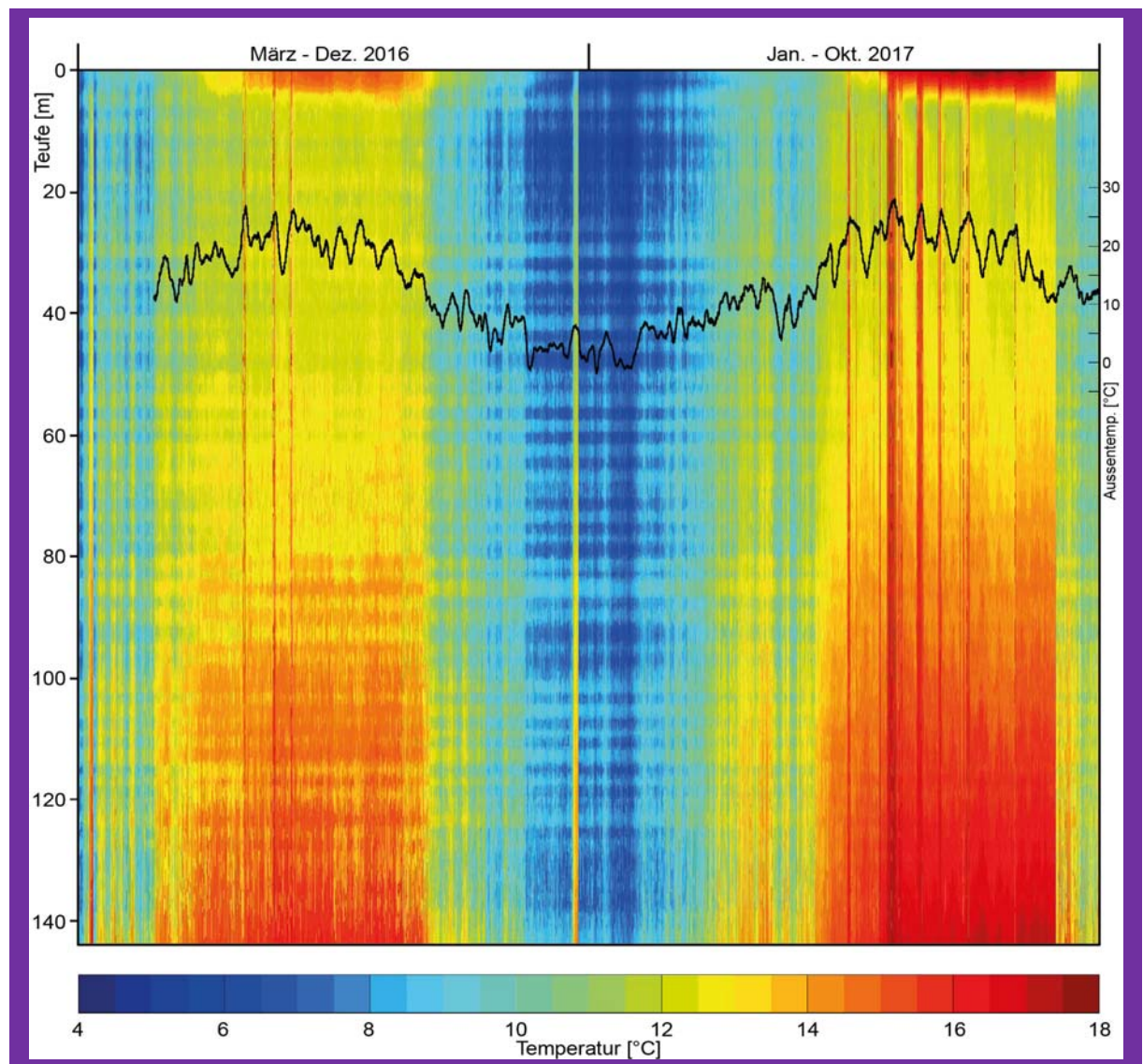




Schlussbericht

4D-Temperaturmessungen in EWS

Saisonales und räumliches Temperatur-Monitoring in teilregeneriertem Erdwärmesondenfeld in Lausen





Datum: 10.11.2017 (Anpassungen am 01.05.2018 und 08.10.2018)

Ort: Liestal

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Geo Explorers AG, CH-4410 Liestal

Auftragnehmer/in:

Geo Explorers AG
Wasserturmplatz 1, CH-4410 Liestal
www.geo-ex.ch

Autor/in:

Andreas Ebert, Geo Explorers AG, andreas.ebert@geo-ex.ch

BFE-Bereichsleitung: Gunter Siddiqi, gunter.siddiqi@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Céline Weber, cweber@focus-e.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501117-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

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 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. Mit Hilfe einer Kernbohrung und verschiedensten Bohrloch-geophysikalischen Messungen wurde der Aufbau des Untergrundes detailliert untersucht.

Nach 1.5 Jahren Messzeit wurden folgende erste Erkenntnisse gesammelt:

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 wird erhofft, dass die Laufzeiten der Wärmepumpe, sowie das Freecooling nun weiter optimiert werden. 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 von einem Tag.

Die Messungen laufen noch mind. 3 weitere Jahre. Damit sollen z.B. die gegenseitige Beeinflussung der EWS, die Ausbreitung der Kältefahne um die EWS und der langfristige Einfluss der Regeneration quantifiziert werden.

Résumé

Il y a deux immeubles collectifs neufs à Lausen, près de Liestal, qui sont chauffés depuis 2016 chacun avec une pompe à chaleur. Chaque immeuble est raccordé à trois sondes géothermiques de 145m. Les sondes sont régénérées grâce au système *freecooling*. Les températures du sous-sol d'un immeuble sont mesurées dans les trois sondes géothermiques ainsi que dans une sonde de mesure, thermiquement inactive, grâce à des fibres optiques. La sonde inactive se situe à 3 mètres de la sonde active la plus proche. Avec un carottage et différents mesures géophysiques, on a étudié la structure détaillée du sous-sol.

Après un an et demi de mesures, les résultats suivants ont pu être constatés : Le taux d'injection de chaleur dans le sol, réalisée grâce au *freecooling*, était clairement plus bas qu'attendu. Même après une régulation améliorée du système, des valeurs d'environ 5% seulement ont été atteintes. Les mesures ont montré que même en janvier 2017, où il a fait très froid, la pompe à chaleur n'était jamais active durant plus de 12 heures au total par jour, et qu'à chaque fois elle s'enclenchait pour des très courtes durées. Le mode de fonctionnement de la pompe à chaleur doit encore être optimisé, dans le but d'obtenir un fonctionnement plus régulier. La régulation du freecooling doit également encore être améliorée, afin d'obtenir un taux de recharge plus élevé. La température autour de la sonde géothermique, qui a atteint une température minimale de 5°C durant le premier hiver, a presque totalement retrouvé sa valeur initiale l'hiver suivant, suggérant que le sol a pu se régénérer presque complètement. Il semblerait que le secteur froid autour de la sonde active a provoqué une réduction de la température d'environ 0.5°C au niveau de la sonde de mesure (sonde inactive thermiquement). Mis à part le fait que le sous-sol se refroidit sur le long terme, le secteur proche de la sonde atteint très souvent son état quasi initial en l'espace d'un jour, après une phase d'injection de chaleur (freecooling), respectivement de prélèvement de chaleur, de plusieurs jours.



Des mesures seront encore effectuées pendant au moins trois ans. De ce fait, plusieurs paramètres pourront être étudiés comme par exemple: l'influence des sondes les unes sur les autres, l'étendue de la zone d'incidence autour des sondes ainsi que l'influence à long terme de la récupération de chaleur.

Summary

Two apartment buildings in Lausen are heated by two earth-source heat pumps since 2016. Every single heat pump is connected to three 145 m-deep geothermal probes. Each probe is regenerated through a Freecooling system. Thanks to fiber optic technology, the underground temperature has been measured in three probes and in an additional measurement probe. The latter is 3m away from one of the other probe. The detailed structure of the underground has been accurately investigated with the help of a core drilling and several geophysical measurements.

After a period of 1.5 years, the following results have been collected:

The Freecooling-induced heat input was significant lower than predicted and gained relevant values of 5% in the first place through subsequent optimal system adjustments. The measurements showed, that even in very cold January 2017, the heat pump was not operating more than 12 hours a day and only activated in short-term cycles. Due to subsequent adjustments the heat pump-terms as well as Freecooling are now expected to be further optimized. The annulus temperatures around the probes, which reached a minimum of 5°C in the first winter, recovered almost completely by the following winter season. It seems that the colder surrounding zone of the geothermal probe induced a temperature decrease of 0.5°C in the adjacent measurement probe. Apart from the long-term cooling trend in the ground around the probe, the close range resp. the annulus recovers after phases of several days lasting heat input (Freecooling) resp. heat extraction (heating) mostly in one day.

Measurements will still be taken for, at least, the next three years. Therefore, several parameters such as mutual influence of the geothermal probes, the spreading of the cool zone surrounding the probes and the long-term influence of heat input will be investigated.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Ziele des Projekts	6
1.3 Aufbau Bericht	7
2 Grundlagen	8
2.1 Standort	8
2.2 Geologie und Strukturen	9
2.3 Bohr- und Ausbaudaten	12
2.4 Logging Daten	17
2.5 Hydraulische Bohrlochversuche	18
2.6 Geothermal Response Tests	19
2.6.1 TRT	19
2.6.2 E-TRT	23
2.7 Qualitätsmessungen in den EWS	24
2.8 Bohrlochverlaufsmessungen	25
2.9 Heizungsanlage	29
2.9.1 Systembeschreibung	29
2.9.2 Technische Anpassungen seit Inbetriebnahme	35
2.9.3 Betriebsverhalten Wärmepumpensystem	37
2.10 Simulation / Dimensionierung der EWS	39
3 Langzeit Temperatur-Messungen um EWS	42
3.1 Fragestellung und Ziele	42
3.2 Installation / Messablauf	43
3.3 Theorie Temperaturermittlung mittels Lichtwellenleiter	43
3.4 Rohdaten	43
3.5 Energie- und Wärmepumpendaten	46
3.6 Resultate und Interpretation	52
3.6.1 Einleitung	52
3.6.2 Langfristige Temperaturentwicklung	52
3.6.3 Kurzfristige Temperaturentwicklung	62
4 Schlussfolgerungen und Fazit	65
5 Ausblick	68
6 Danksagungen	68
7 Referenzen	69



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Nutzung von Wärme aus dem Untergrund und saisonale Wärmespeicherung in Erdwärmesondenfeldern substituiert fossile Brennstoffe für Raumwärme. Der Wärmeentzug aus und die Wärmespeicherung in Erdwärmesondenfeldern kann modelliert und die Leistung an der Oberfläche gemessen werden. Tatsächliche Messungen der räumlichen und saisonalen Temperaturveränderungen in Abhängigkeit von Tiefe, Geologie und Entzug bzw. Regeneration fehlen jedoch. Mittels faseroptischer Messung in einer Erdwärmesonden-Gruppe und einer Kontrollbohrung wurde mit vorliegendem Projekt eine Referenz geschaffen.

Im November 2014 bewilligte das Bundesamt für Energie die Teilfinanzierung für das Forschungsprojekt „GEO4DT Lausen; Saisonales und räumliches Temperatur-Monitoring in teilregeneriertem Erdwärmesondenfeld“ mit Gesuch um Finanzbeitrag vom September 2014. Nach Bauverzögerungen wurden im Sommer 2015 bis Frühjahr 2016 zwei neue Mehrfamilienhäuser im Minergie-Standard auf der Parzelle 244 in Lausen (Kanton Baselland) gebaut. Die Vorsorgestiftung Häring war Bauherr der EWS. Für die Gebäudeheizung wurden für jedes Gebäude 3 Erdwärmesonden erstellt. Die Firma Geo Explorers als Teilfinanzierer des Forschungsprojekts wurde von der Vorsorgestiftung Häring mit der geologischen Begleitung und Dimensionierung der EWS beauftragt und darf weiterhin Daten erheben.

Das Forschungsprojekt untersucht die räumliche und zeitliche Änderung der Temperaturverteilung einer Erdwärmesonden-Gruppe (3 Sonden und 1 inaktive Messsonde). Dafür wurden die Erdwärmesonden mit einem Glasfaserkabel entlang der Sondenrohre zur Temperaturüberwachung mittels „Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing“ ausgestattet.

Des Weiteren wurde für detaillierte hydrogeologische und geochemische Untersuchungen am verwitterten Opalinuston eine Kernbohrung erstellt. Mit dem Ziel zusätzliche Geosphären-Parameter (z.B. zu Dekompaktion und Redox-Verhältnissen) im Zusammenhang mit der Langzeitentwicklung eines geologischen Tiefenlagers zu erheben, entschloss sich die Nagra im August 2015, Untersuchungen im Bohrloch und an Bohrkernen in dieser Kernbohrung durchzuführen. Geo Explorers wickelte die Bohrung und die Messungen als Generalunternehmer für die Nagra ab.

Die Kernbohrung wurde anschliessend als funktionstüchtige EWS und ebenfalls mit einem Glasfaserkabel ausgebaut. Diese EWS ist nicht an das Heizsystem angeschlossen, sondern wird als Messsonde genutzt. Sie befindet sich im Nahbereich einer sich in Betrieb befindenden EWS.

Des Weiteren wurden verschiedenste Messungen durchgeführt, wie z.B. geothermal response tests, Vermessungen des räumlichen Verlaufs der EWS, Qualitätsmessungen an den Sonden (z.B. Durchflussmessungen), und geophysikalische Bohrloch-Logging.

1.2 Ziele des Projekts

Das Gesamtprojekt besteht aus verschiedenen Teilprojekten, wie z.B. der Kernbohrung zu Forschungszwecken, dem Erstellen der EWS für den Heizbetrieb, Ausbau der EWS mit Glasfaserkabeln für die langfristige Messung der Untergrundtemperaturen und Messen der Sole- und Wärmepumpendaten, sowie diversen Qualitäts- und Untergrundmessungen im Bohrloch und in den EWS.

Entsprechend sollen mehrere Fragestellungen geklärt werden. Zum einen sollte mit der Kernbohrung und den dazugehörigen Bohrloch-geophysikalischen Messungen die Geologie und Grundwasserfluss detailliert untersucht werden. Diese Daten dienen somit auch als wichtige



Grundlagendaten für die Interpretation der dreidimensionalen Entwicklung der Untergrundtemperaturen um Erdwärmesonden, welche im vorliegenden Bericht beschrieben werden.

Die wichtigsten Ziele des vorliegenden Projekts (4D-Temperaturmessungen) sind:

Mit echten Messdaten soll das Verständnis des gesamten Wärmesystems (Heizung, Wärmepumpe, Untergrund, Regeneration) besser verstanden werden und die üblichen Simulationen und Planungswerte verifiziert werden. Bis anhin gibt es kein öffentliches Projekt mit solch umfangreichen und langfristigen Messungen inkl. entsprechenden Grundlagendaten. Unter anderem sollen folgende bisher offene Fragen mit den Messdaten beantwortet werden: Wie entwickelt sich die Untergrundtemperatur räumlich um eine kleine Erdwärmesonden-Gruppe herum hinsichtlich Wärmeentzug und Regeneration durch Freecooling und zwar kurzfristig und langfristig über Jahre hinweg? Wie funktioniert das Wärmesystem in einem Mehrfamilien-Neubau im Minergie-Standard im Detail, z.B. Betriebszeiten an sehr kalten Wintertagen und Wärmeeintrag im Sommer? Wie unterscheidet sich die Planung zur Realität? Wie relevant ist die Regeneration durch Freecooling tatsächlich? Wie und in welchem Ausmass beeinflussen sich die Erdwärmesonden gegenseitig? Wie breitet sich die Kältefront um eine aktive Sonde aus und wie weit reicht diese? Haben geologische Variationen inkl. Grundwasser einen Einfluss auf die Entwicklung der Untergrundtemperatur? Wie gross ist der Einfluss der Regeneration durch den solaren Eintrag von der Oberfläche her?

Mit den finalen Erkenntnissen nach Abschluss des Projekts nach weiteren Messjahren soll das gesamte Wärmesystem inkl. Untergrund und gegenseitiger Beeinflussung der EWS besser verstanden werden. Wir hoffen, dass mit den endgültigen Erkenntnissen eine auf Messdaten beruhende Grundlage geschaffen werden kann, welche eine Dimensionierung und korrekte Einstellung von EWS und Wärmepumpen erlaubt, welche mehr der Realität entspricht. Auf Grund der zunehmenden Dichte von Erdwärmesonden soll mit den 4D-Temperatur-Messdaten ein wichtiger Datensatz erbracht werden, welcher die tatsächliche Beeinflussung von benachbarten Erdwärmesonden aufzeigt. Dies ist in Hinblick einer nachhaltigen, langfristigen, schadensfreien aber auch wirtschaftlichen Nutzung der Untergrundenergie, auch in Hinblick auf die Energiestrategie 2050 von Bedeutung. Jeglicher Schaden durch Vereisen auf Grund von einer unzureichenden Dimensionierung oder Nichtbeachtung von Nachbarsonden schadet der Erdwärmesonden-Branche. Ebenso ist es wichtig, dass auf Grund der grösseren Anfangsinvestitionen durch die Bohrungen nur so grosse Anlagen erstellt werden, wie es wirklich braucht. Jede Überdimensionierung macht die Erdwärmesonden wirtschaftlich gesehen weniger konkurrenzfähig gegenüber anderen Wärmesystemen, obwohl sie bzgl. der Energiestrategie 2050 auf Grund des geringen Verbrauchs von Primärenergie einen wichtigen Pfeiler darstellen.

1.3 Aufbau Bericht

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen aufgezeigt. Diese sind der Aufbau des Untergrundes mit entsprechenden Messungen, der Ausbau der Bohrungen mit Messungen in den Erdwärmesonden und der Beschrieb des Heizsystems inklusive Planerdaten. Im Kapitel 3 werden die Ergebnisse der gemessenen Untergrundtemperaturen gezeigt und mit den aufgezeichneten Daten des Wärmesystems verglichen und interpretiert. Anschliessend folgen im Kapitel 4 die ersten Schlussfolgerungen.



2 Grundlagen

2.1 Standort

Der Projektstandort Lausen liegt im Ergolzthal im Baselland in Lausen bei Liestal.

Koordinaten: 2'624'157 / 1'257'719 (Koordinaten der Kernbohrung / Messsonde)

Höhe über Meer: 345 m

Parzellen-Nr.: 244

Adresse: Industriestrasse 19 und 20, Lausen

Grundeigentümer: Vorsorgestiftung Häring & Co. AG

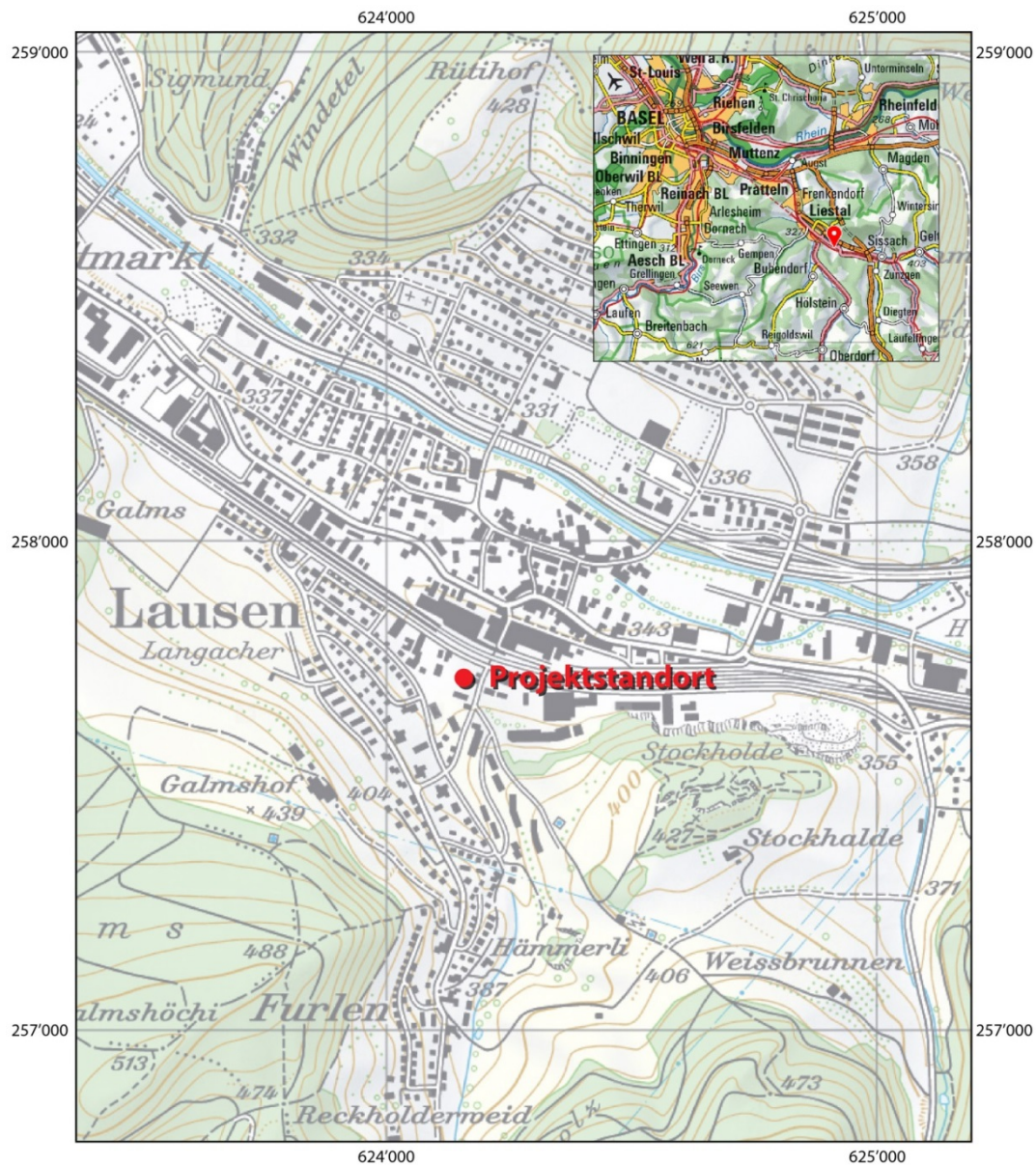


Abb. 1 Karte mit Projektstandort.

2.2 Geologie und Strukturen

Der Standort liegt im Tafeljura. Das Gebiet ist geprägt von NNE-SSW verlaufenden Graben und Horst-Strukturen. Der Standort der Kernbohrung liegt auf einer ca. 1 km breiten Horst-Struktur. Am Standort im Ergolzthal stehen unter einer mehreren Meter mächtigen quartären Lockergesteinsschicht der Opalinuston an. Der Opalinuston hat eine Gesamtmächtigkeit von ca. 140 m. Am Bohrstandort stehen noch ca. 70 m Opalinuston an. Die Schichten liegen im Nahbereich der Bohrung in ungestörter subhorizontaler Lagerung. Gemäss geologischer Karte und umliegender Bohrungen liegen die Schichten im Ergolzthal nahezu horizontal und fallen südlich des Bohrstandorts am Galms gegen Süden ein. Das Querprofil entlang der Horst-Struktur in Abb. 2 zeigt den Verlauf der Schichten am Bohrstandort.

Basierend auf den Kernen wurde die in Tab. 1 zusammengefasste litho-stratigraphische Unterteilung gemacht. Als neue Erkenntnisse können der tiefgründig verwitterte bzw. stark geklüftete und wasserführende verwitterte Opalinuston, die quarzreichen Sandsteinvorkommen im unteren Opalinuston, sowie die reichlich vorkommenden Gips-Anhydrit-Knollen bzw. -Adern im unteren Bereich der Klettgau-Fm. genannt werden.

Im Zusammenhang mit der Kernbohrung und verschiedenen Messungen wurden die Gesteinsparameter und der strukturelle Aufbau des Untergrunds ermittelt. Die für diesen Bericht wichtigsten Gesteinsparameter sind die Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Schichten, die Klüftigkeit und der daraus resultierende Grundwasserfluss (siehe nachfolgende Kapitel). Für Detailangaben wird auf den Arbeitsbericht NAB 15-10 „Kernbohrung Lausen: Geologische, hydrogeologische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht)“ vom April 2016 der Nagra verwiesen.

Es wurden 360 natürliche Strukturen in den Bohrkernen identifiziert. Diese sind u.a. Rutschharnische, Störzonen, Klüfte und Adern. Struktureiche Zonen können Indizien für einen verstärkten Grundwasserfluss sein. Es wurden mehrere struktureiche Zonen ausgeschieden. Auf Grund der Verwitterung und Dekompaktion ist der Opalinuston am Top reich an Klüften, was sich auch in sichtbaren Wasserzutritten in die Kernbohrung geäussert hat. Eine weitere Zone mit einigen Rutschharnischen findet sich an der Basis vom Opalinuston. Allerdings handelt es sich um dichte und geschlossene Strukturen. Die kompetenten Kalkschichten des unteren Lias sind durchzogen von mehreren Haarrissen, die ebenfalls geschlossen sind. Der Keuper ist gesamthaft sehr struktureich. Bis ca. 132 m Bohrtiefe dominieren die Rutschharnische, Störzonen und Stylolithen. Ab ca. 132 m Bohrtiefe liegen viele Haarrisse und Adern aus Sulfat (häufig Fasergips) vor. Die Schichtflächen liegen nahezu horizontal.

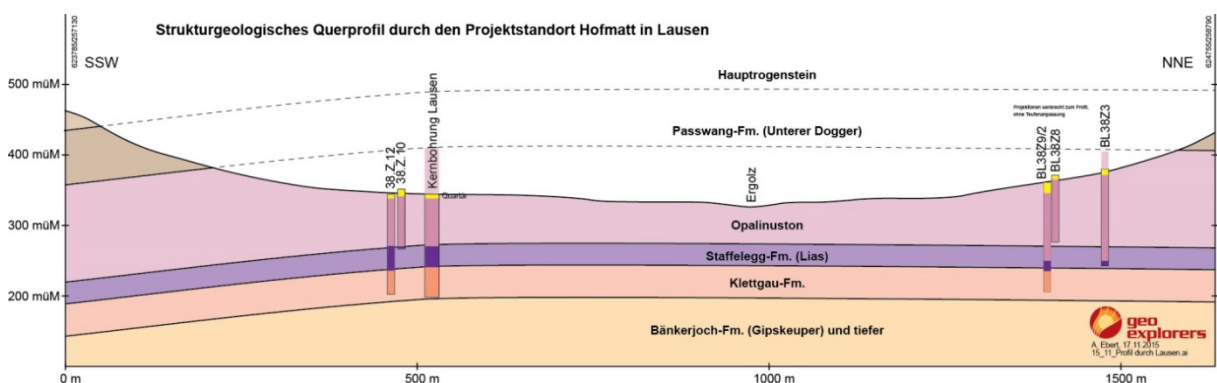
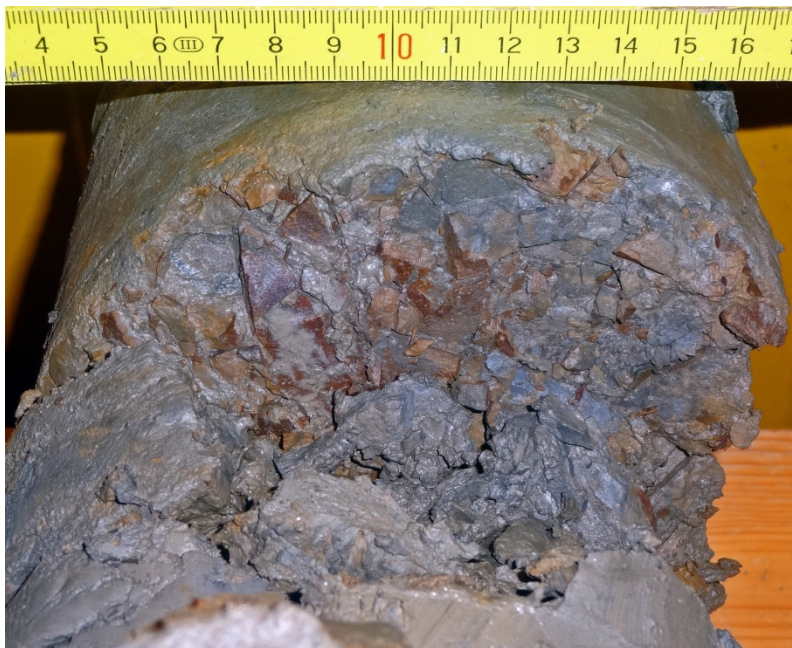


Abb. 2 Geologisches Querprofil durch den Projektstandort

NNE-SSW streichendes strukturgeologisches Querprofil. Am Projektstandort wurde der Opalinuston, die Staffelegg-Fm. und die Klettgau-Fm. durchbohrt.

**Tab. 1 Lithostratigraphie der Kernbohrung**

Stratigraphie	Teufe	Lithologie
Quartär	0 – 6.2 m	Brauner Lehm mit Gehängeschutt aus Kalksteinen
Opalinuston	6.2 – 71.3 m	dunkelgraue, homogene, siltige, z.T. kalkige, Glimmer reiche Tonsteine 6.2 - 18.0 m: verwittert (braun verfärbt, z.T. stark geklüftet bis brekziös) 31 - 62 m: bes. reich an mm-mächtigen hellgrauen kalkigen quarzreichen Silt- bis Feinstandsteinlaminae oder -linsen ab 65 m: viele kleine Muschelschalen auf Schichtflächen
Staffelegg-Fm. (Lias)	71.3 – 104.8 m	71.3 - 79.1 m: dunkelgraue Mergel mit grauen biodetriusreichen Kalklagen, sowie zahlreichen Belemniten (Grünschholz- bis Gross Wolf-Mb) 79.1 - 100.5 m: dunkelgraue, homogene, tonige, kalkige Silt- bis Feinsandsteine und siltige Tonsteine mit Glimmer (Frick-Mb. bzw. Obtusus-Schichten) 100.5 - 104.8 m: graue biodetriusreiche z.T. mergelige Kalksteine (Beggingen-Mb. bzw. Arietenkalk)
Klettgau-Fm. (Keuper)	104.8 – 146.5 m	104.8 - 134.3 m: graue, grünliche und rötliche dolomitische, z.T. siltige und laminierte Tonmergel und Tonsteine, in oberer Hälfte häufig brekziös, in unterer Hälfte mit Gips-Anhydrit-Knollen und Fasergipsadern (Gruhalde-Mb. bzw. Knollenmergel u. Ob. Bunte Mergel) 134.3 - 143.6 m: beige bis rötlich-beige laminierte Dolomite und rötliche Tonsteine und Fasergipsadern (Gansingen Mb.) 143.6 - 146.5 m: bunte siltige Tonsteine und tonige Feinsandsteine (Ergolz-Mb. bzw. Schilfsandstein)

**Abb. 3 Verwitterter Opalinuston**

Stark geklüfteter Opalinuston der Kernbohrung Lausen, Tiefe ca. 10 m.

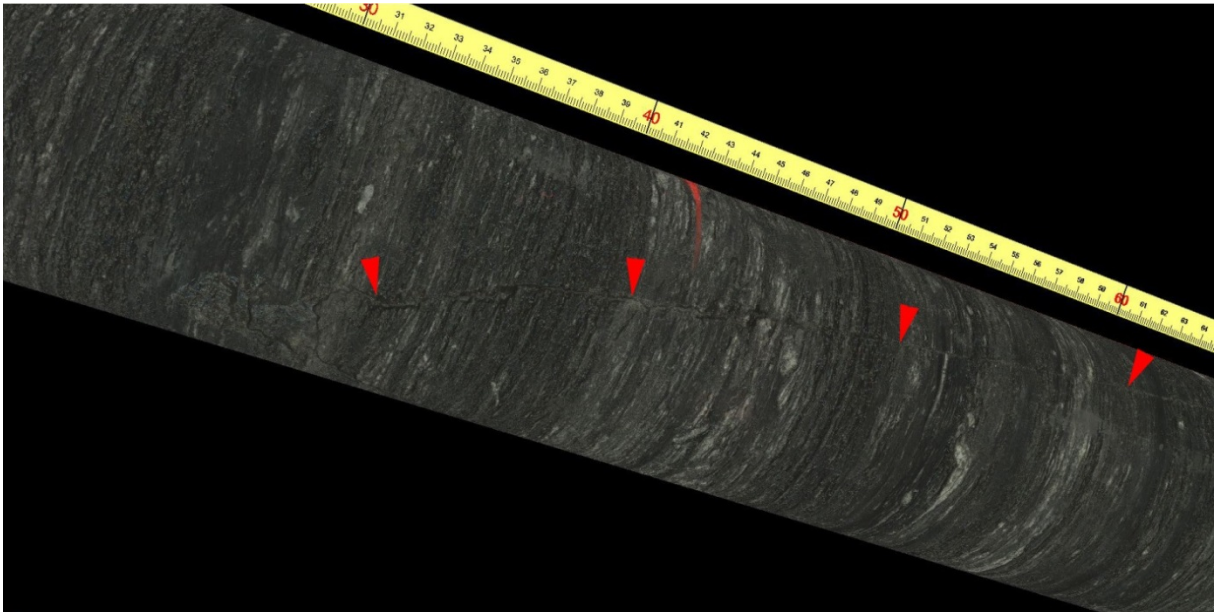


Abb. 4 3D-Kernansicht Opalinuston

Typischer Opalinuston mit hellgrauen Sandsteinlaminae und -linsen der Kernbohrung Lausen, Tiefe ca. 55.50 m. Zudem ist eine Verschiebungsfläche zu erkennen (rote Pfeile).

