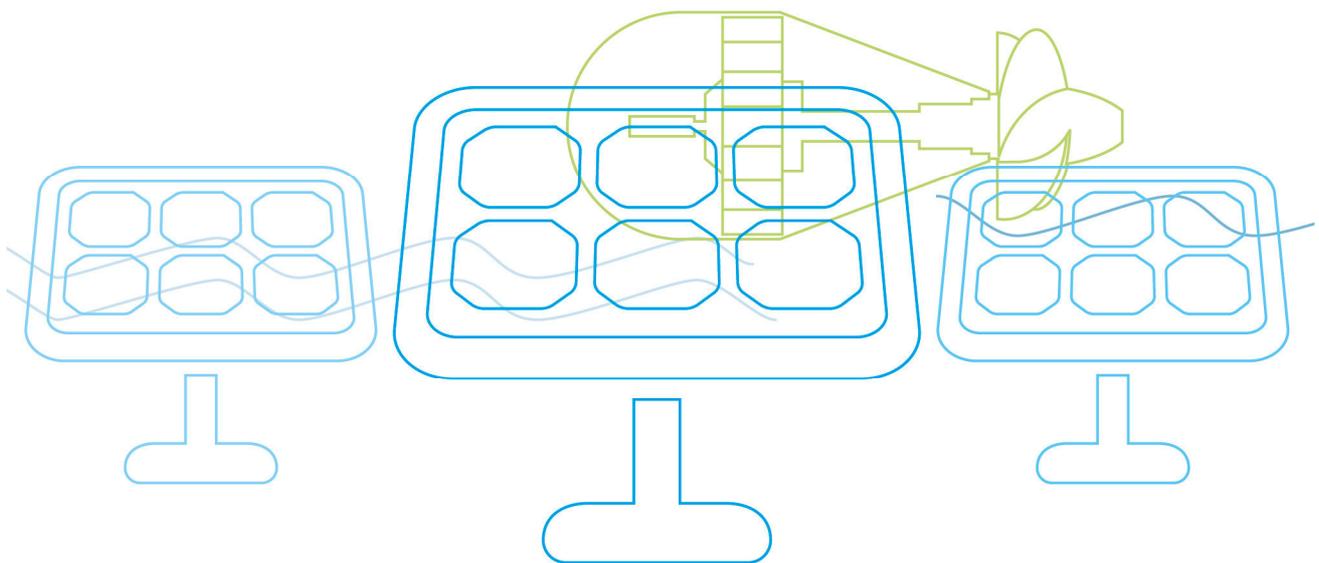




Möglichkeiten, Bemessung und Grenzen neuer Hybrid- Erdwärmesondenkonzepte



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Energie der Zukunft“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| KURZFASSUNG | 2 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| 1 EINLEITUNG | 6 |
| Aufgabenstellung | 6 |
| Schwerpunkte des Projektes..... | 7 |
| Einordnung in das Programm..... | 8 |
| Verwendete Methoden | 8 |
| Aufbau der Arbeit..... | 9 |
| 2 INHALTLICHE DARSTELLUNG | 10 |
| 3 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN..... | 11 |
| Arbeitspaket 1: Untergrundeigenschaften..... | 11 |
| Arbeitspaket 2: Sonden- und Anlageninstallation..... | 30 |
| Arbeitspaket 3: Sondenverpressung..... | 41 |
| Arbeitspaket 4: Forschungsprogramme | 69 |
| Arbeitspaket 5: EWS-Vergleiche | 128 |
| Arbeitspaket 6: WP-Konfigurierung | 181 |
| Arbeitspaket 7: Schlussbericht und Resumée | 182 |
| 4 AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN..... | 190 |
| 5 LITERATURVERZEICHNIS | 192 |

KURZFASSUNG

Erdwärmesonden (EWS) mit daran gekoppelten Wärmepumpen werden in Anlagen unterschiedlicher Größe eingesetzt. Die am weitesten verbreitete Anwendung hat bis heute der U-Rohr-Sondentyp gefunden, wobei in Mitteleuropa bisher nur ein kleiner Teil dieser U-Rohr-Sonden im Sommer auch zur Raumkühlung genutzt wird. Dabei kann als vorteilhafter Nebeneffekt Wärme aus der Raumkühlung in den Untergrund zurückgeführt werden, was zur thermischen Regeneration des Untergrundes beiträgt.

Die Zielsetzungen des vorliegenden Projekts sind grundlegende Untersuchungen zur Kombination von Erdwärmesonden mit Solarthermie (Hybridisierung). Dabei soll überschüssige Wärme zur thermischen Regeneration in den Untergrund eingebracht werden. Eine weitere Zielsetzung im Projekt GEOSOLA betrifft Untersuchungen zu den tageszeitlichen und jahreszeitlichen Schwankungen des Wärmeentzugs, im besonderen die Möglichkeiten und das erreichbare Ausmaß der thermischen Regeneration des Untergrundes durch Nachladung mittels spezieller Schaltungen (Hybridtechnik) von beispielsweise solarer Überschusswärme als erneuerbarer Energie. Die oberste Zielsetzung über den dargestellten Teilzielen ist die Erhöhung der mittleren Langzeit-Wärmeentzugsleistung je m Sondenlänge durch die verfahrensgemäße Gestaltung der thermischen Nachladung mit erneuerbarer Energie.

Die Durchführung des Projektes ist in sieben Arbeitspakete unterteilt, die unterschiedliche Schwerpunkte wie Untergrundeigenschaften, Konfiguration, Einbau und Verpressung der Sonden, ein umfangreiches Forschungsprogramm, die Vergleiche von EWS, die WP-Konfigurierung und den Abschlussbericht behandeln.

Die durchgeführten Untersuchungen des Projektes betrafen einerseits die Einflüsse der Sondenquerschnitte und Sondenlängen, also der Sondengeometrie, auf die Wärmetransportleistung aus dem Untergrund in den Kopf der CO₂-Sonden wie auch auf die Wärmetransportleistung der U-Rohrsonden aus dem und in den Untergrund. Andererseits betrafen sie die Möglichkeiten und Grenzen der Wärmeein- und -ausbringung aus dem Bereich der Verfüllmasse der Sonde durch unterschiedliche Zusammensetzungen dieser Verpressungen. Zur kurzfristigen und saisonalen Speicherung von Wärme wurde der nutzbare radiale Raum um die Sonden sowohl messtechnisch untersucht, als auch mit Hilfe geeigneter Modelle betrachtet.

Auf Basis der durch die eingebrachten Materialien vorgegebenen thermischen Daten konnten die horizontalen Wärmeflüsse entlang der Sonden aus und in den Untergrund über die Verpressung und weiter aus oder in die CO₂- als auch aus und in die U-Rohrsonde über die gemessenen Temperaturdifferenzen bestimmt werden. Die Wärmeeinbringung in die Sondenverpressung und in die nahe Sondenumgebung wurde mittels zeitlicher Abklingkurven, in Funktion der Temperaturgradienten, unter Einbezug der unterschiedlichen Untergrundbeschaffenheiten, interpretiert.

Im Zuge des Projektes wurden zum einen 3 unterschiedlich konzipierte und ausgeführte verpresste Sonden mit betriebsüblichen Längen von 50 bis 100 m, zum anderen 3 unterschiedlich gestaltete offene Sonden in der Forschungsanlage zu Untersuchungen herangezogen. Weiters wurden Sonden an anderen Standorten zur Gewinnung, Ausarbeitung und zum Vergleich von Betriebsdaten herangezogen, wobei bei diesen Untersuchungen insbesondere auf die unterschiedlichen Untergrundstrukturen geachtet wurde. Somit konnten die neuen Sonden- und Verfahrenskonzepten den eher konventionellen Anlagen gegenübergestellt werden.

ABSTRACT

Borehole heat exchangers in combination with heat pumps are installed in several plants with different sizes. Until today, the most popular application is the U-tube-borehole heat exchanger, whereupon only a small number in Central Europe is used in summer for space cooling in air conditioning systems. After space cooling, as a profitable side effect, heat can be re-injected to the ground for its regeneration.

Research efforts within this project were directed to fundamental investigations for the combination of a solar heat system and a geothermal system. Therefore, excess solar heat was re-injected into the ground for accelerated regeneration. Another objective of this project affected the daily and seasonal variations in heat extraction and the possibilities and achievable amounts of thermal regeneration of the ground with defined recharging by solar heat as renewable energy. The main goal of the project is to increase the average long term heat extraction rate per m length of the down-hole heat exchanger by improving the procedural configuration of the thermal recharging with renewable energy. The realization of the project is split-up in seven work packages which deal with the underground properties, the installation and grouting of the down-hole heat exchangers, the research program, the comparison of different borehole heat exchangers, the configuration of the heat pump and the final report.

The investigations of this project concerned on the one hand the effects of the lengths and cross sections (geometry) of the borehole heat exchangers on the heat transport rate from the ground to the head of the CO₂ heat pipes as well as on the heat extraction capacity of the U-tube from and into the ground. On the other hand they concerned the possibilities and boundaries of the heat in- and output from the different grouts around the down-hole heat exchanger. For the short term and seasonal storage of heat, the radial space around the down-hole heat exchangers was investigated by measurement techniques and with simple modelling.

Based on thermal data horizontal heat flows alongside the borehole heat exchangers from and in the ground via the grout continuing from and in the CO₂- as well as from and in the U-tube heat pipe were determined. The thermal loading in the grout and in the near surrounding of the borehole heat exchangers in function of the temperature gradients were interpreted with the help of decay curves including different underground properties.

Within the project three different designed grouted down-hole heat exchangers with commercial scale lengths between 50 and 100 m and three different designed open down-hole heat exchangers in the Geosola research plant were investigated. Moreover, external geothermal heat pump systems were used to collect, assess and compare different operating data considering the different underground properties.

1 EINLEITUNG

Der Heizenergiebedarf besitzt in Anbetracht von Klimaschutz und Einsatz fossiler Brennstoffe einen hohen Stellenwert, wenn man beachtet, dass dafür etwa noch mehr als 2/3 der Endenergie in Form von Wärme verbraucht werden und bis heute dafür die Erdwärme nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt. Überall dort, wo Fernwärme oder Abwärme nicht verfügbar sind, scheint die Verfeuerung fossiler Brennstoffe immer noch kostengünstiger als die Nutzung von Erdwärme über Wärmepumpen zu sein. Ein Grund dafür kann einmal in den noch etwas höheren Investitionskosten gesehen werden, zum anderen lässt sich dies aber auch aus den bei diesen Heizungsanlagen bestehenden größeren Unsicherheiten in der Planung, Auslegung und bei Erfahrungen ableiten.

Erdwärmesonden (EWS) mit daran gekoppelten Wärmepumpen werden in Anlagen unterschiedlicher Größe eingesetzt. Die größte Anwendung hat bis heute der U-Rohr-Sondentyp gefunden, wobei in Mitteleuropa bisher nur ein kleiner Teil dieser U-Rohr-Sonden im Sommer auch zur Raumkühlung in Klimaanlage genutzt wird. Dabei kann als vorteilhafter Nebeneffekt Wärme nach den Anforderungen aus der Raumkühlung in den Untergrund wieder zurückgeführt werden, was teilweise zur thermischen Regeneration des Untergrundes beiträgt.

Aufgabenstellung

Die Zielsetzungen des vorliegenden Projekts sind grundlegende Untersuchungen zur Kombination von Erdwärmesonden mit Solarthermie (Hybridisierung). Dabei ist daran gedacht, überschüssige Wärme beispielsweise aus Solarkollektoren zur thermischen Regeneration in den Untergrund einzubringen.

Im vorliegenden Projekt GEOSOLA sollen die geologischen, hydrogeologischen und insbesondere die thermischen Eigenschaften des Untergrundes an dem vorgesehenen Standort Leonding, Welser Straße 42, an entsprechenden Gesteins- bzw. Untergrundproben analysiert werden, um in Folge in die spez. Wärmeentzugsmessungen mit einbezogen werden zu können.

Neben den Dichten werden die spezifischen Wärmekapazitäten in trockenem und gesättigtem Zustand bestimmt. Es sind 4 Bohrungen und zwar in Teufen von 100 und 50 m vorhanden, in denen jeweils unterschiedliche Sonden und Kombinationen von Sondenkonzepten und Speicher- bzw. Verfüllmaterialien eingebracht sind. Aus den Bohrproben werden die geotechnischen Bodenkennwerte wie Porositäten,

Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten etc. ausgewertet, um sie für die nachfolgenden örtlichen Temperatur- und Wärmeentzugsmessungen hinsichtlich ihrer Einflüsse auf die mittleren spez. Wärmeentzugsleistungen korrelieren zu können. Ebenso werden zu Vergleichszwecken Thermal Response Tests ausgeführt.

Eine weitere Zielsetzung im vorliegenden Projekt GEOSOLA betrifft den Wärmeentzug mit den tageszeitlichen und jahreszeitlichen Schwankungen hinsichtlich der Möglichkeiten und des erreichbaren Ausmaßes der thermischen Regeneration des Untergrundes durch Nachladung mittels spezieller Schaltungen (Hybridtechnik) von beispielsweise solarer Überschusswärme als erneuerbare Energie. Dabei sollen die Sonden teils bei intermittierendem Wärmeentzug, teils mit 2000 h/a Dauerentzug mit und ohne paralleler Nachladung betrieben werden, um die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen sowohl nahe der Oberfläche als auch über der gesamten Sondenlänge im kontinuierlichen Betrieb über einen Zeitraum von mindestens 2 Jahren mit und ohne Nachladung zu bestimmen.

Die oberste Zielsetzung über den dargestellten Teilzielen ist die Erhöhung der mittleren Langzeit-Wärmeentzugsleistung je m Sondenlänge durch die verfahrensgemäße Gestaltung der thermischen Nachladung mit erneuerbarer Energie.

Als Referenz bzw. Vergleichsbasis soll dafür einmal eine Modell-Erdwärmesonde dienen, die vom Institut für Angewandte Geophysik der RWTH Aachen über einen Zeitraum von 5 Jahren untersucht wurde und einen Wärmeentzugsleistungswert zwischen $44,5$ und $52,7 \text{ W/m} \pm 15,9 \text{ W/m}$ erbracht hat. Zum anderen sollen Temperaturprofilmessungen neu errichteter Sole- und CO_2 -Anlagen während der Projektlaufzeit zum Vergleich von Wärmeentzugsleistungen und daraus resultierenden Temperaturabsenkungen entlang der Sonden zur Beurteilung der in den Projektzielen dargestellten Zielgrößen dienen.

Schwerpunkte des Projektes

Die Schwerpunkte des vorliegenden Projekts gliedern sich folgendermaßen:

- Grundlegende Untersuchung zur Kombination von Erdwärmesonden mit Solarthermie (Hybridisierung). Dabei ist daran gedacht, überschüssige Wärme beispielsweise aus Solarkollektoren zur thermischen Regeneration in den Untergrund einzubringen.
- Vergleich der Wärmeentzugsleistungen von CO_2 -Sonden mit Sole oder Wasser U-Rohrsonden

- Untersuchung vertikaler CO₂-Erdwärmesonden zur Optimierung der spezifischen Wärmeentzugsleistung.
- Untersuchung von Möglichkeiten der Rückführung von Überschusswärme in speziellen Speichermedien im Untergrund (z.B. Verpressmaterial).
- Möglichkeit der Kombination von Sole- und CO₂- Sonde zur Steigerung der Effizienz.
- Der Einsatz von innovativen Messverfahren und –systemen zur Schaffung einer umfassenden Datengrundlage.
- Vergleich und Optimierung der unterschiedlichen Sondenvarianten und -konzepte hinsichtlich Ihrer Energieeffizienz.

Einordnung in das Programm

Das gegenständliche Vorhaben des GEOSOLA-Projektes adressiert sich vor allem an das Themenfeld 6: Fortgeschrittene Verbrennungs- und Umwandlungs-Technologien. Es liefert mit seinen Ergebnissen aus den unterschiedlichen Forschungsprogrammen wesentliche Beiträge in den folgenden Bereichen:

- Erneuerbare Energien
- Nachhaltiges Energiesystem
- Reduktion der Klimawirkung

Verwendete Methoden

Im Zuge der Ausführung der Bohrungen für die EWS werden die thermischen, hydrogeologischen und geotechnischen Parameter des anstehenden Untergrundes bestimmt. Die Konstruktion der Sondenköpfe, ihre Gestaltung und Auslegung werden festgelegt. Im zweiten Schritt erfolgt die Montage und Installation der Sondenperipherie (Instrumentierung, Steuerung, Installation und Softwareerstellung) sowie die Inbetriebnahme der Gesamtanlage.

Das Forschungsprogramm beinhaltet:

- die Datengewinnung, Modellierung und Bewertung des Projektkonzeptes sowie den Datenvergleich aus neu errichteten konventionellen EWS-Anlagen bei unterschiedlichen geologischen Untergrundverhältnissen (Granit, Schlier, Sand/Schluff, etc.),

- den Einbau von Glasfaserkabeln und periodische Temperaturprofilmessungen unmittelbar nach Inbetriebnahme der Sonde, nach Wärmeentzugsperioden bzw. nach längeren Ruheperioden,
- das Monitoring der Regeneration des Untergrundes ohne Nachladung von Wärme und Vergleich dieser Daten unter Einbeziehung der thermischen Eigenschaften des Untergrundes mit der im Projekt erzielten Regeneration des Untergrunds,
- den Quervergleich der Funktionalität und Effizienz dieser konventionellen Sonden mit den in diesem Projekt GEOSOLA speziell ausgestatten und unterschiedlich betriebenen Erdwärmesonden.

Aufbau der Arbeit

Die Durchführung des Projektes ist in folgende Arbeitspakete unterteilt:

Arbeitspaket 1: Untergrundeigenschaften

Arbeitspaket 2: Sondeninstallation

Arbeitspaket 3: Sondenverpressung

Arbeitspaket 4: Forschungsprogramm

Arbeitspaket 5: EWS-Vergleiche

Arbeitspaket 6: WP-Konfigurierung

Arbeitspaket 7: Abschlussbericht

2 INHALTLICHE DARSTELLUNG

Die durchgeführten Untersuchungen des Projektes waren vielschichtig und betrafen einerseits die Einflüsse der Sondenquerschnitte und Sondenlängen, also der Sondengeometrie, auf die Wärmetransportleistung aus dem Untergrund in den Kopf der CO₂-Sonden wie auch auf die Wärmetransportleistung der U-Rohrsonden aus dem und in den Untergrund, andererseits betrafen sie die Möglichkeiten und Grenzen der Wärmeein- und -ausbringung aus dem Bereich der Verfüllmasse der Sonde durch unterschiedliche Zusammensetzungen dieser Verpressungen. Zur kurzfristigen und saisonalen Speicherung von Wärme wurde der nutzbare radiale Raum um die Sonden für sowohl messtechnisch untersucht, als auch mit Hilfe geeigneter Modelle betrachtet.

Auf Basis der durch die eingebrachten Materialien vorgegebenen thermischen Daten konnten die horizontalen Wärmeeflüsse entlang der Sonden aus und in den Untergrund über die Verpressung und weiter aus oder in die CO₂- als auch aus und in die U-Rohrsonde über die gemessenen Temperaturdifferenzen bestimmt werden. Die Wärmeeinbringung in die Sondenverpressung und in die nahe Sondenumgebung in Funktion der aufgeprägten Temperaturgradienten wurde mittels den erhaltenen zeitlichen Abklingkurven unter Einbezug der unterschiedlichen Untergrundbeschaffenheiten interpretiert.

Im Zuge des Projektes wurden zum einen 3 unterschiedlich konzipierte und ausgeführte verpresste Sonden mit betriebsüblichen Längen von 50 bis 100 m, zum anderen 3 unterschiedlich gestaltete offene Sonden in der Forschungsanlage sowie auch Sonden außerhalb der Forschungsanlage an anderen Standorten zur Gewinnung, Ausarbeitung und Vergleich von Betriebsdaten herangezogen, wobei bei diesen Untersuchungen auch auf die jeweiligen, unterschiedlichen Untergrundstrukturen geachtet wurde. Insbesondere konnten hier die neuen Sonden- und Verfahrenskonzepte den eher konventionellen Anlagen gegenübergestellt werden.

3 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Arbeitspaket 1: Untergrundeigenschaften

Teilziel 1.1: Ausführung der Bohrungen für die EWS

A) Geologische Standortbeschreibung

Die Erdwärmefontänen (EWF) der GEOSOLA-Forschungsanlage liegen auf dem sog. Harter Plateau, einer pleistozänen Hochterrasse der RISS-Eiszeit, die teilweise durch eine Löß- bzw. Lößlehmbedeckung überlagert wird. Im Liegenden dieser kiesig-sandigen bis gering schluffigen Terrassenschotter sind mächtige schluffig-tonige bis schluffig-sandige Sedimentserien der Molasse zu erwarten (Schlier).

Aufgrund der während der Bohrarbeiten gewonnenen Daten sowie von Bohraufschlussdaten im Umfeld der Sondenstandorte können für den Standort die in nachstehender Tabelle zusammengefassten Schichtfolgen ausgewiesen werden, wobei aber aufgrund der tektonischen und faziellen Variabilität die Mächtigkeiten der einzelnen Serien stärker schwanken können.

| <i>Gesteinsserie:</i> | <i>Mächtigkeit</i> |
|----------------------------------|--|
| Lößlehmdecke | ca. 12 m |
| Schotter der Hochterrasse | ca. 13 m |
| Schlierenserie (schluffig-tonig) | ca. 100 – 120 m |
| Linzer Sande | bis Endteufe der Bohrungen nicht angetroffen |
| Kristallin der Böhmisches Masse | bis Endteufe der Bohrungen nicht angetroffen |

Tabelle 1: Zusammenfassung der für den Standort vorherrschenden Schichtenfolgen

Die Formationen der Linzer Sande sowie des Kristallins wurde in den Erdwärmefontänenbohrungen sowie in den bestehenden Aufschlussbohrungen nicht angetroffen.

B) Hydrogeologische Standortbeschreibung

Die hydrogeologischen Verhältnisse sind durch die unterschiedlich durchlässigen Sedimentserien vorgegeben.

Innerhalb der Deckenschotter existiert ein ca. 5-8 m mächtiger Aquifer, der im Wesentlichen eine gegen Ost bis Nordost gerichtete Grundwasserabströmung aufweist. Der GW-Flurabstand liegt am Standort bei ca. 18–20 m ab Geländeoberkante (GOK).

Der darunter liegende Schlier fungiert dabei als Grundwasserstauer. Erfahrungsgemäß ist aber auch innerhalb des Schlier mit einer geringen Klufwasserführung zu rechnen. Diese Annahme wurde bei der Abtäufung der Bohrungen bestätigt. Der Schlier weist abschnittsweise eine Klüftigkeit auf, die Klüfte sind wassererfüllt.

Das Auftreten von Linzer Sanden unterhalb der Schlierserie würde gespannte Grundwasserverhältnisse bedingen, in allen Bohrungen wurde jedoch diese Formation nicht erreicht.

C) Abgaben zu bestehenden Trink- und Nutzwasserversorgungen sowie bestehende Erdwärmenutzungen

Im relevanten Projektbereich existiert eine öffentliche Wasserversorgung der Linz AG. Fremde wasserrechtlich bewilligte Nutzungsrechte (Trinkwasserbrunnen) sind im Nahbereich der geplanten Sondenanlage (Radius von 100 m) bzw. des angeführten Grundstückes 1091/54 nicht vorhanden. Auch private Brunnen konnten in einer Übersichtsbegehung nicht ermittelt werden.

Aus diesen vorgenannten Gründen ist eine Beeinträchtigung „fremder Rechte“ nicht zu erwarten und damit eine Beweissicherung nicht erforderlich.

Hinsichtlich der Nutzung von Erdwärme bestehen zwei Erdwärmefonsdenanlagen, die jedoch durch die GEOSOLA Forschungsanlage nicht beeinträchtigt werden.

In Abbildung 1 sind die bestehenden Bohrungen und Erdwärmenutzungen dargestellt.

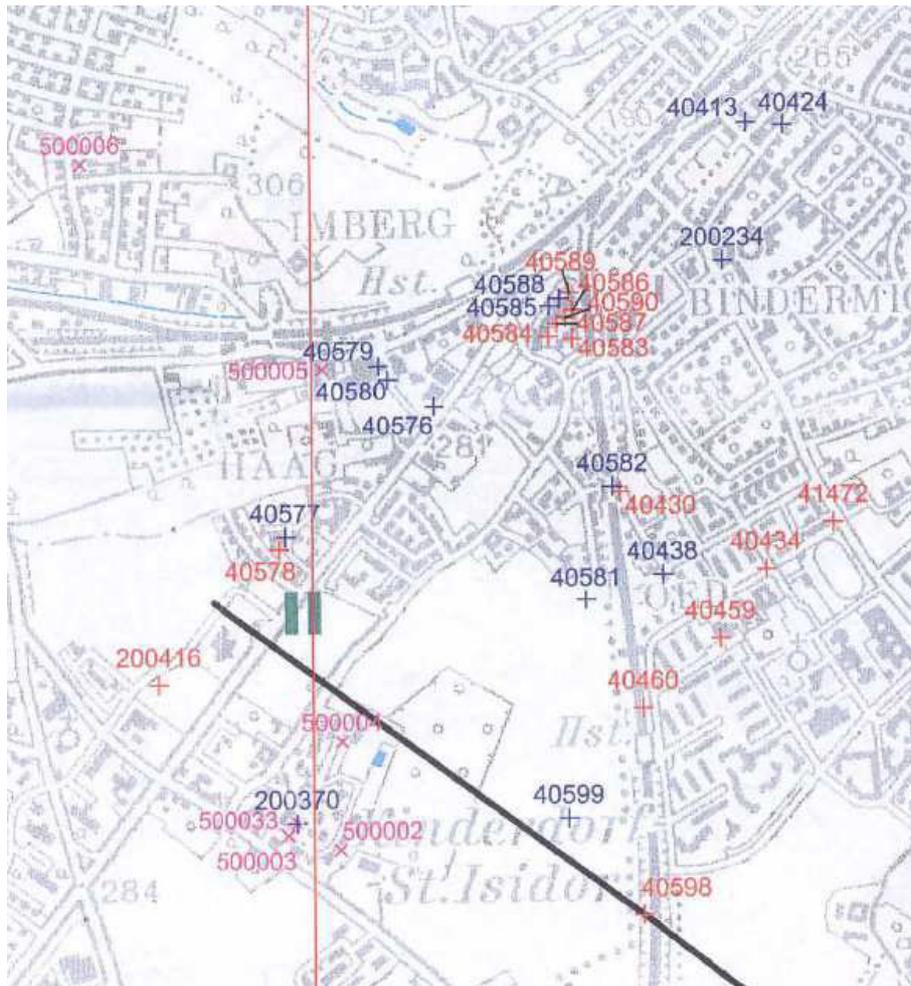


Abbildung 1: Lage der relevanten Bohrungen und Sonden im Nahbereich der EWTS-Forschungsanlage (Institut f. Verfahrenstechnik, Welsstr. 42)

D) Technische Beschreibung der Sondenbohrung

Die Bohrungen werden als Rotationsbohrungen mit dem Doppelkopf-Luftspülung- oder Tubex-Verfahren ausgeführt, wobei gleichzeitig mit dem Bohrgestänge eine Hilfsverrohrung niedergebracht wird. Tiefere Bohrungsabschnitte werden durch eine Bohrspülung gesichert. Mit der Verrohrung als Stütze und Absicherung gegenüber dem Gebirge wird die Einbringung der relativ komplexen Sondenbündel einfacher und sicherer gestaltet.

In jedem Fall wird der oberste Bohrungsabschnitt innerhalb der Deckenschotter bis zum Stauer (Schlier) mittels Hilfsverrohrung gegenüber dem Gebirge bzw. Grundwasser abgedichtet. Die Hilfsverrohrung bindet dabei dicht in den Schlier ein. Der in den einzelnen Bohrungen aufgeschlossene Boden wird durch entnommene Proben beschrieben, bewertet und in einem Bohraufschlussprofil dargestellt.

Zur Erfassung und Beobachtung der thermischen und hydraulischen Verhältnisse innerhalb des vorhandenen Aquifers (Grundwasserleiter) wird eigens ein Grundwasserpegel errichtet (Filterrohr im Aquiferbereich).

Zur weiteren teufenspezifischen Erkundung und Dokumentation der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse werden sowohl in der unausgebauten Bohrung als auch in den bereits ausgebauten Bohrungen und Sonden umfangreiche bohrlochgeophysikalische Messungen und Versuche durchgeführt (Bohrlochlogging).

Für die gegenständliche Vorerkundung sind folgende Bohrloch-Logs vorgesehen:

- Natural Gammalog (GRL) zur Bestimmung des teufenspezifischen relativen Tongehaltes im Gebirge
- Temperatur-Log (TEMP) zur Erfassung der Wassertemperatur, des Temperaturgradienten und von Wasserzutritten

Die geophysikalischen Bohrlochmessungen werden sofort nach Erreichen der Endteufen durchgeführt, wobei das Bohrloch durch die Stützverrohrung bzw. durch eine allfällig notwendige Bohrspülung gesichert wird.

Danach werden die auf der Baustelle vorbereiteten Sondenbündel eingebracht und anschließend sofort von unten nach oben mit der ausgewählten Abdichtungs-Verpresssuspension verpresst.

Wenn es die hydrogeologischen Verhältnisse erlauben wird eine der beiden 100 m Bohrungen durchgehend mittels PVC-Filterrohr DN 125 ausgebaut und nicht mittels Dichtsuspension verpresst. Die EW-Sondenbündel werden danach direkt in die wassererfüllte Sonde eingebaut. In jedem Fall muss dabei sichergestellt sein, dass es zu keinen Verbindungen zwischen verschiedenen GW-Horizonten kommen kann. Der hangende Bereich der Sonde wird mit einem PVC-Sondendurchmesser DN 170 ausgebaut.

Die durchzuführenden Druckprüfungen der Sonden werden nach den einschlägigen Regelwerken vorgenommen (ÖWAV Richtlinie, 2008).

Die Einbringung der konfektionierten Sondenbündel erfolgt über eine Haspel in das mit Hilfsverrohrung oder Bohrspülung gesicherte Bohrloch (einschließlich der Messrohre für die Lichtwellenleiter-Kabel).

Die Überwachung des Einbaus und laufende Überprüfung der konfektionierten Sondenanordnungen und Abstandhalter inklusive der Messrohre und des Verfüllrohrs (Injektionsrohr), sowie die Verpressung der Sonde erfolgt durch Mitarbeiter von AIT, des IVT und der Fa. Mittermayr

(detaillierte Bohrprofile und der Sondenausbau befinden sich im Anhang).

E) Ausführung der Bohrungen

Schwierigkeiten bei der Herstellung der Bohrungen zeigten sich aufgrund der inhomogenen Untergrundeigenschaften und des nicht adäquaten Bohrverfahrens bzw. der Ausrüstung. Der in ca. 30 m unter GOK anstehende Tonstein (lokale geolog. Bezeichnung Schlier) zeigte einerseits eine starke Klüftung, andererseits auch eine Wechsellagerung mit weicheren Lagen und starker Wasserführung. Weiters kam es beim Ausbau der Bohrung γ zu Nachverbrüchen. In dieser Sonde wurde bei ca. 65 m unter GOK geogenes natürliches Rohöl angetroffen. Wegen der geringen Menge dürfte es sich dabei um eine kleinräumige lokale Kluffüllung handeln. Diese Bohrung wurde nach Bruch des Gestänges als Pegel mit Filter- und Vollrohren ausgebaut. Durch den Eintritt von Öl in den Pegel und den Austrag über Gelände wurde die Bohrstelle stark verunreinigt, so dass die Bohrarbeiten vorübergehend eingestellt werden mussten. Nach einer ersten Reinigung der Bohrung durch ein Entsorgungsunternehmen mussten vor dem Sondereinbau weitere Reinigungsarbeiten durchgeführt werden. Aus diesem Grund konnten auch die Bohrlochmessungen in dieser Bohrung nicht durchgeführt werden.

In Tabelle 2 sind die geplanten Bohrungen mit Bohrtiefe und Ausbau den tatsächlich ausgeführten Bohrungen gegenübergestellt.

| Bezeichnung | Bohrtiefe geplant | Bohrtiefe ausgeführt | Ausbau geplant | Ausbau ausgeführt |
|-------------------|-------------------|----------------------|---|---|
| Sonde α -1 | 200 m | 105/85 | 1 U- und 1 ER-CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde | Pegelausbau, Verfilterung bis 30 m unter GOK |
| Sonde α -2 | 200m | 100 m | 1 U- und 1 ER-CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde | 1 U- und 1 ER-CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde |
| Sonde β | 25 m | 28,5 m | Pegelausbau | Pegelausbau |
| Sonde γ | 100m | 100 m | 5 CO ₂ -Sonden + PE-Solesonde | Pegelausbau |
| Sonde η | 100m | 100m | CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde | CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde |
| Sonde ϵ | 50m | 50m | 9 CO ₂ -Sonden + PE-Solesonde | 9 CO ₂ -Sonden + PE-Solesonde |

Tabelle 2: Zusammenstellung der geplanten und ausgeführten Bohrungen.

Die in Tabelle 2 dargestellten Abweichungen bei Anzahl und Tiefe der Bohrungen ergaben sich aufgrund bohrtechnischer Probleme. In Bohrung $\alpha 1$ kam es im Zuge der Bohrabteufung bei ca. 105 m zu einem Bruch des Bohrgestänges. Der Bohrkopf und das im Bohrloch verbliebene Bohrgestänge konnten nicht mehr geborgen werden. Es erfolgte daher eine Zementation bis zum Ende des Gestänges bei 85 m unter GOK. Der Rest des Bohrloches wurde im Bereich des Schliers bis 30 m unter GOK mit Filterrohren, und bis Geländeoberkante mit Vollrohren ausgebaut. Der quartäre Grundwasserhorizont wurde dabei ordnungsgemäß abgedichtet, um einen hydraulischen Kurzschluss zu dem unterlagernden klüftigen Schlier zu unterbinden.

Teilziel 1.2: Ermittlung und Dokumentation der hydrogeologischen, geotechnischen und thermischen Eigenschaften des Untergrundes.

A) Geophysikalische Bohrlochmessungen

I. Allgemeines – Methodenbeschreibung

Zur Erkundung und Dokumentation der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse wurden umfangreiche bohrlochphysikalische Messungen und Versuche durchgeführt, die im Folgenden näher erläutert werden:

- Gammalog

Da die natürliche Gammastrahlung innerhalb von Sedimenten vorwiegend vom radioaktiven Kaliumisotop ^{40}K stammt und dieses vorwiegend in feinkörnigen Sedimenten enthalten ist, nimmt auch die Gammaintensität mit steigendem Feinkornanteil (Tongehalt) zu. In der Loggingkurve der Gammaintensität heben sich stärker tonige Sedimente mit hohen Zählraten (cps) von tonfreien Schichten mit niedrigen Zählraten klar ab und erlauben eine halbquantitative Beurteilung des Tongehaltes.

- Temperaturlog

Bei Temperaturmessungen wird im Bohrloch der Temperaturverlauf als Funktion der Tiefe (in cps) aufgenommen, die Temperaturwerte werden, nach Umrechnung über Kalibrierungskurven, als Celsius-Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) angegeben. Der Temperaturverlauf kann durch den geothermischen Gradienten geprägt sein.

Die im Bohrloch gemessene Temperatur ist unter anderem bestimmt von der Wirkung von in die Bohrung eintretender, aus der Bohrung abfließender oder die Bohrung durchströmender Wässer. Im Zuflussbereich kommt es zu einer Durchmischung, die sich im Idealfall in der Temperaturkurve als relativ konstanter Wert plateauartig gegenüber dem normalen Temperaturverlauf abhebt.

Temperaturmessungen in Bohrungen werden meist in Kombination mit anderen Messverfahren (z.B. Wasserleitfähigkeitslog) durchgeführt. Sie erfolgen im Regelfall zu Beginn eines Messprogramms, um Störungen des Temperaturfeldes durch Vermischung oder Verwirbelung gering zu halten.

- Leitfähigkeitslog

Das Leitfähigkeitslog charakterisiert die Leitfähigkeit des Bohrlochfluids über die Tiefe. Wesentliche Aussagemöglichkeiten ergeben sich über die unterschiedliche Mineralisation von Grundwässern. Somit können Wasserzuflüsse und Bereiche unterschiedlicher Mineralisation der Wässer im Bohrloch aufgezeigt werden.

- Colloidal Borescope

Das Colloidal Borescope (CB) (Abb. 2) ist ein optisches Messsystem zur Bestimmung der grundwasserdynamischen Parameter, Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, in einer Bohrung. Der Vorteil der Methode liegt darin, dass keine Tracerzugabe notwendig ist. Dadurch werden weder der Chemismus, die Dichte noch das Temperaturfeld des Grundwassers verändert. Aus der ermittelten Partikel-Geschwindigkeit (Transportgeschwindigkeit der Feinteile in der Bohrung) lässt sich über einen Konvertierungsfaktor die mittlere Abstandsgeschwindigkeit im Aquifer abschätzen.

Die Messsonde liefert selbst bei einer geringen Anzahl von Partikeln im Grundwasser gut zu interpretierende Ergebnisse.

Partikel ab einer Größe von 5 µm können mit dem Colloidal Borescope beobachtet werden. Das System arbeitet im Geschwindigkeitsbereich von (theoretisch) 0 bis 3 cm/sec.

Das Colloidal Borescope besteht aus zwei Videokameras, einem Kompass, einer Beleuchtungseinheit und einem Linsensystem. Durchqueren Partikel den Messbereich, wird deren Bewegung durch eine Kamera mit 30 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet. Der eingebaute Kompass wird durch die zweite Videokamera beobachtet.

Die Bilder werden digitalisiert und über das Messkabel an den Rechner Obertage geleitet. Eine spezielle Software vergleicht die Bilder und errechnet aus den im Messfeld zurückgelegten Wegen der Partikel die durchschnittliche Geschwindigkeit und Richtung der Grundwasserbewegung.

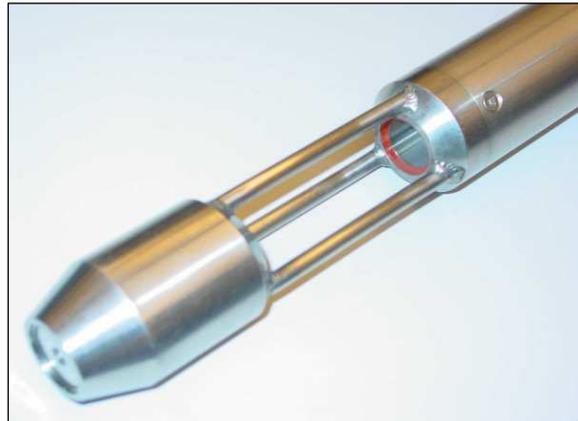


Abbildung 2: Colloidal Borescope – Detailansicht

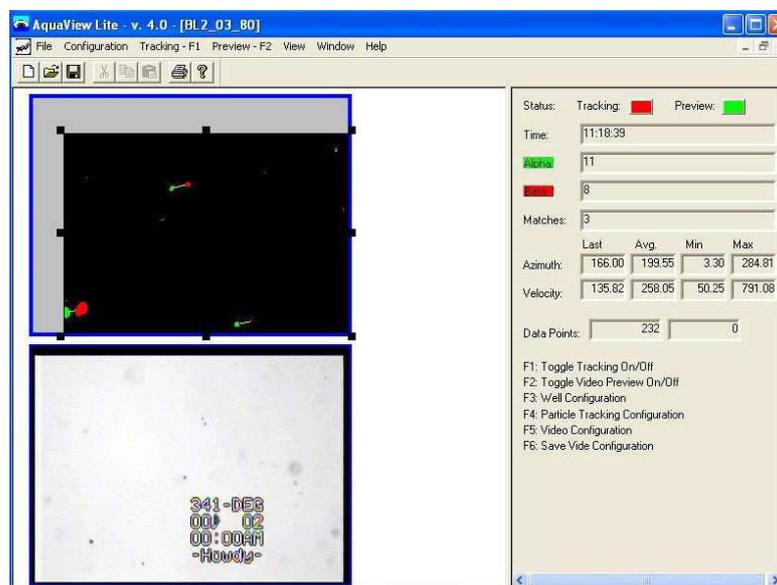


Abbildung 3: Software zur Erfassung der Partikel

Während der Messung liefert die Software zum Livebild (Abbildung 3, unteres Fenster) einen Überblick über die Partikelbewegung (Abb. 3, oberes Fenster) und errechnet ständig einen aktuellen Mittelwert der Partikelgeschwindigkeit und Bewegungs-Richtung.

Die Auswertung dieser Rohdaten erfolgt nach der Messwertkontrolle in einem separaten Schritt mittels Vektoranalyse.

II. Ausgeführte Geophysikalische Bohrlochmessungen

Nach Fertigstellung der ersten Bohrungen wurden vor dem Einbau der Sondenbündel und der nachfolgenden Verpressung geophysikalische Bohrlochmessungen durchgeführt.

Im Detail waren dies folgende Methoden:

- Temperatur-Leitfähigkeitslog
- Natural-Gamma-Log

Die Ergebnisse der Messungen sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

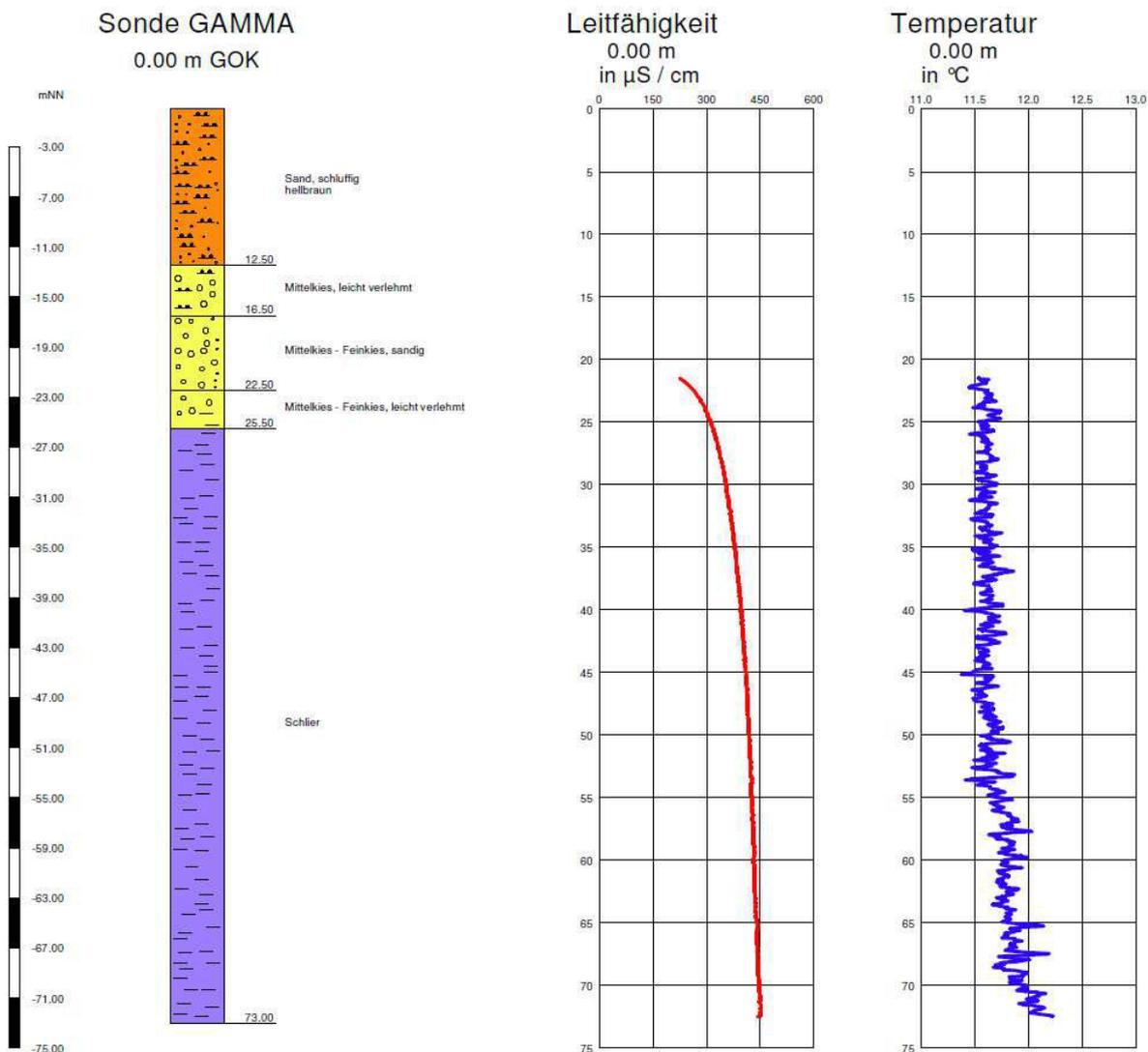


Diagramm 1: Temperatur- und Leitfähigkeitslog

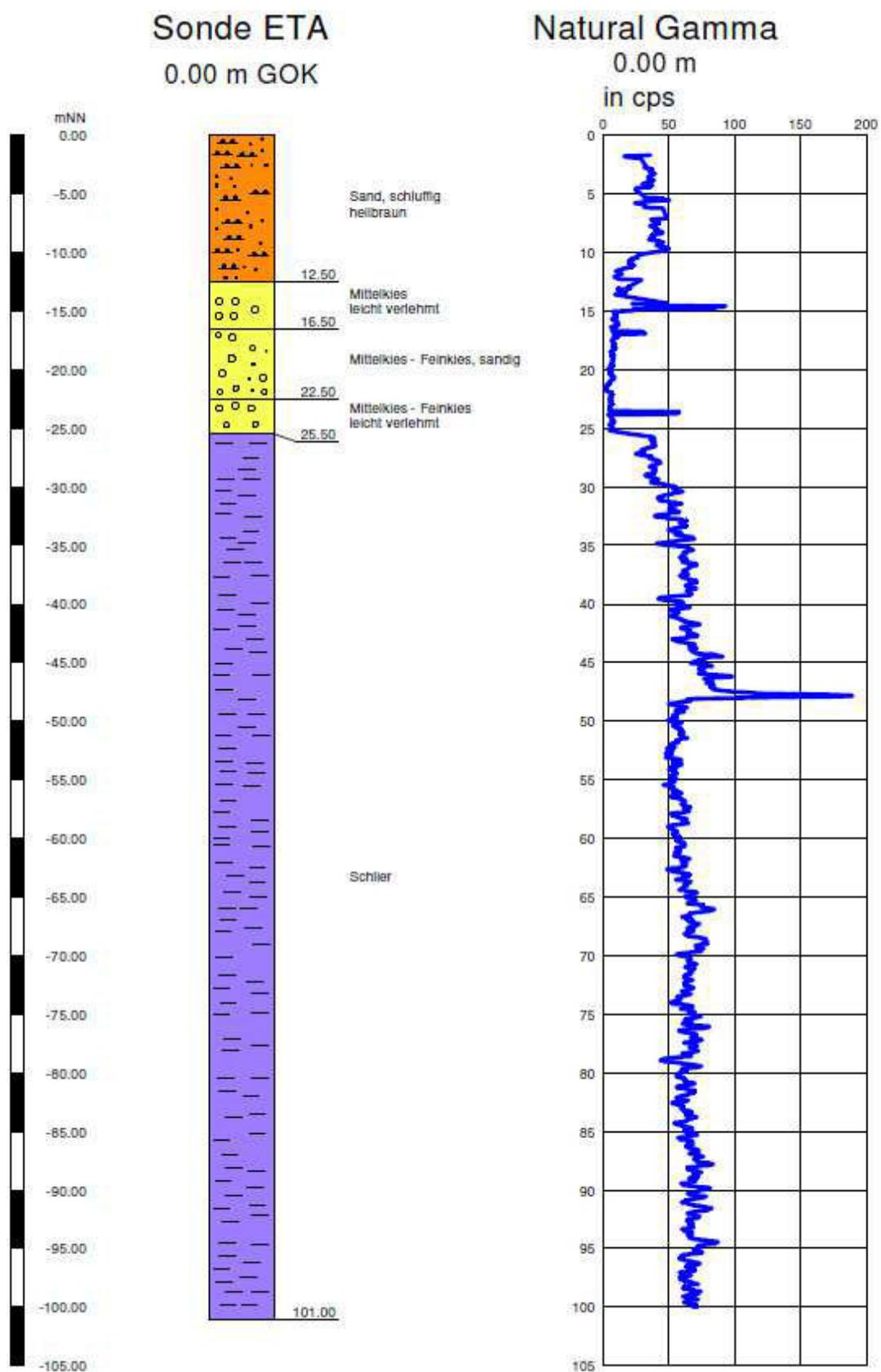


Diagramm 2: Natural Gammalog

III. Interpretation der Messergebnisse

Temperaturlog und Leitfähigkeitslog sind unauffällig. Sprunghafte Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit, die auf einen Zustrom von Wässern einer veränderten Mineralisation hindeuten, sind nicht erkennbar.

Nach Beendigung der Bohrarbeiten liegt die Wassertemperatur bis zu einer Teufe von ca. 54 m unter GOK bei 11,5 - 11,6 °C, danach steigt sie auf über 12 °C an. Von ca. 57 m unter GOK bis 67 m unter GOK ist ein Temperaturplateau interpretierbar.

Im Natural-Gamma-Log sind 3 Anomalien bei 15 m unter GOK, 24 m unter GOK und bei 48 m unter GOK erkennbar. In diesen Bereichen wurde anscheinend Material mit einem erhöhtem Anteil an natürlichen radioaktiven Isotopen durchteuft, bei den Bohrarbeiten fielen diese jedoch nicht auf, es existiert kein Eintrag im Bohrtagebuch über eine sich ändernde Geologie.

IV. Hydrodynamische Messung im hergestellten Grundwasserspiegel

In der Bohrung β , welche als Grundwasserpegel ausgebaut wurde, erfolgten hydrodynamische Messungen (Bestimmung der Grundwasserfließrichtung und Strömungsgeschwindigkeit) im August 2009.

Am Tag der Messung lag der Wasserspiegel bei 18,36 m unter Rohroberkante, die freie Tiefe betrug 25,88 Meter. Auf Grund der geringen Höhe zwischen Wasserspiegel (WSP) und Sumpfroboberkante (SUR-OK) konnten keine Flowmetermessungen zur Festlegung der optimalen Messtiefe durchgeführt werden. Die CB-Sonde wurde daher im Mittelbereich zwischen WSP und SUR-OK für die Messung fixiert.

Zum Zeitpunkt der Messungen war das Wasser in der Beobachtungssonde sehr klar, während der gesamten Messzeit von über 1,5 Stunden konnten lediglich 21 Partikel durch die Software erfasst werden, von denen 18 für die Auswertung herangezogen wurden. Diagramm 3 zeigt die relevanten Datenpunkte.

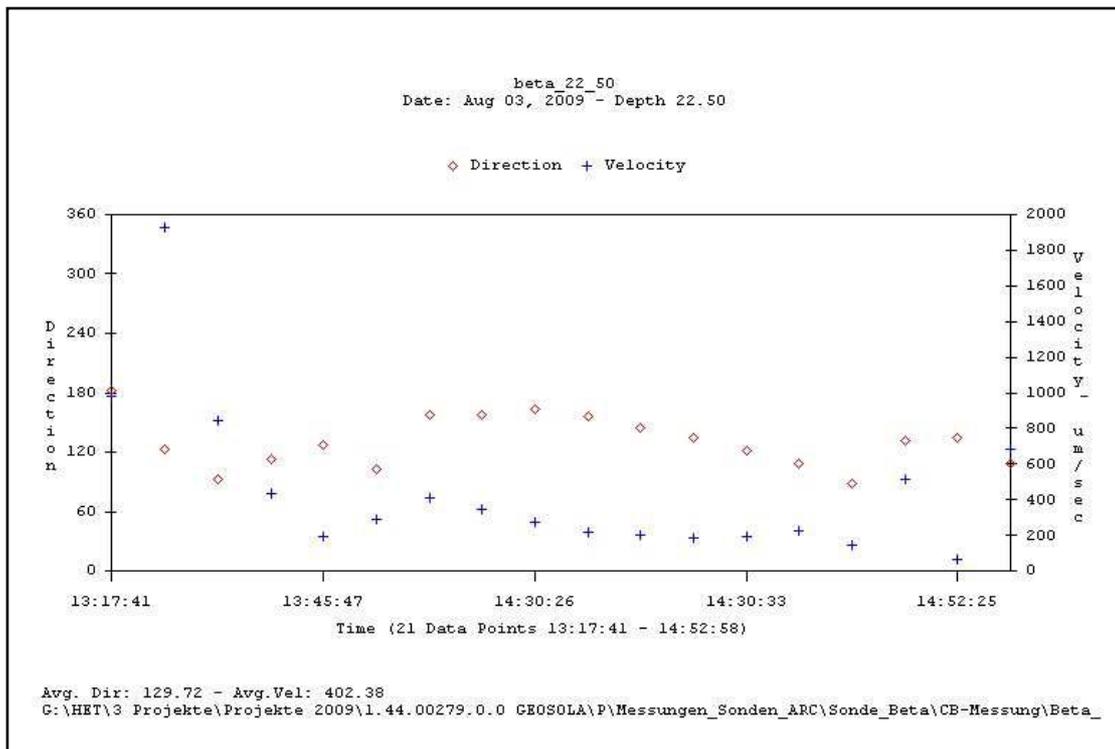


Diagramm 3: Daten der hydrodynamischen Untersuchungen in d. Beobachtungssonde

Die Auswertung der gewonnenen Daten erfolgte durch Mittelwertbildung und durch Vektoranalyse. Beide Methoden lieferten ein nahezu identisches Ergebnis:

- Strömungsrichtung: SE (ca. 130°)
- Mittlere Abstandsgeschwindigkeit: 8,5 m/Tag (Vektor) – 9,5 m/Tag (Mittelwert)

In Abbildung 4 ist die Grundwasserströmungsrichtung in einem Übersichtslageplan auf Basis der ÖK 50 eingetragen.



Abbildung 4: Auswertung der hydrodynamischen Messung in der Beobachtungssonde

B) Wassertemperatur und Grundwasserspiegel

Im Februar 2009 wurde zur Erfassung der zeitlichen Veränderung der Wassertemperatur und des Grundwasserspiegels ein Datensammler in die Beobachtungssonde eingebaut. Die Einbautiefe (Sitz des Temperatur- und Druckaufnehmers) betrug ca. 23 m unter Rohroberkante (ROK). Über einen Zeitraum von 1,5 Jahren konnten Daten erfasst werden, danach war eine Aufzeichnung nicht weiter möglich, da in der Grundwassersonde andere Versuche durchgeführt wurden.

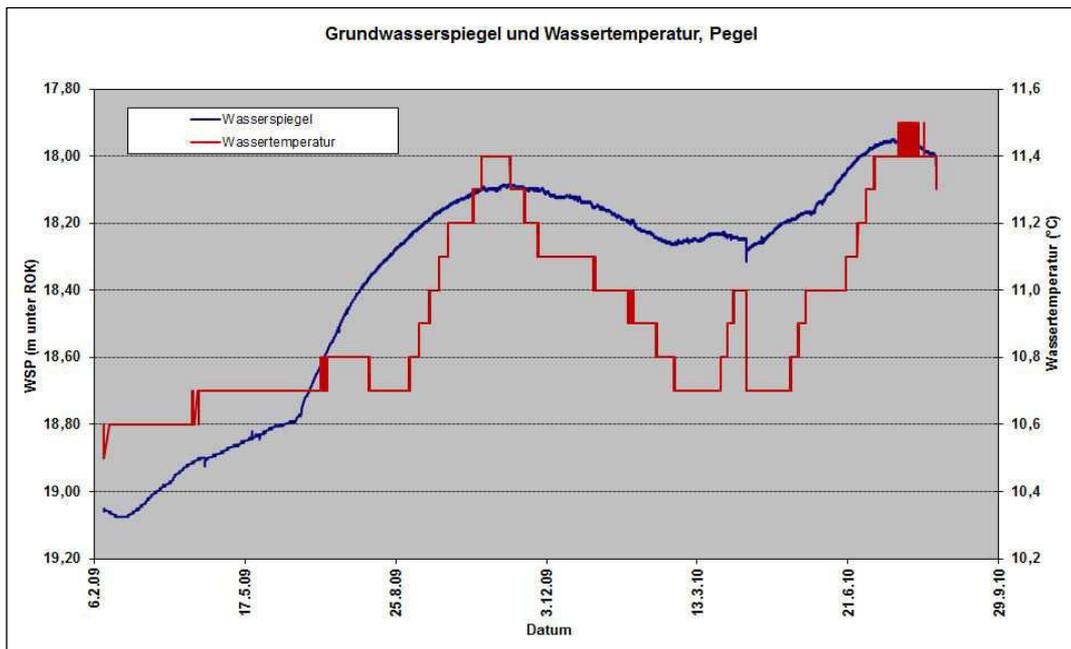


Diagramm 4: Wassertemperatur und GW-Spiegel in der Beobachtungssonde

C) Videobefahrung Sonde Gamma

Die Sonde Gamma wurde an insgesamt 3 Terminen (28.10.2008, 12.2.2009 und 20.4.2009) einer Videobefahrung unterzogen. Dabei konnten starke Beschädigungen im Gewindebereich bei Rohrverschraubungen, Ausbrüche von Rohrstücken und starke Verschmutzungen der Rohrmantelfläche festgestellt werden. Ausgewählte Bilder der Videobefahrung sind nachfolgend dargestellt.



Abbildung 5: Beschädigung der Mantelfläche des Filterrohres in der Sonde Gamma



Abbildung 6: Beschädigung der Mantelfläche des Filterrohres in der Sonde Gamma



Abbildung 7: Schmutzablagerungen und Ölfilm in der Sonde Gamma

D) Geothermische Eigenschaften

I. Allgemeines – Methodenbeschreibung

Die Wärmeentnahme durch Erdwärmesonden (Erdwärmesonde als Wärmesenke) verursacht im Untergrund, je nach Entzugsleistung und -dauer, die Ausbildung eines mehr oder weniger ausgeprägten thermischen Entzugstrichters. Dies ist vergleichbar mit dem Absenktrichter um einen Förderbrunnen in der Grundwasserhydraulik.

Zwei thermische Größen sind dabei von wesentlicher Bedeutung:

- Wärmekapazität C (J/(kgK))

Oberhalb des absoluten Nullpunktes hat der Boden einen Wärmeinhalt, der in Joule pro Gramm (J/g) oder in Joule pro cm^3 (J/cm^3) angegeben werden kann. Da diese Größe schwer zu erfassen ist, wird häufig die Wärmemenge angegeben, die in einer definierten Bodenmenge eine bestimmte Temperaturänderung hervorruft. Die entsprechende physikalische Größe nennt man *spezifische Wärmekapazität* C_p (J/(kgK)). In der Literatur wird häufig die *Wärmekapazität pro Volumeneinheit* C_v ($\text{J}/(\text{m}^3\text{K})$), die so genannte *volumetrische Wärmekapazität* verwendet (HARTGE & HORN 1999). Sie kann über die Kenntnis der Lagerungsdichte aus der spezifischen Wärmekapazität berechnet werden ($C_v = C_p \cdot D$).

- Thermische Leitfähigkeit – Wärmeleitfähigkeit λ (W/(mK))

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist das Vermögen einer Substanz (Festkörper, Flüssigkeit oder Gas), thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren. Sie gibt an, welche Energiemenge pro Sekunde durch einen Körper, der die Querschnittsfläche von 1 m^2 und die Länge von 1 m hat, fließt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen beiden Seiten 1 K beträgt.

II. Direkte Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Untergrundes – Messung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmespeicherkapazität

- Methodik

Die Bestimmung der thermischen Parameter erfolgte dabei mit dem mobilen Gerät ISOMET 2104 der Firma Applied Precision. Die Messung basiert auf der Analyse der Temperaturantwort des untersuchten Materials auf einen Wärmeimpuls. Dieser wird durch ein Widerstandsheizelement, welches in der Messsonde integriert ist, erzeugt. Aus den gemessenen Temperaturverläufen während der Aufheiz- und Abkühlphase wird die Wärmeleitfähigkeit λ und die volumetrische Wärmekapazität C_v berechnet.

Als Messsonde stehen - je nach Materialbeschaffenheit - Einstichsonden als auch Auflegesonden zur Verfügung. In Abbildung 8 ist der Messaufbau mit dem Gerät und der Messsonde dargestellt.

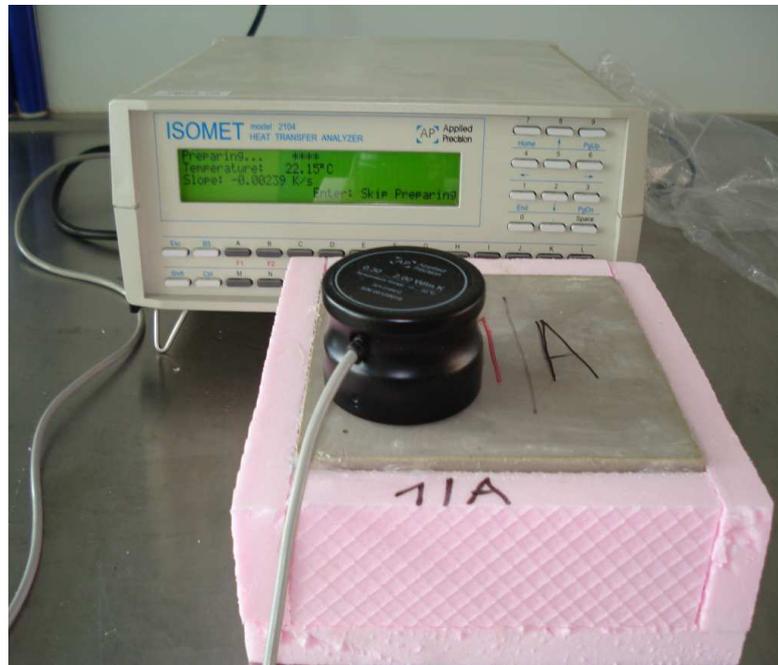


Abbildung 8: Messaufbau

- Durchgeführte Messungen

Aus den Bohrungen für die Erdwärmesonden konnten Proben der Lockergesteine in gestörter Form, sowie in stark eingeschränktem Maße Proben des Festgesteins gewonnen werden. Folgenden Formationen wurden dabei beprobt:

- Lösslehmbedeckung: eine Mischprobe aus allen Bohrungen
- Schotter der Hochterrasse: eine Mischprobe aus allen Bohrungen
- Schlierserie: Cuttings aus allen Bohrungen sowie eine Sonderprobe

Um die realen Umgebungsbedingungen im Boden so weit wie möglich herzustellen, erfolgte eine Verdichtung der Lockergesteinsproben im Proctorverdichtungsgerät. Zusätzlich zu den thermischen Parametern wurden dabei die Dichte und der Wassergehalt des so verdichteten Probekörpers bestimmt.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit sowie der Wärmespeicherkapazität erfolgte mit einer Einstichsonde, welche in den verdichteten Probekörper eingebracht wurde.

