

ENERGIE DER ZUKUNFT

Geosola -

Möglichkeiten, Bemessung und Grenzen neuer Hybrid- Erdwärmesondenkonzepte

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 ist, 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 W/m \pm 15,9 W/m erbracht hat. Zum anderen sollen Temperaturprofilmessungen neu errichteter Sole- und CO₂-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 CO₂-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 Projektvorhaben des GEOSOLA-Projektes adressiert sich vor allem an das Themenfeld 6: Fortgeschrittene Verbrennungs- und Umwandlungstechnologien. 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 dem in diesem Projekt GEOSOLA speziell ausgestatteten 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

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Arbeitspaket 1: Untergrundeigenschaften

Teilziel 1.1: Ausführung der Bohrungen für die EWS

A) *Geologische Standortbeschreibung*

Die Erdwärmetiefsonden (EWTS) 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
Schlierserie (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 Erdwärmesondenbohrungen 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 Kluftwasserführung 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 Erdwärmennutzungen

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 Erdwärmetiesondenanlagen, die jedoch durch die GEOSOLA Forschungsanlage nicht beeinträchtigt werden.

In Abbildung 1 sind die bestehenden Bohrungen und Erdwärmennutzungen dargestellt.

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 der Hilfsverrohrung oder die Bohrspülung gesicherte Bohrloch (einschließlich der Messrohre für die Lichtwellenleiter-Kabel).

Die Überwachung des Einbaus und laufende Überprüfung der konfektionierten Sondeanordnungen 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 Verpressprotokolle und Sondenprüfprotokolle, einschließlich der Kontrolle des Verfüllungsprozesses und der Verpressmasse).

E) Ausführung der Bohrungen

Schwierigkeiten bei der Herstellung der Bohrungen zeigten sich aufgrund der inhomogenen Untergrundeigenschaften und des nicht adäquaten Bohrverfahrens bzw. 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 müssen vor dem Sondeneinbau weitere Reinigungsarbeiten durchgeführt werden. Aus diesem Grund konnten auch die Bohrlochmessungen in dieser Bohrung 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 ergab sich aufgrund bohrtechnischer Probleme. In Bohrung α -1 kam es im Zuge der Bohrabteufung bei ca. 105 m zu einem Bruch des Bohrgestänges. Der Bohrkopf und das im Bohrloch verbliebene Bohrgestänge konnte 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 30m 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

1. 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 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) 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 Partikelgeschwindigkeit (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.

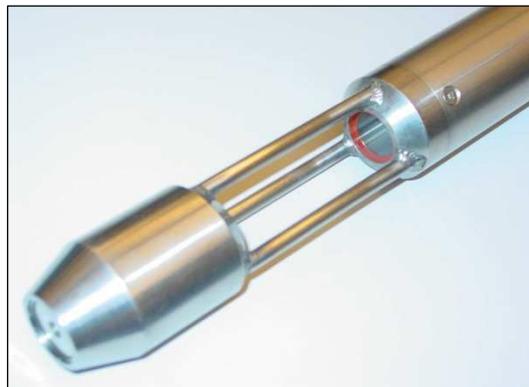


Abb.2, Colloidal Borescope – Detailansicht

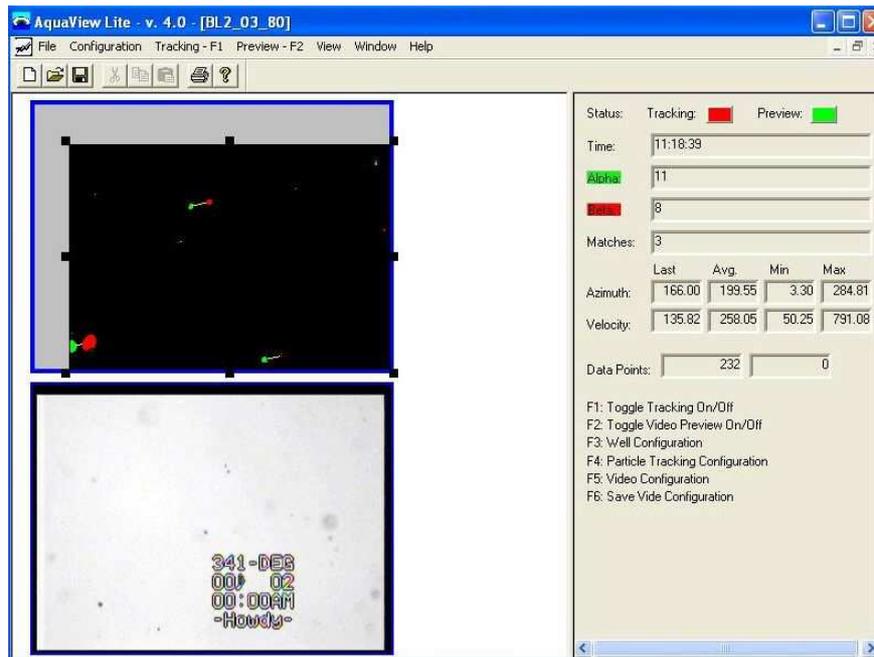


Abb.3, Software zur Erfassung der Partikel

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

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 Abbildungen dargestellt.

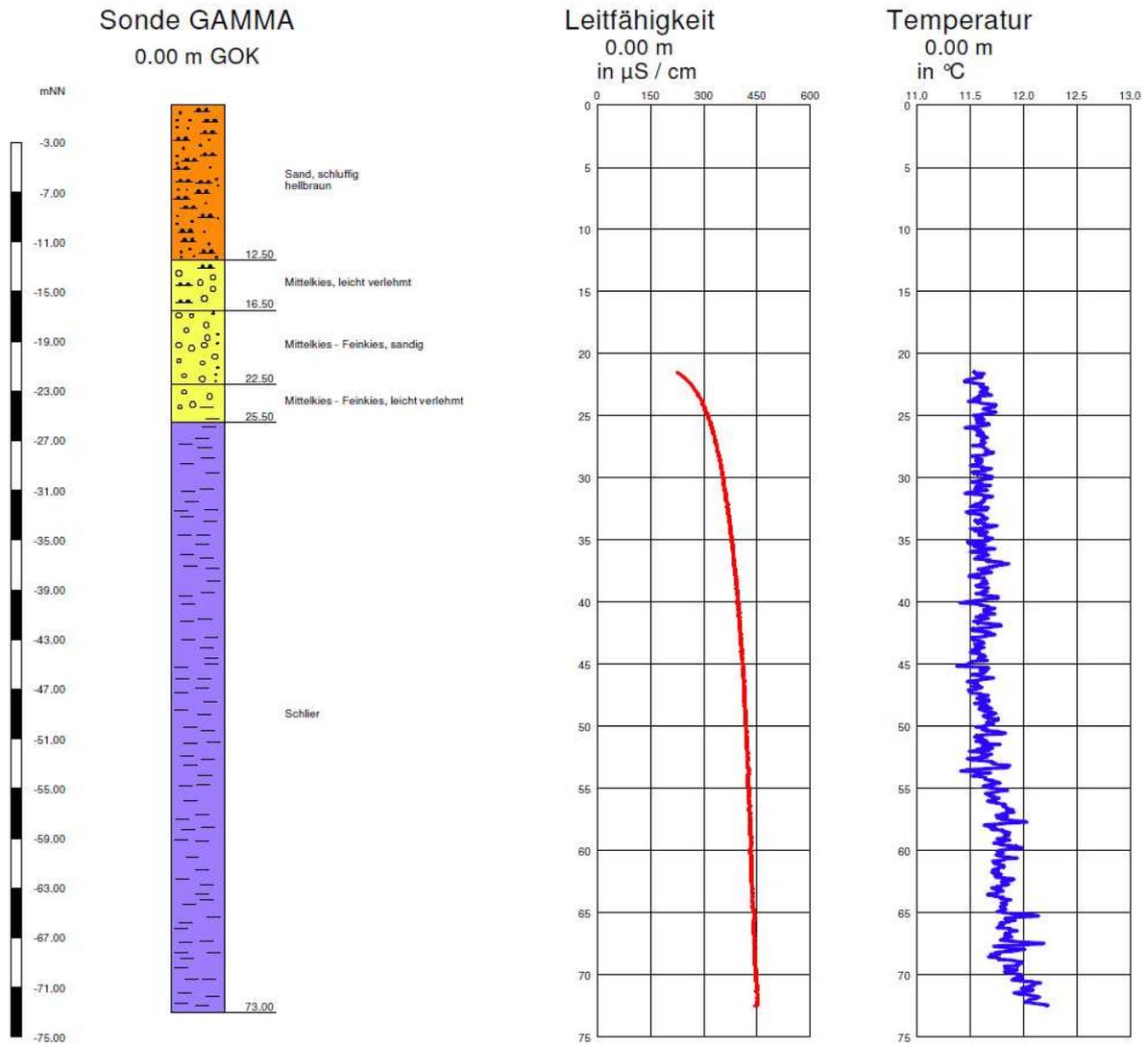
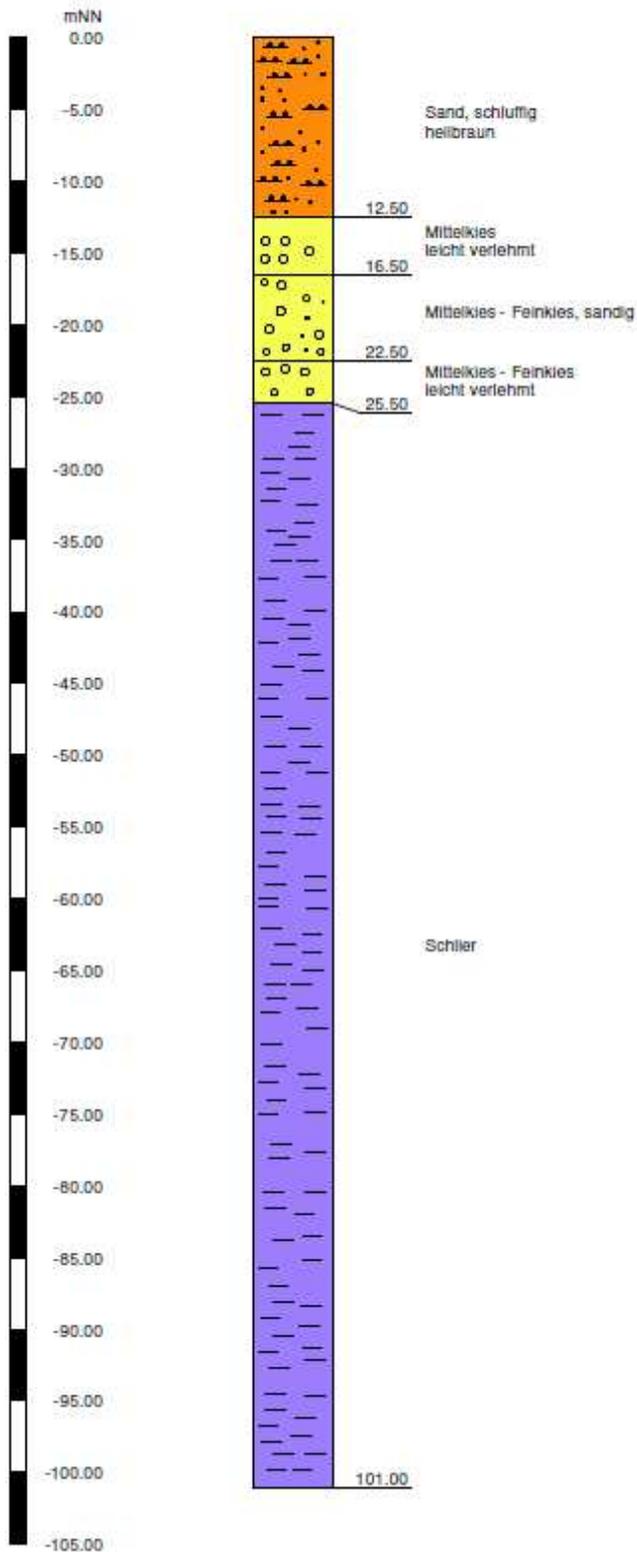


Abb.: 4, Temperatur- und Leitfähigkeitslog

Sonde ETA 0.00 m GOK



Natural Gamma 0.00 m in cps

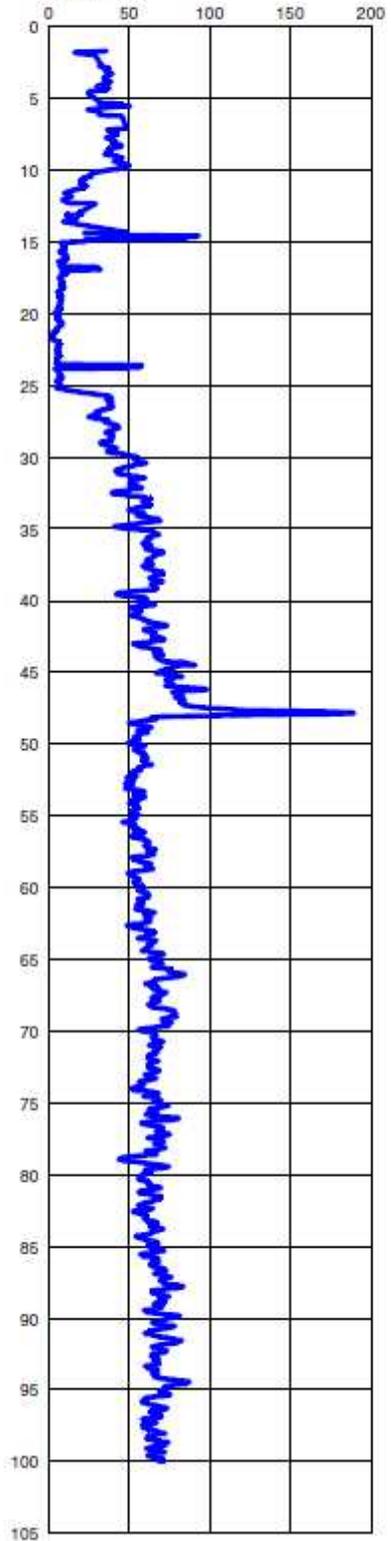


Abb.5 Natural Gammalog

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 vielen diese jedoch nicht auf, es existiert kein Eintrag im Bohrtagebuch über eine sich ändernde Geologie.