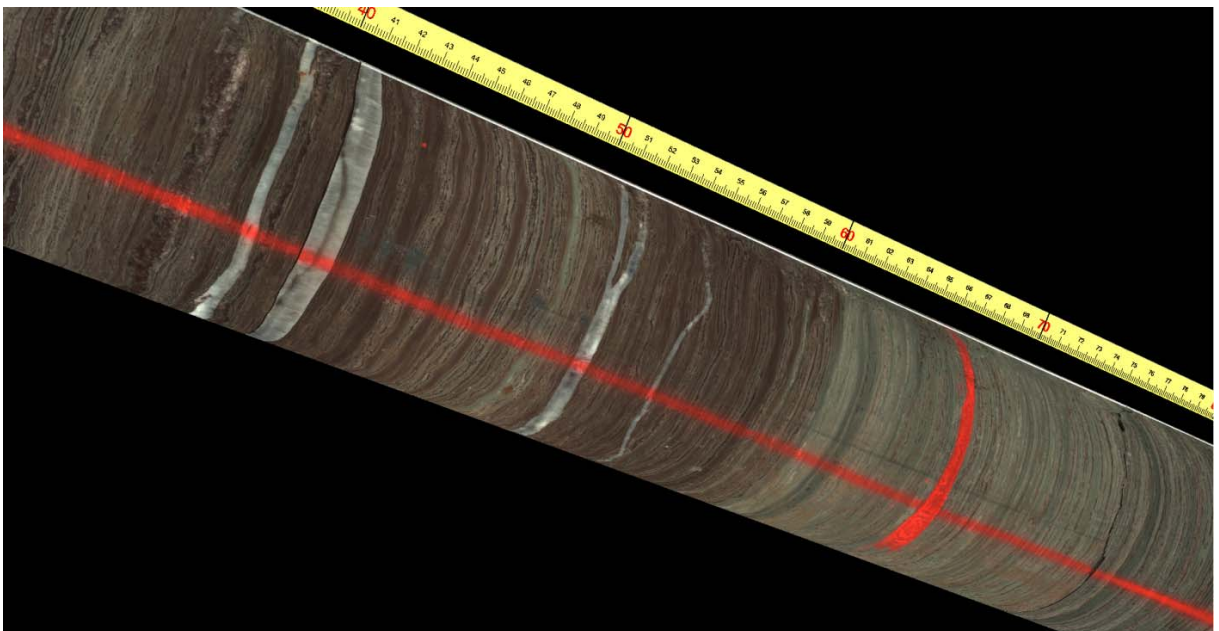


Abb. 5 3D-Kernansicht Keuper

Schichtung und weisse horizontale Fasergips-Adern im bunten Gansingen Mb., Tiefe ca. 136.50 m

2.3 Bohr- und Ausbaudaten

Es wurden 2x3 Erdwärmesonden + eine Messsonde für zwei neue Mehrfamilienhäuser (MFH) erstellt (Anordnung siehe Abb. 6 und Abb. 7). Haus A und Haus B werden mit je einer Wärmepumpe von CTA, Typ Optiheat OH 1-25e mit einer Heizleistung von 24.6 kW beheizt (Tab. 2). Die drei Erdwärmesonden-Bohrungen für das südwestliche Haus B wurden im September 2015 und die drei für das nordöstliche Haus A im November 2015 gebohrt und mit Doppel-U-Sonden ausgebaut. Für jedes MFH wurden je drei Erdwärmesonden à 146 m erstellt, welche zum Heizen und Kühlen (Freecooling, passive Kühlung) eingesetzt werden. Vor dem Haus A (Hausnummer 20) wurde zusätzlich im Oktober 2015 eine 146 m tiefe Kernbohrung abgeteuft, welche ebenfalls als Erdwärmesonde ausgebaut ist und weiterhin über einen Schacht zugänglich ist. Alle anderen EWS sind nicht mehr zugänglich und deren Anschlüsse an die Verbindungsleitungen und die Leitungen selbst liegen ca. 80 cm unter Terrain. Die EWS wurden über einen Verteilschacht an die Wärmepumpe angeschlossen. Alle relevanten Daten zu den Bohrungen und Sonden sind in Tab. 2 dokumentiert. Ein dreidimensionales Blockbild der Sondenanordnung A1-A3, der Kernbohrung und der Geologie ist in Abb. 8 dargestellt.

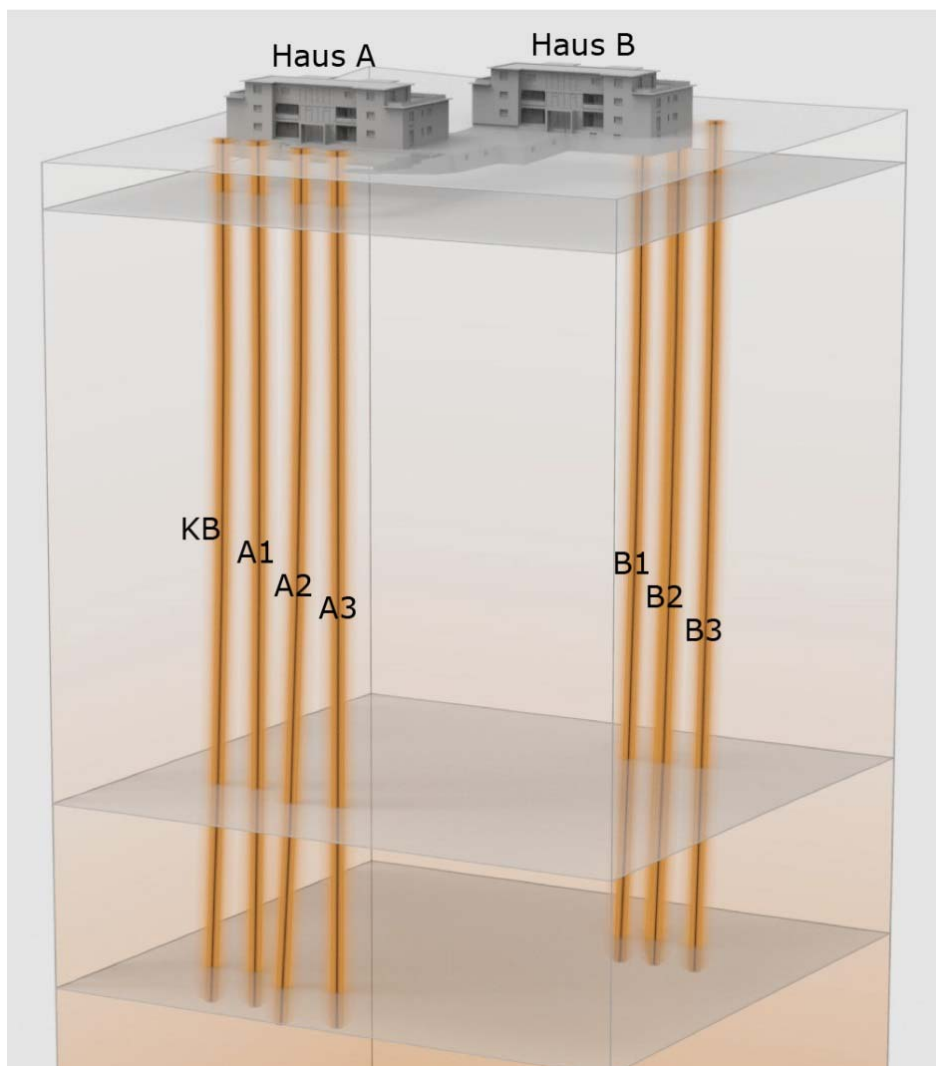


Abb. 6 3D-Schema der erstellten EWS und Messsonde.

Links Haus A mit 3 EWS (A1-A3) und Kernbohrung (KB, Messsonde), rechts Haus B mit 3 EWS.

In den Bohrungen bzw. Sonden wurden verschiedenste Messungen durchgeführt (Tab. 2). Ein Teil dieser Messungen werden im Nachfolgenden beschrieben. Die Messungen und das detaillierte Vorgehen im Zusammenhang mit der Kernbohrung, sowie die geologischen und hydrogeologischen Auswertungen wurden im Detail im NAB 15-10 dokumentiert (Vogt et al., 2016).

Entlang den Sonden A1 bis A3, sowie der Kernbohrung wurde in Schlaufenform an der Aussenwand der Sonden ein Glasfaserkabel von der Geländeoberkante bis zur Endteufe verlegt und einzementiert. Das 1300 m lange Kabel verläuft vom Technikraum zur Sonde A3, weiter zur A2, zur A1 und durch die Kernbohrung und von dieser zurück in den Technikraum. Der Aufbau ist in Abb. 9 schematisch dargestellt. Das Glasfaserkabel besteht aus 4 Fasern vom Typ Multimode. In der Kernbohrung wurde ein Hybridkabel 4Fs bestehend aus einem Kupferkabel zum Heizen und 4 Glasfasern vom gleichen Typ eingebaut. Es kamen 2 Spleissboxen zum Einsatz: Spleissbox bei A3 mit Spleissen zwischen Technikraum und A3, sowie A3 und A2, Spleissbox bei A1 mit Spleissen zwischen A2 und A1, A1 und KB, sowie KB und Technikraum.

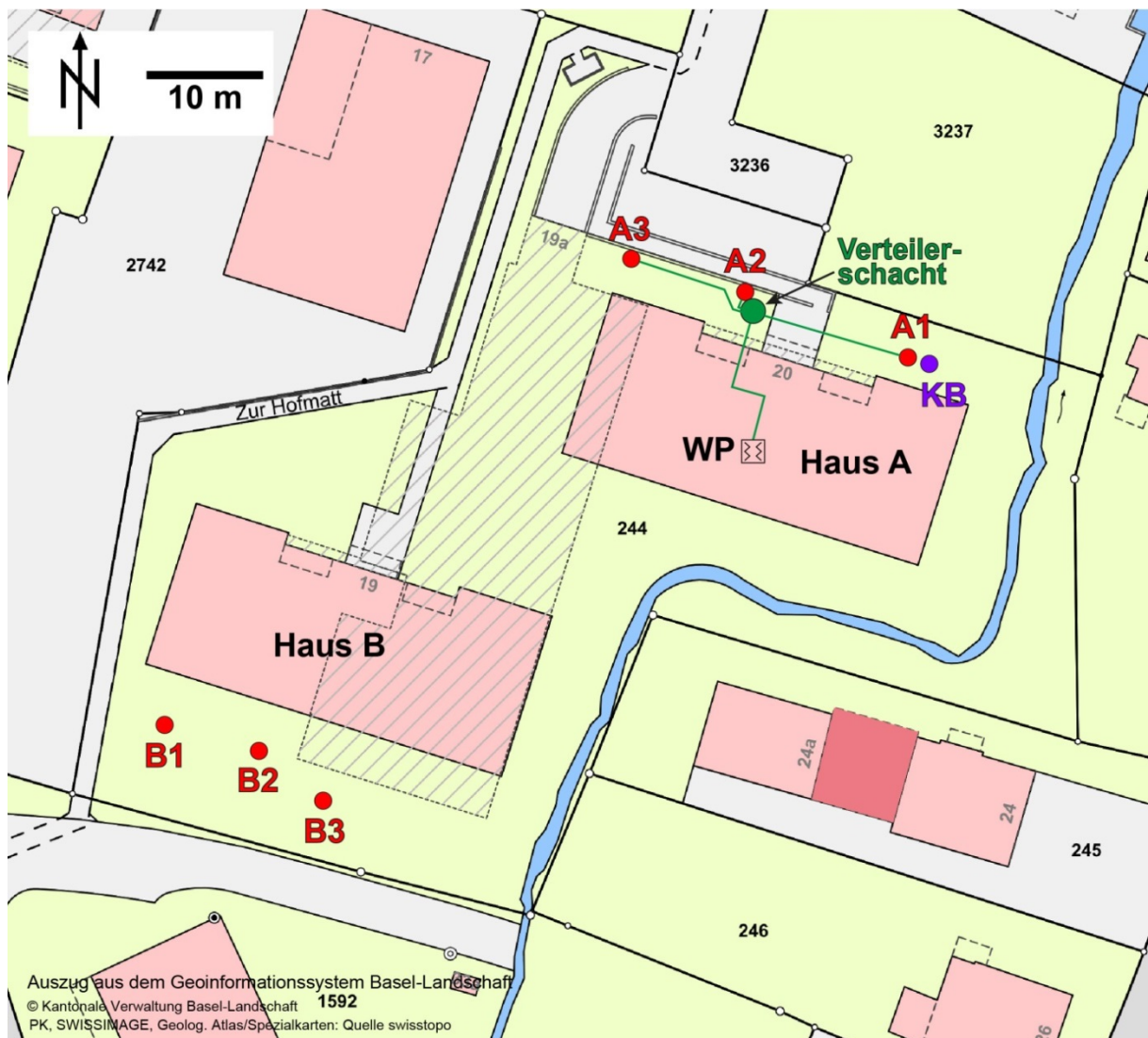


Abb. 7 Situationsplan

Erdwärmesonden A1 bis A3 und B1 bis B3, sowie im Fall Haus A: Verteilerschacht, Wärmepumpe und Zuleitungen in grün, KB = Messsonde in Kernbohrung.



Tab. 2 Ausbau- und Messdaten EWS, Kernbohrung und WP

	Sonden Haus A	Sonden Haus B	Kernbohrung
Allgemeine Daten			
Koordinaten	2'624'155.0 / 1'257'719.7 2'624'141.5 / 1'257'725.4 2'624'131.5 / 1'257'728.0	2'624'091 / 1'257'688 2'624'099 / 1'257'686 2'624'105 / 1'257'681	2'624'157.2 / 1'257'719.1
Höhe über Meer	345 m	345 m	345 m
Daten zu Bohrarbeiten			
Ausführdatum (Bohrarbeiten und Einbau Sonde)	29.10.-09.11.2015	21.09.-28.09.2015	05.10.-28.10.2015
Bohrfirma	EBL Wärmesysteme AG (heute Calodril AG)	EBL Wärmesysteme AG (heute Calodril AG)	Stump Foratec AG (Einbau Sonde durch EBL Wärmesystem AG)
Bohrtiefe	146 m	146 m	146.53 m
Bohrdurchmesser	127 mm	127 mm	146 mm
Bohrverfahren	Destruktiv mit Imlochhammer & Luftspülung	Destruktiv mit Imlochhammer & Luftspülung	Seilkernverfahren CSK 146
Tiefe Schutzverrohrung	14 m	14 m	13 m
Durchmesser Futter-/ Schutzverrohrung	152 mm	152 mm	203 mm (Futterrohr gezogen, Standrohr mit 168 mm einzementiert)
Daten zur Sonde / Ausbau			
EWS-Typ	Doppel-U	Doppel-U	Einfach-U
Hersteller	HakaGerodur	HakaGerodur	HakaGerodur
Typ	GEROthem	GEROthem	GEROthem
Material	PE100-RC	PE100-RC	PE100-RC
Druckbeständigkeit	PN16, SDR11	PN16, SDR11	PN16, SDR11
Durchmesser / Wandstärke	40 / 3.7 mm	40 / 3.7 mm	40 / 3.7 mm
Länge EWS (ohne Schwergewichte)	145 m	145 m	143.45 m
Hinterfüllung	Zeo-Therm 2.0 von Küchler (thermisch verbessert)	Zeo-Therm 2.0 von Küchler (thermisch verbessert)	Zeo-Therm 2.0 von Küchler (thermisch verbessert)



Sondenfluid	Antifrogen N 25%	Antifrogen N 25%	Wasser gefüllt
Leitungsführung	Zuleitungen zum Schacht 50mm, 1 m tief in Sandbett verlegt, Hauptleitung zur WP 90mm	Wie Haus A	Nicht angeschlossen, Sondenrohre für Messungen zugänglich
Sammel- Verteilerschacht	Verteilerschacht von Terra Calidus GmbH, midi 3*40 D 03, Abgänge Dim40 mit DFM Anschlussstutzen, aussen 50mm	Wie Haus A	Nicht angeschlossen
Ausbau mit Glasfaser- / Hybridkabel	Alle (Glasfaserkabel)	Nein	Ja (Hybridkabel)
Typ Glasfaserkabel	Multimode, 4 Fasern		Hybrid 4Fs
Lage des Glasfaserkabels	Aussen am Sondenrohr		Aussen am Sondenrohr
Faser-/Mantel-Durchmesser	50 / 125 µm		50 / 125 µm
Wärmepumpen (Details siehe Kapitel 2.9)			
Inbetriebnahme	März 2016	März 2016	Nicht in Betrieb
Hersteller	CTA	CTA	
Fluid	Sole-Wasser	Sole-Wasser	
Typ	Optiheat OH 1-25e	Optiheat OH 1-25e	
Heizleistung B0/W35	24.6 kW	24.6 kW	
Messungen / Detailauswertungen			
GRT (durch Geo Explorers AG)	In A1 am 19.-23.11.2015	Kein TRT	ETRT 08.-11.12.2015
Geophysikalisches Logging durch BLM GmbH (u.a. Kaliper, Sal/Temp, GammaRay, el. Widerstand, Sonic, Acoustic Borehole Image)	In A2 am 04.11.2015	In B2 am 23.09.2015	Am 28.10.2015
Räumlicher Verlauf (durch Geo Explorers AG)	Nov. 2015	Nov. 2015	Nov. 2015
Druck- und Durchflussprüfung (durch Geo Explorers AG)	Nov. 2015	Okt. 2015	
Hydraulische Tests			Packer-Pumpversuche, Packer-Slug-Tests, Packer-Pulse-Tests durch Nagra & HPC Ag



Hydraulische Durchlässigkeiten			Bis 30 m Tiefe: 10^{-8} bis 10^{-4} m/s Tiefer 30 m: 10^{-12} – 10^{-13} m/s
Grundwasseranalysen			Entnommen & analysiert durch Nagra &
Strukturgeologische Aufnahme			Am Kern & mit Hilfe von Kernscans von Geo Explorers AG
Lithostratigraphische Aufnahme		An cuttings der B2 durch Hansruedi Bläsi, Institut f. Geologie, Uni Bern	Am Kern durch Hansruedi Bläsi, Institut f. Geologie, Uni Bern

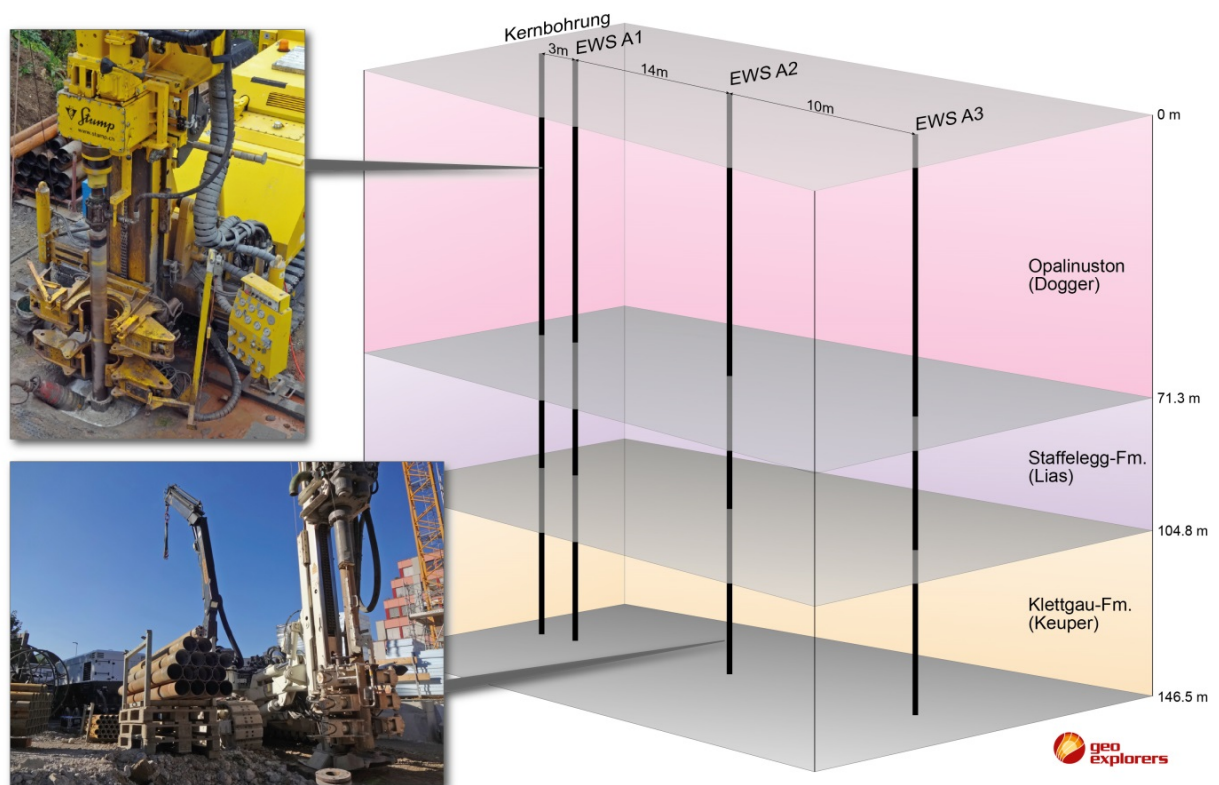


Abb. 8 Blockdiagramm der Sonden A1-A3 und Kernbohrung

Foto links oben: Kernbohrung und links unten: Erdwärmesondenbohrung.

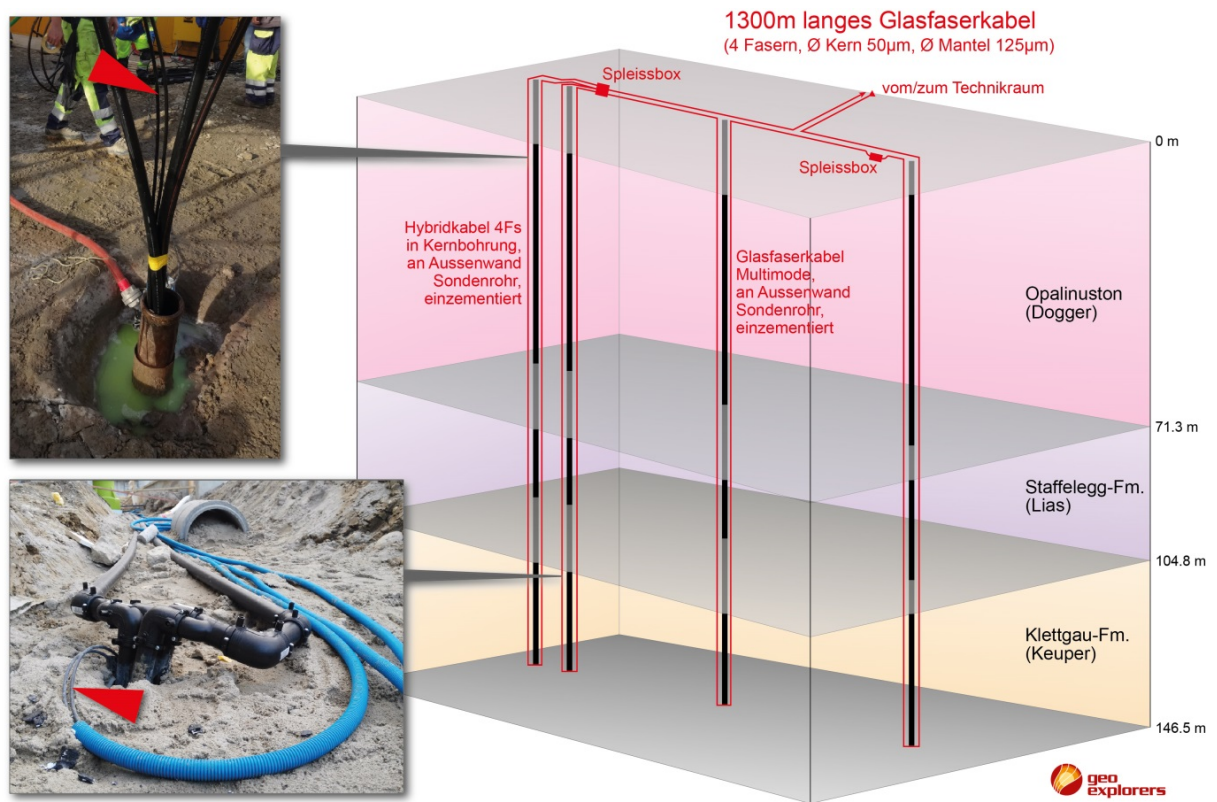


Abb. 9 Ausbau mit Glasfaserkabel (rote Pfeile und Linie)

2.4 Logging Daten

Im Zusammenhang mit den Untersuchungen der Nagra wurden in der Kernbohrung und in den EWS B1 und A2 verschiedene bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt. Für Detailangaben wird auf den Arbeitsbericht NAB 15-10 (Vogt et al., 2016) verwiesen.

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Kaliper für die Bohrlochgeometrie
- Salinität und Temperatur für die Bestimmung von Zu- und Abflüssen und dem Temperatur-Tiefenprofil
- Gamma Ray und elektrische Leitfähigkeit für die Definition von Sedimentschichten bzw. Tongehalt und Porosität bzw. Permeabilität
- Gamma Ray und Full Wave Sonic Log für die Bestimmung von geomechanischen Gesteinsparametern
- Gamma Ray und Acoustic Borehole Image für die Abbildung von Strukturen im Bohrloch



Abb. 10 Logging in Kernbohrung

4-Arm-Kaliper Messung in der Kernbohrung

2.5 Hydraulische Bohrlochversuche

Mit den hydraulischen Tests im Rahmen der Untersuchungen der Nagra wurden die Transmissivität, die hydraulische Durchlässigkeit und das hydraulische Potential bestimmt. Auch hier wird auf den Arbeitsbericht NAB 15-10 (Vogt et al., 2016) verwiesen. Zusätzlich werden Erkenntnisse in Vogt et al. 2017 beschrieben.

Es wurden verschiedene hydraulische Packertests und Pumpversuche in unterschiedlichen Tiefen durchgeführt. Diese zeigten, dass die hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-5} m/s im verwitterten oberen Bereich des Opalinustons bis auf 10^{-13} m/s im ungestörten Opalinuston-Fels (tiefer als 28 m) abnimmt. Die Durchlässigkeiten korrelieren mit der unterschiedlichen Dichte der Klüftung im Opalinuston und deren Öffnungszustand, sowie der Grundwasserchemie (Zunahme der Mineralisation und Verweilzeit nach unten). Im oberen geklüfteten durchlässigeren Opalinuston erfolgt ein advektiver Grundwasserfluss entlang den durch die Dekompaktion entstandenen Klüften. Umgekehrt dominiert in den tieferen Bereichen die Diffusion. Zudem konnte gezeigt werden, dass sich der Ruhewasserspiegel von ca. 2 bis 4 m u. GOK im verwitterten Opalinuston auf ca. 52 m u. GOK an der Basis vom Opalinuston ändert. Die abnehmende Potenzialhöhe kann mit dem lokalen Vorfluterniveau des Rheins und dem regionalen Potential des Muschelkalkgrundwasserleiters erklärt werden.



Abb. 11 Packertests in Kernbohrung Lausen

Vorbereitung eines hydraulischen Bohrlochtests.

2.6 Geothermal Response Tests

Der Thermal oder Geothermal Response Test (TRT oder GRT) ist eine Wärmeverlustmessung. Es wird gemessen, wie viel von der bzw. wie schnell die zugeführte Energie/Wärme in den Fels abfließt. Der TRT ist ein in-situ-Test an einer Erdwärmesonde zur Bestimmung des für die Dimensionierung wichtigsten Untergrundparameters, die durchschnittliche effektive Wärmeleitfähigkeit. Des Weiteren können mit einem TRT die Parameter wie ungestörte durchschnittliche Gebirgstemperatur und Bohrlochwiderstand bestimmt werden. Letztere ist aber nur gültig für die Betriebsparameter während den Messungen (z.B. Durchfluss) und berücksichtigt Parameter wie die gegenseitige thermische Beeinflussung von Vor- und Rücklauf.

Am Projektstandort wurden zwei Geothermal Response Tests durchgeführt. Es wurden ein konventioneller TRT und ein E-TRT (enhanced) basierend auf einem kombinierten Heiz- und Glasfaserkabel durchgeführt. Der normale TRT wurde in der EWS A1 und der E-TRT in der Kernbohrung durchgeführt. Beide Messungen werden nachfolgend beschrieben.

2.6.1 TRT

Im Fall eines normalen TRTs werden an die Erdwärmesonde eine Umwälzpumpe mit Heizelement und Temperatursensoren im Vor- und Rücklauf angeschlossen. Zu Beginn wird das Wasser in der Erdwärmesonde über die Umwälzpumpe zirkuliert, bis sich die ungestörte durchschnittliche Gebirgstemperatur eingestellt hat. Danach wird das Heizelement eingeschaltet und je nach Bohrteufe während mehrerer Tage die Vorlauf- und die Rücklauftemperatur des durchfließenden Fluids in der Erdwärmesonde gemessen. Zusammen mit der kontinuierlich gemessenen Heizleistung und dem Durchfluss können auf Basis der Kelvin'schen Linienquellentheorie und dem Superpositionsverfahren (keine konstante Heizleistung) die durchschnittliche effektive Wärmeleitfähigkeit, die effektive

volumetrische Wärmekapazität und der Bohrlochwiderstand bestimmt werden. Für Details zur Messdurchführung und Auswertung wird auf das Buch „Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie (2015). Des Arbeitskreises „Geothermie“ der Fachsektion Hydrogeologie (FH-DGG) und Fachsektion Ingenieurgeologie (FI-DGGT/DGG). Herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften e.V. DGG und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). 290 Seiten“ verwiesen, sowie auf den Bericht „Qualitätssicherung Erdwärmesonden Temperatur-, Verlaufsmessungen und Thermal Response Tests in Erdwärmesonden im Auftrag von EnergieSchweiz (BFE), zu finden auf <http://www.bfe.admin.ch> Thema Geothermie, erschienen am 06.10.2017“.

Der normale TRT wurde vom 19. - 23.11.2015 in der 145 m langen EWS A1 durchgeführt. Die Heizleistung lag bei 7 kW und der Durchfluss bei 1.54 m³/h, beide waren sehr konstant (Abb. 12). Die ungestörte mittlere Untergrundtemperatur lag bei 14.4°C.

Mit Hilfe der Daten aus Abb. 13 wurden die Untergrundparameter bestimmt. Die mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit über das ganze Bohrloch von 145 m liegt bei 2.29 W/(mK). Der Bohrlochwiderstand R_b liegt bei 0.14 mK/W. Die mittlere effektive volumetrische Wärmekapazität liegt bei 2.26 MJ/(m³K). Gemäss SIA 384/6 kann eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von ca. 2 W/(mK) erwartet werden. Der höhere gemessene Wert kann i. W. auf den vergleichsweise hohen Quarzgehalt im Opalinuston zurückgeführt werden.