Für die Lockergesteine wurden dabei folgende mittleren thermischen Parameter bestimmt:

| Lösslehmbedeckung | | | |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|
| λ [W/(mK)] | C_p [MJ/(m ³ K)] | ρ [g/cm ³] | w [%] |
| 1,23 | 2,06 | 1,70 | 13,1 |

Tabelle 3: mittlere thermische Parameter der Lösslehmbedeckung

| Schotter der Hochterrasse | | | |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|
| λ [W/(mK)] | C_p [MJ/(m ³ K)] | ρ [g/cm ³] | w [%] |
| 1,32 | 1,58 | 2,26 | 3,03 |

Tabelle 4: mittlere thermische Parameter der Schotter

An einer Festgesteinsprobe der Schlierserie erfolgte ebenfalls die Bestimmung der thermischen Parameter. Die Probe wurde dazu einseitig angeschliffen, um eine möglichst glatte und ebene Fläche zu erhalten. Dies ist für eine einwandfreie Messung mit einer Auflegesonde entscheidend.

In Tabelle 5 ist der Mittelwert aus drei Messungen dargestellt, mittels Tauchwägung und Ofentrocknung wurde zusätzlich die Dichte sowie der Wassergehalt der Probe ermittelt.

| Schlier | | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|
| λ [W/(mK)] | C_p [MJ/(m ³ K)] | ρ [g/cm ³] | w [%] |
| 2,2 | 2,17 | 2,07 | 5,2 |

Tabelle 5: mittlere thermische Parameter der Schlierserie

Teilziel 1.3: Bauliche Arbeiten

Die Sonden wurden unmittelbar an der Rückwand des Institutsgebäudes in den Räumen, in denen die beiden Öltanks der vorgängigen Gebäudeheizung im hinteren Eingangsbereich unter dem Straßenniveau untergebracht waren, über einer Länge von ca. 20 m abgeteuft. Die dort vorgesehenen Räume, in denen sich die Sondenköpfe befinden, sind nun vom Kellertechnikumsraum des Instituts zugänglich.

Ein Plan des Messkellers mit allen Sonden und Speichertanks ist in Abbildung 9 dargestellt:

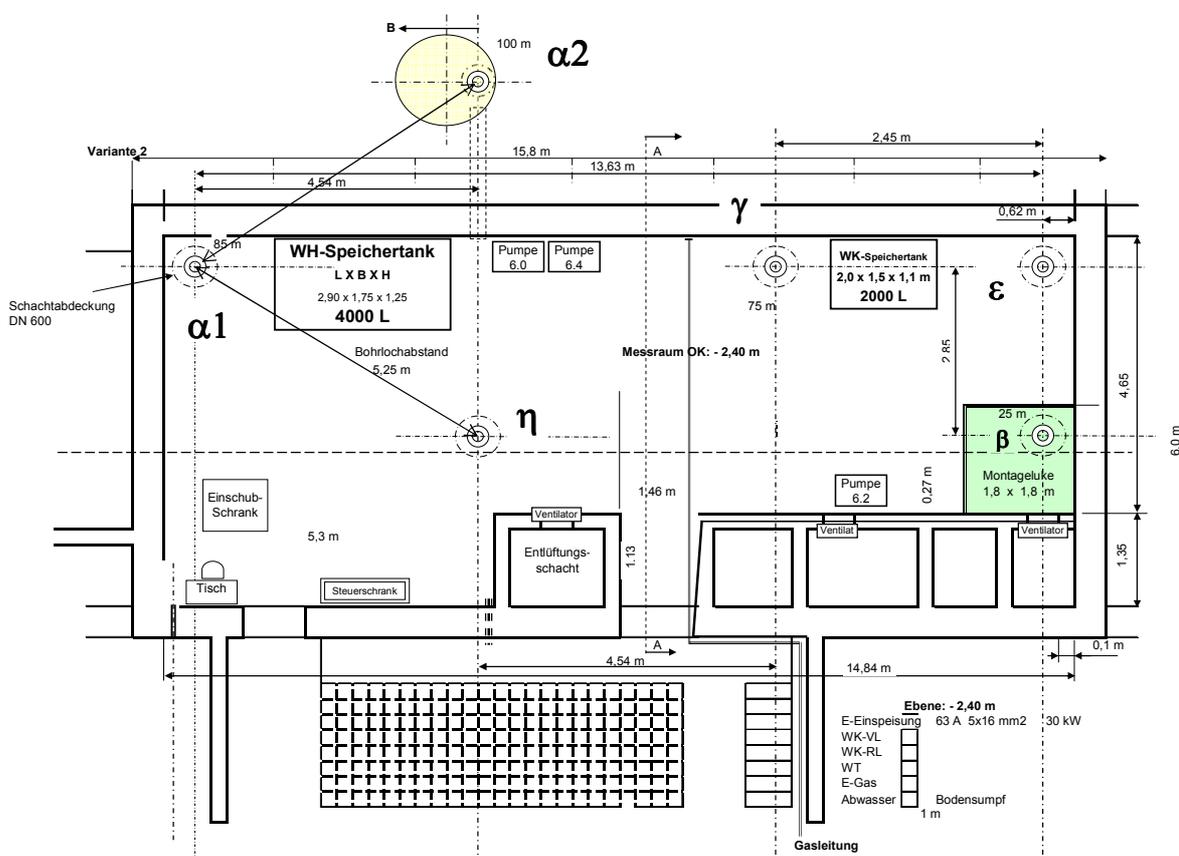


Abbildung 9: Plan des Messkellers

Arbeitspaket 2: Sonden- und Anlageninstallation

Teilziel 2.1: Gestaltung, Konstruktion und Auslegung der Sondenköpfe

A) *Beschreibung der CO₂-Sonde*

Die CO₂- Sonde besteht aus drei bis vier getrennten Sondenrohren. Der Wärmeentzug basiert auf dem Heat Pipe Prinzip, welches sich durch das Verdampfen des flüssigen CO₂ des im Erdreich befindlichen Teils der Sonde auszeichnet. Die Wärmeabgabe erfolgt durch das Kondensieren des CO₂-Dampfes im Sondenkopf.

B) *Sondenrohr*

Das Sondenrohr besteht aus Kältekupfer und ist mit einer PE Schutzhülle ummantelt. Die Sonde selbst ist auf einer Spule aufgewickelt.

C) *Sondenkopf*

Der Sondenkopf ist ein druckfester Behälter, in dem die Verdampfer-Kondensator-Kombination eingebaut ist. Der Wärmetauscher dient als Verdampfer für die Wärmepumpe und als Kondensator für die CO₂-Sonde.

Die Wärmeübertragungsleistung beträgt ca. 325 W/(m²K). Somit ist die Leistung des Sondenkopfes durch eine Oberfläche von 0,4 m² und einem Δt von 3 bis 5 [K] mit 1300 [W] begrenzt.

D) *Sondenfuß*

Die Rohrenden sind gasdicht und dauerhaft verschlossen. Zudem sind alle Rohrenden in einem Schutzrohr dicht mit Vergussmasse gegen mechanische Beschädigung geschützt.

E) *Geometrie der Sonde*

Maximale Länge von 100 m (durch Füllmenge begrenzt)

Anzahl der Sondenrohre 3 bis 4 Stück

Durchmesser D_i 16 mm

PE Schutzmantel 1 mm

Druckfestigkeit 72 bar

Max. Betriebsdruck 45 bar

In den unten dargestellten Abbildungen sind die Querschnitte der eingebauten verpressten Sonden dargestellt.

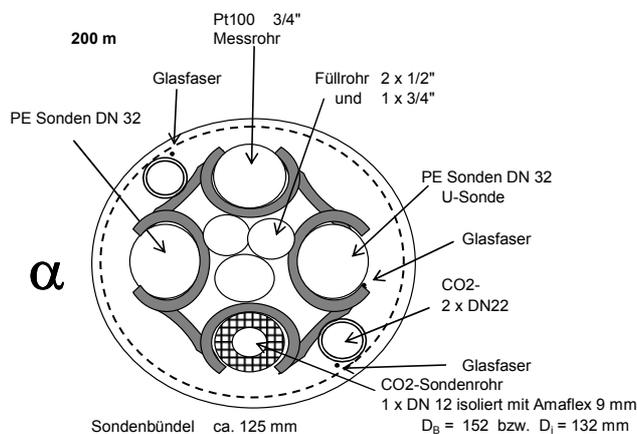


Abbildung 10: Querschnitt der Sonde α

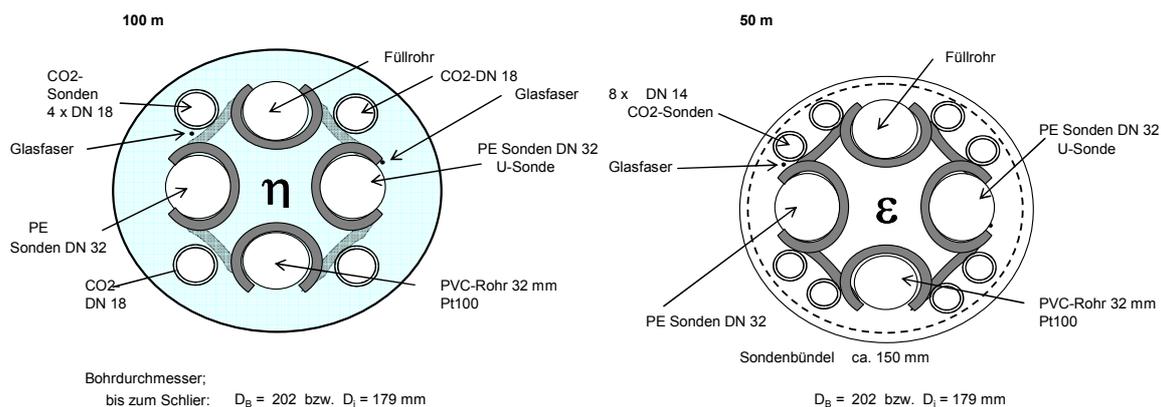


Abbildung 11: Querschnitte der Sonden η und ε

Teilziel 2.2: Einbringung und Einbau der Sonde in das Bohrloch & Verpressung

A) Vorbereiten und Einbau der Hybrid-Sonden: 1 x 50 m und 2 x 100 m

I. Wärmeentzug:

- Der Wärmeentzug soll mit Heat Pipes bestehend aus plastifizierten Kupferrohren, gefüllt mit CO₂ als Wärmeträgermedium bewerkstelligt werden.
- Die Geometrie des Sondenkopfes (Kondensator der Heat Pipes) ist für die Kühlung mit einem weiteren Wärmeträgermedium Sole auszulegen. Dies ist notwendig, da die entzogenen Wärmemengen genau vermessen werden.

II. Wärmesenke:

Für die Wärmesenke ist eine PE Sonde als U-Rohr DN 32 vorgesehen.

III. Messausrüstung:

Alle Sonden sind mit Lichtwellenleitern, auf ein Entzugsrohr und auf ein U-Rohr montiert, ausgerüstet. Ein Leerrohr als Sicherheit und ein Verpressrohr wurden mitgeführt.

Dieses Rohrbündel musste in der ganzen Länge ausgerollt, mit Abstandshaltern sorgfältig ausgerichtet und dann mit 15 Helfern in das jeweilige Bohrloch vorsichtig eingebracht werden. Dieser Vorgang ist in den unten dargestellten Fotos veranschaulicht.



Abbildung 12: Ausrichtung der Rohrbündel mittels Abstandshalter

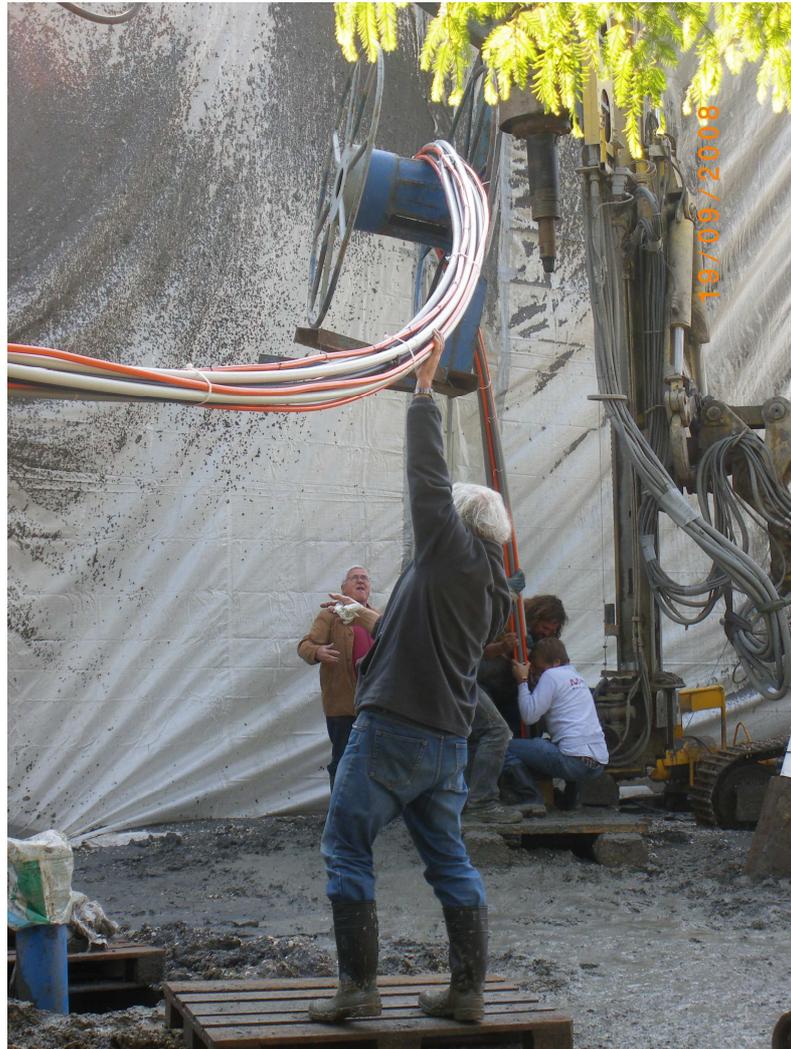


Abbildung 13: Einbringung der Sonde in das Bohrloch

Teilziel 2.3: Montage und Installation der Sondenperipherie

Montage der Sondenköpfe, Verlötung der Sondenrohre mit den Kondensatorböden, Setzen der Kondensatorgehäuserohre, Montage des Verdichters und des Kondensators, Ziehen der Verrohrung zwischen den Apparaten der Wärmepumpe bei der Sonde η und zwischen dem Sondenkopfkondensator und dem Kühlaggregat (zentrale Wärmepumpe) bei den Sonden α und ε , mechanischer Einbau der vorgesehen Messgeräte und Armaturen in den Rohrleitungsabschnitten.



Abbildung 14: Montage und Installation der Sondenperipherie

Teilziel 2.4: Instrumentierung, Steuerung, Software

Einbau der Lichtwellenleiterkabel für den Messbetrieb samt Testmessungen zur Bestimmung der Temperaturverteilung entlang der EW-Sonden.

Die Wärmeaustauscher wurden nach der Entzugsleistung der Sonden berechnet und produziert. Neben der Funktionstüchtigkeit musste auch die Messtechnik berücksichtigt werden. Die ganze Hydraulik wurde nach dem vorgegebenen Schema installiert und die Messtechnik angeschlossen.

A) *DTS-Messsystem – Sensortran*

Hierbei handelt es sich um ein opto-elektronisches Instrument, das in der Lage ist, die Temperatur exakt und schnell über die Länge des gesamten Lichtwellenleiter zu messen (Abb. 15). Ursprünglich wurde dieses System für die Weltraumtechnik zur Messung der Isoliereigenschaften der Brennstofftanks von Space-Shuttles entwickelt. DTS steht für Distributed Temperature Sensing und beruht darauf, dass Laser-Licht, sobald es auf eine Probe trifft, gestreut wird. Hierbei wird Laserlicht in kurzen Pulsen in einen Lichtwellenleiter geschossen und anschließend die Intensitäten des gestreuten Lichtes zu bestimmten Frequenzen gemessen.

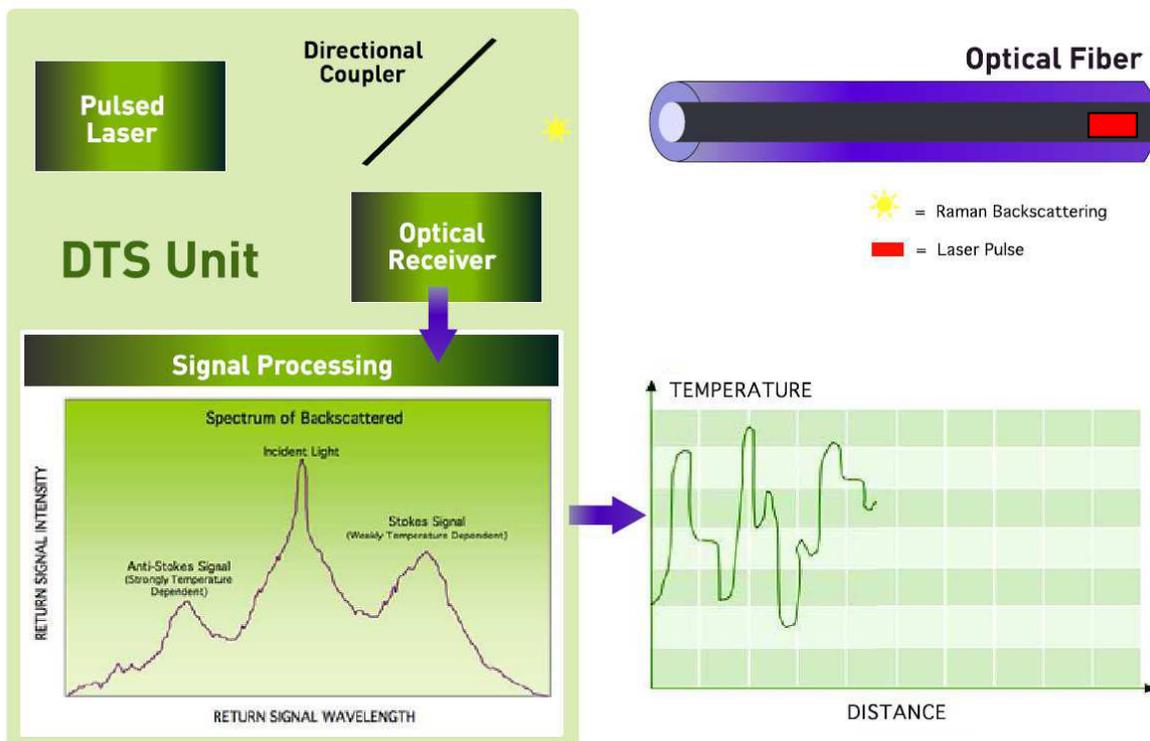


Abbildung 15: Messprinzip des Sensortran-Systems

Im charakteristischen Streuspektrum erkennt man einen dominanten Peak, dessen Frequenz jener des eingestrahlichten Lichtes entspricht. Dieser Bereich wird als Rayleigh-Streuung bezeichnet, welche nicht temperaturabhängig ist.

Weiters erkennt man noch die Raman-Peaks, den Stokes-Peak bei höheren Wellenlängen und den Anti-Stokes-Peak bei kürzeren Wellenlängen. Da aber nur die Intensität des Anti-Stokes-Peak temperaturabhängig ist, kann man aufgrund des Peakverhältnisses der beiden Signale die Temperatur der zu messenden Probe bestimmen.

Da die Lichtwellenleiter durchgängig verlegt wurden, ist nur eine Temperaturkurve zu erkennen, bei der alle drei Sonden auf einmal dargestellt sind (Diagramm 5).

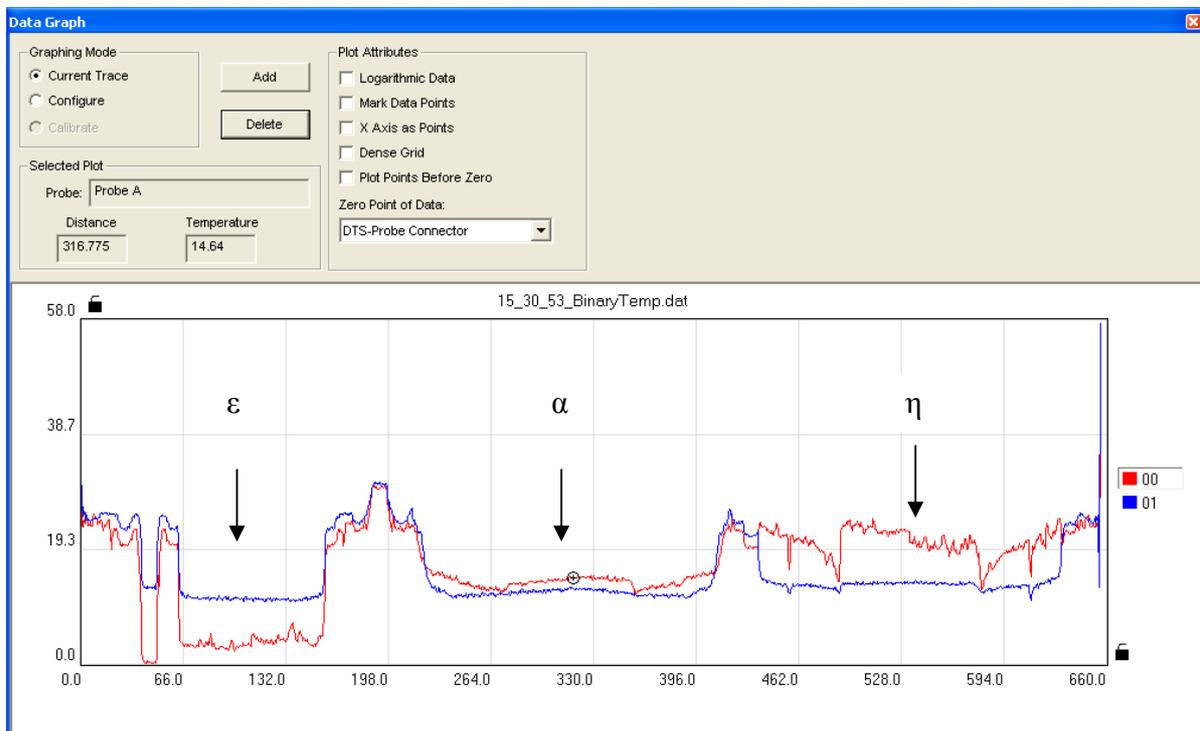


Diagramm 5: Betrachtung unterschiedlicher Temperaturkurven

Teilziel 2.5: Tests und Inbetriebnahme der Anlage

Durchführung der Thermal Response Tests (TRT) bei den Sonden Alpha und Eta zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) des Untergrundes und des thermischen Bohrlochwiderstandes (R_b).

A) Allgemeines

Diese Tests werden normalerweise bei größeren Anlagen zur Bestimmung der thermischen Untergrundparameter durch eine Standortuntersuchung eingesetzt. Dabei wird die Erdwärmesonde mit einer konstanten Wärmeleistung beladen und der Verlauf der Ein- und Austrittstemperatur aufgezeichnet.

Im Zuge des GEOSOLA-Projektes wurden die TRT nach Fertigstellung der Anlage bei den beiden 100 m Sonden durchgeführt. Ein Schema des Testaufbaus ist in Abbildung 16 dargestellt. T_{ein} , T_{aus} und T_m werden während der gesamten Testzeit aufgezeichnet.

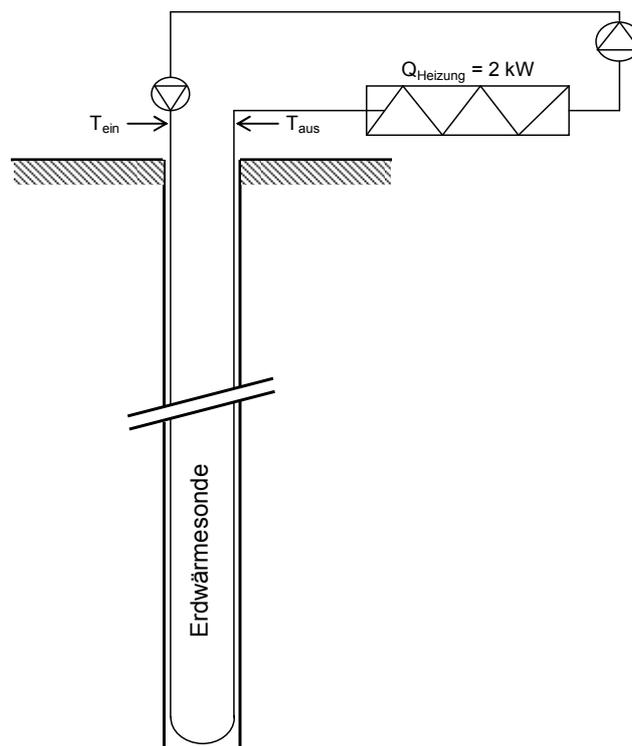


Abbildung 16: Schema des TRT

B) Testauswertung

Zur Auswertung wurde eine der am häufigsten verwendeten Methoden, basierend auf der KELVIN'schen Linienquellentheorie, herangezogen. Dazu wird die mittlere Fluidtemperatur gegen die logarithmische Zeit aufgetragen. Zur Berechnung der benötigten Parameter wurden folgende Formeln verwendet:

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi Hk} \qquad R_b = \frac{H}{Q} \cdot (T_m - T_0) - \frac{1}{4\pi\lambda_{eff}} \cdot (\ln(t) + \ln(\frac{4\alpha}{r^2}) - \gamma)$$

| | | |
|-----------------|---|--------------------------|
| λ_{eff} | Effektive Wärmeleitfähigkeit | $[\frac{W}{mK}]$ |
| Q | Wärmeeintrag | [W] |
| H | Bohrlochtiefe | [m] |
| k | Steigung der Kurve T_m gegen $\ln(t)$ | [1/K] |
| R_b | Thermischer Bohrlochwiderstand | $[\frac{mK}{W}]$ |
| r | Bohrlochradius | [m] |
| T_0 | Ungestörte Erdreichtemperatur | [K] |
| t | Testzeit | [s] |
| T_m | Mittlere Fluidtemperatur ($T_m = \frac{T_{ein} + T_{aus}}{2}$) | [K] |
| γ | Euler'sche Konstante (0,5772) | |
| α | Thermische Diffusivität ($\alpha = \frac{\lambda_{eff}}{\rho \cdot C_p}$) | $[\frac{m^2}{s}]$ |
| $\rho = 5,2$ | | [kg/m ³] |
| $c_p = 2000$ | | $[\frac{J}{kg \cdot K}]$ |

I. Sonde Eta (η)

Im Zuge des am IVT an der Geosola-Industrieforschungsanlage durchgeführten Thermal Response Tests ergab sich folgender Temperaturverlauf am Sondenein- und Ausgang. Die Auswertung des Tests erfolgt gem. Literatur (Signhild Gehlin: Thermal Response Test for BTES Applications) durch Auftragen des Temperaturanstiegs gegen den Logarithmus der Zeit.

In den unten dargestellten Diagrammen sind die Temperaturverläufe während des Tests und die halblogarithmische Auftragung zu erkennen:

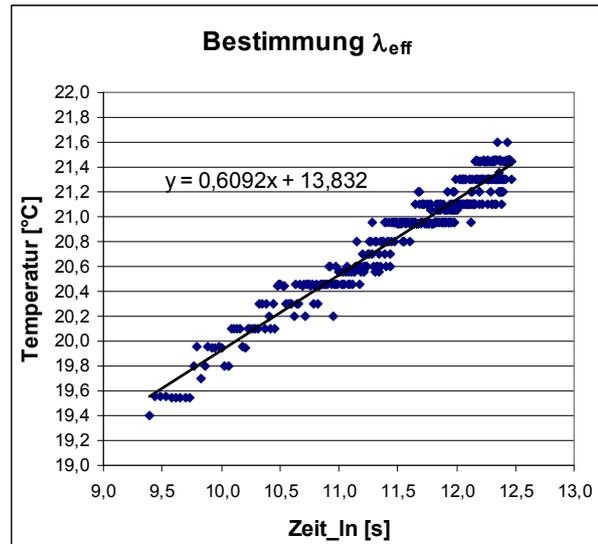
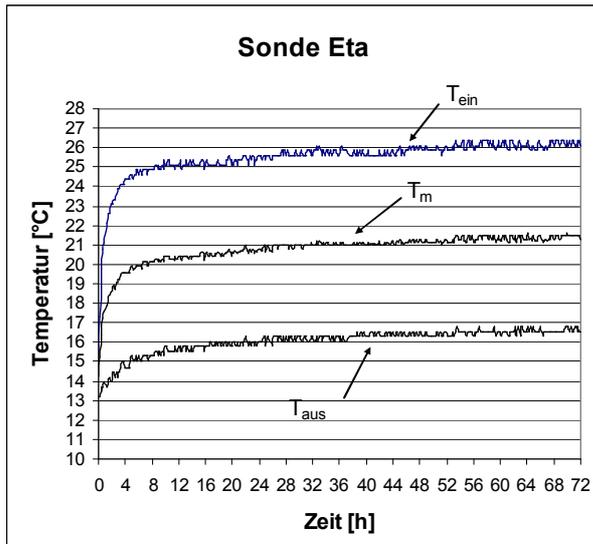


Diagramm 6: gemessene Temperaturkurven

Diagramm 7: Regressionsgerade von T_m

Die Parameter und Ergebnisse des Tests können der unten stehenden Tabelle entnommen werden.

| Testparameter und Ergebnisse | |
|--------------------------------|--|
| Bohrlochtiefe | H = 97 m |
| Bohrlochradius | r = 200 mm |
| Ungestörte Erdreichtemperatur | $T_0 = 11,69 \text{ °C}$ |
| Messzeit | t = 72 h |
| Wärmeleistung in EWS | Q = ~ 2000 W |
| Wärmeleitfähigkeit | $\lambda_{\text{eff}} = 2,61 \text{ W/(mK)}$ |
| thermischer Bohrlochwiderstand | $R_b = 0,23 \text{ mK/W}$ |

Tabelle 6: Auswertung TRT – Sonde Eta

II. Sonde Alpha (α)

Da es sich bei dieser Sonde ebenfalls um eine 100 m tiefe Bohrung handelt, und der Abstand zur Sonde Eta etwa 5 m beträgt, sollten die Ergebnisse dieses TRT die berechneten Parameter aus dem oben durchgeführten TRT der Sonde Eta bestätigen.

Die Temperaturverläufe und die halblogarithmische Auftragung des TRT der Sonde Alpha sind in den folgenden Diagrammen dargestellt:

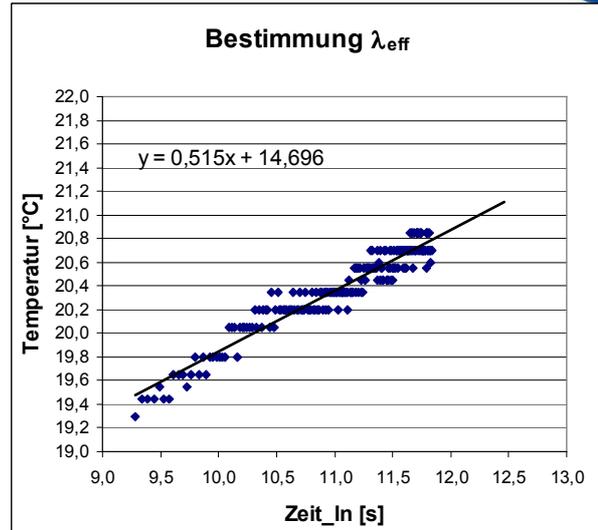
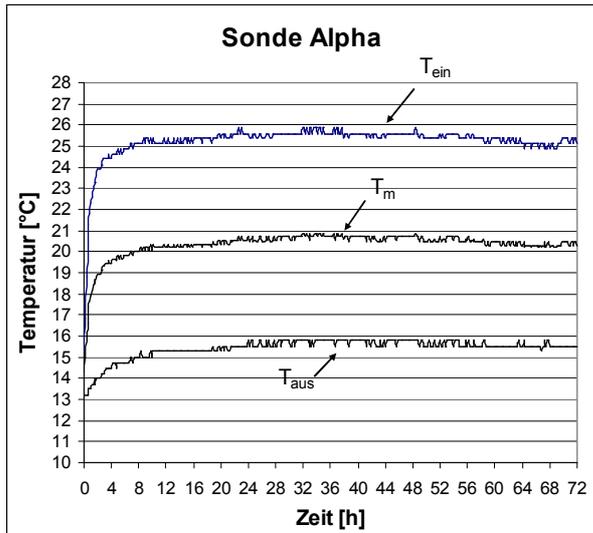


Diagramm 8: gemessene Temperaturkurven

Diagramm 9: Regressionsgerade von T_m

Die Parameter und Ergebnisse des Tests können der unten stehenden Tabelle entnommen werden.

| Testparameter und Ergebnisse | |
|--------------------------------|--|
| Bohrlochtiefe | H = 95 m |
| Bohrlochradius | r = 200 mm |
| Ungestörte Erdreichtemperatur | $T_0 = 11,79 \text{ °C}$ |
| Messzeit | t = 72 h |
| Wärmeleistung in EWS | Q = ~2000 W |
| Wärmeleitfähigkeit | $\lambda_{\text{eff}} = 3,09 \text{ W/(mK)}$ |
| thermischer Bohrlochwiderstand | $R_b = 0,21 \text{ mK/W}$ |

Tabelle 7: Auswertung TRT – Sonde Alpha

C) Interpretation

Die Werte für die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes λ_{eff} weichen etwas voneinander ab, was sich auf einen nicht optimierten Testaufbau zurückführen lässt. Ein Schema dieses Aufbaus wird in Abbildung 17 gezeigt.

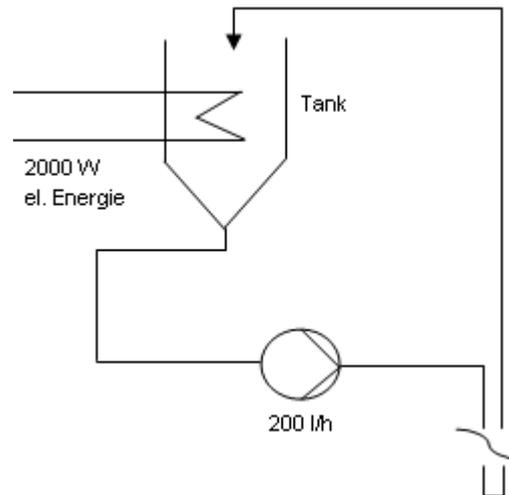


Abbildung 17: Testaufbau des TRT

Nötige Verbesserungen für weiterführende Untersuchungen wären:

- Ermitteln des genauen Leistungseintrags in die Sonde mittels Stromzähler und Überprüfen der Übereinstimmung mit dem aus Vor-, Rücklauf und Fluss berechneten Leistungseintrag,
- Optimales Isolieren des Speichertanks / der Heizeinheit, um oberirdische Wärmeverluste zu verringern,
- Optimieren der Pumpe (Fluss in der Sonde sollte im turbulenten Bereich liegen, bei diesem Test war $Re \sim 2000$),
- Neuberechnung von λ_{eff} und Bohrlochwiderstand.

Arbeitspaket 3: Sondenverpressung

Teilziel 3.1: Recherche

A) Anforderungen an Verfüllmaterialien

Ein wichtiger Bestandteil von Erdwärmesonden ist die Verpresssuspension, welche als thermische Verbindung zwischen Sondenrohr und umgebenden Boden fungiert. Der Bohrlochringraum muss dabei lückenlos verfüllt werden, um einen optimalen Anschluss der Wärmeüberträgerrohre an den Untergrund zu gewährleisten. Die Anforderungen an diese Suspensionen sind dabei sehr vielfältig. Gerade bei Erdwärmesonden müssen die eingesetzten Materialien eine lange Lebensdauer aufweisen, damit die Funktionsdauer der gesamten Sonde weit über der langen Amortisationsdauer liegt.

Zur Sicherstellung eines guten Wärmetransportes sollte das Verfüllmaterial eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Um dies zu erreichen, müssen die Eigenschaften der Einzelkomponenten sowie deren gegenseitige Beeinflussung berücksichtigt werden. Grundsätzlich bestehen Verfüllmaterialien aus Bentonit, Hochofenzement, und Wasser. Die ausgehärtete Suspension zeigt jedoch eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit (etwa $0,8 \text{ W/(mK)}$) und stellt daher einen thermischen Widerstand dar, der zu einem Verlust an nutzbarer Wärmeenergie führt.

Durch die Zugabe von Quarzsand kann die Wärmeleitfähigkeit gesteigert werden. Bei der Verwendung von grobkörnigem Quarzsand verbleibt in der Suspension ein relativ großer Anteil an Poren mit negativer Auswirkung auf die Wärmeleitfähigkeit, weiters kommt es zu einer Sedimentation des Quarzsandes im Bohrloch. Kleinere Korngrößen bringen viele Kontaktflächen zwischen den einzelnen Partikeln mit sich. Ideal ist die Mischung verschiedener Kornklassen bis zu einem Durchmesser von ca. 1 mm. Freiräume werden durch kleine Quarzsandpartikel verschlossen, die Kontaktflächen verkleinert.

Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist auch durch den Zusatz von Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit, wie zum Beispiel Graphit, möglich. Entscheidend dabei ist, dass die Suspensionseigenschaften sowie die Eigenschaften der abgebundenen und ausgehärteten Suspension durch diese Materialien nicht nachteilig verändert werden.

B) Hauptbestandteile der Verfüllmaterialien

I. Bentonit

Die Entstehung von Bentoniten erfolgt unter anderem durch Umwandlungsprozesse im vulkanischen Gestein, hervorgerufen durch hydrothermale Lösungen. Das vulkanische Gestein wird überwiegend durch Hydratation und Hydrolyse in Tonmineralien zersetzt. Dieser Prozess wird im Wesentlichen durch die Faktoren Zusammensetzung des Ausgangsgesteins, physikalische Bedingungen (Temperatur, Korngröße, Porosität, Durchlässigkeit) und Zusammensetzung der Lösung im Porenraum bestimmt.

Derzeit sind folgende Bentonite im Handel erhältlich:

- Calziumbentonit – auch als aktivierter Bentonit bezeichnet,
- Aktivierter Calziumbentonit, welcher aufgrund der Sodazugabe in einen Natriumbentonit überführt wird und in den Eigenschaften diesem sehr nahe kommt,
- Natürlich anstehender Natriumbentonit (Wyoming-Bentonit) ist in Europa sehr selten,
- Organophile Bentonite – auch Bentone oder Organoclays genannt,
- Säureaktivierte Bentonite – auch Bleicherden genannt.

II. Zement

- Herstellung

Als Rohstoffe zur Zementherstellung werden Kalkstein, Ton und deren natürliches Gemisch, der Kalksteinmergel verwendet. In den natürlichen Vorkommen ist immer ein gewisser Anteil an Eisenoxid vorhanden. Dieser gibt dem Zement seine graue Färbung. Hauptbestandteil der Rohstoffe ist Kalk. Der enthaltene Ton kann durch ähnlich zusammengesetzte Stoffe, wie Flugasche und Sand ersetzt werden. Die Gewinnung erfolgt in Steinbrüchen durch Sprengen oder Reißen mit schwerem Gerät. Die abgebauten Rohstoffe werden in Brechanlagen zu Rohschotter verarbeitet. Anschließend erfolgt eine Aufschüttung in Mischbetten zur Homogenisierung des Rohstoffes. Zur Einstellung der gewünschten Zusammensetzung wird der Rohschotter labortechnischen Untersuchungen unterzogen, um gegebenenfalls den Mischbettaufbau gezielt zu verändern. Weiters wird der Schotter vermahlen und dabei getrocknet. Danach erfolgt das Brennen des Rohmehls im Drehofen bei Temperaturen von ca. 1450 °C.

Durch Sinterung entsteht der Zementklinker in Form von kugelförmigen Partikeln mit einem Durchmesser von bis zu 3 cm.

- Zementarten und Zusammensetzung

Die Zusammensetzung der verschiedenen Zementarten ist in der EN 197-1 festgelegt. Man unterscheidet drei Hauptarten:

| | |
|------------------------|---------|
| Portlandzement | CEM I |
| Portlandkompositzement | CEM II |
| Hochofenzement | CEM III |

Die Hauptbestandteile können sein: Portlandzementklinker, Hüttensand, natürliches Puzzolan, kieselsäurereiche Flugasche, gebrannter Schiefer und Kalkstein.

- Eigenschaften

Zement ist ein fein gemahlendes, anorganisches und hydraulisch wirkendes Bindemittel. Durch Hydratation bei Zugabe von Wasser erhärtet Zement zu Zementstein. Dieser Vorgang erfolgt sowohl an der Luft als auch unter Wasser. Bei Wasseraufnahme quillt, und bei Wasserabgabe schwindet der Zementstein. Die Stärke des Schwindens ist für die Verwendung als Verfüllmaterial sehr wichtig. Das geringste Schwinden weist der Hochofenzement auf. Eine weitere positive Eigenschaft ist die geringe Beeinflussung des Quellverhaltens des Bentonits. Deshalb sollte Hochofenzement als Bestandteil der Bohrlochverfüllung für Erdwärmesonden bevorzugt werden. Der gewichtsbezogene Anteil des Zements im Verfüllmaterial sollte kleiner als 15 % sein, um die bleibende Plastizität zu gewährleisten.

C) Eingesetzte Verpressmaterialien

In der baupraktischen Anwendung werden derzeit großteils industriell hergestellte Fertigmischungen zur Verpressung von Erdwärmesonden eingesetzt. Das Material wird als Sackware an die Baustelle angeliefert und mit Hilfe von Schneckenmischern oder Kolloidalmischern unter Zugabe von Wasser zu einer Suspension verarbeitet. Untergeordnet werden noch Suspensionen auf der Baustelle aus den bereits beschriebenen Komponenten Zement, Bentonit und Wasser angerührt (Baustellenmischungen). Diese sind in der Herstellung günstiger, weisen jedoch eine weit geringere Wärmeleitfähigkeit auf. Ohne thermische Verbesserung (Quarzsand oder Quarzmehl) weisen sie Wärmeleitfähigkeiten um etwa 0,8 W/(mK) auf.

Die thermisch verbesserten Fertigprodukte erreichen hingegen λ -Werte von bis zu 2,0 W/(mK).

Folgende Fertigprodukte sind am Markt eingeführt:

- Calidutherm, dornburger zement GmbH & Co.KG
- ThermoCem, HeidelbergCement
- Stüwa Press F-10, STÜWA
- Stüwatherm, STÜWA
- K-Injekt therm, Kuchler Ankertechnik
- Dämmer Light, BTD- Bohrtechnik AG
- Duritherm, Fa. Betontechnik GmbH

Für die Baustellenmischungen finden sich in den Richtlinien der europäischen Länder Vorgaben für deren Zusammensetzung. Für Österreich und die Nachbarländer Deutschland und Schweiz sind dies:

Österreich: ÖWAV Regelblatt 207, Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen.

Deutschland: VDI Richtlinie 4640, Thermische Nutzung des Untergrundes.

Schweiz: SIA 384/6, Erdwärmesonden

Hinsichtlich der Zusammensetzung dieser Mischungen sind zwei unterschiedliche Ansätze erkennbar. In der Schweiz und in Deutschland ist der Zementanteil geringer, sodass sich nach Abbindung des Zements ein Material mit geringer Druckfestigkeit ausbildet. In der österreichischen Mischung ist der Zementanteil höher, was zu einer vergleichsweise hohen Druckfestigkeit der abgebundenen Suspension führt. Beide Ansätze haben ihre Vor- und Nachteile, ein hartes steifes Verpressmaterial schützt die Sondenverrohrung sehr gut und ist gegen Erosion sehr stabil, wird jedoch bei mehrmaliger Frost-Tauwechselbeanspruchung leicht rissig. Die Materialien mit geringerem Zementanteil bleiben relativ weich, was sie erosionsanfällig macht.

Teilziel 3.2: Geotechnische und geothermische Untersuchungen

In umfangreichen Laboruntersuchungen wurden die Eigenschaften der frischen Verpresssuspension als auch der abgebundenen Suspension ermittelt.

Bei den Untersuchungen der frischen Verpresssuspension handelte es sich um Standardverfahren, wie sie in der Beurteilung von Dicht- und Schlitzwandsuspensionen eingesetzt werden.

Im Detail wurden dabei folgende Kennwerte bestimmt:

- Trichterauslaufzeit (TAZ)
- Suspensionsdichte
- Filtratwasserabgabe
- Fließgrenze
- Absetzmaß

Bei den Untersuchungen an Probekörpern der abgebundenen Suspension erfolgte die Ermittlung folgender Kennwerte:

- Einaxiale Druckfestigkeit zu verschiedenen Abbindezeitpunkten (7, 14, 28 und teilweise 56 Tagen)
- Wasserdurchlässigkeit nach 28 Tagen Abbindezeit
- Erosionsstabilität nach 28 Tagen Abbindezeit
- Frostbeständigkeit nach 28 Tagen Abbindezeit
- Wärmeleitfähigkeit nach 28 Tagen Abbindezeit

A) Umfang der untersuchten Materialien

Die Untersuchungen umfassten handelsübliche Produkte als auch Mischungen, welche direkt auf der Baustelle hergestellt werden. In Summe wurden aus den am Markt erhältlichen Produkten vier Fertigprodukte und eine Handmischung, welche auf der Baustelle aus Einzelkomponenten abgemischt wird, untersucht.

Im Detail waren dies:

1. Fertigprodukte:

- Calidutherm, dornburger zement GmbH & Co.KG
- ThermoCem, HeidelbergCement
- Stüwa Press F-10, STÜWA
- Stüwatherm, STÜWA

II. Baustellenmischungen

- Handmischung gem. ÖWAV Richtlinie 207

Die nachfolgenden Untersuchungsergebnisse werden ohne Zuordnung zur Produktbezeichnung in anonymer Form dargestellt. Die Unterscheidung der Materialien erfolgt aufgrund einer zugeordneten Nummer.

Als Ausgangsmaterial der Baustellenmischung wurde ein Portlandhüttenzement mit der Bezeichnung CEM II/B-S sowie ein Natriumbentonit mit der Handelsbezeichnung Aktiv-Bentonit B1 verwendet. In Tabelle 8 sind die Zusammensetzungen der verwendeten Rezeptur, sowie als Vergleich die Rezepturen anderer Regelwerke zusammengestellt.

| Zusammensetzung [kg] | Rezeptur | | |
|-------------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| | ÖWAV Regelblatt 207 | VDI Regelblatt 4640 | SIA 384/6 |
| Wasser | 895 kg | 50 % | 895 kg |
| Zement | 479 kg | 25 % | 200 kg |
| Bentonit | 63 kg | 25 % | 100 kg |

Tabelle 8: Zusammensetzung der Baustellenmischungen

Die Mengenangaben in Tabelle 8 ergeben ca. einen Kubikmeter Suspension, für die Laborversuche wurden entsprechend den angegebenen Mengenverhältnissen kleinere Volumen angemischt.

B) Bestimmung der suspensionsspezifischen Kennwerte

1. Allgemeine Beschreibung der maßgebenden Suspensionskennwerte

- Suspensionsdichte

Die Ermittlung der Suspensionsdichte erfolgt im Standzylinder. Dabei wird ein Liter Suspension in den Standzylinder eingefüllt und das Gewicht ermittelt. Aus dem gegebenen Volumen und der ermittelten Masse kann die Suspensionsdichte errechnet werden.

- Fließgrenze der Suspension

Zu den wesentlichen Fließparametern einer Suspension gehören die Viskosität ε und die Fließgrenze τ_f . Die Fließgrenze ist als die Scherspannung definiert, ab der in einer Suspension Fließen eintritt.

Die Fließgrenze wird standardmäßig mit Hilfe der Kugelharfe von SOOS festgestellt. Diese besteht aus 10 Stahlkugeln mit unterschiedlichem Durchmesser, die an einer Platte mit dünnen Fäden befestigt sind. Bei der Messung wird die Platte abgesenkt, sodass die Kugeln in die Suspension eintauchen. Jeder der 10 Kugeln ist bei gegebener Suspensionsdichte eine andere spezifische Fließgrenze zugeordnet, bei der sie in der Suspension noch in Schwebelage bleibt. Kugeln, deren spezifische Fließgrenze kleiner ist als die der Suspension schwimmen auf der Oberfläche, während Kugeln mit größerer Fließgrenze eintauchen bis sie am gespannten Faden hängen. Als Messergebnis wird die spezifische Fließgrenze der größten Kugel mit gespanntem Faden ermittelt.

- Bestimmung des Fließverhaltens mit dem MARSH-Trichter

Der MARSH-Trichter besteht aus einem 1,5 l fassenden Trichter, dessen Konusspitze ohne Einschnürung in ein Auslaufröhrchen, $\varnothing = 5 \text{ mm}$, übergeht. Es werden die Zeiten gemessen, in denen 1,0 l der eingefüllten Suspension durch das Auslaufröhrchen abfließen. Die gemessenen Auslaufzeiten sind von der Wichte, der Fließgrenze und der Viskosität der Suspension abhängig und im Allgemeinen nur als relative Vergleichswerte für die Fließeigenschaften verschiedener Mischungen anzusehen. Ein Liter Wasser fließt in ca. 28 Sekunden aus dem MARSH-Trichter ab. Absolutwerte für die Fließgrenze sowie sonstige Parameter lassen sich nicht unmittelbar bestimmen.

- Bestimmung der Filtratwasserabgabe mit der Filterpresse

Mit dem Filterabpressversuch wird die Filtration an einer porösen Grenzschicht simuliert, deren Poren kleiner als die Partikelgröße der Suspension sind. Zur Durchführung des Versuches wird die zu prüfende Suspension in den zylindrischen Filterpressentopf gefüllt, dieser besitzt auf der Unterseite ein Sieb, welches mit Filterpapier abgedeckt ist. Der Filtertopf wird verschlossen und mit 7 bar Druckluft von oben beaufschlagt. Das in 7,5 Minuten durch das Sieb ausgepresste Wasser wird aufgefangen und als Filtratwasserabgabe bezeichnet.

- Bestimmung des Absetzmaßes

Bei frischen Dichtsusensionen können Sedimentationseffekte auftreten, dabei handelt es sich um vertikale Feststoffverlagerungen, die in der Regel mit einem Absondern von Wasser an der Oberfläche der Dichtmasse verbunden sind.

Die Menge dieser Absonderung von klarem Wasser an der Oberfläche der Suspension wird bestimmt und in Relation zur Gesamtmenge der Suspension gesetzt. Die Messung erfolgt indem ein Standzylinder mit einem Liter frischer Suspension befüllt wird. Nach einer Stunde wird der Anteil an abgesetztem Wasser bestimmt.

II. Anmischen der Suspensionen

Das Anmischen der Suspensionen erfolgte auf Basis einer vorgegebenen Trichterauslaufzeit zwischen 40 und 50 Sekunden. Durch diese Vorgabe sollte die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Materialien sowie die grundsätzliche Durchführbarkeit der weiteren Suspensionsversuche gewährleistet werden. Zu diesem Zweck wurde beim Anmischen einiger Fertigprodukte als auch bei den Baustellenmischungen ein größerer Anteil an Wasser verwendet als die Herstellerangaben, bzw. die Rezeptur vorschreibt.

- Anmischvorgang der Fertigprodukte

Das Anmischen der Fertigprodukte erfolgte generell nach Angaben des jeweiligen Herstellers. Die benötigte Wassermenge wird vorab in das Rührgefäß eingewogen. Nach Start des Rührers wird die abgewogene Menge an Feststoff in das Rührgefäß zugegeben. Die Mischdauer beträgt 5 Minuten, im Anschluss daran erfolgt zügig die Bestimmung der Trichterauslaufzeit. Ist diese zu lang, wird sukzessive Wasser in die Suspension eingerührt, bis eine entsprechende Trichterauslaufzeit (40 bis 50 Sekunden) erreicht wird. Danach erfolgt zügig die Ermittlung der weiteren Suspensionskennwerte.

- Anmischvorgang der Baustellenmischung

Beim Anmischen der Baustellenmischung wurde generell versucht, die in den einzelnen Rezepturen angegebenen Mengenangaben einzuhalten. Aufgrund der fehlenden Spezifikation der zu verwendeten Materialien erfolgte die Festlegung folgender Materialien:

- Zementsorte: CEM II/B-S 32,5 R
- Bentonitsorte: Natriumbentonit mit der Handelsbezeichnung Aktiv Bentonit IBECO CT

Das Anmischen der Baustellenmischung erfolgte generell nach folgender Prozedur:

- Einrühren der entsprechenden Menge Bentonit in die vorgegebene Menge Wasser
- Anquellen des Bentonits im Wasser unter ständigem Rühren für ca. 10 Minuten.
- Erst danach Zugabe der entsprechenden Zementmenge
- Ermittlung der TAZ, falls zu hoch erfolgte die Zugabe von Wasser

Dieser Anmischvorgang mit Anquellen des Bentonits wird vom Hersteller empfohlen.

C) Bestimmung der Eigenschaften der abgebundenen Suspensionen

I. Allgemeine Beschreibung der durchgeführten Versuche an Probekörpern der abgebundenen Verpressmaterialien

- Probenvorbereitung

Zur Ermittlung der Eigenschaften der abgebundenen Verpressmaterialien wurde die frische Suspension in zylindrische Formen mit den Abmessungen $D = 80 \text{ mm}$, $H = 160 \text{ mm}$ abgefüllt. Um ein Austrocknen der Probekörper während der Abbindezeit zu verhindern, wurden diese feucht, bzw. im Wasser gelagert. An den so hergestellten Probekörpern erfolgte die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit, der Wasserdurchlässigkeit, der Erosionsbeständigkeit, der Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechseln und der Wärmeleitfähigkeit.

- Volumenbeständigkeit des Materials

Die Volumenbeständigkeit beschreibt die Volumenveränderung der Suspension im Zuge des Abbinde- und Aushärtvorganges. Bestimmt wird dabei die Probenhöhe von ausgehärteten Probekörpern, diese wird in Relation zur Ausgangsprobenhöhe gesetzt. Die Ermittlung der Volumenbeständigkeit erfolgte nur an Probekörpern der Versuchsserie 1.

- Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit gem. ÖNORM B 4415

Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgt gem. ÖNORM B 4415 in einer Prüfpresse. Dabei wird ein Probekörper mittels Hydraulikstempel mit gleich bleibendem Vorschub axial belastet und die maximale Prüflast aufgezeichnet.

Die auf den Querschnitt umgelegte Spannung wird als einaxiale Druckfestigkeit q_u bezeichnet. Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgte an 7, 14, 28 und 56 Tage alten Prüfkörpern eines Verpressmaterials.

- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit gem. ÖNORM B 4422-1

Die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten k_f erfolgt gem. ÖNORM B 4422-1 bei fallender Druckhöhe.

Der hydraulische Gradient beträgt dabei im Mittel $i = 30$. Der Probekörper wird dabei von unten nach oben durchströmt, wobei die Wassermenge je Zeiteinheit registriert wird.

- Bestimmung der Erosionsbeständigkeit

Unter Erosionsstabilität versteht man die Stabilität eines Materials gegen Erosion aufgrund von strömendem Wasser. Die Bestimmung der Erosionsstabilität erfolgt mit Hilfe des Pinhole Tests. Dabei wird der Prüfkörper mit einer durchgehenden Bohrung von 1 mm Durchmesser versehen und in die Prüfapparatur eingebaut. Im Versuch wird diese Bohrung mit Wasser durchströmt. Durch Vergleich der gemessenen Wassermengen in der Zeiteinheit kann die Vergrößerung des Strömungskanals durch das strömende Wasser dargestellt werden. Am Ende des Versuches wird der Probekörper ausgebaut und beurteilt. Bei nicht erosionsstabilen Materialien erhöht sich im Zuge des Versuches die durchströmende Wassermenge und es bildet sich ein Erosionstrichter an der Bohrung.

- Bestimmung der Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechselbeanspruchung

Die Prüfung der Frostbeständigkeit erfolgt für Betone gemäß ÖNORM B 3303 und für Naturstein nach ÖNORM B 3122. Dabei werden Probekörper mit einem Alter von mindestens 28 Tagen 56 Frost-Tauwechseln unterzogen. Um das festgelegte Prüfkriterium zu erfüllen, darf die Abwitterung (Gewichtsverlust) der so geprüften Probekörper je nach Frostklasse einen vorgegebenen Grenzwert nicht überschreiten. Die Kriterien der angeführten Normen erscheinen für Verpressmaterialien von Erdwärmesonden als nicht geeignet. Die laut Norm vorgegebene Befrostungstemperatur von -20 °C wird auch bei übermäßigem Wärmeentzug in der Tiefsonde nicht erreicht. Es erfolgte daher in Absprache mit dem Auftraggeber die Festlegung von folgendem abgeänderten Temperaturprofil für die Frost-Tauwechselbeanspruchung:

- 4 Stunden Abkühlen von +10 °C auf -10 °C
- 8 Stunden konstante Temperatur von -10 °C
- 4 Stunden auftauen auf +10 °C
- 8 Stunden konstante Temperatur von +10 °C

Als weitere Abweichung zu den Normversuchen erfolgte die Lagerung während des Versuches nicht in Wasser, da dies teilweise zu einer vollständigen Zerstörung der Probekörper führen würde.

Die in den verschiedenen Rezepturen verwendeten Quellphasen (Tonminerale) würden beim Einfrieren Wasser abgeben und beim Auftauen dieses wieder aufnehmen. Dadurch entsteht ein Schrumpf- und Quellprozess, welcher den Probekörper zerstört.

Die Abmessungen der Probekörper betrug $D = 80 \text{ mm}$, $H = 160 \text{ mm}$, von jedem Material wurden 2 Probekörper befestigt. Nach 28 Frost-Tauzyklen erfolgte eine visuelle Beurteilung der Probekörper sowie die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit als objektiver Parameter. Aus dem Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit mit einer gleichaltrigen, jedoch nicht gefrostenen Probe, können eventuelle strukturelle Schwächungen infolge der Frosteinwirkung aufgezeigt werden. Bei Versuchsserie 2 wurde zusätzlich eine visuelle Beurteilung als auch eine Bestimmung der Druckfestigkeit an Probekörpern, welche 10 Frost-Tauzyklen ausgesetzt waren, durchgeführt.

Um den Prozess der Frosteinwirkung in der verpressten Sonde realitätsnahe zu simulieren, erfolgte in der ersten Untersuchungsserie ein zweiter Frost-Tauwechselversuch. Dabei wurde ein quaderförmiger Probekörper mit den Abmessungen $15 \times 15 \times 5 \text{ cm}$ hergestellt. Der Probekörper wurde dabei an der Unterseite und an den Seitenflächen mit wärmedämmendem Material umgeben, sodass nur die Oberseite direkt dem Frost ausgesetzt ist. Dies entspricht in etwa den Verhältnissen in der verpressten Sonde, da hier eine mögliche Befrostung nicht allseitig auf die Verpressung einwirkt, sondern diese nur von den Sondenrohren ausgeht.

- Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an den Probekörpern, welche für die Frost-Tauwechselversuche verwendet wurden. Dabei erfolgte die Messung der Wärmeleitfähigkeit vor Befrostung und ein weiteres mal nach Befrostung.

Aus dem Vergleich beider Messwerte kann auf eventuelle Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit infolge der Frosteinwirkung geschlossen werden. Die Messungen wurden mit dem Handmessgerät Isomet 2104 der Fa. Applied Precision Ltd ausgeführt. Bei der Probenserie 1 wurden dabei die Proben für beide Befrostungsversuche gemessen.

Teilziel 3.3: Materialauswahl und Bewertung

Die durchgeführten Untersuchungen umfassten vier handelsübliche Fertigprodukte und drei Baustellenmischungen von Verpresssuspensionen zur Verpressung von Erdwärmesonden. Von allen Produkten und Rezepturen erfolgte die Herstellung einer frischen Suspension sowie abgebundener Probekörper.

Weiters sei darauf hingewiesen, dass sich alle Resultate auf die so hergestellten frischen, bzw. abgebundenen Suspensionen beziehen.

A) *Eigenschaften der frischen Suspensionen*

1. Allgemeines, Bedeutung der Suspensionskennwerte

Im Gegensatz zu einer NEWTONschen Flüssigkeit wie Wasser entspricht das rheologische Verhalten der untersuchten Suspensionen annähernd dem BINGHAM-Modell, für welche das BINGHAMsche Fließgesetz:

$$\tau = \tau_f + \eta \times D$$

gilt. Dabei stellt *Eta* die Viskosität und *D* das Schergefälle dar. Der Faktor τ_f wird als Fließgrenze bezeichnet. Er ist die Scherspannung, die aufgebracht werden muss, damit die Suspension zu Fließen beginnt. Unter Fließfähigkeit versteht man die Fähigkeit der Suspension, sich lediglich unter der Wirkung seines Eigengewichtes auszubreiten.

Die Fließfähigkeit wird im Wesentlichen von der Fließgrenze beeinflusst. Sinkt die Schubspannung während des Fließvorganges im Beton unter den Wert der Fließgrenze, endet der Fließvorgang

Die beiden Parameter *Eta* und τ_f können mittels Viskositätsmessungen im Labor bestimmt werden. Dazu wird die Suspension in einen Rotationsviskosimeter eingebaut und abgeschert. Diese aufwendige Methode wird in der Praxis durch vereinfachte Verfahren ersetzt. Eines dieser Verfahren zur Ermittlung der Fließgrenze stellt das Kugelharfengerät nach SOOS dar.