IV. Hydrodynamische Messung im hergestelltem 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 ROK, die freie Tiefe betrug 25,88 Meter. Auf Grund der geringen Höhe zwischen Wasserspiegel (WSP) und Sumpfroberkante (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. Abb. 6 zeigt die relevanten Datenpunkte.

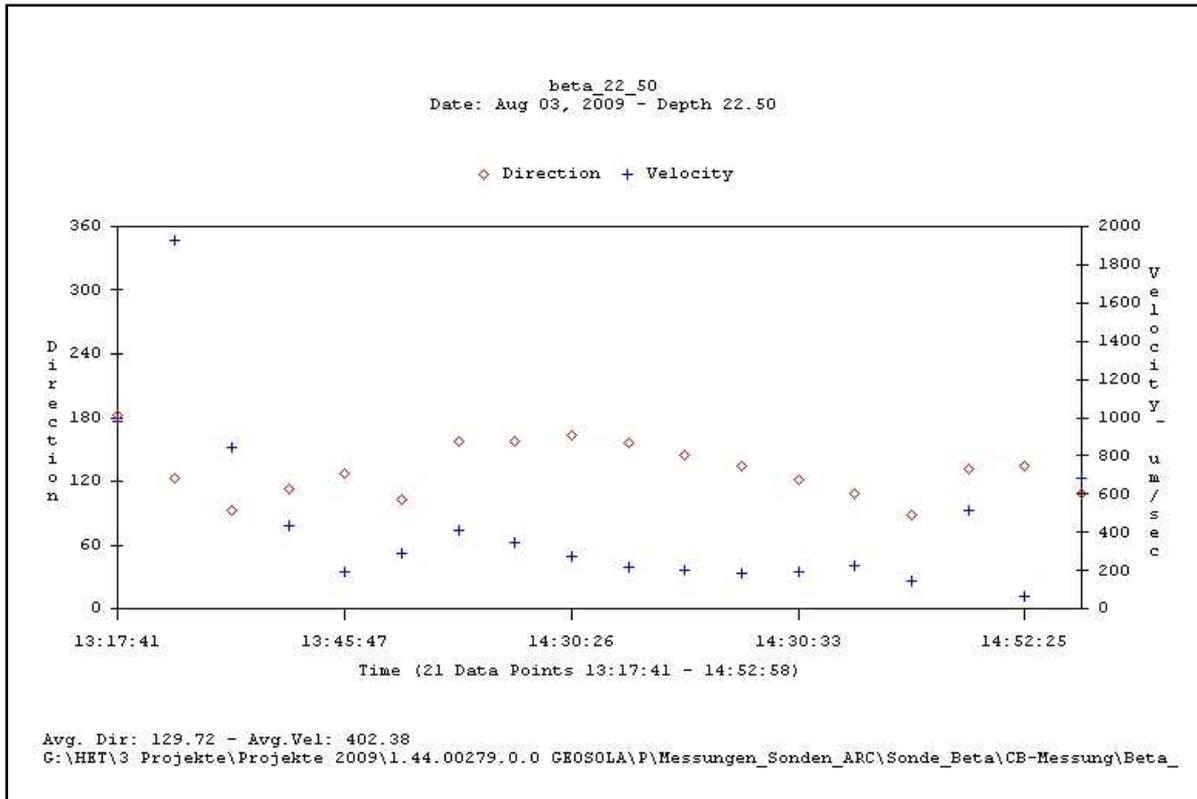


Abb. 6, Daten der hydrodynamischen Untersuchungen in der Beobachtungssonde

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 7 ist die Grundwasserströmungsrichtung in einem Übersichtslageplan auf Basis der ÖK 50 eingetragen.



Abb.7 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.

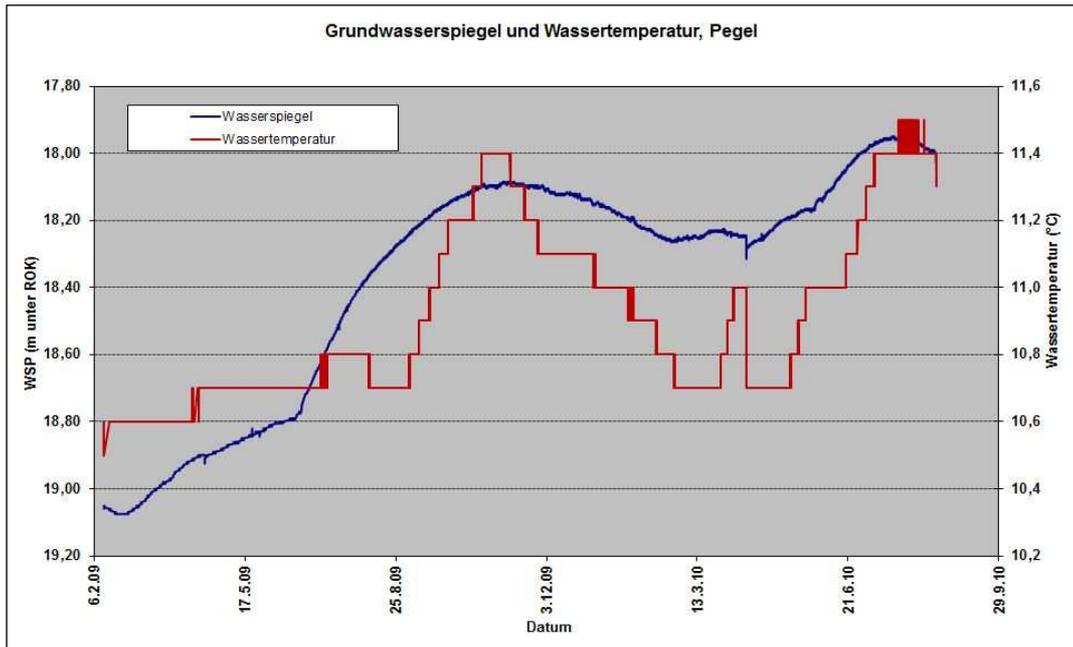


Abb. 8, Wassertemperatur und GW-Spiegel in der Beobachtungssonde

C) Videobefahrung Sonde Gamma

Die Sonde Gamma wurde an insgesamt 3 Terminen (28.10.2008, 12.2.2009 und 21.4.2009) 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.



Abb.9, Beschädigung der Mantelfläche des Filterrohres in der Sonde Gamma



Abb. 10, Beschädigung der Mantelfläche des Filterrohres in der Sonde Gamma



Abb. 11, 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 (J/(m^3K)), 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 12 ist der Messaufbau mit dem Gerät und der Messsonde dargestellt.

Abb. 12, 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
- Schlierenserie: 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 [%]
1,54	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 13 dargestellt:

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 Sonden dargestellt.

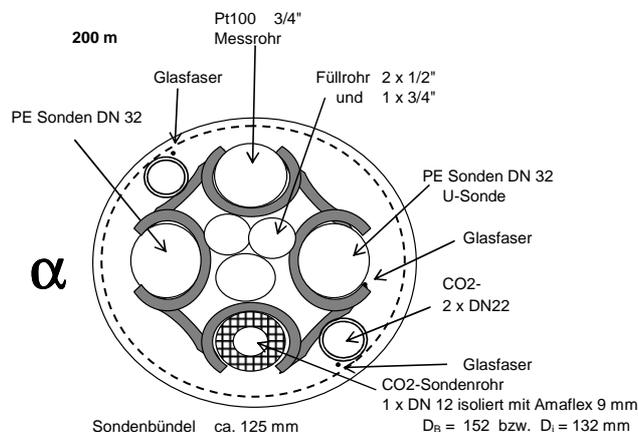


Abb. 14, Querschnitt der Sonde α

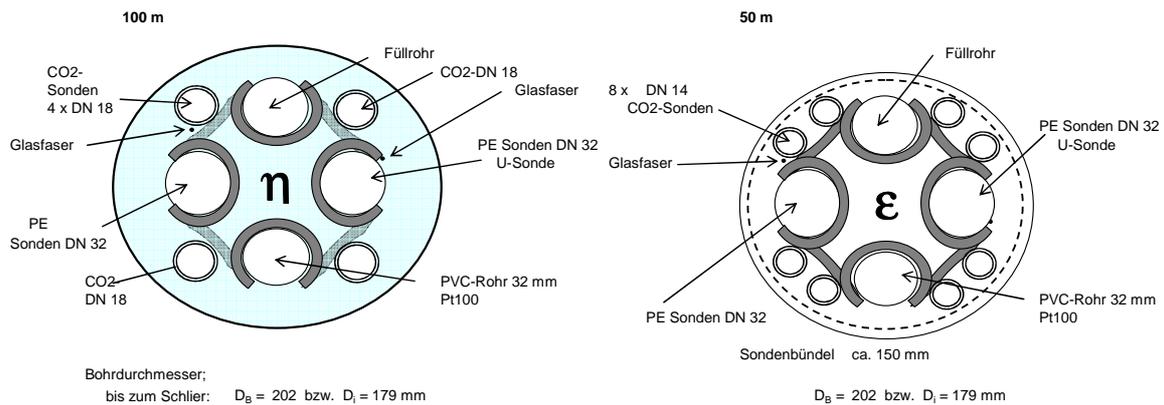


Abb. 15, Querschnitte der Sonden η und ε

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 Lichtwellenleiter, 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.



Abb. 16, Ausrichtung der Rohrbündel mittels Abstandshalter

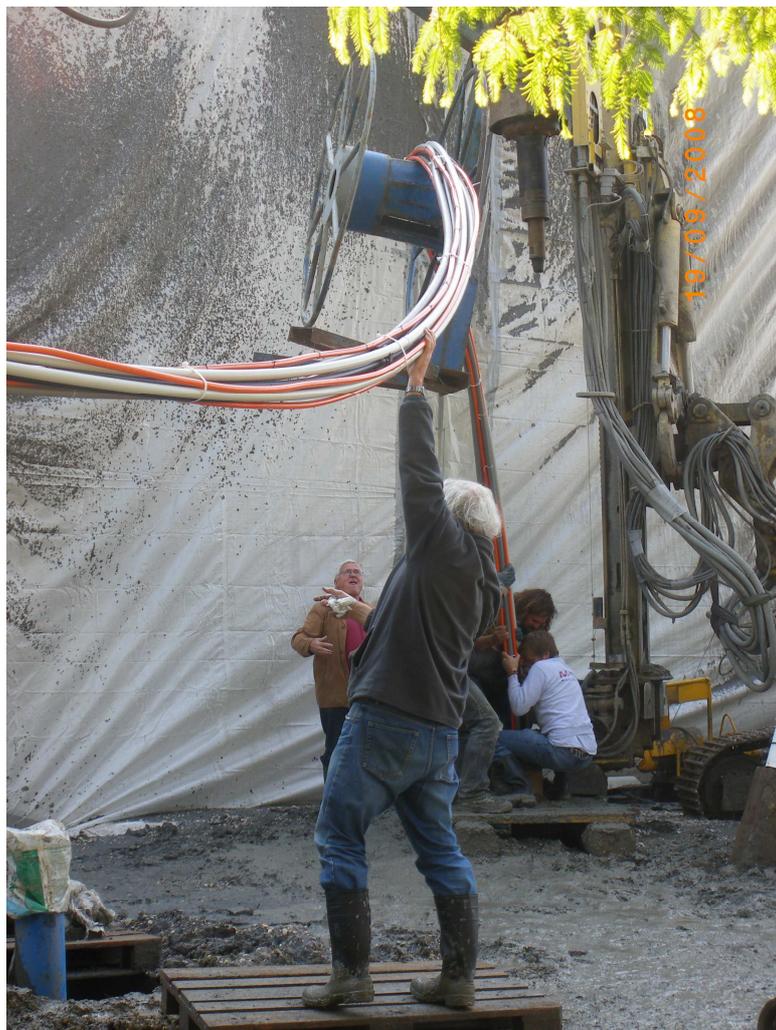


Abb. 17, Einbringung der Sonde in das Bohrloch

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.



Abb.: 18, Montage und Installation der Sondenperipherie

Teilziel 2.4: Instrumentierung, Steuerung, Software

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

Die WT 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. 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.