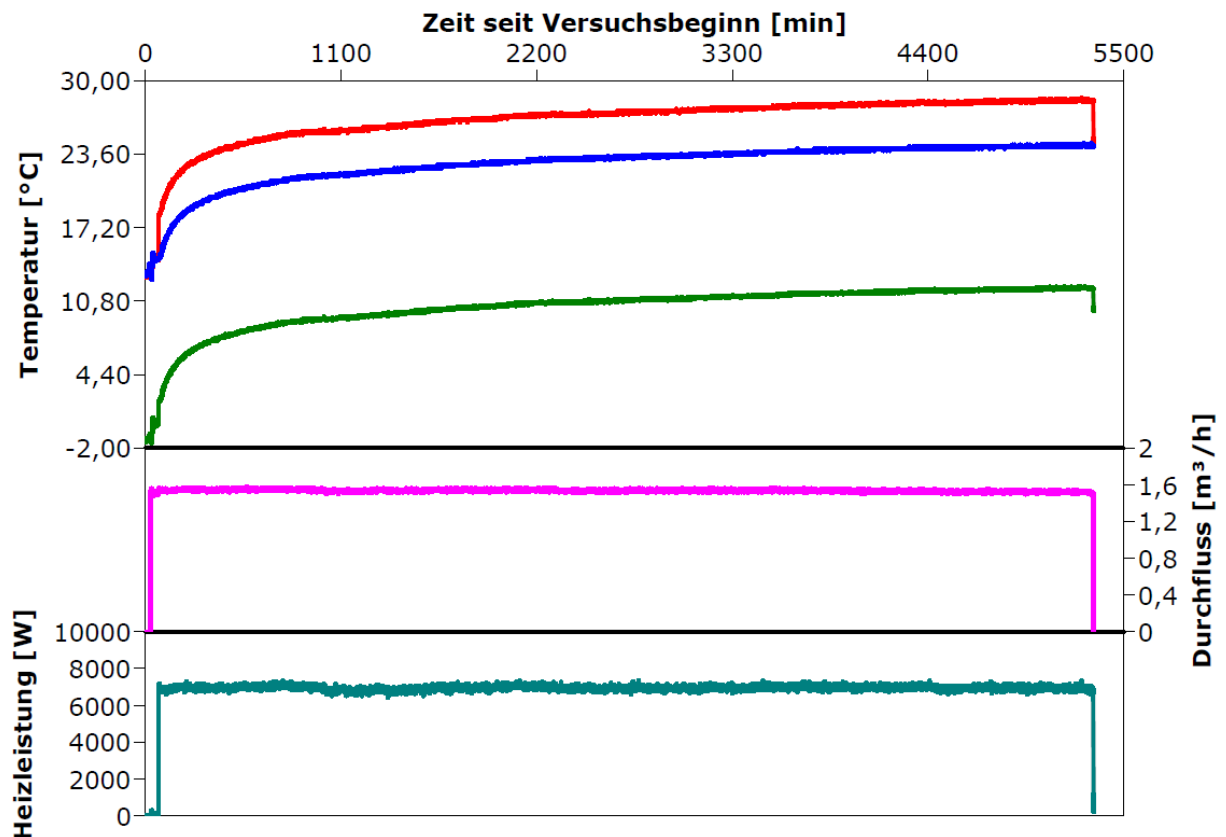


Abb. 12 Daten des TRT

Zeitlicher Verlauf von Vor- und Rücklauf-Temperatur (Rot bzw. Blau) während der Heizphase, sowie in Grün ΔT zwischen Vor- und Rücklauf. In Rosa die zeitliche Entwicklung des Durchflusses durch die Sonde und unten in Blau die Heizleistung in W während des TRTs.

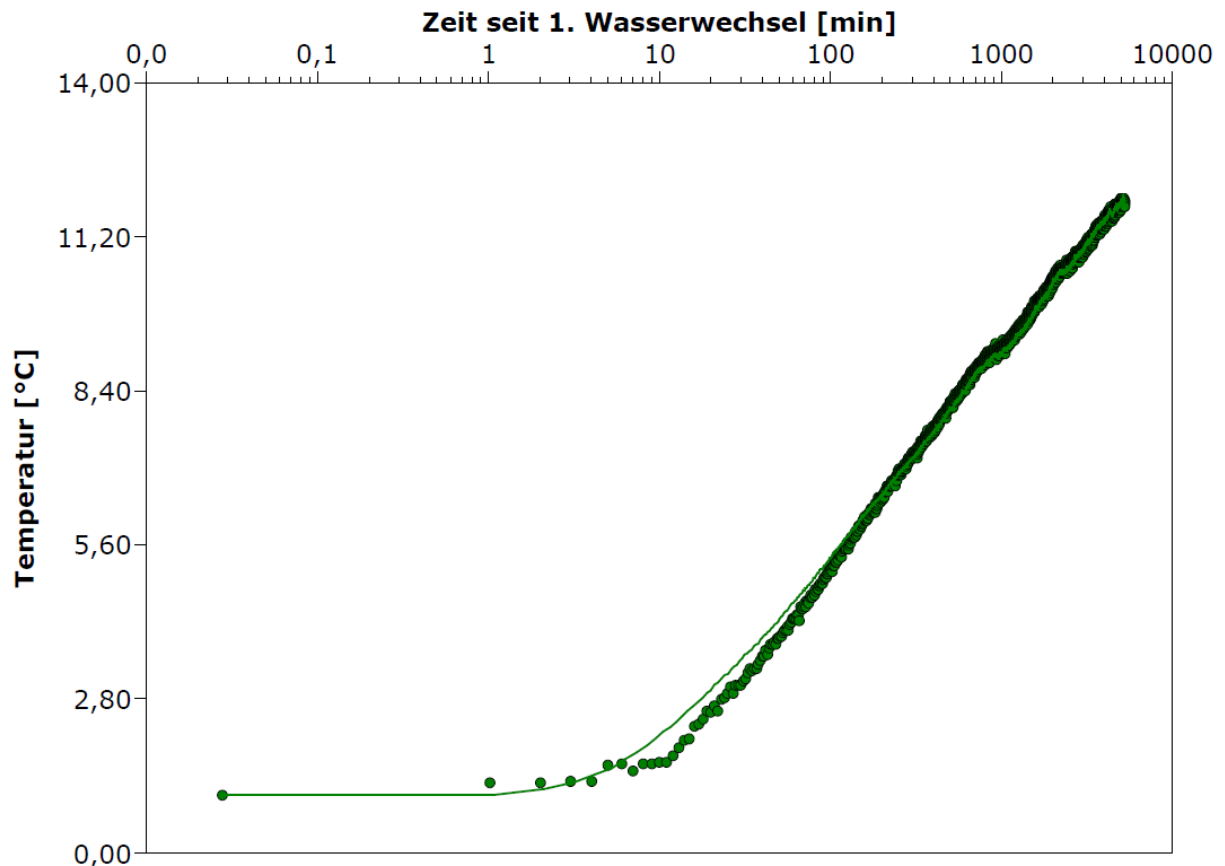


Abb. 13 Temperaturentwicklung während Heizphase

Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgerfluid (= gemittelt aus Einlauf- und Auslauftemperatur) und initialer mittlerer Temperatur des Untergrundes (= gemessene konstante Ruhetemperatur des Fluids während Fluidzirkulation ohne Heizbetrieb, Einlauf- = Auslauftemperatur) als Funktion der Zeit während dem Heizbetrieb. Die grüne Linie zeigt die mit GeoLogik berechnete Annäherung mittels Linienquellentheorie nach Kelvin und zeitgebundener Superposition bei schwankender Heizleistung und Berücksichtigung vom Bohrlochwiderstand. Darauf basierend wurde die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und der Bohrlochwiderstand berechnet.

Der Vergleich der Temperatur-Tiefenprofile vor und kurz nach dem TRT können aufzeigen, ob Schichten mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten u./o. unterschiedlich starken Grundwasserflüssen u./o. Bereiche mit ungenügender Hinterfüllung vorliegen. Unterschiedliche Steigungen im Ruheprofil stehen häufig für Variationen in der Wärmeleitfähigkeit. Eine steilere Datenlinie steht für höhere Wärmeleitfähigkeiten. Aus der Erfahrung her sind häufig Änderungen am Top und an der Basis des Lias zu erkennen. Stärkere Grundwasserflüsse sind oft an Hand von deutlichen Anomalien zu erkennen. Besonders in der Abkühlphase nach dem TRT können solche gut erkannt werden, weil die Wärme schneller abgeführt wird. Hohlräume bzw. unzureichende Hinterfüllungen äussern sich in einem Wärmestau. Im vorliegenden Fall wurden ein Ruhetemperaturprofil vor dem TRT und eines ca. eine halbe Stunde nach dem Beenden des TRTs gemessen (Abb. 14). Ein Grundwassereinfluss ist nur im verwitterten Opalinuston zu erkennen (schnellere Abkühlung nach der Heizphase). Die Detailerkenntnisse sind in der Bildunterschrift der Abb. 14 beschrieben.

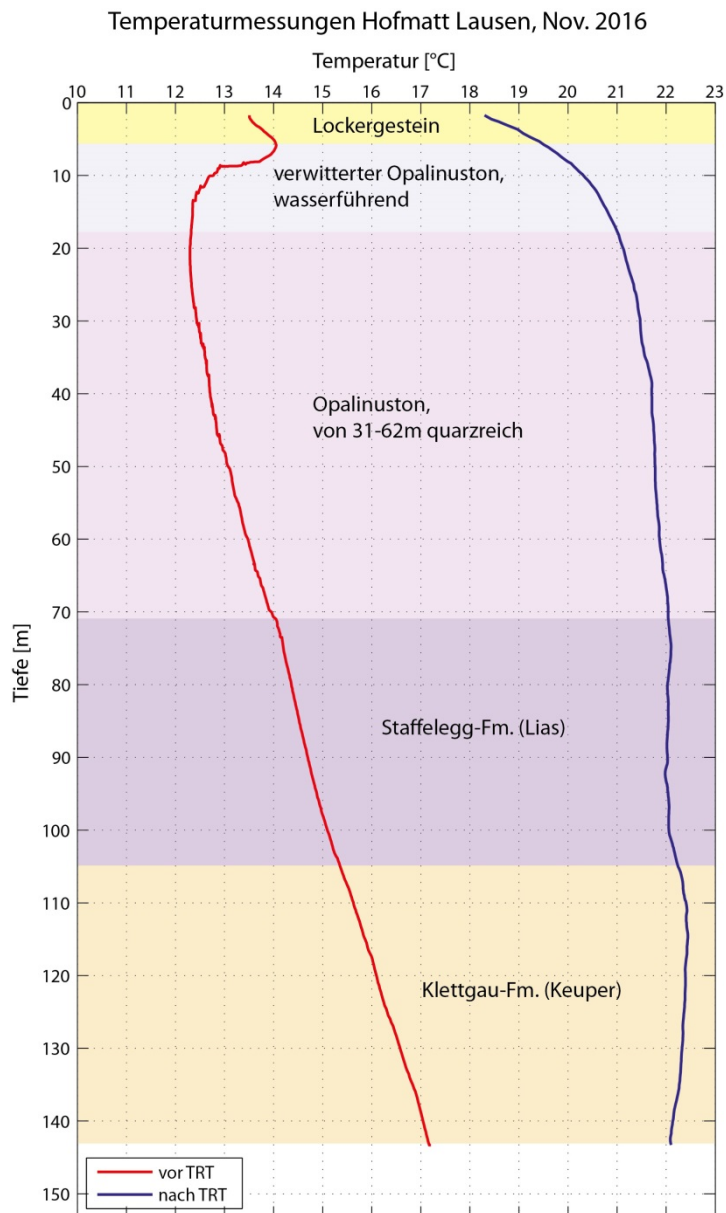


Abb. 14 Temperaturtiefenprofil vor und nach TRT

Die schnellere Abkühlung nach dem TRT im verwitterten Opalinuston (blaue Kurve, Messung ½ Std. nach Ende Heizen bzw. TRT) kann auf das fließende Grundwasser zurückgeführt werden, welches in der Kernbohrung mit deutlichen Zuflüssen ersichtlich war. Die hydraulischen Versuche in der Kernbohrung belegen, dass abgesehen vom oberen Opalinuston die Schichten dicht sind und kein Grundwasser fließt. Die Unterschiede im Temperaturgradient und der Abkühlung können somit nur auf Variationen in der Wärmeleitfähigkeit zurückgeführt werden (Annahme: gleichmässige und vollständige Hinterfüllung). Bis ca. 10m Tiefe sind die Temperaturen jahreszeitlich beeinflusst (Vgl. mit Daten der Langzeitmessungen). Das allmähliche Umbiegen der Temperaturkurve oberhalb 40m kann langfristigen Änderungen des lokalen u./o. globalen Klimas zugeordnet werden (Klimaerwärmung, Änderungen in der Vegetation und Bebauung).

2.6.2 E-TRT

Für den E-TRT wurde ein 308 m langes Glasfaser-Kupfer-Hybridkabel schlaufenartig (2x154 m) zusammen mit dem Sondenrohr im Ringraum der 146 m tiefen Kernbohrung einzementiert. Das Kupferkabel (elektrischer Leiter) dient dabei als Heizelement. Eine konstante Heizleistung von 5000 W wurde auf der gesamten Kupferkabellänge in den Untergrund (und auf der Restkabellänge in die Atmosphäre) eingespeist, was eine längenbezogene Leistung von 32.5 W/m ergibt. Das Glasfaserkabel wird mittels Verbindung an ein Lasergerät angeschlossen, mit welchem von beiden Enden her abwechselungsweise gemessen wird. Dabei dient die optische Faser im Kabel als Sensor und anhand des Effektes der Raman-Streuung wird die Temperatur ermittelt. Genauere Erklärungen zur Theorie der Temperaturmessung via das OFDR-Verfahren sind im Kapitel 3.3 zu finden. Die thermische Leitfähigkeit wurde mittels Linienquellentheorie aus den Temperaturdaten ermittelt, wobei die vertikale Auflösung abhängig ist vom Abstand der gemessenen Punkte des Lasers, welche hier 1 Meter beträgt.

Die Messung wurde vom 08.12.2016 – 16.12.2016 durchgeführt, wobei nach drei Tagen die Heizleistung abgeschaltet wurde. Je nach Gesteinszusammensetzung variiert die Wärmeleitfähigkeit zwischen 2 und 3 W/mK (Abb. 15).

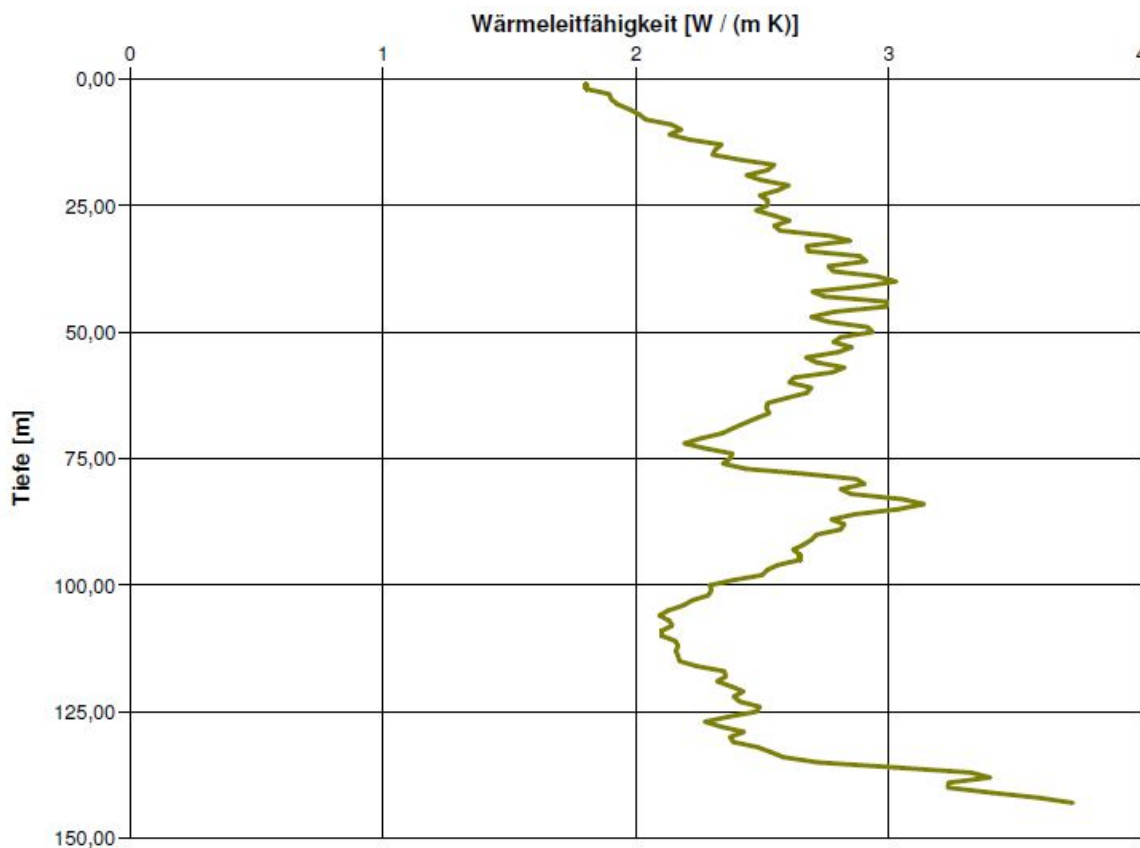


Abb. 15 Wärmeleitfähigkeit berechnet durch einen E-TRT in der Kernbohrung

Der variierende Ton- und Quarz-Gehalt ist hier hauptverantwortlich für die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, z.B. Quarz-reicheren Schichten im Opalinuston und im Schilfsandstein. Die Werte bis 13 m werden wahrscheinlich durch die einzementierte Stahl-Schutzverrohrung verfälscht.



2.7 Qualitätsmessungen in den EWS

In allen Sonden wurden zusätzliche digitale Durchfluss- und Druckprüftests gemäss SIA 384/6 durchgeführt. Für das vorliegende Projekt sind besonders die Durchflusstests von Bedeutung, da unterschiedliche Durchflüsse die Energieentzüge aus dem Untergrund und somit auch die Temperaturänderungen im Untergrund beeinflussen. Geo Explorers hat diese Tests durchgeführt. In einigen Bohrungen war der Zement bereits ausgehärtet, sodass nicht mit maximalem Druck geprüft werden konnte. Es werden nur die Ergebnisse für die Sonden A1 bis A3 beschrieben, in welchen die Temperaturmessungen erfolgen.

Der Kopfdruck für die Druckprüfung lag bei max. 6 bar. Die Druckerholung in der ersten Erholungsphase lag bei 0.4 bis 1.3 bar. Die Druckerholung nach dem Ablassen von Wasser aus der Sonde hat den Vorgaben gemäss SIA 384/6 entsprochen (Druckanstieg um weniger als 0.1 bar). Die Sonden sind dicht.

Beim Durchflusstest wurde der Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf der beiden U-Sonden bei variierendem Durchfluss gemessen. Damit kann bestimmt werden, ob z.B. die Sonde gequetscht ist. Die Abweichung des gemessenen Druckverlustes in der Erdwärmesonde darf max. um $\pm 15\%$ vom berechneten Wert nach Blasius abweichen bzw. die Werte müssen entsprechend Abbildungen 2 und 3, Anhang B1 in der SIA 384/6 genügen. Im vorliegenden Fall genügen die Sonden nicht ganz der Norm (Tab. 3 und Abb. 16). Die Abweichung kann auf ein Quetschen der Sonden, Ablagerungen im Sondenfuss oder Lufteinschlüsse im Sondenfluid während der Messungen zurückgeführt werden. Die Frage wird sein, ob der unterschiedliche, wenn auch geringe Widerstandsunterschiede bei den Temperaturmessungen ersichtlich wird, weil der Entzug in den Sonden mit geringerem Widerstand bzw. grösserem Durchsatz grösser sein wird und somit die Abkühlung des Ringraums stärker. Es sei aber angemerkt, dass die Sonden nachträglich hydraulisch abgeglichen wurden, so dass der Durchfluss in allen Kreisläufen in etwa gleich sein sollte.

Tab. 3 Ergebnisse der Durchflussprüfung.

EWS	A1 (duplex)	A2 (duplex)	A3 (pro U-Rohr)
Max. Durchfluss	3.5 m ³ /h	3.3 m ³ /h	1.66 / 1.59 m ³ /h
Differenzdruck bei max. Durchfluss	1.04 bar	1.06 bar	0.48 / 0.58 bar
Berechneter Sollwert für Differenzdruck	0.75 bar	0.67 bar	0.41 / 0.37 bar
Abweichung in % (erlaubt $\pm 15\%$)	+40%	55%	+15% / +55%



Durchflusstest
Projekt: Lausen
Erdsonde: Sonde A3 (2), Single 40 x 3,7 mm

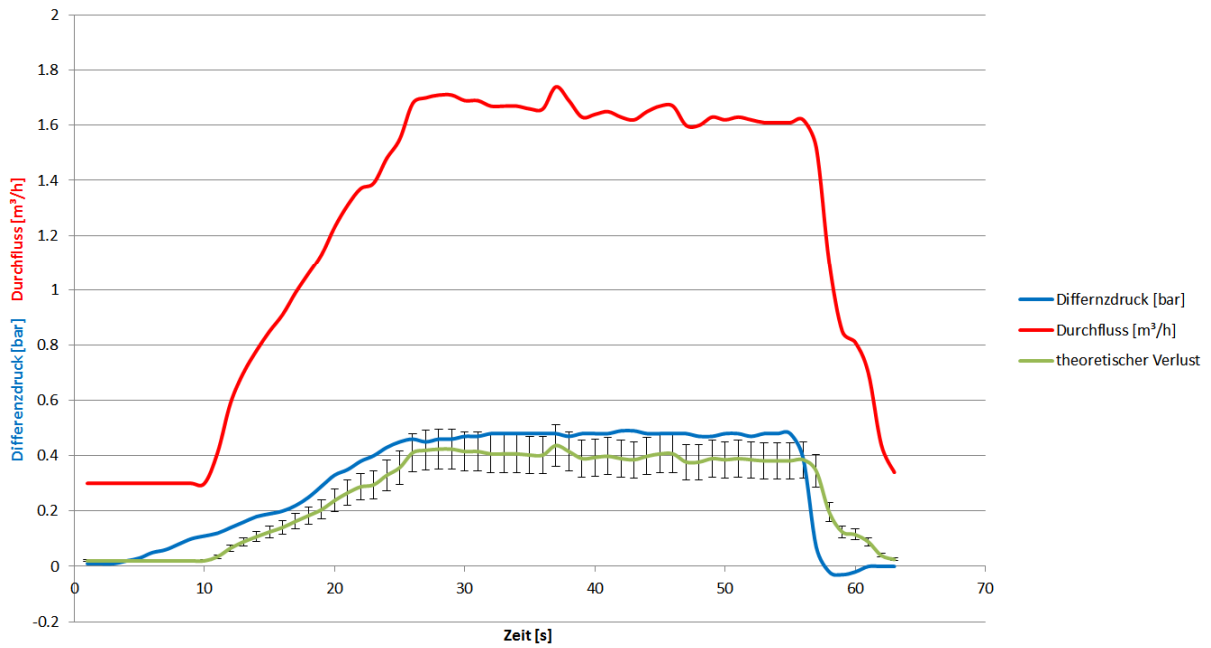


Abb. 16 Durchflusstest in einem U-Rohr von EWS A3

Diese Sonde hat den Durchflusstest gerade bestanden.

2.8 Bohrlochverlaufsmessungen

Um den Verlauf der Erdwärmesonden im Untergrund und hier im Speziellen der Lage der Kernbohrung zur nahe gelegenen EWS A1 zu bestimmen, wurden Ablenkungsmessungen mit einem kombinierten 3-Achs-Accelerometer, 3-Achs-Magnetometer und 3-Achs-Gyroscope durchgeführt. Somit kann die Beschleunigung in 3 Richtungen, das magnetische Feld in 3 Richtungen und die Winkelgeschwindigkeit um 3 Achsen gemessen werden. Basierend auf diesen Daten wird der räumliche Verlauf der Bohrung berechnet. Die Tiefe wird mittels hydrostatischen Drucks ermittelt.

Die Messungen erfolgten in den komplett Wasser gefüllten Sondenrohren. In Abb. 17 ist der räumliche Verlauf der 4 Bohrungen in Lausen (Parzelle 244, Haus A) mit der jeweiligen Ablenkung dargestellt. Die Bohrungen wurden nahezu vertikal gebohrt. Der Grund dafür liegt i.W. an der nahezu horizontalen Schichtlagerung. Im Vergleich zeigen Messungen in Schichten mit steilem Einfallen z.T. Abweichungen von über 30%. Hier liegt die maximale horizontale Ablenkung bei 1 bis 4 m. Dies bedeutet, dass die Abstände der Sonden zu einander über die ganze Tiefe relativ konstant sind. Dies ist besonders bei der Messsonde in der Kernbohrung wichtig, denn nur wenn die räumlichen Abstände zwischen Messsonde und der benachbarten aktiven Sonde bekannt sind, können die Temperaturänderungen in der Messsonde richtig interpretiert und quantifiziert werden (vergleiche Abb. 17 und nachfolgende Abbildungen).

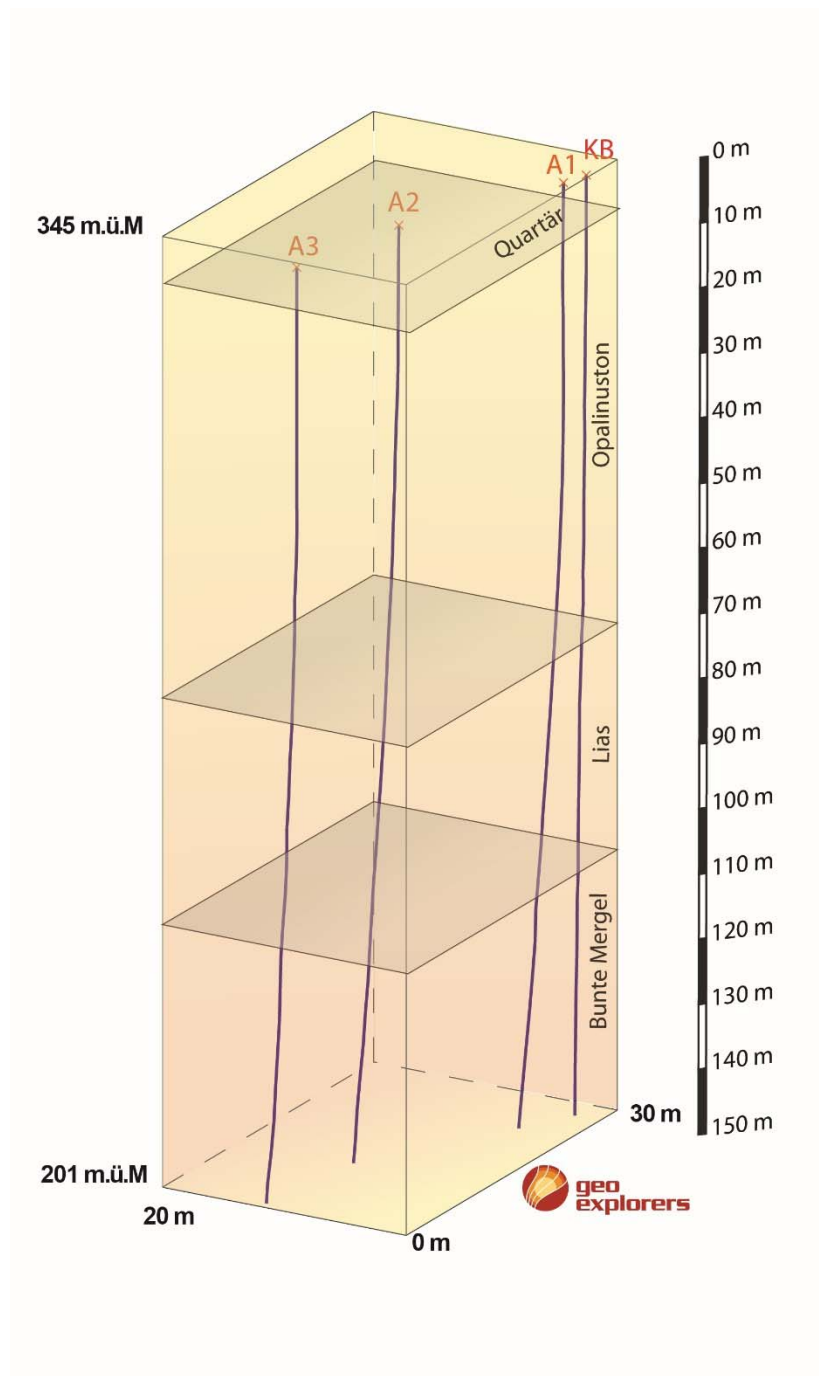


Abb. 17 3D-Verlauf der 4 Bohrungen von Haus A mit Geologie

x:y:z Ratio beträgt in der Abbildung 1:1:2, A1 – A3: EWS Bohrungen, KB: Kernbohrung bzw. Messsonde

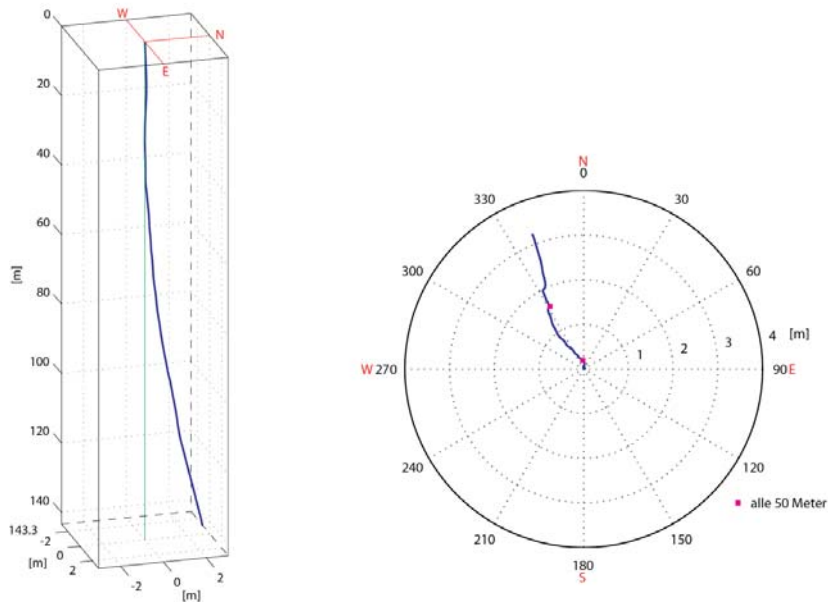


Abb. 18 Bohrlochverlaufsmessung EWS Bohrung A1

Links ist ein 3D-Bild der gemessenen EWS-Bohrung (blaue Linie) zu sehen. Relatives Verhältnis x:y:z ist 1:1:6. Die Ablenkung ist in Meter dargestellt. Die grüne Linie ist die senkrechte zum Nullpunkt an der Oberfläche. Auf dem rechten Bild ist die Ablenkung in Polar-Koordinaten (in Grad) dargestellt. Null Grad zeigt Richtung Norden. Die totale horizontale Ablenkung ist in Meter dargestellt.

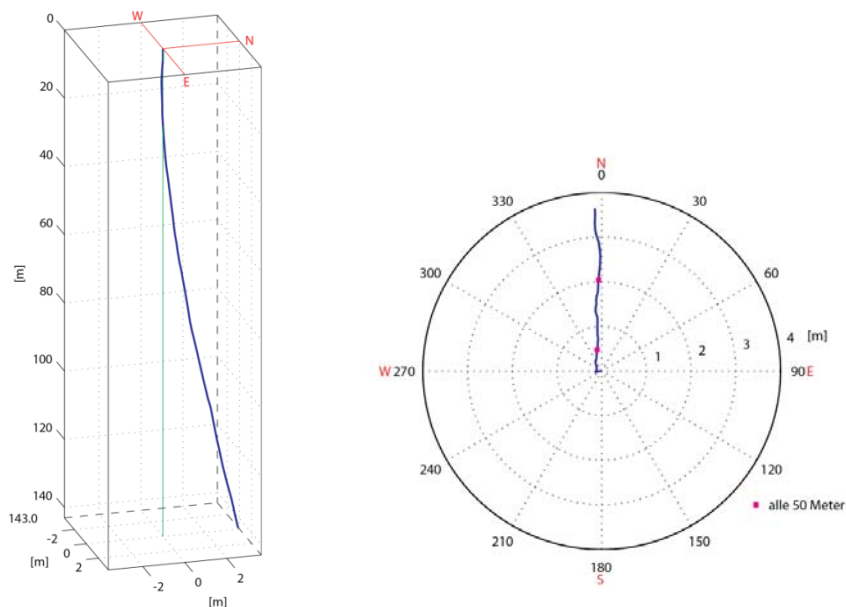


Abb. 19 Bohrlochverlaufsmessung EWS Bohrung A2

Siehe Anmerkungen in Bildunterschrift Abb. 18.