Fließgrenze und Viskosität wirken sich direkt auf die Sedimentationsbeständigkeit aus. Man versteht unter Sedimentationsbeständigkeit den Widerstand gegen Entmischen sowohl während des Fließvorgangs als auch nach dem Erreichen der endgültigen Lage im Bohrloch. Je geringer die Werte für Viskosität und Fließgrenze sind, desto größer wird die Neigung zum Sedimentieren. Die Folge einer mangelnden Gefügestabilität ist das Absetzen von Klarwasser an der Suspensionsoberfläche.

Eine weitere Eigenschaft von Verpresssuspensionen ist die sog. Thixotropie. Darunter versteht man die Eigenschaft der Verflüssigung unter mechanischer Kraftereinwirkung und der Verfestigung in Ruhephasen. Außer vom Abbindegrad und der Temperatur wird die Fließgrenze einer Suspension wesentlich von ihrer thixotropen Eigenschaft beeinflusst.

Die Eigenschaften der untersuchten frischen Suspensionen sollen auf Grundlage folgender Kennwerte beurteilt werden:

- Suspensionsdichte
- Fließgrenze
- Filtratwasserabgabe
- Absetzmaß
- Trichterauslaufzeit

Dabei beschreiben die Suspensionsdichte, die Fließgrenze und die Trichterauslaufzeit qualitativ die rheologischen Eigenschaften und im Besonderen die Viskosität der Suspensionen.

Der suspensionsspezifische Kennwert Filtratwasserabgabe kennzeichnet quantitativ die Wasserabgabe an einer Fläche mit vorgegebener Porosität infolge eines auf die Suspension wirkenden Druckes. Dies soll das Verpressen gegen poröses Gebirge bzw. Lockergestein simulieren. Infolge des hydrostatischen Druckes der Suspension wird dabei Wasser in das umgebende Gebirge abgegeben. Bei Schlitzwänden gilt für Bentonit-Zementsuspensionen ein oberer Grenzwert von 130 ml.

Das Absetzmaß beschreibt hingegen das Absondern von Wasser an der Oberfläche der Suspension infolge von Sedimentationseffekten. Dies führt zu einer Volumsverringering der abgebundenen Suspension. Nach den EAU (1990) soll das Absetzmaß bei Schmal- und Schlitzwänden nicht mehr als 3 % betragen. Bei der gewählten Prüfanordnung mit 1000 ml Suspension entspricht dies einer Filtratwasserabgabe von max. 30 ml.

Als rein rechnerischer Kennwert wird weiters der Wasser/Feststoffwert (W/F-Wert) für jede Suspension berechnet. Dieser Wert gibt das Gewichtsverhältnis von verwendetem Wasser zu eingesetztem Feststoff (Summe aller Komponenten, z.B. Bentonit und Zement) an. Hohe W/F-Werte bedeuten dabei generell geringe Suspensionsdichten.

II. Zusammenfassung und Interpretation der gemessenen Suspensionskennwerte

Wie bereits beschrieben, erfolgte das Anmischen der Suspensionen auf Basis einer vorgegebenen Trichterauslaufzeit (TAZ) zwischen 40 und 50 Sekunden. Durch diese Vorgabe sollte die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Materialien sowie die grundsätzliche Durchführbarkeit der weiteren Suspensionsversuche gewährleistet werden. Die gemessenen TAZ betragen maximal 54 Sekunden bei der Suspension aus Material 2 bzw. 43 Sekunden bei Material 4. Der Streubereich beträgt daher 11 Sekunden bei einem Mittelwert von 48 Sekunden.

Bei den nachfolgenden Interpretationen der Suspensionskennwerte ist die TAZ in einem Streubereich als konstanter vorgegebener Wert anzusehen.

- Suspensionskennwerte und -eigenschaften der Fertigmischungen

Da die gemessenen Suspensionsdichten gut mit dem errechneten Wasser/Feststoffwert (W/F-Wert) korrelieren, erfolgt eine gemeinsame Betrachtung beider Werte. Geringe W/F-Werte entsprechen dabei hohen Suspensionsdichten und umgekehrt. Die gemessenen Dichten aller untersuchten Suspensionen sind in Diagramm 10 dargestellt. Als Anhaltswert zur Beurteilung ist die Dichte von $\rho_{\text{susp}} = 1,3 \text{ g/cm}^3$ durch eine rote Linie markiert.

Alle untersuchten Fertigprodukte überschreiten diesen Wert. Die maximale Suspensionsdichte betrug $\rho_{\text{susp}} = 1,72 \text{ g/cm}^3$ und wurde bei Material 5 gemessen. Die kleinste Dichte ergab sich bei Material 3 mit $\rho_{\text{susp}} = 1,27 \text{ g/cm}^3$. Umgekehrt proportional dazu verhalten sich die W/F-Werte. Besonders bei Material 7 errechnet sich ein hoher W/F-Wert bei einer geringen Suspensionsdichte. Die anderen Suspensionen aus Fertigprodukten zeigen W/F-Werte unter 1.

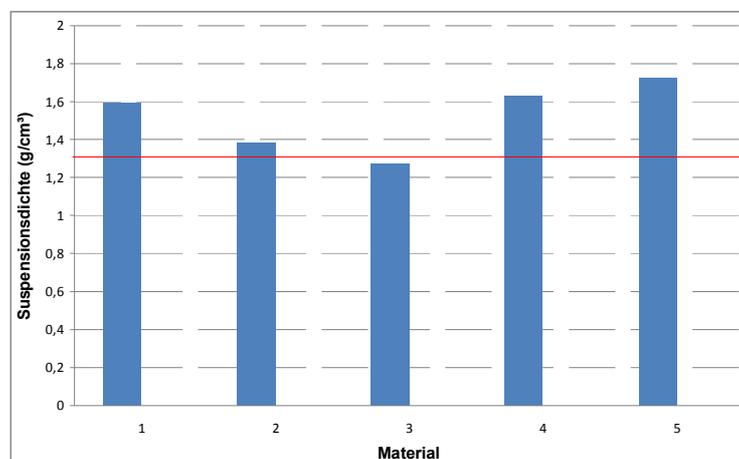


Diagramm 10: Zusammenstellung der gemessenen Suspensionsdichten

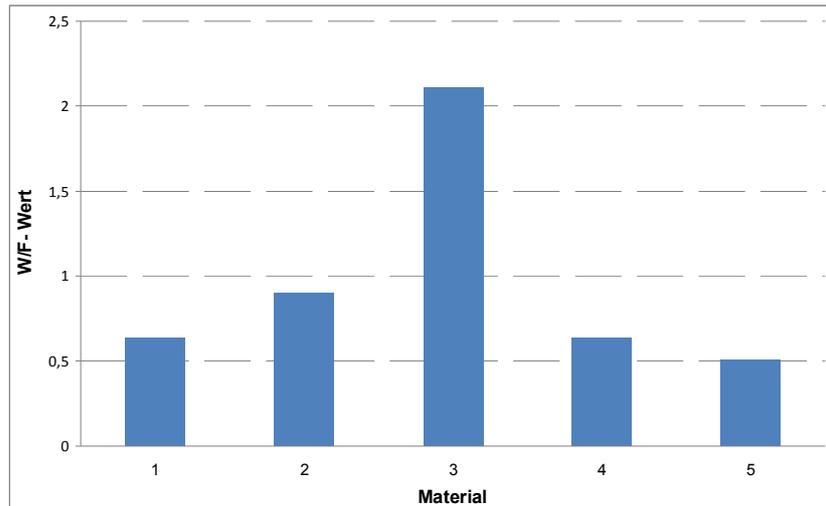


Diagramm 11: Zusammenstellung der errechneten W/F-Werte

Die gemessenen Fließgrenzen variieren stark, Material 2 zeigt dabei den geringsten Wert mit $\tau_f = 16 \text{ N/mm}^2$ und Material 3 den höchsten Wert mit $\tau_f = 47 \text{ N/mm}^2$, vgl. Diagramm 12. Das rheologische Verhalten der Suspensionen entspricht, wie bereits beschrieben, annähernd dem Bingham-Modell. Die Fließfähigkeit wird im Wesentlichen von der Fließgrenze τ_f beeinflusst. Sinkt die Schubspannung während des Fließvorganges in der Suspension unter den Wert der Fließgrenze τ_f , endet der Fließvorgang und die Suspension kommt zum Stehen. D.h. die Fließfähigkeit einer Suspension ist umso größer, je kleiner ihre Fließgrenze ist. Eine fließfähige Konsistenz ist jedoch Voraussetzung für eine hohlraumfreie Verfüllung.

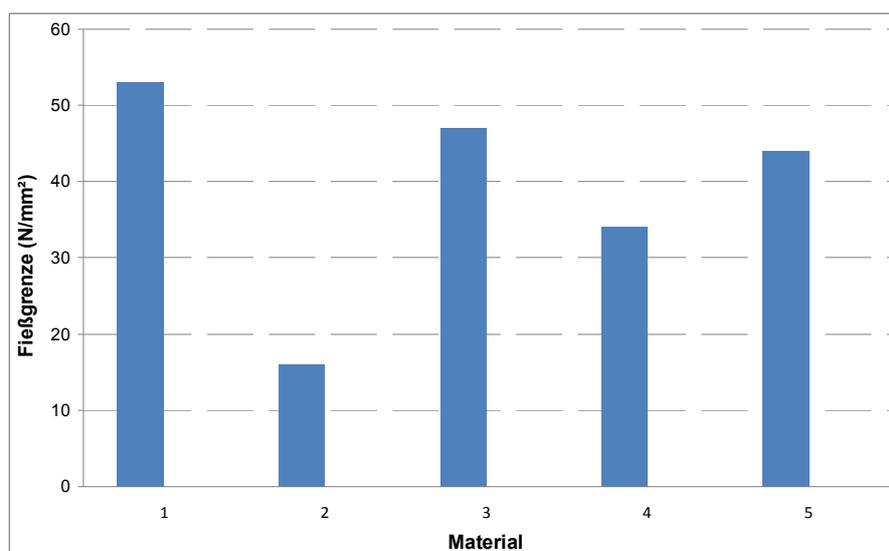


Diagramm 12: Zusammenstellung der ermittelten Fließgrenzen

Die Fließfähigkeit wird im Wesentlichen durch den W/F-Wert sowie durch das Vorhandensein von quellfähigen Phasen in der Suspension beeinflusst. Hohe W/F-Werte führen allgemein zu geringen Fließgrenzen und somit zu fließfähigen Suspensionen. Sind jedoch Quelltone vorhanden, binden diese Wasser, was auch bei hohen W/F-Werten zu hohen Fließgrenzen führen kann. Dies erklärt bei Material 3 den hohen Wert der Fließgrenze bei gleichzeitig hohem W/F-Wert.

Große Variationen zeigen sich weiters bei den gemessenen Filtratwasserabgaben, siehe Diagramm 13. Die geringste Filtratwasserabgabe wurde dabei bei Material 3 mit $f = 91$ ml, die größte bei Material 2 mit $f = 123$ ml gemessen. Generell zeigt eine große Filtratwasserabgabe, dass freies, ungebundenes Wasser in der Suspension vorhanden ist, welches nicht von hydraulischen Bindemitteln oder quellfähigen Phasen aufgenommen werden kann. Dieses freie Wasser kann im Bohrloch in durchlässiges Gebirge abfiltrieren, was zu einem Volumenverlust in der Suspension führt. Eine große Filtratwasserabgabe deutet bei den Fertigprodukten auf das Fehlen von quellfähigen Phasen hin, da diese bei W/F-Werten unter 1 einen Großteil des Wassers anlagern und diesen im Filterabpressversuch nur zu einem geringen Teil abgeben.

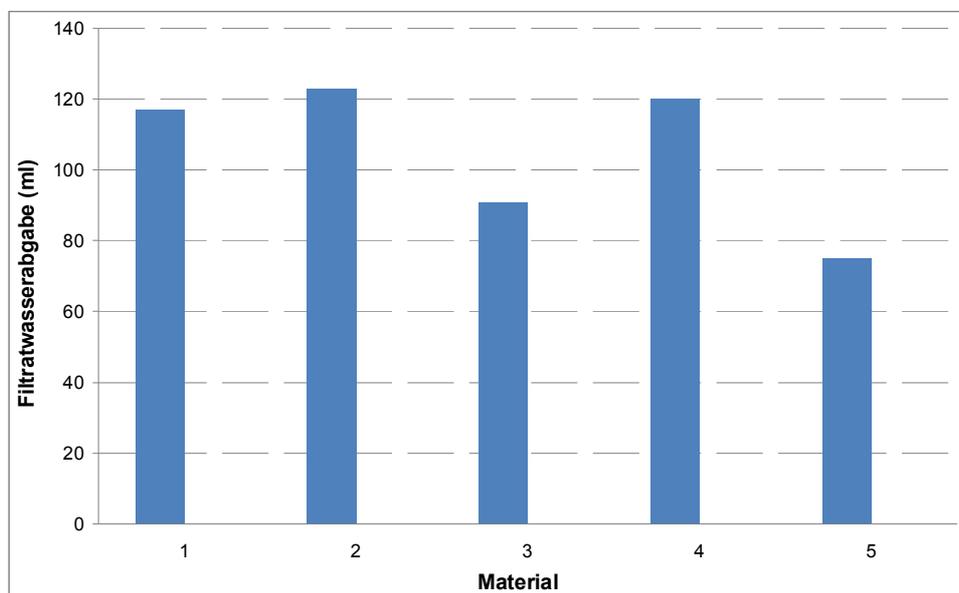


Diagramm 13: Zusammenstellung der gemessenen Filtratwasserabgaben

Das nach 24 Stunden gemessene Absetzvolumen weist den größten Streubereich auf.

An Material 7 zeigte sich dabei das geringste abgesetzte Wasservolumen von $\Delta V = 0,9$ ml, bei Material 4 hingegen betrug das Absetzvolumen 33,1 ml, was 3,3 % des Gesamtvolumens (1000 ml) entspricht. Ein hohes Absetzvolumen deutet auf instabile Suspensionen hin. Aufgrund von Sedimentationserscheinungen kommt es zum Absetzen von Klarwasser an der Oberfläche und somit zu einem Volumsverlust an abgebundener Suspension. Weiters können sich inhomogene Verfüllkörper ausbilden.

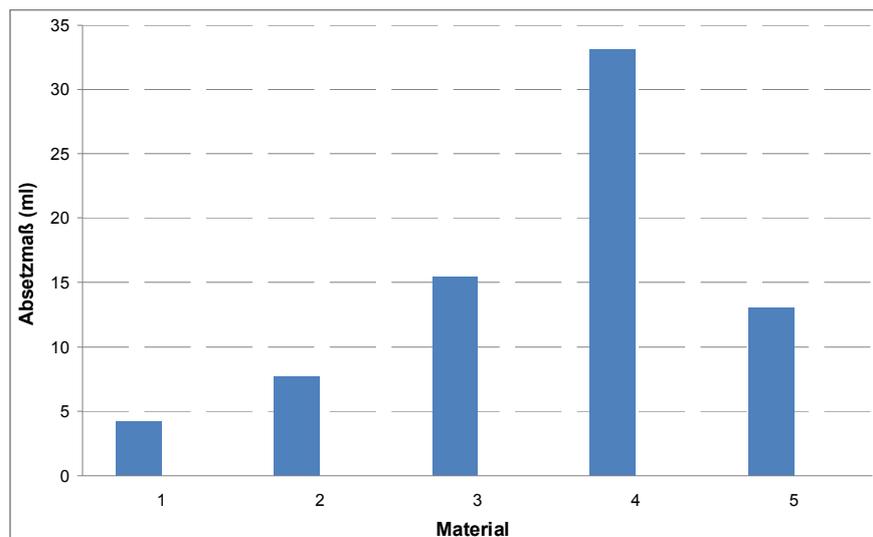


Diagramm 14: Zusammenstellung der nach 24 Stunden gemessenen Absetzvolumina

B) Eigenschaften der abgebundenen Suspensionen

I. Volumenbeständigkeit

Die Volumenbeständigkeit der einzelnen Materialien bezieht sich auf die Veränderung der Höhe von Probekörpern während der Abbindezeit infolge des Absetzens von Klarwasser an der Oberfläche sowie anderer Schwindvorgänge. Die Ausgangsprobenhöhe betrug dabei 160 mm bei einem Probendurchmesser von 80 mm. Der größte Verlust an Volumen im abgebundenen Zustand zeigt sich bei Material 3. Es handelt sich dabei um eine Baustellenmischung. Im Vergleich dazu zeigen die restlichen Materialien, alles Fertigprodukte, weit geringere Volumenverluste. Bei einem Vergleich der Fertigprodukte zeigt Material 4 einen höheren Wert. Bei beiden Materialien dürfte es sich dabei um normale Schwindvorgänge infolge der Hydratation des Zementes handeln. Material 4 besitzt auch die höchste Endfestigkeit, was auf einen hohen Zementgehalt und damit verbunden auf ein größeres Schwindmaß schließen lässt.

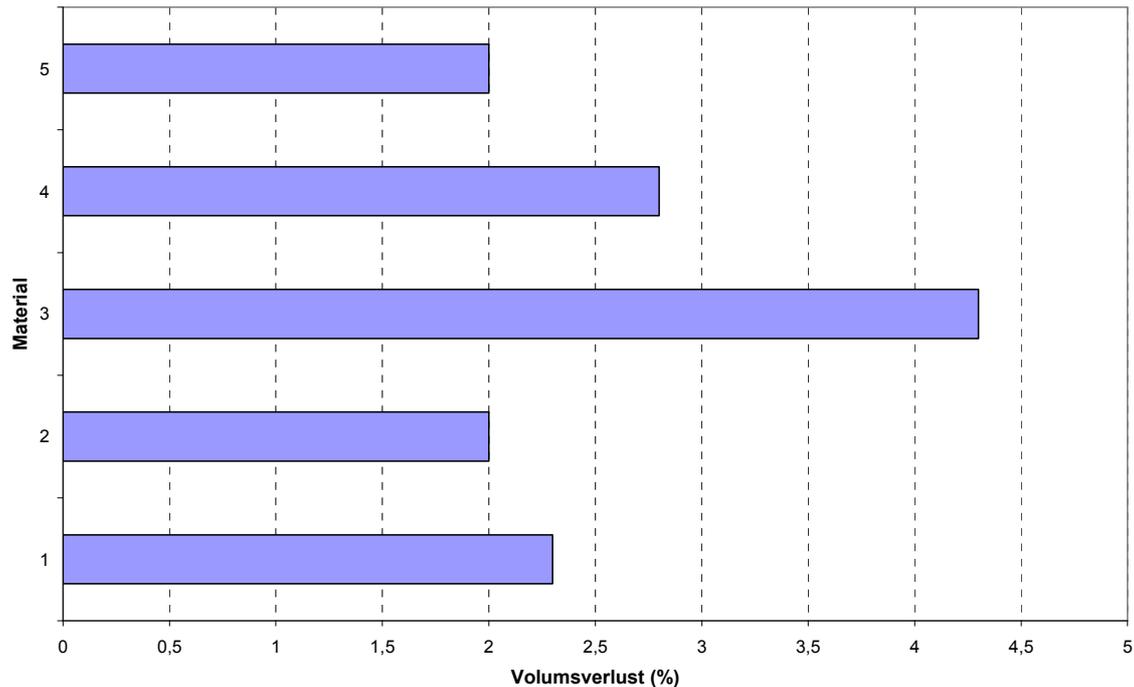


Diagramm 15: Zusammenstellung der gemessenen Volumenveränderungen an Probekörper der Serie 1

II. Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde nach 7, 14, 28 und 56 Tagen Abbindezeit an Probekörpern ermittelt. In Diagramm 16 sind die ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten je Material und Abbindezeit dargestellt.

Die Endfestigkeiten liegen dabei zwischen $3,2 \text{ N/mm}^2$ (Material 4) und $0,9 \text{ N/mm}^2$ (Material 5) und zeigen somit einen großen Streubereich.

Neben der Endfestigkeit ist auch der Verlauf des Festigkeitszuwachses interessant. Einige Materialien zeigen einen proportionalen Zuwachs über die Abbindezeit, vgl. Mat. 2 und 3. Ein relativ rasches Abbinden zeigen Material 1 und 4, hier zeigen bereits die Druckfestigkeiten nach 7 Tagen im Vergleich zur Endfestigkeit hohe Werte. Beide Materialien dürften daher einen entsprechend hohen Bindemittelanteil bei geringem Anteil an Quellton aufweisen. Dies würde auch die hohen Filtratwasserabgaben der frischen Suspensionen erklären.

Für Schlitzwandmassen wird im Hinblick auf eine ausreichende Erosionsstabilität eine Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen von $q_f = 0,3 \text{ N/mm}^2$ gefordert. Alle untersuchten Materialien erreichen diese Vorgabe, bzw. überschreiten diesen Wert um ein Vielfaches.

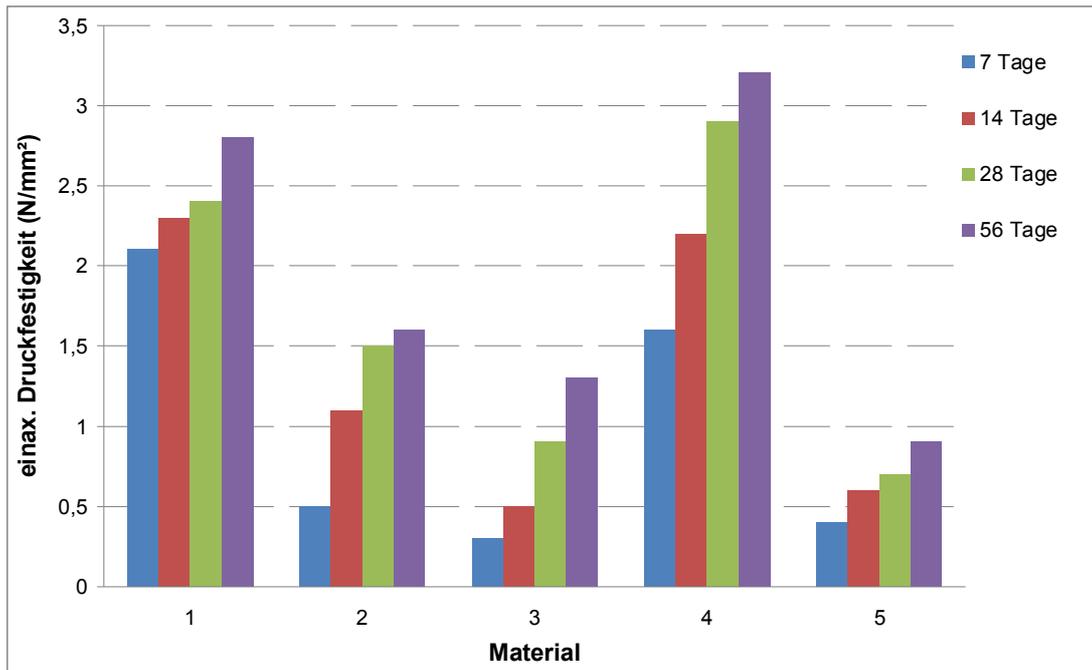


Diagramm 16: Zusammenstellung der gemessenen einaxialen Druckfestigkeiten an den Probekörpern zu verschiedenen Abbindezeitpunkten

III. Wasserdurchlässigkeit der ausgehärteten Suspension

Der Wasserdurchlässigkeitskoeffizient k_f wurde an Probekörpern beider Serien nach 28 Tagen Abbindezeit bei einem hydraulischen Gradienten von $i = 30$ ermittelt. Diagramm 17 zeigt eine Zusammenstellung der ermittelten Werte.

Die gemessenen Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten variieren dabei zwischen $k_f = 1E^{-9}$ und $1E^{-8}$ m/s. Bei Lockergesteinsböden entspricht dies einem schwach durchlässigen bis sehr schwach durchlässigen Boden wie Schluff-Tongemischen.

Dabei führt ein hohe W/F-Wert in Kombination mit dem geringen Verhältnis von Zement zu Quellton zu durchlässigeren Probekörpern. Die während der Hydratation des Zementes entstehenden Phasen verschließen nur geringe Teile des Porenraumes, sodass noch genügend offene Kanäle als Wasserwegigkeiten offen bleiben.

Von der EAU (1990) wird ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \leq 5E^{-8}$ m/s für konventionelle Dichtmassen zur bautechnischen Abdichtung gegen Grundwasser gefordert. Dabei ist jedoch unklar, ob es sich um die reine Materialdurchlässigkeit oder um die Systemdurchlässigkeit aller Einbauten handelt.

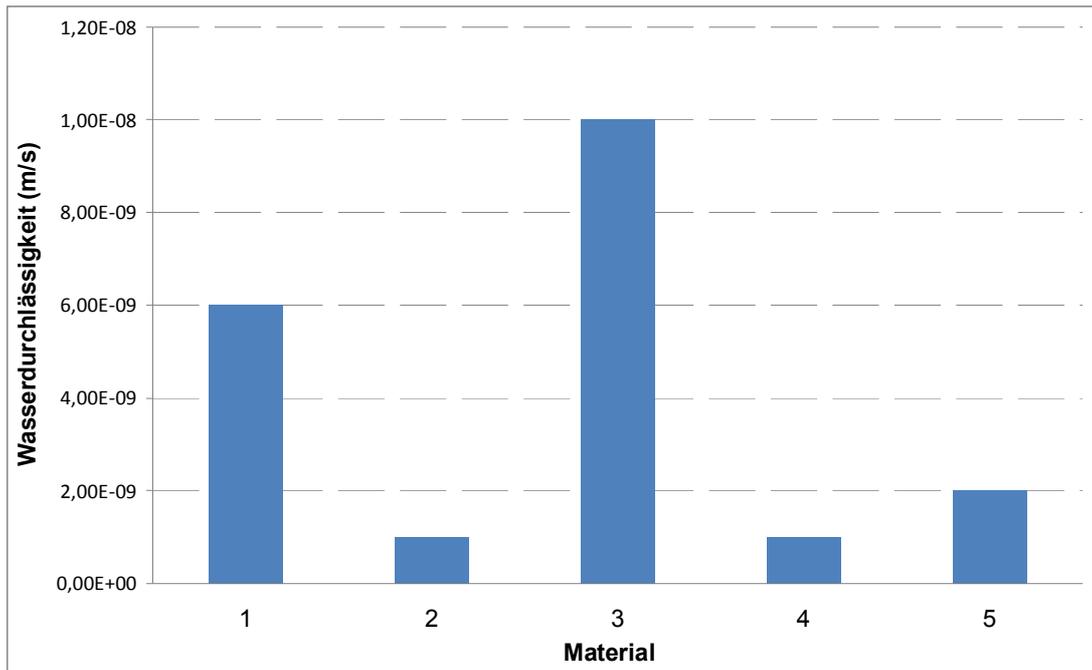


Diagramm 17: Darstellung der ermittelten Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten

Die im Labor ermittelten Durchlässigkeiten geben nur die reine Materialdurchlässigkeit der abgebundenen Suspensionen wieder. Die Systemdurchlässigkeit, d.h. die Durchlässigkeit der Verpressung samt Sondenverrohrung ist etwa eine halbe bis eine Zehnerpotenz höher anzusetzen.

IV. *Erosionsbeständigkeit der abgebundenen Suspension*

Aufgrund der hohen einaxialen Druckfestigkeiten sind alle untersuchten Materialien als erosionsstabil zu bezeichnen. Eine Untersuchung der Erosionsstabilität mit Hilfe des Pinhole-Tests ist nur bei geringen Druckfestigkeiten ($> 0,3 \text{ N/mm}^2$) gefordert.

V. *Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechseleinwirkung*

Um den Prozess der Frosteinwirkung in der verpressten Sonde realitätsnahe zu simulieren, erfolgte in der ersten Untersuchungsserie ein zweiter Frost-Tauwechselversuch. Dabei wurde ein quaderförmiger Probekörper mit den Abmessungen $15 \times 15 \times 5 \text{ cm}$ hergestellt. Der Probekörper wurde dabei an der Unterseite und an den Seitenflächen mit wärmedämmendem Material umgeben, sodass nur die Oberseite direkt dem Frost ausgesetzt war.

Dies entspricht in etwa den Verhältnissen in der verpressten Sonde, da hier eine mögliche Befrostung nicht allseitig auf die Verpressung einwirkt, sondern diese nur von den Sondenrohren ausgeht.

Die Auswertungen der visuellen Beurteilung an den Probekörpern nach der Frost-Tauwechselbeanspruchung zeigten fast durchgehend leichte bis schwere Schäden in Form von Rissen und Abplatzungen bis hin zum Bruch des Probekörpers. Die einzige Ausnahme bilden die Probekörper aus Material 2, hier waren keine sichtbaren Schäden erkennbar.

Aufgrund der visuellen Beurteilung der Probekörper kann daher nur das Material 2 hinsichtlich der Ausbildung von optisch wahrnehmbaren Schäden als frost-tauwechselbeständig eingestuft werden. Bei allen anderen untersuchten Materialien kam es infolge der Frost-Tauwechselbeanspruchung zu Schäden an den Probekörpern.

VI. Wärmeleitfähigkeit der befrostenen und unbefrostenen Probekörper

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an befrostenen Probekörpern und parallel dazu an gleichaltrigen Proben ohne Befrostung. Die Ergebnisse der Messungen an den zylindrischen Probekörpern sind in Diagramm 18 grafisch dargestellt.

Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten bewegen sich bei den Fertigprodukten zwischen 1,87 W/(mK) (Material 2) und 1,23 W/(mK) (Material 1). Die Baustellenmischung, Material 3, zeigt erwartungsgemäß den geringsten Wert.

Der Vergleich zwischen den Wärmeleitfähigkeiten von Probekörpern mit und ohne Frost-Tauwechselbeanspruchung, ebenfalls in Diagramm 18 dargestellt, zeigt einen Unterschied. Am befrostenen Probekörper werden dabei durchwegs geringere Wärmeleitfähigkeiten gemessen. Dies kann wie bei der einaxialen Druckfestigkeit auf eine Veränderung der Gefügestruktur durch Mikrorisse hervorgerufen werden, was zu einer Verschlechterung der Wärmeleitung im Material führt. In den Diagrammen ist weiters der Rückgang der Wärmeleitfähigkeit als Prozentwert zu jedem Material eingetragen.

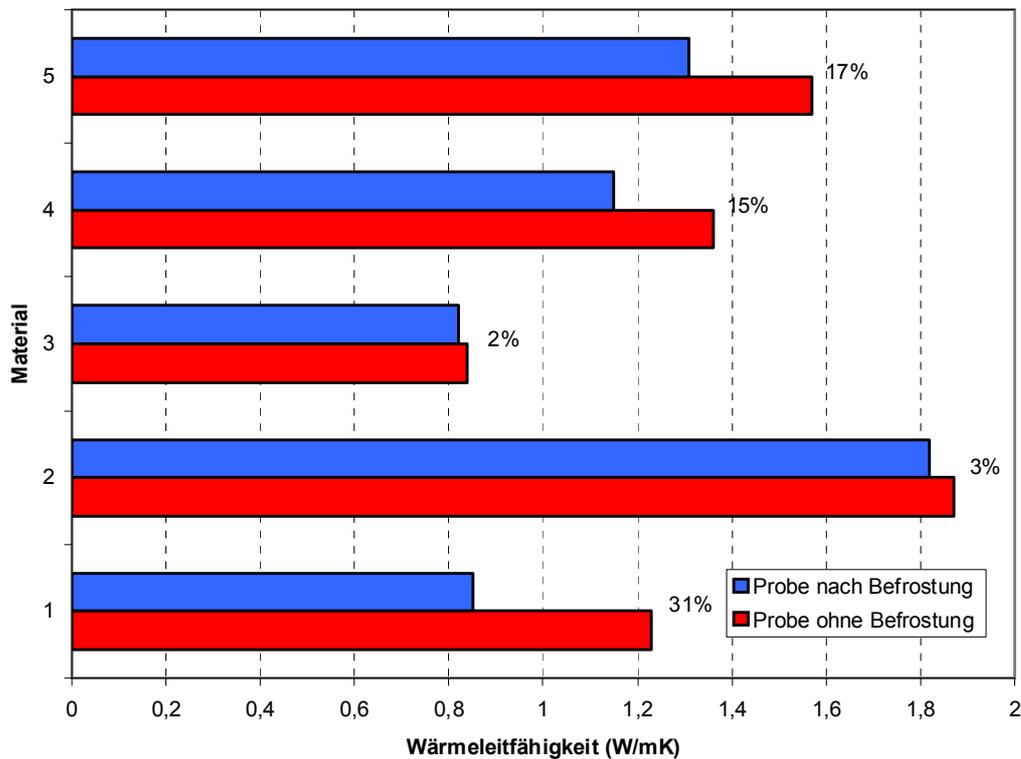


Diagramm 18: Grafische Darstellung der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten an befrosten Proben und an Vergleichsproben

C) Beurteilung der untersuchten Verpressmaterialien hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit im Forschungsprojekt GEOSOLA

In nachstehender Tabelle sollen die untersuchten Verpressmaterialien für Erdwärmesonden hinsichtlich ihrer Eigenschaften in Suspensionsform als auch im abgebundenen Zustand beurteilt werden. Diese Beurteilung basiert auf den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen an den frischen Suspensionen und den daraus hergestellten Probekörpern. Da es sich beim Material 3 und 10 um die gleiche Rezeptur mit unterschiedlichen Wassergehalten handelt, werden diese Materialien zusammengefasst.

| Eigenschaft | Verpressmaterial | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Verarbeitbarkeit | gute Verarbeitbarkeit, | gute Verarbeitbarkeit, | gute Verarbeitbarkeit, | gute Verarbeitbarkeit, | gute Verarbeitbarkeit, |
| Pumpbarkeit | gut verpumpbar | gut verpumpbar | gut verpumpbar | gut verpumpbar | gut verpumpbar |
| Suspensionsstabilität | gut | gut | gering gut | gering ausreichend | gut |
| Volumsbeständigkeit | | | | | |
| Suspensionsdichte | hoch | gering | zu gering nieder | hoch sehr hoch | sehr hoch |
| Druckfestigkeit | hoch, | | | | |
| Druckfestigkeitsentwicklung | rasches Abbindeverhalten | mittel | nieder | Hoch | gering-mittel |
| Wasserdurchlässigkeit | gering | sehr gering | gering | sehr gering | sehr gering |
| Erosionsstabilität | gegeben | gegeben | gegeben | gegeben | gegeben |
| Abfall der Wärmeleitfähigkeit | 31 % | 3 % | 2 % | 15 % | 17 % |

Tabelle 9: Zusammenstellung und Beurteilung der untersuchten Verpressmaterialien hinsichtlich ihrer Eigenschaften

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aus der durchgeführten Untersuchung von vier am Markt angebotenen Fertigprodukten sowie von einer Rezeptur zur Herstellung von Verpresssuspensionen sind für die Verpressung der geplanten Erdwärmesonden im gegenständlichen Forschungsprojekt folgende Ergebnisse und Schlussfolgerungen zu berücksichtigen:

- I. Die untersuchten Fertigprodukte weisen hinsichtlich ihrer Suspensions-eigenschaften als auch ihrer Eigenschaften im abgeordneten Zustand große Unterschiede auf.
- II. Lässt man die Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechselbeanspruchung außer Acht, so erscheinen alle Fertigprodukte als Verpressmaterial für Erdwärmesonden geeignet. Das Material 2 weist jedoch im Vergleich zu den anderen Produkten die höchste Wärmeleitfähigkeit auf.
- III. Die untersuchte Baustellenmischung, Material 3, ist zwar generell zum Verpressen von Erdwärmesonden geeignet, weist jedoch eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit auf.
- IV. Für an der Baustelle gemischte Suspensionen sollten folgende Randbedingungen unbedingt eingehalten werden:
 - Generell sind hochgeschlackte Zemente der Klasse CEM III/A oder B zu verwenden, sind diese im Handel nicht erhältlich, können auch Zemente der Güte CEM II/B-S verwendet werden. Reine Portlandzemente sollten nicht verwendet werden.
 - Die Verwendung von zementstabilem, aktiviertem Natriumbentonit, z.B. Aktiv-Bentonit IBECO CT oder Aktiv-Bentonit IBECO B1 ist anzuraten.
 - Der Bentonit ist ohne Zement mit Wasser mind. 10 Minuten klumpenfrei anzurühren, erst dann ist der Zement zuzugeben. Eine gleichzeitige Zugabe von Bentonit und Zement in das Anmachwasser führt zu niederviskosen Suspensionen mit generell schlechteren Eigenschaften.
 - Aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen ist die Rezeptur von Material 10 zum Verpressen von Erdwärmesonden als geeignet zu bezeichnen.
 - Die Dichte der Suspension sollte mindestens $1,3 \text{ g/cm}^3$ betragen, ist die Bohrspülung aus dem Bohrloch durch die eingebrachten Verpresssuspensionen zu verdrängen, so ist die Suspensionsdichte um ca. $0,5 \text{ g/cm}^3$ höher als die Dichte der Bohrspülung zu wählen.

- Eine Erhöhung der Suspensionsdichte sollte nicht unbedingt durch die Erhöhung des Zementanteils erfolgen, vielmehr ist die Zugabe von mineralischen Sanden oder Mehlen hoher spez. Dichte zielführender.

Materialauswahl und Ausführung der Verpressung der Forschungssonden

I. Materialauswahl

Um einen möglichst verlustfreien Wärmefluss zwischen umgebendem Gebirge und dem Wärmetauscher (CO₂-Rohr bzw. PVC-Sondenrohr) zu gewährleisten, soll das untersuchte Material mit der höchsten gemessenen Wärmeleitfähigkeit zur Verpressung des Ringraumes verwendet werden. Dies ist das Material 2 mit der Handelsbezeichnung ThermoCem der Firma HeidelbergerCement.

Um den Einfluss unterschiedlicher Verpressmaterialien auf das Wärmeentzugsverhalten von Erdwärmesonden untersuchen zu können, wird ein Abschnitt einer Bohrung mit der Baustellenmischung, Material 3, verfüllt. Unter Annahme von gleichen geologischen Bedingungen kann aus dem Vergleich der entzogenen Wärmeenergien je Meter Sonde der Einfluss des Verpressmaterials auf die Energieausbeute dargestellt werden.

II. Ausführung

In Tabelle 10 sind die Bohrungen samt Ausbau und Verpressung zusammengestellt. Auch bei den Bohrungen $\alpha 1$ und γ , welche als Pegel mit entsprechender Verrohrung ausgebaut wurden, erfolgte eine Abdichtung und Verfüllung über dem Filterrohr bis zur Geländeoberfläche mit Thermocem. Das Verpressmaterial hat hier nur eine abdichtende Funktion.

In Sonde α -2 erfolgte die Variation des Verpressmaterials, von Endteufe bis auf 60 m Tiefe erfolgte die Verpressung mit Thermocem. Darüber wurden 30 m mit einer auf der Baustelle gemischten Bentonit-Zementsuspension verfüllt. Diese beiden Bereiche der Sonde liegen im Schlier, die geologischen Randbedingungen sind hier als homogen zu bezeichnen.

Ab 30 m Tiefe bis zur Geländeoberkante erfolgte wiederum die Verfüllung mit Thermocem.

| Bezeichnung | Bohrtiefe | Ausbau | Verpressung |
|-------------------|-----------|---|--|
| Sonde α -1 | 85 m | Pegelausbau, Verfilterung bis 30 m unter GOK | ab 30 m bis GOK: Verfüllung mit Thermocem |
| Sonde α -2 | 100 m | 1 U- + 1 ER-CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde | 100 – 60 m: Thermocem 60 – 30 m: Zement-Bentonit-Mischung (Material 3) 30 – 0 m: Thermocem |
| Sonde β | 28,5 m | GW-Pegelausbau | - |
| Sonde γ | 100 m | Pegelausbau | ab 27 m bis GOK: Verfüllung mit Thermocem |
| Sonde η | 100 m | CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde | durchgehend Thermocem |
| Sonde ϵ | 50 m | 9 CO ₂ -Sonden + PE-Solesonde | durchgehend Thermocem |

Tabelle 10: Zusammenstellung der geplanten und ausgeführten Bohrungen

Im Zuge des Verpressvorganges bei Bohrung α -2 wurden Proben beider Verpresssuspensionen entnommen und im Labor der Bodenprüfstelle Linz untersucht.

Der Prüfbericht ist in der Anlage beigefügt, die ermittelten Parameter der frischen Suspensionen entsprechen den Vorgaben.

Arbeitspaket 4: Forschungsprogramme

Teilziel 4.1: Wärmestromdichten und Verfüllmassen

A) *Kontinuierliche Messungen und Bewertungen örtlicher Wärmestromdichten aus der Sondenumgebung über die Verfüllmassen in die Sonde unter Beachtung des Einflusses von Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Verfüllmaterialien mit unterschiedlichen Messmethoden (Pt100, Lichtwellenleiter)*

Für die Bilanzierung des gesamten Wärmeentzuges wurden der Volumenfluss durch die Sonden und die Pt100-Messungen, die direkt die Temperaturen der Sole, im Fall der Geosola-Anlage ein Wasser-Ethylenglykol-Gemisch, am Sondeneintritt und am Sondaustritt bestimmen, herangezogen. Die Temperaturmessungen im Untergrund fanden mittels Lichtwellenleitern, die entlang der Sonde verlegt wurden, statt.

Für die Berechnung der Wärmestromdichten wurde vor allem der Unterschied der beiden 100 m Sonden Alpha und Eta während des Betriebes mit den Sole-U-Rohren untersucht. Beide befinden sich geologisch gesehen im selben Untergrund und weisen die gleiche Teufe auf, sodass sie sich nur in der Verpressung unterschieden.

Eine grafische Darstellung der Sonden im geologisch beschriebenen Untergrund mit ihren unterschiedlichen Verpressungen und einer Temperaturprofileinteilung ist in Diagramm 19 zu erkennen.

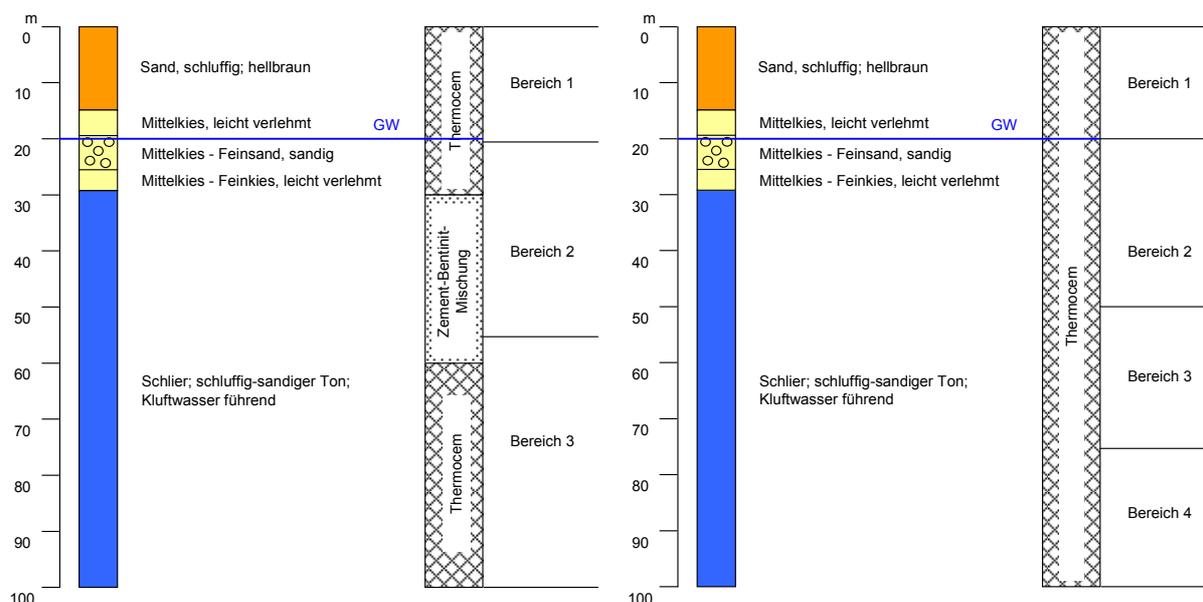


Diagramm 19 links: Darstellung Sonde alpha; rechts: Darstellung Sonde eta

Die Einteilung der unterschiedlichen Entzugsbereiche basiert auf den unten dargestellten Temperaturprofilen, wobei man bei der Sonde Alpha gut erkennen kann, dass die einzelnen Bereiche in etwa den unterschiedlichen Verpressabschnitten entsprechen.

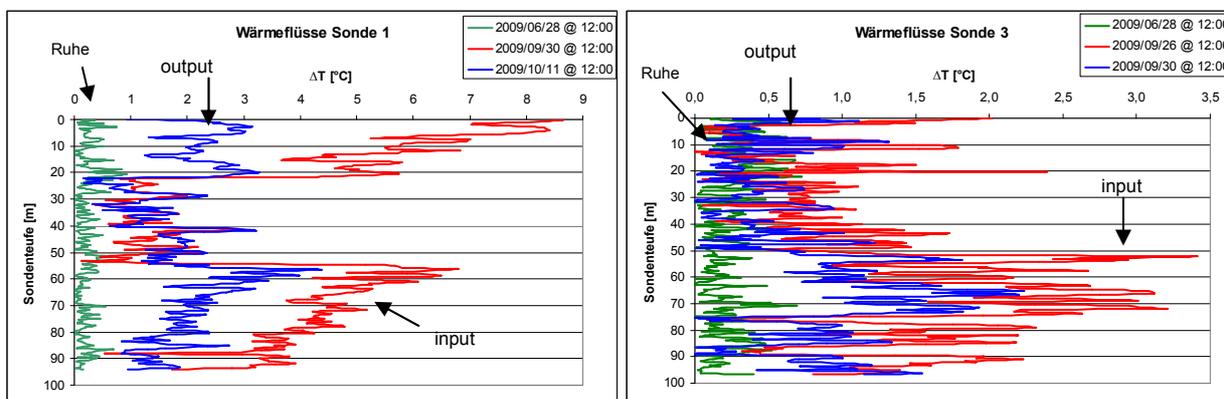


Diagramm 20: Temperaturprofil entlang der Sonde α (1)

Diagramm 21: Temperaturprofil entlang der Sonde η (3)

B) Messdaten und Ergebnisse

Für die Temperaturen des ungestörten Untergrundes wurden die Daten vor Inbetriebnahme der Geosola-Anlage verwendet. Entlang der Sonde ging man, zur Vereinfachung der Berechnung der zugeführten Wärmemenge je Messpunkt, von einer reinen Konduktion, also Wärmeleitung aus. Die Kenndaten und die unterschiedlichen Ergebnisse sind in Tabelle 11 gegenübergestellt.

| | λ - Untergrund [W/(mK)] | λ - Verpressung [W/(mK)] | T_{ein} [°C] | mittlere Wärmeentzugs- leistung [W/m] | mittlere Wärmeentzugs- leistung je Abschnitt [W/m] | Entzugs- radius [m] |
|----------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------|--|--|---------------------------|
| Sonde α | 0-30 m: 1,46 30-95 m: 2,5 | 0-22 m: 1,8 22-55 m: 0,8 55-95 m: 1,8 | 1,3 | 30 | 0-22 m: 38 22-55 m: 15 55-95 m: 41,5 | 0,14 |
| Sonde η | | 0-97 m: 1,8 | | | 1,9 | |

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Wärmeentzüge entlang der Sonde

Bei der Sonde α ist dabei sehr gut der Unterschied der drei Verpressregionen erkennbar, wohingegen bei der Sonde η sehr gut der Einfluss des Untergrundes deutlich wird. Bei den abschnittsbezogenen spezifischen Wärmeentzugsleistungen stimmen die Werte in etwa mit den Ergebnissen der Modellierung überein, nur der Wert für die spezifische Wärmeentzugsleistung des Thermocems im unteren Abschnitt ist wesentlich höher als in der Modellierung, was sich darauf zurückführen lässt, dass bei der Modellierung nur ein Höhengschnitt bei 40 m betrachtet wurde, wohingegen hier ein Mittelwert über den gesamten unteren Abschnitt gebildet wurde.

Zur Veranschaulichung der vergleichbaren Wärmeentzüge entlang der Sonden beim Thermocem als Verpressmaterial, wurden die beiden Wärmeentzugsprofile im Diagramm 22 gegenübergestellt.

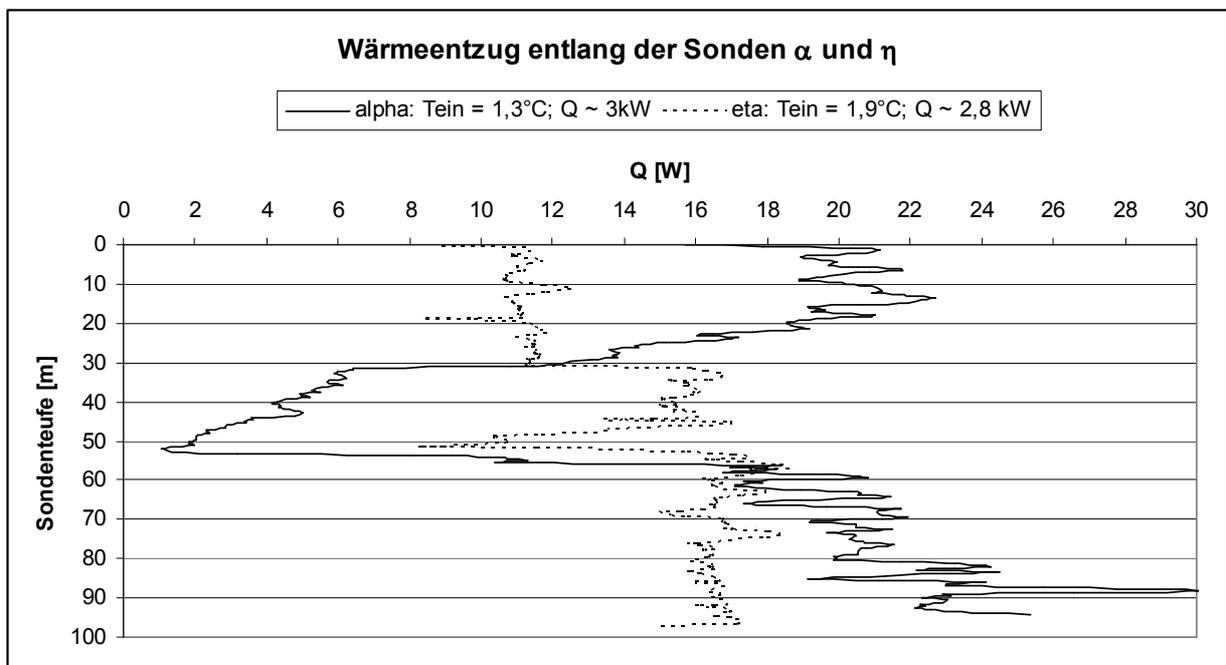


Diagramm 22: Wärmeentzug entlang den Sonden

Die etwas höheren Werte bei der Sonde Alpha hängen mit der etwas niedrigeren Eintrittstemperatur zusammen.

Da Entzugsradien um die Sonde sehr variieren, je nach Eintrittstemperatur und Versuchszeitraum, kommt es zu sehr unterschiedlichen Wärmestromdichten, bei denen man nur erkennen kann, dass sie umso kleiner werden, je größer der Entzugsradius wird, und je länger dem Untergrund Wärme entzogen wird.

Die für diese Anlage berechenbare, geothermische Wärmestromdichte q beträgt $0,036 \text{ W/m}^2$ bei einer mittleren Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes von $2,85 \text{ W/(mK)}$ und einem mittleren Temperaturgradienten von $1,2 \text{ K/95 m}$.

C) Interpretation

Mit Hilfe der faseroptischen Temperaturmessung war es möglich, eine genaue Betrachtung der unterschiedlichen Entzugsleistungen der verschiedenen Verpressmaterialien und Untergrundschichten durchzuführen. Dabei war sehr gut erkennbar, dass im Bereich der Zement-Bentonit-Mischung eine wesentlich schlechtere spezifische Wärmeentzugsleistung erzielt wurde.

Werden die spezifischen Wärmeentzugsleistungen auf die unterschiedlichen Untergrundschichten bezogen, lässt sich aus den oben dargestellten Ergebnissen sehr gut die bessere Wärmeübertragung in der Tiefe und im Schlier als im Sand und Kies erkennen. Eine genauere Betrachtung des Einflusses des Grundwassers wurde aber erst im Abschnitt 4.3 durchgeführt.

Teilziel 4.2: Wärmeeintrag und Wärmeentzug in und mit der Sonde

A) Wärmebilanzierung durch Erfassung der in- und output-Wärmemengen (Vor- und Rücklaufemperatur und Durchfluss)

Bevor mit dem thermischen Entzug bzw. der Rückführung von Wärme in den Sondenraum begonnen werden konnte, wurden die thermischen Eigenschaften und der thermische Ausgangszustand noch mit dem installierten Meßsystem festgehalten. Diese Ausgangssituation im Untergrund der einzelnen Sonden bezieht sich auf den 28.06.2009 und ist im Diagramm 23 dargestellt.

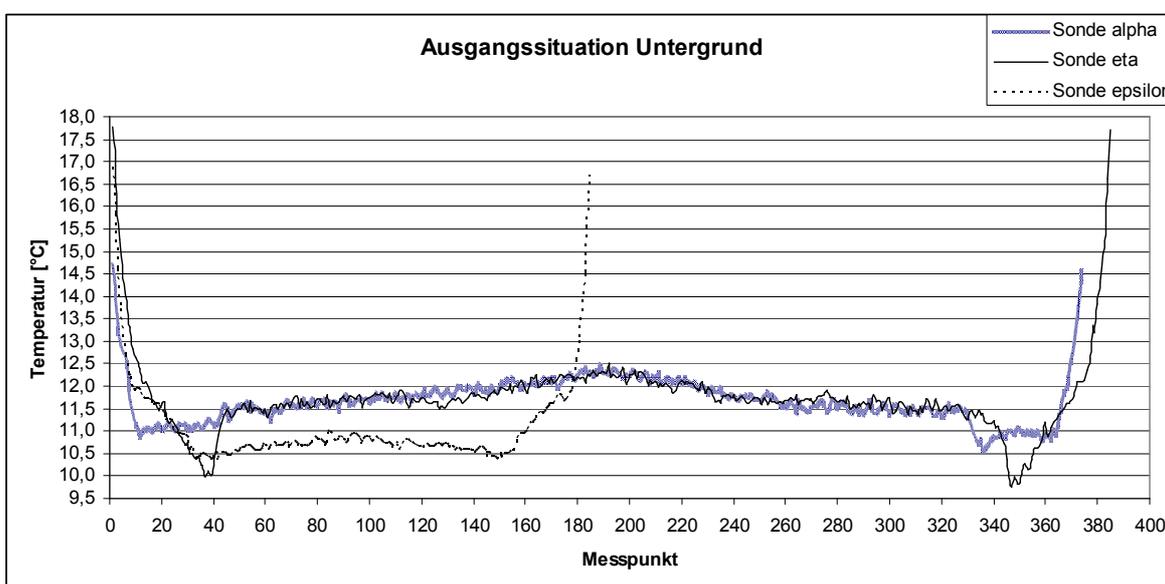


Diagramm 23: Temperaturprofil der einzelnen Sonden vor Start der einzelnen Programme

Zur Bestimmung der mittleren Bodentemperatur wurden die einzelnen Sonden getrennt voneinander näher betrachtet, wie in den unten dargestellten Diagrammen zu erkennen.

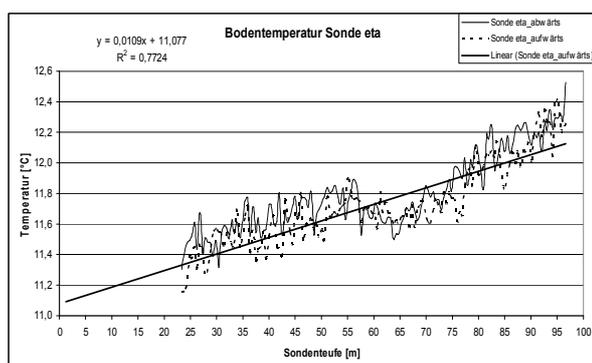
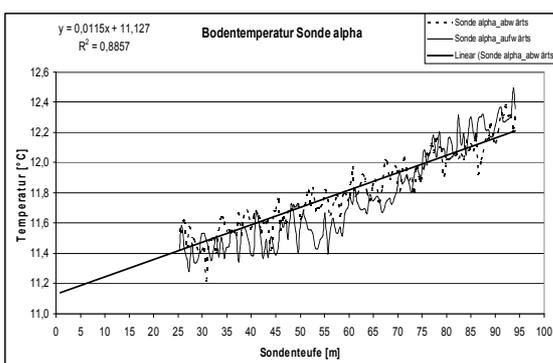


Diagramme 24 und 25, Bodentemperatur der Sonden Alpha und Eta

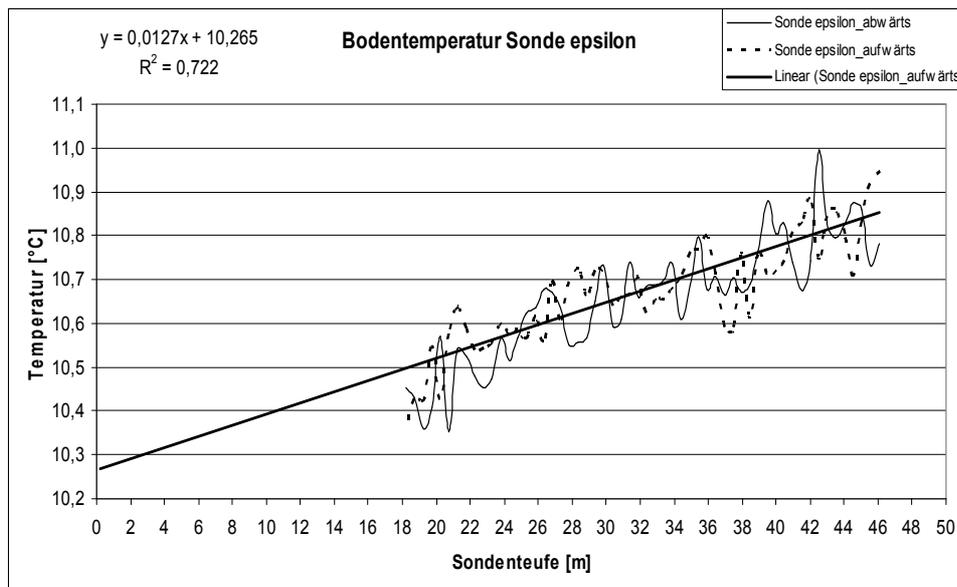


Diagramm 26: Bodentemperatur der Sonde Epsilon

Daraus ließen sich die mittleren Bodentemperaturen für die weiteren Berechnungen bestimmen. Die Temperatur im Grundwasser in den unverpressten Bohrungen wurde direkt mittels Widerstandsthermometer gemessen:

Sonde alpha: $T_{m_{Boden}} = 11,74 \text{ °C}$

Sonde eta: $T_{m_{Boden}} = 11,64 \text{ °C}$

Sonde epsilon: $T_{m_{Boden}} = 10,61 \text{ °C}$

Sonde beta: $T_{m_{Boden}} = 10,6 \text{ °C}$

Anschließend wurde damit begonnen, die einzelnen Sonden in Bezug auf ihren Wärmeeintrag und Wärmeentzug bei unterschiedlichen Eintrittstemperaturen der Sole näher zu untersuchen.

B) Messdaten und Ergebnisse

I. Solesonden

Zur Untersuchung und zum Vergleich der einzelnen verpressten Simplex-Solesonden wurde der Einfluss der unterschiedlichen Eintrittstemperaturen auf die spezifische Wärmeleistung in W/m betrachtet. Der Durchfluss durch die Sonde lag dabei jeweils im turbulenten Bereich ($Re > 2200$).

Die Ergebnisse werden in den unten dargestellten Diagrammen zusammengefasst.