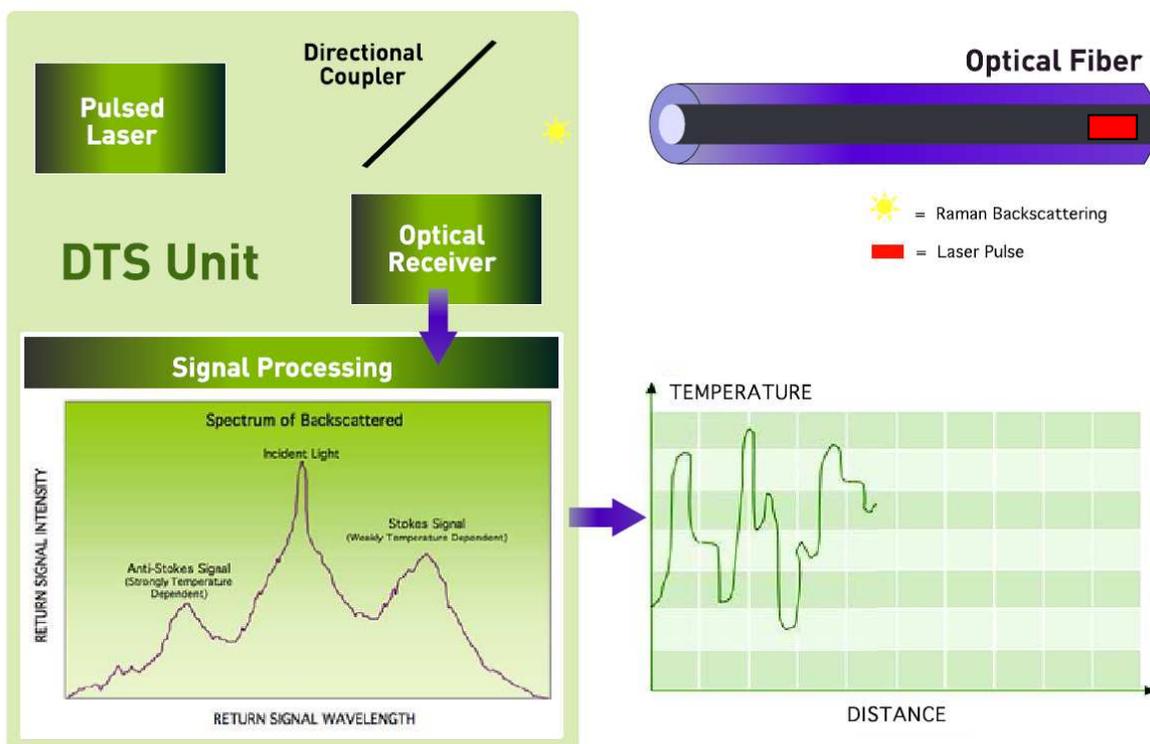


Abb. 19, Messprinzip des Sensortran-Systems

Im charakteristischen Streuspektrum erkennt man einen dominanten Peak, dessen Frequenz der des eingestrahlten 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.

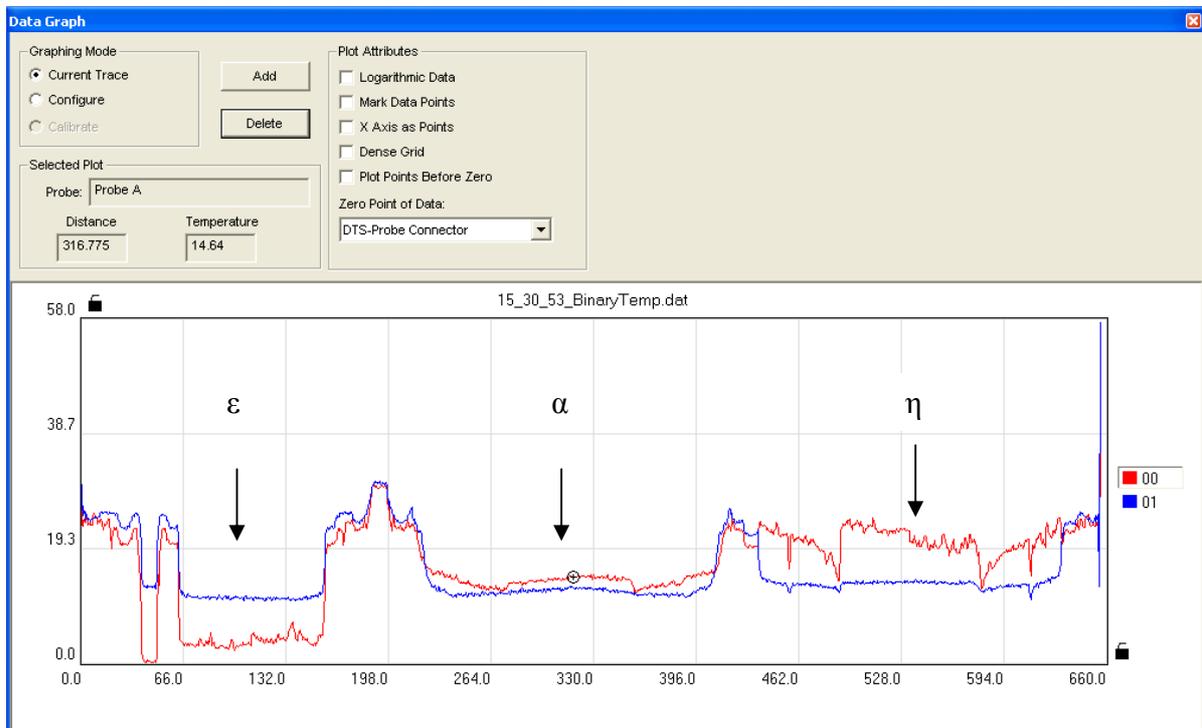


Abb.: 20, Betrachtung unterschiedlicher Temperaturkurven

Teilziel 2.4: Tests und Inbetriebnahme der Anlage

Durchführung der Thermal Response Tests 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 22 dargestellt. T_{ein} , T_{aus} und T_m werden während der gesamten Testzeit aufgezeichnet.

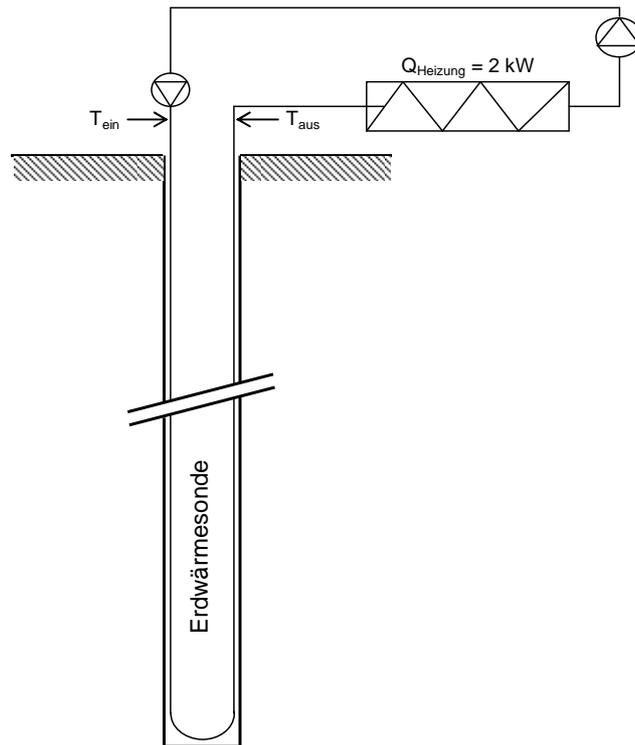


Abb.: 21, Schema des TRT

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:

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi H k}$$

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

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

I. Sonde eta

In den unten dargestellten Diagrammen sind die Temperaturverläufe während dem Test und die halblogarithmische Auftragung zu erkennen:

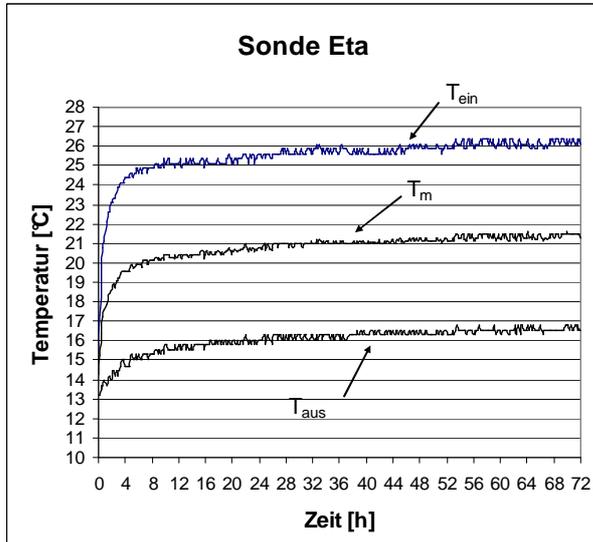


Diagramm 1, gemessene Temperaturkurven

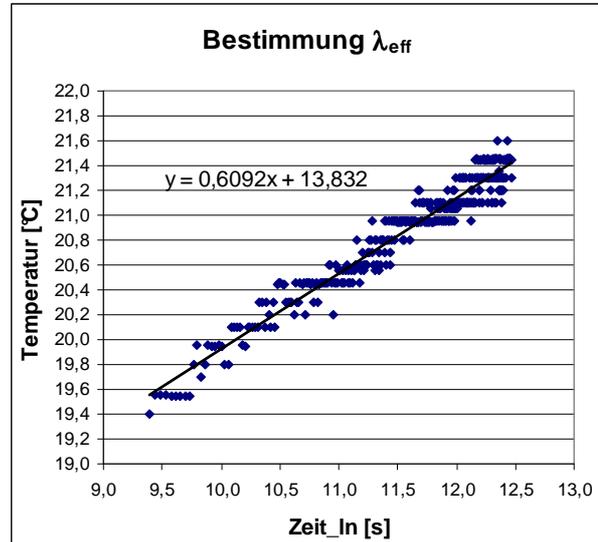


Diagramm 2, Regressionsgerade von T_m

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

Testparameter und Ergebnisse	
Bohrlochtiefe	$H = 97 \text{ m}$
Bohrlochradius	$r = 200 \text{ mm}$
Ungestörte Erdreichtemperatur	$T_0 = 11,69 \text{ °C}$
Messzeit	$t = 72 \text{ h}$
Wärmeleistung in EWS	$Q = 2000 \text{ W}$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{\text{eff}} = 2,61 \text{ W/(mK)}$
thermischer Bohrlochwiderstand	$R_b = 0,35 \text{ mK/W}$

Tabelle 6, Auswertung TRT – Sonde Eta

II. Sonde alpha

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:

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 abge bundenen 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 einem 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 wird 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, kieselensäurereiche 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 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 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. Diese sogenannten Baustellenmischungen sind in der Herstellung günstiger, weisen jedoch eine weit geringere Wärmeleitfähigkeit auf. Baustellenmischungen ohne thermische Verbesserung (Quarzsand oder Quarzmehl) weisen 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, KÜCHLER Anker-technik
- Dämmer Light, BTD- Bohrtechnik AG
- Duritherm, Fa. Betontechnik GmbH
- ThermoCem, HeidelbergZement

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 dem am Markt erhältlichen Produkten vier Fertigprodukte und eine Handmischung, welche auf der Baustelle aus Einzelkomponenten abgemischt wird, untersucht.

Im Detail waren dies:

I. 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 bleiben. 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 Dicht Suspensionen 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 in dem 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 TAZ (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 Aushärtevorganges. Bestimmt wird dabei die Probenhöhe von ausgehärteten Probekörpern, diese wird in Relation zur Ausgangshöhe gesetzt. Die Ermittlung der Volumenbeständigkeit erfolgte nur an Probekörper 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 Probenkörper 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 $+10\text{ °C}$ auf -10 °C
- 8 Stunden konstante Temperatur von -10 °C
- 4 Stunden auftauen auf $+10\text{ °C}$
- 8 Stunden konstante Temperatur von $+10\text{ °C}$

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 Probenkörper betrug $D = 80 \text{ mm}$, $H = 160 \text{ mm}$, von jedem Material wurden 2 Probenkörper befrosten. Nach 28 Frost-Tauzyklen erfolgte eine visuelle Beurteilung der Probenkörper 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 Probenkörpern, 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 Probenkörper mit den Abmessungen $15 \times 15 \times 5 \text{ cm}$ hergestellt. Der Probenkörper 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 Probenkörpern 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 Probenkörper.

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 η 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 η 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 Krafteinwirkung 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 Volumsverringerng 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 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 Abbildung 22 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, siehe Abb. 23. 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.