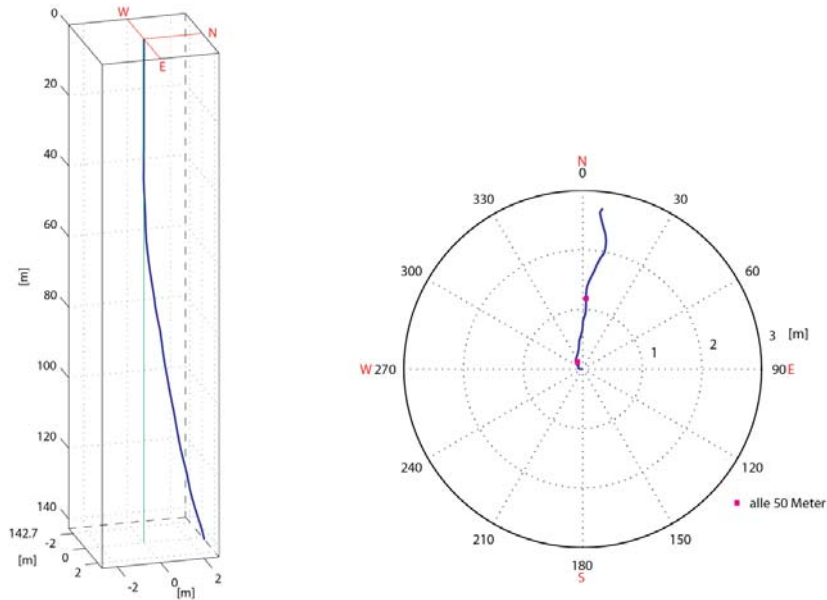


Abb. 20 Bohrlochverlaufsmessung EWS Bohrung A3

Siehe Anmerkungen in Bildunterschrift Abb. 18.

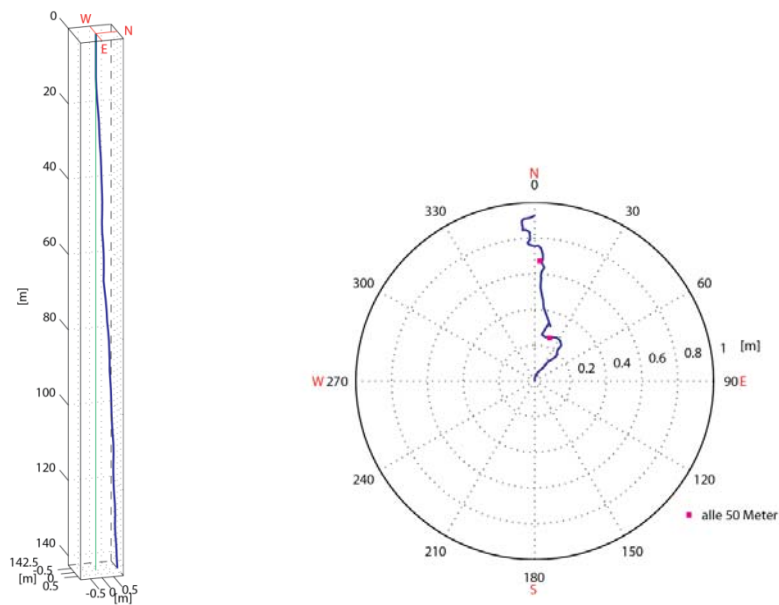


Abb. 21 Bohrlochverlaufsmessung in der Kernbohrung

Siehe Anmerkungen in Bildunterschrift Abb. 18.



2.9 Heizungsanlage

2.9.1 Systembeschreibung

Auf der Liegenschaft Hofmatt, Lausen BL wurden 2 Mehrfamilienhäuser mit je 10 Wohnungen in Holzbauweise nach Minergie Anforderungen gebaut. Pro Mehrfamilienhaus ist eine Sole-Wasser Wärmepumpe im Einsatz (Tab. 2). Die installierten Komponenten des Wärmesystems sind in Tab. 5 gelistet. Abb. 22 zeigt das installierte Wärmesystem im Haus A.

Tab. 4 Wärmepumpen und Energiedaten

Wärmepumpe (pro Mehrfamilienhaus)		
Inbetriebnahme	März 2016	
Hersteller	CTA	
Fluid	Sole-Wasser	
Typ	Optiheat OH 1-25e	
Heizleistung (B0/W35)	24.6 kW	
COP gemäss Herstellerangaben	4.6 (B0/W35) 2.6 (B0/W55)	
Planungswerte (pro Mehrfamilienhaus)		
Geplante Energie für Heizen / WW / Kühlen (Erstkonzept)*	Heizen: Warmwasser: Freecooling:	50'000 kWh/a 15'000 kWh/a 22'500 kWh/a
Planungswert Energie für Heizen / WW / Kühlen (gemäss Energienachweis bzw. Erfahrungswert für Freecooling)*	Heizen: Warmwasser: Freecooling:	30'000 kWh/a (94 MJ/a m ² = 26.1 kWh/a m ² , Heizfl. 1142 m ²) 15'000 kWh/a 1'500 kWh/a (5% der Heizenergie, 19°C Rücklauf)
Kälteenergie bzw. Wärmeentzug aus Untergrund (berechnet aus Planungswert)	Heizen: Warmwasser:	23'500 kWh/a (mit COP 4.6) 9'000 kWh/a (mit COP 2.6) total ca. 33'000 kWh/a
Gemessene Werte Haus A (siehe Kapitel 3.5)		
Wärmeentzug aus EWS	1. Betriebsjahr: 2. Betriebsjahr:	38'000 kWh (Kälteenergie) ≈ 47'000 kWh Heizenergie der WP (mit COP ≈ 5 bei Quelltemp. 5-10°C)
Wärmerückgabe in EWS (Freecooling)	1. Sommer 2. Sommer:	400 kWh 1'850 kWh

* Die geplanten Werte des Erstkonzepts wurden für die Definition der Wärmepumpe und Auslegung der EWS für die Offerten verwendet. Das Geologiebüro wurde nicht über die Zahlen gemäss Energienachweis informiert. Entsprechend wurden bei der Simulation überhöhte Werte verwendet. Erst im Zusammenhang mit diesem Bericht erfolgte mit Hilfe des Energienachweises eine genauere Bestimmung der Energiewerte, welche aber bei der Simulation der EWS zu keinen signifikanten Änderungen bei den Sondenlängen führte.



Tab. 5 Installierten Komponenten des Wärmesystems.

Komponente	Spezifikationen
Wärmepumpe	Einstufige Wärmepumpe von CTA, Typ Optiheat Economy OH 1-25e pro Haus. Die detaillierten technischen Daten und Schema zur Wärmepumpe sind in Tab. 6, Abb. 23 und Abb. 24 gegeben. Kälteteil und elektronische Steuerung sind im Wärmepumpengehäuse integriert. Die hydraulischen Komponenten wie Umwälzpumpe, Expansionsgefäß und Sicherheitsventile wurden separat vom Installateur eingebaut.
Brauchwasserspeicher	Brauchwasserspeicher von CTA 1500 l pro Haus, mit Notheizelement 10 kW
Pufferspeicher	Pufferspeicher von CTA für Heizung 800 l pro Haus
Umwälzpumpen	Umwälzpumpe Heizung von Biral Typ A 14-2 geregelt, Energieklasse A, 8-70 W Umwälzpumpe Sole von Biral Typ A 16-2, Energieklasse A, 8-174 W
Druckausdehnungsgefäß	Druckausdehnungsgefäß für Heizung von IMI Hydronic, Typ Statico SU 200.3 (200 Lt., 3 bar)
Freecooling	Freecooling Set 4 pro Haus, passend zur Wärmepumpe OH 1-25e bestehend aus isoliertem Wärmetauscher mit Konsole und Mischventil (Schema siehe Abb. 25)
Fussbodenheizung	Fussbodenheizung 0.5-5 l/min, $\leq 35^{\circ}\text{C}$ für 10 Minergie-Wohnungen pro Haus ohne elektronischer Regelung mit Einzelraum-Temperaturfühlern (Gesamt-Energiebezugsfläche pro identischem Wohnhaus: $1'124.5\text{ m}^2$ mit Heizwärmebedarf von 94 MJ/m^2).
Wärmezähler Sole	Bidirektionaler Mikroprozessor-Wärmezähler PVOptima in Tauchhülse misst folgende Parameter: Wärmeentzug aus EWS in kWh Wärmerückgabe durch Freecooling in kWh Soletemperatur Vorlauf Soletemperatur Rücklauf
Datenlogger in Wärmepumpe	zeichnet folgende Parameter auf (0.1 RVS61.843/169 Serie F) Rücklauftemperatur Wärmepumpe [$^{\circ}\text{C}$] Vorlauftemperatur Wärmepumpe [$^{\circ}\text{C}$] Temperaturspreizung Kondensator [$^{\circ}\text{C}$] Temperaturspreizung Verdampfer [$^{\circ}\text{C}$] Quelle Eintrittstemperatur [$^{\circ}\text{C}$] Quelle Austrittstemperatur [$^{\circ}\text{C}$] Betriebsstunden Verdichter 1 [Stunden] Startzähler Verdichter 1 Aussentemperatur [$^{\circ}\text{C}$] Aussentemperatur gedämpft [$^{\circ}\text{C}$] Vorlauftemperatur Istwert Heizkreis 1 [$^{\circ}\text{C}$] Vorlauftemperatur Istwert Kühlkreis 1 [$^{\circ}\text{C}$]

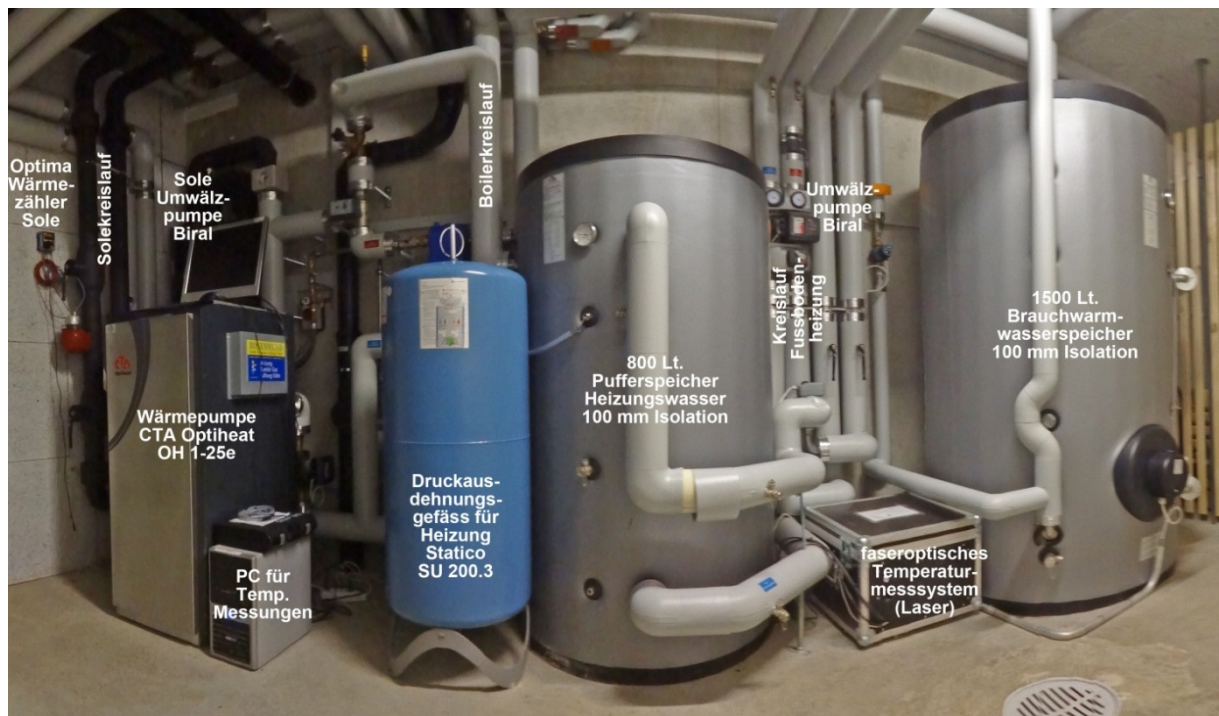


Abb. 22 Installiertes Wärmesystem Haus A

Tab. 6 Technische Daten der Wärmepumpe (aus Datenblatt CTA 07/2016)

Wärmepumpentyp	Optiheat 1-25e
Bauart	Konventionell
Regler Optiplus	integriert
WPZ-Prüfnummer	SW-345-14-02

Verflüssiger, Heizungsseite (bei B0/W35)

Volumenstrom minimal / nominal / Norm	m³/h	2.1 / 3.0 / 4.2
Druckabfall über Wärmepumpe	kPa	2 / 4 / 9
Medium Wasser	%	100

Normleistungsdaten (nach EN 14511)			W 35	W 45	W 55
Heizleistung	bei B0	kW	24.6	22.6	21.1
Leistungszahl COP	bei B0	-	4.6	3.4	2.6
El. Leistungsaufnahme	bei B0	kW	5.4	6.6	8.0
Kälteleistung	bei B0	kW	19.2	15.9	13.1

Abmessungen/Anschlüsse/Diverses

Abmessungen	T x B x H	mm	700 x 530 x 1260
Gesamtgewicht		kg	205
Heizkreisanschluss	AG	Zoll	1½"
Solekreisanschluss	AG	Zoll	1½"
Kältemittel/Füllmenge in kg	-- / kg		R-410A / 4.2
Kälteöl Füllmenge		l	3.3

Schall

Schallleistungspegel	Lwa	dB(A)	59
Schalldruckpegel in 1 m ¹⁾	Lpa	dB(A)	44

Einsatzbereich

Wärmequelletemperatur	min/max	°C	-6 / +25
Heiz-Vorlauftemperatur bei > B0 ²⁾	min/max	°C	25 / 60
Heiz-Vorlauftemperatur bei B-6	min/max	°C	25 / 54

Verdampfer, Soleseite (bei B0/W35)

Volumenstrom minimal / nominal / Norm	m³/h	4.3 / 5.0 / 5.8
Druckabfall über Wärmepumpe	kPa	13 / 18 / 24
Medium Wasser/Ethylenglykol	%	75 / 25

Elektrische Daten

Betriebsspannung Kraft	3 / N / PE / 400 V / 50 Hz	
Externe Absicherung	AT	25 "C"
Externe Abs. ohne Umwälzpumpen	AT	25 "C"
max. Maschinenstrom	A	22
Anlaufstrom direkt/mit Sanftanlasser	A	111 / 53
Schutzart	IP	20
max. Leistungsaufnahme Verdichter	kW	10.8
max. Leistungsaufnahme Umwälzpumpen ^{3) 4)}	kW	0.5
max Leistungsaufnahme total	kW	11.3
Heizungspumpenausgänge ³⁾	P / N / PE	
Quellenpumpenausgang ⁴⁾	P / N / PE	



Volumenstrom Quelle minimal / nominal / Norm 4.3/5.0/5.8 m³/h

Volumenstrom Heizung minimal / nominal / Norm 21./3.0/4.2 m³/h

Leistungsangaben nach EN 14511

Heizleistung in kW

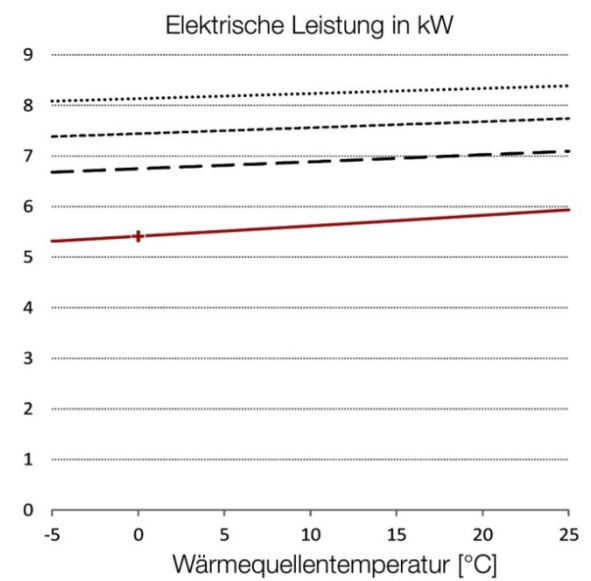
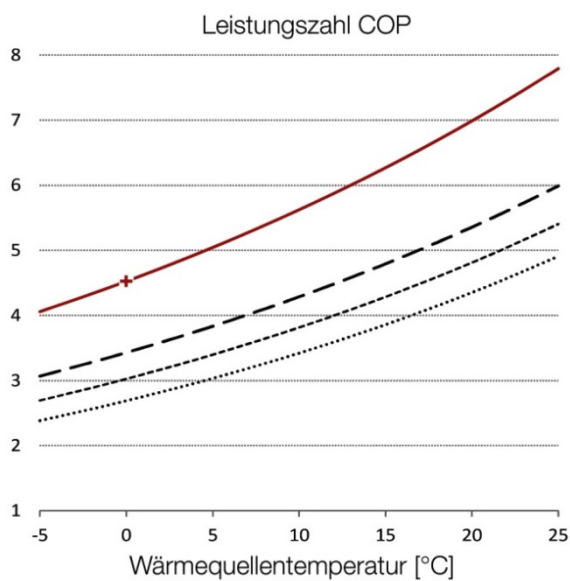
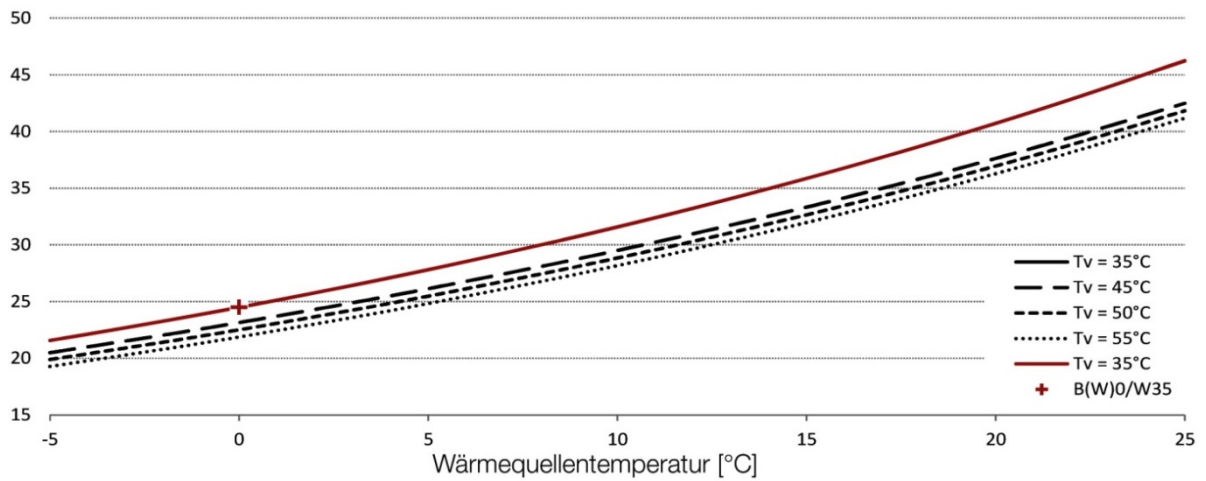


Abb. 23 Leistungskurven der Wärmepumpe OH 1-25e
(aus Datenblatt CTA 07/2016)

Wärmepumpe mit Pufferspeicher TWW Erwärmung mit hydraulischer Umschaltung

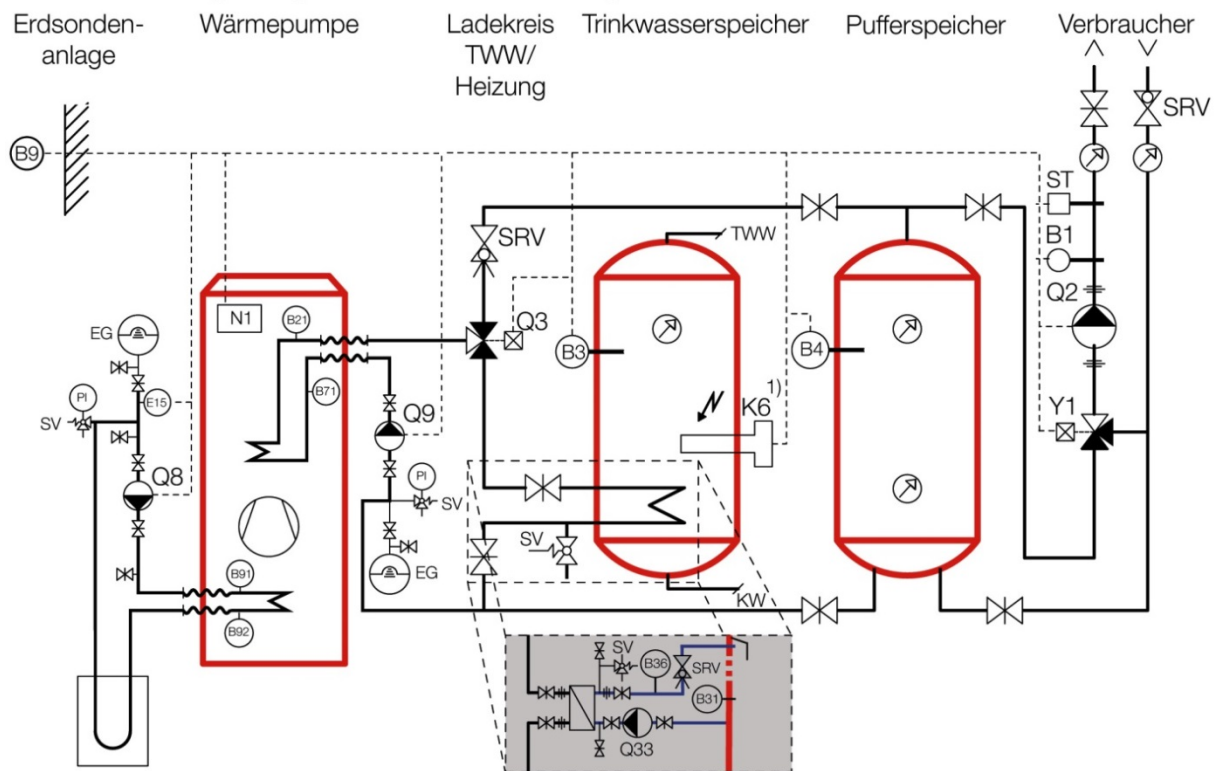


Abb. 24 Grundkonzept der Wärmepumpe OH 1-22e bis 1-33e

Funktionsbeschreibung und Schema aus Datenblatt CTA 07/2016:

Über den Aussentemperaturfühler (B9) wird die Wärmepumpe in Betrieb gesetzt. Diese arbeitet auf den Pufferspeicher. Die Ein- und Ausschaltung der Wärmepumpe erfolgt über die Temperaturfühler (B4) bzw. (B71) in Abhängigkeit der Aussentemperatur. Die Maschine besitzt eine Anlaufverzögerung um ein Pendeln zu verhindern. Die Pumpe (Q2) ist während der gesamten Heizperiode in Betrieb. Die TWW Ladung erfolgt nach Zeitprogramm über den Temperaturfühler (B3), dabei wird das Umlenkenventil (Q3) umgeschaltet. Der Elektroeinsatz (K6) im TWW-Speicher wird vom Wärmepumpenregler angesteuert. Die Entladeregelung wird mit dem optionalen Heizkreis-Mischer (Y1) über den Vorlauftemperaturfühler (B1) in Abhängigkeit zur Aussentemperatur geregelt. Der Pufferspeicher kann im Niedertarif geladen werden. Optional kann ein externer Wärmeübertrager zur TWW-Erwärmung eingesetzt werden. Für die Steuerung der Zwischenkreispumpe Q33 müssen zwei zusätzliche Temperaturfühler (B31, B36) eingebaut werden. Anmerkung: Der Speicher wurde nicht wie auf dem Schema eingebunden. Die Leitung vom Vorlauf verläuft durch den Speicher (siehe Kapitel 2.9.3).

Legende:

B1 Vorlauftemperaturfühler Heizkreis
B3 Trinkwarmwassertemperaturfühler
B36 TWW Ladetemperaturfühler
B71 Rücklauftemperaturfühler Wärmepumpe
B91 Sole Eintrittstemperaturfühler
EG Expansionsgefäß
KW Kaltwasser
N1 Wärmepumpenregler Optiplus eingebaut
Q3 Umlenkenventil TWW, ev. TWW Ladepumpe
Q8 Solepumpe
SRV Strangregulierungsventil
TWW Trinkwarmwasser
1) Kraftschütz und Sicherung in bauseitigem Tableau

B21 Vorlauftemperaturfühler Wärmepumpe
B31 TWW Temperaturfühler unten
B4 Pufferspeichertemperaturfühler
B9 Aussentemperaturfühler
B92 Sole Austrittstemperaturfühler
E15 Soledruckwächter
K6 Elektroheizeinsatz TWW 1)
Q2 Heizkreispumpe
Q33 TWW Zwischenkreispumpe
Q9 Kondensatorpumpe
SV/PI Sicherheitsventil / Manometer
Y1/ST Heizkreis-Mischer / Sicherheitsthermostat



Freecooling, Heizkreis/Kühlkreis indirekt mit Pufferspeicher oder Kombispeicher

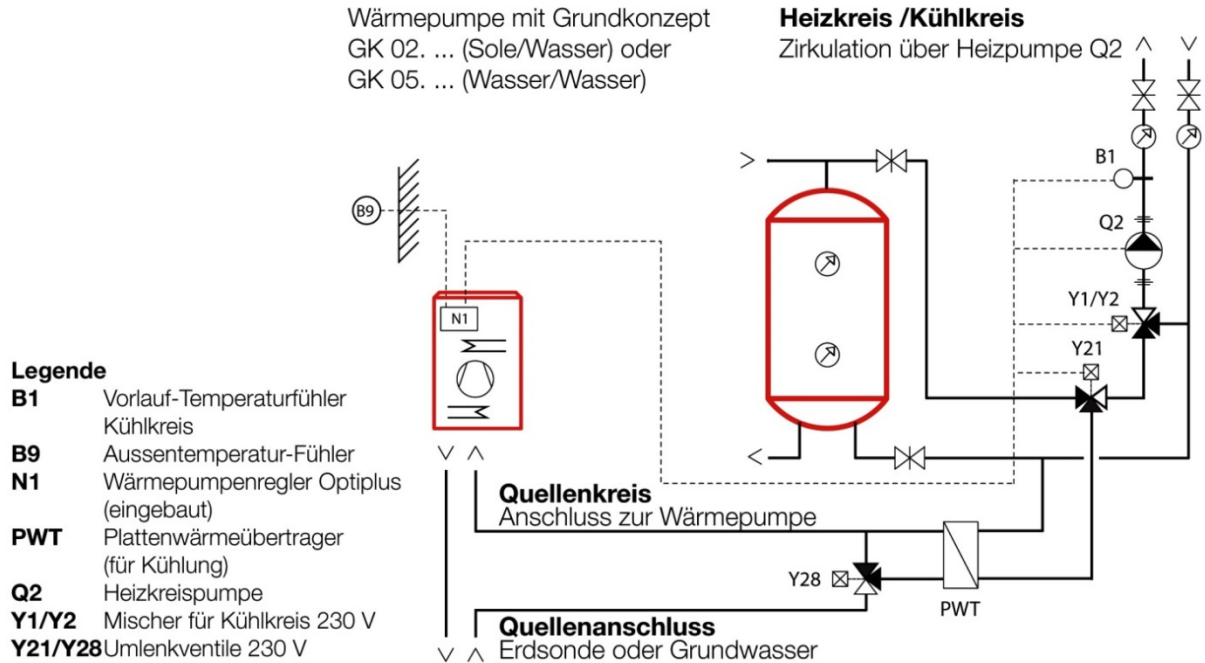


Abb. 25 Schema Freecooling

Funktionsbeschreibung und Schema aus Datenblatt CTA 07/2016:

Beim passiven Kühlen (Freecooling) erfolgt die Kühlung, ohne dass ein Kälteerzeuger in Betrieb genommen wird. Die Wärmerückgabe erfolgt direkt in die angeschlossene Quelle (Erdsonde oder Grundwasser). Der Wärmepumpenregler fährt über die Aussentemperatur (B9) eine Kühlkennlinie, welche mit dem angeschlossenen Mischer (Y1/Y2) und der Vorlauftemperatur (B1) geregelt wird. Bei Kühlanforderung, wird der Quellenkreis mittels der Umlenkventile (Y21/Y28) beidseitig über den Plattenwärmeübertrager (PWT) gelenkt. Bei Heizanforderung werden die Umlenkventile auf die Heizposition zurückgestellt. Bei einer eingestellten Entladeregelung wird das Mischventil Y1/Y2 in die Regelung eingebunden. Bei vorhandenen Raumthermostatventilen müssen diese für den Kühl-, sowie den Heizbetrieb umstellbar sein.



2.9.2 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
	• 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)	• 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
	Anpassungen der Parameter / Einstellungen • 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-	• 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



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 • 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)	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 17°C eingestellt. Wenn WP aus Heizmodus fällt (>17°C), wird nach 8h (siehe Parameter 913) Kühlmodus freigegeben • Freecooling-Betrieb wird früher frei gegeben.§ • Wie bereits im Heizbetrieb wird so auch im Kühlbetrieb 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:	Beeinflusst Leistung bzw.



Filtertrockner in WP im Kältekreis ersetzt (auf Grund Verunreinigungen o. Feuchtigkeitsrückstände in Kältemittel)	internen Durchfluss der WP
---	----------------------------

* Die kürzere Sperrdauer hat nicht zur Folge, dass anstatt Freecooling eine Art Heizwärmerückgewinnung erfolgt. Es wurden u.a. auch die beiden Parameter Heizgrenze (P730 von 19°C auf 17°C) sowie Kühlgrenze (P912 von 22°C auf 20°C) um 2K nach unten verschoben. Es wechselt somit nicht mehr oder weniger zwischen Heizen und Kühlen als vorher, sondern auf einem tieferen Niveau. Das Freecooling beginnt somit schon früher in einer Hitzeperiode. Die Temperaturen sind sehr stark gemittelt, somit ist es unwahrscheinlich, dass es zu einem täglichen Hin und Her von Heizen und Kühlen kommt.

§ Wenn die Kühlfunktion aktiv ist, ist es generell so warm, dass das Freecooling die benötigte volle Kühlleistung zur Absenkung der Raumtemperatur gar nicht erbringen kann. Die Wärme kann nämlich nicht schnell genug vom Raum über den Fussboden in die Heizungsrohre gelangen. Die Problematik, dass die vorgegebenen 21°C im Raum zu kühl wären, wird somit nicht erreicht.

Die Reduziersollwerte sind gedacht als Tag/Nachtabsenkung und sind, wie oben bereits kommentiert, beide auf die gleiche Temperatur eingestellt, weil die Trägheit von Minergie Gebäuden so gross ist, dass diese Absenkung überhaupt keinen Einfluss hat.

Alle Anpassungen werden mit den Messdaten in den folgenden Jahren überprüft und gegebenenfalls erneut angepasst.

2.9.3 Betriebsverhalten Wärmepumpensystem

Mit der Überwachung des Wärmesystems wurde unter anderem erkannt, dass die Regeneration durch Freecooling sehr gering war, die Wärmepumpe überproportional häufig anschaltete und im letzten Sommer die Wärmepumpe auch für WW nicht angeschaltet hat. Im Rahmen der letzten grösseren Anpassungen wurde am 25.04.2018 bzgl. des Betriebsverhaltens der Wärmepumpe folgendes festgehalten:

Generell

Die Wärmepumpe weist eine überdurchschnittlich hohe Anzahl an Starts auf und die Laufzeiten der Wärmepumpe sind unterdurchschnittlich tief. Selbst während längeren Kältephasen ist die Wärmepumpe nicht länger als 12 Std. pro Tag in Betrieb. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wärmepumpe überdimensioniert wurde. Nebst dem Betriebsverhalten mit den kurzen Laufzeiten und den vielen Starts, gibt es weitere Anzeichen, die diese Annahme stützen. So wurde während der Planungsphase von einem höheren Heizwärmebedarf ausgegangen. Es scheint, dass nach einer ersten Auswahl des Wärmepumpentyps auf Grund dieser Daten, keine Anpassungen mehr vorgenommen wurden.

Die (noch) relativ hohen Quellentemperaturen (Eintrittstemperatur der Sole in WP) von durchschnittlich +7°C führen zusätzlich zu einem effizienteren Betrieb und zu einer grösseren Heizleistung des ausgewählten Wärmepumpentyps.

Hydraulik

Nebst den nicht ganz optimalen Leistungsmerkmalen der Wärmepumpe, ist die Einbindung des Heizungsspeichers nicht optimal. Da der Heizungsvorlauf von der Wärmepumpe zuerst in den Speicher geleitet, und von dort aus auf die Heizgruppe geführt wird, entsteht eine zusätzliche Durchmischung des Speichers und eine nicht notwendige Abkühlung der Vorlauftemperatur. Es ist nicht ersichtlich, wieso die Anlage überhaupt mit einer Heizgruppe mit Heizungsmischer ausgeführt wurde. Auf Grund der Bauart (Minergie) wäre es ev. energetisch sinnvoller gewesen, die



Mischergruppe und den Heizungsspeicher gänzlich wegzulassen oder diesen in den Heizungsrücklauf zu integrieren. Siehe auch Bemerkungen in Kapitel 2.9.2.

Sonden/Sondenpumpe

Die Qualitätsmessungen haben gezeigt, dass die gemessenen Druckverluste der Sonden höher waren als in der Norm vorgeschrieben. Ev. liegt hier ein bisher unbemerkter Erstellungsfehler vor. Die Soleumwälzpumpe lief 28.04.2018 bereits auf 100% Leistung, trotzdem konnte das ΔT über den Sole Kreislauf nicht unter 4K gebracht werden. Mit 4K kann die Anlage effizient betrieben werden, aber durch die hohe Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe wird der gesamte Wirkungsgrad der Wärmepumpe verschlechtert.

Warmwasserproduktion

Wie nachfolgend im Bericht gezeigt wird, erfolgte während einer Periode im Sommer überhaupt kein Wärmeentzug aus dem Untergrund. Die Überprüfung vor Ort am 28.04.2018 zeigte, dass die Warmwasserproduktion täglich resp. jede Nacht über die Legionellen Schutz Funktion erfolgte. Die Ursache für den reinen Elektroheiz-Einsatz liegt ev. auch darin, dass der Sollwert von der Wärmepumpe nicht erreicht werden konnte. Die Wärmepumpe würde grundsätzlich über eine Funktion verfügen, damit die Elektroheizung periodisch zugeschaltet werden kann. Dazu müsste aber noch ein zusätzlicher Schütz im Elektrotabelleau installiert und ein Steuerungskabel von der Wärmepumpe zum Elektrotabelleau gezogen werden. Die Legionellen Schutz Funktion wurde nun vorübergehend ausgeschaltet.

Der Elektroheiz-Einsatz wurde deaktiviert, da dieser jede Nacht eingeschaltet hat, während die Wärmepumpe noch das Brauchwarmwasser am Aufheizen war. Es sollte zwingend der Schütz mit Steuerungskabel eingebaut werden. Ansonsten kann weiterhin jede Nacht das Brauchwarmwasser mit dem Elektroheizeinsatz aufgeheizt werden, oder aber der Legionellenschutz bleibt dauerhaft ausgeschaltet und die notwendige Warmwassertemperatur wird nicht erreicht.



2.10 Simulation / Dimensionierung der EWS

Mit der Software EWS wurde die Temperaturentwicklung der beiden EWS-Anordnungen für Haus A und B simuliert. Mit Hilfe der Simulation wurden die effektiv benötigte Sondenlänge und Sondenanzahl simuliert, damit die Sonden nach SIA 384/6 über mind. 50 Jahre nachhaltig betrieben werden können. Gemäss Vorgabe SIA 384/6 muss das Sondenfeld so ausgelegt werden, dass nach 50 Jahren nach der Heizperiode, resp. der maximalen Auskühlung des Sondenfeldes (meist Ende Februar), die gemittelte Temperatur von Vor- und Rücklauf bei minimal -1.5°C liegt (hier Rücklauftemperatur des Solekreislaufes -3°C bei einer Temperaturdifferenz von Ein- und Austritt von 3°K). Für die Simulation wurden folgende wichtigsten Eckdaten des Erstkonzepts (siehe Tab. 4) und dem Energienachweis gemäss Planer-Vorgaben verwendet:

Heizleistung:	49.2 kW (2 * 24.6 kW)	
COP:	4.6 (B0/W35), 2.6 (B0/W55)	
Simulationsdauer:	50 Jahre	
	Simulation 1	Simulation 2
Heizenergie:	2*50'000 kWh/Jahr (gemäss Erstkonzept*)	2*30'000 kWh/Jahr (gemäss Energienachweis*)
Warmwasser:	2*15'000 kWh/Jahr (gemäss Planer)	2*15'000 kWh/Jahr (gemäss Planer)
Kühlenergie:	45'000 kWh/Jahr (gemäss Erstkonzept)	2*1'500 kWh/Jahr (Erfahrungswerte, ca. 5% Heizenergie)
Kühlleistung:	25 kW (gemäss Planer)	
Rücklauf Freecooling:	19°C	
Wärmeleitfähigkeit Gestein:	2.3 W/mK (gemäss TRT)	
Wärmeleitfähigkeit Zementation:	2.00 W/mK	
Temperaturdifferenz:	3°K	
Sonde:	PN16 40mm / 3.7mm	
Fluid:	Monoethylenglykol 25%	
Temperatur Erdreich:	gemäss gemessenem Temperaturprofil	

* siehe Tab. 4 unten

Die Sonden wurden in zwei Anordnungen mit je 3 Sonden zu je 8 bis 14 m Abstand zwischen den Sonden platziert. Der Abstand zur Hauswand beträgt min. 2 m, der zur Parzellengrenze min. 3 m. Der Abstand der beiden Sondenanordnungen für Haus A und B liegt bei mehr als 50 m. Es wurde so simuliert, als wenn nur eine Wärmepumpe mit 6 EWS in Betrieb wäre.

Die Simulation 1 ergab 2*3 Sonden à 137 m Länge. Die Simulation 2 ergab 2*3 Sonden à 138 m Länge. Mit entsprechender Sicherheit wurden tatsächlich 145 m lange Sonden eingebaut. Die simulierte Temperaturentwicklung über 50 Jahre mit 145 m langen Sonden ist in Abb. 26 gegeben. Die simulierte Ausdehnung der Kältefahne um jede Sondenanordnung ist in Abb. 27 ersichtlich. Diese zeigt, dass sich beide Sondenanordnungen zu je 3 Sonden gegenseitig nur geringfügig beeinflussen. Der Untergrund um jede Sondenanordnung wird in einer Distanz von durchschnittlich 10 m um die Sonden nach 50 Jahren um ca. 2°K abgekühlt. Die tatsächliche Ausbreitung der Abkühlungsfahne um die Sonden herum soll mit Hilfe der Messsonde in der Kernbohrung gemessen werden.

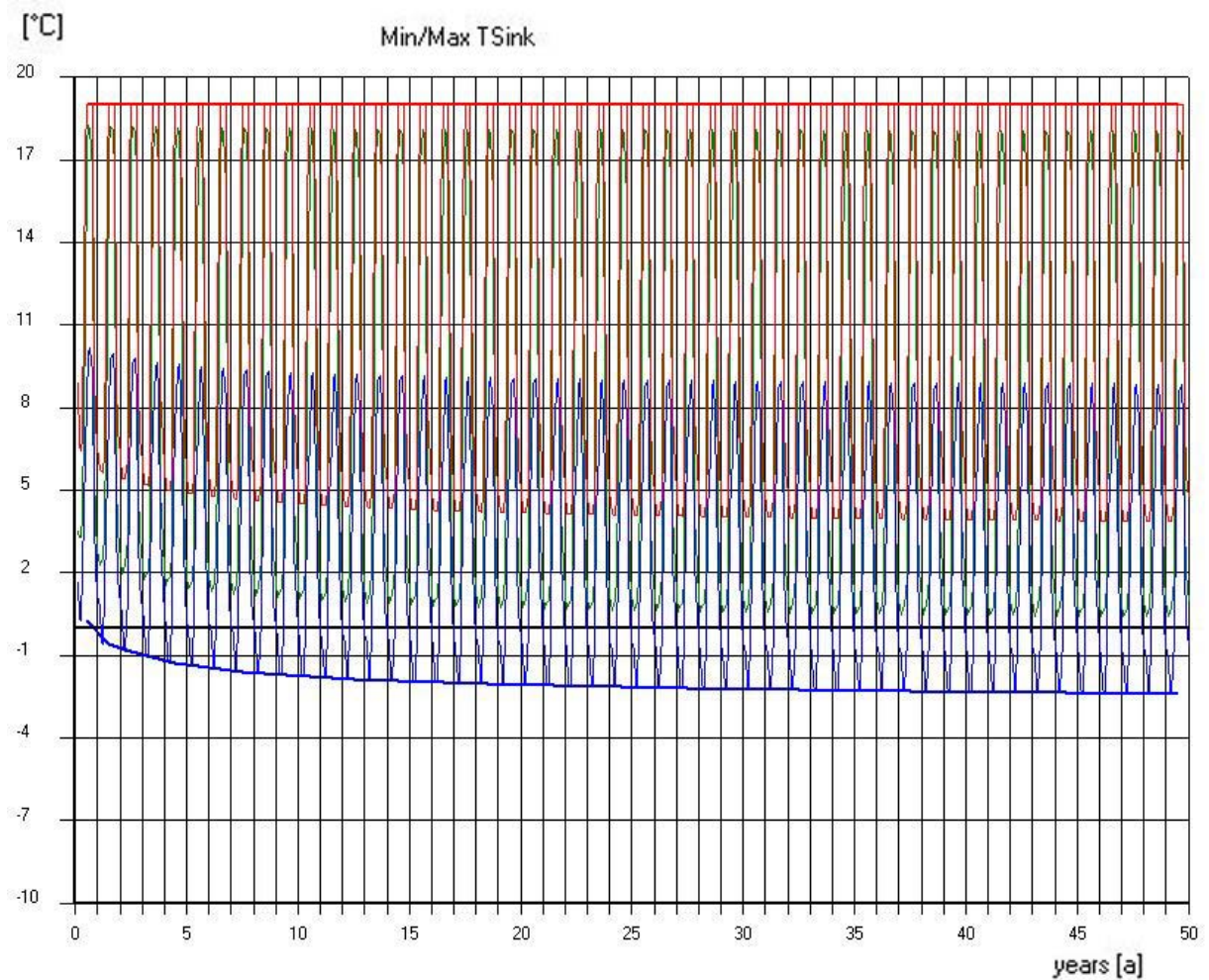


Abb. 26 Simulierte Temperaturentwicklung der Sole

Dargestellt ist die max. (rot), durchschnittliche (grün) und min. (blau) Sondenrücklauf- bzw. Eintrittstemperatur (y-Achse) über 50 Jahre (x-Achse). Berechnet mit der Simulationssoftware EWS von Huber Energietechnik AG.

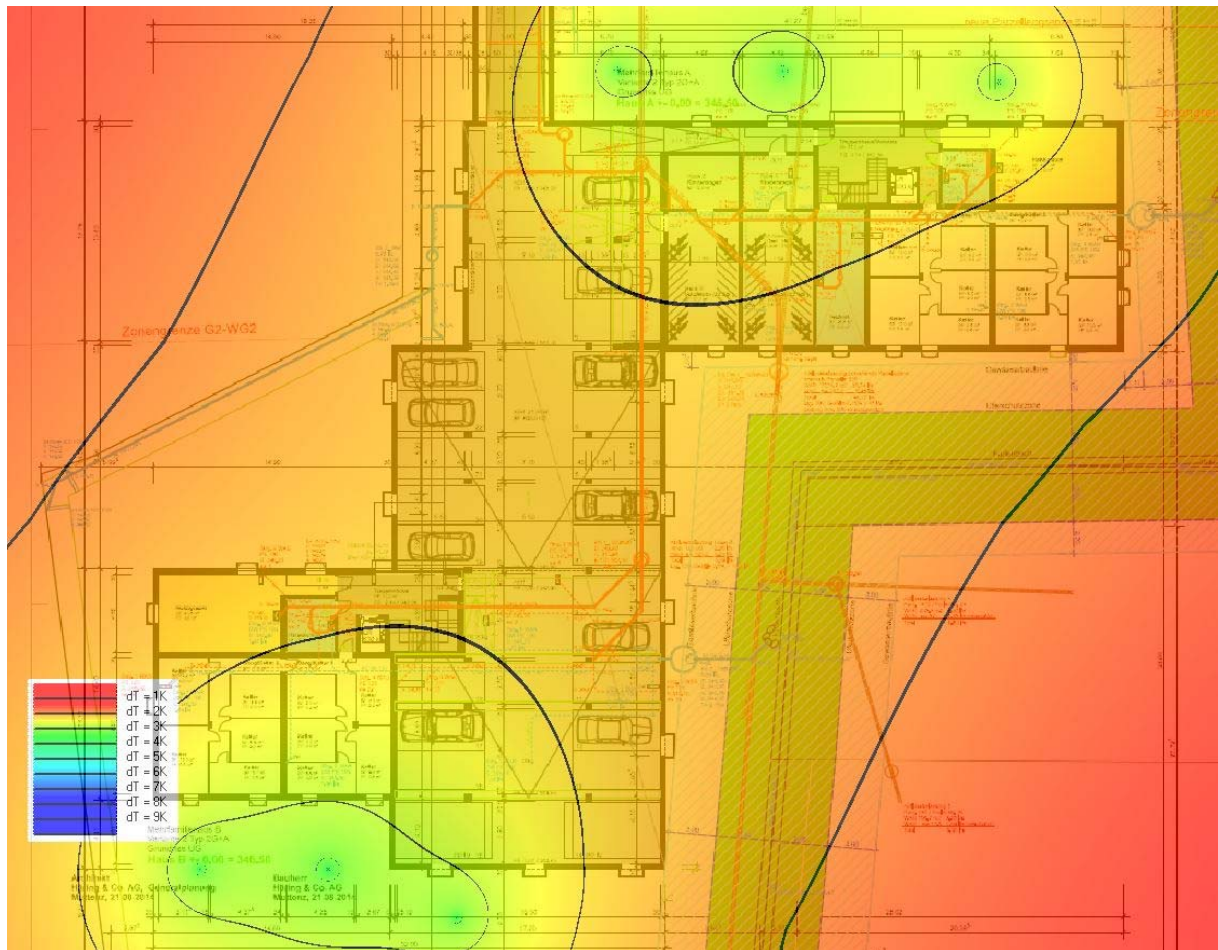


Abb. 27 Bodentemperatur nach 50 Jahren

Darstellung der simulierten durchschnittlichen Jahresbodentemperatur nach 50 Jahren. Die schwarzen Linien stellen die Isothermen dar. Von Linie zu Linie entspricht einer Temperaturdifferenz von 1°K. In durchschnittlich 10 m Distanz um die beiden Sondenanordnungen von je 3 Sonden für Haus A (oben) und Haus B (unten) beträgt die Abkühlung ca. 2°K.



3 Langzeit Temperatur-Messungen um EWS

3.1 Fragestellung und Ziele

Mit den räumlichen Temperaturmessungen über mehrere Jahre soll versucht werden, nachfolgende Fragen zu klären. Der Messbeginn war im März 2016. Folglich können zu einigen Fragestellungen noch keine aussagekräftigen Antworten gegeben werden, da dafür über mehrere Jahre gemessen werden muss.

- Wie verändert sich allgemein die räumliche Untergrundtemperatur um jede EWS mit der Zeit, abhängig von Energieentzug, Regeneration und Klima?
- Wie schnell regeneriert sich der Fels zeitlich differenziert (z.B. bei einem Unterbruch der WP, allgemein nach der Heizphase im Winter, nach einer Wärmezufuhr auf Grund von freecooling)?
- Wie lange und wie oft läuft die Wärmepumpe (Anzahl Einschaltungen, Betriebsstunden), besonders während der Wintermonate?
- Wie relevant ist Freecooling? Wie viel Wärme wird tatsächlich in den Untergrund geführt und wie gross ist die tatsächliche Regeneration? Wie wichtig sind die korrekten Einstellungen?
- Wann und in welchem Ausmass kommt die Kältefront der benachbarten aktiven EWS A1 in der Messsonde in der Kernbohrung an?
- Wie gross ist der thermische Oberflächeneinfluss bzw. die Regeneration? Wie tief reicht der jahreszeitliche Temperatur-Einfluss?
- Die aktiven Sonden sind vergleichsweise weit voneinander entfernt. Kann trotzdem eine gegenseitige Beeinflussung festgestellt werden? Ist die Temperaturentwicklung um alle drei Sonden gleich, oder zeigt die mittlere eine andere?
- Wie gross ist der Einfluss der Geologie (z.B. räumliche Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit) und des Grundwassers auf die räumliche Temperaturentwicklung im Untergrund? Unterscheidet sich die Temperaturentwicklung in Schichten mit Grundwasserfluss und höherer Wärmeleitfähigkeit zu den anderen?
- Die Sonden-Dimensionierung erfolgte vorweg mit Hilfe einer Simulation und Grundlagendaten aus einem GRT. Entsprechen die simulierten Werte, sowie die angenommen Energiewerte der Realität?
- Bei der Durchflussprüfung wurden Unterschiede festgestellt. Zudem sind die Zulaufängen unterschiedlich. Resultieren diese in einer unterschiedlichen Temperaturentwicklung im Untergrund?
- Wie können die Einstellungen der WP optimiert werden?



3.2 Installation / Messablauf

Langzeitmessungen der Untergrundtemperatur sowie der entzogenen und rückgeführten Energie werden nur für Haus A durchgeführt. In den EWS-Bohrungen A1 bis A3, sowie der Kernbohrung wurde in Schlaufenform an der Aussenwand der Sonden ein Glasfaserkabel von der Geländeoberkante bis zum Sondenfuss verlegt und einzementiert (siehe auch Tab. 2). Das 1300 m lange Kabel verläuft vom Technikraum zur Sonde A3, weiter zur A2, zur A1 und durch die Kernbohrung und von dieser zurück in den Technikraum. Der Aufbau ist in Abb. 9 schematisch dargestellt. Das Glasfaserkabel besteht aus 4 Fasern vom Typ Multimode. In der Kernbohrung wurde wegen der E-TRT Messung ein Hybridkabel 4Fs bestehend aus einem Kupferkabel zum Heizen und 4 Glasfasern vom gleichen Typ eingebaut. Es kamen 2 Spleissboxen zum Einsatz: Spleissbox bei A3 mit Spleissen zwischen Technikraum und A3, sowie A3 und A2, Spleissbox bei A1 mit Spleissen zwischen A2 und A1, A1 und KB, sowie KB und Technikraum. Die Dämpfung auf Grund der Spleisse ist im normalen Bereich. Abb. 28 zeigt ein Beispieldatensatz der gemessenen Temperaturen entlang dem 1300 m langen Glasfaserkabel.

Die beiden Glasfaserkabelenden sind an das Lasergerät angeschlossen. Mit der Kommunikationssoftware (Charon3) wurden die Mess-Einstellungen konfiguriert, die Messungen gestartet/ gestoppt und die gemessenen Daten heruntergeladen. Als Sampling Intervall wurde 1 Meter eingestellt. Folglich wird zu jedem vordefiniertem Messzeitpunkt pro Meter ein Messwert generiert. Das heisst bei 1300 Metern Kabel werden zu jedem Messzeitpunkt 1301 Daten aufgezeichnet. Der Messwert, also die Temperatur wird während einer Zeit von 20 Minuten ermittelt (10 min Messung im Glasfaserkabel in die eine Richtung, 10 min in die andere Richtung) und dann als ein Messwert abgespeichert. Die Messgenauigkeit liegt bei 0.1°C und 0.1 m.

3.3 Theorie Temperaturermittlung mittels Lichtwellenleiter

Die optische Faser im Glasfaserkabel dient als Temperatur-Sensor. Je nach einwirkenden Temperaturen auf ein Glasfaserkabel, ändern sich die Dichte und Molekülschwingung entlang des Lichtwellenleiters und entsprechend die Eigenschaften des rückgestreuten Lichts. Mittels des OFDR (optical frequency domain reflectometry) Verfahren wird mit Hilfe eines Lasers ein Dauerstrichsignal in den Lichtwellenleiter eingespeist und mit Hilfe des rückgestreuten Lichts die Temperatur bestimmt (DTS distributed temperature sensing). An kleinsten Inhomogenitäten in der Gitterstruktur wird das Licht reflektiert und ändert durch die Raman-Streuung seine Wellenlänge. Das rückgestreute Signal besitzt ein „Rayleigh-Anteil“ und einen sogenannten „Raman-Anteil“. Dieser „Raman-Anteil“ kann unterteilt werden in Stokes und Anti-Stokes und deren Frequenzspektrum und Wellenlänge ist abhängig von der Temperatur, da die temperaturabhängige Molekülbewegung sich proportional zur Phasenverschiebung verhält. Mittels eines Raman-Reflektometers können die Temperaturen bei Ausnutzung der Rayleigh- und Raman-Streuung im Glasfaserkabel entsprechend bestimmt werden (siehe u.a. Sass & Lehr, 2013, sowie von der Weid et. al. 1997).

3.4 Rohdaten

In den Abb. 28 bis Abb. 31 sind die „Rohdaten“ entlang des 1300 m langen Glasfaserkabels zu einem bestimmten Zeitpunkt dargestellt (gemittelte Momentaufnahme von 20 Minuten Messzeit). Dargestellt sind die Temperaturen im Frühjahr 2016 kurz nach Inbetriebnahme, im Winter 2017 während dem maximalen Energieentzug aus dem Untergrund, im Frühjahr 2017 als die Erholung des Untergrundes einsetzt und im Sommer 2017 während der Regeneration mittels Freecooling. Die Kabelabschnitte entlang den jeweiligen Erdwärmesonden A1 bis A3 und der Messsonde / Kernbohrung sind entsprechend im Diagramm markiert. Da das Kabel als Schlaufe in jeder Bohrung bzw. entlang jeder EWS verlegt ist, nimmt die Temperatur konstant bis zum tiefsten Punkt (Sondenfuss) zu und entsprechend bis zur Oberfläche wieder ab. Z.B. nimmt in Abb. 28 die Temperatur entlang der Sonde A3 ab Kabellänge 40 m bis 185 m mit zunehmender Tiefe von ca. 12°C auf ca. 16°C zu und

entsprechend mit der Kabelführung vom Sondenfuss (bei 190 m) zur Oberfläche (bei 330 m) wieder auf ca. 12°C ab.

Zu Beginn der Messungen sind die Untergrundtemperaturen in den Sonden A1 bis A3 ähnlich wie in der Kernbohrung, aber auf Grund des bereits erfolgten Energieentzugs etwas tiefer (Abb. 28). Im ersten Winter 2017 erreichen die Temperaturen die bisher tiefsten Werte von ca. 7-8°C (Abb. 29). Im Frühjahr 2017 erholt sich der Untergrund rasch wieder auf ähnliche hohe Werte wie im Jahr 2016 (Abb. 30). Abb. 31 zeigt, wie sich die Temperatur zu höheren Werten verschiebt, wenn das Freecooling aktiv ist. Weitere Daten, Auswertungen und Interpretationen werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

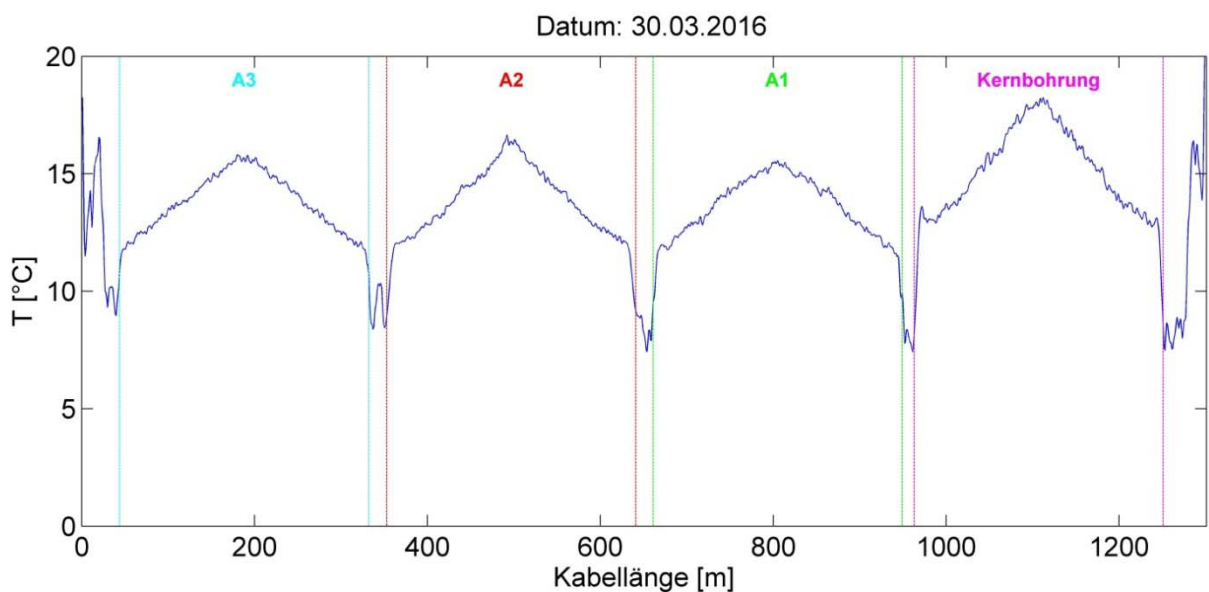


Abb. 28 Temperatur-Messwerte entlang Glasfaserkabel, Frühjahr 2016

Die blaue Kurve zeigt die Temperaturverteilung entlang dem 1300 m langen Glasfaserkabel im Ringraum. Die X-Achse entspricht der Lage entlang dem Glasfaserkabel in m und die Y-Achse der Temperatur in °C. Von ca. 40 m bis 340 m entspricht der EWS A3, von ca. 340 m bis 650 m der EWS A2, von ca. 650 m bis 960 m der EWS A1 und von ca. 960 m bis 1270 m der Kernbohrung bzw. Messsonde. Die maximalen Temperaturen in A1 bis A3 sind etwas tiefer als in der Kernbohrung, da bereits Wärme aus dem Boden entzogen wurde. Die Kernbohrung ist nicht an das Heizsystem angeschlossen und zeigt zum Zeitpunkt der Messung das ungestörte Temperatur-Tiefenprofil.

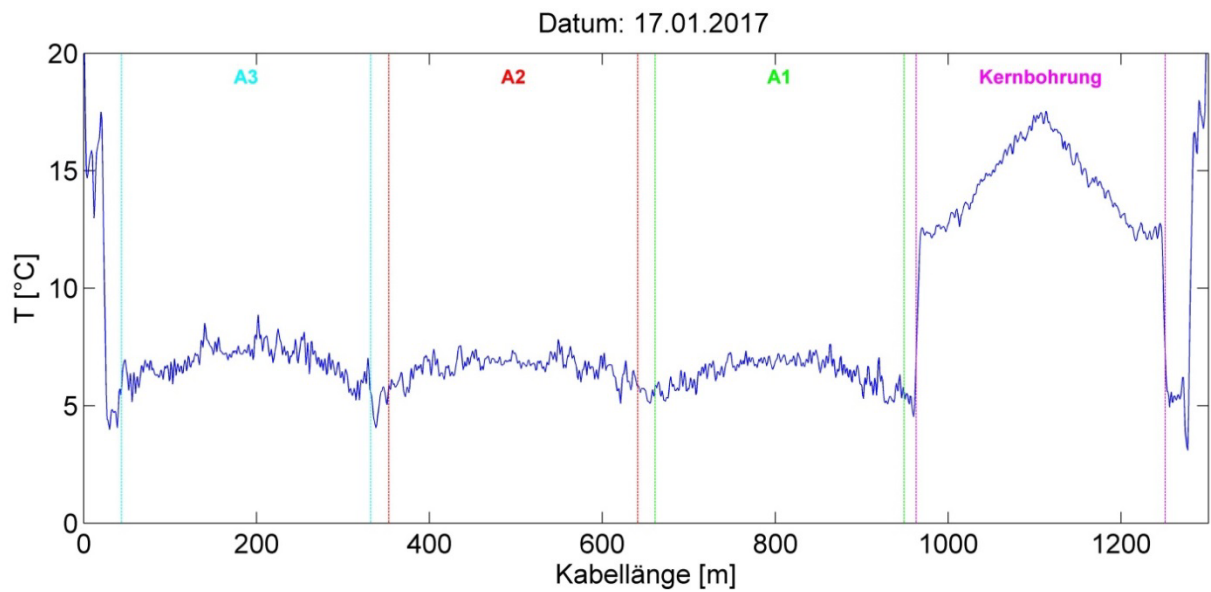


Abb. 29 Temperatur-Messwerte entlang Glasfaserkabel, Winter 2017

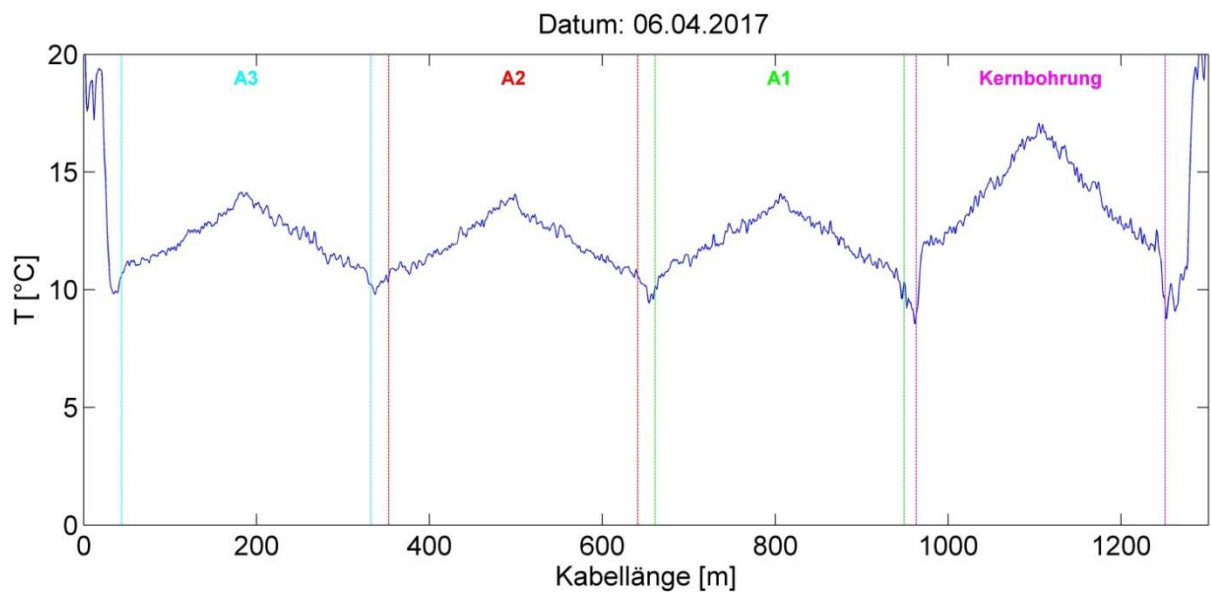


Abb. 30 Temperatur-Messwerte entlang Glasfaserkabel, Frühjahr 2017

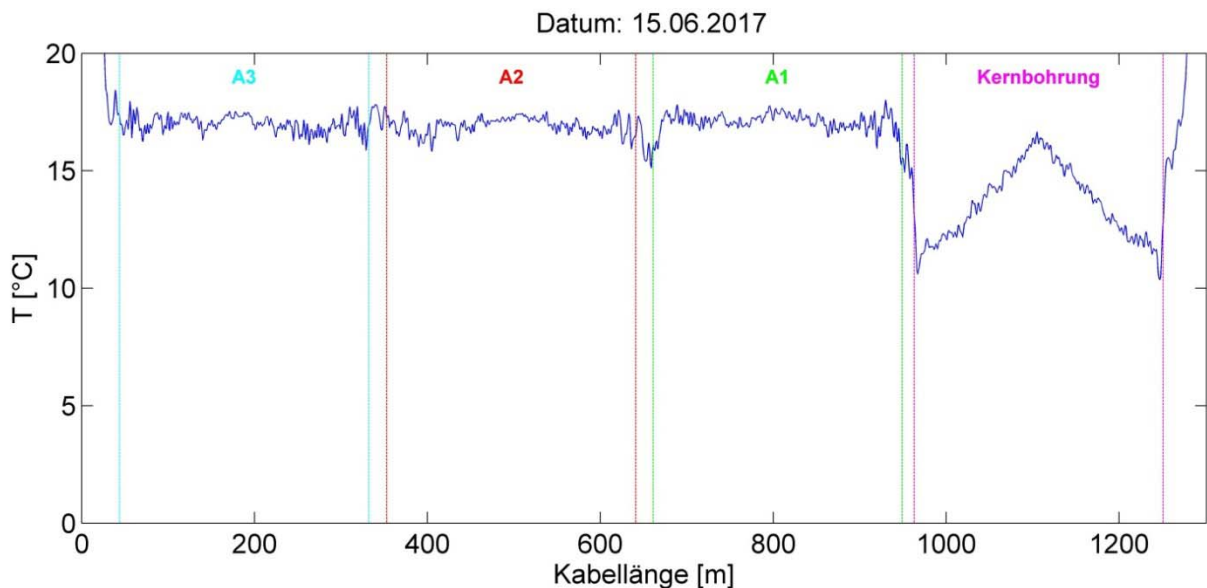


Abb. 31 Temperatur-Messwerte entlang Glasfaserkabel, Sommer 2017

3.5 Energie- und Wärmepumpendaten

Mit Wärmezählern und Datenloggern im Solekreislauf und in der Wärmepumpe werden u.a. Messwerte zu Energieentzug, Freecooling, Temperatur und Betriebsstunden erhoben (siehe Tab. 7, Tab. 8 und nachfolgende Abbildungen). Da der Sole-Wärmezähler erst im Mai installiert wurde, liegen Messparameter nur seit dieser Zeit vor.

Die Messdaten in Tab. 7 zeigen, dass der tatsächliche Wärmeentzug aus dem Untergrund für Haus A mit rund 38'000 kWh ($\approx 47'000$ kWh totale Heizenergie, inkl. elektr. Energie bei Annahme COP ≈ 5 bei Quellentemp. 5-10°C) im ersten Betriebsjahr die im Energienachweis berechnete Heizenergie von ca. 45'000 kWh pro Haus entspricht (Tab. 4 und Abb. 33). Da die Wärmepumpe durch die (noch) höheren Quellentemperaturen und tieferen Senkentemperaturen effizienter betrieben wurde, kann angenommen werden, dass die gemessenen und kalkulierten Werte ziemlich genau übereinstimmen. Der Wärmeeintrag durch das Freecooling in den Untergrund war nach der Optimierung der Einstellungen mit ca. 1850 kWh im zweiten Sommer ähnlich der geplanten von ca. 1'500 kWh (Tab. 4 und Abb. 33). Es sei angemerkt, dass die ersten konzeptionellen bzw. planerischen Kenngrössen für den Energiebezug und -eintrag viel zu hoch gewesen wären (Tab. 4)! Es scheint, dass in modernen Minergie-Wohngebäuden im Sommer die Aufheizung viel geringer ist, als häufig angenommen. Für die Dimensionierung der EWS ist dies essentiell. Eine nachträgliche Simulation mit den tatsächlichen nun gemessenen Werten für den Wärmeentzug und Wärmeeintrag bestätigt, dass die 6*145 m Sonden gemäss den Vorgaben nach SIA 384/6 ausreichen.

Die Betriebsstunden der Wärmepumpe summieren sich auf knapp 1800 Vollast-Stunden. Zusammen mit dem Warmwasser wäre dieser Wert vergleichsweise eher tief. Die Anlage wäre eher zu gross dimensioniert. Die ca. 8000 Einschaltungen des Verdichters im ersten Betriebsjahr sind sehr hoch. Normal wären 1000 bis 3000. Selbst während der sehr kalten Jahreszeit hat die WP sehr oft ein- und ausgeschaltet (Tab. 8). Dies deutet ev. auf Unstimmigkeiten bei der Wärmepumpe oder in der Wärmeverteilung hin. Dies wurde im April 2018 begutachtet und einzelne Parameter wurden angepasst (siehe auch Kapitel 0 und 2.9.3).



Tab. 7 Gemessene Energie- u. WP-Daten

Gemessener Parameter	Wert	Anmerkung
Betriebsstunden 1. Betriebsjahr	ca. 1800 Std.	(05.2016 – 05.2017) siehe Abb. 32
Anzahl Einschaltungen Verdichter 1. Betriebsjahr	Ca. 8000	(05.2016 – 05.2017) siehe Abb. 32
Wärmeentzug aus Untergrund 1. Betriebsjahr	Ca. 38'000 kWh	(06.2016 – 06.2017) siehe Abb. 33
Wärmeeintrag in Untergrund (Freecooling), 1. Sommer	Ca. 400 kWh	Sommer 2016 siehe Abb. 33
Wärmeeintrag in Untergrund (Freecooling) 2. Sommer	Ca. 1850 kWh	Sommer 2017, auf Grund System-Optimierung höherer Wert als im Sommer 2016 (vgl. Kapitel 0)

Weitere Daten zum Wärmesystem sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Während der bisher kältesten Messperiode Ende Januar 2017 wurden während 14 Tagen folgende Werte gemessen:

Tab. 8 Messwerte während kältester Messperiode (16. bis 29.01.2017)

Gemessene Parameter		
Betriebsstunden Verdichter	128 Std., durchschnittl. 9.15 Std. / Tag	
Anzahl Einschaltungen Verdichter	421, durchschnittl. 29.4 / Tag	
Wärmeentzug aus Untergrund	3508 kWh, durchschnittl. 251 kWh / Tag	
gemessene Aussentemperatur (durch Abstrahlung von Haus wärmer als Realität)	Ø 0.03°C, min. -3.53°C, max. 6.8°C Verglichen mit meteorol. Daten lag die tatsächliche Aussentemp. im Jan. 2017 am Standort ca. 3°C tiefer	
Durchschnittl. Rück- bzw. Vorlauftemperaturen in WP und Sole	gemessen in WP: ca. 3°C (Austritt Sole) ca. 7°C (Eintritt Sole)	gemessen vom Sole-Wärmezähler: ca. 2°C (Eintritt in EWS) ca. 7°C (Austritt aus EWS)
ΔT zw. Vor- u. Rücklauf	gemessen in WP: Ø ca. 1.6°C über ganze Zeit Ø ca. 3.5°C wenn WP aktiv	gemessen vom Sole-Wärmezähler: Ø ca. 2.1°C über ganze Zeit Ø ca. 5°C wenn WP aktiv

Tab. 9 Messwerte während ganzer Messdauer 2016-2017

Messparameter	Gemessen in WP:	Gemessen vom Sole- Wärmezähler:
---------------	-----------------	------------------------------------



minimalste Temperatur von Rücklauf bzw. Eintritt in EWS	0.54°C total 16 Werte <1.5°C Messintervall 5 Min.	0.63°C total 80 Werte <1.5°C Messintervall 30 Min.
minimalste Temperatur von Vorlauf bzw. Austritt aus EWS	5.05°C	5.26°C

Die Messdaten der kältesten Messperiode in Tab. 8, Abb. 34 und Abb. 35 zeigen, dass die Wärmepumpe nicht, wie generell angenommen wird, während sehr kalten Wintertagen nahezu den ganzen Tag in Betrieb ist. Durchschnittlich war die Wärmepumpe während den 2 kältesten Januar-Wochen 2017 ca. 9 Stunden pro Tag in Betrieb (siehe auch Abb. 47). Dabei lag durchschnittlich die Rücklauf-Temperatur bei ca. 2 bzw. 3°C. Die tiefste gemessene Rücklauf-Temperatur lag bei 0.54 bzw. 0.63°C. Allerdings wurden nur sehr wenige Werte mit Temperaturen <1.5°C gemessen (Tab. 9). Diese sind aber nicht aufeinander folgende Messwerte, sondern können teilweise mit dem Anfahren der Wärmepumpe korreliert werden. *Es sei angemerkt, dass der Januar 2017 gemäss Meteo Schweiz der kälteste seit 30 Jahren war (durchschnittlich -2.9°C auf der Alpennordseite unter 1000 müM). Die Mitteltemperatur in Basel lag bei -1.7°C (Norm 1.6°C). In Lausen liegen die Temperaturen auf Grund der topographischen Höhe und Schattenlage ca. 0.5-1°C tiefer.*

Die mittlere Soletemperatur lag während der kältesten Periode im Januar bei ca. 4-5°C. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf lag - solange die Wärmepumpe in Betrieb war - bei ca. 4 K. Letztere ist vergleichsweise hoch aber vom Wärmepumpensystem vorgegeben und kann nicht geändert werden. Durch einen höheren Durchfluss könnte die Spreizung minimiert werden. Allerdings läuft die Soleumwälzpumpe schon auf 100%. Ev. liegt ein Durchflussproblem im Solekreis vor. Die Qualitätsmessungen hatten gezeigt, dass die gemessenen Druckverluste in den Sonden höher waren als in der Norm vorgeschrieben.

Ergänzende Daten sind in den Abb. 36 und Abb. 37 gegeben. Es scheint, dass auf Grund einer dauerhaften Legionellen-Schutz-Einschaltung das Warmwasser ab Frühjahr 2017 durchwegs mit Hilfe einer elektrischen Zusatz-Heizung anstatt der Wärmepumpe erwärmt wurde (siehe auch Kapitel 0 und 2.9.3). Abb. 44 bestätigt diese Annahme, denn in den Monaten Juni, Juli, August 2017 wurde in Solkreislauf kein Wärmeentzug aus dem Untergrund detektiert. Der Sommerbetrieb erfolgte im 2017 von Mai bis September.

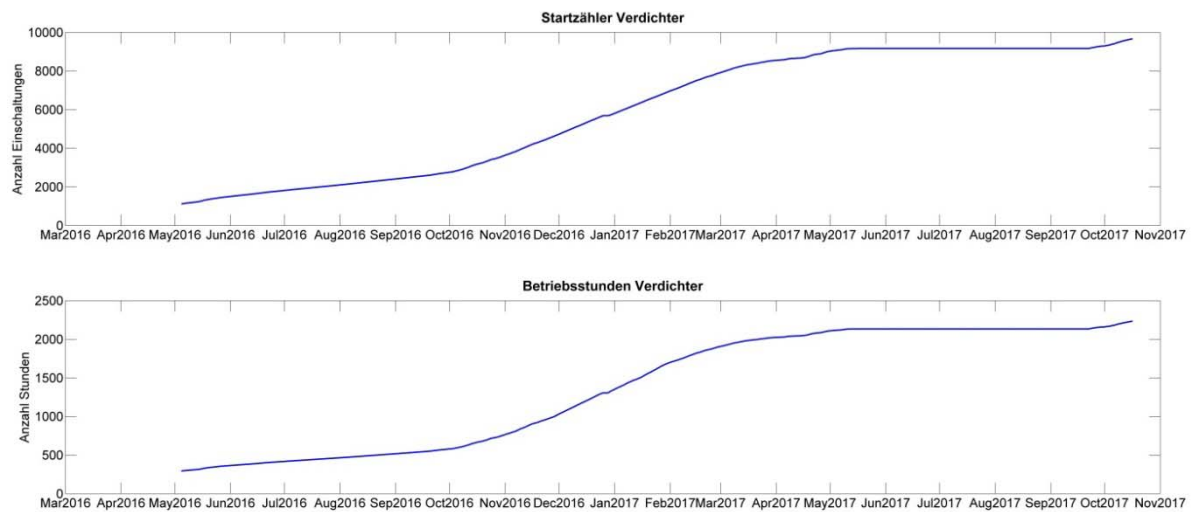


Abb. 32 Anzahl Anschaltungen & Betriebsstunden WP

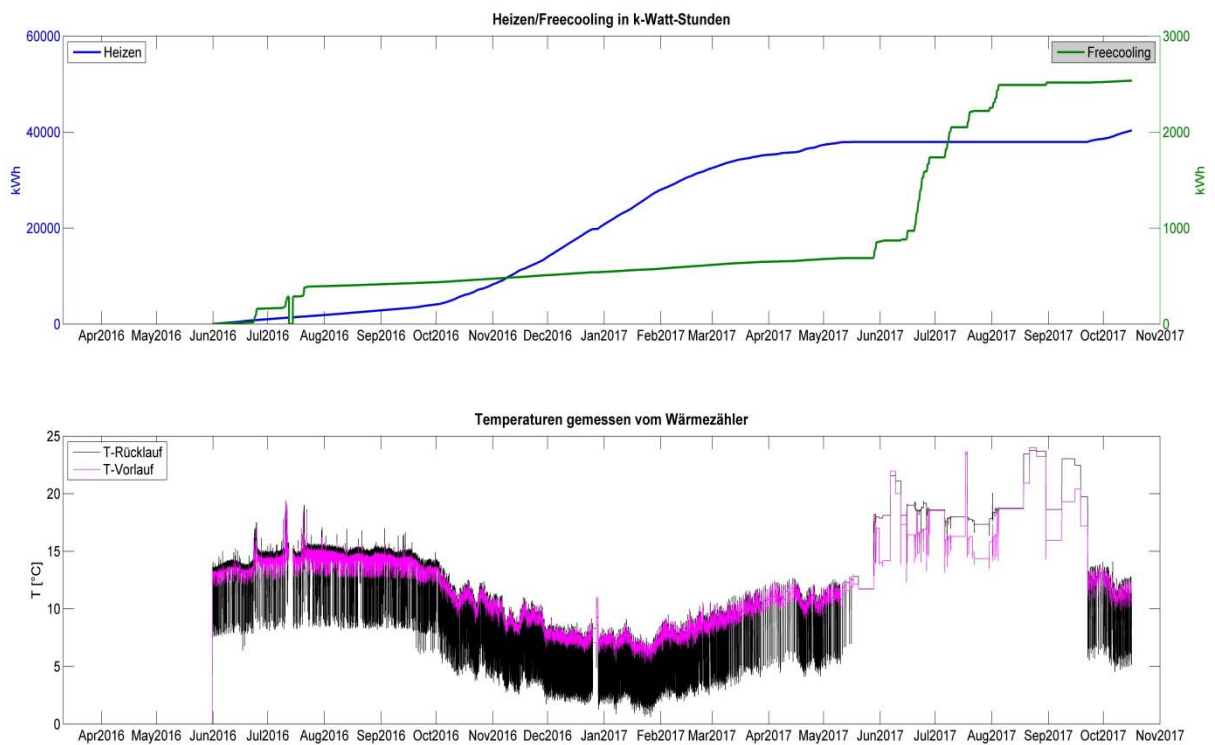


Abb. 33 Wärmeentzug aus und –eintrag in Untergrund, sowie Sole-Temperaturen

Gemessene Parameter von Sole-Wärmehähler bei Ein- bzw. Austritt in EWS. Die leicht ansteigende grüne Kurve zwischen August 2016 und Juni 2017 kann mit passivem Wärmeeintrag vom Heizungskeller erklärt werden (Glasfaser-Daten bestätigen dies!).

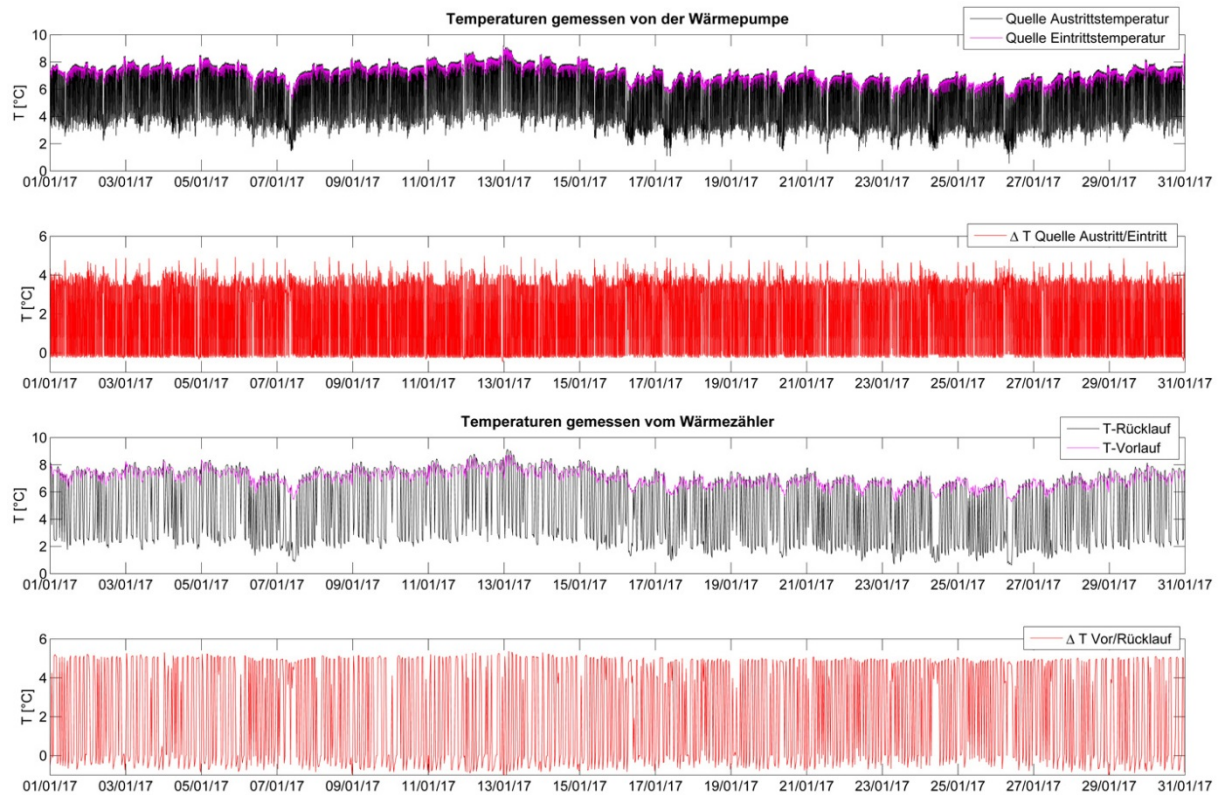


Abb. 34 Vor- und Rücklauftemperaturen Januar 2017

Oben Vor- und Rücklauf-Temperaturen gemessen in WP, darunter in Rot dazugehöriges ΔT zwischen Vor- und Rücklauf. Drittes Diagramm von oben mit Vor- und Rücklauf-Temperaturen gemessen im Sole-Kreislauf, darunter in Rot dazugehöriges ΔT zwischen Vor- und Rücklauf. Ausschnitt vom 22. & 23.01.2017 im Diagramm Abb. 35.

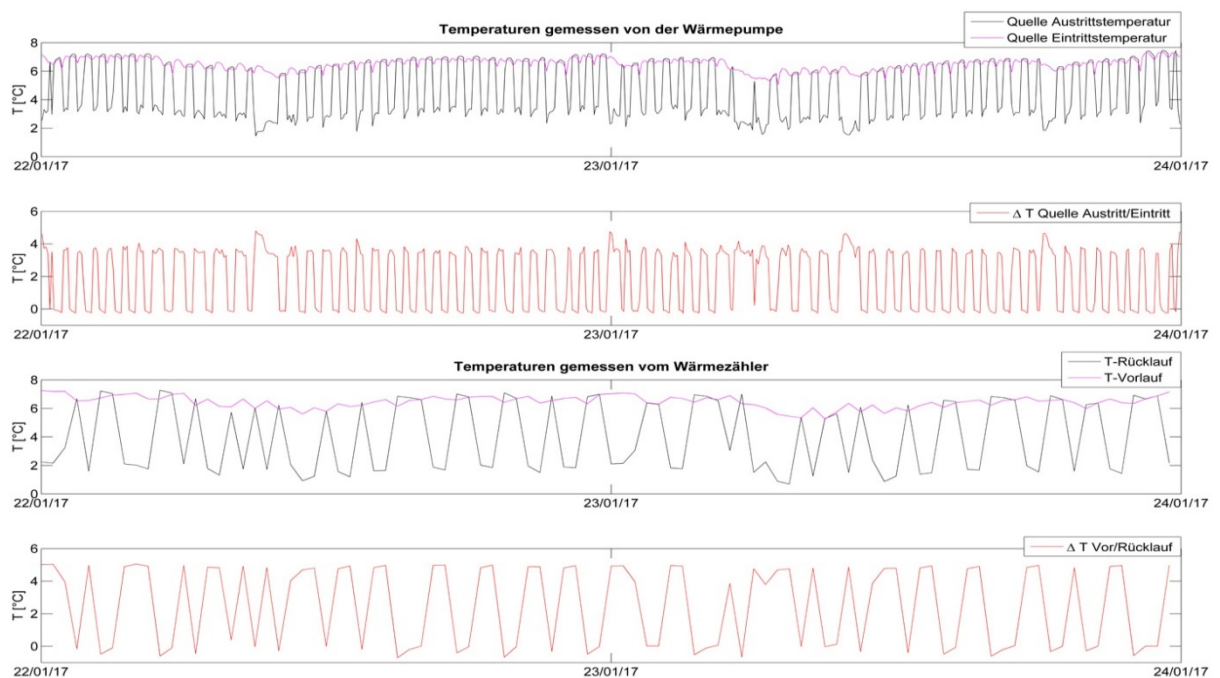


Abb. 35 Vor- Rücklauftemperaturen 22.-23.01.2017



Ausschnitt aus Abb. 34 von Vor- und Rücklauftemperaturen während einer sehr kalten und lang andauernden Kälteperiode. Gut zu erkennen ist, dass die WP trotz der Kälte nicht dauerhaft in Betrieb war. Der Unterschied im Temperaturkurvenverlauf der beiden Wärmehändler liegt daran, dass das Messintervall oben bei 5 Minuten und unten bei 30 Minuten lag.

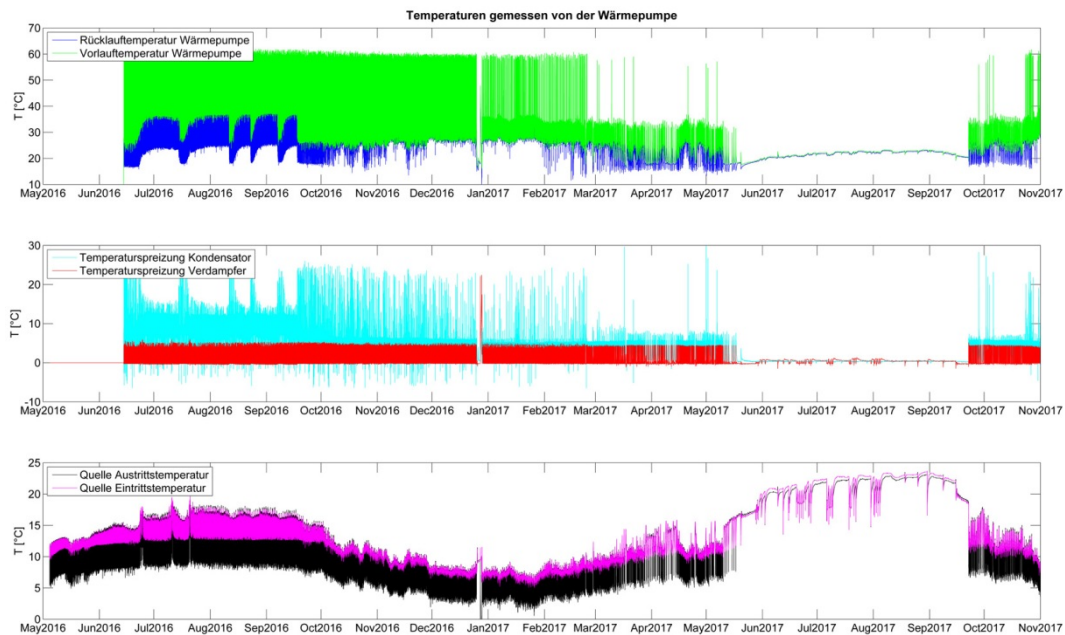


Abb. 36 Messdaten der Wärmepumpe

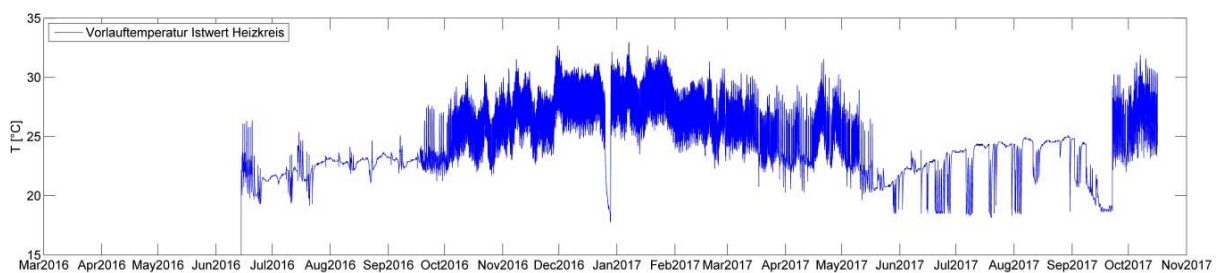


Abb. 37 Temperaturen Heizkreis



3.6 Resultate und Interpretation

3.6.1 Einleitung

Die Temperaturen aus der Glasfaserkabel-Messungen in Abb. 28 bis Abb. 31 können zur besseren vergleichenden Visualisierung als Temperatur-Tiefenprofil dargestellt werden (Abb. 38). Jede Datenkurve entspricht einer ungeglätteten Momentaufnahme der Untergrundtemperatur. Die Momentaufnahmen können sich je nach Aktivität der Wärmepumpe und deren Einsatzdauer rasch ändern. Sie können entweder ein Abbild während des aktiven Wärmeentzugs sein oder den Zustand des Untergrundes widerspiegeln, wenn die Wärmepumpe einige Stunden nicht in Betrieb war.

Da die Abb. 38 schnell sehr unübersichtlich würde, wenn man viele solcher Temperaturtiefenprofile über einen längeren Zeitraum darstellt, haben wir die Darstellung aller Daten vom Zeitraum März 2016 bis Oktober 2017 gemäss Abb. 39 gewählt. Diese zeigt den gesamten Datensatz aller Messdaten. Jeder Messpunkt zu einem bestimmten Zeitpunkt und in definierter Tiefe in diesem Diagramm spiegelt eine mit dem Laser-Glasfaser-Messsystem ermittelte Temperatur wider. Für jede Tiefe ist die Temperatur als ein Mittel von einer 20 Minuten andauernden Messperiode dargestellt. Basierend auf dieser Darstellung lassen sich Änderungen in der Temperatur vierdimensional, also mit der Zeit sowie räumlich erkennen und können Synthese-Diagramme abgeleitet werden.

3.6.2 Langfristige Temperaturentwicklung

In diesem Kapitel wird die langfristige Temperaturentwicklung beschrieben und interpretiert. Wenn nicht anders beschrieben, beziehen sich die Temperaturen auf die „im Glasfaser“ bzw. im Ringraum zwischen Bohrlochwand und Sondenrohr gemessenen Temperaturen. Die kurzfristigen Temperaturschwankungen und deren Aussagen werden im Kapitel 3.6.3 behandelt. Die Abb. 39 bis Abb. 42 zeigen die Temperaturentwicklungen in den 3 aktiven EWS A1 bis A3 und in der Messsonde in der Kernbohrung über den Zeitraum März 2016 bis Oktober 2017. 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. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse beschrieben und diskutiert. Da die Temperaturentwicklung in den 3 Sonden A1 bis A3 nahezu identisch ist, wird nur der Datensatz der Sonde A1 in Abb. 41 seitenfüllend dargestellt.

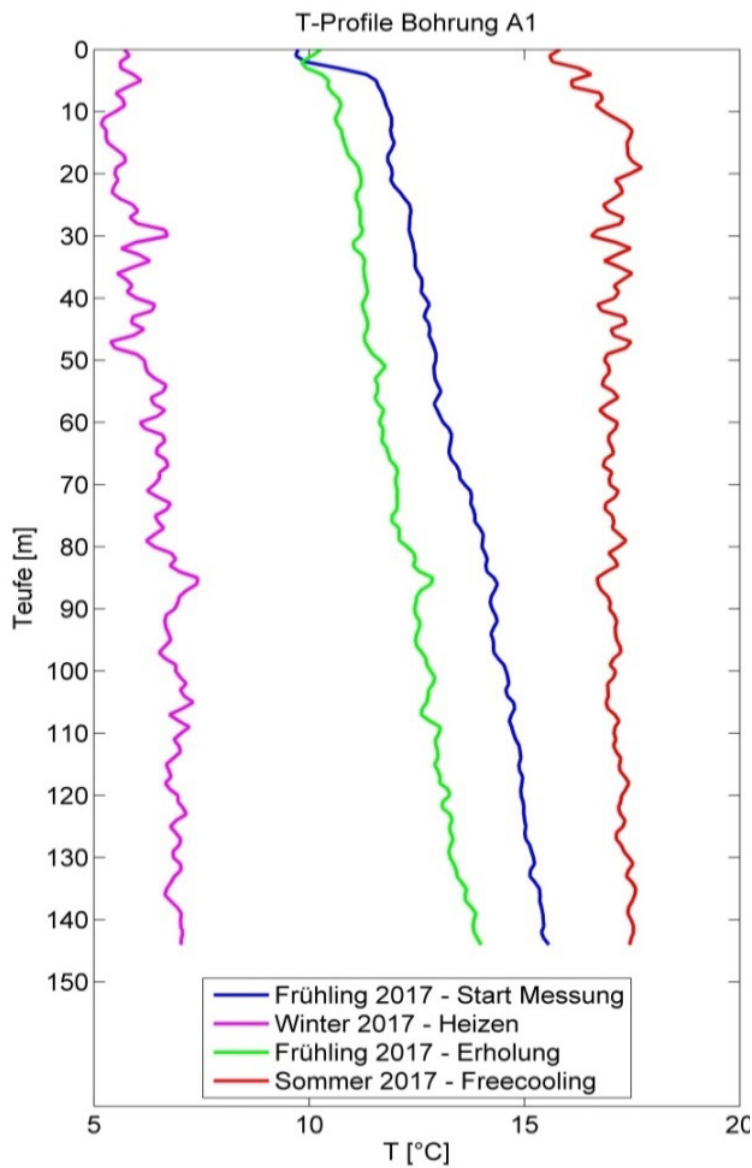


Abb. 38 Temperaturtiefenprofile

Die Daten dieser Abbildung entsprechen denen in Abb. 28 bis Abb. 31 für die EWS A1. Sie stellen eine Momentaufnahme der Ringraumtemperatur über die Tiefe dar. In Blau die Temperaturen kurz nach Einschalten des Wärmepumpensystems im Frühjahr 2016. Die Temperaturen erreichen im Winter 2017 (pink) ein Minimum von ca. 7°C. Diese erholen sich im Frühjahr 2017 rasch. Auf Grund des Wärmeeintrags durch Freecooling übersteigen die Temperaturen die Anfangswerte im Frühjahr 2016.

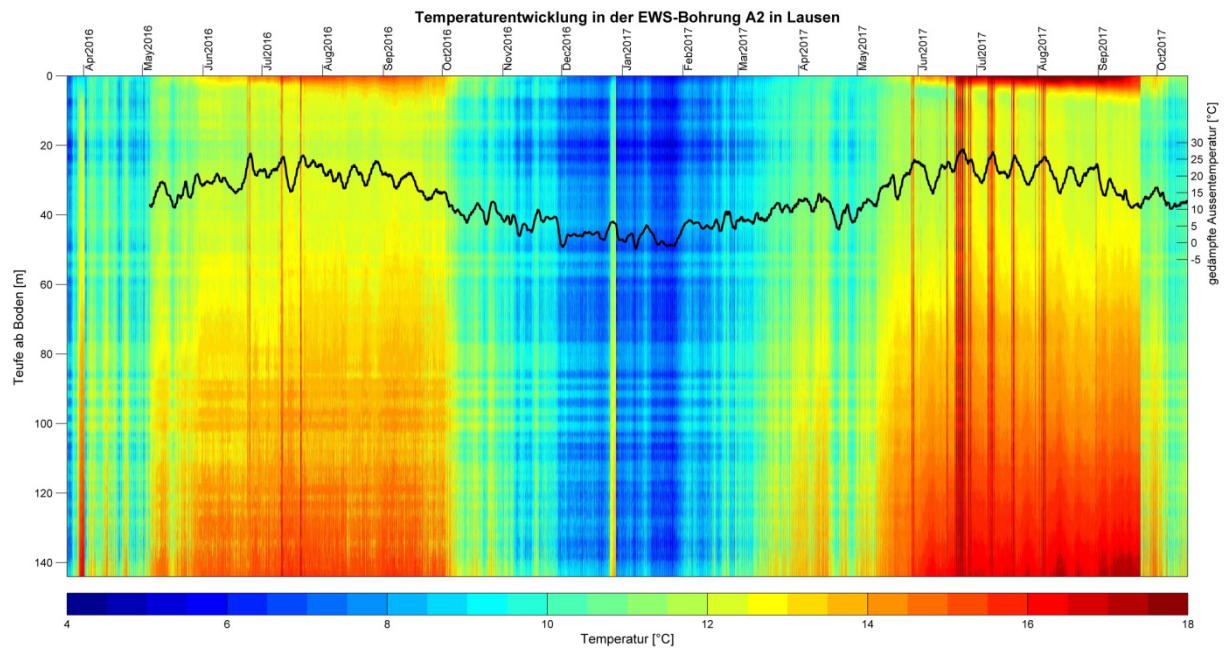


Abb. 39 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A2

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.

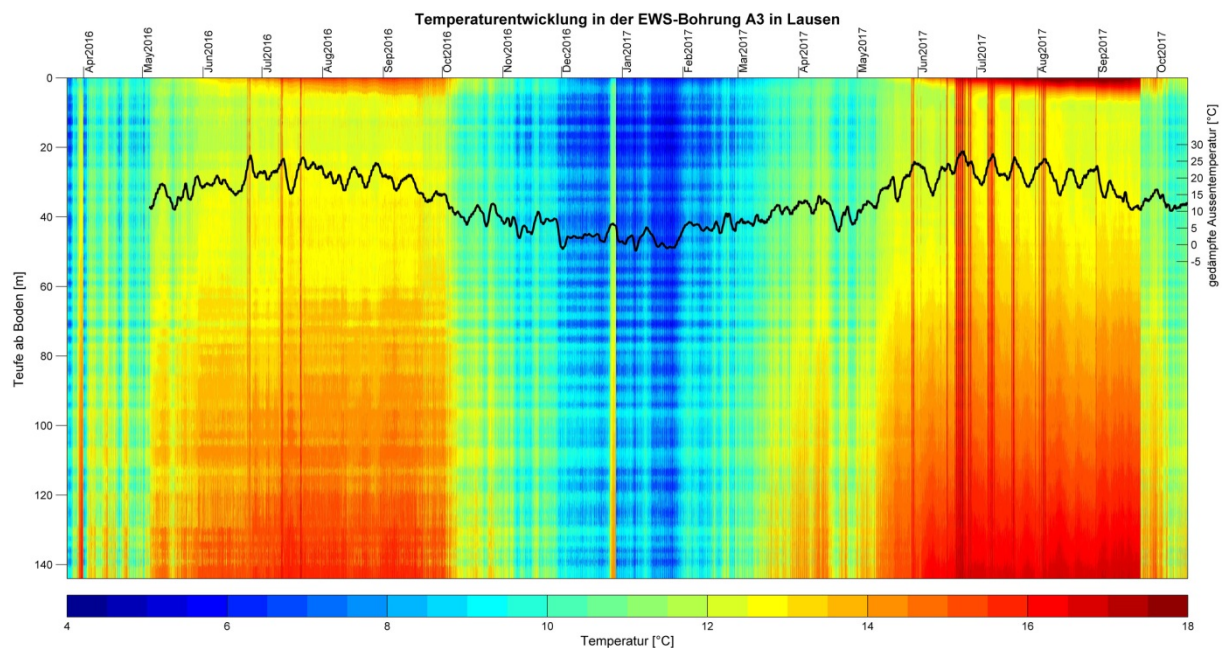


Abb. 40 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A3

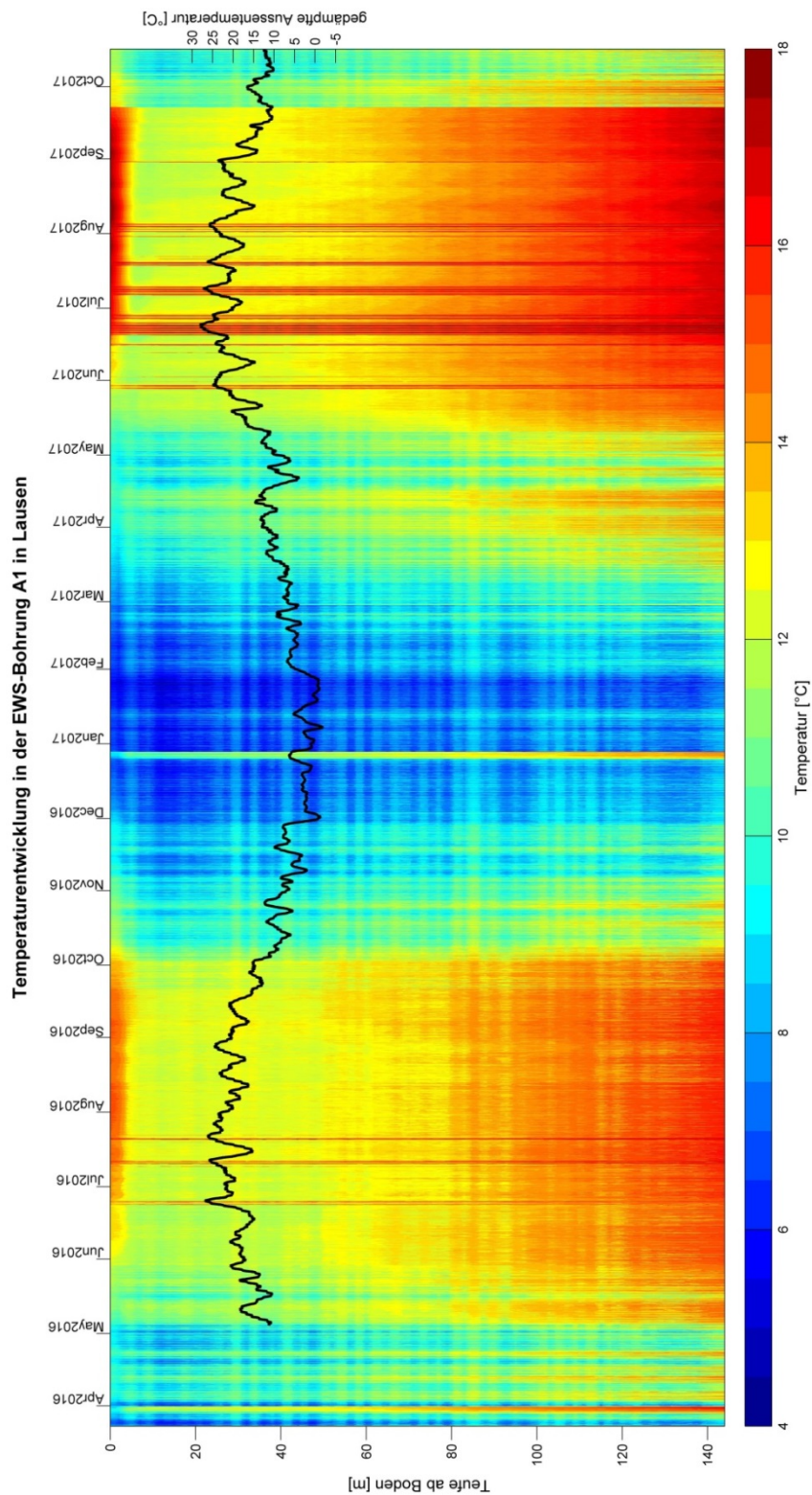


Abb. 41 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A1

Während der Heizphase wird eine Ringraumtemperatur von 7-8°C erreicht. Diese erholt sich bis zum Sommer rasch. Der Ausfall der Wärmepumpe über Weihnachten 2016 zeigt, wie schnell sich der Nahbereich erholt hat. Freecooling ist anhand der roten Linien erkennbar und war im 2. Sommer auf Grund von technischen Anpassungen effektiver.

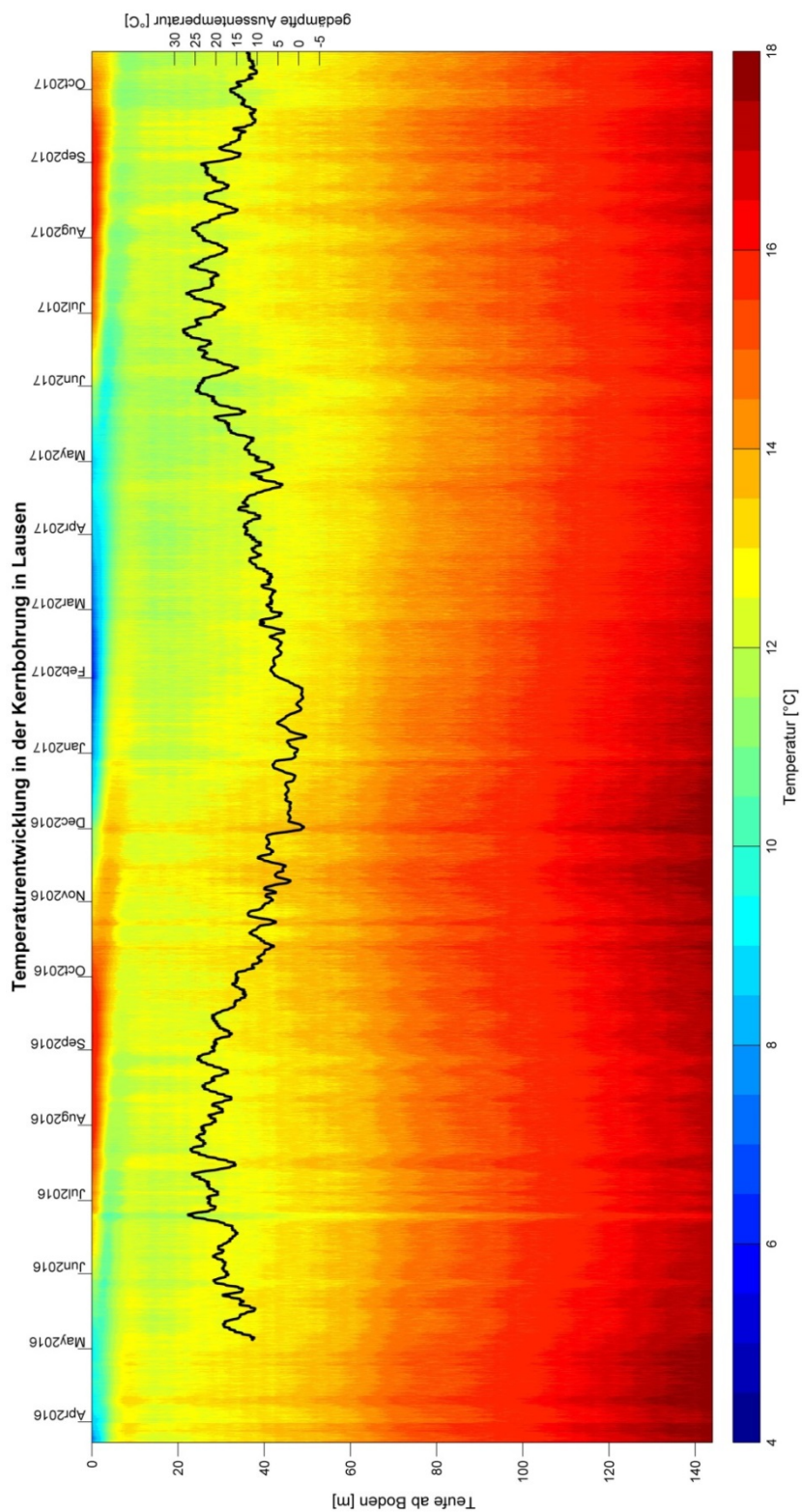


Abb. 42 Entwicklung Untergrundtemperatur in Messsonde der Kernbohrung

Da die Messsonde nicht aktiv zur Wärmeerzeugung beiträgt, sind die Untergrundtemperaturen gegenüber den aktiven Sonden gleichbleibend. Die leicht kühleren Temperaturen von ca. 0.5°C im 2. Jahr könnten auf einen Durchschlag der Kältefahne von der EWS A1 hindeuten. Die verzögerte jahreszeitliche Temperaturfront von der Oberfläche her reicht bis in eine Tiefe von ca. 8.5 m.

Ungestörte Untergrundtemperatur:

Abb. 43 zeigt die ungestörte Untergrundtemperatur in der Messsonde vor der Inbetriebnahme und über den Messzeitraum vom März 2016 bis Oktober 2017. Da die Temperaturen vor und seit März 2016 mit unterschiedlichen Messtools gemessen wurden, sind die Kurven nicht ganz deckungsgleich, stimmen aber nahezu überein. Die Temperatur-Tiefenprofile in der Messsonde zeigen, dass auf Endtiefe eine maximale Temperatur von rund 17.5°C vorliegt. Die mittlere Oberflächentemperatur liegt bei ca. 11°C. Daraus ergibt sich ein mittlerer thermischer Gradient von vergleichsweise hohen 4.3°C pro 100 m. Zwei mögliche Erklärungen für diesen hohen Gradienten sind zum einen der regional erhöhte geothermische Gradient, sowie der Einfluss der vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit der anstehenden Schichten, welche den Wärmefluss von unten „stauen“.

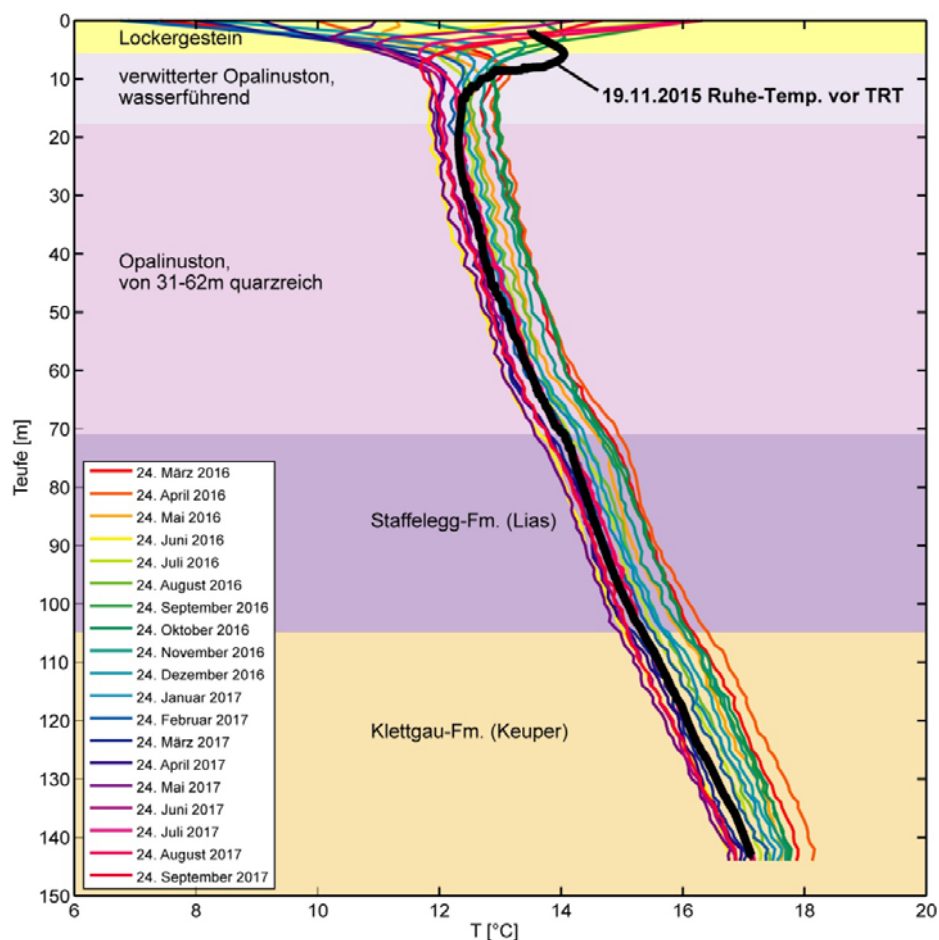


Abb. 43 Temperaturtiefenprofile in Messsonde

Die Variation der monatlichen Tiefenprofile ist (noch) vergleichsweise gering mit einer Tendenz zu tieferen Temperaturen mit der Zeit. Der mittlere geothermische Gradient liegt bei ca. 4.3°C/100m. Gut erkennbar sind die Änderungen im Temperaturgradient abhängig von der Lithologie bzw. der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins. Die saisonale Eindringtiefe der jahreszeitlichen Temperaturänderungen liegt bei ca. 8.5 m.

Die lithologischen Änderungen am Übergang Opalinuston – Lias sowie Lias – Keuper spiegeln sich auch im Temperaturgradienten wider (Abb. 43) und können mit Unterschieden in der Wärmeleitfähigkeit erklärt werden (tonigere Lagen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit und karbonat- bzw. quarzreichere Lagen mit höheren Wärmeleitfähigkeiten). Da abgesehen vom Top Opalinuston



alle Schichten dicht sind und keinen Grundwasserfluss gezeigt haben, können die Änderungen nicht einem möglichen zirkulierenden Grundwasser zugeordnet werden. Vergleiche dazu auch Abb. 15 und Kapitel 2.5. Die jahreszeitlichen bzw. klimabedingten Temperaturänderungen haben einen Tiefeneinfluss von ca. 8.5 m von der Oberfläche her (siehe Abb. 43 und nachfolgenden Absatz).

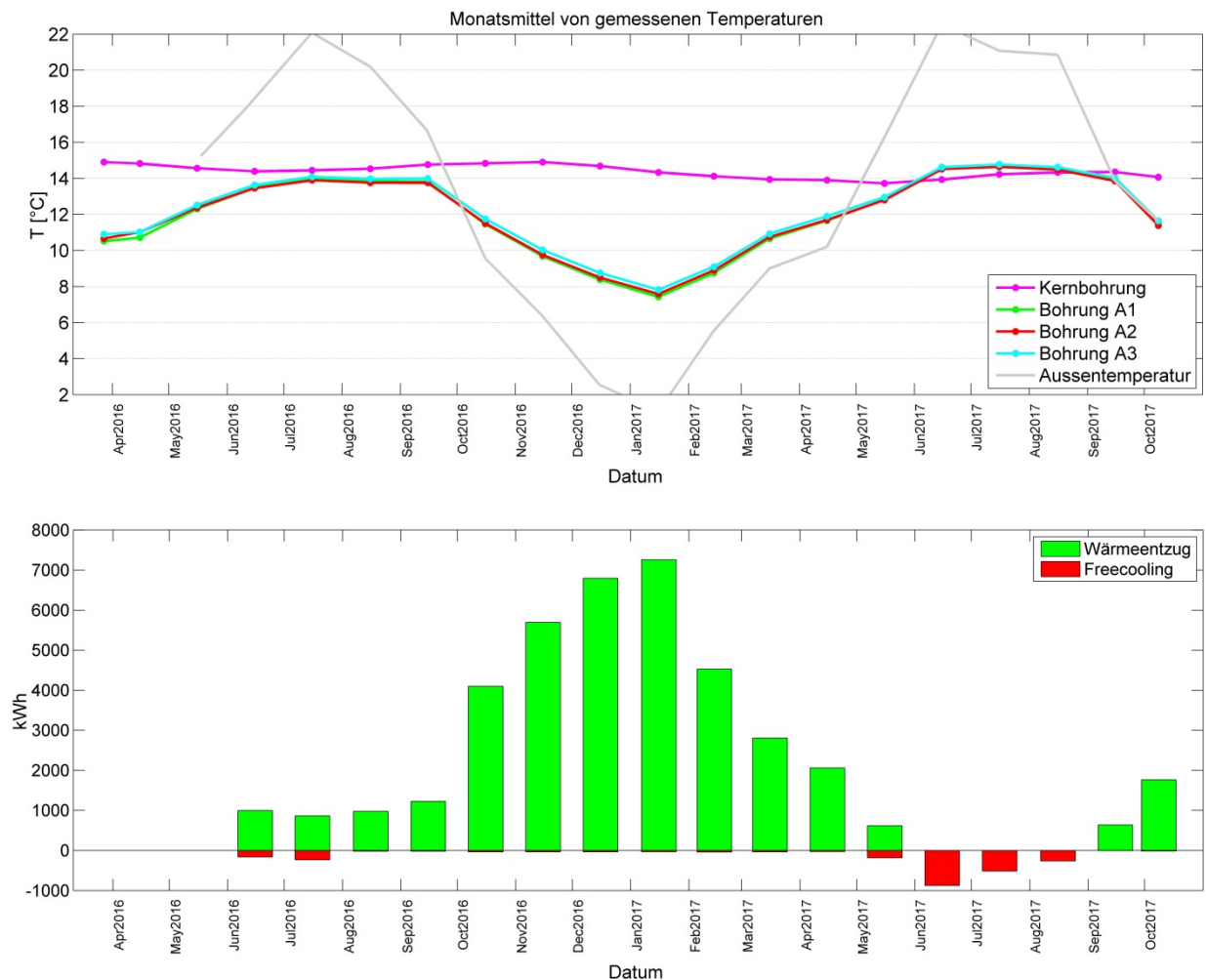


Abb. 44 Korrelation Monatsmitteltemperaturen mit Wärmeentzug / -eintrag

Oben 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 unteren Diagramm werden der Wärmeentzug in kWh aus dem Untergrund (grün) und die Wärmerückgabe durch Freecooling (rot) gegenüber gestellt. Dargestellt sind die Daten seit Inbetriebnahme der Wärmepumpe und der Messungen im März 2016 bis Mitte Oktober 2017. Die gemittelten Temperaturen in der nicht aktiven Messsonde in der Kernbohrung (pink), welche ca. 3 m von der EWS A1 entfernt liegt, sind im zweiten Jahr um ca. 0.5°C kühler. Ein Grund dafür kann der Durchschlag der Kältefahne von der benachbarten EWS sein. Gemäss Daten kam es im Sommer 2017 zu keinem Wärmeentzug (siehe Text).

Wärmeentzug und Temperaturentwicklung allgemein:

Die Abb. 39 bis Abb. 41 der 3 EWS zeigen eine sehr ähnliche Entwicklung der Untergrundtemperaturen. Die Heizperiode ist mit den Blautönen gut zu erkennen. Dabei erreicht die Untergrundtemperatur im Nahbereich / Ringraum der Sonden mittlere minimale Temperaturen von ca.



7-8°C. Im ersten Winter 2016/2017 wurden die kältesten Untergrundtemperaturen Ende Januar während einer langen Kaltphase gemessen (kältester Januar seit 30 Jahren). Während dieser zweiwöchigen Phase war die Wärmepumpe gesamthaft 128 Stunden in Betrieb und hat dem Untergrund 3508 kWh Wärme entzogen. In ca. 15 m Tiefe wurden die kurzfristig kältesten Temperaturen von ca. 4.5°C im Ringraum gemessen. In grösserer Tiefe lagen die tiefsten Temperaturen bei ca. 5 bis 6°C.

Im Frühjahr 2017 hat sich der Untergrund mit abnehmendem Heizbetrieb rasch erholt und erreicht im Mai wieder ähnliche gemittelte Temperaturen wie im Jahr zuvor (siehe Abb. 44). Gut zu erkennen sind auch die Kälteeinbrüche im April 2017. Die rasche und vollständige Regeneration zeigt, dass im ersten Winter nur der Nahbereich um die Erdwärmesonden abgekühlt wurde. Dies wird durch die Messdaten an Weihnachten 2016 bestätigt, als die Wärmepumpe vom 25. - 28.12.2016 ausgefallen ist. Nach dem Ausfall der Wärmepumpe hatten sich die Untergrundtemperaturen bereits nach dem ersten Ausfalltag grösstenteils wieder erholt (siehe auch Kapitel 3.6.3). Die Änderungen durch den Wärmeeintrag durch Freecooling werden nachfolgend beschrieben.

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. 42 und Abb. 43). Die Beeinflussung durch die Jahreszeiten reicht ca. 8.5 m tief in den Untergrund. Auf der Abb. 42 erkennt man deutlich, wie z.B. die Wärmefront im Sommer 2016 langsam von der Oberfläche her in den Untergrund wandert und ab November 2016 von der Oberfläche her wieder durch die tieferen Wintertemperaturen sukzessive bis in den Februar 2017 abgekühlt bzw. neutralisiert wird.

In weit die Grundwasser führende Schicht des verwitterten Opalinuston auf die Untergrundtemperatur einen Einfluss hat, kann erst eindeutig mit längerfristigen Messungen definiert werden. Die vergleichsweise scharfe Grenze der jahreszeitlichen Beeinflussung am Top vom Opalinuston bei ca. 8.5 m (Abb. 43), 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.

Auf Grund der noch kurzen Laufzeit der Messungen kann der Einfluss der Geologie oder der benachbarten Sonden noch nicht definiert werden.

Abb. 44, Abb. 36 und Abb. 37 zeigen, dass die Warmwasser-Erzeugung nicht durch den Wärmeentzug über den Solekreislauf erfolgt ist (kein Wärmeentzug aus Untergrund). Das Warmwasser wurde auf Grund einer dauerhaften Einschaltung des Legionellen-Schutzes mit einer zusätzlichen elektrischen Heizung erzeugt (siehe auch Kapitel 0 und 2.9.3).

Wärmeeintrag durch Freecooling:

Seit Messbeginn konnten zwei Sommer mit Wärmeeintrag überwacht werden. Die Wärmeeinträge von Sommer 2016 und 2017 durch Freecooling unterscheiden sich deutlich. Im ersten Sommer wurden nur ca. 400 kWh und im zweiten Sommer ca. 1850 kWh Wärme in den Untergrund zurückgeführt. Wenn man Abb. 33, Abb. 41 und Abb. 45 betrachtet, so fällt auf, dass im ersten Sommer der Wärmeeintrag nur wenige Male und kurz im Juni und Juli erfolgte. Im zweiten Sommer erfolgte der Wärmeeintrag von Ende Mai bis Ende August mit 28x viel häufiger und intensiver. Der Unterschied kann mit weniger ausgeprägten Wärmephasen bzw. einem kühleren Sommer oder mit den Änderungen am Wärmesystem erklärt werden. Unter anderem wurden die Sperrzeiten sowie die Komforttemperaturen reduziert (siehe Kapitel 0).

Es verwundert nicht, dass auf Grund der Anpassungen das Freecooling im zweiten Sommer effektiver war und somit auch die Ringraumtemperatur im zweiten Sommer höher liegt als im ersten Sommer (Abb. 44 und Abb. 45). Der Unterschied liegt bei ca. 1°C. Im zweiten Sommer wurde eine mittlere maximale Untergrundtemperatur über die ganze Tiefe von ca. 15°C erreicht.



Abb. 39 bis Abb. 45 zeigen, dass trotz des wärmeren Untergrunds Ende Sommer 2017 die Untergrundtemperatur mit Einsetzen der Heizphase im Oktober rasch ähnliche Werte erreichen wie im ersten Herbst 2016. Die Wärmefront durch den Wärmeeintrag ist folglich nicht weit in den Untergrund eingedrungen. Die Eindringtiefe bzw. schnelle Erholung korreliert mit der Temperaturentwicklung während des Ausfalls der Wärmepumpe im Dezember 2016! Vergleicht man die eingetragene Energie durch Freecooling mit der entzogenen durch den Wärmeentzug im September und bis Mitte Oktober 2017, so liegt nahe, dass die eingebrachte Energie schnell wieder entzogen wurde (Abb. 44).

Das kurzfristige Verhalten während des Wärmeeintrags durch Freecooling ist in Kapitel 3.6.3 beschrieben.

Ausbreitung Kältefahne um EWS A1:

Vergleicht man Abb. 42 bis Abb. 45 so wird sofort ersichtlich, dass die Untergrundtemperatur in der Messsonde viel homogener ist und weniger schwankt. Dies liegt daran, dass die Sonde nicht aktiv an das Wärmesystem angeschlossen ist.

Es fällt aber auch auf, dass die Untergrundtemperaturen im zweiten Jahr tendenziell um ein halbes Grad tiefer liegen (Abb. 44). 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 muss. 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 nach dem 1. Winter in der 3 m entfernten Messsonde gering ist.

In Abb. 44 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 (Maximalwert ca. 2-3 Monate und Minimalwert ca. 4 Monate versetzt). 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. 42 und Abb. 43). Z.B. benötigt die sommerliche Wärmefront von der Oberfläche her ebenfalls 2 bis 3 Monate bis sie den Untergrund in 5-8.5 m Tiefe erwärmt.

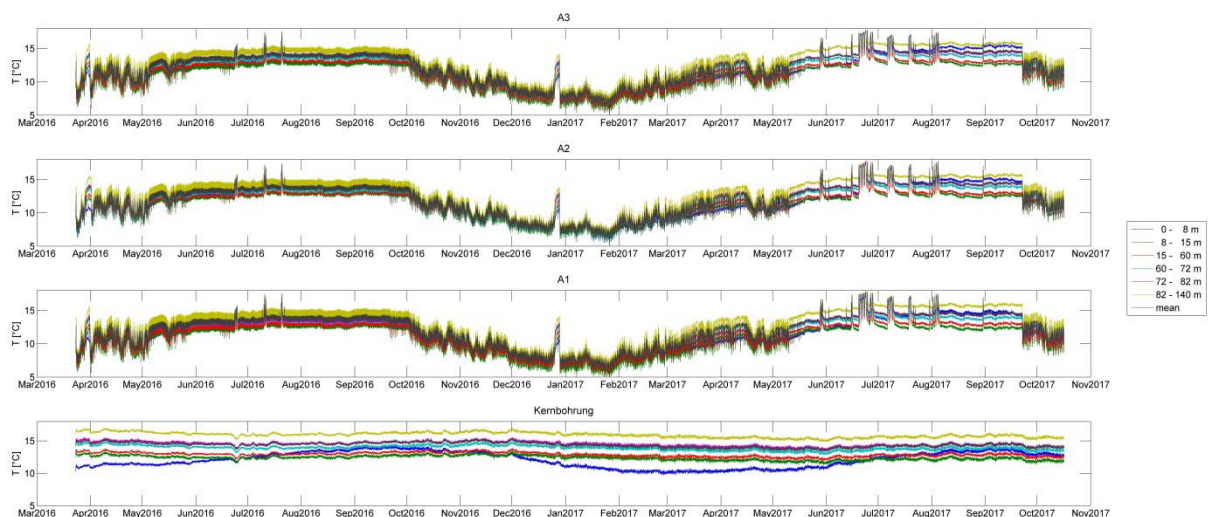


Abb. 45 Temperaturentwicklung pro Teufenintervall und Sonde

Dargestellt ist die Untergrundtemperatur gemittelt für verschiedene Tiefenintervalle (siehe Legende) über den Zeitraum März 2016 bis Oktober 2017. Von oben nach unten sind die Temperaturentwicklungen in der Sonde A3, A2, der zur Kernbohrung nächsten Sonde A1 und in der Messsonde in der Kernbohrung aufgetragen. Die Optimierungen am Wärmesystem (Kapitel 0) spiegeln sich ab Mai 2017 in ruhigeren Datenkurven wider, sowie einem effektiveren Freecooling im 2. Sommer. Der Ausschlag Ende Dezember 2016 ist auf einen Ausfall der Wärmepumpe zurückzuführen. Während im Sommer die Temperaturen der Tiefenintervalle gut zu unterscheiden sind, verschmelzen diese im Winter auf Grund der längeren und häufigeren Laufzeit der Wärmepumpe zu einer Kurve.

Unterschiede zwischen Sonden A1 bis A3:

Die Temperaturentwicklung im Ringraum der drei aktiven Sonden ist leicht unterschiedlich. Im Winter zeigt die Sonde A3 0.2 bis 0.3°C wärmere Durchschnittstemperaturen im Ringraum als in den Sonden A1 und A2 (Abb. 44 und Abb. 46). Zudem ist die Temperaturspreizung im Ringraum der Sonde A2 in den Wintermonaten deutlich kleiner als in den Sonden A1 und A3.

Wenn man davon ausgeht, dass die Geologie, Grundwassereinfluss und die Hinterfüllung bei allen drei Sonden gleich ist und die gegenseitige Beeinflussung auf Grund der weiten Abstände noch nicht greift, so kommen nur folgende mögliche Erklärungen für die unterschiedlichen Ringraumtemperaturen in Frage:

- verschiedene Zulaufängen vom Verteilerschacht bis Sonde:
A1 ca. 14 m, A2 <2 m, A3 ca. 10 m
- variierender Durchfluss durch Sonde:
Die Durchflussprüfungen haben ergeben, dass der Durchfluss verschieden ist (Kapitel 2.7); Sonde A1 zeigt bessere Werte als A2 und A3. Allerdings ist jede Sonde mit einem Tacosetter versehen, sodass der Durchfluss geregelt sein sollte.

Genau mit einander vergleichen lassen sich nur A1 und A3, da beide ungefähr die gleiche Zulaufänge haben. Auf Grund der besseren Durchflusswerte von A1 wird diese Sonde mehr belastet. Dies kann die kälteren Ringraumtemperaturen erklären.

Warum A2 eine geringere Temperaturspreizung im Ringraum von A2 zeigt, kann mit der kürzeren Zulaufänge oder ev. mit einer näheren Lage des Glasfaserkabels am Sondenrohr oder in der Mitte von den 4 Sondenrohren erklärt werden. Somit wäre der puffernde Einfluss vom Zement oder dem Sondenvolumen geringer.

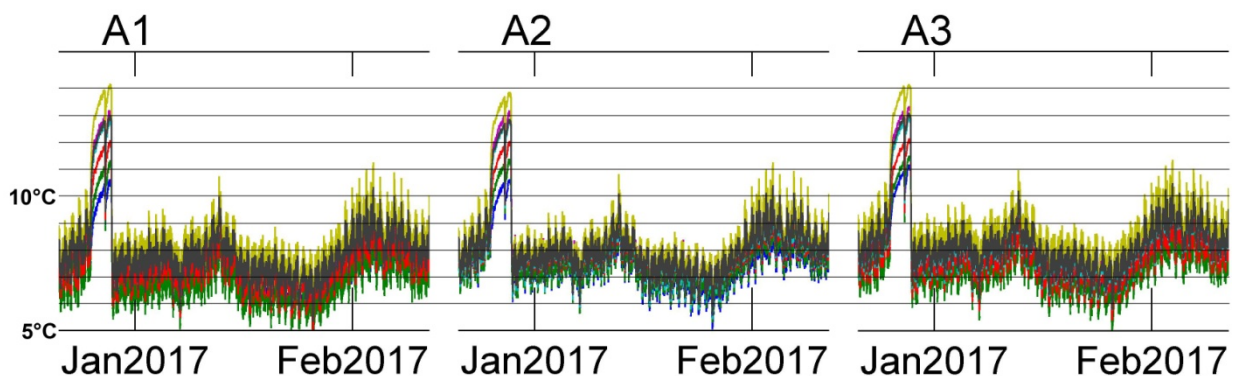


Abb. 46 Temperaturvergleich Sonden A1 bis A3

Die Ringraumtemperatur unterscheidet sich in den 3 aktiven Sonden. Dargestellt sind die gemittelten Temperaturen für verschiedene Tiefenintervalle (Farbskala siehe Abb. 45) über den Zeitraum Dez.2016 bis Feb. 2017. Im Ringraum von A1 werden gesamthaft leicht tiefere Temperaturen als in A2



und A3 gemessen (vgl. auch mit Abb. 44). Die Temperaturspreizung ist in A2 geringer als in A1 und A3.

3.6.3 Kurzfristige Temperaturentwicklung

Im Nachfolgenden wird beschrieben, wie das kurzfristige Verhalten der Wärmepumpe ist (z.B. Einschaltungen und Betriebszeiten am Wintertag) und wie schnell sich die Temperatur im Ringraum der Sonden regeneriert (z.B. nach Ausfall der Wärmepumpe an Weihnachten 2016 oder Wärmeeintrag im Sommer 2017).

In Abb. 47 wird verglichen, wie oft und lange die Wärmepumpe an einem äusserst kalten Tag, an einem normalen Wintertag und am Ende der Heizperiode in Betrieb ist. Bei der Dimensionierung von EWS wird generell davon ausgegangen, dass die Wärmepumpe an sehr kalten Tagen bzw. bei Auslegungstemperatur praktisch den ganzen Tag in Betrieb ist. Die Abb. 47 und auch Abb. 35 zeigen aber, dass trotz des seit 30 Jahren kältesten Januars die Wärmepumpe kaum mehr als die Hälfte des Tages in Betrieb war, wobei sie rund 35 Mal verteilt auf den ganzen Tag anschaltete. Die Fehlersuche und Optimierungen im April 2018 haben gezeigt, dass diese beschriebene Tatsache ev. mit nicht optimalen Einstellungen von Parametern im Wärmepumpensystem und zusätzlich mit einer nicht optimalen hydraulischen Einbindung erklärt werden können (siehe auch Kapitel 0 und 2.9.3). Die folgenden Messdaten werden dies beantworten. Zudem kann geschlossen werden, dass die Wärmepumpe ev. zu leistungsstark ausgelegt ist.

An einem normalen Wintertag läuft die Wärmepumpe nur noch weniger als 6 Stunden am Tag, tendenziell eher am Morgen und schaltet dabei rund 25 Mal an. Dabei ist die Wärmepumpe, wie im Winter vergleichsweise immer nur kurz in Betrieb. Im Mai läuft die Wärmepumpe nur noch eine Stunde am Morgen mit weniger als 10 Anschaltungen. Beachtet sei, dass im vorliegenden Fall ein 800 Liter Pufferspeicher für die Heizung zwischengeschaltet ist und somit Ein- und Ausschaltungen puffern sollte. Die vielen Einschaltungen und kurzen Betriebszeiten lassen sich auf ungenügende Parametereinstellungen (siehe Anpassungen, Kapitel 0) zurückführen, sowie ev. auch auf einen Pufferspeicher, der nicht ideal angeschlossen ist und folglich zu starke Durchmischungen zulässt.

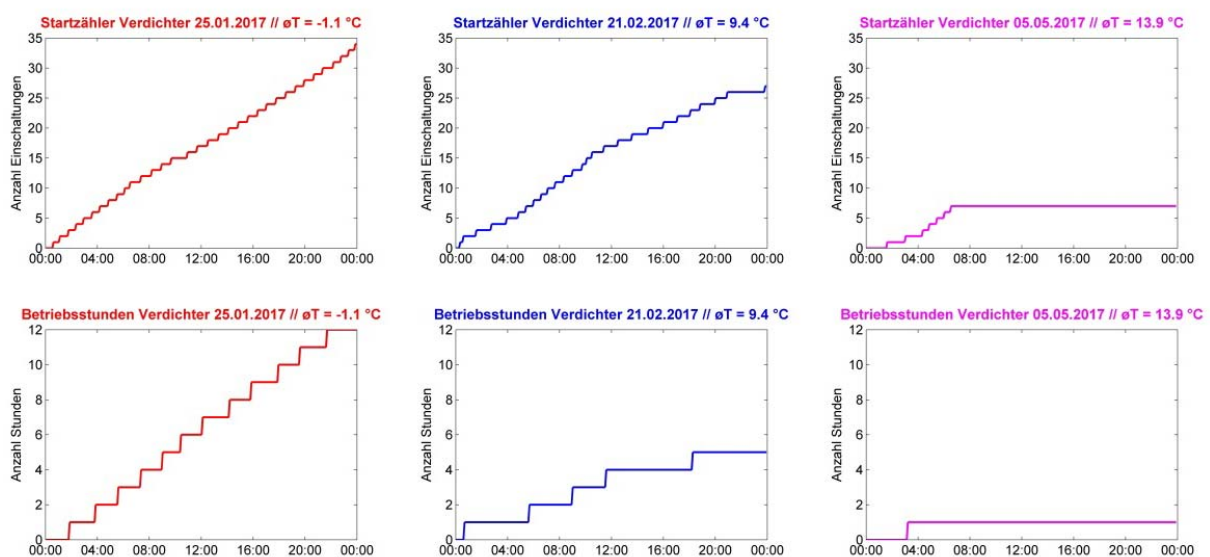


Abb. 47 Vergleich WP-Betriebszeiten Winter & Frühjahr

Links (rot) die Anzahl Einschaltungen und Betriebsstunden der WP an einem sehr kalten Januartag 2017, in der Mitte (blau) an einem eher wärmeren Februartag 2017 und rechts (pink) am Ende der Heizperiode im Mai 2017. Die gedämpfte Aussentemperatur ist ebenfalls gegeben (auf Grund von



Gebäude-Abstrahlung im Winter wärmer als die tatsächliche Lufttemperatur). Die Stufen in der Kurve sind ein Artefakt der Datenaufzeichnung des Wärmezählers (ganze Zahlen), wobei die Messungen alle 5 Minuten erfolgen.

Wie schnell sich die Temperatur im Ringraum nach einer Ausschaltung erholt, ist in Abb. 48 ersichtlich. Nach dem Ausfall der Wärmepumpe an Weihnachten 2016, nach einer längeren Heizphase, regeneriert sich die Ringraumtemperatur in 30 m bzw. 130 m Tiefe innerhalb von einem Tag um ca. 3.3 bzw. 4.5°C. Am folgenden Tag sind es nur noch rund ein halbes Grad. Dies bedeutet, dass die relevante Kältefront durch den bis dahin erfolgten Wärmeentzug noch nicht weit in den Fels eingedrungen sein kann. Auf Grund des stärkeren Wärmeentzugs nach dem Wiedereinschalten der Wärmepumpe nach dem Ausfall liegt die durchschnittliche Ringraumtemperatur rund 1°C tiefer als vor dem Ausfall. Im Gegensatz zur Regeneration fällt die Ringraumtemperatur innerhalb von ca. 2 Stunden auf den Temperatur-Wert vor dem Ausfall.

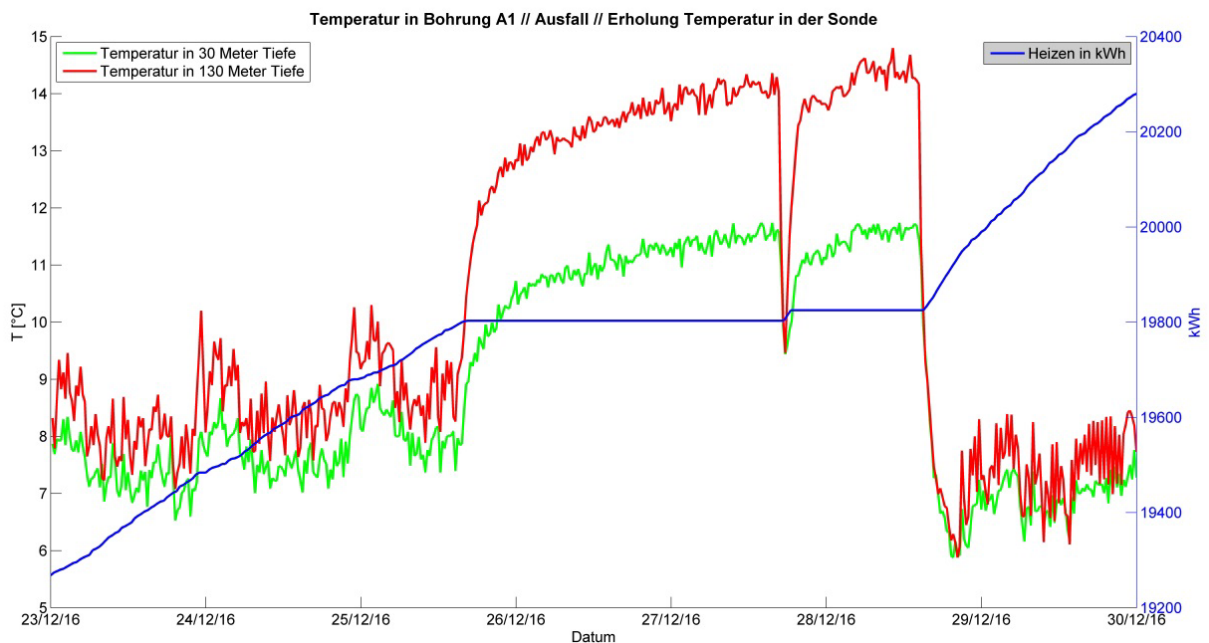


Abb. 48 Kurzfristige Regeneration nach Ausfall WP

An Weihnachten 2016 ist die Wärmepumpe ausgefallen. Die Untergrundtemperaturen in 30 bzw. 130 m Tiefe haben sich innerhalb von einem Tag nahezu regeneriert. Nach dem Wiedereinschalten der Wärmepumpe fällt die Temperatur innerhalb weniger Stunden und pendelt sich auf Grund des stärkeren Wärmeentzugs nach dem Wiederbetrieb bei ca. 1°C tieferen Untergrundtemperaturen ein als vor dem Ausfall.

Abb. 49 zeigt, wie sich nach einem Wärmeeintrag durch Freecooling der Ringraum erwärmt und wieder erholt. Es werden während des Wärmeeintrags maximale Ringraumtemperaturen von 17.5 bis 18°C erreicht, unabhängig von der Dauer des Wärmeeintrags und der Messtiefe (Kühlgrenze im Heizsystem liegt bei 22°C). Dabei sind das ΔT der Erwärmung und Erholung zwangsläufig in kühleren Tiefen ausgeprägter als in grösseren Tiefen. Entsprechend wird in diesen Bereichen mehr Energie gespeichert. In 130 m Tiefe liegt die Erwärmung pro Freecooling-Phase bei ca. 2°C und erfolgt die Erholung grösstenteils innerhalb von einem bis zwei Tagen. In 30m Tiefe dagegen liegt die Erwärmung bei ca. 5°C. Die vollständige Erholung der Ringraumtemperatur erfolgt nicht mehr zwischen den Tagen mit Wärmeeintrag. Eine vollständige Erholung nach 9 Tagen mit Wärmeeintrag durch Freecooling wird in 30 m Tiefe erst nach ca. 4 bis 5 Tagen erreicht. Gesamthaft pendelt sich die



Ringraumtemperatur nach 9 Tagen mit Wärmeeintrag in beiden Tiefen von 30 bzw. 130 m Tiefe auf einem leicht höheren (0.4°C) Temperaturniveau ein. Die rasche Erholung zeigt, dass zum einen die eingetragene Energiemenge pro Freecooling-Event bezogen auf den Sondenmeter vergleichsweise gering ist ($<0.3 \text{ kWh}$ pro Bohrmeter verglichen zu rund 60 kWh/m Entzugsenergie) und die Wärmefront nicht sehr weit in den Fels eingedrungen sein kann bzw. rasch neutralisiert wird. Gleichwohl hat sich nach 9 Freecooling-Phasen das Temperaturniveau im Ringraum auf einem geringfügig höheren Temperaturniveau stabilisiert (siehe auch Abb. 41).

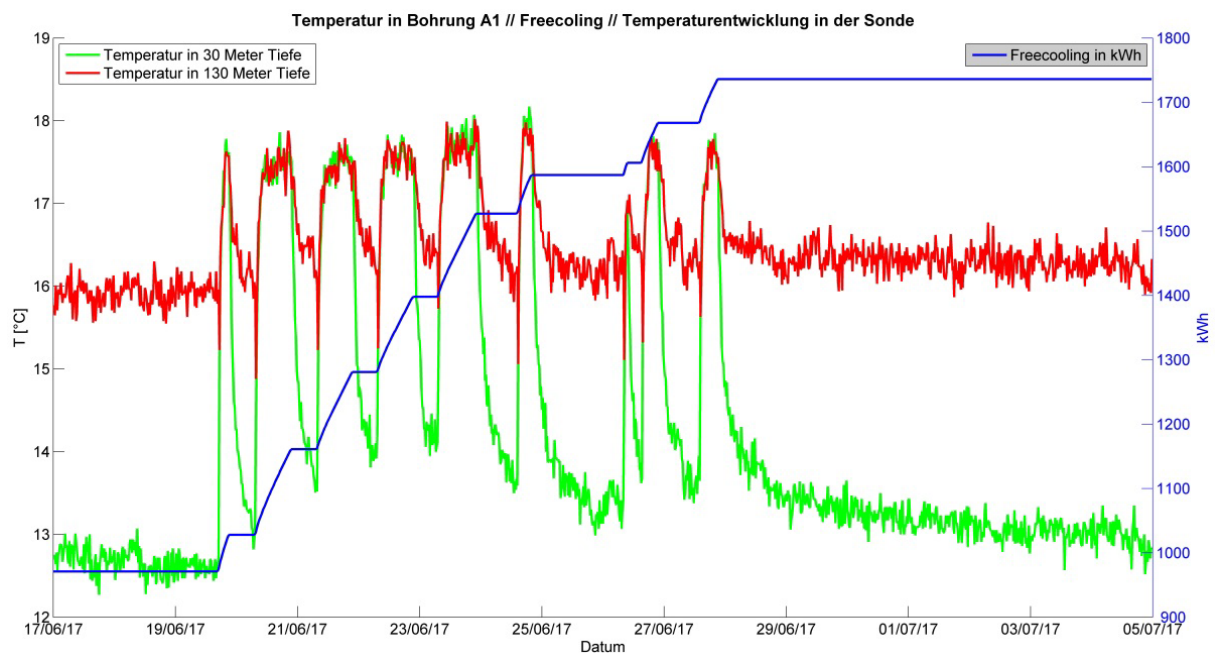


Abb. 49 Einfluss Freecooling auf Untergrundtemperatur

Dargestellt sind die Ringraumtemperatur in 30 und 130 m Tiefe (grün bzw. rot) und der Wärmeeintrag in kWh (blau). An 9 Tagen wurde durch das Freecooling Wärme in den Untergrund abgegeben.



4 Schlussfolgerungen und Fazit

Mit den Messungen sollen verschiedenste Fragestellungen geklärt werden. Diese sind einerseits allgemeiner Art, wie sich z.B. die Untergrundtemperatur allgemein über die Zeit in Abhängigkeit vom Wärmeentzug und –eintrag verändert, aber auch sehr detailliert, wie z.B. sich die Sonden gegenseitig beeinflussen oder wie gross der Einfluss der Geologie ist. Auch interessiert nicht nur der Untergrund, sondern auch wie der Betrieb der Wärmepumpe aussieht, z.B. wie effektiv das Freecooling tatsächlich ist und wie die Planung und Realität übereinstimmen.

Viele Schlussfolgerungen sind noch nicht möglich, da bisher nur über einen Winter gemessen wurde. Somit machen auch Quantifizierungen oder numerische Modellierungen noch keinen Sinn. Viele Aussagen z.B. zur gegenseitigen Beeinflussung von Sonden oder dem Einfluss durch die Geologie können erst nach mehrjährigen Messungen gemacht werden.

Folgende wichtige Erkenntnisse konnten aber bereits gewonnen werden:

Das Wärmesystem betreffend:

- Die konzeptionellen Planungswerte für **Wärmebedarf und Wärmeeintrag** durch Freecooling entsprachen nicht der Realität. Zumindest damals waren die Vorstellungen bzgl. Energieentzug und –rückgabe sehr grosszügig bemessen. Die mit dem Energienachweis definierten Energie-Daten entsprechen aber ca. den tatsächlich gemessenen im ersten Betriebsjahr. Über diese wurde das Geologiebüro für die Simulation nicht informiert. Deutlich ist geworden, dass der Wärmeeintrag durch Freecooling viel geringer ist, als oft erhofft (ca. 5% der entzogenen Energie aus dem Untergrund). Ein Grund dafür liegt wahrscheinlich daran, dass sich neue Minergie-Wohnhäuser kaum noch aufheizen, aber auch die detaillierten Einstellungen im Wärmepumpensystem nicht optimal sind. Letztere werden sich mit den folgenden Messjahren zeigen. Ein weiterer Grund ist wahrscheinlich auch am System selber (z.B. das Register für die Bodenheizung) zu suchen, welches primär auf das Heizen dimensioniert und optimiert ist.
- Die **Betriebszeit** der Wärmepumpe für Heizen und WW lag im ersten Jahr bei rund 1800 Stunden. Dies deutet daraufhin, dass die Wärmepumpe eher zu gross dimensioniert ist.
- Generell wird an kalten Wintertagen davon ausgegangen, dass die Wärmepumpe nahezu den ganzen Tag in Betrieb ist. Trotz des seit 30 Jahren kältesten Januars lief die Pumpe nie mehr als 12 Stunden pro Tag. Insgesamt erfolgten viel zu häufige **Ein-Ausschaltungen** der Wärmepumpe (ca. 8000 mal im Jahr anstatt ca. 1000 bis 3000 mal) und die Wärmepumpe war immer nur vergleichsweise kurz in Betrieb. Die Fehlersuche und Optimierungen im April 2018 deuten darauf hin, dass einige Parameter im Wärmepumpensystem falsch oder nicht optimal eingestellt waren. Zudem wurden einige Parameter so angepasst, dass die eher zu gross dimensionierte Wärmepumpe und der nicht ideal eingebundene Speicher möglichst optimal betrieben werden können. Diese wurden im April 2018 erkannt und angepasst. Das Folgejahr wird zeigen, ob die Anpassungen zu einer Verbesserung führen.
- Bei den **Parameter-Einstellungen** im Wärmepumpensystem spielt auch eine Rolle, von wem und für wen diese erfolgen. Besonders bei Mietobjekten wird häufig so eingestellt, dass es sicher für jeden warm genug ist. Entsprechend hohe Temperaturen werden eingestellt. Entsprechend haben auch das Einsparen von Energie oder eine hohe Regenerationsrate wenig Gewicht. Im vorliegenden Fall war z.B. der Legionellen-Schutz mit einer separaten elektrischen Heizung wichtig. Es wurde aber nicht beachtet, dass diese nicht im Dauerbetrieb eingestellt sein sollte.
- Ohne die **Messungen** wären z.B. die Probleme mit dem Freecooling, dem fehlenden Wärmeentzug im Sommer aus dem Untergrund, sowie dem häufigen Einschalten der Wärmepumpe nicht aufgedeckt worden. Es hat sich gezeigt, dass es sehr wichtig ist, dass das gesamte Wärmepumpensystem korrekt eingestellt wird. Erst nach den Anpassungen der



Systemeinstellungen (z.B. Reduzierung Sperrfrist Freecooling) konnte im zweiten Sommer ein relevanter Wärmeeintrag durch Freecooling erreicht werden. Es wird sich zeigen, in wie weit mit den weiteren Anpassungen im April 2018 das System optimiert werden konnte. Es wird erhofft, dass die WP optimierter und länger läuft, WW mit der WP sicher das ganze Jahr erzeugt wird und das Freecooling noch effizienter erfolgt.

- Die Frage stellt sich, in wie weit bei anderen Objekten überhaupt die Parameter richtig bzw. optimal eingestellt sind und in wie weit diese in den ersten Betriebsjahren hinterfragt und optimiert werden. Hier wäre eine grössere Sensibilisierung sicher von Vorteil.

Den Untergrund betreffend:

- Trotz des seit 30 Jahren kältesten Januars lag die **kälteste Ringraumtemperatur** bei rund 5°C. Das Bauwerk und dessen Bewirtschaftung definieren die Leistung der Wärmepumpe und den Energiebedarf. Beide wiederum sind neben den Untergrundeigenschaften ein wichtiger Parameter für die notwendige Länge der Erdwärmesonden. Die gemessenen Untergrundtemperaturen zeigen, dass erstellte Anlage gut dimensioniert wurde.
- Die Untergrundtemperatur hat sich im Frühjahr **rasch wieder erholt** und erreicht durch den höheren Freecooling-Eintrag im zweiten Sommer leicht höhere Ringraumtemperaturen als nach dem ersten Sommer.
- **Freecooling** erhöht die Untergrundtemperatur, aber auf Grund des geringen gesamten Wärmeeintrags nur im Nahbereich der Bohrung, was der schnelle Temperaturabfall zu Beginn der Heizperiode zeigt.
- Der Ausfall der Wärmepumpe im Winter sowie das Freecooling zeigen, dass der Nahbereich um die Bohrung sich jeweils rasch innerhalb von Stunden bis wenigen Tagen grösstenteils regeneriert. Die relevante jahreszeitliche Wärme- bzw. Kältefront einer Saison reicht somit nicht weit in den Fels. Der Untergrund ist bzgl. Wärmetransport träge. Langfristig werden weitreichendere minimale Temperaturänderungen von Bedeutung werden.
- Dies belegen die gemessenen **Temperaturen in der Messsonde**, welche ca. 3 m von einer aktiven EWS entfernt liegt, welche tendenziell im zweiten Jahr ca. 0.5°C tiefere Werte zeigen. Die andauernden Messungen müssen zeigen, ob dies tatsächlich dem naheliegenden Durchschlag der Kältefront von der benachbarten EWS zugeordnet werden kann.
- Der jahreszeitliche **Einfluss von der Oberfläche** reicht am Projektstandort ca. 8.5 m weit in den Untergrund. Auf Grund von Grundwasserfluss im oberen Felsbereich ist dieser im Vergleich zu umliegenden Standorten weniger tief.
- Die 3 EWS zeigen leicht unterschiedliche Temperaturen, was auf Unterschiede im Durchfluss, den Zuleitungen und/oder der Lage des Glasfaskabels zurückgeführt werden kann.

Nachfolgend werden die ursprünglichen Fragestellungen und Zielsetzungen des Projektes benannt und in welchem Mass diese mit den bisherigen Messungen und Interpretationen beantwortet werden konnte:

1. Wie verändert sich das räumliche Temperaturfeld bei teilregenerierten EWS-Feldern - kurzfristig, saisonal, langfristig? Bisher wird dies nur modelliert oder ist auf Messungen im Vor- und Rücklauf limitiert.
Mit dem eingebauten Glasfaskabel wird die Untergrundtemperatur lückenlos in jeder Tiefe gemessen. Die kurzfristigen und saisonalen Schwankungen sind z.B. in Abb. 39 bis Abb. 42 gut erkennbar. Da die Überwachung in den 3 aktiven und der nahe gelegenen inaktiven EWS erfolgt, kann somit ein räumliches Abbild der Temperaturentwicklung gemacht werden. Die langfristige Entwicklung wird sich mit den fortlaufenden Messdaten zeigen. Hier ist besonders Abb. 44 von



Bedeutung, die die monatliche Temperaturentwicklung mit dem Energieentzug und –eintrag vergleicht.

2. Wie ändert sich das Temperaturfeld im Ringraum - ebenfalls räumlich und zeitlich - und sind die in der SIA gesetzten Schutzmassnahmen bzgl. der Frosttaugrenze sinnvoll? Bisher gibt es diesbezüglich nur wenige Modellierungen und keine tatsächlichen Messungen.

Die Temperaturentwicklung ist ähnlich zu Punkt 1. Bisher stimmen die geplanten und tatsächliche Werte in etwa überein. Gemäss Simulation wurde im ersten Winter eine gemittelte kälteste Temperatur von ca. 5°C erwartet, welche den gemessenen kältesten Ringraumtemperaturen entspricht. Allerdings sind erste Schlussfolgerungen nach nur einem Jahr Messen noch zu früh, insbesondere weil die Einstellungen noch nicht optimal waren. Zumindest im ersten Jahr erfolgte der Wärmebetrieb sicher frostfrei. Die neuen Anpassungen im April 2018 müssen abgewartet werden.

3. Wie beeinflussen die geologischen Unterschiede (Tonsteine zeigen z.B. eine starke Anisotropie in der Wärmeleitfähigkeit) 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.

Im speziellen bei diesen Punkten muss über mehrere Jahre gemessen werden. Kurzfristige Schwankungen erlauben hier keinen Rückschluss auf den Untergrund. Dafür muss die Wärme- bzw. Kältefront weiter in den gesunden Fels gelangen. Hier wird besonders die passive nicht aktive EWS in der Kernbohrung entscheidende Antworten liefern, ob sich z.B. die Untergrundtemperatur über die ganze vertikale Tiefe gleichmässig entwickelt, oder ob die Kältefront die Kernbohrung abhängig von der Geologie unterschiedlich stark erreicht. Dafür muss sich die Temperaturfront erst noch systemrelevant ausbreiten. Entsprechend den Untergrundparametern in Abb. 14 und Abb. 15 sollten sich die Variationen in der Tiefe auch in der Entwicklung im Temperaturtiefenprofil in der Kernbohrung bzw. passiven Messsonde mit der Zeit durchpausen. Dies würde sich z.B. in den Diagrammen von Abb. 38 oder Abb. 42 widerspiegeln. Z.B. eine geringere Wärmeleitfähigkeit wie im oberen Keuper sollte dazu führen, dass langfristig im Ringraum der aktiven EWS in dieser Schicht kühlere Temperaturen gemessen werden und umgekehrt in der Messsonde die Abkühlung langsamer erfolgt als in den umgebenden Schichten mit grösserer Wärmeleitfähigkeit.

4. 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.

Da sich gezeigt hat, dass die Parameter-Einstellungen noch nicht optimal waren und diese nun nach dem ersten und zweiten Messjahr deutlich geändert wurden, wären hier Aussagen verfrüht und spekulativ. Tatsache ist, dass die tatsächliche Untergrundtemperaturen, Grundwasserfluss und Wärmeleitfähigkeit entscheidenden Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kälte- bzw. Wärmefront um die jeweilige EWS haben. Die Sondenlänge wird zusätzlich entscheidend durch den Bohrlochwiderstand und die Leistung der Wärmepumpe definiert. Alle Parameter haben letztendlich einen Einfluss auf die Abstände zwischen den Sonden. Verschiedenste Temperatur-Tiefenprofil-Messungen in der Umgebung vom Messstandort haben gezeigt, dass der Wärmegradient zwischen 2.6 und 7°C pro 100m variieren kann und die Temperaturkurven z.B. in 100 m Tiefe um 4°C verschoben sein können. In einem Fall von einem EFH mit einer 7kW-Wärmepumpe würde nur alleine ein um 1°C grösserer Wärmegradient (4 anstatt 3°C/100m) und eine um 1.5°C wärmere Oberflächentemperatur dazu führen, dass 13% weniger Sondenmeter für einen nachhaltigen Betrieb benötigt würden (gemäss Simulation mit Software EWS von Huber Energietechnik AG).



Vergleich Simulation / Planung mit Realität:

Wie oben erwähnt, scheint es, dass zumindest die Werte vom ersten Winter mit den simulierten Temperaturen übereinstimmen (beide gemittelten kältesten Temperaturen liegen bei ca. 5°C). Aber auch hier kann eine aussagekräftige Antwort erst nach mehreren Messjahren gemacht werden, insbesondere weil nun in den ersten beiden Jahren die Einstellungs-Parameter im Wärmepumpensystem stark verändert wurden und der erste Winter im Januar aussergewöhnlich kalt war.

5 Ausblick

Da viele Fragestellungen erst mit mehrjährigen Messungen beantwortet werden können, wird für mindestens 3 weitere Jahre (2018, 2019 und 2020) gemessen und protokolliert.

6 Danksagungen

Einen besonderen Dank richten wir an die Vorsorgestiftung Häring & Co. AG, die es erst ermöglicht hat, dass überhaupt über mehrere Jahre gemessen werden kann. Ohne ihr Verständnis für Zusatzaufwände, sowie der Ermöglichung von langfristigen Zugängen zu den Sonden und dem Technikraum, wäre die technische Umsetzung nicht möglich gewesen.

Dem BFE bzw. Energie Schweiz danken wir für die finanzielle Unterstützung und dem Input von Wissen. Ohne diesen Beitrag hätte das Projekt nicht realisiert werden können.

Für die Unterstützung bei der erfolgreichen technischen Umsetzung danken wir Clemens Lehr, Erich Allemann und der Bohrfirma Calodrig AG.

Ohne der Forschungsbohrung, den verschiedensten geophysikalischen Messungen und deren Erkenntnissen könnten die Messdaten nur halb so gut interpretiert werden. Der Nagra, welche die Kernbohrung finanziert hat, gebührt ein grosses Dankeschön.

Der Kanton Baselland hat die Bohrlochverlaufsmessungen finanziert. Dafür danken wir herzlich.

Ein wichtiger Beitrag erfolgte von Rafael Beerhalter (Thermosolution AG). Ohne seine detaillierte Überprüfung des Wärmesystems, wären einige nicht idealen Einstellungen nicht erkannt worden und hätte dies ev. zu einem frühzeitigen Defekt und zu einer weniger optimalen Nutzung bzw. Regeneration des Untergrundes geführt. Seinen Bemühungen und Vorschlägen zur Optimierung des Systems danken wir besonders.



7 Referenzen

- Saas, I., & Lehr, C., 2013. Design parameters acquisition of an underground heat storage and extraction system – a deep bhe array in a karstic alpine marble aquifer for 1 GWH power. Proceedings, thirty-eighth workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University 2013, SGP-TR-198.
- Vogt, T., Ebert, A., Häring, C., Becker, J.K., Traber, D., Deplazes, G., Bläsi, H., Rufer, D., 2016. Arbeitsbericht NAB 15-10 Kernbohrung Lausen: Geologische, hydrogeologische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht). 83 Seiten und 20 Anhänge.
- Vogt, T., Hekel, U., Ebert, A., Becker, J.K., Traber, D., Giger, S., Brod, M., Häring, C., 2017. Hydrogeologische Untersuchungen im oberflächennahen Opalinuston (Bohrloch Lausen, Schweiz). Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie. Vol. 22-3, pp. 209-220. DOI 10.1007/s00767-017-0363-2
- Von der Weid, J.P., Passy, R., Mussi, G., Gisin, N., 1997. On the characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometry. J. Lightwave Technol. Vol. 15, pp. 1131–1141.