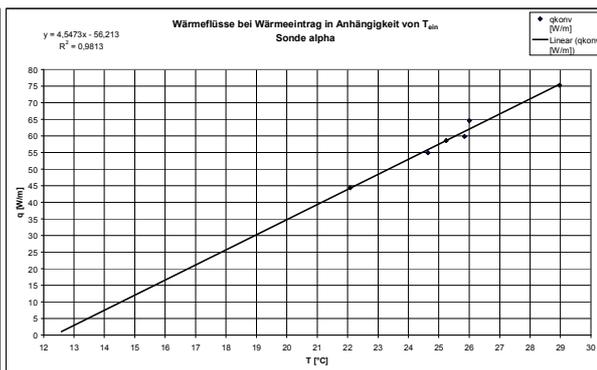
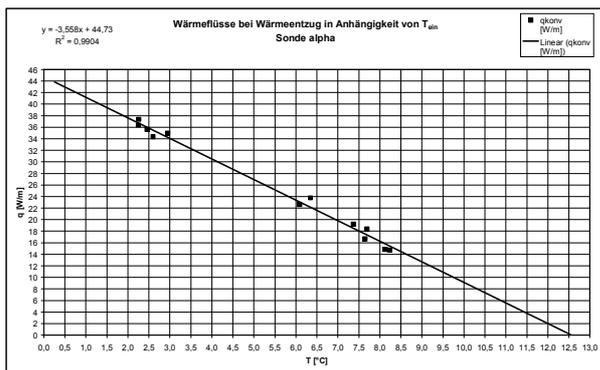


Diagramme 27 und 28: Wärmeeintrag und Wärmeentzug der Sonde Alpha

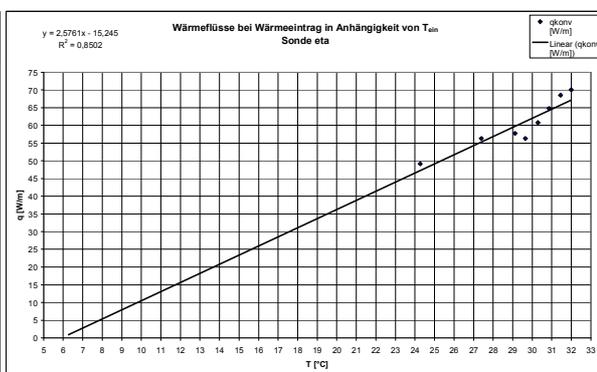
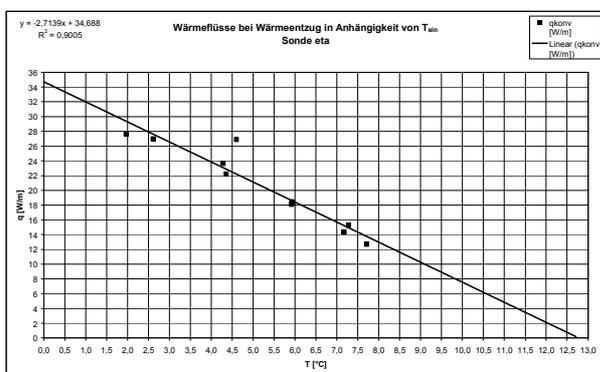


Diagramme 29 und 30: Wärmeeintrag und Wärmeentzug der Sonde Eta

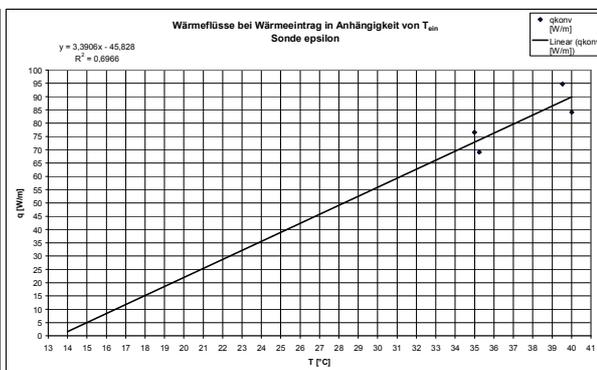
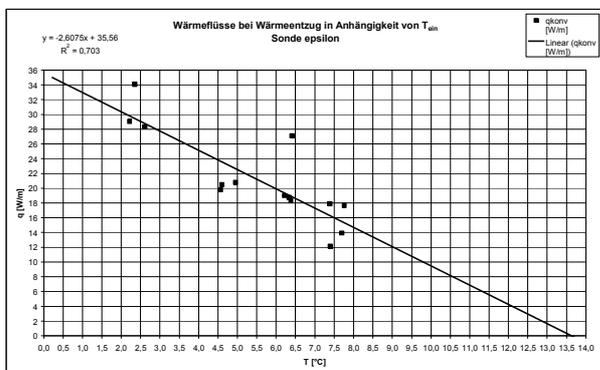


Diagramme 31 und 32: Wärmeeintrag und Wärmeentzug der Sonde Epsilon

Anhand der Diagramme kann man erkennen, dass zur Zeit die 100 m - Sonde Alpha mit der Soleführung die besten Wärmeentzugs- und Wärmeeintragsleistungen bringt. Im Vergleich dazu liegen die 100 m–Sonde Eta und die 50 m–Sonde Epsilon mit den Ergebnissen etwas darunter.

II. CO₂-Sonden

Für die Betrachtung der Wärmeentzugsleistungen der CO₂-Sonden wurden die beiden 100 m-Sonden Alpha und Eta untersucht. Die Tests wurden mit den, von der Firma Mittermayr vorgefüllten CO₂-Sonden durchgeführt, wobei sich die beiden Sondengeometrien in der Anzahl und im Durchmesser der CO₂-Rohre unterscheiden, wie in den Querschnitten unten (Abb. 18 und 19) zu erkennen ist:

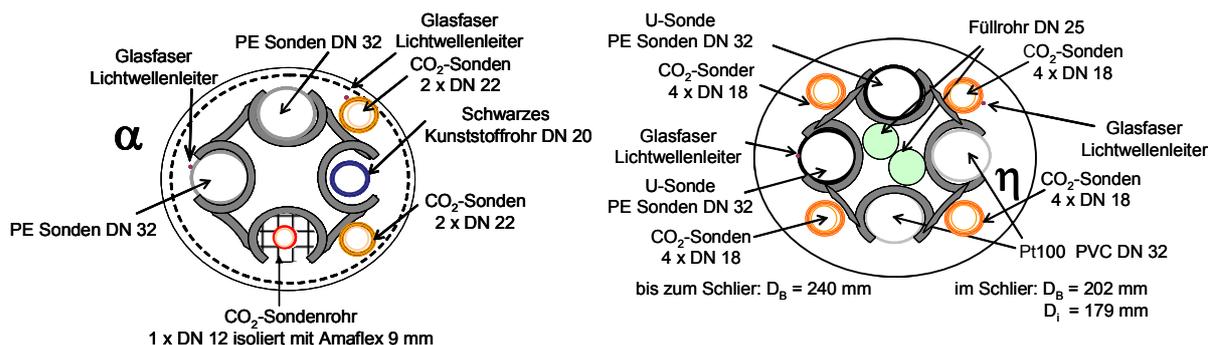
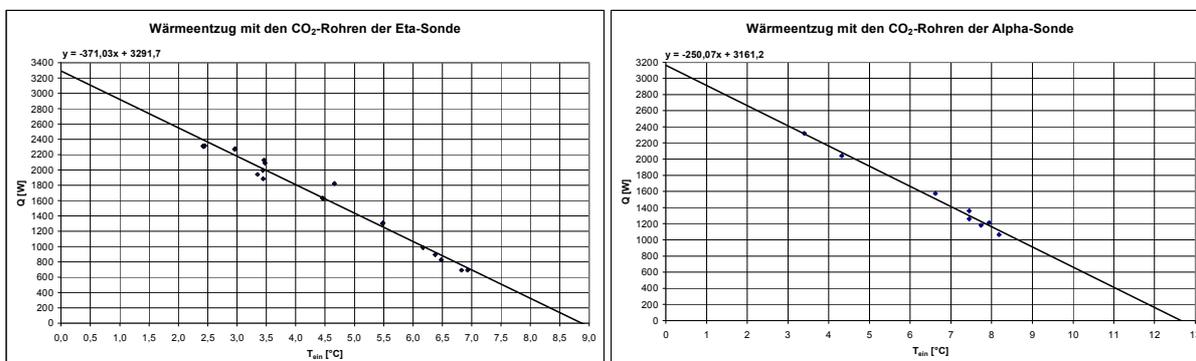


Abbildung 18 und 19: Querschnitte der Sonden Alpha und Eta

Um einen Vergleich mit den Solesonden in Bezug auf die Wärmeentzugsleistung zu ermöglichen, wurde bei diesen Untersuchungen der Einfluss der unterschiedlichen Eintrittstemperaturen der Sole in den Kondensator der CO₂-Sonden am Sondenkopf auf die Wärmeentzugsleistung in W betrachtet.

Der Durchfluss durch die Summe der einzelnen Wärmeaustauscher lag für beide Sonden jeweils im turbulenten Bereich, wobei bei der η-Sonde stets ein ca. 30-50 % höherer Wert erreicht werden konnte.

Die Ergebnisse werden in den unten dargestellten Diagrammen 33 und 34



zusammengefasst.

Diagramme 33 und 34: Wärmeentzug der CO₂-Sonden Eta und Alpha

Es zeigt sich, dass beide Sonden annähernd gleiche Leistungen erzielen können, bei der Alpha-Sonde aber auch bei etwas höheren Temperaturen noch Wärme entnommen werden kann, was mit einem höheren Druck in der CO₂-Sonde zusammenhängen könnte.

Da mittels LWL-Messung festgestellt wurde, dass beide Sonden nur etwa bis zur Hälfte (ca. 45 m) der gesamten Sondenteufe aktiv waren, wird hier verzichtet, eine spezifische Wärmeentzugsleistung in W/m anzugeben.

III. Offene Strömungssonden (unverpresste Bohrungen)

Dabei handelt es sich um ein Sondenkonzept, das in eine unverpresste („offene“) Bohrung eingebracht wird. Die Bohrung ist mit einem Filterrohr ausgebaut und wird von Grundwasser durchströmt. Es findet bei der offenen Strömungssonde kein Stoffaustausch mit dem Grundwasser statt.

- **Funktionsprinzip:**

Ein Wärmeaustauscher wird von einem kühlen Arbeitsmedium (auf wässriger Basis) durchströmt. Das den Wärmeaustauscher umgebende Grundwasser wird dabei abgekühlt. Dadurch kommt es zu einer Dichtezunahme; das Wasser beginnt abzusinken. Der dadurch aufgebaute Druck zwingt das Grundwasser – wegen der Anordnung des Wärmeaustauschers in einem Strömungsrohr – zur Zirkulation. Dieses Strömungsrohr sorgt für eine physische Trennung der wassergefüllten direkten Sondenumgebung vom ebenfalls wassergefüllten Ringraum der Bohrung. Das Prinzip der Strömungssonde ist in Abbildung 20 unten dargestellt.

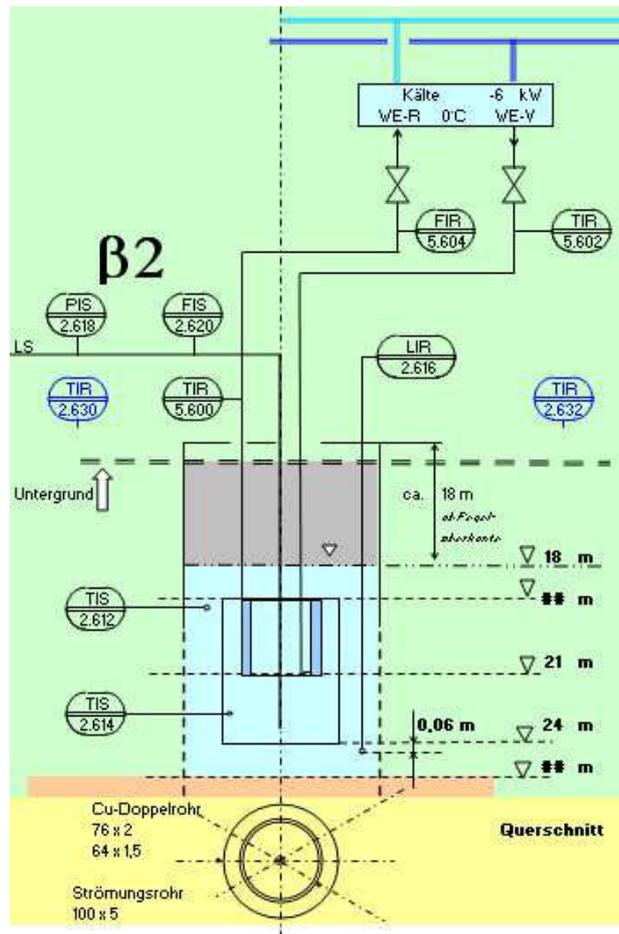


Abbildung 20: Prinzip der Strömungssonde, Sondenquerschnitt im Bereich des Wärmeaustauschers.

- **Wärmeaustauscher – Geometrien**

Das „Herzstück“ der offenen Strömungssonde ist eine Wärmeaustauschfläche im Strömungsrohr. Diese besteht im Wesentlichen aus einem durchströmten Rohr oder einer doppelwandigen Platte, die gegenüber der Grundwasserumgebung dicht abschließt. Dieses Rohr wird von kalter Wärmeträgerflüssigkeit durchströmt und ist aus einem Material mit guter Wärmeleitfähigkeit gefertigt.

Die erste „Generation“ des Wärmeaustauschers war ein konzentrisches Kupferrohr, wobei in der Rohrwand das Wärmeträgerfluid strömte. Dies wurde dann weiterentwickelt zu vier separat angeströmten konzentrischen Doppelrohren und schließlich zu einem Stahlrohr mit gewellter Oberfläche, bei dem Turbulenz und damit der Wärmeübergangskoeffizient erhöht waren.

- **Weiterer Aufbau**

Weiters wurden mit der Sonde zwei Temperaturfühler im Strömungsrohr installiert (oben und unten), um die Grundwasser-Temperatur und das Strömungsverhalten überprüfen zu können. Um die natürlichen Strömungsverhältnisse umkehren zu können, wurde außerdem ein Luftschlauch installiert. Durch Dispergieren von Luft im unteren Bereich des Strömungsrohrs konnten so höhere Reynoldszahlen erzwungen und der Wärmeübergang somit verbessert werden.

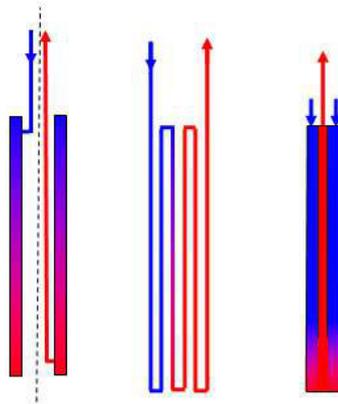


Abbildung 21: 1.) konzentrisches Doppelrohr, 2.) Stahlrohr mit gewellter Oberfläche, 3.) Doppelrohr. Außen kalte Vorlauflüssigkeit, die erwärmte WT-Flüssigkeit strömt innen nach oben.

- **Leistung und Ergebnisse**

Die Entzugsleistung des Wärmeaustauscher-Designs (1) in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur wird im unten dargestellten Diagramm 20 veranschaulicht. Das Wärmeaustauscher-Design mit dem konzentrischen Doppelrohr (1) führte zu folgenden Ergebnissen:

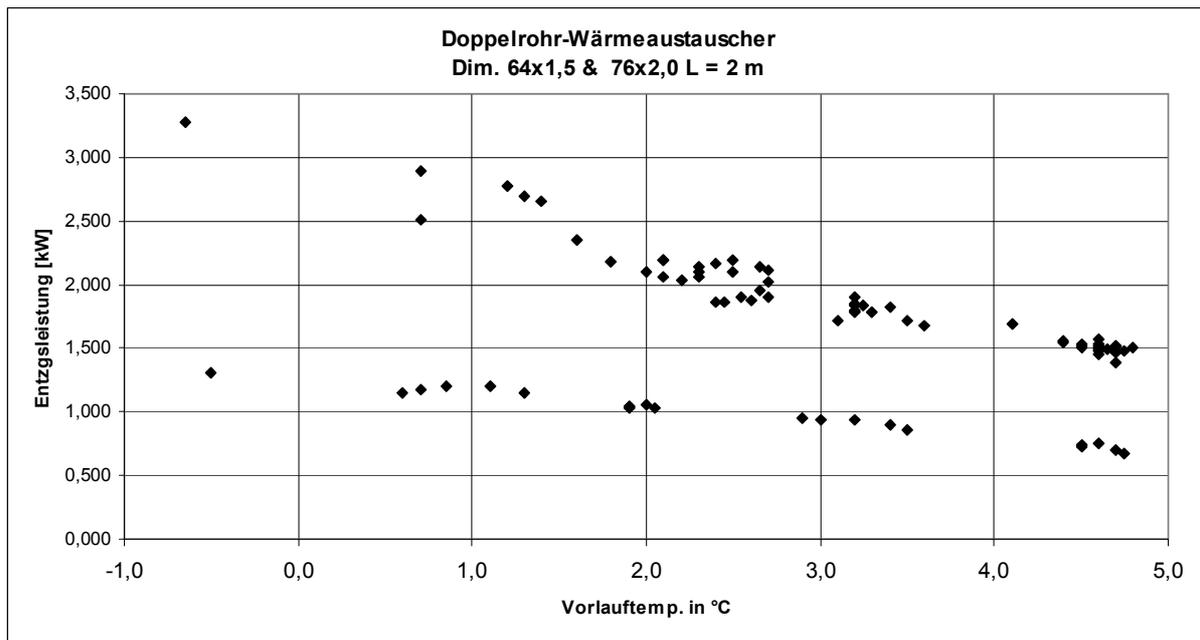


Diagramm 35: Entzugsleistung des Wärmeaustauscher-Designs (1) in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur.

Die untere Wertereihe im Diagramm 35 repräsentiert den Wärmeentzug bei natürlicher Konvektion in Grundwasser. Bei erzwungener Konvektion (Dispergieren von Luft) steigt der Wärmeentzug um den Faktor 1,7 – 2,4 an (obere Wertereihe in Diagramm 35). Ursache ist der erhöhte Turbulenzgrad und somit ein verbesserter Wärmeübergang.

Das Wärmeaustauscher-Design mit dem gewellten Stahlrohr (2) führte zu den, in Diagramm 36, dargestellten Ergebnissen. Die Daten wurden bei Vorlauftemperaturen zwischen 2,8 °C (höhere Entzugsleistung) und 5,4 °C gemessen.

Je nach Vorlauftemperatur wird eine unterschiedliche Leistung erreicht. Die Entzugsleistung ist notwendigerweise 0 kW bei $T_{\text{Vorlauf}} = T_{\text{Untergrund}}$. Die aus den Geraden in Diagramm 35 berechnete Untergrundtemperatur von 10,5 °C stimmt mit der gemessenen Temperatur genau überein.

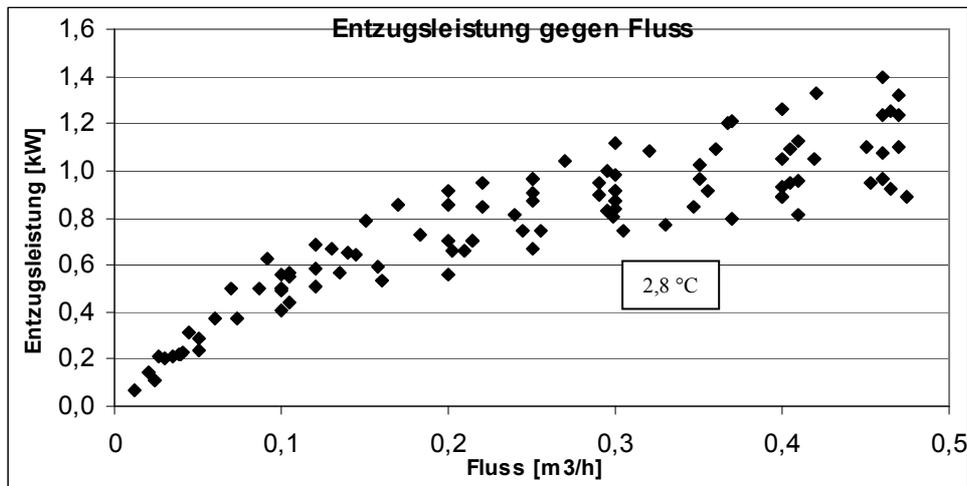


Diagramm 36: Entzugsleistung der offenen Strömungssonde mit gewelltem Stahlrohr als Wärmeaustauscher

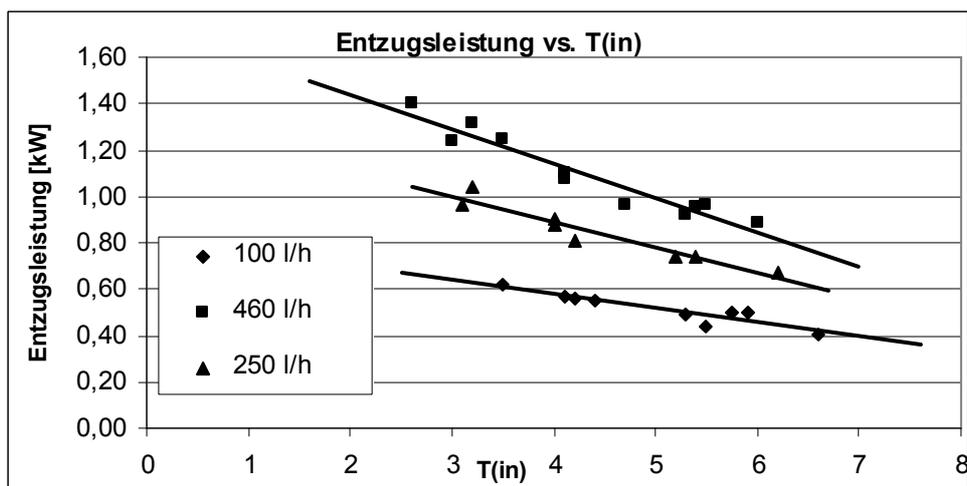


Diagramm 37: Entzugsleistung gegen Eintrittstemperatur

Das Wärmeaustauscher-Design „vier konzentrische Doppelrohre“ (3) brachte folgende, im Diagramm 38 dargestellten, Ergebnisse: Die Entzugsleistung nähert sich bei Erhöhen des Durchflusses einem Maximum, da die Fließgeschwindigkeit erhöht wird und somit die Verweildauer des Wärmeträgerfluids im Wärmeaustauscher sinkt (siehe auch Wärmeaustauscher (2)). Die höchsten Entzugsleistungen werden bei niedrigen Vorlauftemperaturen und Dispergieren von Luft im Strömungsrohr (Verbesserung des Wärmeübergangs) erzielt.

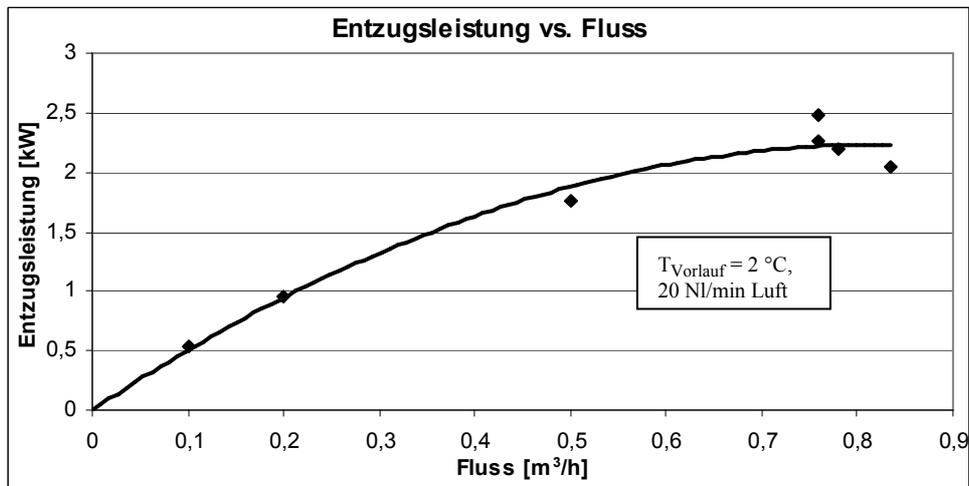


Diagramm 38, Entzugsleistung gegen Fluss

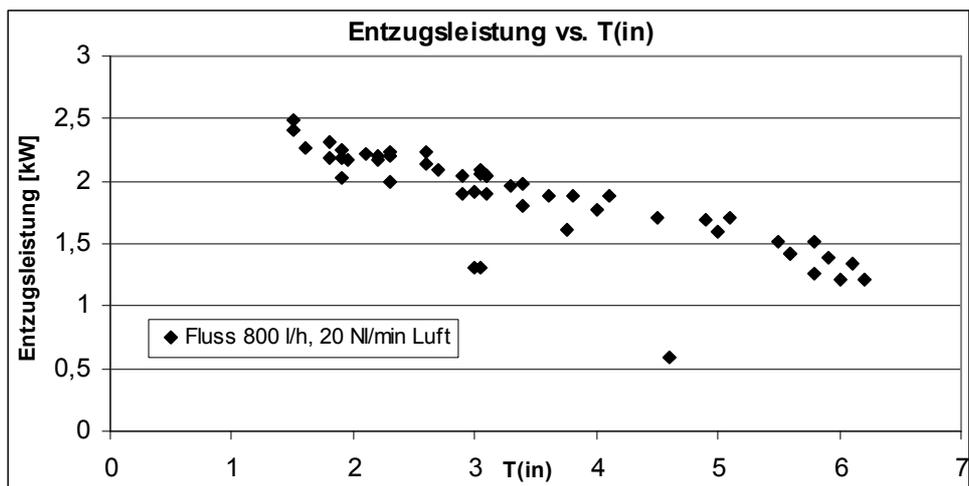


Diagramm 39: Entzugsleistung gegen Eintrittstemperatur

- **Vergleich der Sondengeometrien**

Ein Vergleich der Entzugsleistungen der drei unterschiedlichen Wärmeaustauscher zeigt keine signifikanten Unterschiede. Vom Aufbau ist die Sondengeometrie (2) zu bevorzugen, da keine Spezialteile gefertigt werden müssen und somit der Wärmeaustauscher kostengünstig zu installieren ist. Die Sonde mit dem Wärmeaustauscher (1) liefert allerdings bei niedrigeren Vorlauftemperaturen etwas höhere Entzugsleistungen.

| Geometrie / T(ein) | (1) (Doppelwand) | (2) (Stahlrohr) | (3) (4 konzentr.Rohre) |
|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|
| 2 °C | 1,57kW* | 1,53 kW | 1,31 kW* |
| 4°C | 1,24 kW | 1,16kW* | 1,13 kW |
| 6°C | 0,81kW* | 0,94kW* | 0,78 kW* |

Tabelle 12: Entzugsleistungen der verschiedenen Sonden bei einem Durchfluss von 500 l/h. Alle Werte wurden ohne Luft-Dispersion gemessen. Lag kein genauer Messwert an der jeweiligen Stelle vor, wurden die angegebenen Werte extrapoliert und berechnet(*).

- **Resumée**

Strömungssonden können in Zukunft wegen ihres einfachen Aufbaus, jedoch wirkungsvollen Prinzips, eine Alternative zu Entnahme/Schluckbrunnen darstellen. Vor allem in Bereichen schwieriger Grundwasserverhältnisse (chemische Einflussfaktoren, Wasserschutzgebiete,..) versprechen Strömungssonden einige Vorteile. In der Leistung stehen sie „Standing Column Well“-Systemen nicht nach.

Aus technischer Sicht können in der nächsten Phase Feldversuche in Probebohrungen angestrebt werden.

C) Interpretation

Aus den Ergebnissen lässt sich erkennen, dass die spezifischen Wärmeentzugsleistungen der Solesonden etwa den allgemeinen VDI-Richtlinien 4640 entsprechen.

Die bessere Entzugsleistung der Sonde Alpha lässt sich teilweise auf den etwas höheren Durchfluss und teilweise auf die alternierende Verpressung zurückführen.

Nähere Untersuchungen zum Wärmeeintrag sind in den Teilzielen 4.3-4.5 zu finden.

Bei einem direkten Vergleich der Wärmeentzugsleistungen bei 0 °C und unter Berücksichtigung der aktiven CO₂-Sondenzlänge, wie er in der unten stehenden Tabelle 13 dargestellt ist, wird deutlich, dass die CO₂-Sonden ein hohes Entzugspotential aufweisen.

| Sondenbezeichnung | T_{ein} | Wärmeentzugsleistung | Spezifische Wärmeentzugsleistung |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|---|
| α -Sole (95 m) | 0 °C | 4470 W | 48 W/m |
| η -Sole (97 m) | 0 °C | 3450 W | 36 W/m |
| α -CO ₂ (45 m) | 0 °C | 3300 W | 74 W/m |
| η -CO ₂ (45 m) | 0 °C | 3170 W | 70 W/m |

Tabelle 13: Vergleich der Sonden bezüglich ihrer Wärmeentzugsleistung

Weitere Untersuchungen bezüglich der CO₂-Füllmenge und den dabei auftretenden Drücken und dadurch erzielbaren Leistungen sind im Teilziel 4.6, Untersuchungen des Einflusses der Sondenlänge auf den mittleren Wärmeentzug, zu finden.

Ein direkter Vergleich mit den Leistungen der Strömungssonde in der Bohrung β kann nicht gezogen werden, da das Wärmeentzugsprinzip (konvektiver Wärmeübergang im strömenden Grundwasser) grundsätzlich verschieden vom rein konduktiven Wärmetransport in verpressten Sonden ist.

Teilziel 4.3: Untersuchungen des Kurzzeitspeicherbetriebs der Hybridsonde

A) Ausgleich tageszeitlicher Wärmeentzugsschwankungen durch Nutzung von solarer Überschusswärme und Kurzzeitspeicherung im oberen und kälteren Bereich der EWS

Es ist Stand der Technik, bei der Kombination von Erdwärmesonden und solaren Warmwassergewinnungs-Anlagen die Erdwärmesonden mit Überschusswärme zu regenerieren. Eines der Hauptziele des Geosola-Projektes war es, die Einbeziehung überschüssiger Solarwärme technisch umzusetzen und zu quantifizieren. Zur Untersuchung des Potentials von jahreszeitlichem Ausgleich gibt es bereits mehrere Publikationen, die sich im Wesentlichen auf Regeneration mit solaren Überschüssen aus den Sommermonaten beschränken.

Es ist Teil des Geosola-Projektes, auch tageszeitliche Schwankungen zu simulieren und zu untersuchen, ob ein „Kurzzeit-Speicherbetrieb“ der Hybridsonde möglich bzw. sinnvoll ist. Zur Abgrenzung der Kurzzeit- von der Langzeitspeicherung wurde der Zeithorizont zwischen wenigen Stunden bis maximal einer Woche definiert. Es wurde untersucht, ob solare Überschüsse, die beispielsweise an einem sonnigen Tag gewonnen werden, zur Temperierung in der Nacht oder während einer kurzen Schlechtwetterperiode genutzt werden können.

Die Geosola-Industrieforschungsanlage verfügt über ein Warmwasserreservoir, das eine solare Wärmequelle simuliert.

Damit können unabhängig von der tatsächlichen Sonneneinstrahlung Wärmeströme in die Erdwärmesonden geleitet werden und das Speicherverhalten der Sonden untersucht werden. Bei den in diesem Kapitel vorgestellten Resultaten wurde vorwiegend dieser Anlagenteil verwendet.

Zur Untersuchung des Kurzzeit-Speicherbetriebs der Hybridsonden wurde eine definierte Wärmemenge aus dem Speichertank in die Sonden eingebracht. Die Wärmemenge wurde mittels online - Datenaufzeichnung der Vor- und Rücklauftemperaturen und des Flusses bestimmt. Anschließend wurde das Temperatur-Abklingverhalten in den passiven Sonden untersucht und eine Beurteilung der Speicherfähigkeit vorgenommen.

B) Messdaten und Ergebnisse

Zur Untersuchung wurde die Sonde 4 (Sonde ϵ) herangezogen. In die 50 m tiefe Erdwärmesonde wurden 240 kWh thermische Energie mit einem Anfangs-Temperaturniveau von 36 °C eingebracht. Zum Vergleich: Die Temperatur im ungestörten Untergrund liegt bei ca. 11 °C.

Der Ringraum um die Sonde wurde dadurch auf etwa 31 °C aufgeheizt. Das Abklingverhalten ist in Diagramm 39 dargestellt.

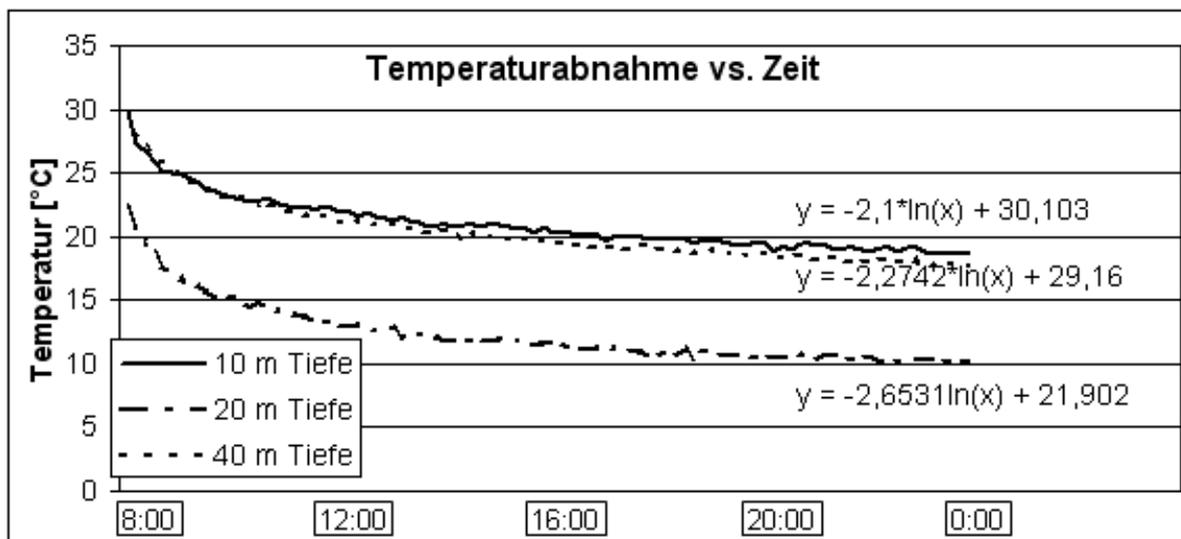


Diagramm 39: Temperaturabnahme im Sondenringraum. Man beachte die stärkere Abnahme in einer Tiefe von 20 m, hier transportiert eine Grundwasserströmung die eingebrachte Wärme schnell ab.

Beim Temperaturverlauf im Untergrund (Diagramm 39 unten) zeigt sich auch die Grundwasserfahne in 20 m Tiefe. Wärme kann in diesem Bereich kaum eingebracht werden; bereits bei Beginn des Abklingens liegt das Temperaturniveau hier um 10 – 11 °C tiefer als im undurchströmten Ringraum. Nach bereits 14 h ist die Temperatur auf das Niveau des ungestörten Grundwassers abgeklungen.

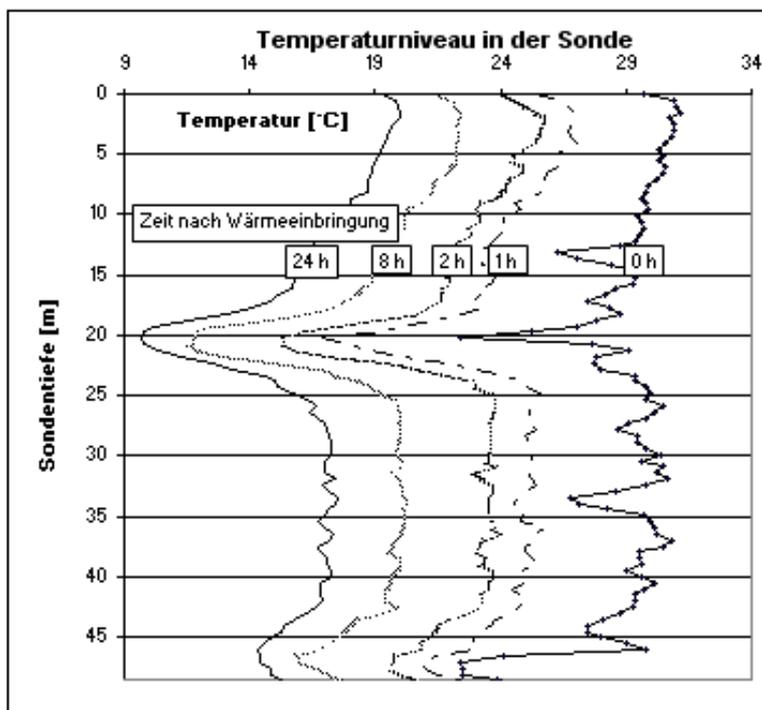


Diagramm 40: Im Bereich der Grundwasserfahne (20 m Tiefe) ist nach 8 h das Temperaturniveau auf 11,5 °C gesunken. Nach 14 h ist die eingebrachte Wärme abgeklungen.

Der Wärmeeintrag, die Speicherdauer ($\tau = T/2$, „Halbwertszeit“) und die verbliebene Wärme wurden in Tabelle 14 zusammengefasst. Im Rechenmodell wird davon ausgegangen, dass nach 12 h 50 % der im Erdreich verbliebenen Energie wieder gewonnen werden können; die restlichen 50 % werden im Boden abgeleitet. Die prozentuelle Restwärme wurde berechnet nach:

$$Q_{rel} = \frac{T_{12h} - T_0}{T_{Start} - T_0} f_R$$

| Sondentiefe [m] | τ [h] | Temp-Niveau Anfang [°C] | T (1/2) [°C] | Rest-Wärme nach 12 h ($f_R = 50\%$) |
|--------------------|------------|----------------------------|-----------------|--|
| 0 | 16,97 | 29,56 | 20 | 26,90 % |
| 10 | 17,72 | 30,1 | 20,6 | 27,10 % |
| 20 | 1,43 | 21,9 | 16,2 | 0,25 % |
| 30 | 6,33 | 30,6 | 20,55 | 20,60 % |
| 40 | 10,1 | 29,16 | 19,8 | 23,90 % |
| 50 | 5,91 | 26,95 | 18,7 | 20,04 % |

Tabelle 14: Energiespeicherung - Zeithorizonte

Die gewonnenen Daten wurden in mehreren Versuchen reproduzierbar wiedergewonnen und somit bestätigt.

C) Interpretation

Die Kurzzeit-Speicherung von überschüssiger Solarwärme in Erdwärmesonden ist grundsätzlich möglich und auch wirtschaftlich vertretbar. Einerseits muss aber der Untergrund zur Speicherung geeignet sein (kein strömender Aquifer) und andererseits muss die zu speichernde Wärme kostengünstig zur Verfügung stehen, da – wie in der Tabelle 14 oben ersichtlich - nach 12 h nur noch 20-25 % der eingetragenen Wärme gewonnen werden können. Dies ist bei solaren Überschüssen der Fall; es wird nur die Energie zum Betrieb der Umwälzpumpen benötigt.

Von Grundwasser durchströmte Sonden eignen sich nicht für den Speicherbetrieb, sind aber von Vorteil, wenn nur Wärme entzogen werden soll, da erstens der thermische Schluss mit dem Verpressmaterial sicher gegeben ist (keine Luftblasen) und zweitens geothermische Energie nicht nur durch Wärmeleitung, sondern aktiv zur Sonde transportiert wird.

Aus den gewonnenen Daten lässt sich feststellen, dass eine Kombination von Solarthermie und Geothermie mit integrierter Speicheroption anzustreben ist.

Teilziel 4.4: Untersuchungen des Langzeitspeicherbetriebs der Hybridsonde

Ausgleich von saisonalen Wärmeentnahmeschwankungen mittels ausgearbeiteter Bewirtschaftungsprogramme der nutzbaren sondennahen Speicherkapazitäten unter Einbezug des Zwischenspeichers

Definiert man „Langzeit-“, als einen Zeitraum von mehreren Monaten bis zu einer saisonalen Speicherung, scheint eine Langzeitspeicherung bei den unter Teilziel 4.3 dargestellten Daten nicht sinnvoll. Die eingebrachte Wärme klingt innerhalb von einigen Tagen vollständig ab; es sind nach 24 h nur mehr 12 % der Wärme verfügbar (im nicht durchströmten Sondenbereich).

Eine interessante Alternative zur saisonalen Speicherung konnte im Zuge des Geosola-Projektes gezeigt werden: Bei intensiv genutzten EWS kühlt der Untergrund im Laufe der Nutzungsdauer trichterförmig um den ungestörten Untergrund ab. Die Geosola-Versuchssonden zeigen auch nach drei Jahren Nutzung keine signifikante Abkühlung, da immer wieder solarer Wärmeeintrag mit Warmwasser simuliert wurde.

Es ist daher sinnvoll, solare Überschüsse außerhalb der Heizperiode zur Regeneration des Untergrundes in die EWS einzubringen.

Erdwärmesonden-Langzeitspeicher müssen entsprechend dimensioniert werden und als Sondenfelder aufgebaut sein, mit den Geosola-Versuchssonden lässt sich keine Langzeitspeicherung realisieren. Sehr wohl konnte aber gezeigt werden, dass auch für einzelne Erdwärmesonden die Regeneration des Untergrundes funktioniert.

Ein Bewirtschaftungsprogramm muss daher nicht auf Langzeitspeicherung sondern auf Erhaltung des Temperaturniveaus abzielen. Aus der Literatur ist bekannt, dass der Wärmestrom aus der Erde etwa $0,07 \text{ W/m}^2$ Erdoberfläche beträgt. Entzieht man mehr Wärme, würde die Sondenumgebung abkühlen. Ein Vorschlag zur optimalen Bewirtschaftung einer EWS, die nicht zur Langzeitspeicherung herangezogen werden kann, ist im Folgenden dargestellt. Kalkuliert wurde als Beispiel ein Jahresverbrauch an Energie für Heiz- und Warmwasserbereitung von 12 000 kWh für ein Einfamilienhaus.

| Monat | Entladen [kWh] | Laden [kWh] | Schlüssel in % (DIN 4713) |
|--------------|-------------------|----------------|------------------------------|
| Januar | 2040 | 128 | 17 |
| Februar | 1800 | 128 | 15 |
| März | 1560 | 288 | 13 |
| April | 960 | 768 | 8 |
| Mai | 480 | 1152 | 4 |
| Juni | 160,0 | 1536 | 1,3 |
| Juli | 160,0 | 1632 | 1,3 |
| August | 160,0 | 1440 | 1,3 |
| September | 360 | 1248 | 3 |
| Oktober | 960 | 768 | 8 |
| November | 1440 | 384 | 12 |
| Dezember | 1920 | 128 | 16 |
| Summe | 12000 | 9600 | 100% |

Tabelle 15: Vorschlag eines Bewirtschaftungsplans mit 80 % solarthermischer Regeneration und 20 % Autoregeneration des Untergrunds.

Mit einem richtig dimensionierten Lade- und Entladeplan („Bewirtschaftungsprogramm“) kann das Abkühlen des Untergrundes verhindert werden. Saisonale Temperaturschwankungen im Untergrund treten jedoch nach wie vor auf.

Die oben angegebenen Werte von 9 600 kWh für Energieeintrag („Laden“) lassen sich mit einer Solarkollektorfläche von 13 – 20 qm erreichen (500 – 750 kWh/(m²*a) Wärmeproduktion).

Teilziel 4.5: Untersuchungen des Speicherbetriebs und der erzielbaren Zeithorizonte

Die faseroptische Temperaturmessung im Untergrund erlaubt es, das Abklingverhalten von eingebrachter Wärme in der EWS über einen beliebigen Zeitraum zu beobachten. Damit konnte gezeigt werden, dass solare Überschüsse zur Kurzzeitspeicherung herangezogen werden können (Teilziel 4.3).

Wie lange können nun solare Überschüsse gespeichert werden? Auch die Wirtschaftlichkeit muss gegeben sein. Deshalb muss der Wert der wieder gewinnbaren, gespeicherten Energie größer sein als die Kosten der zur Speicherung benötigten Energie für Umwälzpumpen etc. Nur so lässt sich ein positiver Deckungsbeitrag erzielen. Dieser Wert kann nicht beliebig übertragen werden, sondern ist für jede EWS-Anlage gesondert zu ermitteln (Speicherkapazität im Untergrund, Grundwasserfluss,...).

A) Untersuchung des Speicherbetriebs

Im Zuge des Geosola-Projekts wurden im Wesentlichen drei Betriebszustände der Sole- und CO₂-Sonden untersucht: Wärmeentzug, Wärmeeintrag und simultaner Wärmeeintrag (Solesonden) und –entzug (CO₂-Sonden). Letzterer Betriebszustand diente vor allem der Untersuchung der Leistungsfähigkeit der CO₂-Sonden. Im Betriebszustand „Wärmeeintrag“ wurde mittels Pufferspeicher (als Wärmequelle) solarer Wärmeüberschuss simuliert und das Sondenverhalten dabei untersucht.

Zum Monitoring des Wärmeeintrags wurden die Daten zu Solefluss, Eingangs- und Ausgangstemperatur geloggt und ausgewertet. Außerdem wurden Temperaturprofile längs der Sondenachse mittels der Lichtwellenleiter sowohl während des Wärmeeintrags als auch während des Abklingens aufgenommen. Im Diagramm 41 ist ein Temperaturprofil entlang der Sonde während des Wärmeeintrags angegeben.

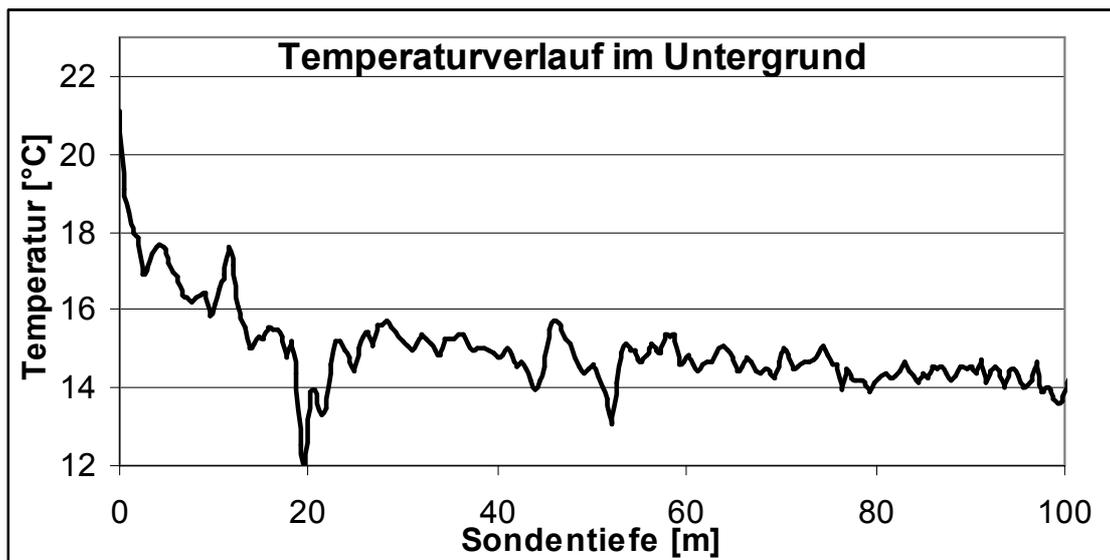


Diagramm 41: Temperaturverlauf entlang der Sondenachse (Sonde 3) während Wärmeeintrag.

Es zeigt sich, dass besonders viel Wärme – aufgrund des höheren Gradienten – im oberen Sondendrittel abgeführt wird. Nachteilig für den Speicherbetrieb ist, dass eben hier Wärme durch einen strömenden Aquifer abgeführt wird (Zacke bei 20 m im Diagramm 41).

Der Speicherbetrieb betrifft also je nach Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes (siehe Kapitel „Thermal Response Test“) das obere Sondendrittel stärker. Soll Wärme in einer EWS kurzzeitig gespeichert werden, müssen demnach die geologischen Voraussetzungen gegeben sein. Die Dimensionierung der Wärmequelle (Solarkollektoren,...) ist gemäß der Daten, die bei den Wärmeeintrags-Versuchen generiert wurden, kein limitierender Faktor. Der Wärmeeintrag ist bereits bei relativ geringen Vorlauftemperaturen um die 35 °C in der Größenordnung der maximalen Entzugsleistung der Sonde, d. h. wenn aus einer EWS 4 kWh thermischer Energie entzogen werden können, können (bei diesen Vorlauftemperaturen) auch in etwa 4 kWh eingebracht werden. Untersuchungen zu höheren Vorlauftemperaturen (70 °C aufwärts) konnten an der Geosola-Versuchsanlage nicht realisiert werden. Solche Vorlauftemperaturen sind aber bei Verwendung von Solarkollektoren zu erwarten. Hierbei sollte der mögliche Wärmeeintrag durch den größeren Temperaturgradienten noch deutlich höher liegen, wie die Beobachtungen des oberen Sondendrittels in Diagramm 41 auch bestätigen.

B) Erzielbare Zeithorizonte

Für die untersuchte Sonde ϵ der Geosola-Industrieforschungsanlage konnte anhand der Abklingkurven (Teilziel 4.3) eine Extrapolation erstellt werden, aus der sich die maximale Speicherdauer abschätzen lässt. Die Speicherdauer, bis zu der eine Rekuperation der eingebrachten Wärme wirtschaftlich sinnvoll ist („Break-Even“) liegt je nach Untergrund-Beschaffenheit in der Größenordnung zwischen Minuten und Tagen. Hierbei muss die gespeicherte und wieder gewonnene Energie wertvoller sein als die zum Einbringen der Wärme benötigte (elektrische) Energie. Da diese Werte je nach Energieversorger oder Anlagentyp stark schwanken können, wurde auf eine Abschätzung verzichtet.

Mit der Sonde 4 (Sonde ϵ) konnten experimentell folgende Zeithorizonte zur Speicherung nachgewiesen werden:

| Untergrund | t(50%) [h] |
|-------------------|-----------------------|
| Deckschicht | 17,72 |
| Aquifer | 1,43 |
| Schlier | 10,1 |

Tabelle 16: Erzielbare Speicherhorizonte (50 % Restwärme) in den verschiedenen Schichten im Untergrund

Die effektivste Kurzzeit-Speicherung darf somit für den obersten, untiefen Sondenbereich angenommen werden.

Teilziel 4.6: Untersuchungen des Einflusses der Sondenlänge auf den mittleren Wärmeentzug

A) Untersuchung der Solesonden

Dazu wurden die beiden Sonden Eta und Epsilon genauer untersucht, da beide die gleiche Verpressung aufweisen und sich somit nur in ihrer Länge unterscheiden.

Eine Veranschaulichung der beiden untersuchten Sonden ist in der unten dargestellten Abbildung zu finden.

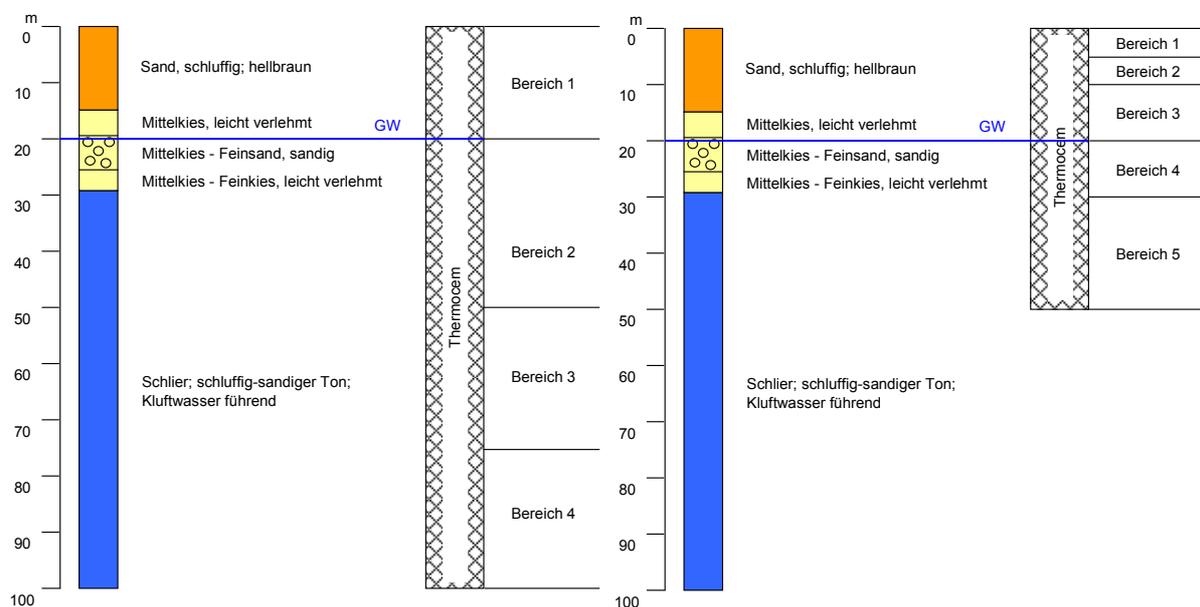


Abbildung 22: links: Darstellung Sonde Eta; rechts: Darstellung Sonde Epsilon

Die Einteilung der unterschiedlichen Entzugsbereiche basiert auf unten dargestellten Temperaturprofilen, wobei man gut erkennen kann, dass die Bereiche 1-3 der Sonde Epsilon dem Bereich 1 der Sonde Eta und die Bereiche 4 + 5 der Sonde Epsilon dem Bereich 2 der Sonde Eta entsprechen.

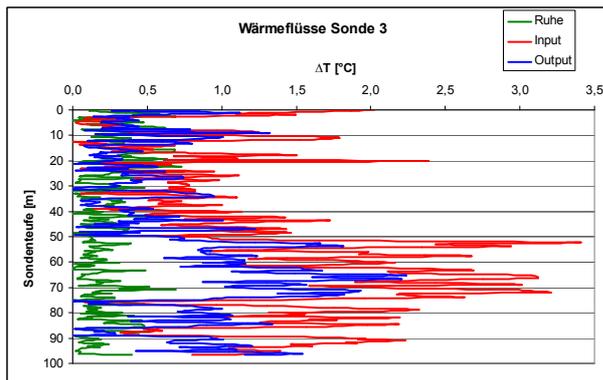


Diagramm 42: Temperaturprofil entlang der Sonde η (3)

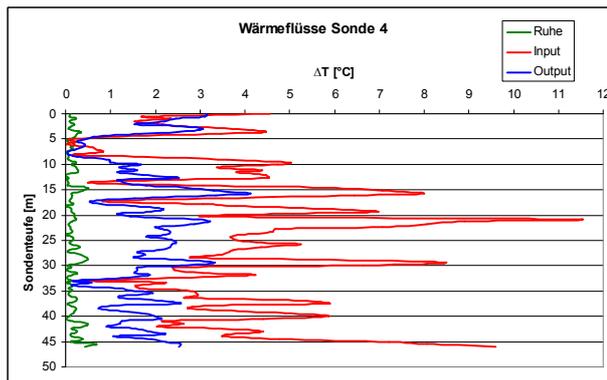


Diagramm 43: Temperaturprofil entlang der Sonde ϵ (4)

Zuerst wurde speziell die gesamt erzielbare Wärmeentzugsleistung mittels den beiden Solesonden betrachtet, wodurch sich sehr gut zeigt, dass es durch eine Verdoppelung der Länge zu einer Verdoppelung der erzielbaren Gesamtleistung kommt. Die Wärmeentzugsleistungen in W/m bleiben hingegen annähernd gleich, wie in den unten stehenden Diagrammen dargestellt ist.

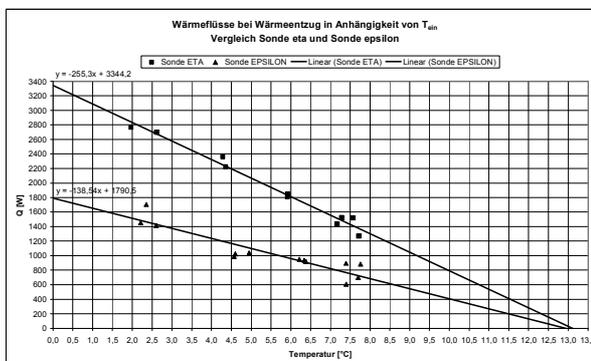
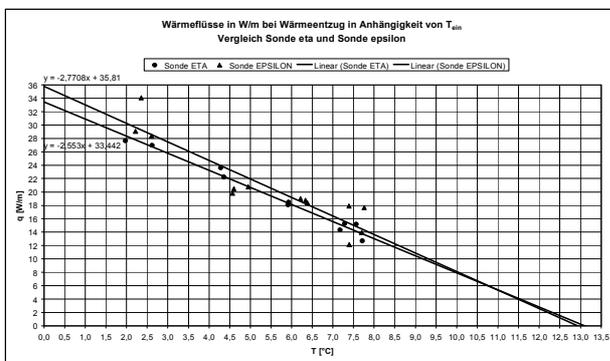


Diagramme 44 und 45: Vergleich Sonde Eta und Sonde Epsilon

Bei einem Vergleich der Wärmeflüsse entlang der Sonden Eta und Epsilon, wie er im Diagramm 46 unten dargestellt ist, kann man sehr gut erkennen, dass diese in tieferen Schichten höher sind.

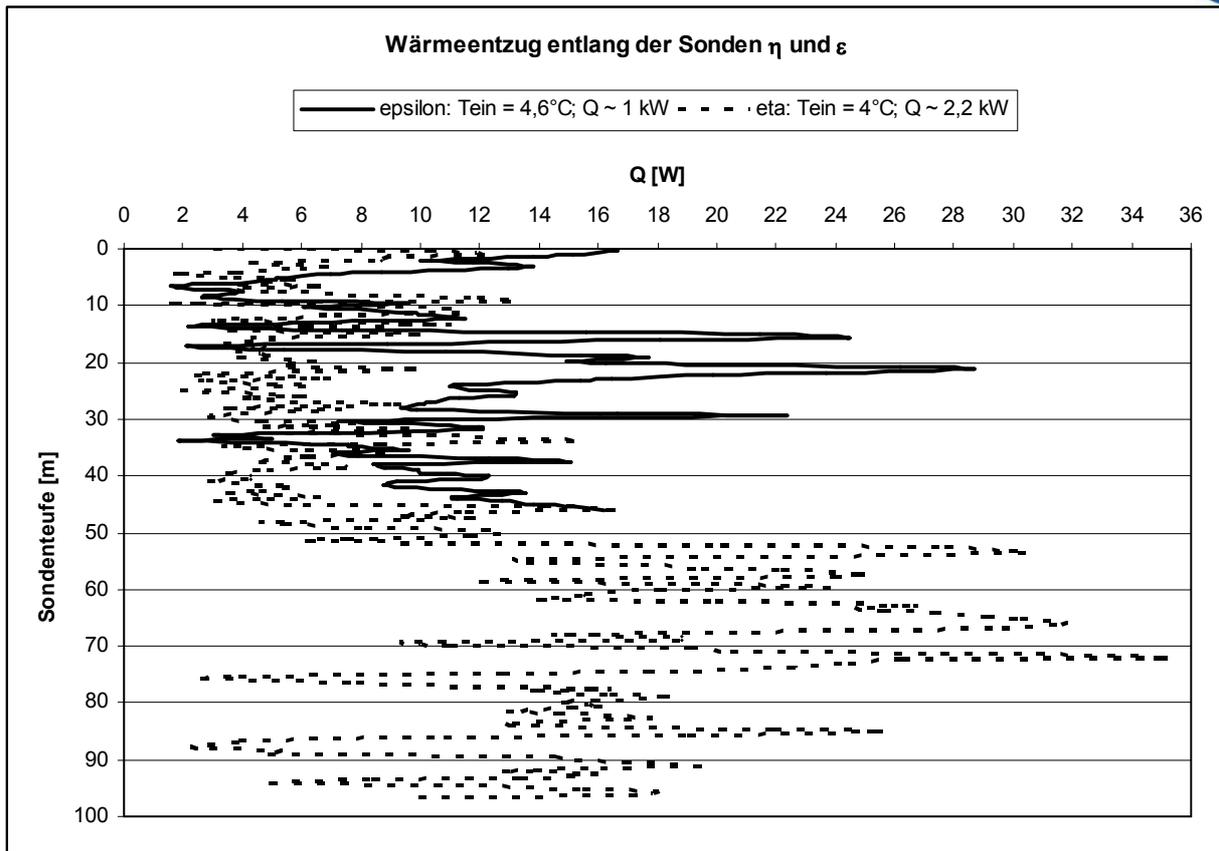


Diagramm 46: Wärmeentzug entlang den Sonden

B) Untersuchung der CO₂-Sonden

1. Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip eines CO₂-Wärmerohres ist in Abbildung 23 dargestellt. Dabei wird zur Wärmeübertragung der Zwei-Phasen-Thermosyphon-Effekt ausgenutzt, der es ermöglicht, die aus dem Untergrund gewonnene Wärme, ohne zusätzliche Umwälzpumpe, mittels aufsteigendem Dampfstrom nach oben zu befördern. Als Heizmedium in der Verdampferzone dient dabei das umliegende Erdreich und als Wärme aufnehmendes Medium wird, im Falle der Geosola-Anlage, eine Wasser-Ethylenglykol-Mischung verwendet, die mit ca. 0-5 °C durch den Kondensator gepumpt wird.

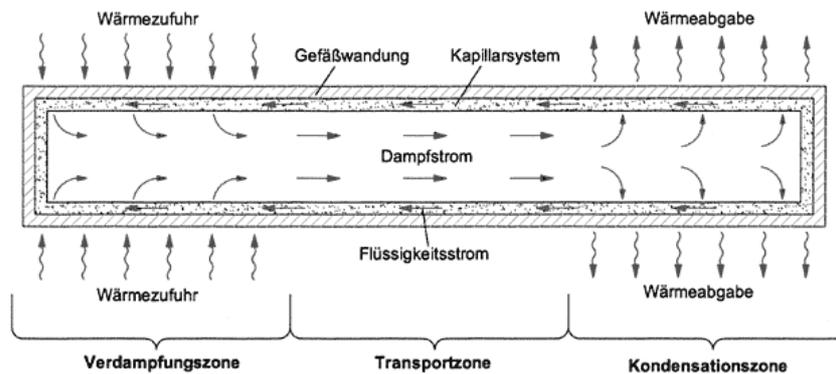


Abbildung 23: Funktionsprinzip eines CO₂-Wärmerohres

II. Messdaten und Ergebnisse

Für die Untersuchungen des Einflusses der unterschiedlichen aktiven Längen auf den Wärmeentzug einer CO₂-Sonde wurden bei annähernd gleichbleibender Soleeintrittstemperatur am Kondensator verschiedene Füllungen eines CO₂-Rohres der Eta-Sonde betrachtet. Der Vorteil der Eta-Sonde lag darin, dass der Lichtwellenleiter direkt am untersuchten Entzugsrohr angebracht war, an dem außerdem die Möglichkeit bestand, den CO₂-Druck im Rohr und den Fluss des flüssigen CO₂ durch das Rohr im oberen Bereich zu messen. Der Querschnitt und die Messeinheit im Untergrund der Eta-Sonde sind in den unten dargestellten Abbildungen veranschaulicht.