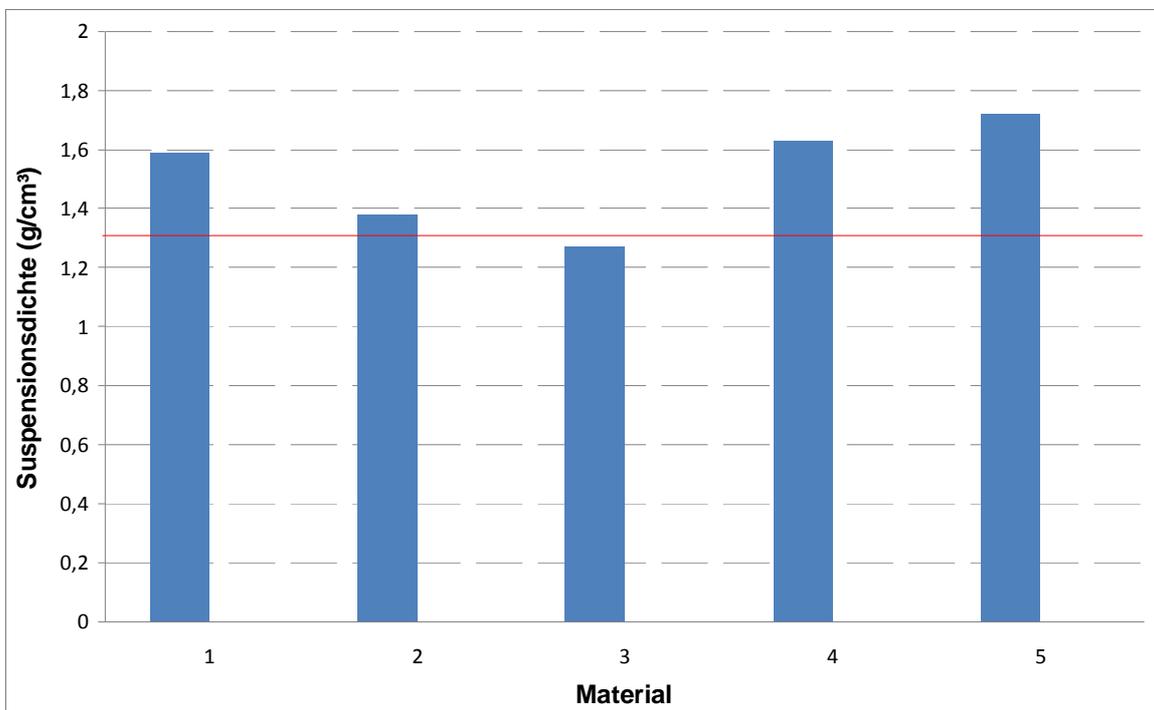


Abb.: 22, Zusammenstellung der gemessenen Suspensionsdichten

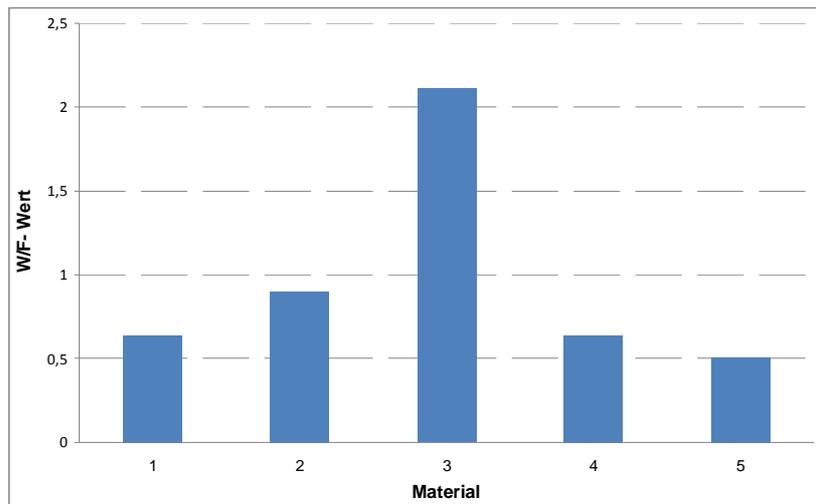


Abb.: 23, Zusammenstellung der errechneten W/F-Werte

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. Abb. 24. 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 holraumfreie Verfüllung.

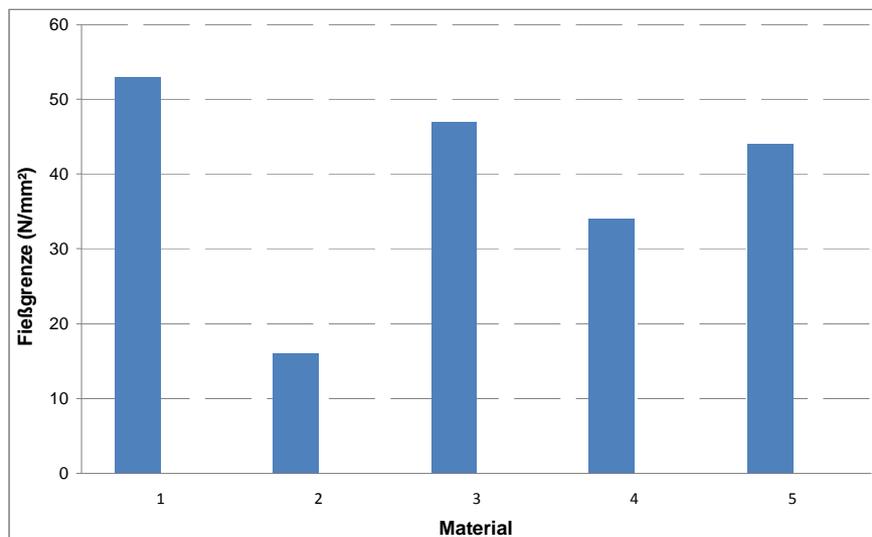


Abb. 24, Zusammenstellung der ermittelten Fließgrenzen

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 Abbildung 25. 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.

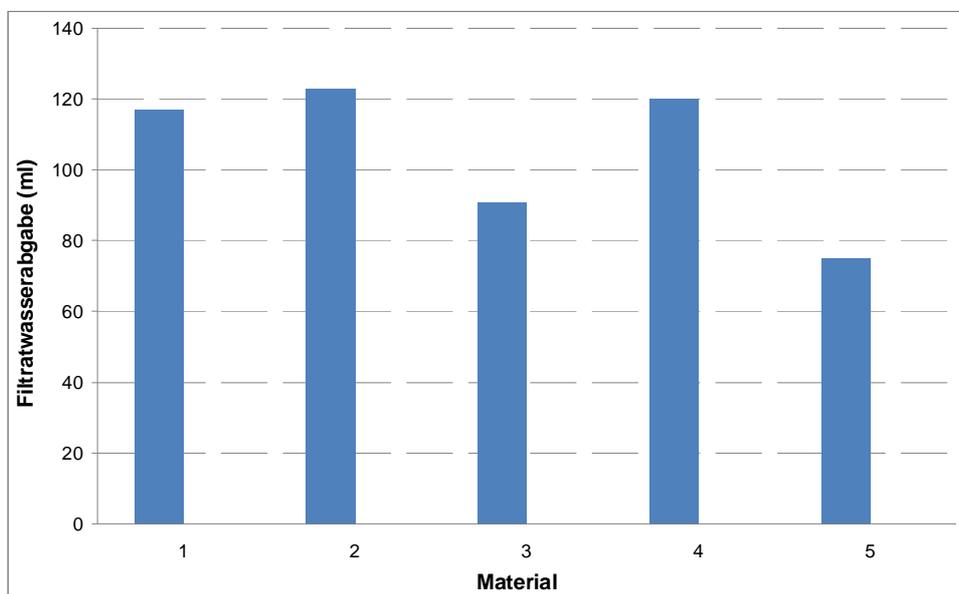


Abb.: 25, Zusammenstellung der gemessenen Filtratwasserabgaben

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.

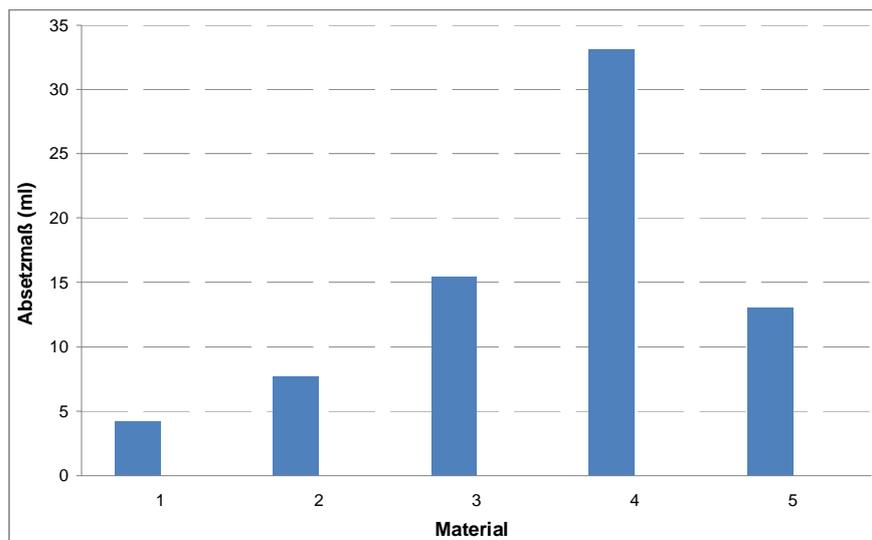


Abb.: 26, Zusammenstellung der nach 24 Stunden gemessenen Absetzvolumina

B) Eigenschaften der abgebundenen Suspensionen

I. Volumenbeständigkeit

Die Volumenbeständigkeit der einzelnen Materialien bezieht sich auf die Veränderung der Höhe von Probenkörper 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.

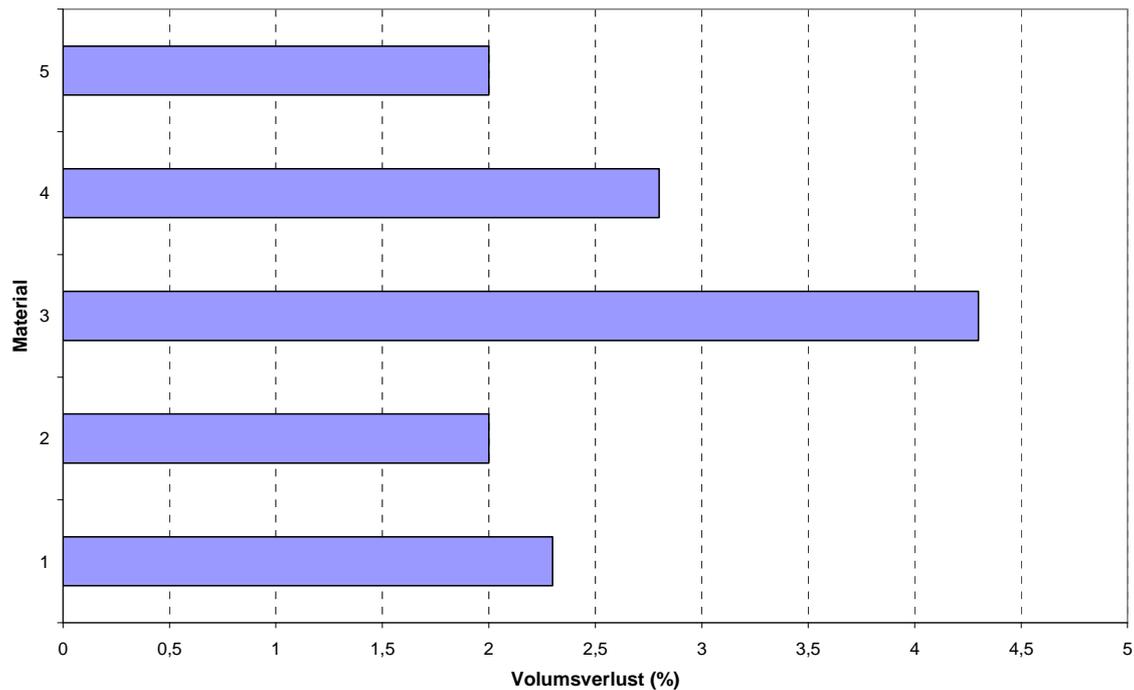


Abb.: 27, Zusammenstellung der gemessenen Volumenveränderungen an Probenkörper der Serie 1

II. Einaxiale Druckfestigkeit

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

Die Endfestigkeiten liegen dabei zwischen 3,2 N/mm² (Material 4) und 0,9 N/mm² (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 eine Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen von $q_f = 0,3 \text{ N/mm}^2$ gefordert. Dies im Hinblick auf eine ausreichende Erosionsstabilität. Alle untersuchten Materialien erreichen diese Vorgabe, bzw. überschreiten diesen Wert um ein Vielfaches.

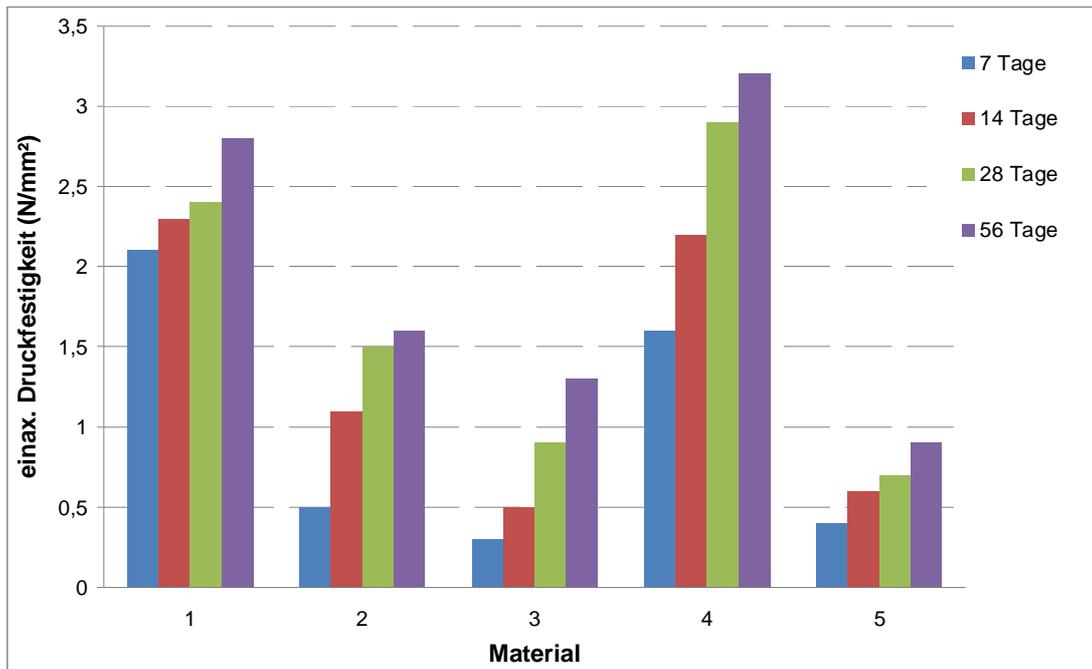


Abb.: 28, Zusammenstellung der gemessenen einaxialen Druckfestigkeiten an den Probekörpern zu verschiedenen Abbindezeitpunkten

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. Abbildung 29 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.

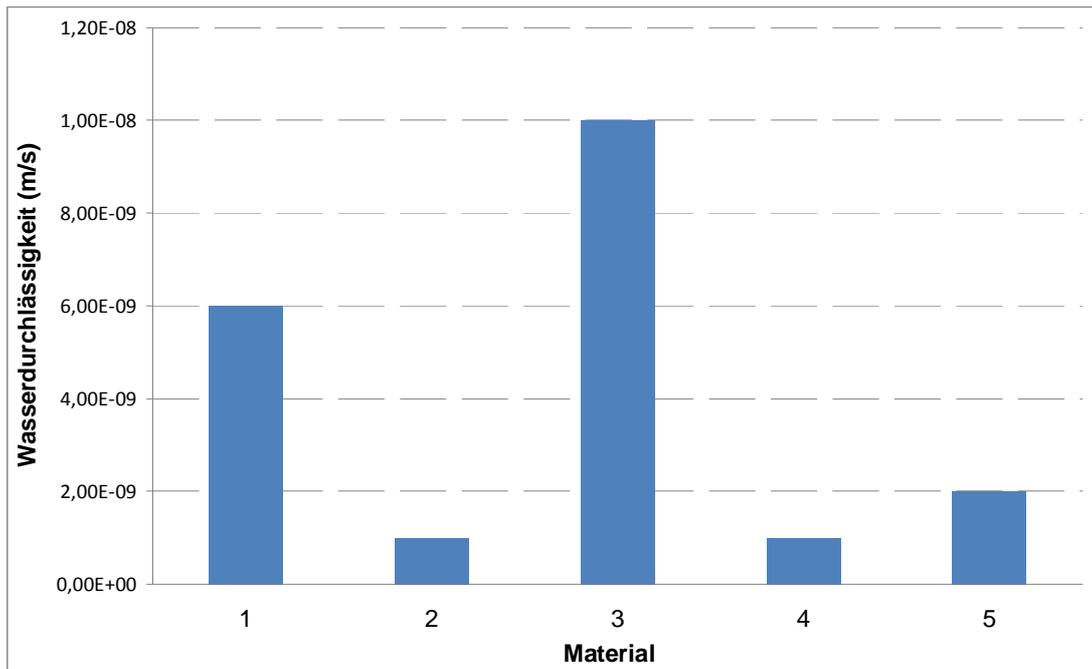


Abb.: 29, Darstellung der ermittelten Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten

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 um ca. um 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-Tauwechselfersuch. Dabei wurde ein quaderförmiger Probenkörper mit den Abmessungen $15 \times 15 \times 5 \text{ cm}$ hergestellt. Der Probenkörper 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.

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

Aufgrund der visuellen Beurteilung der Probenkörper 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 Probenkörpern.

VI. Wärmeleitfähigkeit der befrostenen und unbefrostenen Probenkörper

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an befrostenen Probenkörpern und parallel dazu an gleichaltrigen Proben ohne Befrostung. Die Ergebnisse der Messungen an den zylindrischen Probenkörpern sind in Abbildung 30 grafisch dargestellt.

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

Der Vergleich zwischen den Wärmeleitfähigkeiten von Probenkörpern mit und ohne Frosttauwechselbeanspruchung, ebenfalls in Abbildung 30 dargestellt, zeigt einen Unterschied. Am befrostenen Probenkörper werden dabei durchwegs geringere Wärmeleitfähigkeiten gemessen. Dies kann wie bei der einaxialen Druckfestigkeit auf eine Veränderung 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.

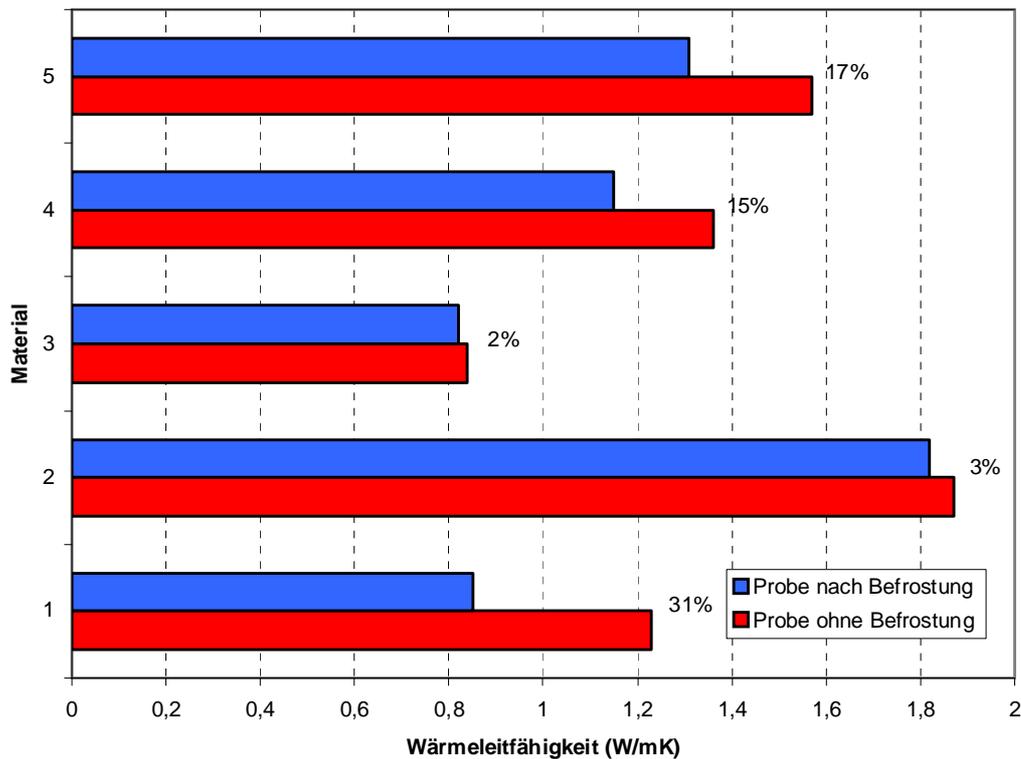


Abb.: 30, Grafische Darstellung der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten an befrosten Proben und an Vergleichsproben

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 Pumpbarkeit	gute Verarbeitbarkeit, gut verpumpbar	gute Verarbeitbarkeit, gut verpumpbar	gute Verarbeitbarkeit, gut verpumpbar	gute Verarbeitbarkeit, gut verpumpbar	gute Verarbeitbarkeit, gut verpumpbar
Suspensionsstabilität Volumsbeständigkeit	gut	gut	gering gut	gering ausreichend	gut
Suspensionsdichte	hoch	gering	zu gering nieder	hoch sehr hoch	Sehr hoch
Druckfestigkeit Druckfestigkeitsentwicklung	hoch, 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 gegenständliche Forschungsprojekt folgende Ergebnisse und Schlussfolgerungen zu berücksichtigen:

- I. Die untersuchten Fertigprodukte weisen hinsichtlich ihrer Suspensionseigenschaften als auch ihrer Eigenschaften im abgedunden Zustand große Unterschiede auf.
- II. Lässt man die Beständigkeit gegenüber Frost-Taubeanspruchung 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 Portlandzement sollten nicht verwendet werden.
 - Die Verwendung von zementstabilem, aktivierten 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 Verpresssuspension 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 mineral. Sanden oder Mehlen hoher spez. Dichte zielführender.

Materialauswahl und Ausführung der Verpressung der Forschungssonden

I. Materialauswahl

Um einen möglichst verlustfreien Wärmefluss zwischen umgebenden 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 α -1 und γ , welche als Pegel mit entsprechender Verrohrung ausgebaut wurden, erfolgte eine Abdichtung und Verfüllung über dem Filterrohren 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

Tabelle10, 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 Anlage beigefügt, die ermittelten Parameter der frischen Suspensionen entsprechen den Vorgaben.

Arbeitspaket 4: Forschungsprogramme

Teilziel 4.1: Wärmestromdichten und Verfüllmassen

Dabei wurde vor allem der Unterschied der beiden 100 m Sonden alpha und eta während dem Betrieb 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.

Teilziel 4.2: Wärmeeintrag und Wärmeentzug in und mit der Sonde

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 5 dargestellt.

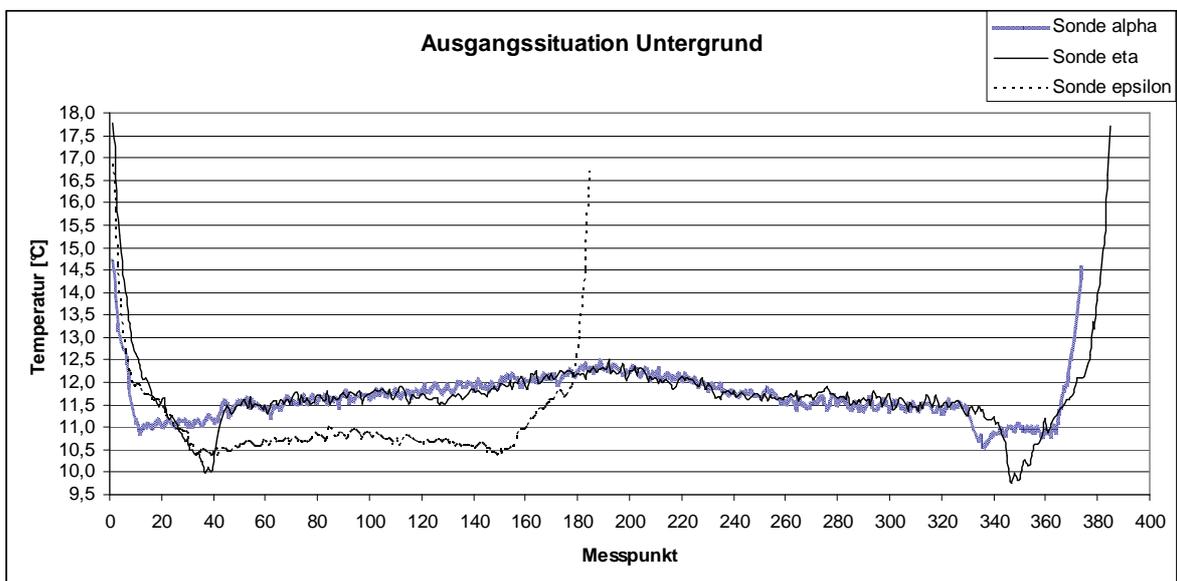


Diagramm 5, Temperaturprofil der einzelnen Sonden vor Start der einzelnen Programme

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

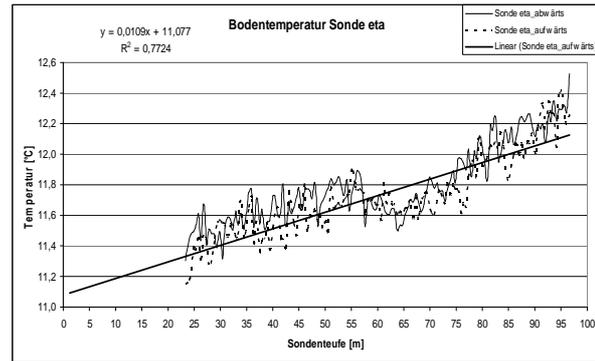
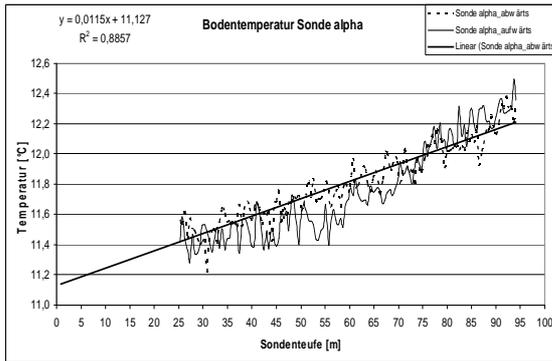


Diagramme 6 und 7, Bodentemperatur der Sonden alpha und eta

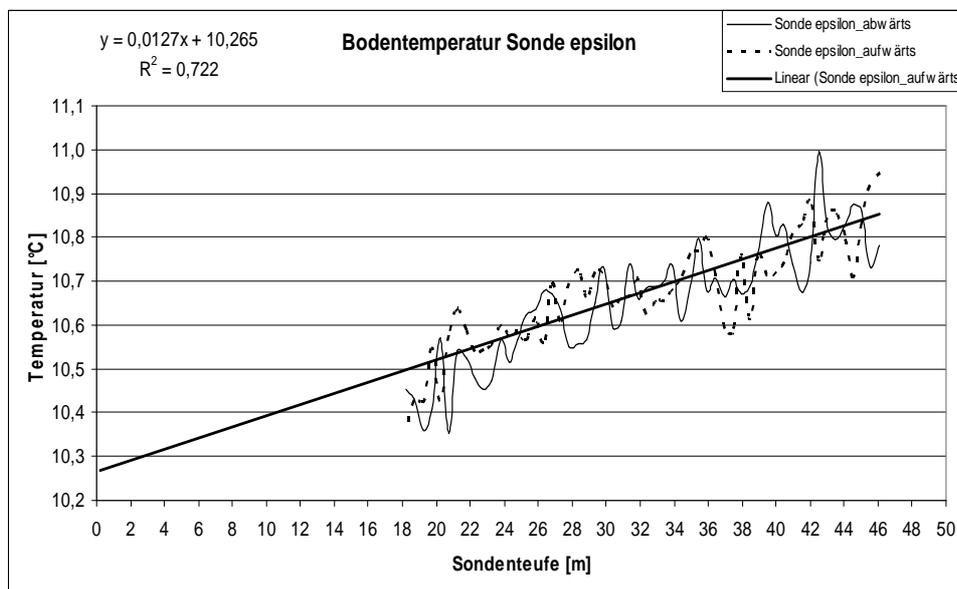


Diagramm 8, Bodentemperatur der Sonde epsilon

Daraus ließen sich die mittleren Bodentemperaturen für die weiteren Berechnungen bestimmen:

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. Die Ergebnisse werden in den unten dargestellten Diagrammen zusammengefasst.

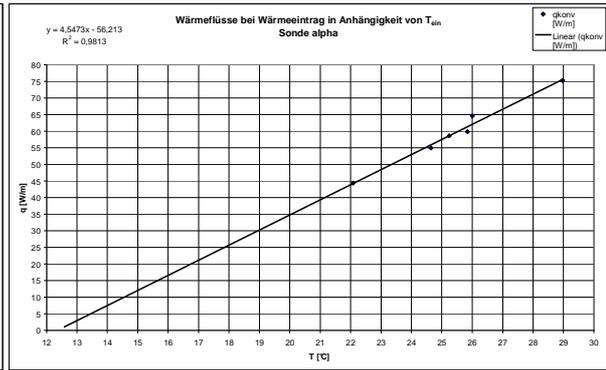
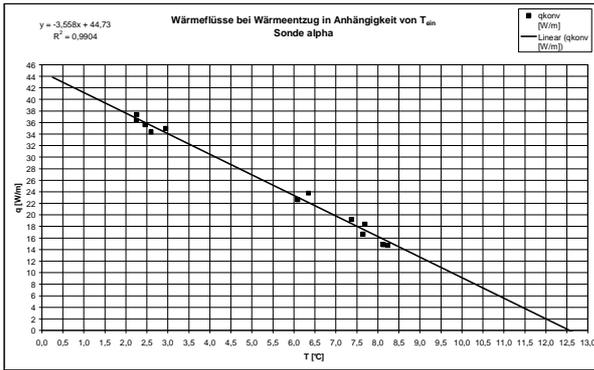


Diagramme 9 und 10, Wärmeentzug und Wärmeentzug der Sonde alpha

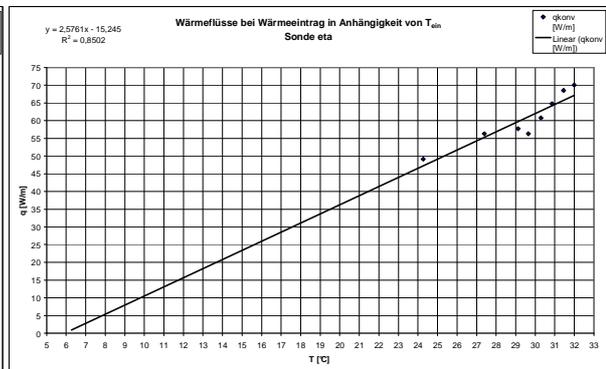
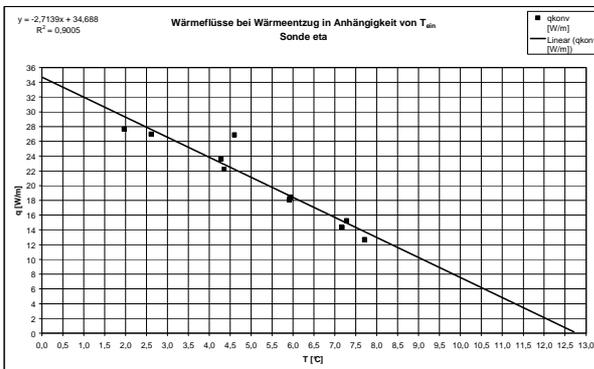


Diagramme 11 und 12, Wärmeentzug und Wärmeentzug der Sonde eta

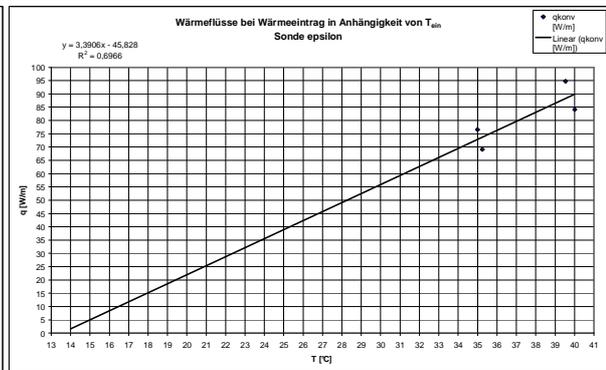
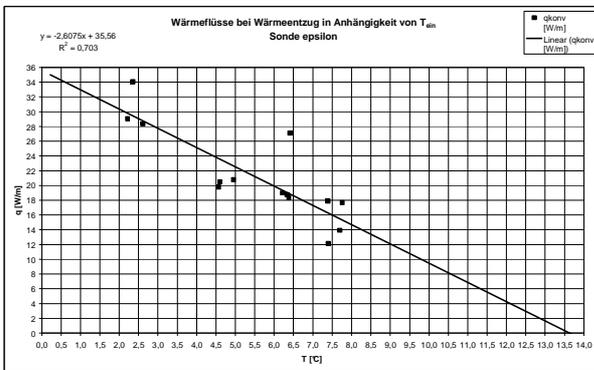


Diagramme 13 und 14, Wärmeentzug und Wärmeentzug der Sonde epsilon

Anhand der Diagramme kann man erkennen, dass zur Zeit die 100 m - Sonde alpha mit der Soleführung die besten Wärmeentzugs- und Wärmeentzugsleistungen bringt. Im Vergleich dazu liegen die 100 m-Sonde eta und die 50 m-Sonde epsilon mit den Ergebnissen etwas darunter, dafür bringen sie aber im direkten Vergleich ähnliche Leistungen.

Für die Wärmeentzugsleistungen der CO₂-Sonden wurden vor allem die beiden 100 m-Sonden alpha und eta betrachtet. 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 zu erkennen ist:

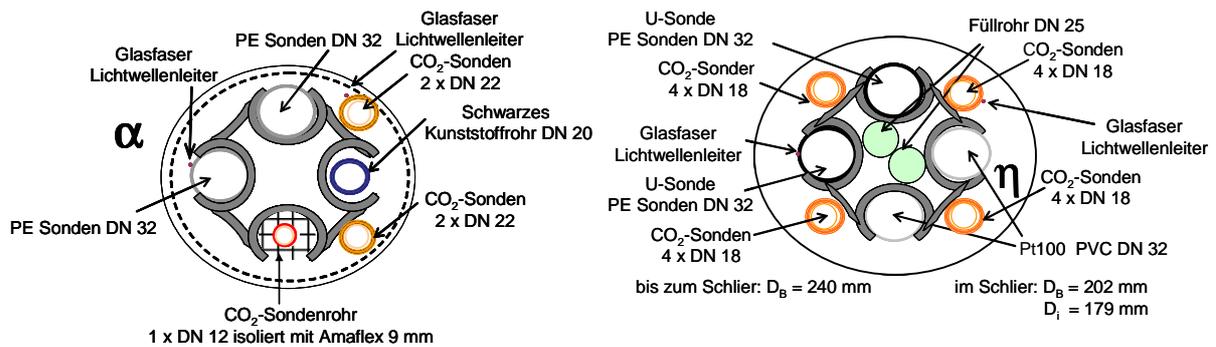


Abb.: 31 und 32. Querschnitte der Sonden alpha und eta

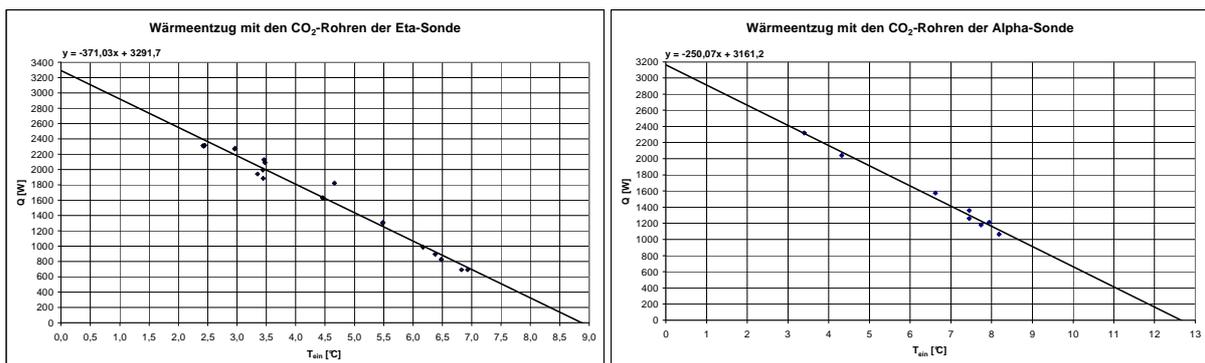


Diagramme 15 und 16: Wärmeentzug der CO₂-Sonden eta und alpha

Anhand der oben dargestellten Diagramme 15 und 16, die den Zusammenhang des Wärmeentzuges mit der Eintrittstemperatur am Kondensator der Sonden alpha und eta darstellen, lässt sich gut erkennen, 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.

Weitere Untersuchungen bezüglich der CO₂-Füllmenge und den dabei auftretenden Drücken und dadurch erzielbaren Leistungen wären nötig, um genauere Aussagen treffen zu können.

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 [1, 2]. Eines der Hauptziele des Geosola-Projektes ist es, die Einbeziehung überschüssiger Solarwärme technisch umzusetzen und zu quantifizieren. Zur Untersuchung des Potentials von jahreszeitlichem Ausgleich gibt es bereits mehrere Publikation, 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 soll untersucht werden, 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 Abbildung 33 dargestellt.

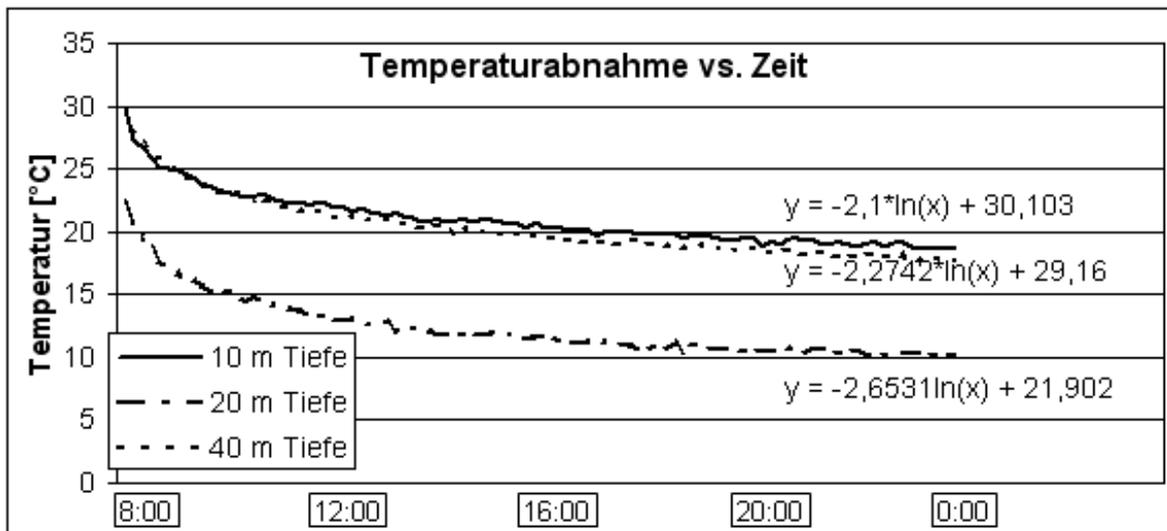


Abb.: 33, Temperaturabnahme im Sondenringraum. Man beachte die stärkere Abnahme in einer Tiefe von 20 m, hier transportiert eine Grundwasserströmung die eingebrachte Wärme schnell ab.

Beim Temperaturverlauf im Untergrund (Abbildung 34 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.

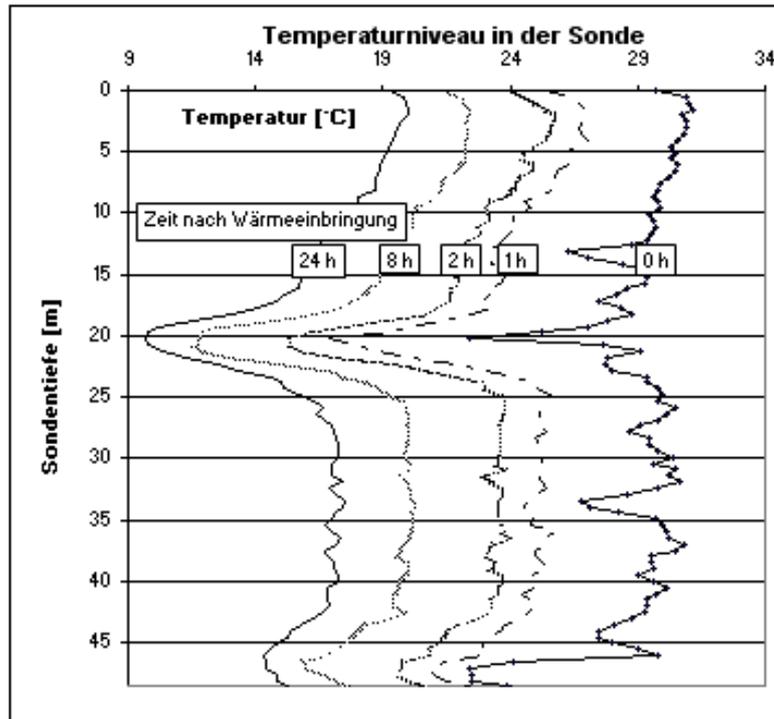


Abb.: 34, Im Bereich der Grundwasserfahne (20 m Tiefe) ist nach 8 h das Temperaturniveau auf 11,5 °C gesunken. Nach 14 h ist die eingebrachte Wärme abgeklungen.

Der Wärmeeintrag, die Speicherdauer ($\tau = T/2$, „Halbwertszeit“) und die verbliebene Wärme wurden in Tabelle 11 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 11,

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 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 Sonden-nahen 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 Punkt 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. [3]. 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 [4], 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 [5]. 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 12, Vorschlag eines Bewirtschaftungsplans mit 80 % solarthermischer Regeneration und 20 % Autoregeneration des Untergrundes.

Mit einem richtig dimensionierten Lade- und Entladeplan („Bewirtschaftungsprogramm“) kann das Abkühlen des Untergrundes verhindert werden. Saisonale Temperaturschwankungen im Untergrund treten 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 laut Dimensionierungstabelle [6]).

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 (Kapitel 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. In der Abbildung unten ist ein Temperaturprofil entlang der Sonde während Wärmeeintrag angegeben.

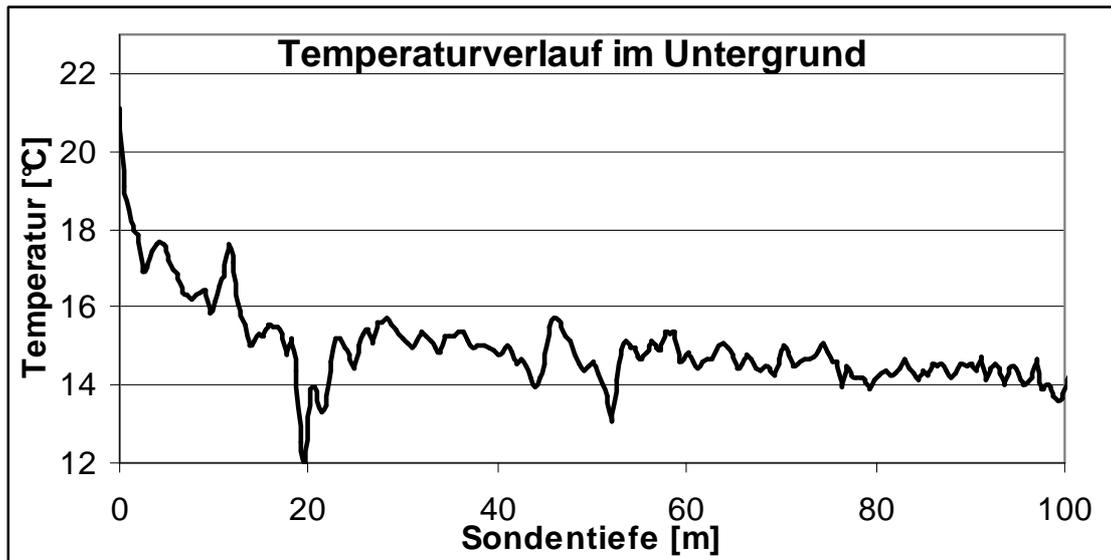


Abb. 35, Temperaturverlauf entlang der Sondenachse (Sonde 3) während Wärmeeintrag.

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).

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 Abbildung 35 oben auch bestätigen.

B) Erzielbare Zeithorizonte

Für die untersuchte Sonde Nr. 4 der Geosola-Industrieforschungsanlage konnte anhand der Abklingkurven (Kapitel 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

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

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

Zuerst wurde speziell die Wärmeentzugsleistung mittels Solesonde 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.

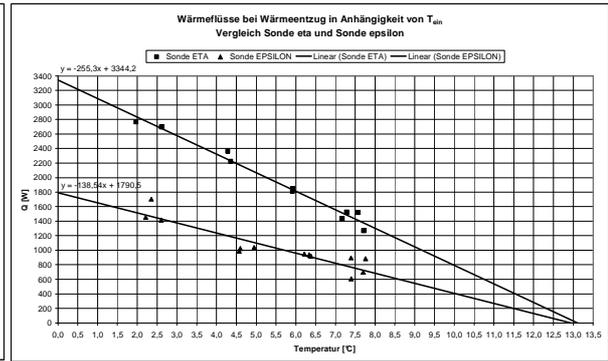
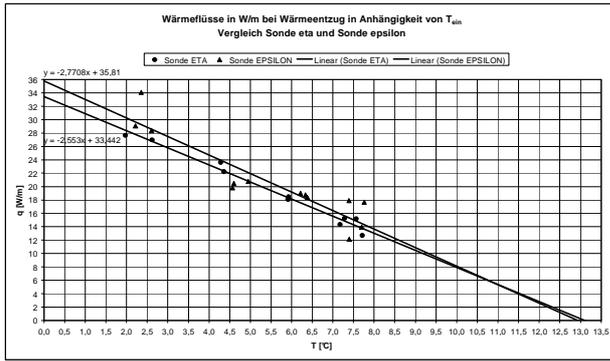
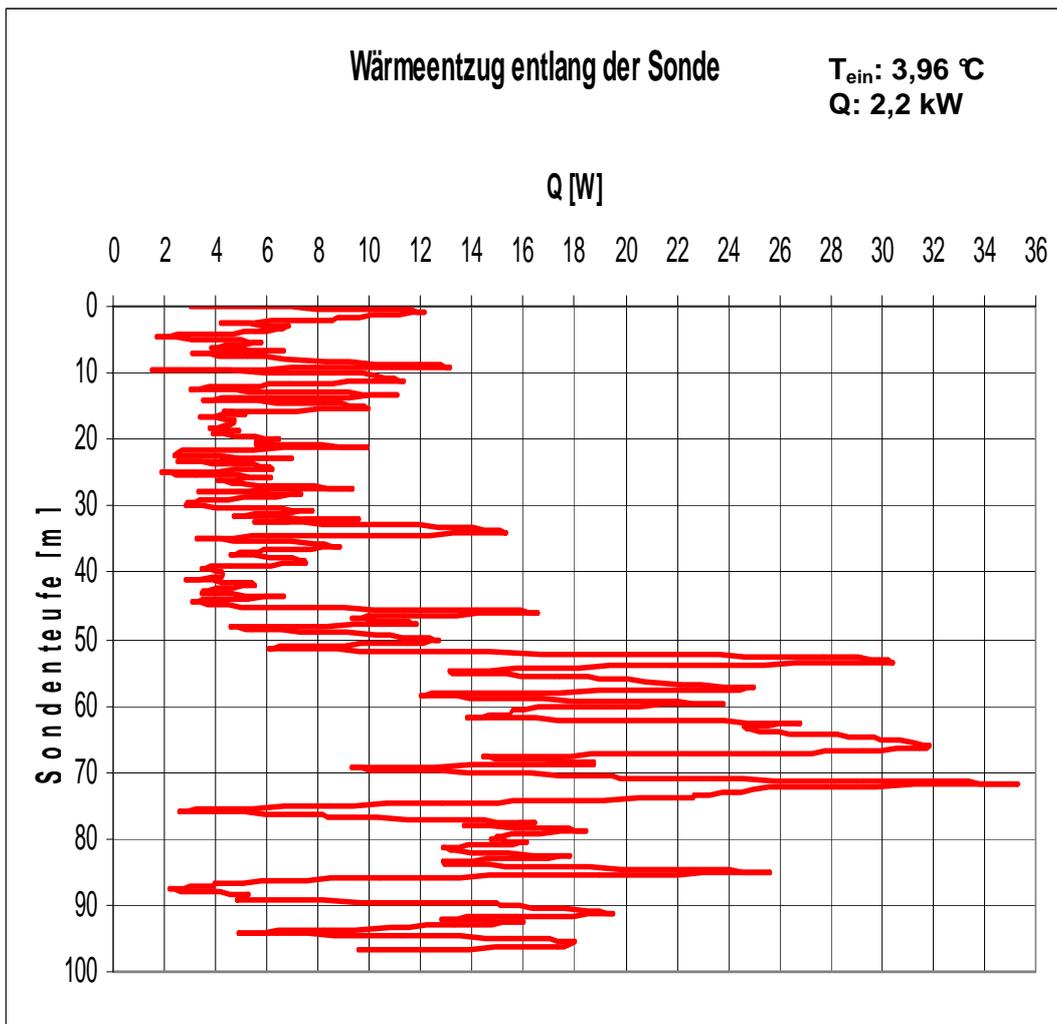


Diagramme 17 und 18: Vergleich Sonde eta und Sonde epsilon

Bei der Betrachtung der Wärmeflüsse entlang der Sonde kann man sehr gut erkennen, dass diese in tieferen Schichten höher sind.



Teilziel 4.7: Untersuchungen des Wärmeentzuges unterschiedlicher Sondengeometrien

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- u. 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

Teilziel 4.10: Thermische Modellierung der EW-Sonden im Untergrund

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 Abbildung 37 und 38 ersichtlich. Es zeigt sich deutlich, dass sich das Bohrloch mit der CO₂-Technologie selbstständig regeneriert. Dies ist deutlich positives Alleinstellungsmerkmal gegenüber den herkömmlichen Systemen zum Leistungsentzug mittels Tiefenbohrung (z.B. Sole).

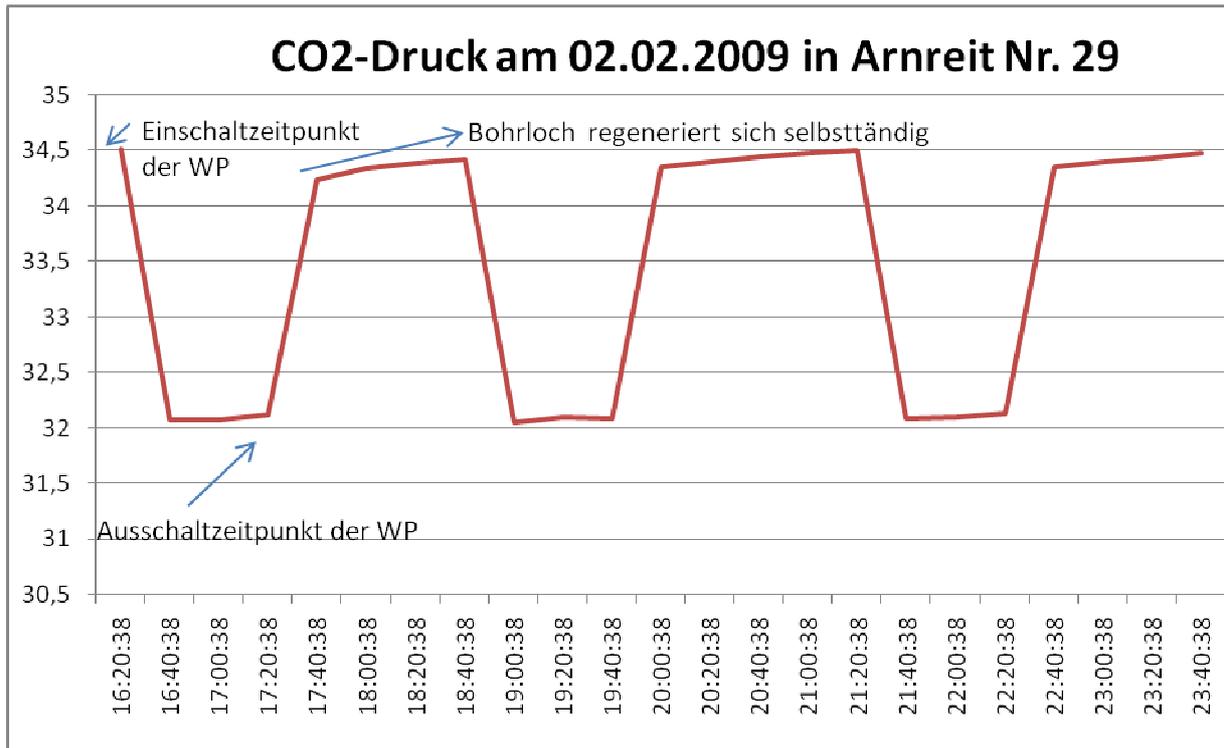


Abb.: 37, Schaltintervalle / Druck (Temperatur) Diagramm

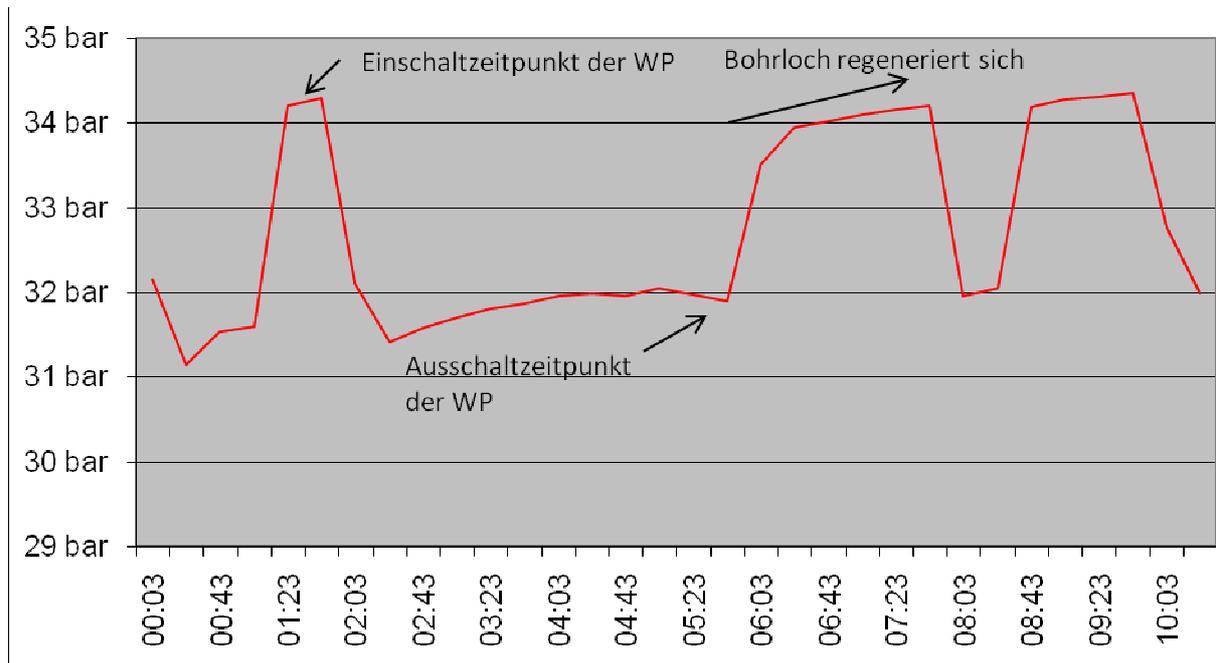


Abb.: 38, Schaltintervalle / Druck (Temperatur) Diagramm

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 39).

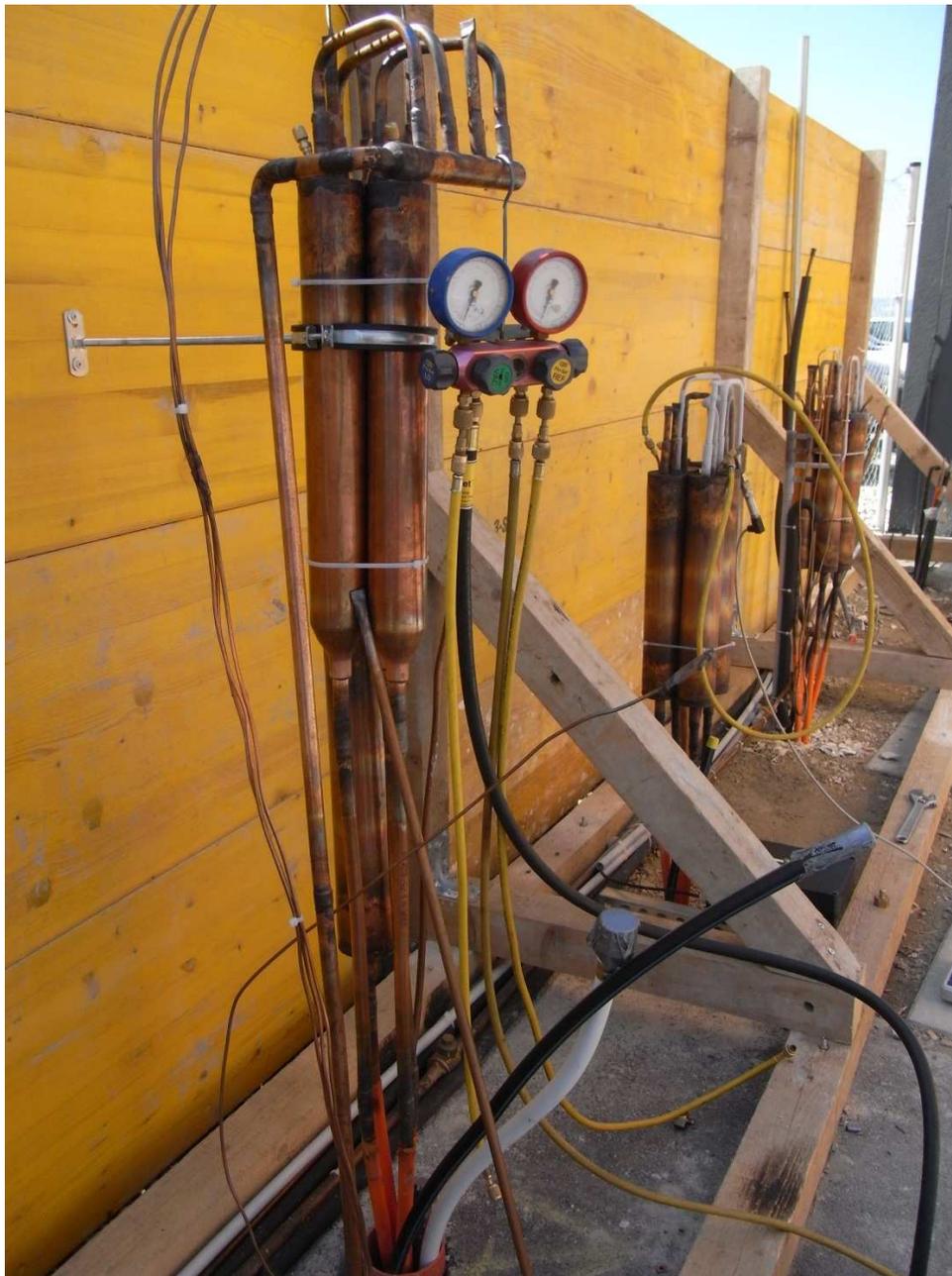


Abb.: 39, Sondenversuchsstand



Abb.: 40, Wärmepumpe Eigenbau M-Mittermayr GmbH

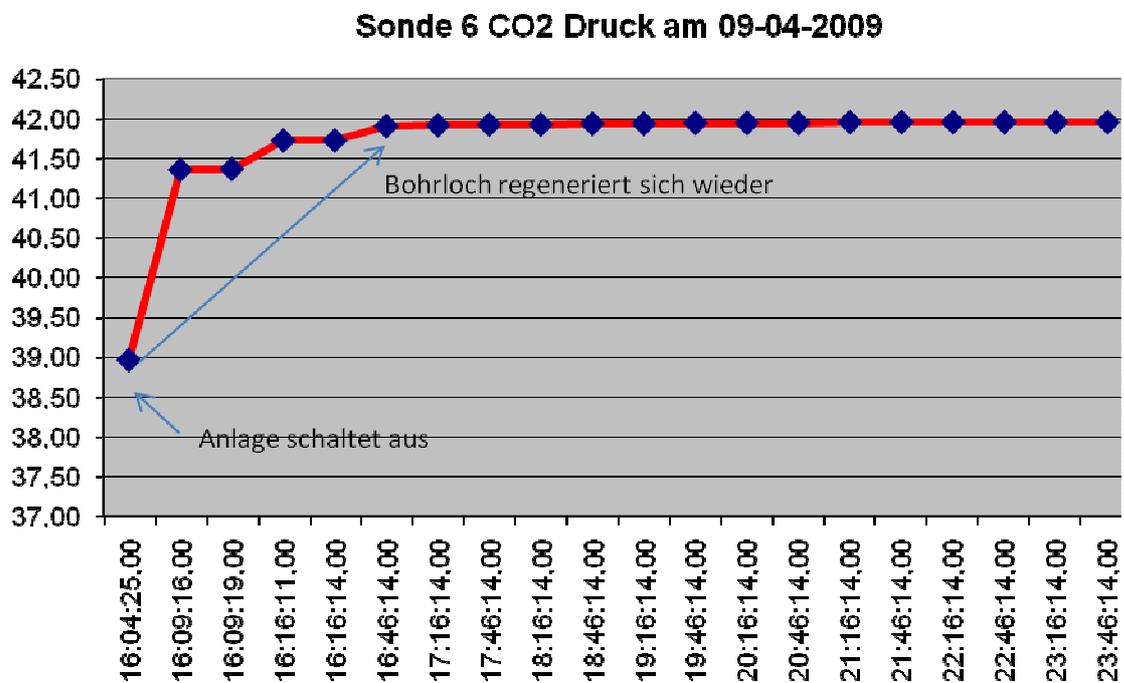


Abb.: 41, Bohrlochregeneration nach Abschaltung der Wärmepumpe

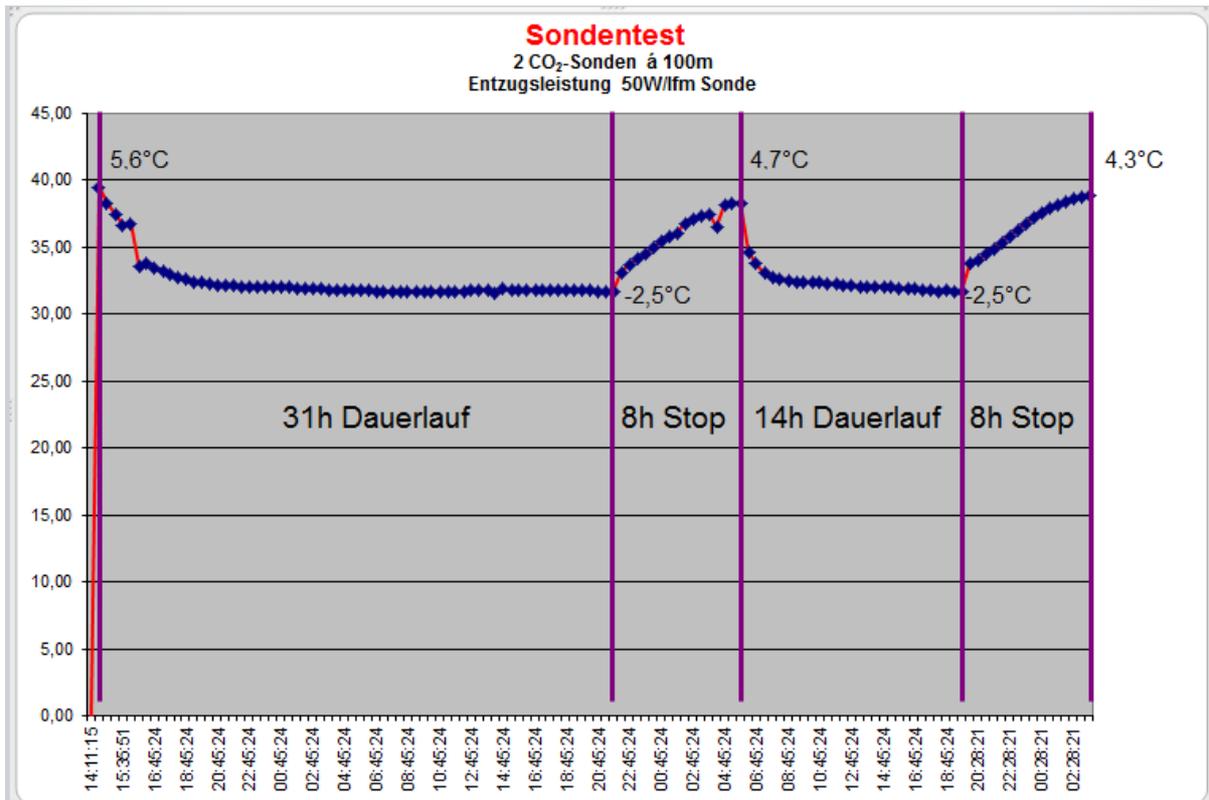


Abb.: 42, Bohrlochregeneration nach Dauerlauf

Arbeitspaket 5: EWS-Vergleiche

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 43). 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.



Abb.: 43, Versuchsanlage für DV und Sole mit frequenzgesteuertem Verdichter (2,4 – 6 KW)

4. Ausblick und Empfehlungen

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>

[6]

http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/broschueren/dimensionierungshilfe_sonnenkollektoren_07.pdf

6. Anhang