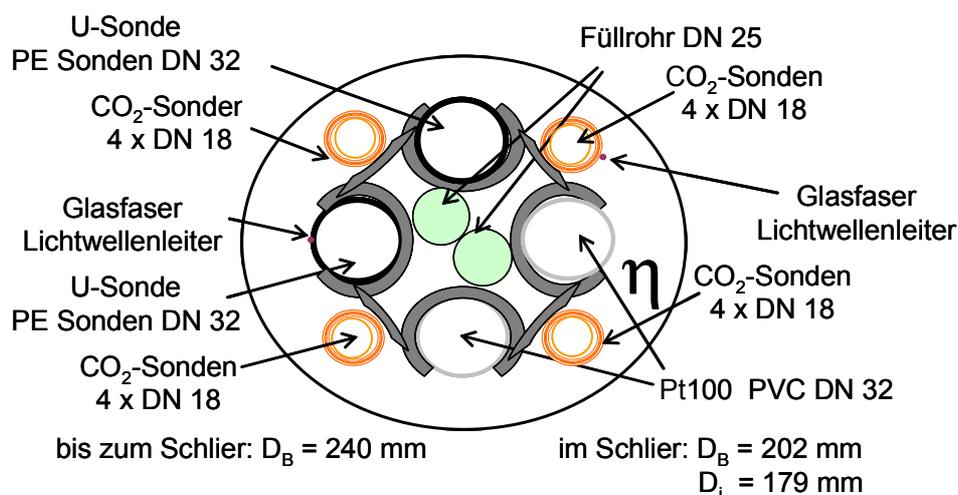


Abbildung 24: Querschnitt der Sonde Eta

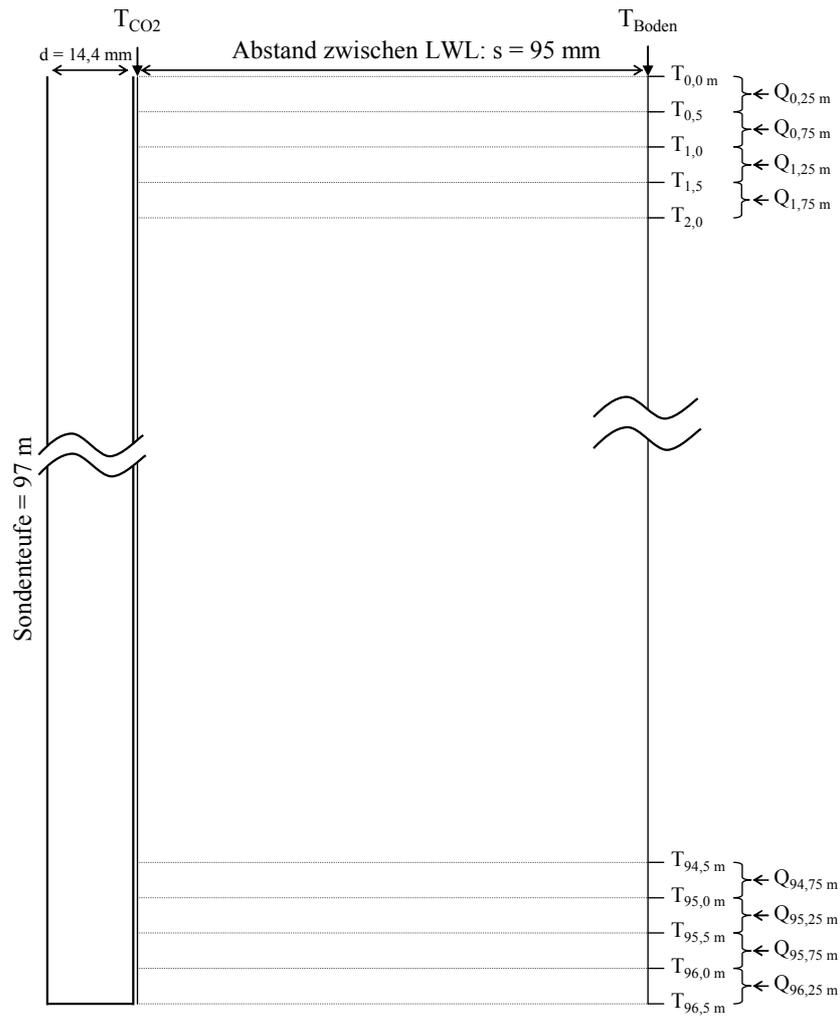


Abbildung 25: Messeinheit im Untergrund der Sonde η

In der unten abgebildeten Tabelle sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst.

| T_{ein} [°C] | Entzugsleistung [W] | Füllmenge [kg] | Aktive Länge [m] |
|--------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| 1,44 | 0 | 0,0 | 0 |
| 1,44 | ~ 400 | 1,9 | 15 |
| 1,25 | ~ 890 | 2,9 | 35 |
| 1,56 | ~ 980 | 3,6 | 50 |
| 1,53 | ~ 980 | 4,3 | 50 |
| 1,57 | ~ 890 | 5,1 | 55 |
| 1,56 | ~ 890 | 6,0 | 95 |

Tabelle 17: Übersicht der Untersuchungsergebnisse

Dabei lässt sich gut erkennen, dass ab einer gewissen aktiven Länge eine Steigerung der Füllmenge zu keiner weiteren Steigerung der Entzugsleistung führt. Das lässt vermuten, dass die Entzugsleistung eines CO₂-Rohres in den oberen Bereichen stärker ist. Diese Vermutung wird durch die unten dargestellten Diagramme noch bekräftigt. Natürlich ist dabei auch zu bedenken, dass man das CO₂-Rohr nicht überfüllt, um die Bildung eines Flüssigkeitspools, der die Entzugsleistung einschränkt, wie schon in früheren Untersuchungen gezeigt wurde, zu verhindern.

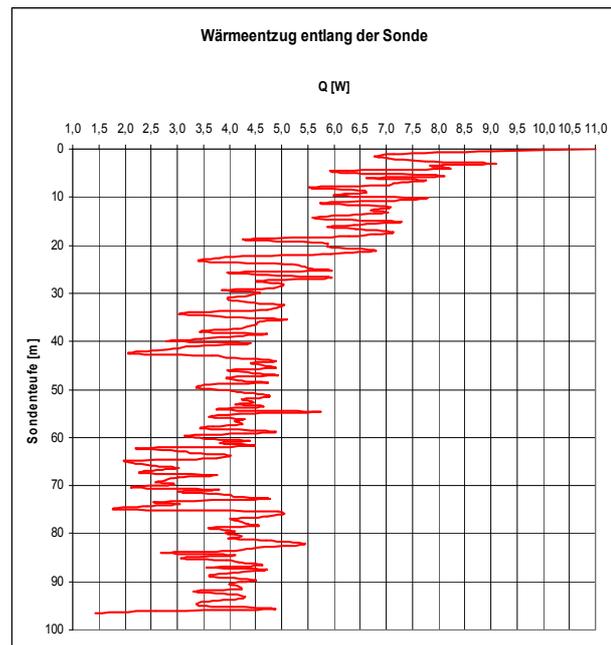
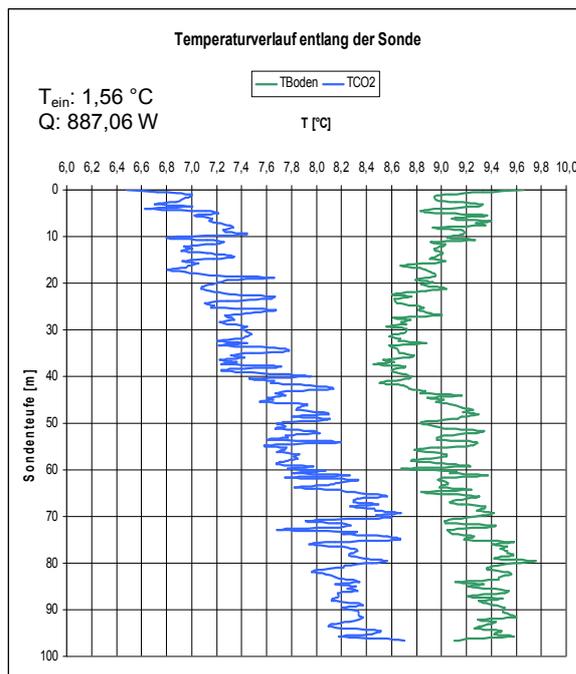


Diagramm 47: Temp.-Verlauf im Untergrund Diagramm 48: Wärmeentzug entlang der Sonde

Aufgrund des Druckanstieges entlang des absteigenden CO₂-Rohres steigt die Temperatur entlang der Sonde und die nutzbare Temperaturdifferenz wird geringer, somit sind die Entzugsleistungen der CO₂-Sonde im oberen Bereich höher.

C) Interpretation

Aufgrund der Untersuchungen kann man erkennen, dass es für die Sole- und CO₂-Sonden unterschiedliche Wärmeentzugsbereiche entlang der 100 m Teufungstiefe gibt. Während die Sole-Sonde in den unteren 50 m effizienter arbeitet, sind die Wärmeentzugsleistungen der CO₂-Sonde in den oberen 50 m höher.

Teilziel 4.7: Untersuchungen des Wärmeentzuges unterschiedlicher Sondengeometrien

Hier können vor allem die drei verpressten Sonden Alpha, Eta und Epsilon betrachtet werden, ebenso wie die drei offenen Strömungs sonden (siehe Abbildungen unten).

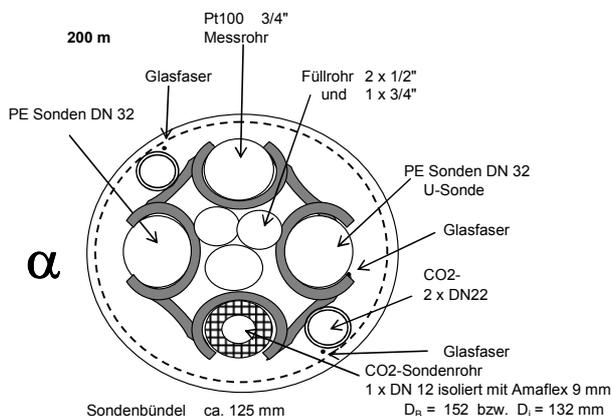


Abbildung 26: Querschnitt der Sonde α

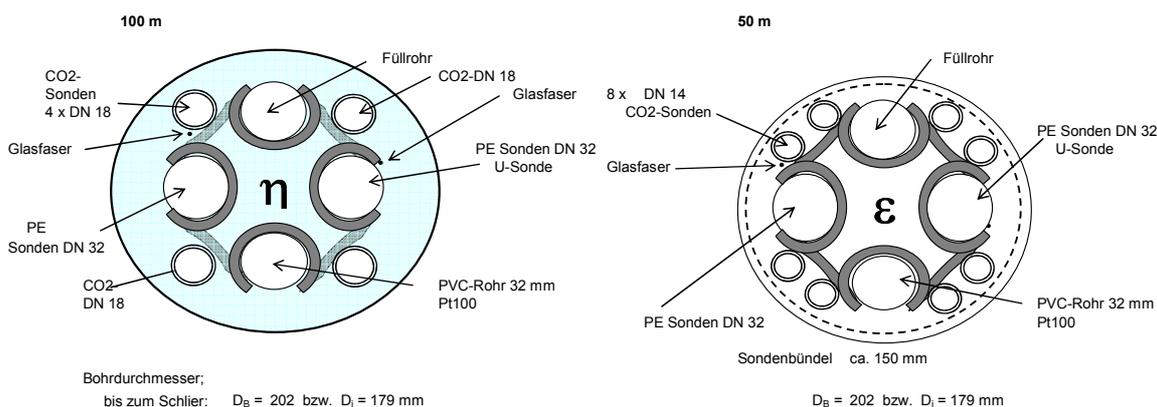


Abbildung 27: Querschnitte der Sonden η und ϵ

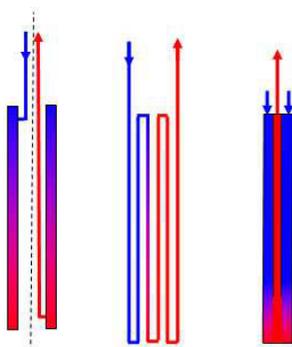


Abbildung 28: 1.) konzentrisches Doppelrohr, 2.) Stahlrohr mit gewellter Oberfläche, 3.) Doppelrohr. Außen kalte Vorlauf Flüssigkeit, die erwärmte WT-Flüssigkeit strömt innen nach oben.

Bei den drei Strömungs sonden zeigt ein Vergleich der Entzugsleistungen der drei unterschiedlichen Wärmeaustauscher keine signifikanten Unterschiede. Vom Aufbau ist die Sondengeometrie (2) zu bevorzugen, da keine Spezialteile gefertigt werden müssen und somit der Wärmeaustauscher kostengünstig zu installieren ist. Die Sonde mit dem Wärmeaustauscher (1) liefert allerdings bei niedrigeren Vorlauftemperaturen etwas höhere Entzugsleistungen.

| Geometrie / T(ein) | (1) (Doppelwand) | (2) (Stahlrohr) | (3) (4 konzentr.Rohre) |
|-----------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|
| 2 °C | 1,57 kW* | 1,53 kW | 1,31 kW* |
| 4 °C | 1,24 kW | 1,16 kW* | 1,13 kW |
| 6 °C | 0,81 kW* | 0,94 kW* | 0,78 kW* |

Tabelle 18: Entzugsleistungen der verschiedenen Sonden bei einem Durchfluss von 500 l/h.

Alle Werte in der oben angeführten Tabelle wurden ohne Luft-Dispersion gemessen. Lag kein genauer Messwert an der jeweiligen Stelle vor, wurden die angegebenen Werte extrapoliert und berechnet(*).

Bei den drei verpressten Sonden ist vor allem ein Vergleich der eingebauten CO₂-Rohre interessant, da es bei den eingebauten U-Rohrsonden keine Geometrieunterschiede gibt. Hier wurden vor allem die Entzugsleistungen der Sonden Alpha und Eta betrachtet, da sie sich nur im Durchmesser und der Anzahl der verwendeten CO₂-Rohre, also in der Geometrie, und nicht in der Länge unterschieden.

| T(ein) | Alpha | Eta |
|--------|------------------------|------------------------|
| | 2 CO ₂ DN22 | 4 CO ₂ DN18 |
| 2 °C | 2,7 kW | 2,5 kW |
| 4 °C | 2,2 kW | 1,8 kW |
| 6 °C | 1,7 kW | 1,1 kW |

Tabelle 19: Entzugsleistungen der verschiedenen Sonden

Bei den oben dargestellten Entzugsleistungen der CO₂-Sonden handelt es sich aber um keine optimalen Werte, da man aus den Temperaturmessungen mittels LWL im Untergrund erkennen konnte, dass die CO₂-Rohre nicht über die gesamte Teufungstiefe aktiv waren.

Bei einer näheren Betrachtung eines CO₂-Rohres der Eta Sonde konnte bei einer voll ausgenutzten Länge von 97 m und einer Eingangstemperatur von 1,5 °C eine Entzugsleistung von knapp 1 kW erzielt werden. Im direkten Vergleich, bei der selben Eintrittstemperatur von 1,5 °C, mit der Solesonde, die hier eine Entzugsleistung von 3 kW liefert, sollte es möglich sein, mit 4 voll aktiven CO₂-Rohren eine Entzugsleistung von 4 kW zu erreichen. Diese ersten Ergebnisse sind Grundlage für weitere Untersuchungen, die mit der Geosola-Anlage, auch nach Beendigung des Projektes, durchgeführt werden.

Teilziel 4.8: Wärmepumpenregelung und –kontrolle

Eine kontinuierliche Anpassung der Wärmepumpenleistung an unterschiedliche Wärmeentzugs- und Wärmeabgabesituationen wird durch das interne Regelsystem des Wärmepumpengerätes gesteuert und überwacht. Für das Messprogramm zur Erkundung der Leitfähigkeiten im Untergrund war eine stabile Temperatur des Wärmeträgermediums (Sole) notwendig. Dafür musste die Ein-Aus-Regelung der Wärmepumpe durch eine frequenzgesteuerte Maschine ersetzt und angepasst werden. Die erforderlichen Parameter hierfür werden von dem Verdampfer- und Kondensatorfühler mittels Temperatur- und Druckmessungen erfasst und mit den vordefinierten (gewünschten) Parametern in der Regelung verglichen. Die Anpassung und die Abgleichung bzw. Anlagenschwankungen werden mittels eines integrierten elektronischen Expansionsventils auf einem definierten Anlagenbetriebspunkt gehalten, wodurch eine gleichmäßige Betriebsweise gewährleistet werden kann. Zur Kontrolle und Dokumentation besteht regelungstechnisch ebenso die Möglichkeit, eine Echtzeitaufnahme aller relevanten Anlagendaten in Schrift und Grafik zu erstellen.

Teilziel 4.9: Untersuchungen des Einflusses der Temperatur der Sondenumgebung der obersten 10 m (abwärts vom Sondenkopf) auf die mittlere Entzugsleistung der Sonde

Bei den beiden 100 m Sonden Alpha und Eta konnte kein direkter Einfluss der saisonalen Schwankungen auf die mittlere Entzugsleistung der Sonden festgestellt werden, weder bei den Sole- noch bei den CO₂-Sonden. Eine leichte Temperaturschwankung der oberen 10 m während der Jahreszeiten war zwar mit Hilfe der ortsauflösenden faseroptischen Temperaturmessung zu erkennen, jedoch hatte diese keine Auswirkung auf die mittleren Entzugsleistungen der beiden Sonden.

Auch bei der kürzeren 50 m Sonde Epsilon reichten die Temperaturschwankungen der oberen 10 m nicht aus, um einen merklichen Einfluss auf die mittlere Entzugsleistung auszuüben. Hier ist jedoch der Einfluss des Aquifers, der sich in 20 m unterhalb der GOK befindet, zu erkennen. Eine genauere Beschreibung dieses Einflusses wird in den Kapiteln 4.3-4-5 näher beschrieben.

Teilziel 4.10: Thermische Modellierung der EW-Sonden im Untergrund

A) Einführung FEM Modellierung

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Sie ist ein weit verbreitetes Berechnungsverfahren im Ingenieurwesen und gilt als das Standardwerkzeug bei der Simulation von festen Körpern. Das Verfahren liefert eine Näherungsfunktion an die exakte Lösung der Differentialgleichung, deren Genauigkeit durch die Erhöhung der Freiheitsgrade und damit des Rechenaufwandes verbessert werden kann.

Mit der FE-Methode können Probleme aus verschiedenen physikalischen Disziplinen berechnet werden, da es sich grundsätzlich um ein numerisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen handelt. Zunächst wird das Modellgebiet in eine beliebig große Anzahl von Elementen unterteilt.

Diese Elemente sind „endlich“ (finit) und nicht unendlich (infini) klein. Das Aufteilen in eine bestimmte Anzahl Elemente finiter Größe, die sich mit einer endlichen Zahl von Parametern beschreiben lassen, gab der Methode den Namen „Finite-Elemente-Methode“.

Innerhalb dieser Elemente werden Ansatzfunktionen definiert. Setzt man diese Ansatzfunktionen in die zu lösende Differentialgleichung ein, erhält man zusammen mit den Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen ein Gleichungssystem, welches in der Regel numerisch gelöst wird. Die Größe des zu lösenden Gleichungssystems hängt maßgeblich von der Anzahl der finiten Elemente ab. Seine Lösung stellt letztlich die numerische Lösung der betrachteten Differentialgleichung dar.

1. Diskretisierung des Ausgangsmodells

Die gegebene Aufgabenstellung wird diskretisiert, indem ganz allgemein das zu betrachtende Modellgebiet in einfache Teilgebiete, die so genannten Elemente, in endlicher (finiter) Anzahl, zerlegt wird. Bei gewissen Aufgabenstellungen ist die Aufteilung in Elemente durch das Problem bereits weitgehend vorgegeben, zum Beispiel bei räumlichen Fachwerken, bei denen die einzelnen Stäbe die Elemente der Konstruktion bilden. Das gilt auch bei Rahmenkonstruktionen, wo die einzelnen Balken oder unterteilte Balkenstücke die Elemente der Aufgabe darstellen.

Bei zweidimensionalen Problemen wird das Grundgebiet in Parallelogramme, Dreiecke oder Vierecke eingeteilt.

Selbst wenn nur geradlinige Elemente verwendet werden, erreicht man mit einer entsprechend feinen Diskretisierung eine recht gute Approximation (Annäherung) des Grundgebietes. Jedenfalls erlaubt diese Diskretisierung eine flexible und auch dem Problem angepasste Erfassung des Grundgebietes. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass sehr spitze oder überstumpfe Winkel in den Elementknoten vermieden werden, um numerische Schwierigkeiten auszuschließen. Dann wird das gegebene Gebiet durch die Fläche der approximierenden Elemente ersetzt.

Räumliche Probleme werden mit einer Diskretisierung des dreidimensionalen Gebietes in Tetraederelemente, Quaderelemente oder andere dem Problem angepasste berandete Elemente, dies sind i. d. R. Serendipity- oder Lagrange-Elemente, bearbeitet.

Die Feinheit der Diskretisierung, d.h. die Dichte des Netzes, hat maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Resultate der Näherungsrechnung. Da gleichzeitig der Rechenaufwand bei der Verwendung feinerer und dichterere Netze steigt, gilt es, möglichst intelligente Vernetzungslösungen zu entwickeln.

II. Randbedingungen:

Nachdem ein gegebenes Problem diskretisiert ist und die Elementmatrizen aufgestellt sind, führt man vorgegebene Randbedingungen ein. Ein typisches FE-Problem kann zwei Arten von Randbedingungen haben: Dirichlet-Randbedingungen und Neumann-Randbedingungen. Sie gelten (wirken) immer an den Knotenpunkten.

Eine Dirichlet-Randbedingung gibt einen Funktionswert direkt vor, und eine Neumann-Randbedingung gibt eine Ableitung eines Funktionswertes vor. Ist eine Dirichlet-Randbedingung vorgegeben, bedeutet dies, dass das Problem einen Freiheitsgrad weniger bekommt und die zugehörige Zeile und Spalte in der Gesamtmatrix gestrichen wird. Ist die Dirichlet-Randbedingung ungleich Null, so wird der Wert entsprechend seinem Vorfaktor der Linearform ("rechten Seite") hinzugefügt. Je nach Art des physikalischen Problems kann es sich um verschiedene physikalische Größen handeln.

B) Modellgenerierung

Modellrechnungen auf Basis der Finiten-Element-Methode erfolgten an zwei unterschiedlichen Modellen.

- 1) Modell 1: Nahbereich einer Sonde, Diskretisierung der Sondenverrohrung und des Verpressbereiches sowie des anstehenden Untergrundes, Modellgröße 10 x 15 Meter.

In Abbildung 29 ist der Sondenquerschnitt dargestellt. Eine Veranschaulichung des diskretisierten FE-Modells ist in Abbildung 30 zu sehen.

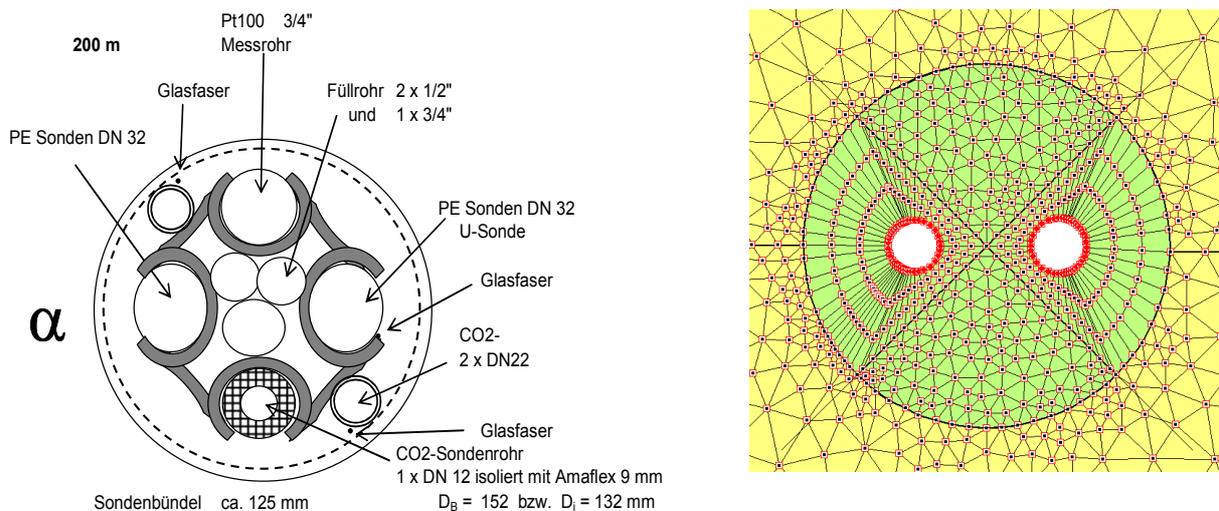


Abbildung 29: Querschnitt Sonde α Abbildung 30: Diskretisierter Sondenquerschnitt

- 2) Modell 2: Gesamtbereich aller fünf Sonden, Diskretisierung der Sonden als Knotenpunkte, Modellgröße 50 x 50 Meter. Abbildung 31 zeigt den Lageplan der Sonden und in Abbildung 32 wird das diskretisierte FE-Modell dargestellt.

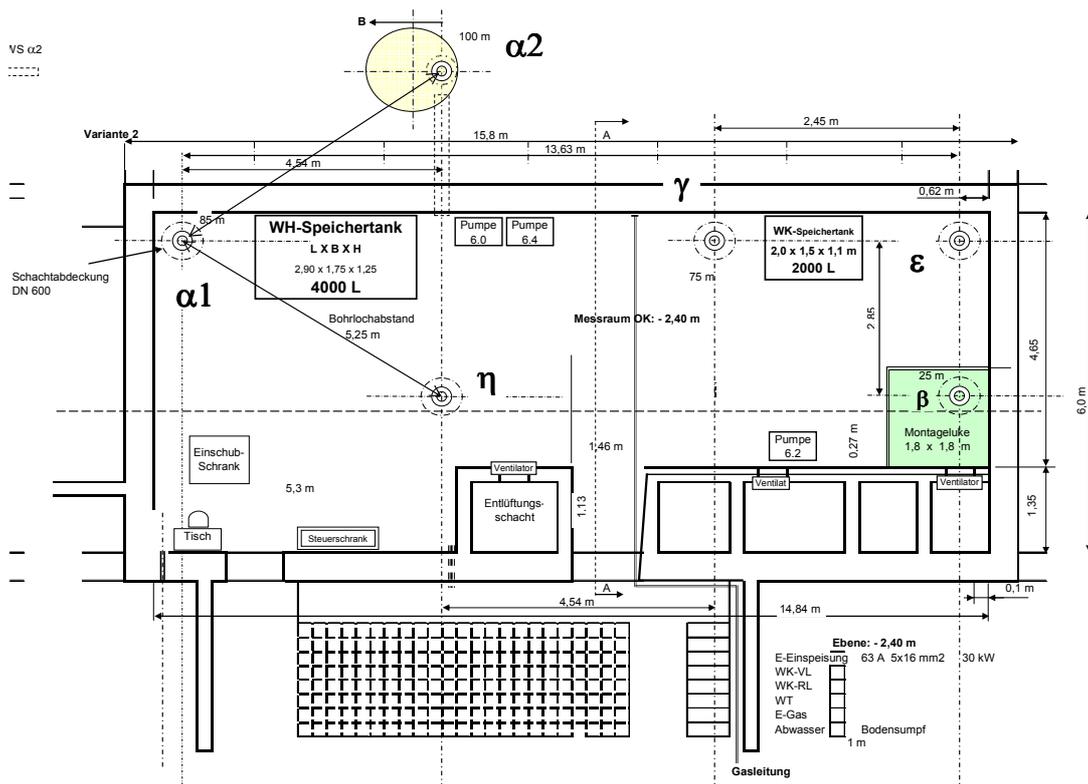


Abbildung 31: Lageplan der Sonden

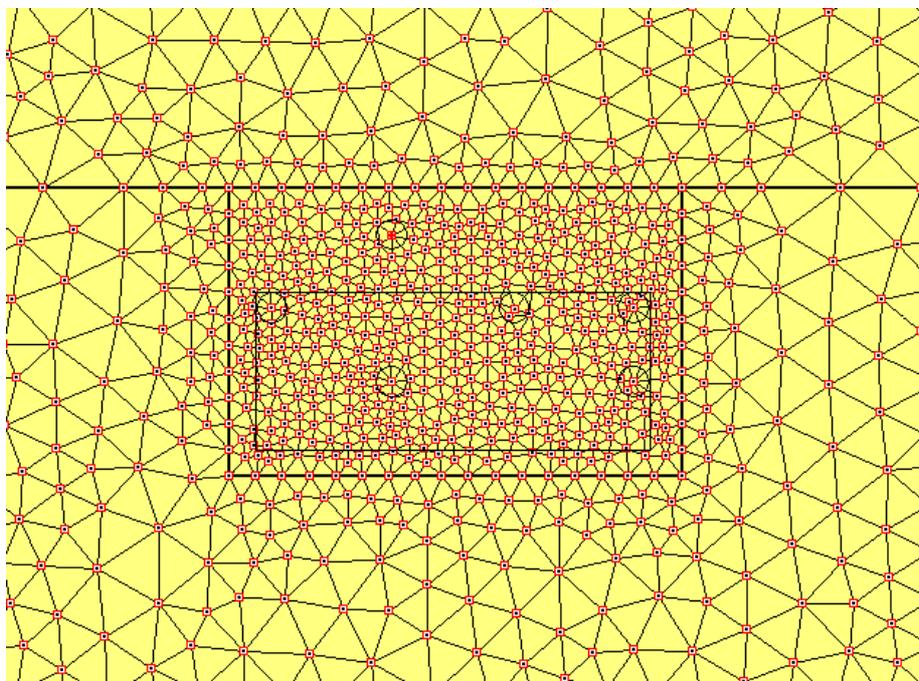


Abbildung 32: Diskretisiertes FE-Modell

Für beide Modelle erfolgte eine thermische Modellierung auf Basis der im Teilziel 1.2 ermittelten thermischen Kennwerte des Untergrundes sowie der im Arbeitspaket 3 ermittelten thermischen Parameter der Sondenverpressung.

Weiters wurde eine kombinierte hydraulisch-thermische Modellierung auf Basis der im Teilziel 1.2 ermittelten geohydraulischen Kennwerte des Grundwasserleiters durchgeführt.

Das Ergebnis der Modellrechnungen ist das Temperaturfeld im jeweiligen Modellgebiet unter den gewählten bzw. vorgegebenen Rahmenbedingungen. Zusätzlich wurde bei den Betriebsfällen Wärmeentzug, im Modell 1, die über die Randbegrenzung, hier die Sondenverrohrung, fließende Leistung ermittelt. Diese entspricht der Entzugsleistung je Meter Sondenlänge.

1. Vereinfachungen

Im Zuge der Diskretisierung des thermischen als auch des hydraulischen Modells sind folgende Vereinfachungen notwendig, um eine numerische Lösung der Differentialgleichungen zu erzielen:

- Homogene und isotrope Eigenschaften des Untergrundes. Der Untergrundaufbau wird durch die Einführung mehrerer Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften vereinfacht dargestellt. Die unterschiedlichen Schichten sind homogen und isotrop hinsichtlich ihrer Eigenschaften.
- Da die Soletemperatur nur in einem U-Rohr mittels Lichtwellenleiter gemessen wurde, wird die Temperatur im zweiten Rohr über bereits ermittelte Korrelationen zwischen Vorlauf- und Rücklaufemperatur errechnet.
- Im Modell 1 werden nicht alle Einbauten diskretisiert. Die Kupferrohre sowie die Leerverrohrungen wurden nicht berücksichtigt. Der daraus resultierende Fehler ist jedoch als gering zu bewerten.
- Im Modell 2 werden die Sonden jeweils als Knoten dargestellt. Eine feinere Diskretisierung ist modelltechnisch nicht möglich.
- Beide Modelle sind zweidimensionale Abbildungen, in diesen Aufsichtsdarstellungen ist die z-Koordinate (Tiefe) als Elementdicke berücksichtigt. Die Elementdicke beträgt in allen Modellen einen Meter.
- Die Modelle beziehen sich mit ihren Eingangsparametern und Randbedingungen auf zwei diskrete Tiefen. Diese beiden Tiefen wurden aufgrund von hydrogeologischen und geologischen Randbedingungen festgelegt.

1. Tiefenstufe: 20 Meter unter Sondeneinlauf,
Bereich des quartären Grundwasserkörpers.

2. Tiefenstufe: 40 Meter unter Sondeneinlauf,
Bereich im Festgestein.

II. Eingangparameter und Randbedingungen

Für beide Modelle wurden folgende Eingangparameter und Randbedingungen festgelegt:

- Thermische Randbedingungen:

| | λ [W/mK] | c_p [MJ/m ³ K] | ρ [g/cm ³] | w [%] |
|--------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| Lösslehmbedeckung | 1,23 | 2,06 | 1,70 | 13,1 |
| Schlier | 2,20 | 2,17 | 2,07 | 5,2 |
| Schotter d. Hochterrasse | 1,32 | 1,58 | 2,26 | 3,03 |

Tabelle 20: Thermische Randbedingungen

- Geohydraulische Randbedingungen:

Für den quartären Grundwasserleiter in der ersten Tiefenstufe wurden im AP 1 folgende geohydraulischen Parameter bestimmt:

Strömungsrichtung: SE (ca. 130°)

Mittlere Abstandsgeschwindigkeit: 8,5 m/Tag (Vektor)–9,5 m/Tag (Mittelwert)

Im Modell 1 erfolgt eine kombinierte geohydraulisch-geothermische Modellierung für die erste Tiefenstufe. Dabei wird das Grundwassergefälle aufgrund der Messungen mit 0,5 % bzw. 1,0 % angesetzt.

- Anlagentechnische Eingangparameter:

Die Modellierungen erfolgten für zwei Betriebsfälle der Sonde α , die Sonde η wurde dabei als Kontrollsonde mitgemessen.

Betrachtete Betriebsfälle:

- 1) Betriebsfall I: Wärmeentzug aus Sonde α bei konstanter Eintrittstemperatur der Sole in die Sonde, $T_{\text{ein}} = 1,32$ °C.
- 2) Betriebsfall II: Wärmezufuhr in Sonde α bei konstanter Eintrittstemperatur der Sole in die Sonde, $T_{\text{ein}} = 22,5$ °C.

C) Ausgeführte Modellrechnungen

Für beide Modelle wurden alle Betriebsfälle untersucht, zusätzlich erfolgten bei Modell 1 die Variation des Grundwassergefälles bei 20 m Tiefe, sowie die Variation des Verpressmaterials bei 40 m Tiefe. In den nachstehenden Tabellen sind die modellierten Betriebsfälle inklusive der Variationen für beide Modelle zusammengestellt.

I. Modell 1

- Betriebsfall I: Output; $T_{\text{ein}} = 1,32 \text{ °C}$; Laufzeit = 3 Tage

| Nahbereich einer Sonde | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------|---------------|---------------|------------------------|---------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Tiefe [m] | Initialtemp. [°C] | VL-Temp. [°C] | RL-Temp. [°C] | Grundwassergefälle [%] | Bodenart | λ [W/mK] | c_p [MJ/m ³ K] | Verpressmaterial |
| 20 | 11,77 | 1,79 | 4,09 | 0,5 | sandiger Kies | 1,46 | 1,62 | Thermocem |
| 20 | 11,77 | 1,79 | 4,09 | 1 | sandiger Kies | 1,46 | 1,62 | Thermocem |
| 40 | 12,97 | 4,72 | 8,84 | kein Grundwasser | Schlier | 2,2 | 2,17 | Thermocem |
| 40 | 12,97 | 4,72 | 8,84 | kein Grundwasser | Schlier | 2,2 | 2,17 | Zement Bentonit Gemisch |

Tabelle 21: Modellrechnung 1 für Betriebsfall I

- Betriebsfall II: Input; $T_{\text{ein}} = 22,5 \text{ °C}$; Laufzeit = 5,5 Tage

| Nahbereich einer Sonde | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------|---------------|---------------|------------------------|---------------|------------------|----------------|-------------------------|
| Tiefe [m] | Initialtemp. [°C] | VL-Temp. [°C] | RL-Temp. [°C] | Grundwassergefälle [%] | Bodenart | λ [W/mK] | C_p [MJ/m³K] | Verpressmaterial |
| 20 | 11,77 | 20,85 | 16,78 | 0,5 | sandiger Kies | 1,46 | 1,62 | Thermocem |
| 20 | 11,77 | 20,85 | 16,78 | 1 | sandiger Kies | 1,46 | 1,62 | Thermocem |
| 40 | 12,97 | 15,82 | 13,31 | kein Grundwasser | Schlier | 2,2 | 2,17 | Thermocem |
| 40 | 12,97 | 15,82 | 13,31 | kein Grundwasser | Schlier | 2,2 | 2,17 | Zement Bentonit Gemisch |

Tabelle 22: Modellrechnung 1 für Betriebsfall II

II. Modell 2

- Betriebsfall I: Output; $T_{\text{ein}} = 1,32 \text{ °C}$; Laufzeit = 3 Tage

| Gesamtbereich aller 5 Sonden | | | | | | |
|------------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|---------------|------------------|----------------|
| Tiefe [m] | Initialtemp. [°C] | gemittelte Soletemp. [°C] | Grundwassergefälle [%] | Bodenart | λ [W/mK] | C_p [MJ/m³K] |
| 20 | 11,77 | 2,94 | 0,5 | sandiger Kies | 1,46 | 1,62 |
| 20 | 11,77 | 2,94 | 1 | sandiger Kies | 1,46 | 1,62 |
| 40 | 12,97 | 6,78 | Kein Grundwasser | Schlier | 2,2 | 2,17 |

Tabelle 23: Modellrechnung 2 für Betriebsfall I

- Betriebsfall II: Input; $T_{\text{ein}} = 22,5 \text{ °C}$; Laufzeit = 5,5 Tage

| Gesamtbereich aller 5 Sonden | | | | | | |
|------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------|---------------|------------------|----------------|
| Tiefe [m] | Initialtemp. [°C] | gemittelte Soletemperatur [°C] | Grundwassergefälle [%] | Bodenart | λ [W/mK] | C_p [MJ/m³K] |
| 10 | 11,77 | 18,86 | 0,5 | sandiger Kies | 1,46 | 1,62 |
| 10 | 11,77 | 18,86 | 1 | sandiger Kies | 1,46 | 1,62 |
| 40 | 12,97 | 14,57 | Kein Grundwasser | Schlier | 2,2 | 2,17 |

Tabelle 24: Modellrechnung 2 für Betriebsfall II

D) Darstellung der Ergebnisse

In Folge sind die Ergebnisse, geordnet nach Modellen und Betriebsfällen, in Form des errechneten Temperaturfeldes grafisch dargestellt. Bei Modell 1 wurde zusätzlich das Temperaturprofil in einem horizontalen Schnitt durch die Sonde aufgezeichnet und für den Betriebsfall I die Entzugsleistungen, welche über die Sondenverrohrung abgeführt werden, zusammengestellt.

I. Ergebnisse Modell 1

- Betriebsfall I

| | Entzugsleistung [W/m] |
|--|-----------------------|
| Tiefe = 20 m; GW-Gefälle = 0,5 % | 48,0 |
| Tiefe = 20m; GW-Gefälle = 1 % | 62,3 |
| Tiefe = 40m; Thermocem | 24,7 |
| Tiefe = 40m; Zement-Bentonitgemisch | 17,6 |

Tabelle 25: Ermittelte Entzugsleistungen je Meter Sonde

Tiefe = 20 m; Grundwassergefälle = 0,5 %

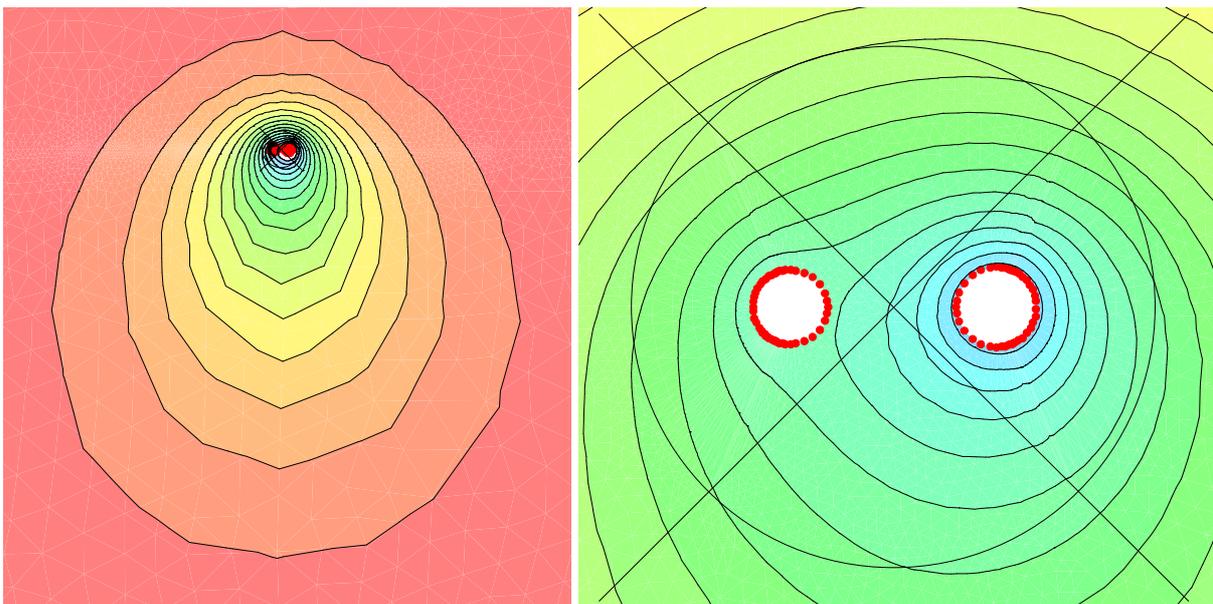


Abb. 33: Temperaturfahne um die Sonde. Abb. 34: Temperaturen im Nahbereich der Sonde

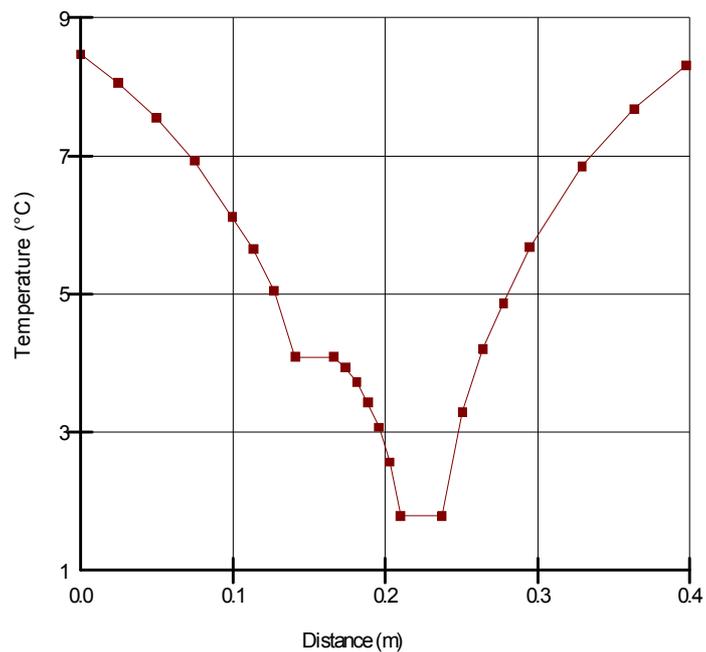


Diagramm 49: Vertikaler Schnitt durch die Sonde bei $I = 0,5 \%$

Tiefe = 20 m; Grundwassergefälle = 1 %

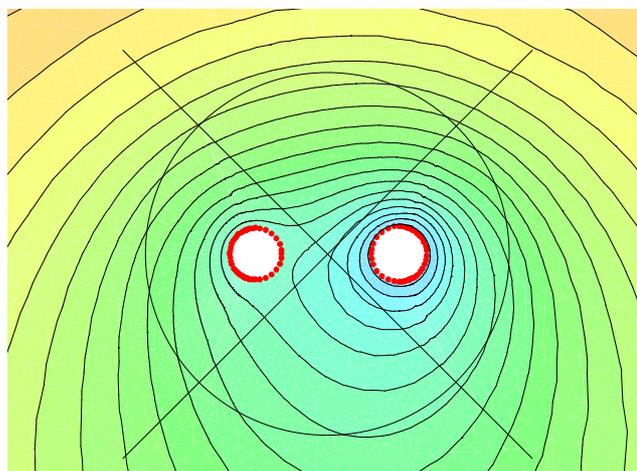
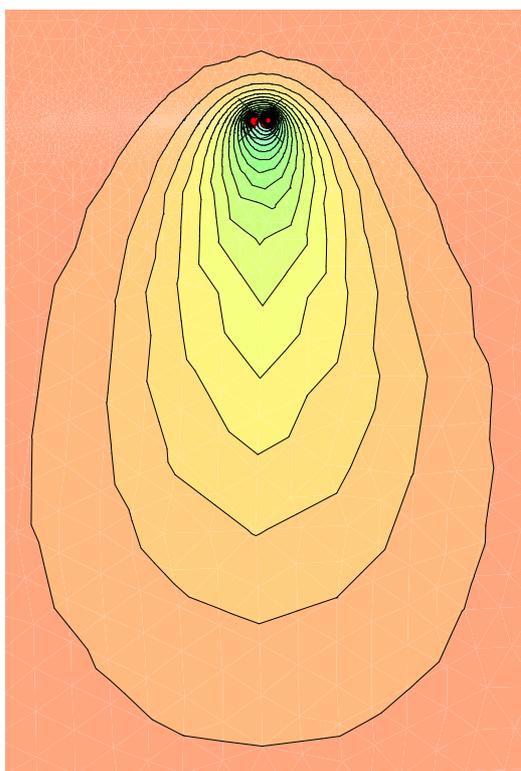


Abb. 35: Ausbreitungsfahne bei $I = 1\%$

Abb. 36: Temperaturen im Nahbereich der Sonde

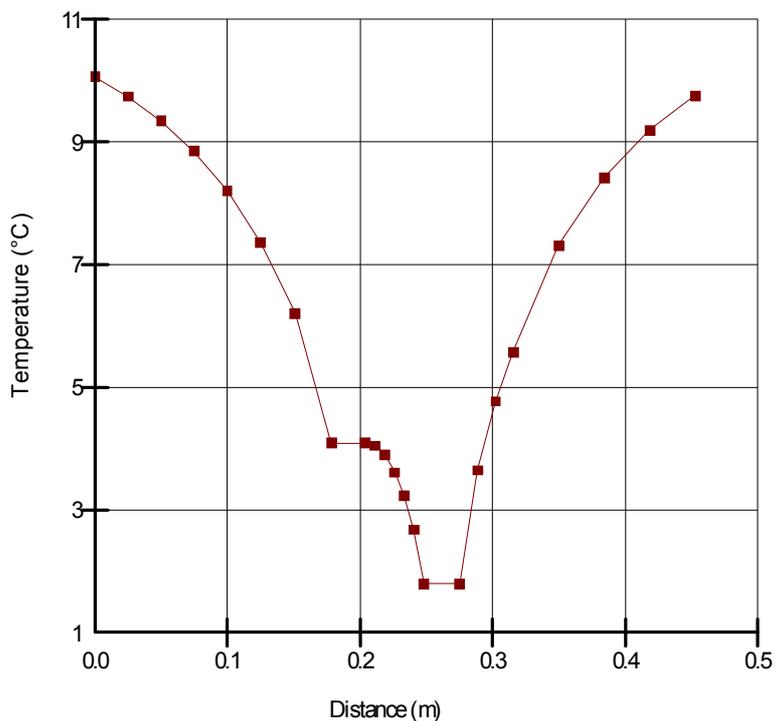


Diagramm 50: Vertikaler Schnitt durch die Sonde bei $I = 1\%$

Tiefe = 40 m; Verpressmaterial Thermocem

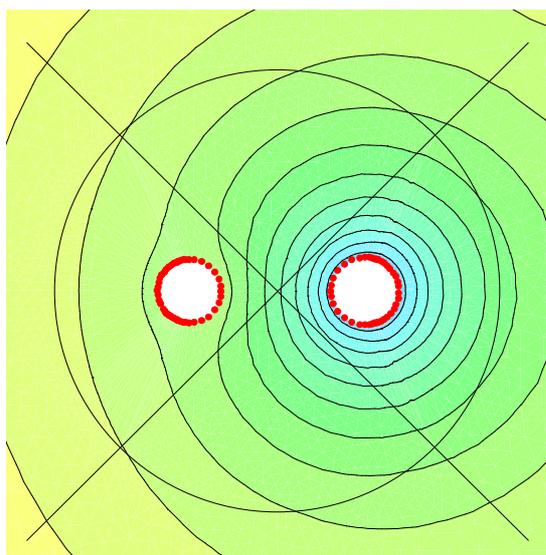


Abb. 37: Temp. im Nahbereich der Sonde

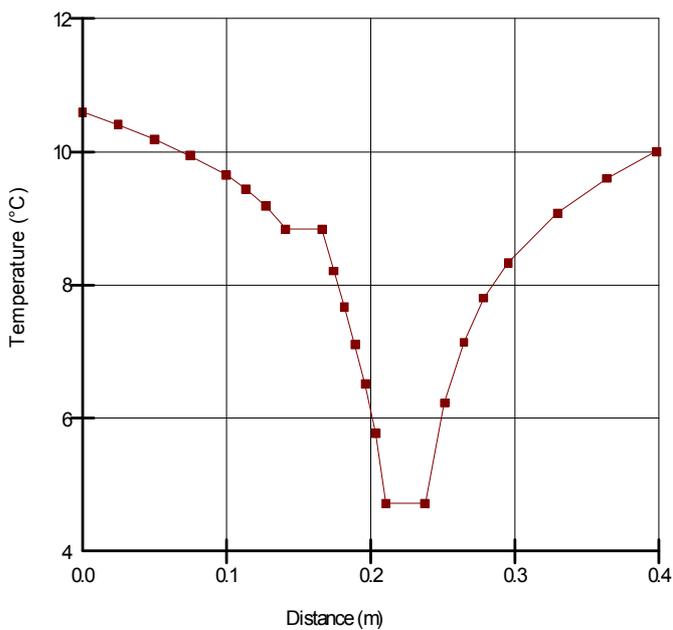


Abb. 38: Vertikaler Schnitt durch die Sonde

Tiefe = 40 m; Verpressmaterial Zement-Bentonitgemisch

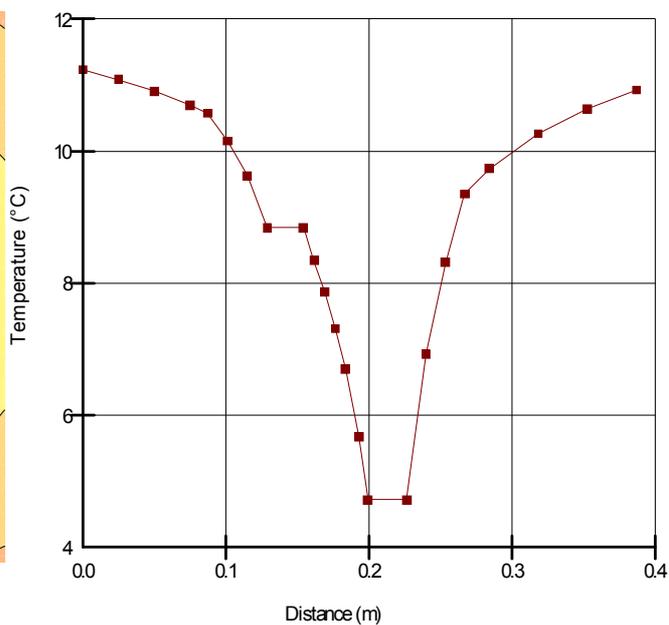
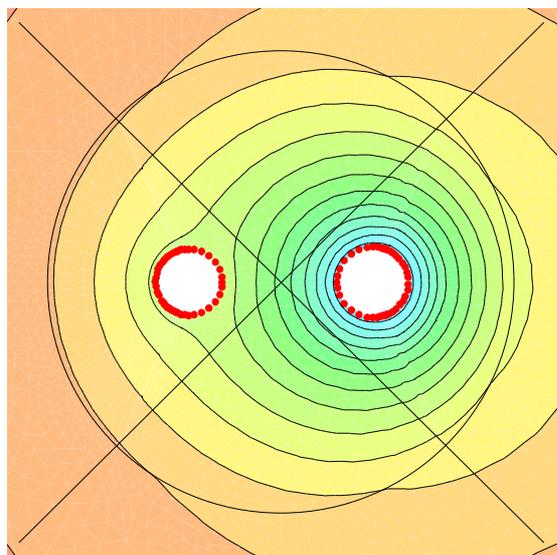


Abb. 39: Temp. im Nahbereich der Sonde Diagramm 51: Vertikaler Schnitt durch die Sonde

- Betriebsfall II

Tiefe = 20 m; Grundwassergefälle = 0,5 %

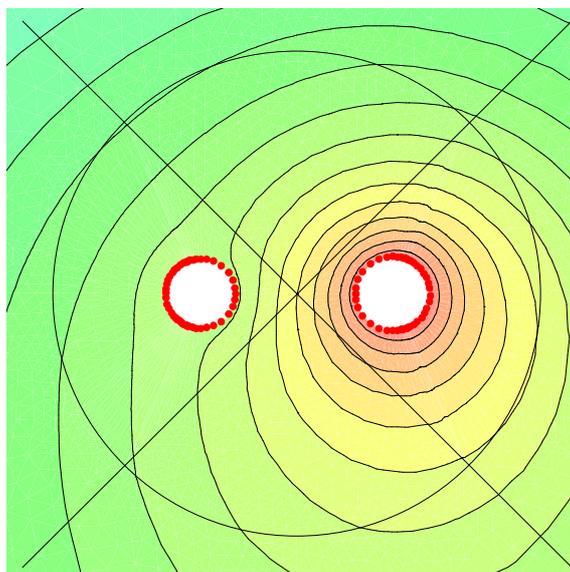
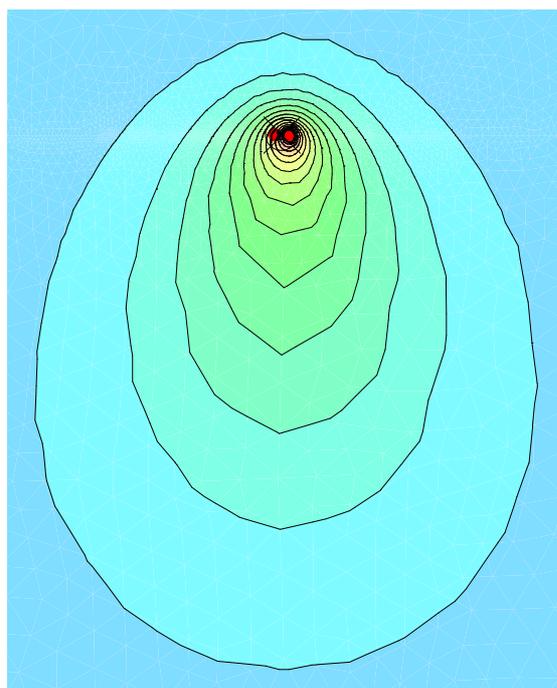


Abb. 40: Temperaturfahne um die Sonde

Abb. 41: Temperaturen im Nahbereich der Sonde

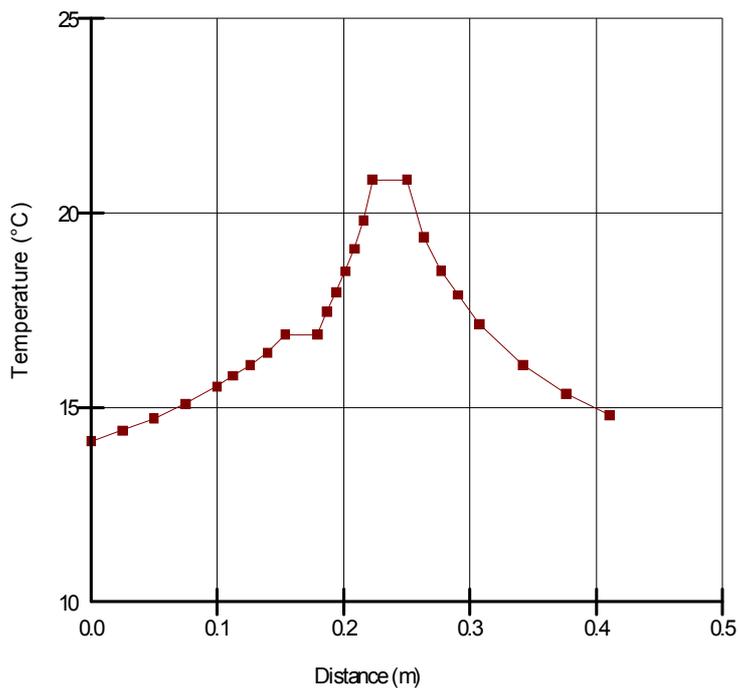


Diagramm 52: Vertikaler Schnitt durch die Sonde bei $I = 0,5 \%$

Tiefe = 20 m; Grundwassergefälle = 1 %

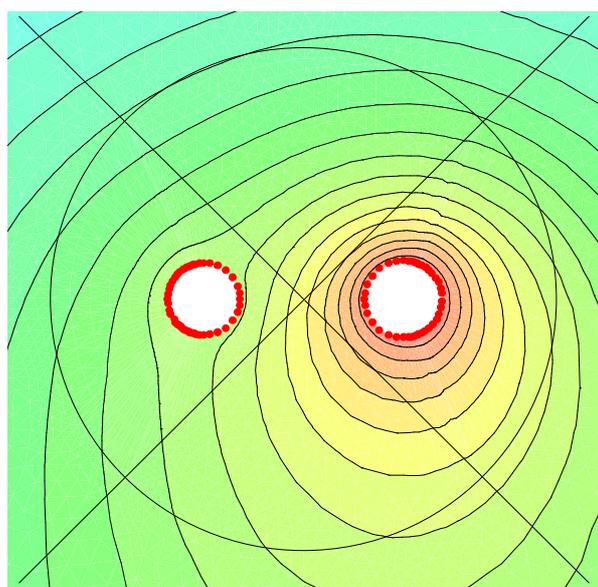
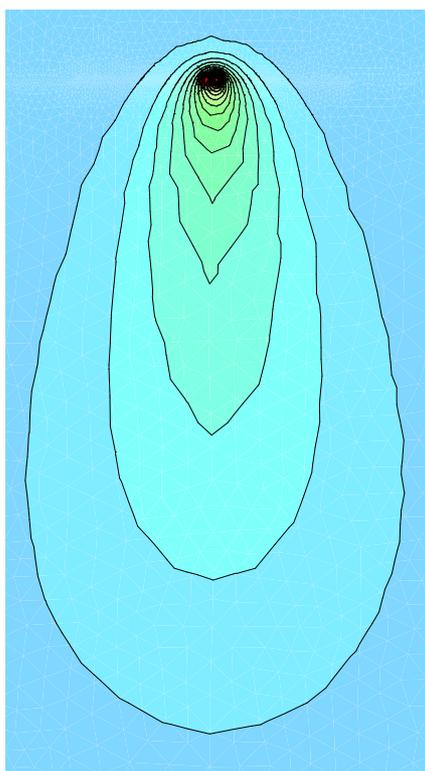


Abb. 42: Temperaturfahne um die Sonde

Abb. 43: Temperaturen im Nahbereich der Sonde

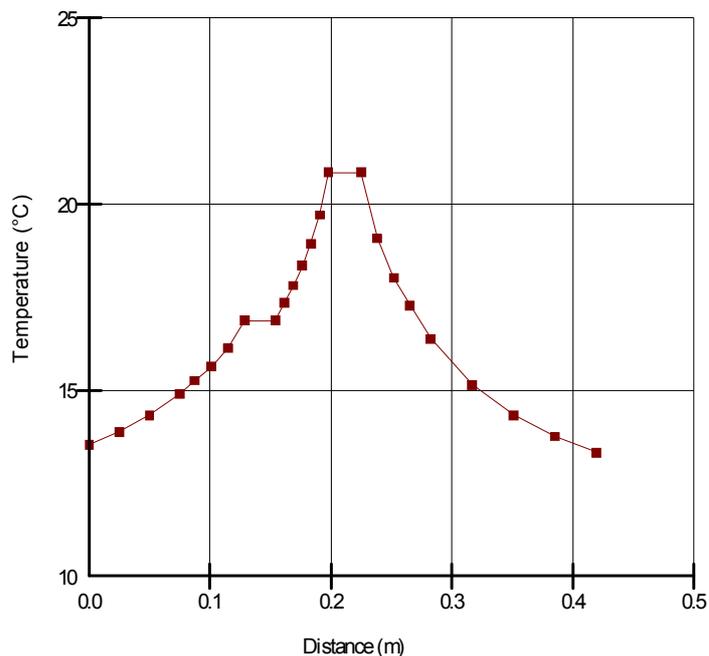


Diagramm 53: Vertikaler Schnitt durch die Sonde bei $I = 1\%$

Tiefe = 40 m; Verpressmaterial Thermocem

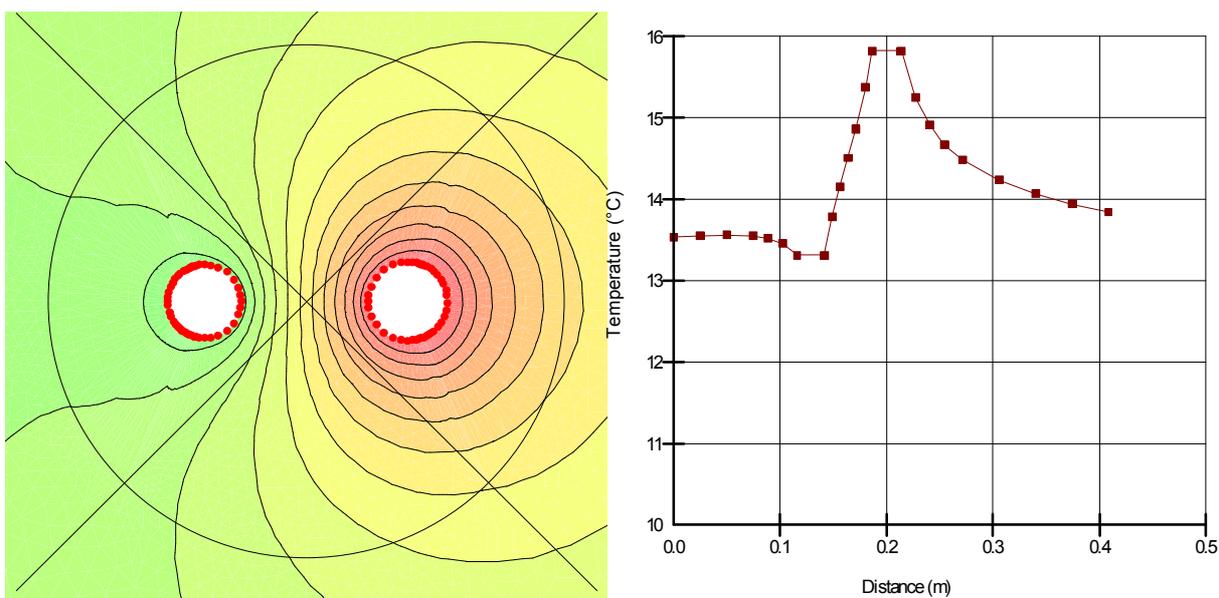


Abb. 44: Temp. im Nahbereich der Sonde

Diagramm 54: Vertikaler Schnitt durch die Sonde

Tiefe = 40 m; Verpressmaterial Zement-Bentonitgemisch

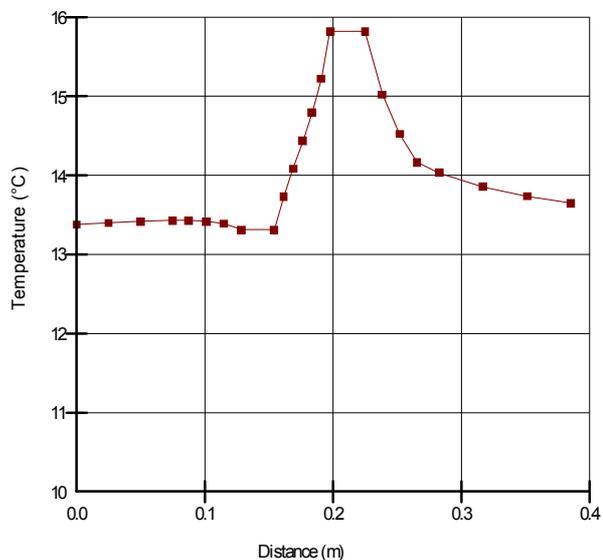
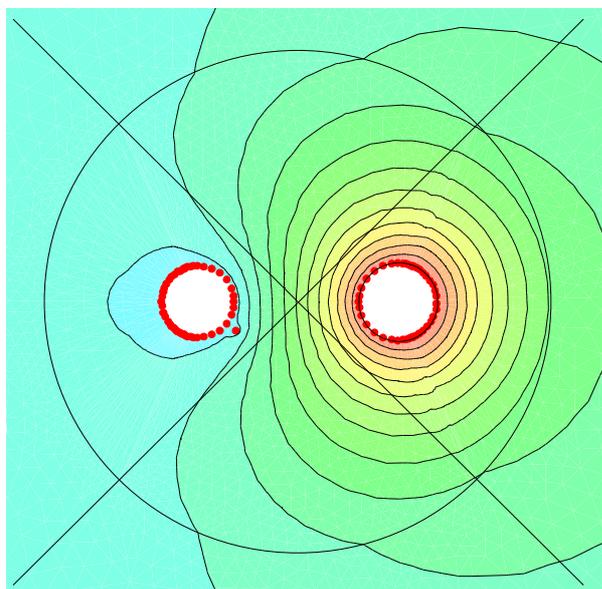


Abb. 45: Temp. im Nahbereich der Sonde

Diagramm 55: Vertikaler Schnitt durch die Sonde

II. Ergebnisse Modell 2

- Betriebsfall I

Tiefe = 20 m; Grundwassergefälle = 0,5 %

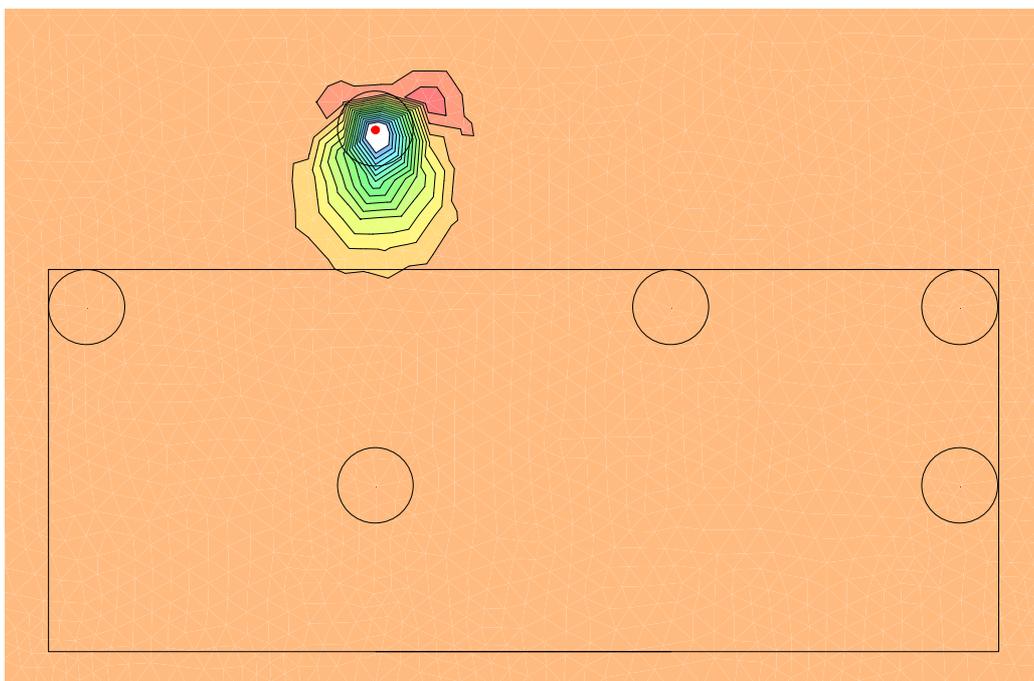


Abbildung 46: Temperaturfahne im Sondenfeld

Tiefe = 20 m; Grundwassergefälle = 1 %

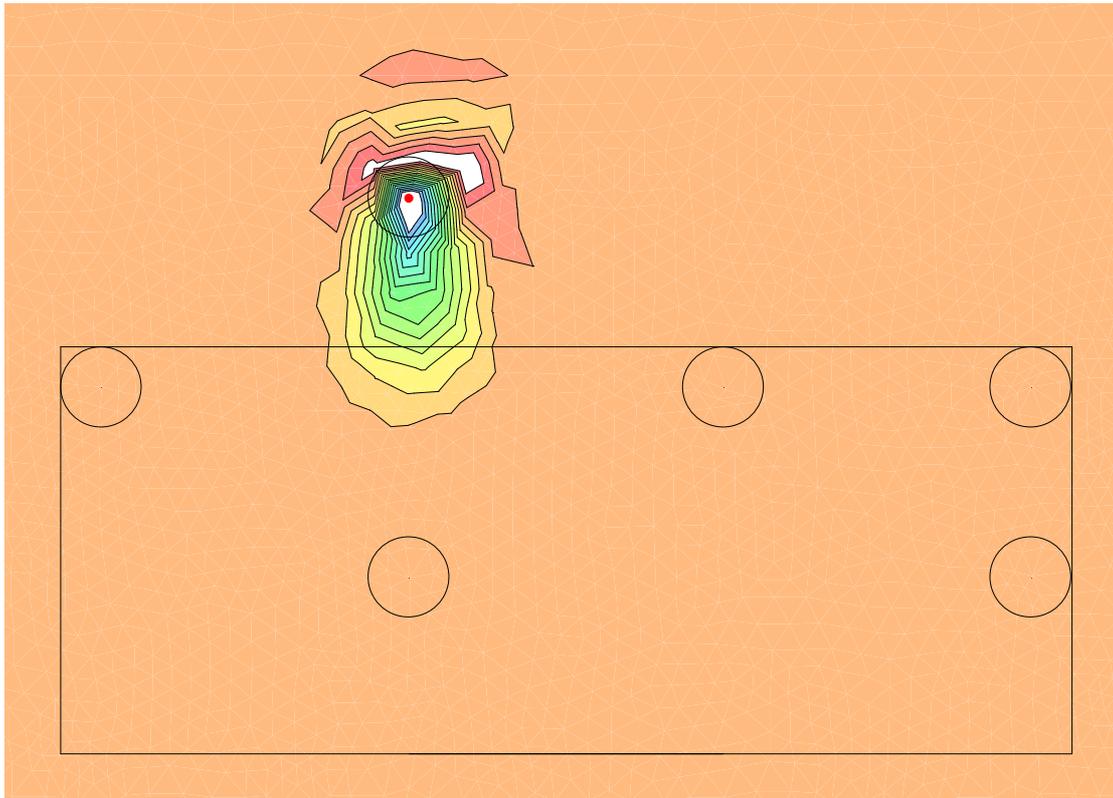


Abbildung 47: Temperaturfahne im Sondenfeld

Tiefe = 40 m; kein Grundwasser

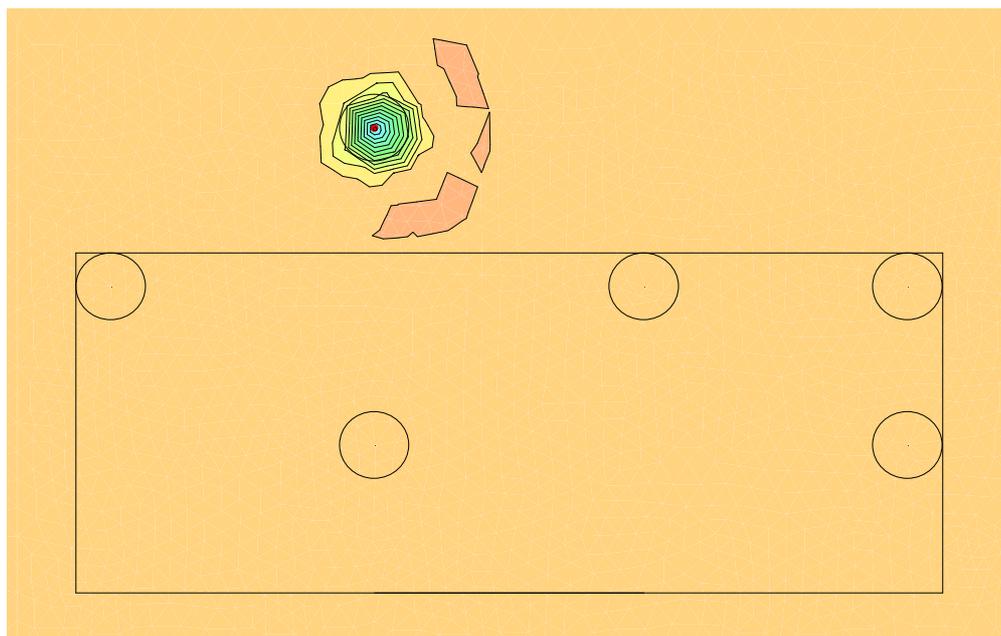


Abbildung 48: Temperaturfahne im Sondenfeld

- Betriebsfall II

Tiefe = 20 m; Grundwassergefälle = 0,5 %

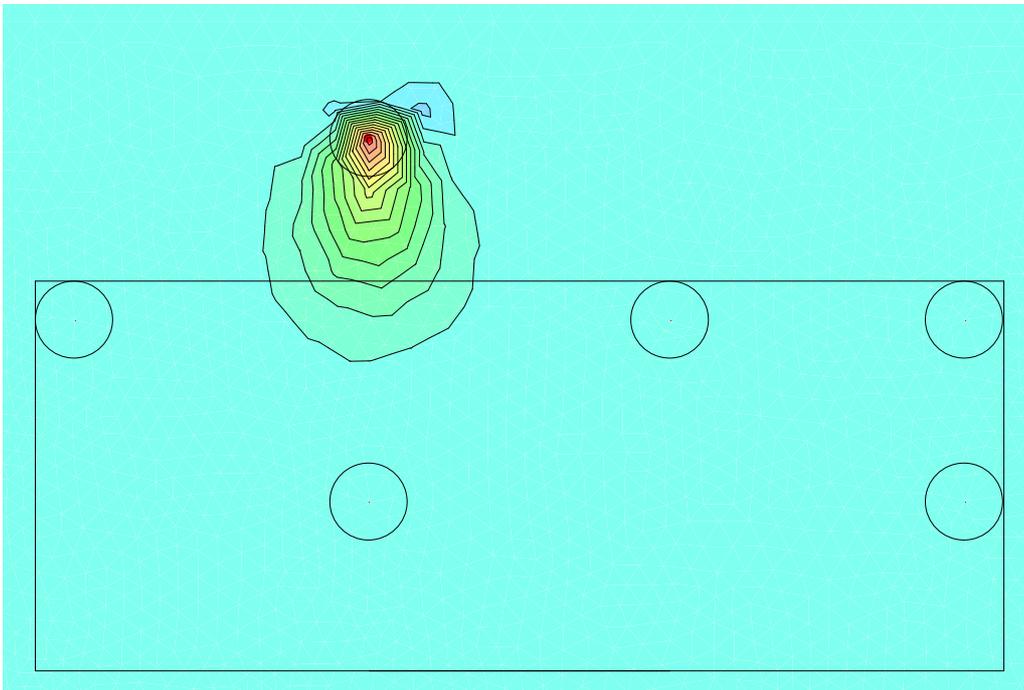


Abbildung 49: Temperaturfahne im Sondenfeld

Tiefe = 20 m; Grundwassergefälle = 1 %

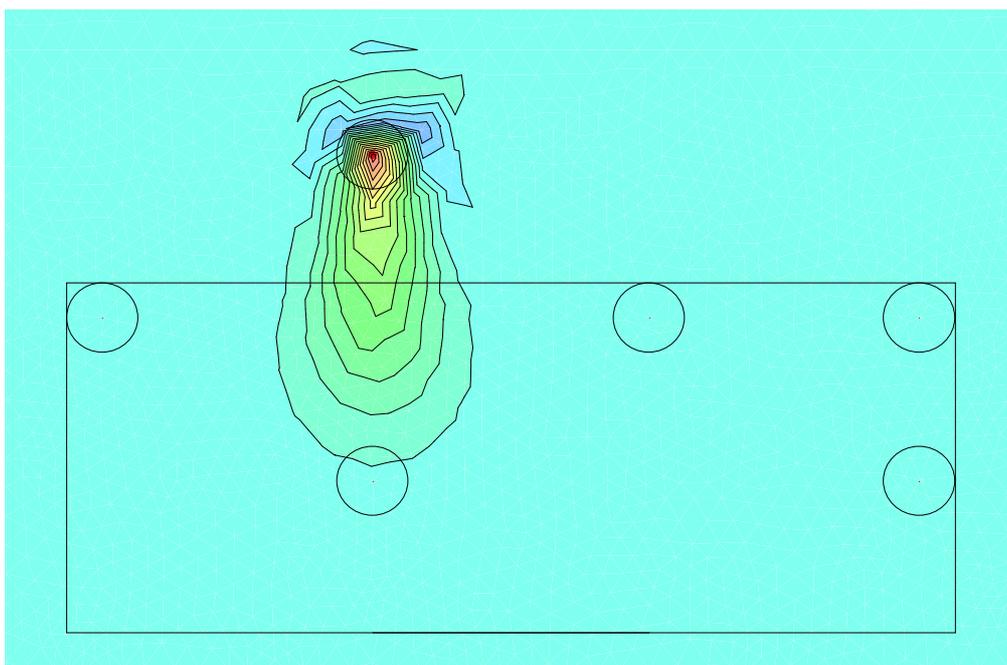


Abbildung 50: Temperaturfahne im Sondenfeld

Tiefe = 40 m; kein Grundwasser

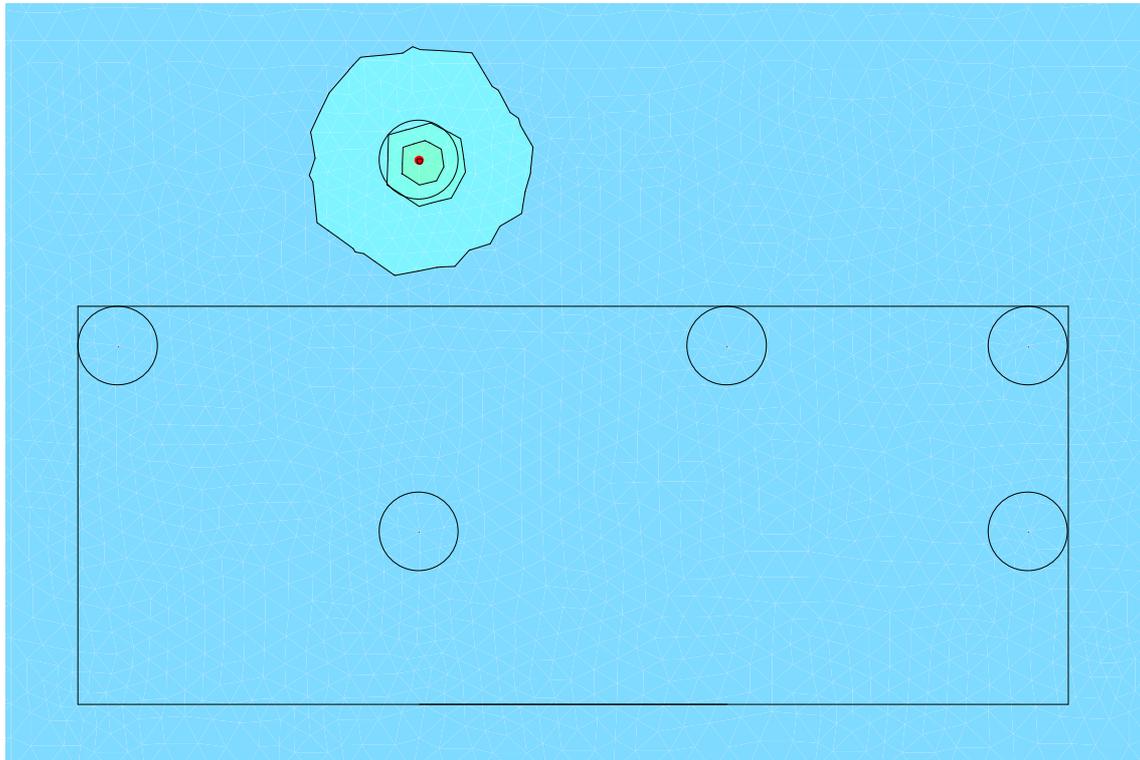


Abbildung 51: Temperaturfahne im Sondenfeld

E) Zusammenfassung und Interpretation der Modellierung

Modellrechnungen auf Basis der Finiten-Element-Methode erfolgten an zwei unterschiedlichen Modellen.

- 1) Modell 1: Nahbereich einer Sonde, Diskretisierung der Sondenverrohrung und des Verpressbereiches sowie des anstehenden Untergrundes, Modellgröße 10 x 15 Meter.
- 2) Modell 2: Gesamtbereich aller fünf Sonden, Diskretisierung der Sonden als Knotenpunkte, Modellgröße 50 x 50 Meter.

Für beide Modelle erfolgte eine thermische Modellierung auf Basis der unter Teilziel 1.2 ermittelten thermischen Kennwerte des Untergrundes sowie des unter Teilziel 3 ermittelten thermischen Parameters der Sondenverpressung. Weiters wurde eine kombinierte hydraulisch-thermische Modellierung auf Basis der in Teilziel 1.2 ermittelten geohydraulischen Kennwerte des Grundwasserleiters durchgeführt.

Als anlagenspezifische Eingangsparameter wurden zwei Betriebsfälle untersucht, einerseits der Wärmeentzug und andererseits die Wärmezufuhr, jeweils in einer Sonde.

Das Ergebnis der Modellrechnungen ist das Temperaturfeld im jeweiligen Modellgebiet unter den gewählten bzw. vorgegebenen Rahmenbedingungen. Zusätzlich wurde bei den Betriebsfällen Wärmeentzug im Modell 1 die über die Randbegrenzung, hier die Sondenverrohrung, fließende Leistung ermittelt. Diese entspricht der Entzugsleistung je Meter Sondenlänge.

In Folge werden für das jeweilige Modell die Ergebnisse kurz zusammengefasst und interpretiert.

1. Modell 1: Nahbereich der Sonde α

Mit Hilfe dieses Modells soll das thermische Verhalten im Nahbereich bzw. in der Sonde untersucht werden. Als Variationsparameter wurden das Grundwassergefälle des quartären Aquifers sowie das Verpressmaterial verwendet.

In den Temperaturfeldern der kombinierten geohydraulisch-geothermischen Modellierung zeigt sich sehr gut der Einfluss des strömenden Grundwassers auf die Temperaturverteilung im Modellgebiet.

Es bilden sich in Grundwasserfließrichtung verschleppte Temperaturfahnen aus, je größer das Grundwassergefälle, desto längere Fahnen bilden sich aus. Auch in der Sonde kommt es zu einer Verzerrung des Temperaturfeldes in Richtung der Grundwasserströmung. Aufgrund des konvektiven Wärmetransportes durch das strömende Grundwasser zeigen sich sehr hohe Entzugsleistungen. Die Entzugsleistungen der Modelle mit reiner Wärmeleitung liegen weit darunter. Bei Wärmezufuhr stellt sich ein sehr ähnliches Bild ein, wiederum sind die in Grundwasserfließrichtung verlaufenden Temperaturfahnen deutlich erkennbar.

Die Variation des Verpressmaterials in Modell 1 zeigt leichte Veränderungen des Temperaturtrichters in der Sonde. Vergleicht man die Temperaturprofile im Vertikalschnitt durch die Sonde, so zeigt das vom thermisch vergüteten Material (Thermocem) einen deutlich flacheren Temperaturtrichter. Aufgrund des höheren Bohrlochwiderstandes ist der sich bei der Bentonit-Zementmischung einstellende Trichter wesentlich steiler. Die Eintrittsverluste in die Sonde, ausgedrückt durch einen Temperaturabfall, sind hier höher. Dieser Umstand schlägt sich auch in der wesentlich geringeren Entzugsleistung nieder.

II. Modell 2: Gesamtes Sondenfeld

In diesem Modell soll die Auswirkung des Wärmeentzuges bzw. der Wärmezufuhr in einer Sonde auf das gesamte Sondenfeld untersucht werden. Als aktive Sonde wird für beide Betriebsfälle die Sonde α verwendet.

Bei der kombinierten geohydraulisch-thermischen Modellierung ist wie bei Modell 1 die Auswirkung des Grundwassers auf die Temperaturverteilung im Sondenfeld gut erkennbar. Aufgrund des geringen Modellierungszeitrahmens von drei Tagen hat sich sicherlich noch kein stationärer Zustand eingestellt, die dargestellten Temperaturfelder sind daher nur als Momentaufnahmen anzusehen. Die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturfahnen der beiden Grundwasserspiegellagen ist jedoch deutlich erkennbar. Bei den leichten Temperaturveränderungen im Anstrombereich zu den Sonden dürfte es sich um Modellfehler aufgrund der Iterationslösung handeln.

Ohne Grundwasserbeeinflussung ist deutlich nur der konduktive Wärmetransport in Form eines radialsymmetrischen Temperaturtrichters erkennbar. Aufgrund des geringen Modellierungszeitraumes ist die Reichweite des Trichters gering.

Teilziel 4.11: Untersuchungen standortspezifischer Faktoren

A) Versuchsanlage bei Herrn Mittermayr in Arnreit

Technische Daten zur Versuchsanlage bei Herrn Mittermayr:

- 100 Meter Sonde 4 * 16 mm bzw. (Di 14 mm)
- WP HP 07 EXC 5,3 kW (Q_0)
- 53 W/lfm Sonde

Die Auswertungen sind in den Diagrammen 56 und 57 ersichtlich. Es zeigt sich deutlich, dass sich das Bohrloch mit der CO₂-Technologie selbstständig regeneriert. Dies ist ein deutlich positives Alleinstellungsmerkmal gegenüber den herkömmlichen Systemen zum Leistungsentzug mittels Tiefenbohrung (z.B. Sole).

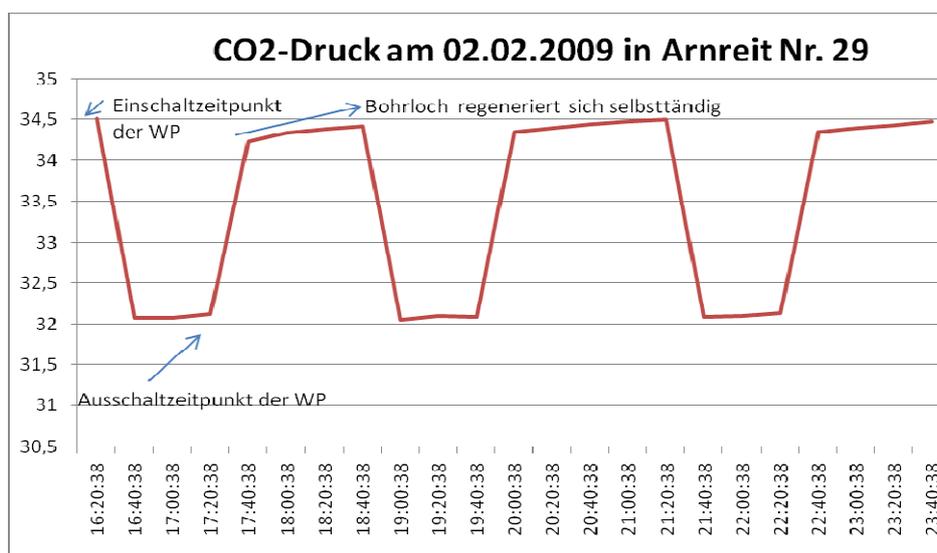


Diagramm 56: Schaltintervalle / Druck (Temperatur) Diagramm

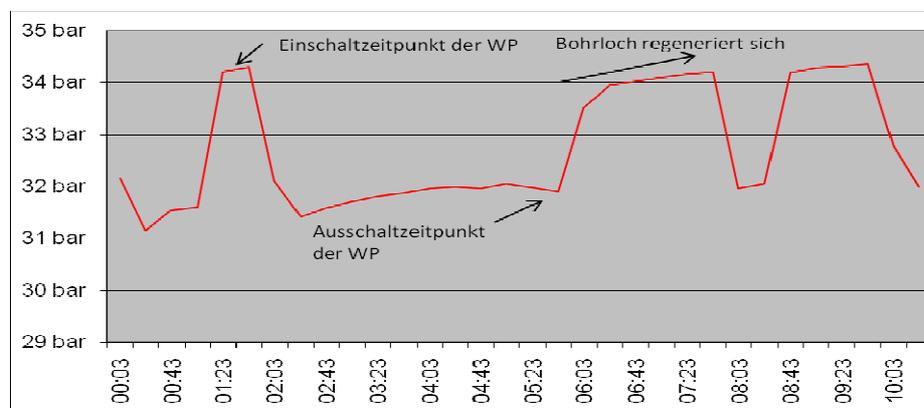


Diagramm 57: Schaltintervalle / Druck (Temperatur) Diagramm

B) Versuchsanlage bei M-TEC Mittermayr in Arnreit

Auch bei einer zweiten Versuchsanlage bei der M-TEC Mittermayr GmbH zeigt sich das gleiche Ergebnis wie bei der Versuchsanlage bei Herrn Mittermayr. Auch im Versuchssondenfeld der M-TEC Mittermayr GmbH regenerieren sich die Bohrlöcher innerhalb von Stunden (siehe Abbildung 51).

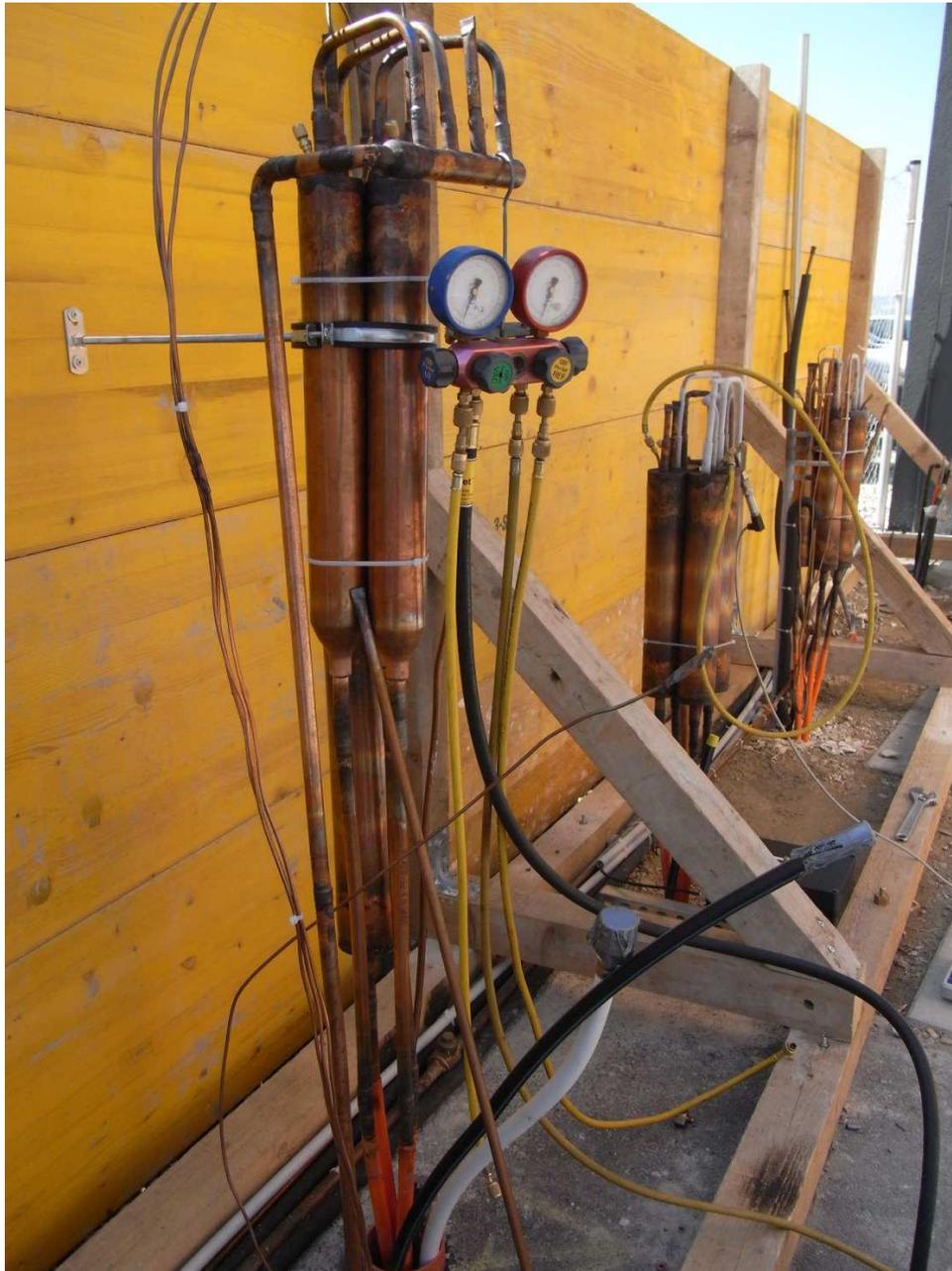


Abbildung 51: Sondenversuchsstand

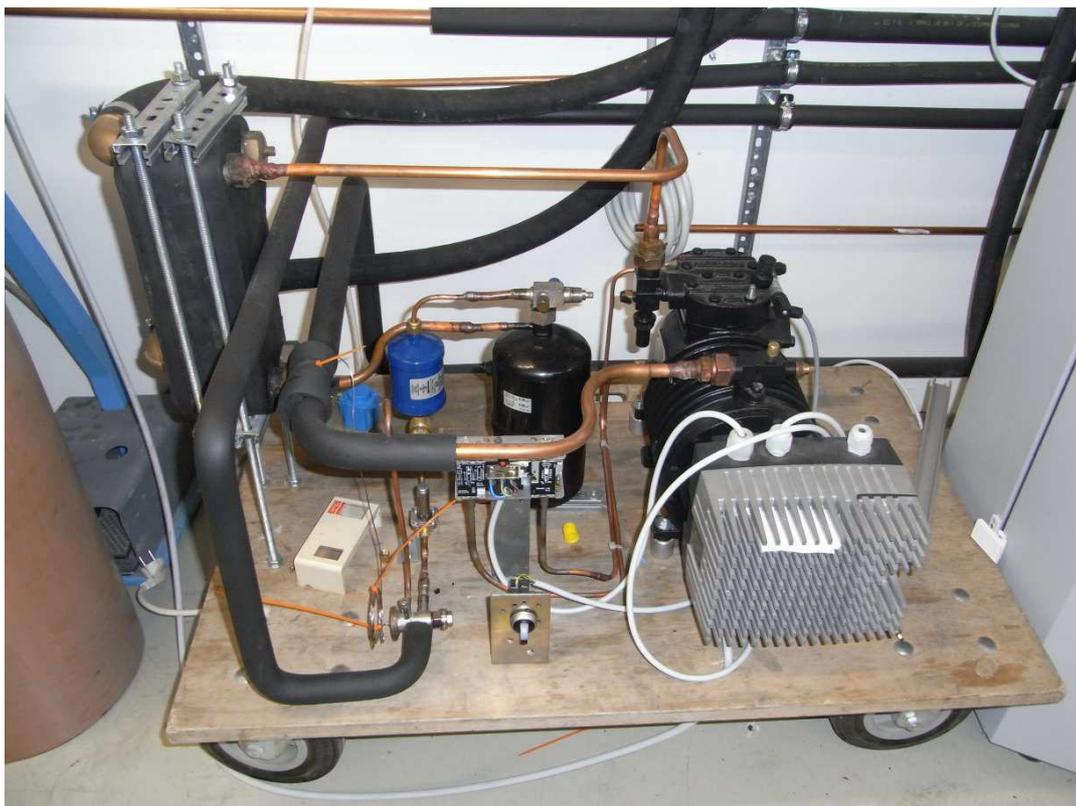


Abbildung 52: Wärmepumpe Eigenbau M-Mittermayr GmbH

Sonde 6 CO2 Druck am 09-04-2009

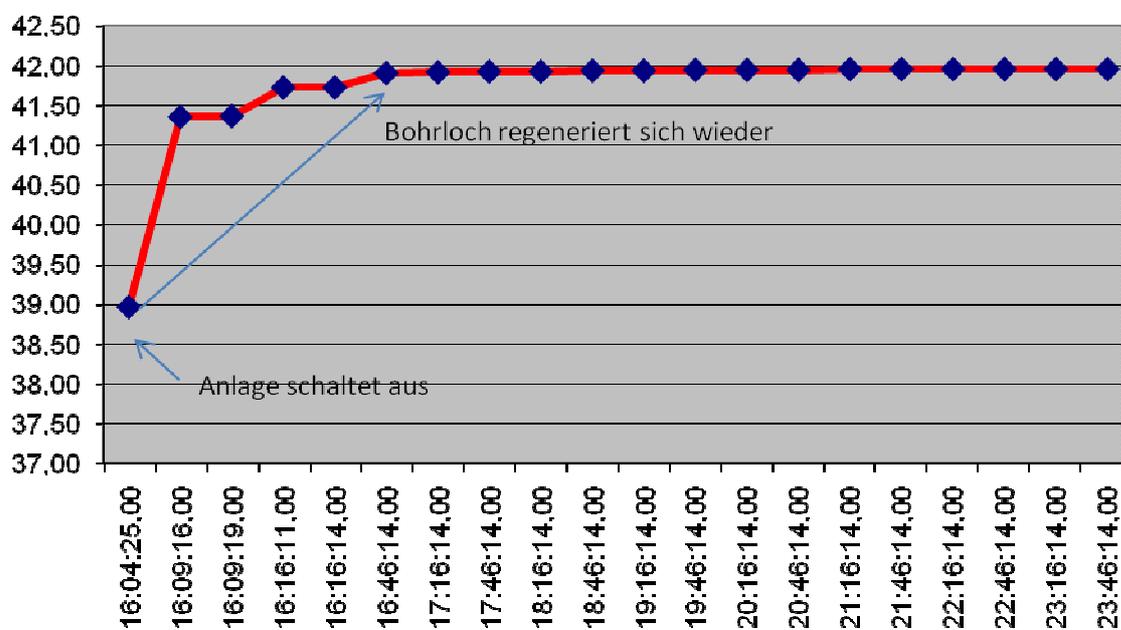


Diagramm 58: Bohrlochregeneration nach Abschaltung der Wärmepumpe

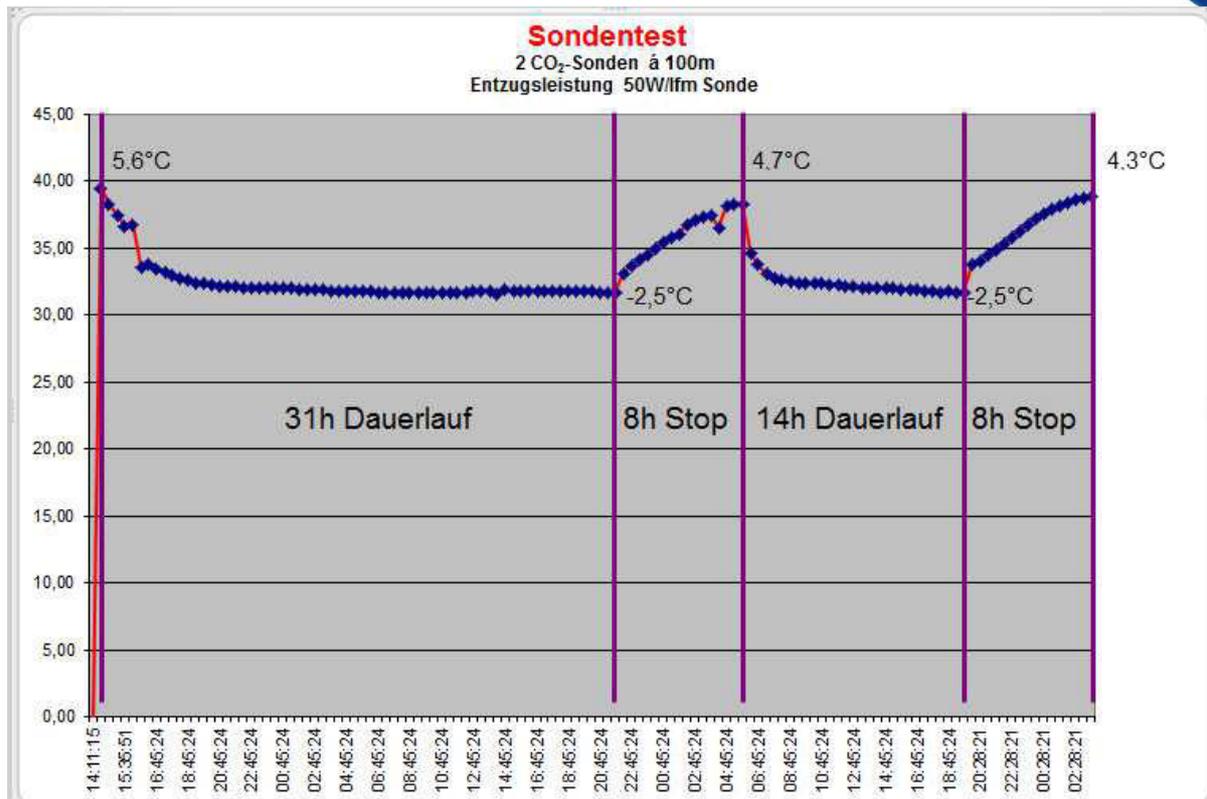


Diagramm 59: Bohrlochregeneration nach Dauerlauf

Arbeitspaket 5: EWS-Vergleiche

Im Arbeitspaket 5 erfolgen Messungen an externen konventionellen Wärmegewinnungsanlagen. Diese Messungen bestehen einerseits aus der Bestimmung des Temperaturprofils direkt in der PE-Verrohrung der Erdwärmefsonde bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Wärmegewinnungsanlage mittels Faseroptischer Temperaturmessung (FOT), sowie aus der kontinuierlichen Aufzeichnung der Betriebsdaten der angeschlossenen Wärmepumpe. Dabei werden folgende Daten kontinuierlich aufgezeichnet:

- Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Sole
- Entzogene- bzw. zugeführte Wärmemenge
- Aufgenommene elektrische Energie

Ziel der Messungen ist einerseits die Erfassung des dynamischen Verhaltens der Erdwärmefsonde bei normalen Betriebsbedingungen mit Hilfe der FOT. Das Verfahren hat sich für diesen Anwendungsbereich sehr bewährt, besonders die raschen Temperaturreaktionen in der Erdwärmefsonde können sehr gut erfasst und dargestellt

werden. Aufgrund der hohen Dynamik des Gesamtsystems Boden-Sonde werden diese Messungen als Kurzzeitmessungen über einige Tage bis maximal einige Wochen durchgeführt.

Andererseits sollen über die kontinuierliche Messung der Betriebsdaten über längere Zeiträume auch Aussagen über das Langzeitverhalten von Erdwärmesondensystemen möglich sein.

Dieses Langzeitmonitoring erfolgt über ein konventionelles Monitoring auf Basis von Einzelsensoren.

A) Identifikation und Auswahl geeigneter Vergleichsanlagen

Die Auswahl geeigneter Anlagen für das Monitoringprogramm erfolgt dabei nach folgenden Kriterien:

- Geologisch-hydrogeologische Gegebenheiten
- Anlagenspezifische Parameter
- Dokumentation der gesamten Anlage

I. Geologisch-hydrogeologische Gegebenheiten

Um den Einfluss der geologischen als auch der hydrogeologischen Gegebenheiten auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesondenanlagen zu bestimmen, werden Anlagen in verschiedenen geologischen Einheiten ausgewählt. Bei den betrachteten geologischen Einheiten lag das Hauptaugenmerk auf dem Kristallin sowie den Sedimenten der Molassezone. Diese beiden Einheiten sind als repräsentativ für die geologischen Gegebenheiten in Österreich anzusehen.

Als weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf den Wirkungsgrad von Erdwärmesonden gelten die hydrogeologischen Verhältnisse am Standort. Der konvektive Wärmetransport durch strömendes Grundwasser ist deutlich höher als die reine Wärmeleitung durch das Gestein. Grundwasserhorizonte sind in ihrer Tiefenlage jedoch meist begrenzt und die Erhöhung der Energieausbeute durch Grundwasser ist daher meist auf kleine Teufenabschnitte der Sonde begrenzt.

II. Anlagenspezifische Parameter

Als anlagenspezifische Parameter gelten in diesem Zusammenhang:

- Wärmeentzugssystem, Sole oder CO₂
- Rückspeicherung von Überschusswärme im Boden
- Heizen und Kühlen über die Erdwärmesonde
- Hybridisierung der Entzugssysteme

Bei der Auswahl der Anlagen wurde besonders auf unterschiedliche Wärmeentzugssysteme und die Möglichkeit der Rückführung von Überschusswärme in den Boden geachtet. Die generelle Vergleichbarkeit der Anlagen steht jedoch immer im Vordergrund.

Nur eine externe Anlage besitzt eine Hybridisierung von Entzugssystemen.

III. Dokumentation der gesamten Anlage

Von großem Vorteil für die Beurteilung und Bewertung der gesamten Wärmegewinnungsanlage ist die bestehende ausreichende Dokumentation der Anlagen. Besonders die Aufnahme der anstehenden geologischen Verhältnisse ist für die Bewertung der Messungen von großer Bedeutung.

B) Messtechnische Ausrüstung der Vergleichsanlagen

Die messtechnische Ausrüstung der Vergleichsanlagen umfasst einerseits die Aufzeichnung der wesentlichen Betriebsdaten der Wärmepumpe.

Dies erfolgt über ein permanentes Monitoring, dabei erfolgt die Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen zur Wärmepumpe, die Zählung der entnommenen bzw. zugeführten Wärmeenergie, sowie die, durch die Wärmepumpe verbrauchte, elektrische Energie.

Zusätzlich dazu erfolgt ein temporäres Monitoring des Temperaturprofils entlang der Erdwärmesonde mittels faseroptischer Temperaturmessung (FOT). Dabei wird das Messkabel, ein zweiadriges Glasfaserkabel, entweder direkt in die Sondenverrohrung eingebaut, oder bei der Sondenherstellung über die gesamte Sondenlänge mit eingebaut.

Bei den Soleanlagen hat sich der nachträgliche Einbau in den Solekreislauf gut bewährt. Die Erfassung der Temperatur in Abhängigkeit von der Tiefe erfolgt dabei direkt in der Sole.

Bei CO₂-Anlagen wird entweder das Messkabel außen an der Sonde befestigt und mit eingebaut, oder Blindrohre im Sondenquerschnitt angeordnet über welche im späteren Betrieb das Messkabel eingeführt werden kann.

1. Messparameter und Messanordnung

Die maximale örtliche Auflösung liegt bei diesem Messsystem bei 0.5 m Kabellänge, die bei den Untersuchungen der Anlagen auch verwendet wurde.

Die zeitliche Auflösung ist abhängig von der eingestellten Messdauer des Messgeräts selbst und dem erwünschten Auflösungsvermögen. Bei den untersuchten Anlagen variiert die zeitliche Auflösung zwischen 5 und 15 Minuten.

Beim Einbau direkt in die Sondenrohre wurde ein T-Stück mit Quetschverschraubung am Sondenkopf eingebaut (siehe Abb. 53).



Abbildung 53: Sole - Sondenkopf mit Glasfasermesskabel

Das Glasfasermesskabel ließ sich leicht einführen, auch horizontale Anbindeleitungen stellten kein Problem dar. Durch das Eigengewicht glitt ab etwa 20 Meter Sondentiefe das Messkabel von alleine in die Sonde, ein Schieben war nicht mehr notwendig. Beim Erreichen des Sondenfußes wurde das Kabel mit Hilfe der Quetschverschraubung fixiert und eingedichtet. Somit war sichergestellt, dass sich das Kabel freihängend in der Sonde befindet.

II. Verwendete Messkabel

Bei den bis dato ausgeführten Messungen wurden zwei unterschiedliche Glasfasermesskabel verwendet. In Abbildung 54 ist exemplarisch der Aufbau des Kabels der Firma Brugg dargestellt. Dieses Kabel besitzt einen sehr starken mechanischen Schutz rund um die Glasfasern, bestehend aus einem Stahldrahtgeflecht. Daraus ergibt sich jedoch eine hohe Steifigkeit und damit verbunden eine schwierigere Einbringbarkeit in die Sondenverrohrung. Das Kabel der Firma Brugg wurde daher nur bei Messungen der Anlage Neumarkt verwendet, alle anderen Messungen erfolgten mit einem wesentlich flexibleren Kabel der Firma Leoni.

Beide Fabrikate beinhalten jeweils zwei optische Fasern, die getrennt voneinander zur Temperaturmessung verwendet werden.

Die Kabel sind leicht zu handhaben und auf üblichen Kabeltrommeln zum Transport aufgewickelt. Sie sind biegsam, gegen Knicken sind sie jedoch sehr empfindlich und können Schaden davon tragen.

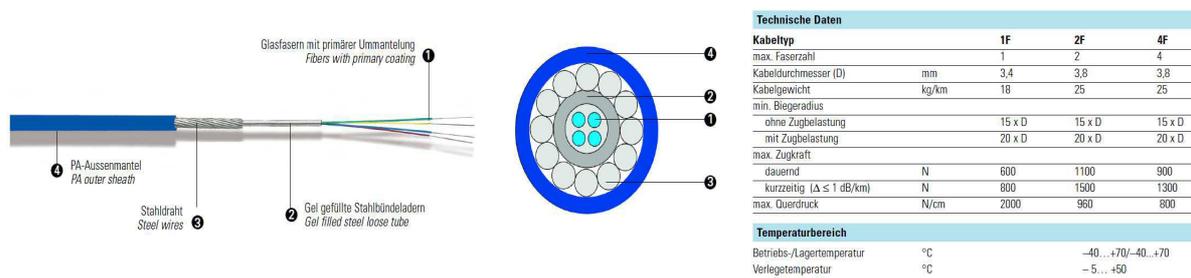


Abbildung 54: Glasfaserkabel der Firma Brugg

III. Kalibrierung der Glasfasermesskabel

Das Messgerät DTS der Firma Sensortran muss auf die verwendeten Glasfasermesskabel kalibriert werden. Die dazu benötigte Software ist bereits am Gerät installiert.

Der Hersteller gibt die Vorgangsweise bei der Kalibrierung im Manual bereits vor.

Er empfiehlt dazu zwei überprüfbare, von der Zimmertemperatur unterschiedliche, Temperaturniveaus. Wie in Abb. 55 ersichtlich sind das ein mit Eis gekühltes Wasserbad und ein genau temperierbarer Ofen.

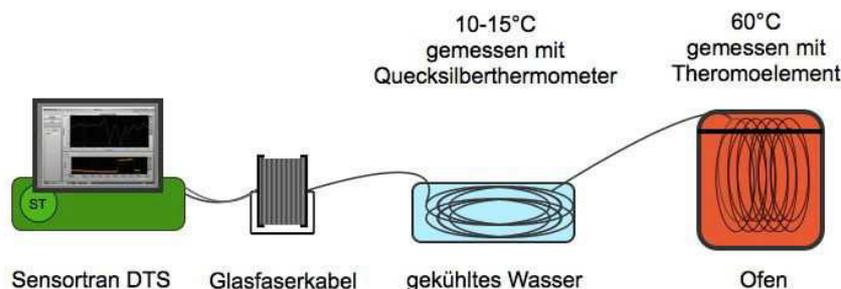


Abbildung 55: Messanordnung bei der Kabelkalibrierung

Dabei wird ein etwa 20 Meter langes Kabelstück über das Wasserbad bzw. den Ofen auf das entsprechende Temperaturniveau gebracht und mittels eines geeichten Thermometers die Kalibriertemperatur genau bestimmt.

C) Beschreibung der untersuchten Anlagen

I. CO₂-Sonden

Anlage Neumarkt/Mühlkreis

- **Lagebeschreibung**

Die untersuchte Anlage liegt auf einer Seehöhe von 630 m ü. A., ca. 1 km südöstlich des Ortszentrums von Neumarkt im Mühlkreis im Mühlviertel/Oberösterreich.

Die beiden CO₂-Erdwärmefensonden befinden sich auf dem Grundstück 119/2 der KG Neumarkt. Die politische Gemeinde ist Neumarkt im Mühlkreis im Bezirk Freistadt.

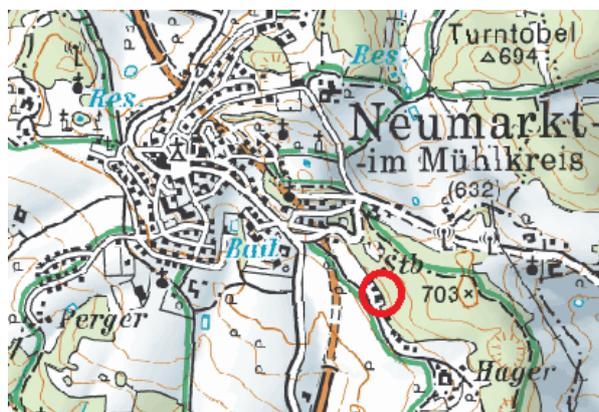


Abbildung 56: Übersichtsplan Neumarkt

Die zwei CO₂ Erdwärmetiefensonden wurden im Garten des Grundstücks abgeteuft. Der horizontale Abstand zwischen den beiden Sonden beträgt 18 m. Auf demselben Grundstück befindet sich ein vom Eigentümer benutzter Trink- und Nutzwasserbrunnen. Der Abstand zu den beiden Sonden beträgt 15 bzw. 33 m. Die Übersicht (Abb. 57) lässt die Hanglage erkennen, im rechten Bild (Abb. 58) sind die Erdwärmesonden mit gelben Punkten, der Brunnen mit einem roten Punkt markiert.



Abbildung 57: Orthofoto Neumarkt



Abbildung 58: Lage der Sonde - Neumarkt

- **Geologie und Hydrogeologie**

Die Anlage befindet sich im Kristallin der Böhmisches Masse, laut geologischer Karte (Abb.: 59) ist der Standort in einer Vermischungszone von Weinsberger Granit zu Migmagranit, Engerwitzdorfer Granit und Diatexit situiert.

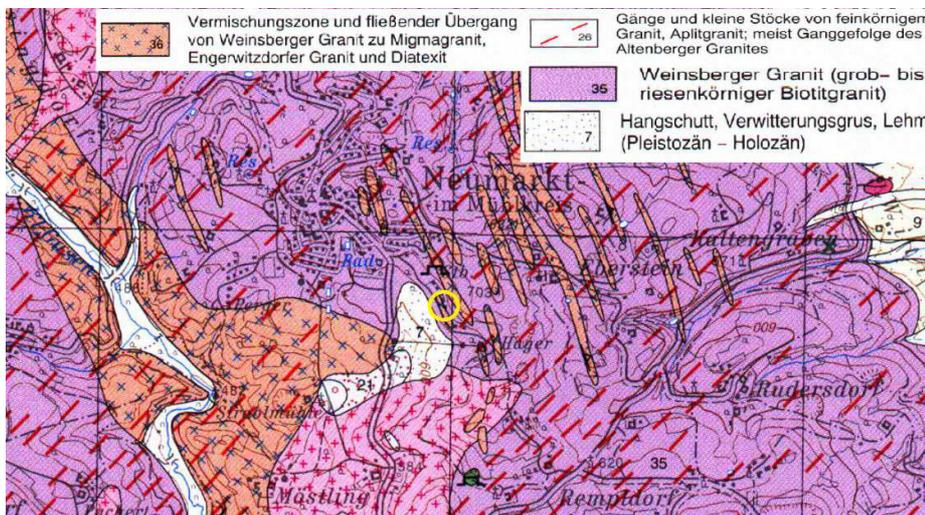


Abbildung 59: Geologische Karte Neumarkt/Mühlkreis

Weinsberger Granit ist ein grob- bis riesenkörniger, porphyrischer Granit. Charakteristisch sind die dicktafeligen, nach dem Karlsbadergesetz verzwilligten Alkalifeldspateinsprenglinge, die nicht selten 10 bis 18 cm Länge erreichen.

Bei der Betrachtung der Bohrprofile kann man die geologischen Verhältnisse folgend beschreiben:

Bis zu einer Tiefe von etwa 4 m ist das Kristallin mit einer lehmig, grusigen Verwitterungsdecke samt Humusschicht überlagert. Danach folgt ein klüftig, hartes Festgestein mit großer Tiefenerstreckung, dass schon nach wenigen Metern standfest ist. Wie aus den Bohrprofilen ersichtlich ist, handelt es sich um eine Abfolge aus braunem, grauem, teils grünem bis schwarz-weißem Granit.

Die Grundwasserverhältnisse sind durch den schon bestehenden Hausbrunnen (DN115 mm, Brunnentiefe: 30 m, hergestellt: 1999) gut bekannt. Der Grundwasserkörper (wassererfüllter Kluftaquifer) wurde in einer Tiefe von 16 m unter GOK im gespannten Zustand angetroffen. Der Ruhewasserspiegel liegt bei etwa 2,8-8,5 m unter GOK. Die Dotierung dieses Kluftaquifers erfolgt durch Infiltration von Niederschlagswasser. Durch Temperaturmessungen des Betreibers wurde eine Grundwassertemperatur zwischen 8,8 °C und 10 °C beobachtet.

- **Anlagenbeschreibung**

Herstellung der Sonden

Die beiden Sondenbohrungen wurden im Rotationstrockenbohrverfahren mit einer Imlochhammerbohrung mit Luftspülung bis in 100 m Tiefe abgeteuft. Der Durchmesser beträgt bei beiden Bohrungen DN150 mm. Um die Standsicherheit des Bohrlochs in der Verwitterungsdecke zu gewährleisten, wurde ein Sperrrohr DN190 bis zu einer Tiefe von 6 m (Sonde 1) bzw. 5 m (Sonde 2) eingesetzt und einzementiert.

Die Besonderheit bei dieser Anlage besteht darin, dass Sonde 1 als Brunnen, d.h. ohne Ringraumverpressung, und Sonde 2 wie herkömmliche Erdwärmesonden mit Verpressung des Ringraumes (Thermocem) hergestellt wurden. Die Ausführung der Sonde 1 als Brunnen ist unüblich und generell nur im standfesten Gebirge möglich. Weiters müssen vorab die hydrogeologischen Verhältnisse genau bekannt sein, um einen Kurzschluss von Aquiferen zu vermeiden.

Anlagedaten und Bemessungswerte

In der Tabelle 26 sind die wichtigsten Anlagedaten ersichtlich.

| | |
|-----------------------------|--------------------|
| beheizte Fläche | 233 m ² |
| Heizsystem | Radiatoren |
| Bausubstanz | Altbau |
| erforderliche Heizleistung | 10,75 kW |
| Vorlauftemperatur | 50 °C |
| Betriebsstunden | 1800 h |
| angenommene Entzugsleistung | 44 W/lfm |
| Wärmepumpe | Heliotherm |

Tabelle 26: Bemessungswerte Neumarkt

Die verwendete Wärmepumpe der Firma Heliotherm ist frequenzgesteuert und besitzt ein internes Modem zur Übertragung der gerätespezifischen Messdaten. Als Wärmequelle dienen 2 CO₂-Erdwärmefischensonden. Die technischen Daten sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

| Wärmepumpe | | CO ₂ -Sonden | |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------|-----------|
| Fabrikat/Type | HP12E-M-Web | Anzahl Bohrungen | 2 |
| Kältemittel | R410a | Tiefe/Bohrung | 100 m |
| Füllmenge/Kältemittel | 4,5-5,5 kg | Durchmesser Bohrung | 150 mm |
| Bauart Verdichter | Scroll | Anzahl Sondenrohre/Bohrung | 4 |
| Kompressoröl | Esteröl | Füllmenge CO ₂ /Sondenrohr | 2,5 kg |
| Füllmenge/Kompressoröl | 1,8 l | Rohrdurchmesser Sonde | 18 mm |
| Betriebsweise | monovalent | Rohrwanddicke | 1 mm |
| Sperrzeit/EVU | 1 h | Werkstoff Sondenrohr | SF-CU F22 |
| Leistungsaufnahme bei V5/W50 | 3,98 kW | Wandstärke Hüllrohr | 1 mm |
| Kälteleistung bei V5/W50 | 8,19 kW | Werkstoff Hüllrohr | PE-HD |
| Heizleistung bei V5/W50 | 12,18 kW | Verpressmaterial Sonde 2 | Thermocem |
| Leistungszahl bei V5/W50 | 3,06 | | |

Tabelle 27: Anlagedaten Neumarkt

- **Durchgeführte Messungen**

In den Heizperioden 2009/2010 sowie 2010/2011 erfolgte die Aufzeichnung von Betriebsdaten durch den Eigentümer, teils wurden die Daten auch über das Modem der Wärmepumpe ausgelesen.

Im Jahr **2009** erfolgten weiters Messungen mittels FOT bei folgenden Betriebszuständen der Wärmequellenanlage:

Betriebszustand 1: verpresste Sonde 2 im Volllastzustand, unverpresste Sonde 1 im Ruhezustand

Betriebszeit Sonde 2: 21.07.2009 17.21Uhr –
25.07.2009 12.13 Uhr

Betriebszustand 2: unverpresste Sonde 1 im Volllastzustand, verpresste Sonde 2 im Ruhezustand

Betriebszeit Sonde 1: 26.07.2009 21.30 Uhr –
31.07.2009 11.30 Uhr

Betriebszustand 3: beide Sonden im Ruhezustand, Grundwasser-Umwälzpumpe in Betrieb

Betriebszeit UW-Pumpe: 09.08.2009 17.45 Uhr –
10.08.2009 17.00 Uhr

Betriebszustand 4: unverpresste Sonde 1 im Volllastzustand mit Umwälzung des Grundwassers, verpresste Sonde 2 im Ruhezustand

Betriebszeit Sonde 1: 22.08.2009 12.02 Uhr –
27.08.2009 16.53 Uhr

Im Jahr **2011** erfolgten wiederum Messungen mittels FOT bei folgenden Betriebszuständen:

Betriebszustand 1: normaler Heizbetrieb, Wärmeentzug aus beiden Sonden

Betriebszeit beider Sonden: 28.02.2011 15.00 Uhr –
28.02.2011 16.22 Uhr

Betriebszustand 2: unverpresste Sonde 1 im Volllastzustand, verpresste Sonde 2 im Ruhezustand, Wasserzirkulation in Sonde 1

Betriebszeit Sonde 1: 28.02.2011 17.03 Uhr –
03.03.2011 07.24 Uhr

Betriebszustand 3: beide Sonden in Betrieb, Wasserzirkulation in Sonde 1

Betriebszeit beider Sonden: 03.03.2011 09.00 Uhr–
11.03.2011 21:00 Uhr

Betriebszustand 4: beide Sonden in Betrieb, keine Wasserzirkulation in Sonde 1

Betriebszeit beider Sonden: 11.03.2011 21.00 Uhr –

18.03.2011 21:00 Uhr

Durch die Umwälzung des Grundwassers in der Sonde 1 (Brunnen) wird eine erzwungene Zirkulation des Grundwassers im Ringraum induziert. Diese soll den konvektiven Wärmetransport über das Grundwasser erhöhen und somit zusätzlich Wärmeenergie zur Sonde bringen. Ziel der FOT Messungen war es daher, auch diesen Mechanismus genauer zu untersuchen.

Bei der Umwälzung des Grundwassers kam eine herkömmliche Gartenpumpe zur Verwendung. Dabei wurde das Grundwasser im oberen Sondenbereich durch ein Rohr aus dem Sohlbereich entnommen und in den oberflächennahen Ringraum gepumpt.

Anlage Arnreit/Mühlkreis

- **Lagebeschreibung**

Die untersuchte Anlage liegt auf einer Seehöhe von 601 m ü. A., ca. 500 m südlich des Ortszentrums von Arnreit im Mühlkreis. Die vier CO₂-Erdwärmetiefensonden befinden sich auf dem Grundstück 24/2 der KG Arnreit. Die politische Gemeinde ist Arnreit im Mühlkreis im Bezirk Rohrbach.



Abbildung 60: Orthofoto Arnreit

Die vier CO₂-Erdwärmetiefensonden wurden auf der Rückseite des Firmengebäudes abgeteuft.

Die Anlage befindet sich im Kristallin der Böhmisches Masse. Laut geologischer Karte (Abbildung 62) liegt der Standort im Engerwitzdorfer Granit. Das Bohrprofil zeigt verwitterten blauen Granit.

Fünf Meter unter Gelände wurde Grundwasser angetroffen (ca. 5 l/min).

- **Anlagenbeschreibung**

Die vier Sonden-Bohrungen wurden im Rotationstrockenbohrverfahren mit einer Imlochhammerbohrung mit Luftspülung bis in 60/80 m Tiefe abgeteuft. Der Durchmesser beträgt bei beiden Bohrungen DN115 mm.

Die Besonderheit bei dem 60 m Sonden-Paar besteht darin, dass Sonde 1 mit dem Verpressmaterial Stüwa-Däm, und die Sonde 2 mit Bentonit-Zement-Gemisch verpresst wurde. Dadurch sollte festgestellt werden, welcher Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit beider Verpressmaterialien gemessen werden kann.

Das zweite Sonden-Paar 3 und 4, beide mit einer Endteufe von 80 m, unterscheiden sich insofern, als Sonde 3 senkrecht und Sonde 4 in einem Winkel von ca. 7° abgeteuft wurden. Hier sollte auch festgestellt werden, welche Sonde sich besser verhält.

Anlagedaten und Bemessungswerte

Da es sich bei der Anlage der M-TEC Energie.Innovativ GmbH um ein Sondenversuchsfeld handelt, wurde die entzogene Leistung zur Heizungsunterstützung in die Fußbodenheizung der Lagerhalle mit eingespeist.

| | |
|----------------------------|--------------------------|
| Beheizte Fläche | ca. 600 m ² |
| Heizsystem | Industriefußbodenheizung |
| Bausubstanz | Lagerhalle |
| Erforderliche Heizleistung | 30 kW |
| Vorlauftemperatur | 30 °C |
| Betriebsstunden | Meßzeitraum |
| Entnommene Entzugsleistung | 48 W/lfm |
| Wärmepumpe | Heliotherm |

Tabelle 28: Bemessungswerte Anreit

Die verwendete Wärmepumpe ist eine Standard-Split-Wärmepumpe.

| Wärmepumpe | | CO ₂ -Sonden | | CO ₂ -Sonden | |
|-------------------------------|------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|-----------|
| Fabrikat | HP07E-WEB | Anzahl Bohrungen | 2 | Anzahl Bohrungen | 2 |
| Kältemittel | R410a | Tiefe Bohrung | 60 m | Tiefe Bohrung | 80 m |
| Füllmenge | 6,5 kg | Durchmesser | 115 mm | Durchmesser | 115 mm |
| Bauart Verdichter | Scroll | Anzahl Sondenrohre | 4 | Anzahl Sondenrohre | 4 |
| Kompressoröl | Esteröl | Füllmenge CO ₂ | 1,8 kg | Füllmenge CO ₂ | 1,8 kg |
| Betriebsweise | Monovalent | Rohrwanddicke | 1 mm | Rohrwanddicke | 1 mm |
| Sperrzeit / EVU | 0h | Werkstoff Sondenrohr | SF-CU F22 | Werkstoff Sondenrohr | SF-CU F22 |
| Leistungsaufnahme bei V-5/W30 | 1,23 kW | Wandstärke Hüllrohr | 1 mm | Wandstärke Hüllrohr | 1 mm |
| Kälteleistung bei V-5/W30 | 5,22 kW | Werkstoff Hüllrohr | PE-HD | Werkstoff Hüllrohr | PE-HD |
| Heizleistung bei V-5/W30 | 6,45 kW | Verpressmaterial | Stüwa-Däm/Bentonit | Verpressmaterial | Bentonit |
| Leistungszahl V-5/W30 | 5,24 | | | | |

Tabelle 29: Anlagendaten Anreit

II. Sole-Sonden

Anlage Sankt Florian - Molasse

- **Lagebeschreibung**

Die untersuchte Anlage liegt auf einer Seehöhe von 265 m ü. A., mitten im Ortskern von Sankt Florian.

Die beiden Erdwärmetiefensonden befinden sich auf dem Grundstück 661/5 der KG Sankt Florian. Die politische Gemeinde ist Sankt Florian im Bezirk Linz-Land.

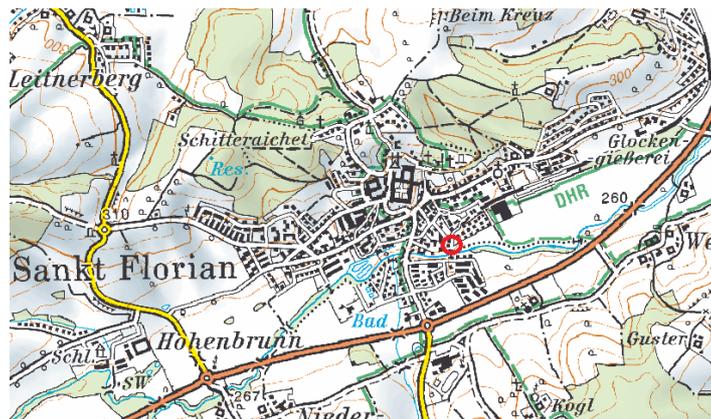


Abbildung 63: Übersichtsplan Sankt Florian



Abbildung 64: Orthofoto m. Höhenschichtlinien, Abbildung 65: Lage d. Erdwärmetiefensonden

- **Geologie und Hydrogeologie**

Die Anlage befindet sich in der Molassezone. Laut geologischer Karte trifft man am Standort auf ältere Deckenschotter mit Lehm/Löss-Überdeckung aus dem Pleistozän bis Oberstem Neogen (Günz) mit darunterliegendem Robulus-Schlier aus dem Unteren Ottnangium.

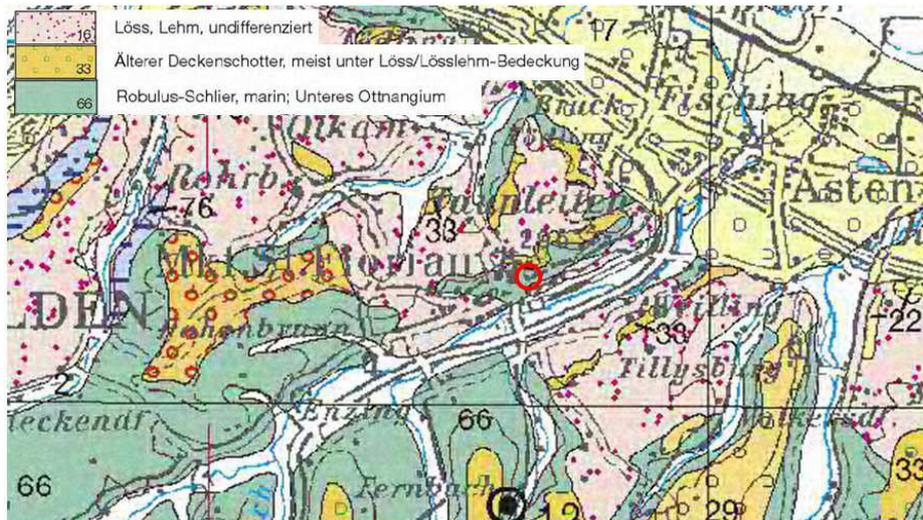


Abbildung 66: geologische Karte Sankt Florian

Robulus Schlier

Bei der Betrachtung der Bohrprofile (siehe Anhang) lässt sich Gleiches erkennen. Nach einer Deckschicht aus schluffig-tonigem Material folgt eine Mittelkiesschicht mit einer Mächtigkeit von etwa 4 m. Ab einer Tiefe von etwa 9 m unter GOK besteht der Untergrund aus blauem Schlier, der nur in einer Tiefe von etwa 28 m für wenige cm verfestigt ist (Flinzstein).

Schlier ist eine lokale Ausdrucksform Oberösterreichs für einen feinschluffigen Mergel.

Bei der Herstellung der Bohrungen wurde ein starker Wasserandrang von 60 l/min. festgestellt.

- **Anlagenbeschreibung**

Herstellung der Sonden

Die beiden Erdwärmefensonden wurden mittels Rotationstrockenbohrung je 100 m abgeteuft. Eine Hilfsverrohrung DN140 mm besteht bei beiden Bohrungen bis zu einer Tiefe von je 12 m. Danach misst die Bohrung einen Durchmesser von 115 mm. Die Besonderheit dieser Anlage besteht in der Verwendung unterschiedlicher Verpressmaterialien. Nach dem Einbau der Duplex-Solesonde DN32 mm wurde Sonde 1 mit einer Zement-Bentonit Suspension (Mischungsverhältnis 5:1) und Sonde 2 mit dem Fertigprodukt Thermocem verpresst. Sonde 1 ist außerdem mit einem Messrohr DN 25 mm ausgestattet.

Anlagendaten und Bemessungswerte

| | |
|-----------------------------|--|
| beheizte Fläche | 400 m ² |
| Heizsystem | Fussbodenheizung / -kühlung |
| Bausubstanz | 150 m ² saniert 250 m ² Neu |
| erforderliche Heizleistung | 12 kW |
| Vorlauftemperatur | 35 °C |
| Betriebsstunden | Mo-Do 6:00-19:00h Fr 6:00-13:00h |
| angenommene Entzugsleistung | 10,3 kW |
| Wärmepumpe | Vaillant |

Tabelle 30: Bemessungswerte Sankt Florian

| Wärmepumpe | | Sole-Sonden | |
|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Fabrikat/Type | geoTherm VWS 11 E | Anzahl Bohrungen | 2 |
| Kältemittel | R 404 A | Tiefe/Bohrung | 100 m |
| Füllmenge/Kältemittel | 1,7 kg | Durchmesser Bohrung | 125 mm |
| Bauart Verdichter | Scroll | Anzahl Sondenrohre/Bohrung | 2 VL, 2 RL |
| Kompressoröl | Polyesteröl Mobil EAL Arctic 22CC | Sonden-Rohrdurchmesser mm | DN 32 PN 16 |
| Füllmenge/Kompressoröl | 1l | Rohrwanddicke mm | 2,9 mm |
| Betriebsweise | Monovalent | Werkstoff Sondenrohr | PE-HD Sondenrohr |
| Sperrzeit/EVU | 1 h | Frostschutzmittelgemisch Sole:Wasser | 30:70 |
| Leistungsaufnahme bei S0/W35 | 2,2 kW | Frostschutzmittel | UCOTHERM PGA |
| Kälteleistung bei S0/W35 | 11,5 kW | Verpressmaterial Sonde 1 | Bentonit:Zement: 5:1 |
| Heizleistung bei S0/W35 | 10,3 kW | Verpressmaterial Sonde 2 | ThermoCem |
| Leistungszahl bei S0/W35 | 4,8 | | |

Tabelle 31: Anlagedaten Sankt Florian

Anlage Amstetten - Molasse

- **Lagebeschreibung**

Die Anlage befindet sich im Süden der Stadt Amstetten. Sie liegt am Grundstück 1126/25 in der KG Amstetten, Gemeinde Amstetten. Der politische Bezirk ist Amstetten in Niederösterreich.

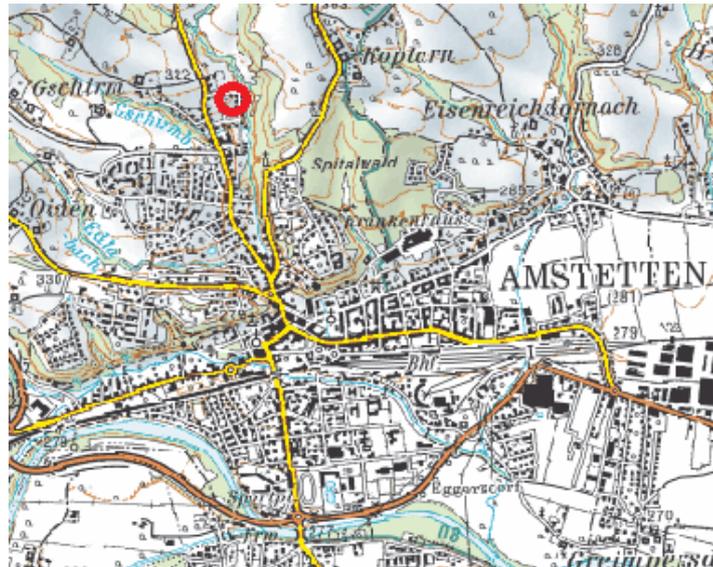


Abbildung 67: Lageplan Amstetten

Wie in Abbildung 68 erkennbar, ist die Erdwärmefiefensonde etwa 4 m vom Gebäude entfernt. Die Sonde führt direkt ohne Schacht in den Keller des Wohnhauses.

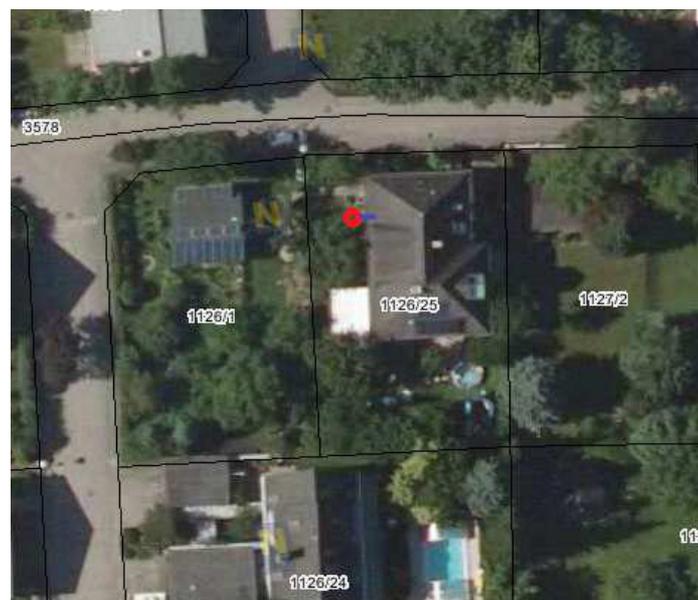


Abbildung 68: Orthofoto mit Katasterlageplan Amstetten

- **Geologie und Hydrogeologie**

Die Anlage befindet sich in der Molassezone. Laut geologischer Karte treten dort ältere Schliere des Egeriums und Sandstreifenschliere aus dem Ottnangium auf, die von Schotterlagen aus dem obersten Neogen überlagert sein können.



Abbildung 69: geologische Karte Amstetten

Laut Bohrprotokoll befindet sich unter der Humusschicht (30 cm) eine feuchte Lehmschicht mit einer Mächtigkeit von etwa 2 m. Darunter folgt eine Schicht bis zu einer Tiefe von 6,8 m aus feuchtem Pechschotter. In der Tiefe von 6,8 m-11,5 m befinden sich trockene Schluff-Tonlagen, die als Deckschicht für einen darunter liegenden Aquifer betrachtet werden können. Die wasserführende Schicht (bis 13,2 m Tiefe) besteht aus nassem Schluff und ist im gespannten Zustand. Der darunter liegende dunkelbraune Schluff wurde bis zur Endtiefe von 126 m im trockenen Zustand vorgefunden.

Bei den Bohrarbeiten wurde ein Grundwassereintritt in 11,5 m und in 13,2 m Tiefe unter GOK festgestellt, der Wasserspiegel stieg bis zu einer Tiefe von 0,5 m unter GOK.

Es befindet sich am selben Grundstück noch ein Nutzwasserbrunnen.

- **Anlagenbeschreibung**

Herstellung der Sonde

Die Bohrung DN168 mm wurde im Rotationsbohrverfahren hergestellt. Die Anordnung einer Hilfsverrohrung erfolgte bis zu einer Tiefe von 12 m.

Nach dem Erreichen der Endteufe von 126 m wurde nach dem Einsetzen der Duplex-Solesonde (4 x DN32 mm) das Bohrloch mit dem Fertigprodukt Stüwatherm fachgerecht verpresst. Die Sondenverrohrung wurde direkt in das Kellergeschoß geführt.

Bemessungswerte und Anlagedaten

Die genauen Anlagedaten und Bemessungswerte sind in Tabelle 32 und 33 zusammengestellt.

Die Besonderheit dieser Anlage besteht in der Kombination der Erdwärmetiefensonde mit der vorhandenen Solaranlage. Die Solaranlage ist wie üblich in das Heizsystem bzw. die Warmwasserproduktion eingebunden, überschüssige Solarwärme, welche nicht mehr vom Warmwasserspeicher aufgenommen werden kann, wird jedoch über einen Wärmetauscher in die Erdwärmesonde eingebracht. Damit soll das die Sonde umgebende Erdreich regeneriert werden.

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| beheizte Fläche | 180 m ² |
| Heizsystem | Fussboden- u. Wandheizung |
| Bausubstanz | saniertes Altbau |
| erforderliche Heizleistung | 8 kW |
| Vorlauftemperatur | 45 °C |
| Betriebsstunden | |
| angenommene Entzugsleistung | 45 W/lfm |
| Wärmepumpe | Vaillant |

Tabelle 32: Bemessungswerte Amstetten

| Wärmepumpe | | Sole-Sonden | |
|------------------------------|------------|--------------------------------------|---------------|
| Fabrikat/Type | VWS61/2 | Anzahl Bohrungen | 1 |
| Kältemittel | R407C | Tiefe/Bohrung | 126 m |
| Füllmenge/Kältemittel | 2,2 kg | Durchmesser Bohrung | 168 mm |
| Bauart Verdichter | Scroll | Anzahl Sondenrohre/Bohrung | 2 VL, 2 RL |
| Kompressoröl | Ester | Sonden-Rohrdurchmesser mm | 32 mm |
| Füllmenge/Kompressoröl | | Rohrwanddicke mm | 2,9 mm |
| Betriebsweise | monovalent | Werkstoff Sondenrohr | PE 100 PN 16 |
| Sperrzeit/EVU | | Frostschutzmittelgemisch Sole:Wasser | 30:70 |
| Leistungsaufnahme bei S0/W35 | 1,4 kW | Frostschutzmittel | Ethylenglykol |
| Kälteleistung bei S0/W35 | 4,5 kW | Verpressmaterial | Stüwatherm |
| Heizleistung bei S0/W35 | 5,9 kW | | |
| Leistungszahl bei S0/W35 | 4,3 | | |

Tabelle 33: Anlagendaten Amstetten

Anlage Sankt Oswald - Granit

- **Lagebeschreibung**

Die untersuchte Anlage liegt mitten im Ortskern von Sankt Oswald bei Freistadt im Mühlviertel/Oberösterreich.

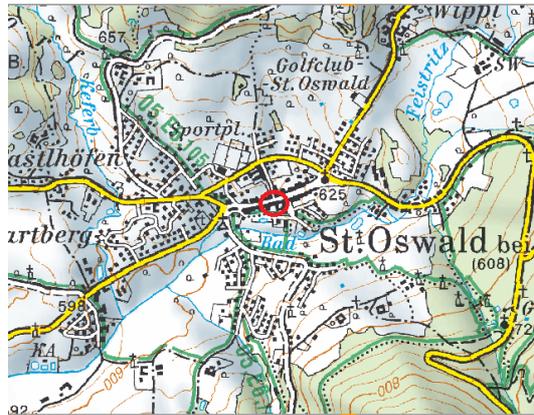


Abbildung 70: Übersichtsplan Sankt Oswald

Die Anlage befindet sich auf dem Grundstück 32/1 in der KG Sankt Oswald. Die politische Gemeinde ist Sankt Oswald im Bezirk Freistadt.

Aus Platzgründen wurden die 2 Erdwärmefensonden 1,5 m vor dem Gebäude auf öffentlichem Grund (Grundstück 1120/6) mit einem Abstand von 6,3 m zueinander abgeteuft.



Abbildung 71: Orthofoto mit
Kataster und Höhenschichtlinien



Abbildung 72: Lage der
Erdwärmesonden

In Abb. 71 ist die Anlage im Übersichtsplan dargestellt, in Abb. 72 sind die beengten Platzverhältnisse und die Lage plus Zuleitung der beiden Erdwärmesonden ersichtlich.

- **Geologie und Hydrogeologie**

Die Anlage befindet sich im Kristallin der Böhmisches Masse. Laut geologischer Karte (Abbildung 73) liegen die beiden Bohrungen im Bereich von oberflächlich anstehenden quartären Sedimenten.

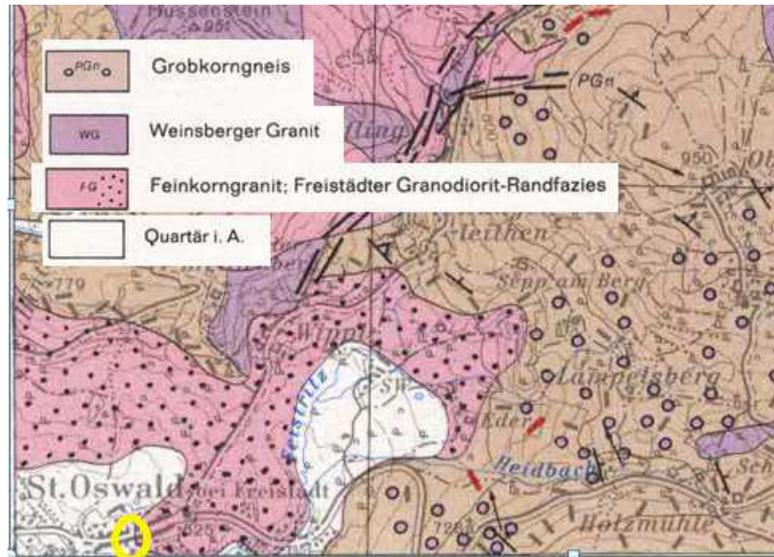


Abbildung 73: geologische Karte Sankt Oswald

Anhand des Bohrprotokolls wurde nachfolgende Geologie angetroffen. Die quartäre Lockergesteinsdecke, bestehend aus Flinz und Steinen, reicht bis in eine Tiefe von 4,6 m unter Gelände. Verwitterter brauner Granit wurde bis zu einer Tiefe von etwa 14 m angetroffen, darunter befand sich bis zur Endteufe kompakter, grau-rötlicher Granit.

Hydrogeologisch kann man annehmen, dass der angetroffene Granit praktisch undurchlässig ist, die Grundwasserströmung verläuft annähernd gegen Südwesten. Der quartäre Grundwasserkörper liegt ungespannt vor.

Aus wasserrechtlicher Sicht sind in einem Umkreis von 150 m keine Nutzenanlagen, die Wasserversorgung geschieht durch das öffentliche Netz.

- **Anlagenbeschreibung**

Herstellung der Sonden

Die Bohrung DN115 mm wurde im Trockenbohrverfahren mit Luftspülung jeweils 150 m abgeteuft. Bis zu einer Tiefe von 16,5 m (Sonde 1) bzw. 18 m (Sonde 2) wurde wegen des Verwitterungsgrades des anstehenden Gesteins eine Hilfsverrohrung mit DN140 mm eingebaut.

Der Bauherr entschied sich für zwei unterschiedliche SONDENSYSTEME. Zu rein wissenschaftlichem Zweck wurden zwei unterschiedliche SONDENSYSTEME eingebaut, die im Betriebszustand bei gleicher geologischer Grundlage beobachtet und hinsichtlich Effizienz ausgewertet werden können.

Die Sonde 1 besteht aus einer Simplexsonde mit einem Rohrdurchmesser von DN40 mm. Die Sonde 2 besteht aus einer Duplexsonde mit einem Rohrdurchmesser DN30. Beide Tiefensonden wurden mit einem Bentonit-Zement-Gemisch verpresst. Die genauen Daten sind in Tabelle 34 ersichtlich.

Anlagedaten und Bemessungswerte

In Tabelle 32 sind die Bemessungswerte ersichtlich.

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| beheizte Fläche | 136 m ² |
| Heizsystem | Fussboden- u. Wandheizung |
| Bausubstanz | Altbau |
| erforderliche Heizleistung | 13,5 kW |
| Vorlauftemperatur | 35 °C |
| Betriebsstunden | 1800h |
| angenommene Entzugsleistung | 45 W/lfm |
| Wärmepumpe | Ochsner |

Tabelle 34: Bemessungswerte Sankt Oswald

Als Wärmepumpe wurde ein Fabrikat der Marke Ochsner gewählt. Die genauen Daten sind in Tabelle 35 ersichtlich.

| Wärmepumpe | | Sole-Sonden | |
|------------------------------|----------------|---|-----------------------------|
| Fabrikat/Type | GMSW 18 | Anzahl Bohrungen | 2 |
| Kältemittel | R 407 C | Tiefe/Bohrung | 150 m |
| Füllmenge/Kältemittel | 1,3 kg | Durchmesser Bohrung | 140/115 mm |
| Bauart Verdichter | Scroll | Anzahl Sondenrohre/Bohrung | 2 (Sonde 1)/4 (Sonde 2) |
| Kompressoröl | EMKARATE RL325 | Sonden-Rohrdurchmesser mm | 40 (Sonde 1)/32 (Sonde 2) |
| Füllmenge/Kompressoröl | 1,85 l | Rohrwanddicke mm | 3,7 (Sonde 1)/2,9 (Sonde 2) |
| Betriebsweise | monovalent | Werkstoff Sondenrohr | PE-HD PE 100 PN 16 |
| Sperrzeit/EVU | 1 h | Frostschutzmittelgemisch Sole:Wasser | 01:01 |
| Leistungsaufnahme bei S0/W35 | 3,05 kW | Frostschutzmittel | Ethanol 60% |
| Kälteleistung bei S0/W35 | 10,45 | Verpressmaterial Zement:Bentonit:Wasser | 75kg:10kg:140l |
| Heizleistung bei S0/W35 | 13,5 kW | | |
| Leistungszahl bei S0/W35 | 4,4 | | |

Tabelle 35: Anlagedaten Sankt Oswald

D) Ergebnisse

I. Interpretation der Temperaturprofile

- Wärmeentzug aus der Erdwärmesonde

Anlage Neumarkt - Wärmeentzug bei unterschiedlichen Betriebszuständen

Messungen 2009

Temperaturlinien beider Sonden:

Sonde 1

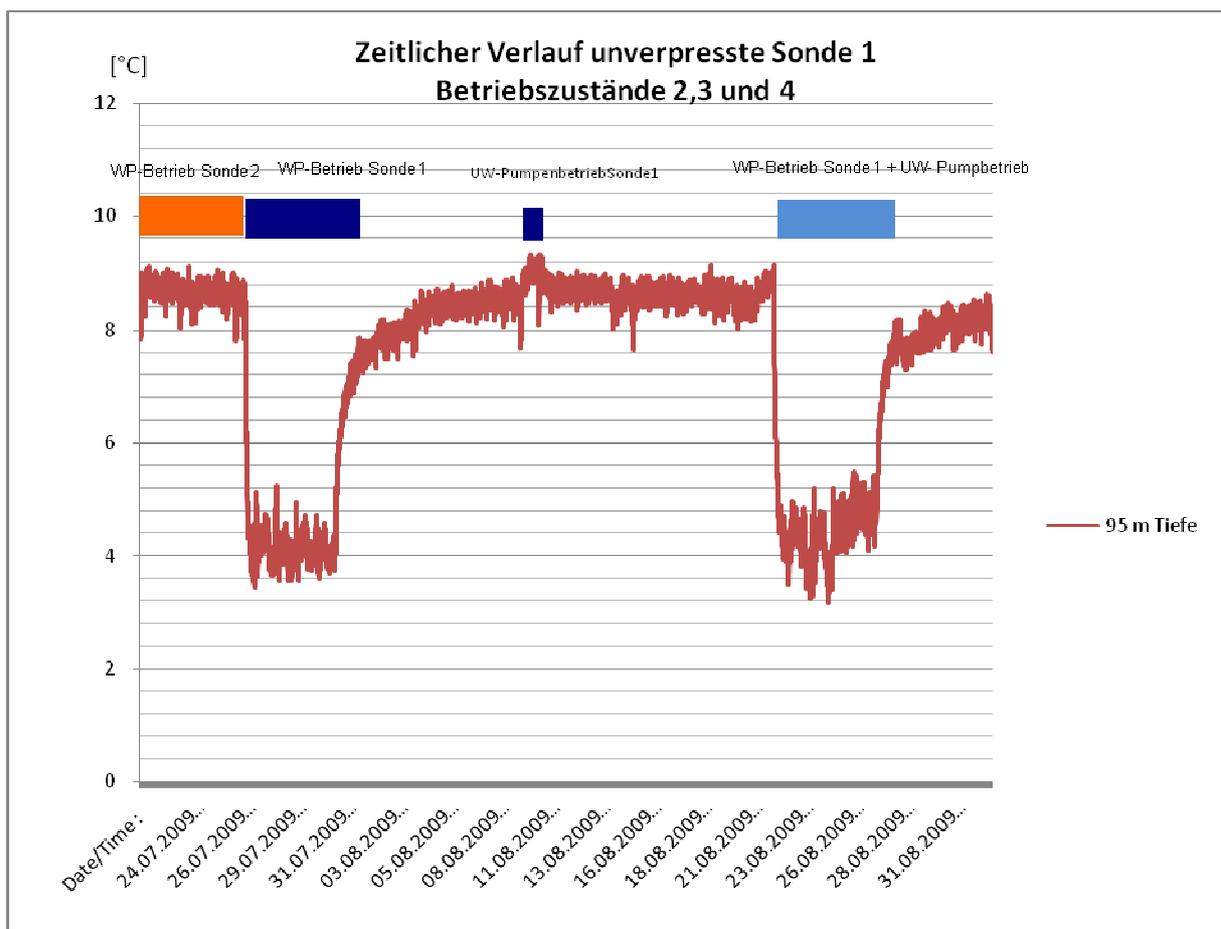


Diagramm 60: Zeitlicher Verlauf der Wassertemperatur

Das Diagramm 60 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wassertemperatur in der nicht verspressten Sonde 1 bei 95 Meter Tiefe. Deutlich sind in der Temperaturlinie die unterschiedlichen Betriebszustände erkennbar. Zu Beginn der Datenaufzeichnung war nur Sonde 2 in Betrieb, die in Ruhe befindliche Sonde 1 zeigt ein relativ hohes Temperaturniveau von etwa 9 °C.

Beim Umschalten auf Sonde 1 fällt die Wassertemperatur aufgrund des Wärmeentzuges auf etwa 4 °C ab.

Nach Abschalten der Wärmepumpe regeneriert sich die Sonde relativ rasch, erreicht jedoch nicht exakt das ursprüngliche Ausgangsniveau von 9 °C. Erst nach Inbetriebnahme der Umwälzpumpe kommt es zu einer Konvektionsströmung im Brunnen und somit zu einer zusätzlichen Zufuhr von Wärmeenergie. Die leichte Temperaturerhöhung bei Umwälzbetrieb ist im Temperaturgang deutlich zu erkennen. Nach Abschalten der Umwälzpumpe nimmt die Temperatur wieder leicht ab. In Abbildung 74 ist das System der erzwungenen Konvektion mit Hilfe einer Umwälzpumpe dargestellt.

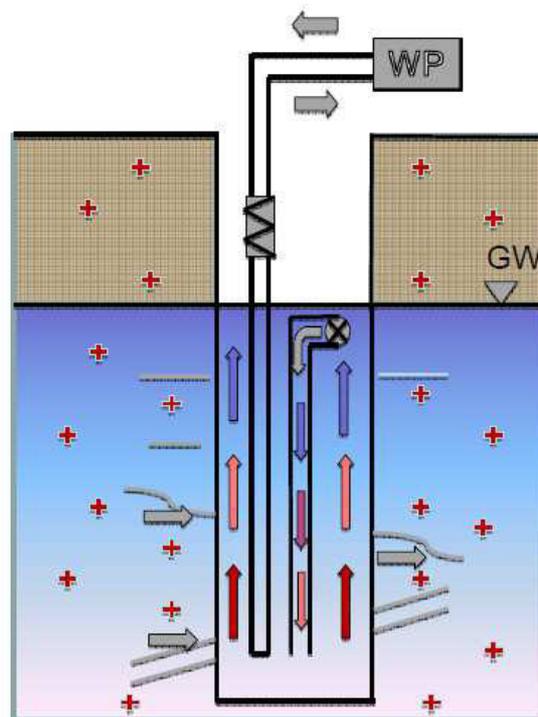


Abbildung 74: erzwungene Konvektionsströmung in Sonde 1

Bei Wärmeentzug aus Sonde 1 mit Umwälzung sinkt die Wassertemperatur wieder deutlich ab. Anfangs wird das Temperaturniveau vom normalen Wärmepumpenbetrieb ohne Umwälzung erreicht, in weiterer Folge nimmt jedoch die Wassertemperatur wieder leicht zu, sodass am Ende des Wärmeentzugs eine höhere Wassertemperatur registrierbar ist.

Im Betriebszustand 2 und 4 der Sonde 1 ist die periodische Schwingung der Kurve durch die Sperrzeit des Stromanbieters erklärbar, die täglich von 11.00 - 12.00 Uhr stattfindet.

Sonde 2

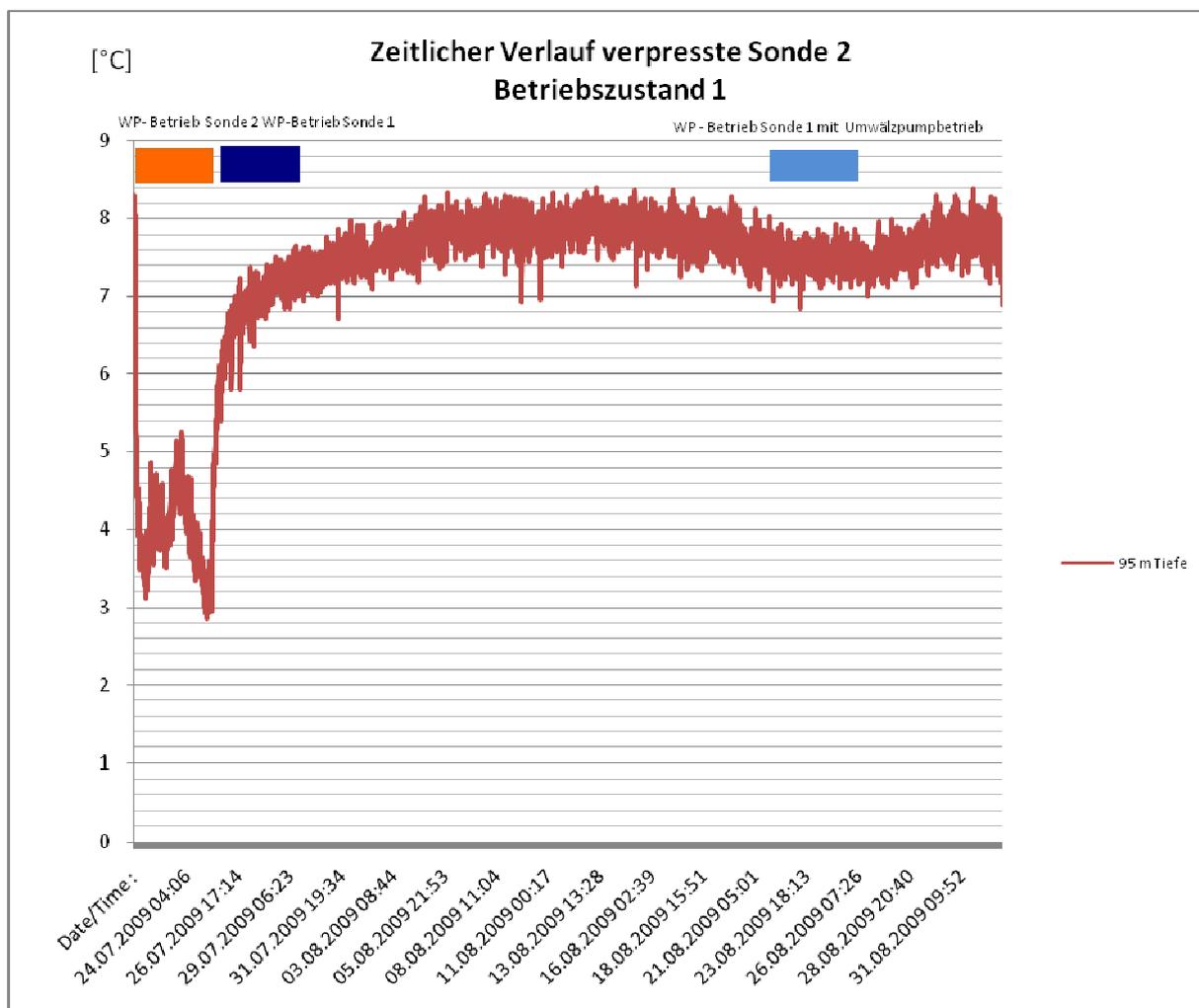


Diagramm 61: Temperaturganglinie in 95 Meter

Das Diagramm 61 zeigt wiederum die Temperaturganglinie in 95 Meter Tiefe, hier jedoch bei der verpressten Sonde 2. Dargestellt sind wie bei Sonde 1 die unterschiedlichen Betriebsphasen. Im Gegensatz zur Sonde 1 zeigt sich hier generell ein stärkerer Schwankungsbereich der Temperaturen.

Bei einer etwa gleich langen Wärmeentzugphase wie bei Sonde 1 sinkt die Umgebungstemperatur hier tiefer ab und erreicht zu Ende des Wärmeentzugs etwa 3 °C.

Die Regeneration verläuft sehr ähnlich der von Sonde 1.

Sehr deutlich ist in der Temperaturganglinie der Wärmeentzug aus Sonde 1 erkennbar. Die Sondentemperatur sinkt dabei leicht ab, obwohl aus der Sonde 2 keine Wärme entzogen wird. Dieser Umstand ist auf die hydrogeologischen Verhältnisse am Anlagenstandort zurückzuführen.

Sonde 2 ist abstromig von Sonde 1 situiert, der Grundwasserstrom erreicht zuerst Sonde 1, wird dort aufgrund des Wärmeentzugs leicht abgekühlt und fließt in Richtung Sonde 2 weiter. Das Messkabel in Sonde 2 registriert die geringere Temperatur des anströmenden Grundwassers. Eine einseitige Beeinflussung ist hier trotz des großen Abstandes der Sonden aufgrund der hydrogeologischen Gegebenheiten vorhanden.

Temperatur-Tiefenprofile beider Sonden

Sonde 1

In Diagramm 62 ist das Temperaturtiefenprofil von Sonde 1 zu Beginn des Wärmeentzugs dargestellt. Der rote Graph stellt dabei das über eine Stunde gemittelte Ausgangsniveau in der Sonde dar. Die anfänglichen Temperaturprofile zeigen, dass die Sonde nur auf etwa 70 m aktiv ist. Durch das noch vorhandene Temperaturniveau verdampft der Fallfilm des CO₂ bis zu dieser Tiefe vollständig. Erst bei weiterem Wärmeentzug und dem damit verbundenen Absinken der Umgebungstemperatur dringt flüssiges CO₂ auch bis zur Sohle der Sonde vor.

Die Temperaturen werden in einem eigens dafür eingebauten Messrohr neben der CO₂-Sonde gemessen. Beim Einbau konnte nicht immer ein konstanter Abstand zwischen Sonde und Messrohr eingehalten werden. Aufgrund dieses un stetigen Relativabstandes ergibt sich der unruhige Verlauf der Temperaturprofile. Im Ruheprofil ist ein Temperaturgradient von etwa 1 °C pro 100 m Tiefe erkennbar.

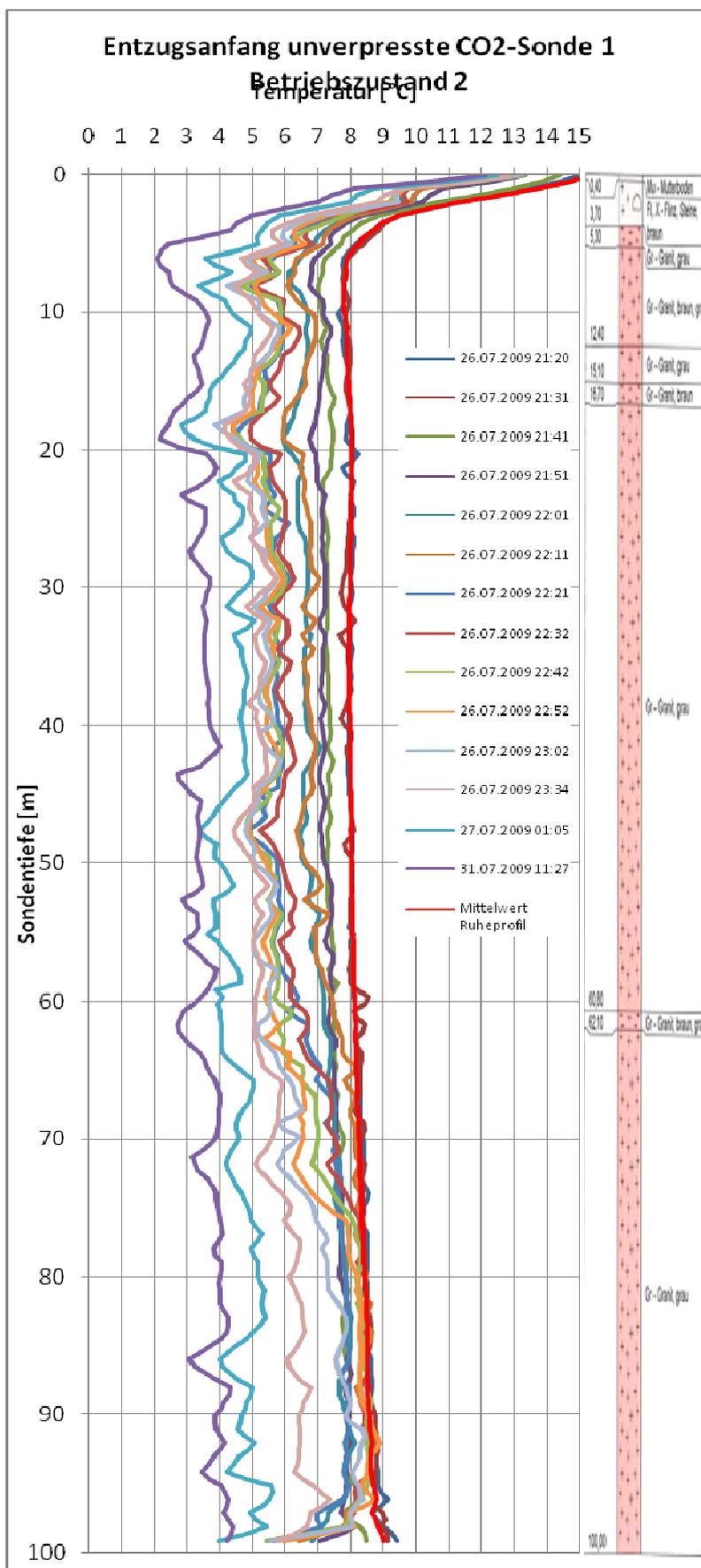


Diagramm 62: Temperaturprofil von Sonde 1 zu Beginn des Wärmeentzugs

Die bei der Umwälzung des Grundwassers im Ringraum aufgezeichneten Temperaturprofile weisen einen glatten ruhigen Verlauf auf.

Die Minimaltemperatur ist annähernd die gleiche wie bei der Messung ohne Umwälzung.

Auffallend bei dieser Messung ist der Verlauf der Temperatur am Bohrlochgrund. Es ist eine Temperaturzunahme auf den letzten 3 Metern erkennbar, die auf ein CO₂-Depot am Sondenfuß schließen lässt.

Sonde 2

In Diagramm 64 sind die Entzugsprofile der verpressten Sonde 2 im Anfangsstadium dargestellt. Das Maximum der Abkühlung ist am 25.07.2009.

Deutlich erkennbar ist der unstetige Verlauf der Temperaturen mit auffällig großen Sprüngen. Dies dürfte einerseits auf die Lage des Messkabels in der Sonde, und andererseits auf die geologisch/hydrogeologischen Verhältnisse in der Sondenumgebung zurückzuführen sein. Ein genereller Trend der Temperatur über die Tiefe ist jedoch erkennbar, die Temperaturzunahme über die gesamte Tiefe beträgt etwa 2 °C. Bei dieser Messung wurde das Kabel der Firma Brugg verwendet, welches wegen des stabileren Stahlmantels einen steiferen Zustand als das Kabel der Firma Leoni aufweist.

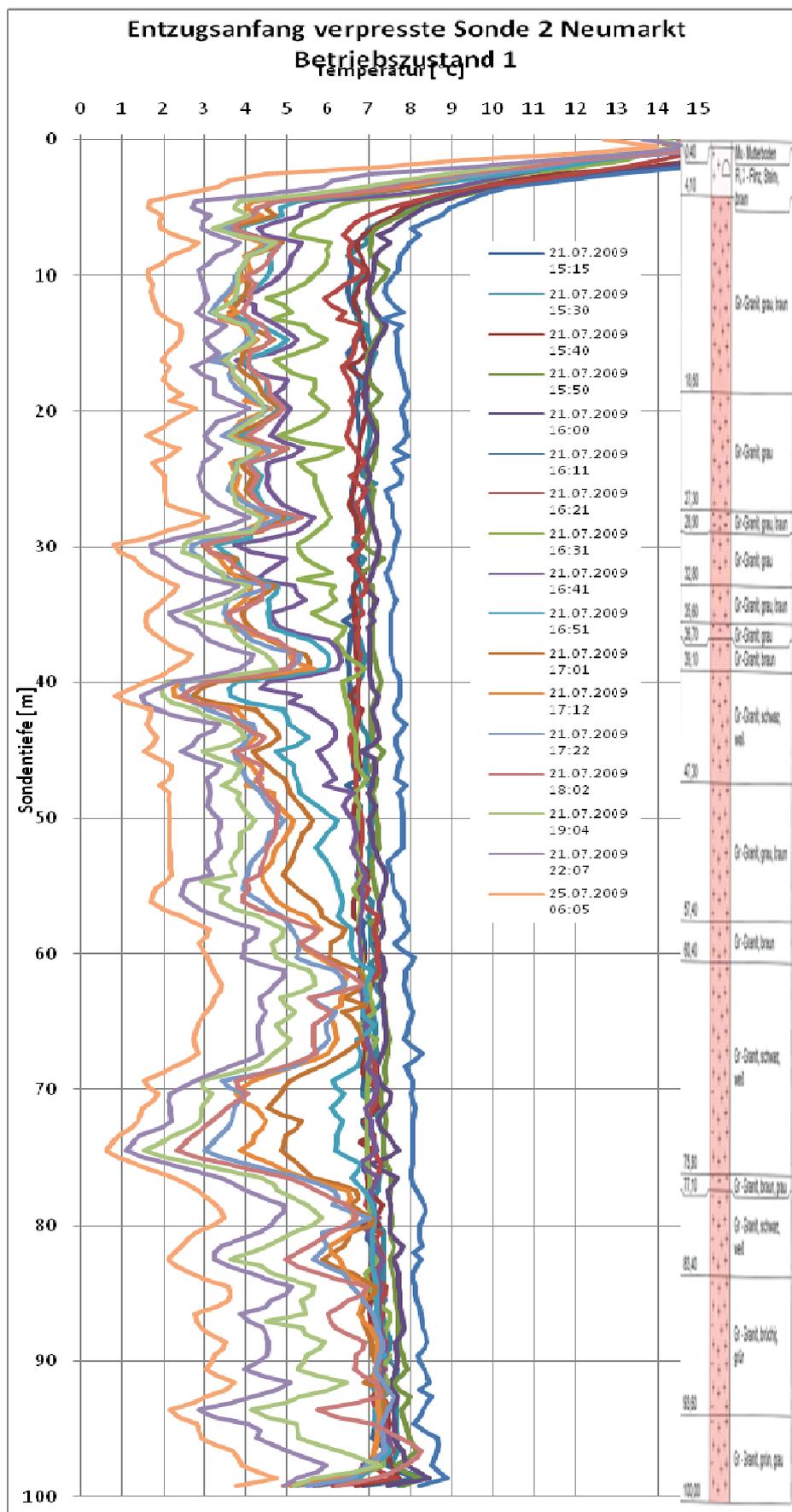


Diagramm 64: Entzugsprofile der verpressten Sonde 2 im Anfangsstadium

Anlage Heigl

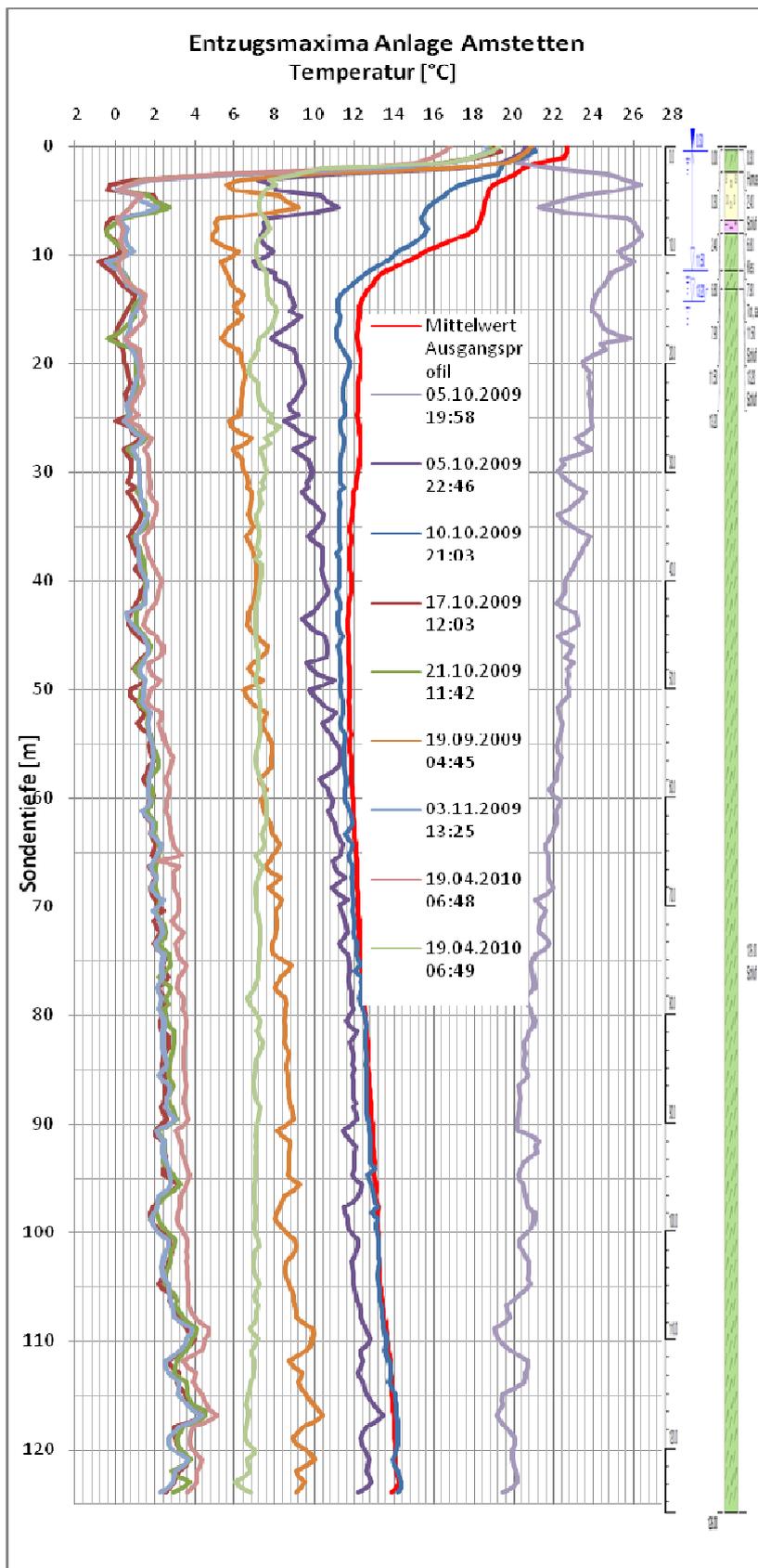


Diagramm 65: Messgraphen der Sole-Anlage in Amstetten

Anlage Amstetten

Bei der Sole-Anlage in Amstetten wurden sehr stetige, ruhige Temperaturprofile gemessen. Die Messungen erfolgten dabei direkt in der Sondenverrohrung, sodass direkt die Soletemperatur gemessen wurde. Im gemittelten Ruheprofil (rote Temperaturkurve) ist deutlich der geothermische Temperaturgradient von 2 °C je 100 m erkennbar. Bei starkem Wärmeentzug, maximale Abkühlung, erreicht die Soletemperatur beim Einlauf in die Sonde etwa den Gefrierpunkt, die Temperaturzunahme im Sondenvorlauf beträgt 2 °C. Die ganz rechts dargestellte Temperaturkurve zeigt die maximal gemessene Erwärmung aufgrund der in die Sonde eingebrachten solaren Überschusswärme. Beim Vergleich von signifikanten Unstetigkeiten in den Temperaturprofilen bei Entzug und Zufuhr von Wärme ist ein Zusammenhang erkennbar. Bei den gegenseitig verlaufenden Zacken handelt es sich um Bereiche besserer bzw. schlechterer Übergangswiderstände zum Gestein. Ob die Ursache beim Gestein oder beim Verpressmaterial liegt, lässt sich jedoch nicht feststellen.

Anlage Sankt Oswald

Im Gegensatz zu den anderen Soleanlagen wurde hier das Messkabel in den Sondenrücklauf, d.h. in das aufsteigende Rohr der U-Sonde eingebaut. Das Ruheprofil zeigt einen etwas ausgebauchten Verlauf, was für kompakten Granit eher unüblich ist. Das Ruheprofil zeigt einen geothermischen Temperaturgradienten von etwa 2 °C/100 m.

Die dargestellten Temperaturprofile wurden während eines Wärmeentzuges aufgenommen. Im Gegensatz zu den Profilen aus dem Vorlauf beträgt die Erwärmung der Sole über die Sondenlänge nur knapp 1 °C. Die Summe aus Vor- und Rücklauf ergibt die bekannte Spreizung von 3 °C. Aus diesem Umstand kann geschlossen werden, dass zwei Drittel der Wärme bereits im Vorlauf dem Untergrund entzogen werden und nur ein Drittel aus dem Rücklauf kommt.

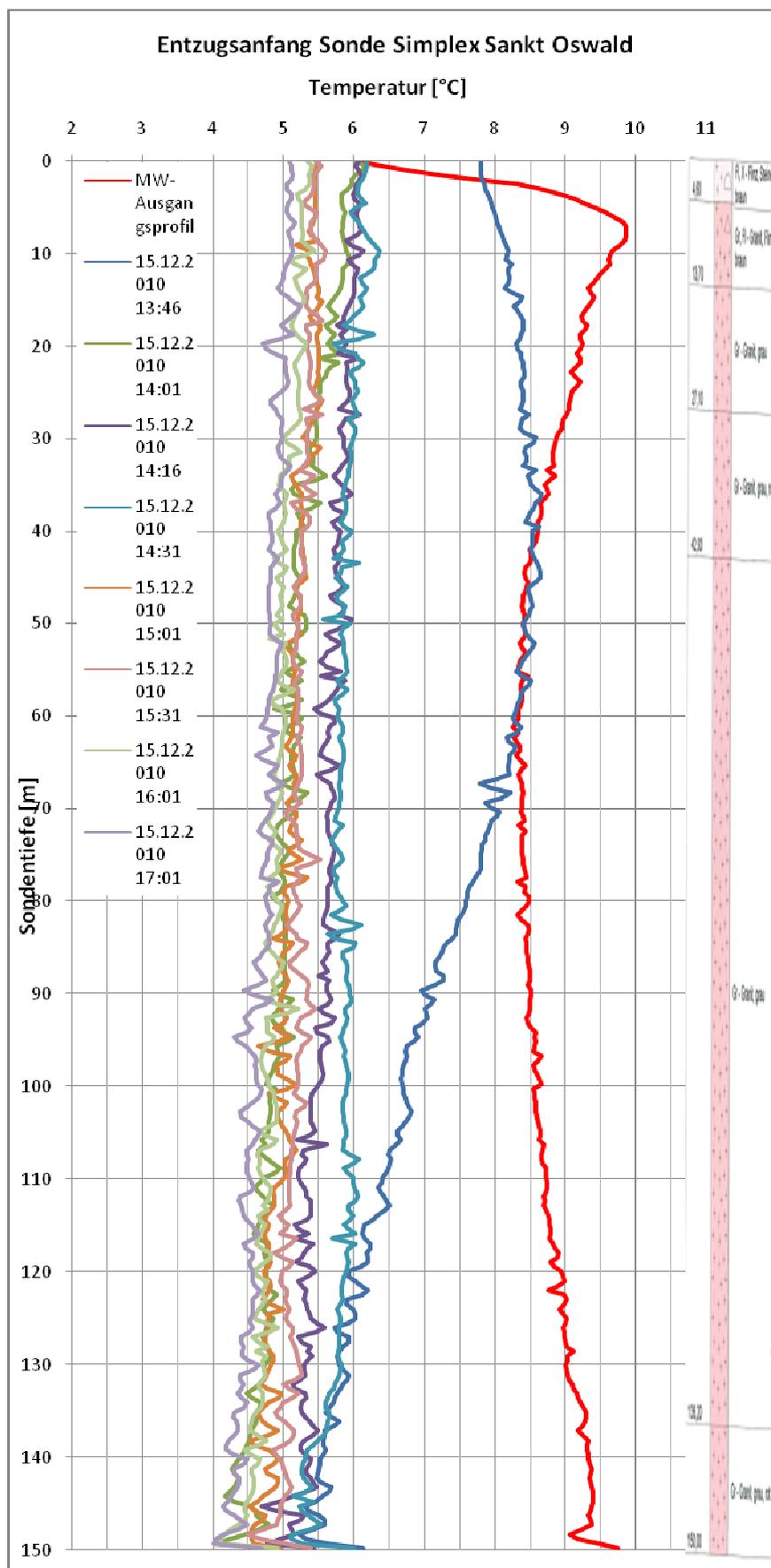


Diagramm 66: Messkurven der Sole-Anlage in Sankt Oswald

Anlage Sankt Florian

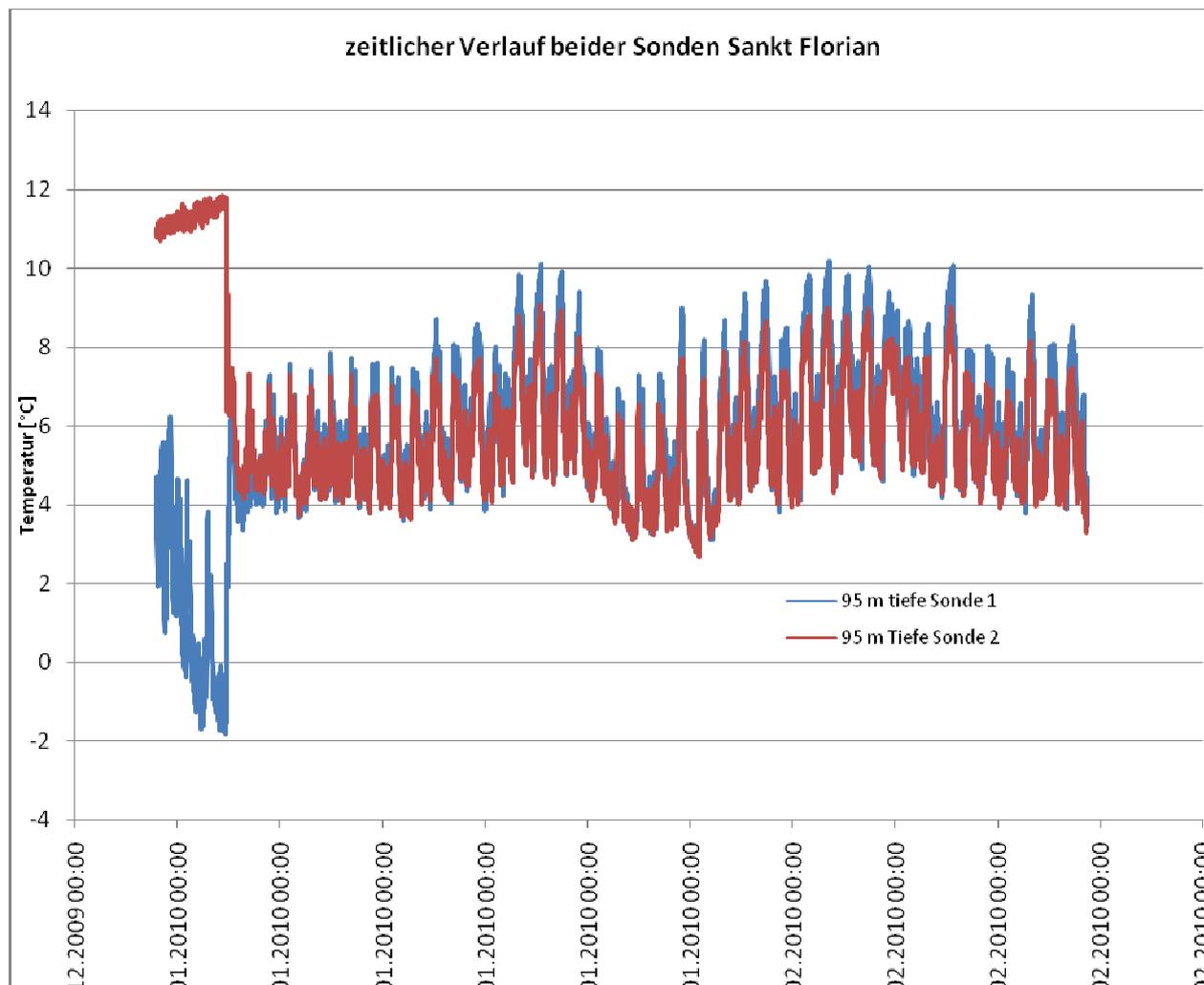


Diagramm 67: Zeitliche Darstellung der Temperaturverläufe beider Sonden

In Diagramm 67 ist der zeitliche Verlauf der Soletemperatur in 95 Meter Tiefe bei Sonde 1 und 2 dargestellt. Die beiden Solesonden wurden bei diesem Belastungsversuch nicht gleichmäßig belastet. Zu Beginn des Versuches wurde auf Einzelbetrieb (nur Sonde 1) umgeschaltet. Aus Sonde 2 erfolgte keine weitere Wärmeentnahme. Deutlich ist in der Temperaturganglinie von dieser Sonde die Regeneration auf Umgebungstemperatur trotz des starken Wärmeentzuges aus Sonde 1 zu erkennen. Eine Beeinflussung der Sonden scheint daher nicht gegeben zu sein.

Im weiteren Verlauf des Versuches wurde die regenerierte Sonde 2 wieder zugeschaltet, der Wärmeentzug erfolgte daraufhin aus beiden Sonden.

Sonde 2 zeigt zu Beginn des Wärmeentzuges aufgrund der Regeneration im Gegensatz zu Sonde 1 ein noch etwas höheres Temperaturniveau. Bei weiterem Entzug gleichen sich die minimalen Soletemperaturen jedoch an.

Deutlich unterschiedlich ist jedoch das Regenerationsverhalten in den Betriebspausen der Wärmepumpe. Das dabei erreichte Temperaturniveau in Sonde 1 ist dabei signifikant höher als das von Sonde 2. Dies ist auf das unterschiedliche Verpressmaterial, mit welchem die Sonden verfüllt wurden, zurückzuführen.

- **Regeneration**

Anlage Neumarkt

In Diagramm 68 sind die Regenerationsprofile der unverpressten Sonde 1 bei Entzugsende, sowie das Ruheprofil dargestellt. Zu Beginn der Regeneration (Minimum der Abkühlung am 31.07.2009 11:27 Uhr) gehen die Graphen schnell in einen ruhigen, glatten Verlauf über. Der Ausgangszustand (Mittelwert Ruheprofil) ist relativ schnell wieder erreicht (03.08.2009). Signifikante Unterschiede über die Sondenlänge sind nicht zu erkennen. Aufgrund der Ausgleichsströmungen im umgebenden Wasser verläuft die Regeneration sehr gleichmäßig.

In Diagramm 68 ist der Regenerationsverlauf von Sonde 2 dargestellt. Auch hier ist eine rasche Regeneration erkennbar, die Temperaturverläufe sind jedoch nicht so homogen und stetig wie bei Sonde 1. Das Temperaturniveau des Ausgangszustandes (21.07.2009 16.11 Uhr) wurde am 02.09.2009 12.01 Uhr fast zur Gänze erreicht.

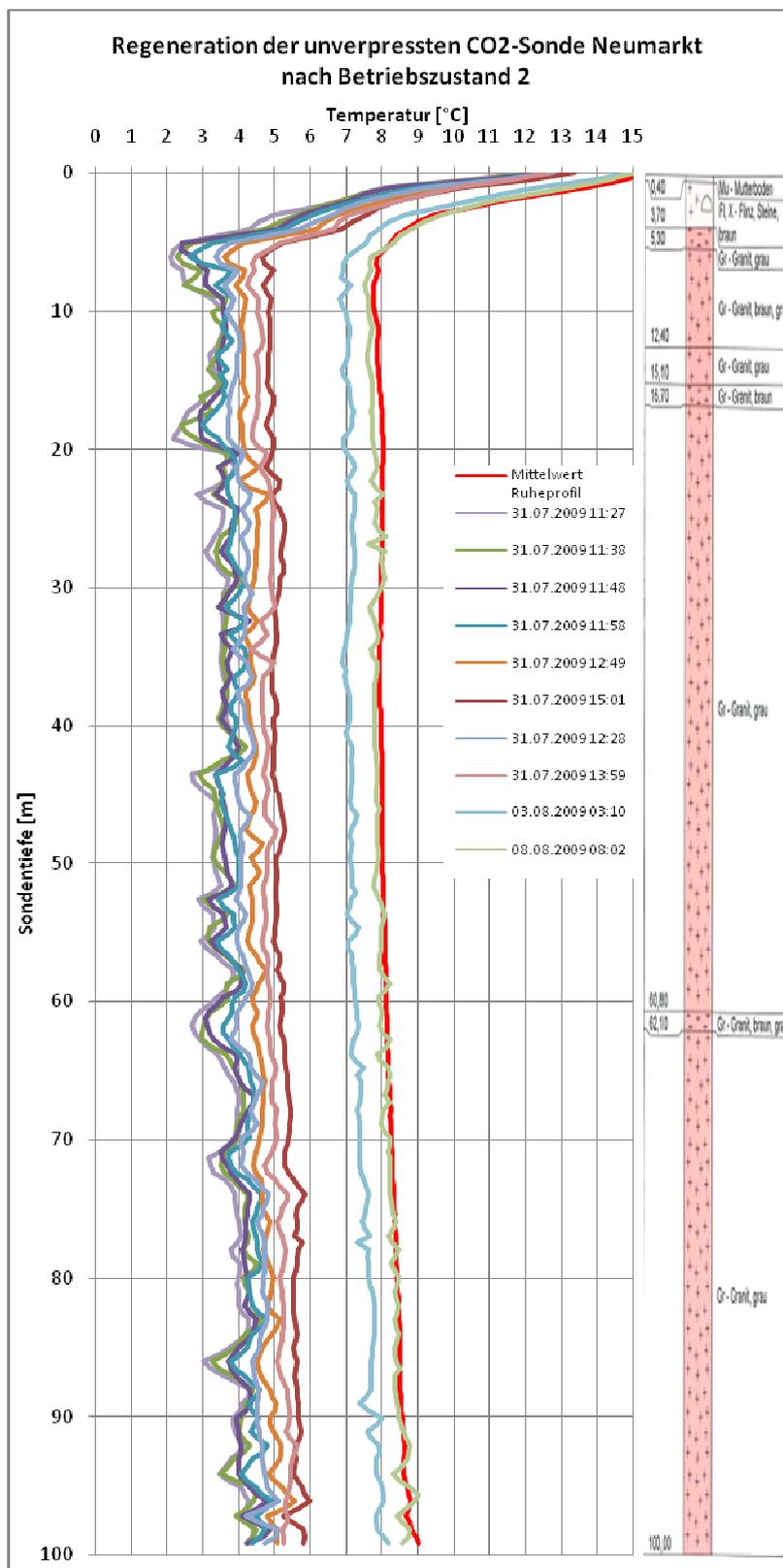


Diagramm 68: Messkurven bei Regeneration der unverpressten Sonde 1

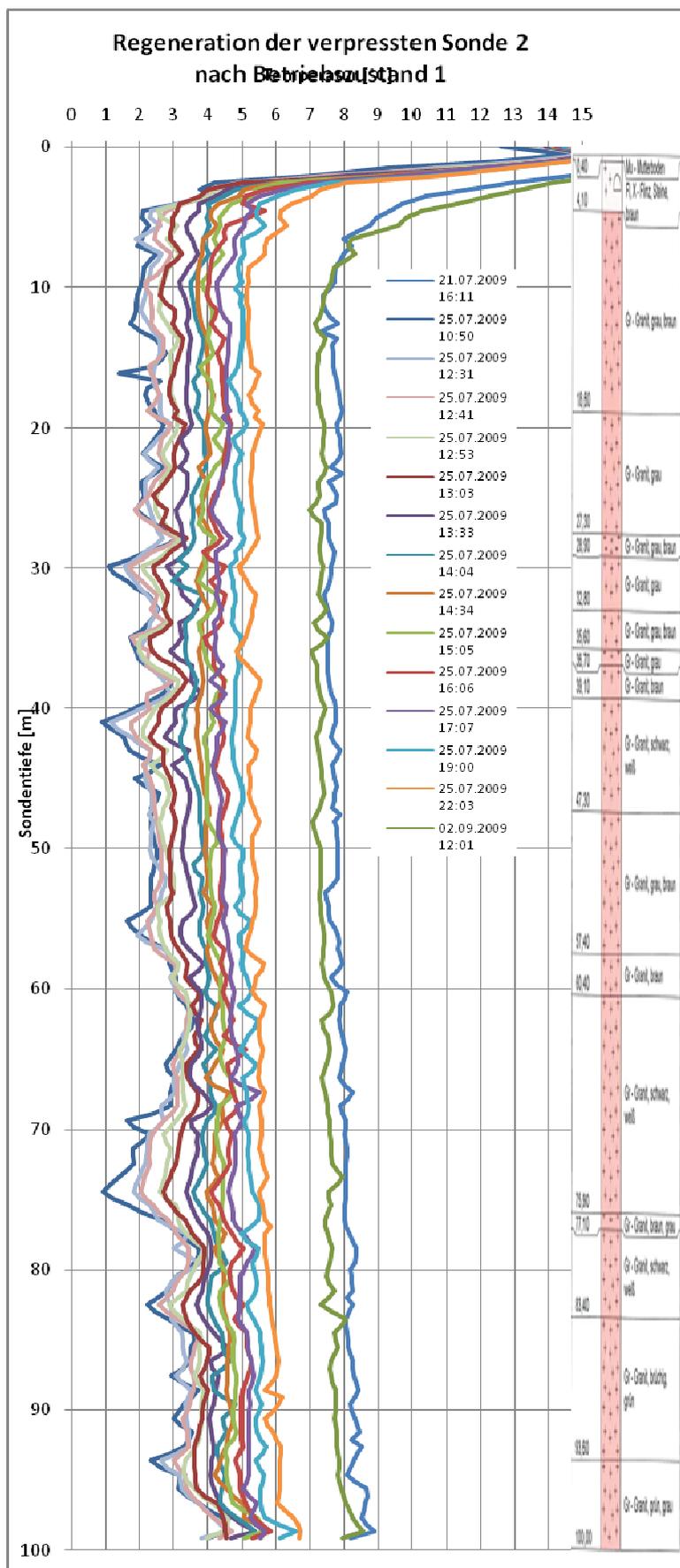


Diagramm 69: Darstellung der gesamten Regenerationszeit

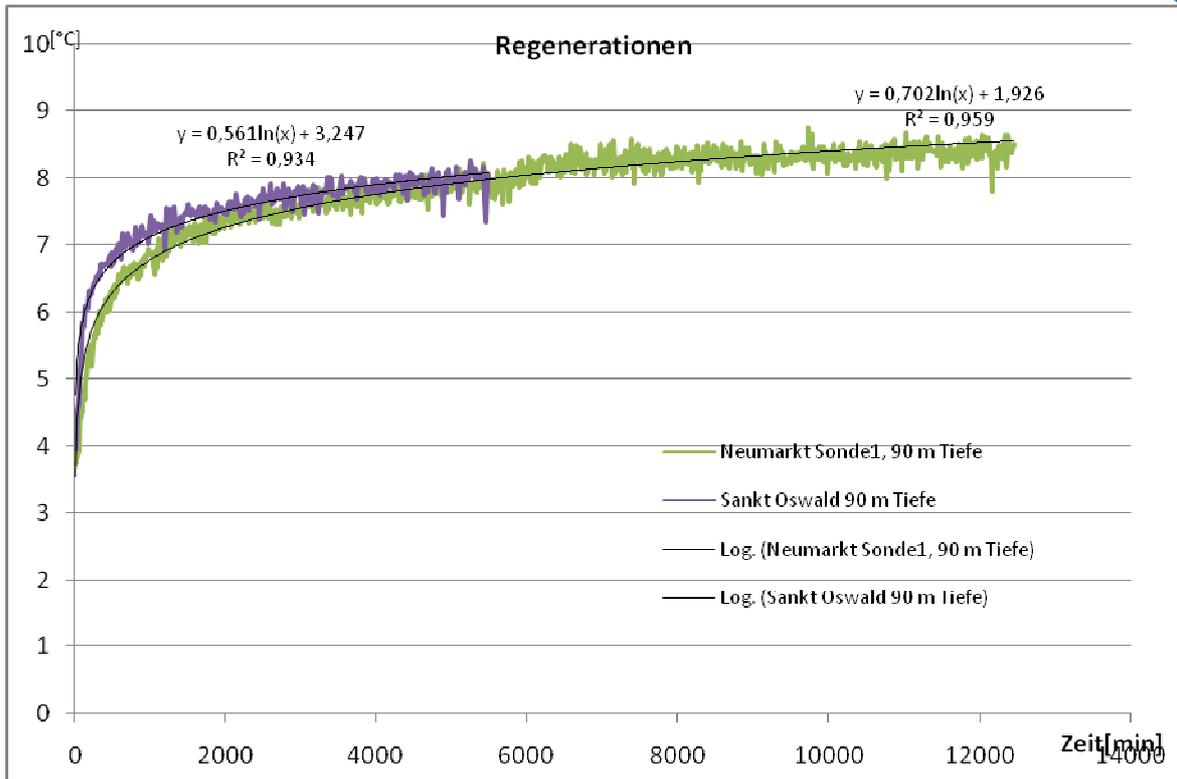


Diagramm 70: Vergleich Regenerationen Anlagen Neumarkt und Sankt Oswald

In dem oberen Diagramm 70 sind die Regenerationsverläufe von Erdwärmesonden der Anlagen Neumarkt und St. Oswald dargestellt. Die Temperaturverläufe wurden durch logarithmische Regressionsgeraden angenähert.

Generell sind die Temperaturverläufe während der Regeneration der Sonden zu Beginn stark von den thermischen Parametern des Verpressmaterials, und im weiteren Verlauf vom umgebenden Untergrund abhängig.

Beide Verläufe zeigen ein sehr rasches Angleichen an die ungestörte Bodentemperatur, was für eine gute Wärmeleitung des Untergrundes spricht. Da beide Anlagen im Kristallin situiert sind, war dies zu erwarten.

Im Diagramm 71 sind Regenerationsfunktionen von Sonden, welche in zwei unterschiedlichen geologischen Einheiten situiert sind, dargestellt. Zwei Anlagen befinden sich dabei im Kristallin (Anlage St. Oswald und Neumarkt) und zwei Anlagen in der Molassezone (Anlage Steyr und St. Florian).

Die Regenerationsfunktionen der unterschiedlichen Geologien unterscheiden sich dabei deutlich. Im Kristallin kommt es zu einem anfangs raschen Ansteigen der Temperatur bis zu einem gewissen Niveau, das Erreichen der ursprünglichen Bodentemperatur dauert dann vergleichsweise lang.

In der Molassezone dauert der anfängliche Temperaturanstieg deutlich länger, auch das Angleichen an die ungestörte Bodentemperatur nimmt deutlich mehr Zeit in Anspruch.

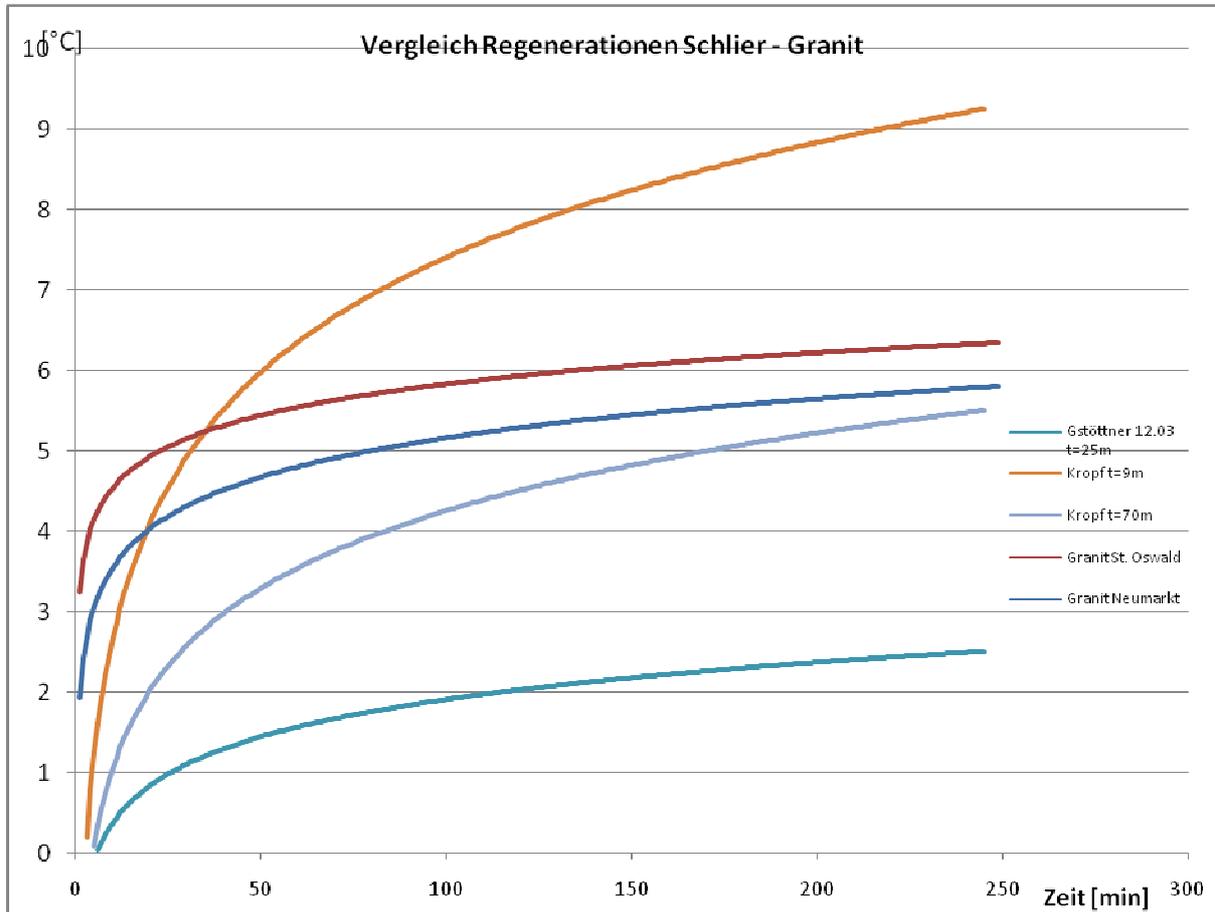


Diagramm 71: Gegenüberstellung: Regenerationsfunktionen im Granit und im Schlier

- **Solarenergie - Einspeisung**

Anlage Amstetten

In Diagramm 72 ist die Temperaturganglinie der Sole in 119 Meter Tiefe dargestellt. Deutlich erkennbar sind die kurzen Phasen der Nachladung solarer Überschusswärme in den Untergrund bis etwa zum 08.10.2009. Danach beginnt die Heizsaison und es stehen nur mehr geringe Mengen an Überschusswärme zur Verfügung. Die Soletemperatur in dieser Tiefe erreicht dabei kurzfristig über 20 °C. Aufgrund des großen Temperaturgradienten zum umgebenden Gebirge wird die eingebrachte Wärme rasch abtransportiert und diese Spitzen klingen schnell wieder auf ein Niveau von etwa 14 °C ab.

Geht man von einer ungestörten Bodentemperatur von etwa 12 °C aus, so ergibt sich eine nutzbare Temperaturerhöhung durch die Rückspeisung von Überschusswärme von 2 °C.

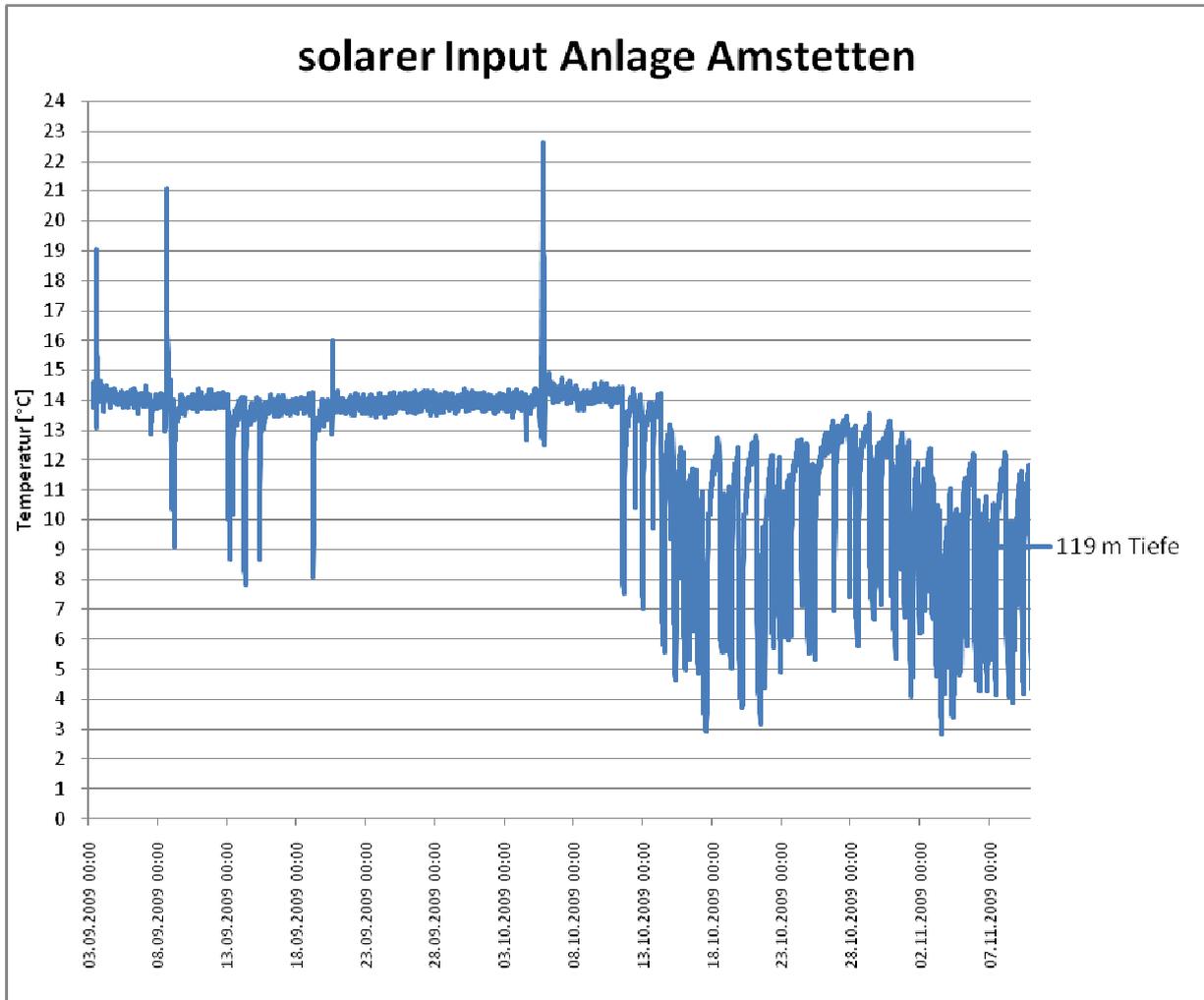


Diagramm 72: Solarer Input der Anlage Amstetten

In den beiden nachfolgenden Diagrammen wird exemplarisch die Einspeisung und Entnahme von Wärmeenergie über einen Tag (05.10.2009) näher betrachtet.

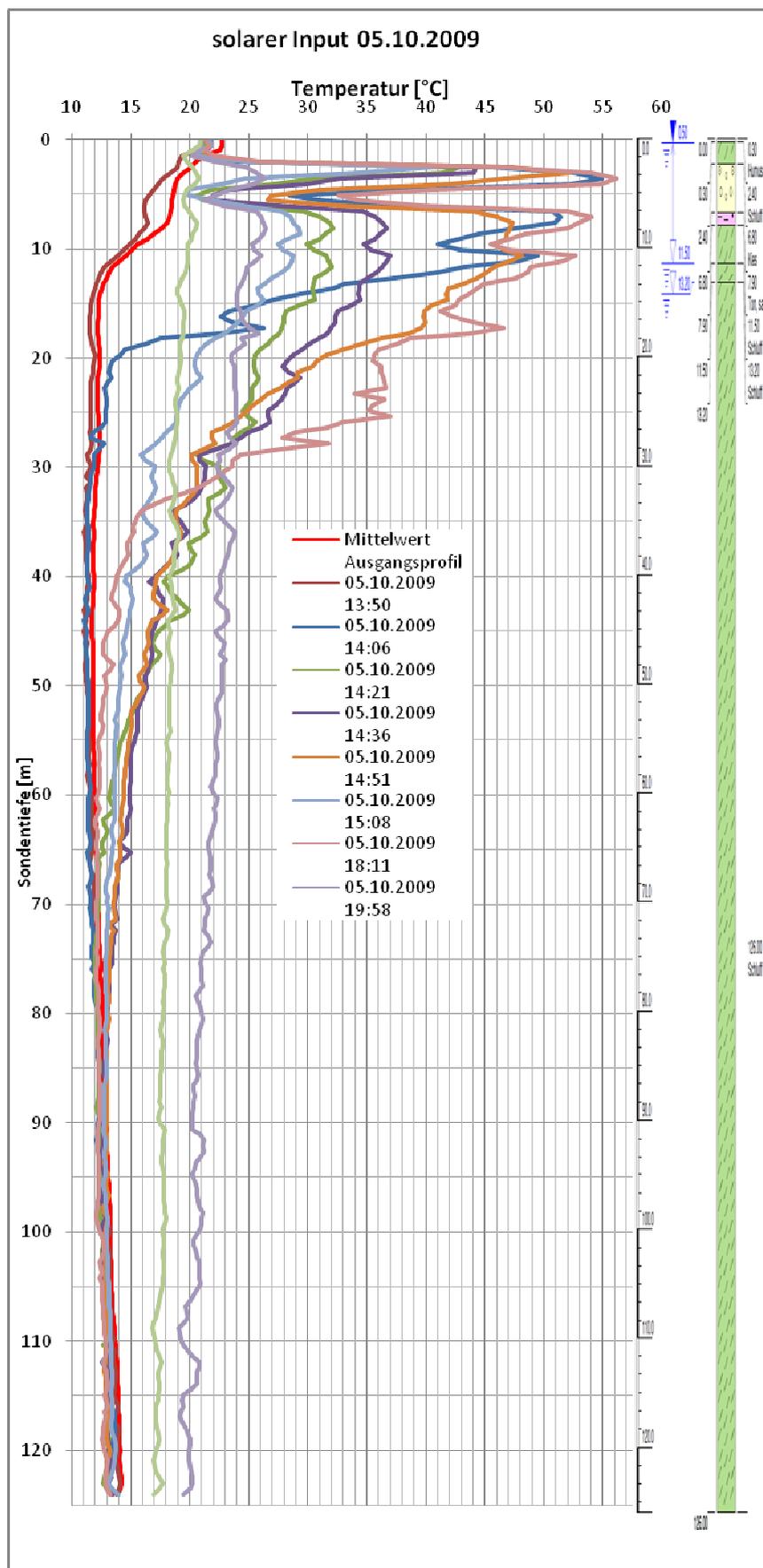


Diagramm 73: Solare Einspeisung am 05.10.2009

In Diagramm 74 sind die Temperaturprofile während einer Wärmeeinspeisung über einen Zeitraum von 10 h dargestellt.

Zu Beginn der Einspeisung wird die eingebrachte Wärme im Lockergesteinsbereich schnell an den Untergrund über konvektiven Wärmetransport durch das Grundwasser abgeführt. Erst bei weiterer Zufuhr von Energie erhöht sich entlang der gesamten Sonde die Temperatur.

Das Temperaturprofil am Ende der Einspeisung (19:58 Uhr) zeigt im Vergleich zum Ausgangsprofil ein deutlich höheres Temperaturniveau über die gesamte Sondenlänge.

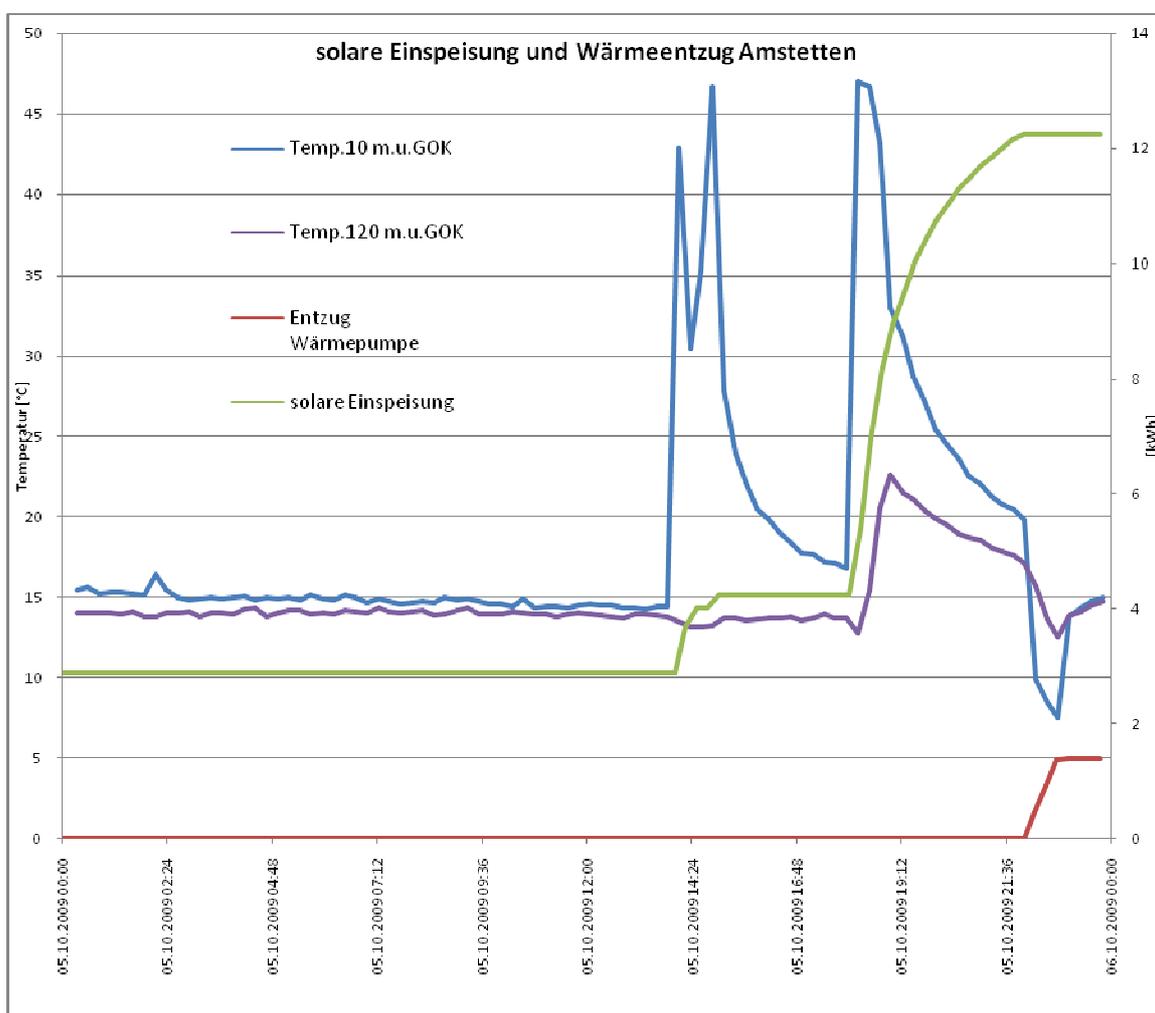


Diagramm 74: Verhalten der Sole bei solarer Einspeisung

Im Diagramm 74 sind die Tagesganglinien der Soletemperatur in 10 und 120 Meter Tiefe, sowie die, über den Tag eingespeiste bzw. entnommene Energie aufgetragen. Mit Beginn der solaren Einspeisung (Anstieg der grünen Linie) steigt auch die Temperatur der oberflächennahen Sole an (blaue Linie).

In 120 m Tiefe reagiert die Temperatur nicht, da die Wärmefront nicht so tief in die Sonde eindringt. Stoppt die Einspeisung, sinkt auch sofort die Soletemperatur wieder ab. Erst bei neuerlicher Einspeisung steigt diese wieder an. Ist die eingebrachte Energie groß genug, erreicht sie auch die unteren Bereiche der Sonde, dies ist in der neuerlichen Einspeisung um etwa 17:00 Uhr deutlich zu erkennen. Beide Temperaturverläufe zeigen einen deutlichen Anstieg der Temperatur. Um etwa 22:00 Uhr beginnt der Wärmeentzug durch die Wärmepumpe (rote Linie), dies ist auch deutlich an den rasch abfallenden Soletemperaturen erkennbar.

II. Quantitative Beschreibung

- **Kennzahlen**

Anlage Neumarkt

Durch Aufzeichnungen des Anlagenbetreibers lassen sich folgende Kennzahlen ermitteln:

Messperiode Sommer 2009:

1) Betriebszustand 1: Sonde 2 (Länge 100 m)

Entzugsdauer : 91 h

Entzugswärme: 490 kWh

Stromverbrauch: 174,5 kWh

Kälteleistung: 315,5 kWh

Spez. Entzugsleistung: 34,7 W/m

2) Betriebszustand 2: Sonde 1 (Länge 100 m)

Entzugsdauer: 109 h

Entzugswärme: 620 kWh

Stromverbrauch: 226,9 kWh

Kälteleistung: 393,1 kWh

Spez. Entzugsleistung: 36,1 W/m

3) Betriebszustand 4: Sonde 1

Entzugsdauer: 124,5 h

Entzugswärme: 700 kWh

Stromverbrauch: 246,14 kWh

Kälteleistung: 453,9 kWh

Spez. Entzugsleistung: 36,5 W/m

Die niedrigen Entzugsleistungen sind dadurch erklärbar, dass in den Sommermonaten die gewonnene Wärme nicht vollständig verbraucht werden konnte.

Messperiode Februar 2011

Entzugsdauer : 63 h

Entzugswärme: 570 kWh

Stromverbrauch: 189 kWh

Kälteleistung: 381 kWh

Spez. Entzugsleistung: 60,5 W/m

Leistungsbilanz Heizperiode 2008/2009 (17.10.2008-09.04.2009)

Stromverbrauch: 6039 kWh

Wärmeleistung heizungsseitig: 21590 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,57

Leistungsbilanz Heizperiode 2009/2010 (14.10.2009-22.05.2010)

Stromverbrauch: 6586,1 kWh

Wärmeleistung heizungsseitig: 23810 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,62

Leistungsbilanz Heizperiode 2010/2011 (17.09.2010-03.04.2011)

Stromverbrauch: 6478 kWh

Wärmeleistung heizungsseitig: 22300 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,44

Anlage Sankt Oswald

Durch Aufzeichnungen des Anlagenbetreibers sind folgende Bilanzen aufstellbar:

Leistungsbilanz Heizperiode 2008/2009 (11.10.2008-04.05.2009)

Stromverbrauch: 3039 kWh

Wärmeleistung heizungsseitig: 10165 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,34

Leistungsbilanz Heizperiode 2009/2010 (13.11.2009-29.04.2010)

Stromverbrauch: 3727,8 kWh

Wärmeleistung heizungsseitig: 14134 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,79

Leistungsbilanz Heizperiode 2010/2011 (15.12.2010-22.04.2011)

Stromverbrauch: 2909 kWh

Wärmeleistung heizungsseitig: 10186 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,50

E) Zusammenstellung der Kenn- und Betriebsdaten aller Anlagen

In der nachstehenden Tabelle sind die Kenndaten sowie die wichtigsten Betriebsdaten aller beobachteten Anlagen zusammengestellt.

| Standort | Sonde | | | Untergrund | | | | Messzeitraum | | Jahresarbeitszahl | Betriebsdaten | | | Verpressmaterial |
|------------------|----------------------------------|--------------|--------------|---------------------|--|----------------------------|--------------------|---------------------------|---|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| | System/ Sondenart | Tiefe [m] | Rückspeisung | Geologische Einheit | Überdeckung | Anstehendes Festgestein | GW- Mächtigkeit | Permanentes Monitoring | LWL- Monitoring | | mittlere Entzugsleistung [W/m] | tiefste Soleeintrittstemp. [°C] | mittlere Soleeintrittstemp. [°C] | |
| <u>Amstetten</u> | 1 Stk: Sole-Duplex | 125 | ja | Molasse | 0-2 m: Lehm 2-6,8 m: Pechschotter; 6,8-11,5 m: Schluff, Ton | Schlier | 11,5-13,2 m | ja | 03.09.2009- 10.11.2009 16.04.2010- 22.04.2010 01.10.2010- 30.11.2010 | 4,0 | 42 | | | Stüwathem |
| <u>Steyr</u> | 3 Stk: Sole-Simplex | 3 x 56,66 | nein | Molasse | 0-12 m: Schluff, tonig; 12-28 m: Ton, kiesig | Schlier | 12 m | ja | 01.02.2009- 19.03.2009 | 4,4 | 49,4 | -4,2 | -2,2 | Bentonit- Zementgemisch |
| <u>Neumarkt</u> | 2 Stk: CO ₂ Kupfer | 2 x 100 | nein | Kristallin | 0-0,4 m: Humus; 0,4-3,7 m: Flins | Granit | 16 m | WP- Monitoring | 07.07.2009- 02.09.2009 15.02.2010- 26.02.2010 28.02.2010- 20.03.2011 | 3,44 | 60,5 | | | Thermocem |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|---------|------|------------|--|---------|----------|--------------------|-----------------------|------|------|-----|-----|------------------------|
| <u>St. Oswald</u> | Sonde 1: Sole-Simplex | 2 x 150 | nein | Kristallin | 0-4,60 m: Flinz | Granit | kein GW | nein | 13.11.2009-10.12.2009 | 3,5 | 32,4 | 2,9 | 6,1 | Bentonit-Zementgemisch |
| | Sonde 2: Sole-Duplex | | | | | | | ja | 15.12.2011-03.01.2011 | | | | | |
| <u>St. Florian</u> | Sonde 1: Sole-Simplex | 2 x 100 | ja | Molasse | 0-4 m: Schluff, Ton, Mittelkies | Schlier | | eigenes Monitoring | 19.03.2009-31.03.2009 | | | | | Bentonit-Zementgemisch |
| | Sonde 2: Sole-Simplex | | | | | | | | 01.01.2010-15.02.2010 | | | | | |
| <u>Buchberg</u> | σ-Sonde | 164 | nein | Kristallin | 0-20,6 m: Schluff, Sand ab 20,6 m: Granit, grau/schwarz | Granit | bei 11 m | nein | nein | 4 | 95 | 6 | 8 | keine |
| <u>GEOSOLA Verpresste Sonden</u> | Sonde η: Sole-Simple | 97 | nein | Molasse | 0-12,5 m: Sand | Schlier | 20 m | ja | ja | n.a. | 28 | 2 | 5,4 | Thermochem |
| | Sonde η: 4 CO ₂ Kupfer DN18 | | | | 12,5-25,5 m: Kies | | | | | | 24 | 2,5 | 4,4 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----|------|---------|---|---------|----------|------|-------|------|----|------|-------|---|
| <u>GEOSOLA</u> <u>Verpresste</u> <u>Sonden</u> | Sonde α : Sole-Simplex | 95 | nein | Molasse | 0-12,5 m: Sand 12,5-25,5 m: Kies | Schlier | 20 m | ja | ja | n.a. | 38 | 2,25 | 5,5 | 0-30 m + 60-100 m: Thermoem 30-60 m: Bentonit.-Zementgemisch |
| | Sonde α : 2 CO ₂ Kupfer DN22 | | | | | | | | | | 24 | 3,5 | 6,6 | |
| | Sonde ϵ : Sole-Simplex | 50 | | | | | | | | | 30 | 2,25 | 5,5 | |
| <u>GEOSOLA</u> <u>offene</u> <u>Sonden</u> | Strömungs- Sonde 1 | 25 | nein | Molasse | 0-12,5 m: Sand 12,5-25,5 m: Kies | Schlier | bei 20 m | nein | n. a. | 314 | 2 | 4 | keine | |
| | Strömungs- Sonde 2 | | | | | | | | | 306 | 2 | 4 | | |
| | Strömungs- Sonde 3 | | | | | | | | | 262 | 2 | 4 | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------------------|--------------------|------|------------|------|--------|-----|------|--------|------|----|--|--|--|----------------------------|
| <u>M-Tec</u> | 1 Stk: CO ₂ Kupfer | 60 7° schräg | nein | Kristallin | n.a. | Granit | 5 m | nein | | n.a. | 50 | | | | Stüwa- Däm |
| | 1 Stk: CO ₂ Kupfer | | | | | | | | | | | | | | Bentonit- Zementgemisch |
| | 1 Stk: CO ₂ Kupfer | 80 | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 Stk: CO ₂ Kupfer | 80 7° schräg | | | | | | | defekt | | | | | | |

Tabelle 36: Aufstellung der Betriebsparameter aller untersuchten Sonden

Arbeitspaket 6: WP-Konfigurierung

Bei einem ersten Testlauf der Heliotherm Wärmepumpe (25 kW thermisch) waren größere Schwankungen im Wärmeabgabetank und im Wärmeentzugstank messbar als zuvor angenommen. Als Konsequenz wurde daher die zuvor eingesetzte Wärmepumpe durch eine eigenkonstruierte Wärmepumpe der M-TEC Mittermayr GmbH ersetzt (Siehe Abbildung 75). Diese Anlage wurde zusätzlich mit einem frequenzgeregelten Verdichter betrieben, der von 20 – 70 Herz stufenlos modulierbar ist und eine maximale Leistung von 6 KW aufweist. In einem zweiten Testlauf konnte so nun die Temperatur im Wärmeabgabetank und Wärmeentzugstank auf einem konstanten Niveau gehalten werden. Dadurch war eine genaue Vermessung und Dokumentation der Daten gewährleistet. Darüber hinaus war aufgrund der stufenlosen Leistungsanpassung auch eine Verbesserung der Arbeitszahl der Wärmepumpe die Folge.



Abbildung 75: Versuchsanlage für DV und Sole mit frequenzgesteuertem Verdichter (2,4 – 6 KW)

Arbeitspaket 7: Schlussbericht und Resumée

Teilziel 7.1: Untergrund und Verpressung

A) *Untergrund der Forschungsanlage*

Die GEOSOLA-Forschungsanlage liegt auf einer pleistozänen Hochterrasse der Riß-Eiszeit, die teilweise durch eine Löß- bzw. Lößlehmbedeckung überlagert wird. Nachdem die Bohrarbeiten ausgeführt wurden, konnten für den Standort die in nachstehender Tabelle zusammengefassten Schichtfolgen ausgewiesen werden.

| <i>Gesteinsserie:</i> | <i>Mächtigkeit</i> |
|----------------------------------|--|
| Lößlehmdecke | ca. 12 m |
| Schotter der Hochterrasse | ca. 13 m |
| Schlierenserie (schluffig-tonig) | ca. 100 – 120 m |
| Linzer Sande | bis Endteufe der Bohrungen nicht angetroffen |
| Kristallin der Böhmisches Masse | bis Endteufe der Bohrungen nicht angetroffen |

Tabelle 37: Zusammenfassung der für den Standort vorherrschenden Schichtenfolgen

Es wurden keine Linzer Sande und kein Kristallin erbohrt.

Innerhalb der Deckenschotter existiert ein ca. 5-8 m mächtiger Aquifer der eine gegen Ost bis Nordost gerichtete Grundwasserabströmung aufweist. Der GW-Flurabstand liegt am Standort bei ca. 18–20 m ab Geländeoberkante (GOK).

Der darunter liegende Schlier fungiert dabei als Grundwasserstauer. Dieser weist abschnittsweise wassererfüllte Klüfte auf.

Gespannte Grundwasserverhältnisse wurden nicht erbohrt.

Die Wassertemperatur liegt bis zu einer Teufe von ca. 54 m unter GOK bei 11,5-11,6 °C, danach steigt sie auf über 12 °C an. Von ca. 57 m unter GOK bis 67 m unter GOK ist ein Temperaturplateau zu erkennen.

In der Bohrung β , welche als Grundwasserpegel ausgebaut wurde, erfolgten hydrodynamische Messungen (Bestimmung der Grundwasserfließrichtung und Strömungsgeschwindigkeit) im August 2009.

Die Messmethoden lieferten folgendes Ergebnis:

- Strömungsrichtung: SE (ca. 130°)
- Mittlere Abstandsgeschwindigkeit: 8,5 m/Tag (Vektor) – 9,5 m/Tag (Mittelwert)

B) Verpressung der Forschungssonden

Um einen möglichst verlustfreien Wärmefluss zwischen umgebendem Gebirge und dem Wärmetauscher (CO₂-Rohr bzw. PVC-Sondenrohr) zu gewährleisten, wurde das untersuchte Material mit der höchsten gemessenen Wärmeleitfähigkeit zur Verpressung des Ringraumes verwendet. Dies ist ThermoCem der Firma HeidelbergerCement.

Um den Einfluss unterschiedlicher Verpressmaterialien auf das Wärmeentzugsverhalten von Erdwärmesonden untersuchen zu können, wurde ein Abschnitt einer Bohrung mit einer anderen Verpressung, Material 3 [Abschnitt 3.1], verfüllt. Somit kann aus dem Vergleich der entzogenen Wärmeenergien je Meter Sonde der Einfluss des Verpressmaterials auf die Energieausbeute dargestellt werden.

In Tabelle 38 sind die Bohrungen samt Ausbau und Verpressung zusammengestellt.

| Bezeichnung | Bohrtiefe | Ausbau | Verpressung |
|---------------------|-----------|---|--|
| Sonde α -1 | 85 m | Pegelausbau, Verfilterung bis 30 m unter GOK | ab 30 m bis GOK: Verfüllung mit Thermocem |
| Sonde α -2 | 100 m | 1 U- + 1 ER-CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde | 100 – 60 m: Thermocem 60 – 30 m: Zement-Bentonit-Mischung (Material 3) 30 – 0 m: Thermocem |
| Sonde β | 28,5 m | GW-Pegelausbau | - |
| Sonde γ | 100 m | Pegelausbau | ab 27 m bis GOK: Verfüllung mit Thermocem |
| Sonde η | 100 m | CO ₂ -Sonde + PE-Solesonde | durchgehend Thermocem |
| Sonde ε | 50 m | 9 CO ₂ -Sonden + PE-Solesonde | durchgehend Thermocem |

Tabelle 38: Zusammenstellung der geplanten und ausgeführten Bohrungen

Teilziel 7.2: Betriebsverhalten von Hybridsonden

Die Hybridsonden in der Industrieforschungsanlage in Leonding befinden sich geologisch gesehen im selben Untergrund und weisen die gleiche Teufe auf (Sonde Alpha und Eta). Sie unterscheiden sich nur in der Verpressung.

Die mittleren Bodentemperaturen der unbeeinflussten Sonden wurden mittels LWL bzw. mittels Widerstandsthermometer bestimmt zu:

Sonde Alpha: $T_{m_{Boden}} = 11,74 \text{ °C}$

Sonde Eta: $T_{m_{Boden}} = 11,64 \text{ °C}$

Sonde Epsilon: $T_{m_{Boden}} = 10,61 \text{ °C}$

Anschließend wurde damit begonnen, die einzelnen Sonden in Bezug auf ihren Wärmeeintrag und Wärmeentzug bei unterschiedlichen Eintrittstemperaturen der Sole näher zu untersuchen.

Anhand der Diagramme in Kapitel 4.2 kann man erkennen, dass die 100 m-Sonde Alpha mit der Soleführung die besten Wärmeentzugs- und Wärmeeintragsleistungen bringt.

Für die Betrachtung der Wärmeentzugsleistungen der CO₂-Sonden wurden die beiden 100 m-Sonden Alpha und Eta untersucht.

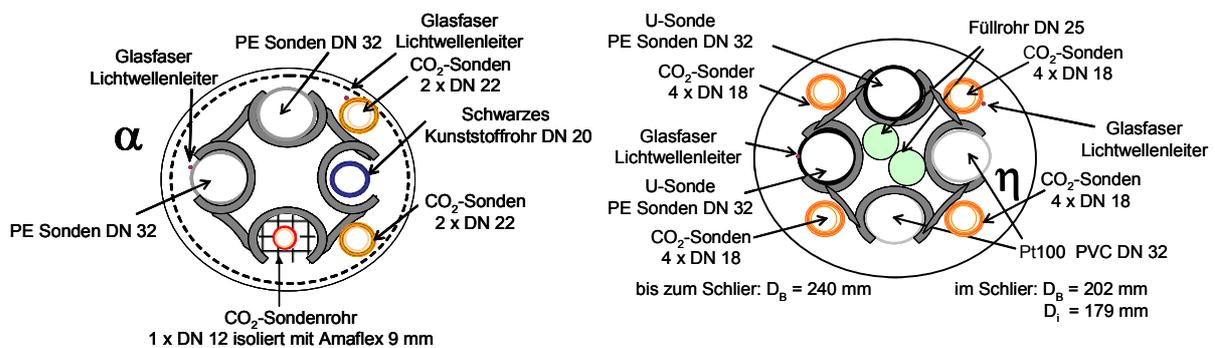


Abbildung 76 und 77: Querschnitte der Sonden Alpha und Eta

Es zeigt sich, dass beide Sonden annähernd gleiche Leistungen erzielen können.

Da die LWL-Messung ergab, dass beide Sonden nur etwa bis zur Hälfte (ca. 45 m) der gesamten Sondenteufe aktiv waren, kann keine spezifische Wärmeentzugsleistung in W/m angegeben werden.

Aus den Ergebnissen lässt sich erkennen, dass die spezifischen Wärmeentzugsleistungen der Solesonden etwa den allgemeinen VDI-Richtlinien 4640 entsprechen.

Weiters wurde der Einfluss der Sondenlänge auf das Wärmeentzugsverhalten untersucht. Dabei zeigt sich, dass es durch eine Verdoppelung der Länge zu einer Verdoppelung der erzielbaren Gesamtleistung kommt. Die Wärmeentzugsleistungen in W/m bleiben annähernd gleich.

Die Wärmeflüsse entlang der Sonde sind in tieferen Schichten höher.

Teilziel 7.3: Potential und Grenzen der Nachladung

Eines der Hauptziele des Geosola-Projektes war es, die Einbeziehung überschüssiger Solarwärme technisch umzusetzen und zu quantifizieren. Zur Abgrenzung der Kurzzeit- von der Langzeitspeicherung wurde der Zeithorizont zwischen wenigen Stunden bis maximal einer Woche definiert. Es wurde weiters untersucht, ob solare Überschüsse, die beispielsweise an einem sonnigen Tag gewonnen werden, zur Temperierung in der Nacht oder während einer kurzen Schlechtwetterperiode genutzt werden können.

Dabei zeigte sich vor allem die Grundwasserfahne in 20 m Tiefe. Wärme kann in diesem Bereich kaum eingebracht werden; bereits bei Beginn des Abklingens liegt das Temperaturniveau hier um 10 – 11 °C tiefer als im undurchströmten Ringraum. Nach bereits 14 h ist die Temperatur auf das Niveau des ungestörten Grundwassers abgeklungen.

Von Grundwasser durchströmte Sonden eignen sich somit nicht für den Speicherbetrieb. Aus den gewonnenen Daten lässt sich jedoch ablesen, dass eine Kombination von Solarthermie und Geothermie mit integrierter Speicheroption anzustreben ist [Kapitel 4.3].

Mit einem richtig dimensionierten Lade- und Entladeplan („Bewirtschaftungsprogramm“) kann außerdem das Abkühlen des Untergrundes verhindert werden.

Mit der Sonde 4 (Sonde ϵ) konnten experimentell folgende Zeithorizonte zur Speicherung nachgewiesen werden:

| Untergrund | t(50%) [h] |
|-------------------|-----------------------|
| Deckschicht | 17,72 |
| Aquifer | 1,43 |
| Schlier | 10,1 |

Tabelle 39: Speicherbarkeit von Wärme im Untergrund

Die effektivste Kurzzeit-Speicherung darf somit für den obersten, untiefen Sondenbereich angenommen werden.

Teilziel 7.4 + 7.5: Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse

In Kapitel 5 des Endberichts werden verschiedene EWS-Anlagen detailliert beschrieben und verglichen. Folgende Daten sollen hier herausgegriffen und gesondert analysiert werden:

Ein wichtiger Faktor zur Abschätzung von Kosten oder Effizienz ist die Jahresarbeitszahl („JAZ“ oder „COP“ von „Coefficient of Performance“).

Es wurden die JAZ von drei Anlagen ermittelt: St. Oswald, Steyr und Neumarkt. Diese werden im Folgenden mit **(1)**, **(2)** und **(3)** bezeichnet. In den Tabellen werden ein Vergleich zu konventionellen Energieträgern und eine rechnerische Amortisationsdauer bei Einsatz dieser drei Anlagen dargestellt. Dabei wird von Haushaltsenergiepreisen (Strom, Erdgas) Stand September 2011 ausgegangen.

Es ist zu beachten, dass sich die Jahresarbeitszahl in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern verändern kann: Beispielsweise Vorlauftemperatur, Sondereinlauf-temperatur und Umgebungstemperatur. In diesem Berechnungsbeispiel wurden die durchschnittlichen JAZ des Beobachtungszeitraums verwendet.

| | Elektr. Energie | Erdgas | (1) St.Oswald |
|--------------------------------|-----------------|--------|---------------|
| Preis/kWh | 17 | 7 | 4,86 |
| COP | - | - | 3,5 |
| Investitionskosten | 2546,5 | 6111,6 | 15279 |
| kWh/a | 10186 | 10186 | 10186 |
| Preis/Jahr | 1731,62 | 713,02 | 494,7 |
| Amortisationszeit | - | 13,50 | 14,4 |
| Amortisationszeit (gg. Erdgas) | - | - | 14 |

| | Elektr. Energie | Erdgas | (2) Steyr |
|--------------------------------|-----------------|--------|-----------|
| Preis/kWh | 17 | 7 | 3,86 |
| COP | - | - | 4,4 |
| Investitionskosten | 3750 | 9000 | 22500 |
| kWh/a | 15000 | 15000 | 15000 |
| Preis/Jahr | 2550 | 1050 | 579,5 |
| Amortisationszeit | - | 13,50 | 13,3 |
| Amortisationszeit (gg. Erdgas) | - | - | 9,6 |

| | Elektr. Energie | Erdgas | (3) Neumarkt |
|--------------------------------|-----------------|--------|--------------|
| Preis/kWh | 17 | 7 | 4,94 |
| COP | - | - | 3,44 |
| Investitionskosten | 5575 | 13380 | 33450 |
| kWh/a | 22300 | 22300 | 22300 |
| Preis/Jahr | 3791 | 1561 | 1102,0 |
| Amortisationszeit | - | 13,50 | 14,5 |
| Amortisationszeit (gg. Erdgas) | - | - | 14,6 |

Tabelle 40: Amortisationszeit und COP. Vergleich Heizsysteme rein elektrisch, Erdgas und EWS/WP-Anlagen.

| Parameter | | |
|----------------------------|-------|-------|
| Investition Elektroheizung | 250 | €/kWh |
| Investition Gasheizung | 600 | €/kWh |
| Investition EWS/WP | 1500 | €/kWh |
| Anlage Steyr | 15000 | kWh/a |
| Nutzungsdauer | | |
| Elektroheizung | 40 | a |
| Nutzungsdauer | | |
| Gasheizung | 15 | a |
| Nutzungsdauer | | |
| Geothermie | 30 | a |

Tabelle 41: Parameter für die Amortisationszeit-Bestimmung

In der Realität werden Heizsysteme, die oberflächennahe Geothermie nutzen, so ausgelegt, dass ein längerer Nutzungszeitraum als z.B. bei Gasheizthermen gegeben ist. Die Amortisationszeit sinkt dementsprechend auf unter 15 Jahre, obwohl die Anfangsinvestition für geothermische Energiequellen deutlich höher liegen. Weiters fällt die Bilanz bei steigendem Gaspreis immer besser zugunsten der Geothermie aus; dieser unterliegt jedoch an den momentanen Rohstoffmärkten starken Schwankungen und kann nicht seriös vorausgesagt werden.

Zusammenfassend kann mit den vorliegenden Betriebsdaten die gegenüber einer anderen Wärmequelle gesteigerte Effizienz belegt werden.

4 AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN

Im Rahmen des Projekts GEOSOLA wurde ein unterirdisches Forschungslabor aufgebaut, in dem unterschiedliche Sonden in betriebsüblichem Maßstab eingerichtet wurden, wobei diese Sonden mittels Prozessleitsystem ausschließlich für Forschungsaufgabenstellungen und zur Gewinnung von empirischen Daten genutzt werden können. Nach einer ca. einjährigen Bauphase wurden über die letzten 2 Jahre verschiedenste Untersuchungen durchgeführt, wobei anlagenseitig kontinuierlich Ergänzungen und Verbesserungen erfolgten und damit nach Abschluss dieses Projekts eine weitere Nutzung der Anlage für Forschungszwecke so auch als unbedingte Notwendigkeit gesehen werden muss.

Möglichkeiten und Ideen für weiterführende Untersuchungen hinsichtlich des Betriebs der Erdwärmeaustauschsonden, ob nun mit Sole, mit CO₂ oder in Kombination, stehen verschiedene zur Auswahl, die noch bezüglich Nutzungspotenzial und erforderliche Ressourcen zu evaluieren sein werden.

Aufgrund der Ergebnisse im Bereich der Nachladung des Untergrundes stehen weiterführende Untersuchungen hinsichtlich periodischer Regeneration des sondennahen Ringraumes bzw. einer quasi Nachladung mit den in der GEOSOLA-Forschungsanlage eingerichteten unterschiedlichen Sondenkonfigurationen auf der Liste der im Anschluss geplanten Vorhaben.

Auf Basis der bestehenden Kenntnis der in der GEOSOLA-Anlage vorhandenen Erdwärmesonden können so in Folge Untersuchungen hinsichtlich eines periodischen Wärmeziehens im Vergleich mit einem konstanten Lastbetrieb in Bezug auf die Leistungsfähigkeit betrachtet werden. Hier ist insbesondere der Impulsbetrieb von Interesse, der im Erfolgsfalle eine betriebliche Verbesserung des Wärmeaustausches in Erdwärmesonden ermöglichen könnte.

Auch die Idee von teilverpressten Sonden, die bisher noch nicht Eingang in die oberflächennahen Wärmeaustauschprozesse gefunden haben, birgt Aspekte, die theoretisch betrachtet eben nur in einer derartigen Forschungsanlage auch in Folge praktisch untersucht werden kann.

Ein weiterer Aspekt für die zukünftige Nutzung der GEOSOLA-Forschungsanlage ist eine nähere Betrachtung der verpressten Hybridsonden zur Modellierung von Sonden mit unterschiedlichen Wärmeträgermedien in ein und demselben Untergrund.

Mittels einfacher Modelle können Daten erarbeitet und parallel wiederum mit realen Messdaten verglichen werden, um damit die erforderlichen Anpassungen an die theoretischen Beschreibungen zur Entwicklung einfacher Bemessungs- und Berechnungsmodellen für Sondenanwendungen sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb zu erhalten.

Hinsichtlich offener Sonden sind Evaluationen von unterschiedlich konfigurierten Wärmeübertragern eine weitere Zielsetzung, die die Beschreibung des Potenzials der Anwendung in der Grundwasserwärmenutzung betrifft. Hierin ist auch die Betrachtungen solcher Sondengeometrien, im speziellen des Wärmeübertragers und des Strömungsrohres selbst, zur Bemessung und Entwicklung von Kurzsonden miteinbezogen.

Nicht zuletzt seien hier auch noch Veranstaltungen und Seminare in einem großen Geothermielabor erwähnt, das zum besseren Verständnis oder auch zur Aus- und Weiterbildung für Interessierte an der Geothermie zur Verfügung steht als auch die bereits durchgeführte und weiterhin geplante Einbindung bestimmter Wärmeaustauschprozesse der oberflächennahen Geothermie für Praktikumsbeispiele für StudentInnen der TNF der Johannes Kepler Universität Linz.

5 LITERATURVERZEICHNIS

[1] Parham Eslami-nejad, Michel Bernier, Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors using double U-tube boreholes with two independent circuits, Applied Thermal Engineering, Volume 31, Issues 14-15, October 2011, Pages 3066-3077, ISSN 1359-4311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.05.040.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431111003000>)

[2] Valentin Trillat-Berdal, Bernard Souyri, Gilbert Achard, Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors, Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issue 10, Heat transfer and sustainable energy technologies, July 2007, Pages 1750-1755, ISSN 1359-4311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.07.022.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431106002559>)

[3] L. Rybach, W. J. Eugster, Sustainability Aspects of Geothermal Heat Pumps, PROCEEDINGS, Twenty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2002
SGP-TR-171

[4] Patrice Pinel, Cynthia A. Cruickshank, Ian Beausoleil-Morrison, Adam Wills, A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 7, September 2011, Pages 3341-3359, ISSN 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.013.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211100150X>)

[5] <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab084.pdf>, Zugriff am 8.9.2011

[6]

http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/broschueren/dimensionierungshilfe_sonnenkollektoren_07.pdf, Zugriff am 8.9.2011

- [7] Schmid Stefan Peter, Erhöhung des Energieertrages eines untertägig geschlossenen Geothermischen Wärmetauschers durch die Verwendung geeigneter wärmeleitender Zementrezepturen: Dissertation, TU-Berlin 2004 http://edocs.tu-berlin.de/diss/2004/schmid_stefanpeter.pdf
- [8] C. S. Dai, Y. Chen, J. Zhao, An experimental simulation on heat transfer characteristics of a downhole heat exchanger, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 9-11, 2009 SGP-TR-187
- [9] Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdgekoppelter Wärmepumpen: VDI 4640 Richtlinien, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf, Beuth Verlag, Berlin 1998
- [10] Kölbl Thomas, Grundwassereinfluss auf Erdwärmesonden: Geländeuntersuchungen und Modellrechnungen, Dissertation, Karlsruher Instituts für Technologie 2010
- [11] S. Gehlin, "Thermal Response Test, Method Developmet and Evaluation," Doctor's thesis, Department of Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, 2002.
- [12] A. Peterlunger and M. Ehrbar, "Pumpenlose Erdwärmesonde, Phase 1: Potentialabklärung, Machbarkeitsstudie energetisch und wirtschaftlich," Bundesamt für Energie, Buchs2004.
- [13] "Wärmeleitung," in *VDI-Wärmeatlas*. vol. 10, ed, 2002, pp. Ea1-Ec24.
- [14] H. Fujii, H. Okubo, and R. Itoi; Thermal response tests using optical fiber thermometers; Geothermal Resources Council Transactions 30 (2006) 545-551.

IMPRESSUM

Verfasser

Johannes Kepler Universität Linz Institut für
Verfahrenstechnik

Wolfgang Samhaber
Welser Str. 42, 4060 Leonding
Telefon: 43 732 672 509 11
E-Mail: wsa@jku.at
Web: www.ivt.jku.at/Geothermie/Projekt.htm

Projektpartner

Austrian Institute of Technology – AIT
Alpine Bau GmbH
M-TEC Mittermayr GmbH
GVT Verfahrenstechnik GmbH

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die
Weiternutzung der hier enthaltenen
Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH