

Untersuchungen an Erdwärmesonden mit Hilfe der
Faseroptischen Temperaturmessung (FOT)
in unterschiedlicher Geologie
(Molasse - Kristallin)

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

unter der Leitung von
O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Jean Friedrich Schneider

eingereicht an der
Universität für Bodenkultur
Institut Für Angewandte Geologie

Erhard Josef Golger
Mitterberg 22
9815 Kolbnitz

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Grundlagen und theoretischer Hintergrund	7
2.1. Wärmelehre	7
2.1.1. Definitionen (Böge, 1989) (Wärmeatlas, 1991).....	7
2.2. Wärmegewinnungsanlagen.....	8
2.2.1. Kompressionswärmepumpe	8
2.2.1.1. Definitionen und Kennzahlen	10
2.3. Wärmequelle.....	11
2.3.1. Co ₂ - Sonde	13
2.3.2. Sole Sonde	15
2.4. Messtechnik	17
2.4.1. DTS Sensortran - Faseroptische Temperaturmesstechnik (FOT)	17
2.4.2. Messung der Betriebsdaten - Monitoring.....	21
2.5. Geologie	22
2.5.1. Das Kristallin der Böhmisches Masse.....	22
2.5.2. Die Molassezone	24
3. Untersuchte Anlagen	25
3.1. Thermal Response Test.....	25
3.2. Co ₂ Sonden.....	26
3.2.1. Anlage Neumarkt/Mühlkreis - Granit	26
3.2.1.1. Lagebeschreibung.....	26
3.2.1.2. Geologie und Hydrogeologie.....	27
3.2.1.3. Anlagenbeschreibung	28
3.2.1.4. Messmethodik	29
3.3. Sole Sonden.....	30
3.3.1. Anlage Sankt Florian - Molasse	30
3.3.1.1. Lagebeschreibung.....	30
3.3.1.2. Geologie und Hydrogeologie.....	31
3.3.1.3. Anlagenbeschreibung	31
3.3.2. Anlage Amstetten - Molasse	33
3.3.2.1. Lagebeschreibung.....	33
3.3.2.2. Geologie und Hydrogeologie.....	33
3.3.2.3. Anlagenbeschreibung	34
3.3.3. Anlage Sankt Oswald - Granit.....	36
3.3.3.1. Lagebeschreibung.....	36
3.3.3.2. Geologie und Hydrogeologie.....	36
3.3.3.3. Anlagenbeschreibung	37
4. Ergebnisse	39
4.1. Interpretation der Temperaturprofile.....	39
4.1.1. Wärmeentzug.....	39
4.1.1.1. Anlage Neumarkt.....	39
4.1.1.2. Anlage Heigl.....	45

4.1.1.3. Anlage Sankt Oswald	46
4.1.2. Regeneration.....	48
4.1.2.1. Anlage Neumarkt.....	48
4.1.2.2. Vergleich der Regenerationen Neumarkt - Sankt Oswald (Granit)	50
4.1.2.3. Regenerationsvergleich Molasse - Kristallin.....	51
4.1.2.4. Regenerationsvergleich Verpressmaterial	52
4.1.3. Solarenergie - Einspeisung	53
4.1.3.1. Anlage Amstetten	53
4.2. Quantitative Beschreibung	56
4.2.1. Kennzahlen	56
4.2.1.1. Anlage Neumarkt.....	56
4.2.1.2. Anlage Sankt Oswald	57
5. Zusammenfassung	58
6. Literaturverzeichnis	59
7. Abbildungsverzeichnis	60
8. Tabellenverzeichnis	62
9. Anhang.....	63

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen recht herzlich bedanken, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben, ins besonders meinen Betreuern Dr. rer.nat Wolfgang Straka und DI Richard Niederbrucker.

Meinen besonderen Dank gilt meiner Familie, ohne deren Hilfe ich mein Studium in dieser Form nicht durchführen hätte können und meiner Tante, die mir unterstützend beiseite stand.

Kurzfassung

Diese Arbeit soll einen Einblick in die Praxis der Errichtung und Betriebsführung von derzeit üblichen Anlagen der oberflächennahen Geothermie geben. Es werden speziell Erdwärmesonden bis zu einer Tiefe von ca. 150 m betrachtet.

Bei den im Detail untersuchten Anlagen handelt es sich um drei erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (zwei Sole-Sonden, eine CO₂-Sonde), die unter verschiedenen geologischen Bedingungen (Molasse/Kristallin) errichtet wurden. Bei einer der Solesonden wurde außerdem überschüssige Solarenergie eingekoppelt. Die Sonden wurden mittels faseroptischer Temperaturmessung (FOT) beobachtet, und die Betriebsführung anhand dieser Messdaten verglichen. Des Weiteren wurden die thermischen Wirkungen auf den Untergrund und dessen thermische Regeneration betrachtet. Aus den Betriebsdaten der Wärmepumpen konnten zudem Aussagen zur Effizienz der Anlagen abgeleitet werden.

Es hat sich allerdings gezeigt, dass die gegenwärtig geübte Praxis bei Einrichtung und Betrieb derartiger Anlagen viel zu wenig Rücksicht nimmt, sowohl auf (a) die Dokumentation der geologischen Bedingungen, als auch (b) die laufende Erfassung der Betriebsdaten. Beides wäre Voraussetzung dafür, dass die Anlageneffizienz quantitativ und gestützt auf nachvollziehbare Rechenmodelle betrachtet werden kann. Die Umsetzung muss mit den ausführenden Firmen früh im Projekt geklärt sowie durch angemessene Planung (zumeist ja durch die Firmen selbst) und Vertragsgestaltung abgesichert werden.

Abstract

This study offers a survey of installation and operational management of common small near-surface geothermal applications, as they are handled in practice. Specifically, ground-coupled heat pumps with borehole heat exchangers up to 150 m approximate depth are considered.

Two wells with brine and one with CO₂ as working fluid were investigated in detail. The wells were situated in different geological conditions (fine-grained sedimentary vs. granitic rocks); in addition, one of the brine-based installations was coupled with solar. The wells were monitored by means of fiber-optical temperature (FOT) measurements, and the operational conditions were compared with the help of these data. Furthermore, information on thermal effects in the subsoil and on its thermal recovery could be derived. From the synopsis of thermal measurement and operational data, conclusions on the efficiency of the installations could be drawn.

However, it became clear that in the current practice of installing near-surface geothermal systems takes far too little account of (a) the documentation of geological conditions, as well as (b) the routine acquisition of operational data. Both is to be considered as mandatory, if the real-world efficiency of ground-coupled heat pumps shall be evaluated quantitatively and based on comprehensible numerical models. This is to be clarified with the companies early on within a project, and put into practice by proper planning (which is mostly done by the companies themselves), and enforced by form of contract.

1. Einleitung

Die Herkunft unserer Primärenergie ist heutzutage eine der größten Herausforderung. Tagtäglich wird in den Medien debattiert, wie man den Klimawandel entgegen treten kann. Das Einhalten der Kyoto - Ziele wird dabei besonders stark hervorgehoben.

Die Gewinnung der Primärenergie durch die Geothermie ist ein Weg, den Problemen entgegenzutreten.

Die Geothermie beschäftigt sich mit der im Untergrund vorhandenen Erdwärme. Obwohl die Erdoberfläche als kalt empfunden wird, nimmt die Temperatur mit zunehmender Tiefe kontinuierlich zu. Sie erreicht im Bereich des Erdkerns Temperaturen von über 4000 °C. Die stetig vom Erdinneren abgestrahlte Wärme wird seit Jahrhunderten genutzt. Früher war es die Nutzung heißer Quellen, heutzutage jedoch auch energiewirtschaftlich zur Gewinnung von emissionsfreier Energie.

Bei der Nutzung dieser Energiequelle unterscheidet man prinzipiell zwischen "tiefer Geothermie" und "oberflächennaher Geothermie". Während die tiefe Geothermie die Energie durch direkte Nutzung der Thermalwässer und für die Gewinnung von Heizwärme und Strom beinhaltet , erzeugen die seichten Erdwärmesonden (Tiefe <150m) in geschlossenen oder offenen Systemen einen künstlichen Wärmestrom. Diese Systeme benötigen dazu eine Wärmepumpe, die die dem Boden entzogene Energie auf ein höheres, direkt nutzbares Niveau pumpt.

Meine Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der oberflächennahen Geothermie und zwar speziell mit Erdwärmetiefensonden bis zu einer Tiefe von 150 m unter GOK. Es soll anhand der faseroptischen Temperaturmessung der Untergrund auf sein Verhalten während des Wärmepumpenbetriebs und seiner Regeneration beobachtet werden. Bei den untersuchten Anlagen handelt es sich um verschiedene Technologien (Sole - Sonde, CO₂ - Sonde), die sich in verschiedener Geologie (Molasse - Granit) befinden. Mittels eines parallel laufenden Monitorings der Betriebsdaten der gesamten Anlagen sollen die Effizienz der unterschiedlichen Anlagen bewertet und verglichen werden. Weiters ist ein Standort mit einer Technologie ausgestattet, wo das Einbringen von solarer Überschussenergie in den Untergrund möglich ist. Es soll untersucht werden, ob diese Technologie für den Standort zielführend ist.

2. Grundlagen und theoretischer Hintergrund

2.1. Wärmelehre

Die Übertragung von Energie in Form von Wärme kann durch folgende 3 unterschiedlichen Arten geschehen:

- Wärmeleitung = Konduktion (Transport von Wärme innerhalb eines Stoffes)
- Wärmeübergang = Konvektion (Energietransport zwischen verschiedenen Stoffen mit unterschiedlicher Ausgangstemperatur)
- Wärmestrahlung (Bewegungsenergie wird in elektromagnetische Strahlungsenergie umgewandelt und abgestrahlt)

2.1.1. Definitionen (Böge, 1989) (Wärmeatlas, 1991)

Wärme:

Grundsätzlich kann man erwähnen, dass Wärme eine Form von Energie ist, die auf der Schwingung von Molekülen und Atomen eines Stoffes beruht. Die Bewegungsenergie aller schwingenden Teilchen ist die Wärme eines Stoffes. Der durch die Wärmebewegung repräsentierte Teil der Wärme wird dabei als fühlbare Wärme bezeichnet, während die gegen den Widerstand der Molekülkräfte verrichtete innere Arbeit latente Wärme genannt wird.

Die alte Einheit ist die Kalorie und ist definiert als jene Wärmemenge, um 1 Gramm luftfreies Wasser von 14,5 °C auf 15,5 °C zu erwärmen. Die heutzutage verwendete Einheit ist jedoch das Joule. (1 Joule = 0,239 kal)

spezifische Wärmekapazität c:

Sie ist die Energiemenge in Form von Wärme ΔQ , die notwendig ist, um eine Stoffmenge mit der Masse m von 1 kg unter Beibehaltung des jeweiligen Aggregatzustandes um 1 K zu erwärmen, angegeben in $[J/(kg \cdot K)]$. Sie kennzeichnet somit die unterschiedliche Erwärmbarkeit der Stoffe und ist temperaturabhängig.

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Wärmeleitfähigkeit λ :

Sie ist das Vermögen eines Stoffes, thermische Energie in Form von Wärme mittels Wärmeleitung zu transportieren, angegeben in $[W/(m \cdot K)]$. Sie ist temperaturabhängig und bei Gasen ist sie außerdem noch druckabhängig.

Temperaturleitfähigkeit a:

Sie ist eine Materialeigenschaft die zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der räumlichen Verteilung der Temperatur durch Wärmeleitung als Folge eines vorhandenen Temperaturgefälles dient.

$$a = \frac{\lambda}{c * \rho} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

In der folgenden Tabelle sind jene Stoffwerte wärmetechnisch zusammengefasst, die bei den untersuchten Anlagen auftreten bzw. verwendet wurden.

Tab. 1 wärmetechnische Stoffwerte

Material/ Einheit	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	empf. Rechenwert	Dichte
	c [kJ/m³K] bei 20°C	λ[W/mK] bei 20°C	lt. VDI 4640	ρ [kg/m³]
Wasser	4181	0.59		998
CO2	0.8448 [kJ/(kg*K)]	16.18		1.815
PE		0.39		960
Stahl	3120	60		7800
Kupfer	2010	407.1		8920
Bentonit	3900	0.5-0.8	0.6	
Beton	1800	0.9-2.0	1.6	2000
Granit	2100-3000	2.1-4.1	3.4	2400-3000
Gneis	1800-2400	1.9-4.0	2.9	2400-2700
Ton- Schluffstein	2100-2400	1.1-3.5	2.2	2400-2600
Mergelstein	2200-2300	1.5-3.5	2.1	2300-2600
Kies/Steine trocken	1300-1600	0.4-0.5	0.4	1800-2200
Kies/Steine wassergesättigt	2200-2600	1.6-2.0	1.8	1900-2300

2.2. Wärmegewinnungsanlagen

2.2.1. Kompressionswärmepumpe

Funktionsprinzip

Für das Heizen eines Gebäudes ermöglicht die Nutzung einer Wärmepumpe es, Wärme durch den Einsatz von mechanischer Antriebsenergie aus der Umgebung eines niedrigen Temperaturniveaus auf ein höheres Temperaturniveau zu pumpen. Die am häufigsten verwendete Wärmepumpe ist heutzutage die Kompressionswärmepumpe.

Der Wärmepumpenprozess ist ein Kreisprozess. Prinzipiell durchläuft er vier Stadien (siehe Abb. 1), und beruht auf dem physikalischen Prozess, dass bei einem Wechsel des Aggregatzustandes eine Energiezu- und -abfuhr geschieht.

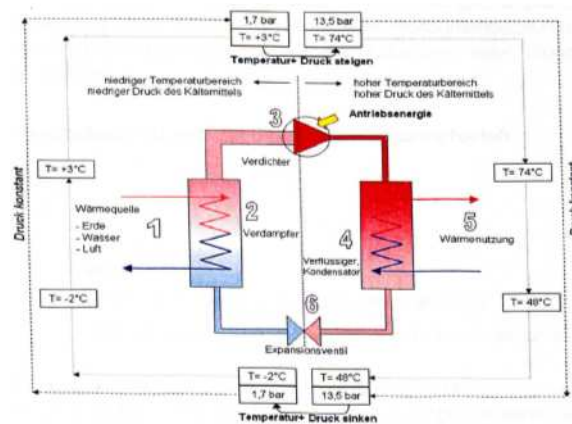


Abb. 1 Funktionsprinzip einer Wärmepumpe im Dreikreisssystem

Eine Wärmepumpe beinhaltet ein Kältemittel, das einen niedrigen Siedepunkt und eine hohe innere Wärme (Enthalpie) besitzt. Dieses Kältemittel wird von einem Trägermedium (1), das eine Umweltwärme aufgenommen hat, so weit erhitzt, dass es verdampft (2). Dieser Dampf wird mittels einen Kompressor (3) soweit (unter Energiezufuhr) verdichtet, bis eine gewünschte Temperatur bei der gleichzeitigen Drucksteigerung erreicht wird. Diese Gas wird anschließend einem Kondensator (4) zugeführt, wo dem Gas durch das Trägermedium des Heizkreises (5) die Wärme entzogen wird. Dadurch geschieht ein weiterer Aggregatswechsel und das flüssige Kältemittel wird über ein Entlastungsventil (6) wieder dem Verdampfer zugeführt. Somit ist der Kreis geschlossen und kann vom Neuen beginnen.

Verständlicherweise ist bei der Betrachtung dieses Kreislaufs die Differenz der Ausgangstemperaturen von großer Bedeutung. Eine Wärmepumpe ist umso effizienter, je höher die die gewonnene Umweltwärme und je niedriger die Vorlauftemperatur des Heizkreises ist.

Die in dieser Arbeit untersuchten Anlagen beinhalten ausschließlich Kompressionswärmepumpen mit Scroll- Verdichter im Dreikreisssystem.

Dreikreisssystem

Bei einem Dreikreisssystem ist jeder der drei Kreise in sich geschlossen.

Der erste Kreis ist der Solekreislauf der, mit einem Gemisch aus Frostschutz (meist Glykol) und Wasser gefüllt, die Wärme durch Umwälzung aus dem Untergrund entzieht und der Wärmepumpe über den Verdampfer zuführt. Die Umwälzung erfolgt bei herkömmlichen Solesonden durch eine Umwälzpumpe. Eine Ausnahme ist die Arbeitsweise der CO₂- Sonde, die selbstzirkulierend ist. Dieses Prinzip wird unter dem Punkt CO₂- Sonde genauer beschrieben.

Der zweite Kreis ist der interne Kältekreis der Wärmepumpe (siehe oben).

Der dritte Kreis ist der Heizkreis, der üblicherweise mit Wasser gefüllt ist. Dabei wird in der Wärmepumpe über den Verflüssiger dem Medium jene Wärme zugefügt, die in den Wohnflächen zur Beheizung benötigt wird. Für die Umwälzung dieses Kreislaufes wird ebenfalls eine Umwälzpumpe benötigt. Wie schon erwähnt hat das Heizsystem für die Effizienz einer Wärmepumpe einen großen Einfluss. Bei herkömmlichen Radiatoren wird eine Vorlauftemperatur von etwa 55°C benötigt, bei modernen Fussboden- und Wandheizungen hingegen nur etwa 35°C.

Scroll Verdichter

Ein Scroll-Verdichter mit zwei archimedischen Spiralfächern (Spiralen mit konstanten Spiralabstand), wobei eine mit der Bodenplatte starr verbunden ist (Stator), und die zweite um 180° versetzte Deckelspirale gegen die Stator-Spirale über einen Exzenter verschoben wird. Der Vorteil dieser Technologie liegt in der lärm- und vibrationsarmen Arbeitsweise und ihrer stufenlosen Regelbarkeit.

Kältemittel

Ein Kältemittel besitzt die Eigenschaft, bei niedrigen Temperaturen zu verdampfen, und gleichzeitig eine hohe innere Wärme zu beinhalten. Dadurch können sie bei niedrigen Temperaturen durch verdampfen Wärme aufnehmen und unter hohen Druck bei der Verflüssigung diese wieder abgeben. Heute werden nur noch chlorfreie Kältemittel zugelassen. Die früher verwendeten, ozonschädlichen FCKW - Arbeitsmittel werden durch HFKW- Arbeitsmittel ersetzt.

2.2.1.1. Definitionen und Kennzahlen

Definitionen (ÖWAV, 2009):

Heizleistung P_H :

Die Heizleistung ist die von einem Gerät je Zeiteinheit an den Wärmeträger abgegebene Wärmemenge, angegeben in [kW]

Kälteleistung (Kühleistung) P_C :

Die Kälteleistung ist die vom Wärmeträger je Zeiteinheit an das Gerät abgegebene Leistung, angegeben in [kW].

Effektive Leistungsaufnahme P_E :

durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe innerhalb der bestimmten Zeitspanne für Verdichter, Abtauen, Steuer-, Regel- und Sicherheitseinrichtungen, anteilige Förderungseinrichtungen zum Transport der Wärmeträger innerhalb des Geräts.

Die Summe von Kälteleistung und effektiver Leistungsaufnahme entspricht der Heizleistung.

Spezifische Entzugsleistung:

Sie ist jene Leistung, die pro Meter Sonde bzw. pro m^2 Entzugsfläche dem Untergrund entzogen wird.

Tab. 2 spezifische Entzugsleistung nach VDI 4640

Untergrund	spezifische Entzugsleistung [W/m]	
	für 1800 h	für 2400 h
Kies, Sand, trocken	<25	<20
Kies, Sand, wasserführend	65-80	55-65
Kalkstein (massiv)	55-70	45-60
Sandstein	65-80	55-65
Granit	65-85	55-70
Basalt	40-65	35-55
Gneis	70-85	60-70

Kennzahlen

Generell bezeichnet der Wirkungsgrad im Allgemeinen das Verhältnis von aufgewendeter Energie zu gewonnener Nutzenergie. Bei einem idealen Verlauf der Zustandsänderungen erhält man den Wirkungsgrad von 1. Man spricht dabei von einem Carnot - Kreisprozess (Tholen M., 2008). In der Realität sind jedoch immer Verluste vorhanden und somit ein Wirkungsgrad von unter 1 zu erwarten.

Bei einem Betrieb mit einer Wärmepumpe jedoch wird dem System Energie aus dem Erdreich zugeführt, die in eine Wirkungsgradberechnung nicht direkt eingerechnet wird, da Sie kostenlos zur

Verfügung steht. Man erhält somit einen Wirkungsgrad von grösser 1. Deshalb wurde für Wärmepumpen die sogenannte Leistungszahl eingeführt.

Leistungszahl ε : Die Leistungszahl ist das Verhältnis der Heizleistung [kW] zur elektrischen Leistungsaufnahme [kW] der Wärmepumpe.

$$\varepsilon = \frac{Q_{HEIZ}}{P_{ANTRIEB}} = \frac{Q_{VERD} + P_{ANTRIEB}}{P_{ANTRIEB}} = 1 + \frac{Q_{VERD}}{P_{ANTRIEB}}$$

Die Leistungszahl ist somit eine Kennzahl der Wärmepumpe für einen bestimmten Betriebspunkt z.B. für 0/35 oder 0/50, beachtet jedoch nicht den Energieverbrauch der Hilfsaggregate, wie in etwa Umwälzpumpe für den Heizkreis. Es wird nur die Wärmepumpe betrachtet. Heutige Elektro-Wärmepumpen erzielen je nach Wärmequelle Leistungszahlen zwischen 3,5 und 5,5. Sie ist auch umso höher, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen der Heizwasservorlauftemperatur und der Wärmequellentemperatur ist.

Bei einer Gesamtbetrachtung (inkl. Hilfsaggregate) wurde der COP Wert (engl. coefficient of performance) eingeführt.

COP - Wert: Der COP - Wert ist das Verhältnis der Heizleistung zur elektrischen Leistungsaufnahme des Gesamtsystems.

Diese Kennzahlen sind jedoch nur für einen bestimmten Betriebspunkt gültig und erlauben allerdings keine energetische Bewertung der Gesamtanlage. Wesentlich aussagekräftiger ist die sogenannte Arbeitszahl.

Arbeitszahl: Die Arbeitszahl ist das Verhältnis der abgegebenen Nutzarbeit zur aufgewendeten Antriebsarbeit.

Somit wird die Anlage über einen bestimmten Zeitraum betrachtet und bewertet. Der übliche Betrachtungszeitraum ist ein Jahr.

Jahresarbeitszahl(JAZ): Die Jahresarbeitszahl einer Elektrowärmepumpe ist das Verhältnis aus jährlich gelieferter Wärme [kWh] zu jährlich aufgenommener elektrischer Antriebs- und Hilfsenergie [kWh].

Bei der Nutzung vom Erdreich lassen sich derzeit Jahresarbeitszahlen von 3,8 bis 4,3 erreichen. (Kaltschmitt, 1999).

Betriebsweise

- monovalent: Der jährliche Heizbedarf wird alleine von der Wärmepumpe abgedeckt.
- bivalent: Der Großteil des Jahresheizbedarfs wird von der Wärmepumpe erzeugt, der Rest kommt von einer zweiten Wärmequelle (Ölheizung).

2.3. Wärmequelle

Geothermie ist die in der Erdkruste vorhandene Wärme. Der aus dem Erdinneren an die Oberfläche dringende Energiestrom stammt aus drei verschiedenen Quellen (Kaltschmitt, 1999):

- Die im Erdinneren gespeicherte Energie, die noch aus der während der Erdentstehung frei gewordenen Gravitationsenergie resultiert.
- Jene Energie, die aus der gegebenenfalls von vor der Erdentstehung noch vorhandenen sogenannten Ursprungswärme stammt.

- Die Energie, die durch den Zerfall radioaktiver Isotope, die in der Erde (insbesondere in der äußeren Erdkruste) enthalten sind, freigesetzt wurde und immer noch wird. Das ist jene Wärme, die wegen der meist schlechten Wärmeleitfähigkeit der Gesteine zum überwiegenden Teil nach wie vor in der Erde gespeichert ist.

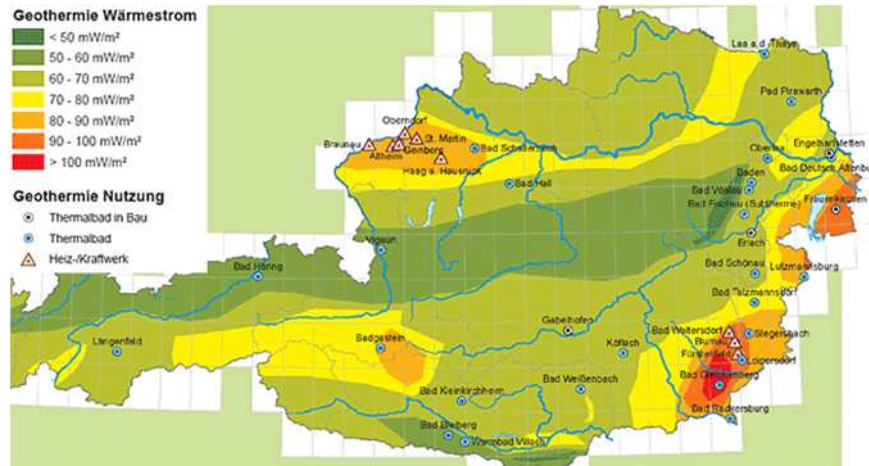


Abb. 2 Geothermischer Wärmestrom Österreichs und deren Nutzung (Geo-Atlas, GBA)

In Abb. 2 ist der geothermische Wärmestrom Österreichs und dessen großtechnische Nutzung ersichtlich. Man kann erkennen, dass die gesamte Molassezone des Alpenvorlandes, die inneralpinen Becken (Neogenbecken) und sogar der Zentralgneis des sogenannten Tauernfenster eine höheren geothermischen Wärmestrom aufweisen. Den geringsten Wärmestrom weisen die südlichen und nördlichen Kalkstöcke sowie die Grauwackenzone auf. Die östlichsten Gebiete Österreichs, die sogenannte Thermenlinie, ist aufgrund der bruchtektonischen Geologie bezüglich Geothermie die ergiebigste Region, was die vielen Thermalbäder bestätigen. Die Ursache für dieses Phänomen ist eine bekanntlich dünne Erdkruste in dieser Region. Im der oberösterreichischen Molassezone, im Innviertel und Hausruckviertel wird dieser hohe Wärmestrom durch etliche geothermischen Großanlagen (Stromerzeugung, Fernwärme) genutzt. Der Grund für diese Gegebenheit in Oberösterreich sind weitreichende Tiefenwässer - Zirkulationen ((Hoffmann, 2007)

Um diese Energie aus dem Erdinneren nutzen zu können, gibt es derzeit umfangreiche Forschungsprojekte und Technologien.

Da sich meine Arbeit ausschließlich mit der oberflächennahen Geothermie beschäftigt, speziell mit Erdwärmetiefensonden bis zu einer Tiefe von 150m, möchte ich diese Technologien näher beschreiben.

Allgemein ist zu erwähnen, dass Erdwärmietiefensonden gegenüber Erdreichkollektoren den Vorteil besitzen, viel platzsparender zu sein, jedoch bei der Herstellung wegen den teuren Bohrarbeiten kostenintensiver sind. Außerdem bringen sie von jahreszeitlichen Temperaturschwankungen unbeeinflusste, gleichmäßige Wärmeleistung aus dem Untergrund hervor. Gegenüber offenen Systemen (direkte Grundwasseranlagen) sind sie speziell bei Gebrauch der CO₂-Technologie absolut umweltfreundlich. Die heikelste Sache sind die Bohrarbeiten, bei denen man auf die mögliche Verkeimungsgefahr des Grundwassers achten muss. Die weitere Gefahr der Grundwasserzusammenschlüsse kann durch eine sorgfältige Verpressung des Bohrlochs ausgeschlossen werden.

Prinzipiell gibt es auf diesem Gebiet zwei unterschiedliche Arten um die Energie aus dem Bohrloch effizient zu entnehmen und einer Wärmepumpe zuzuführen.

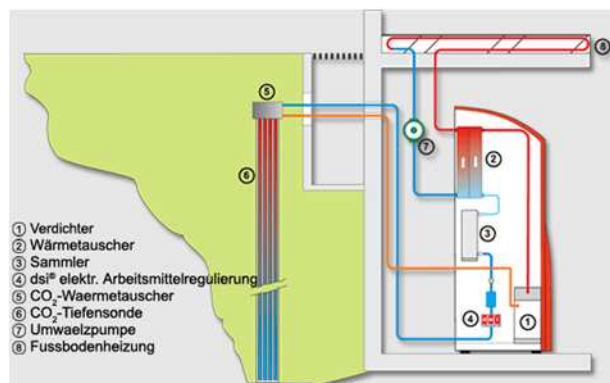


Abb. 3 Schema CO₂- Sonde

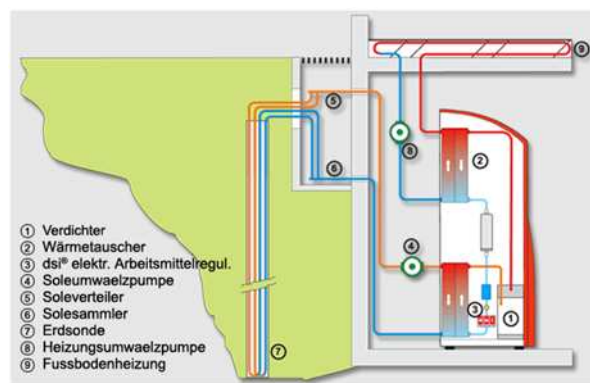


Abb. 4 Schema Duplex - Sole - Sonde

In Abb. 3 und Abb. 4 sind die beiden Technologie schemenhaft skizziert. Der wesentliche Unterschied der beiden Anlagen ist die Selbstzirkulation der CO₂- Sonde. Bei der Sole - Sonde hingegen ist der Betrieb einer Umwälzpumpe im Sole - Kreis nötig.

Folgend möchte ich deren Bauformen, Prinzipien und Herstellung näher beschreiben.

2.3.1. CO₂ - Sonde

Die Grundlage schafft das Prinzip des Energierohres, in dem zirkuliert ein Arbeitsmittel von selbst. Die Sonde besteht aus einem Kupferrohr (d=18mm) und einer 1 mm starken Schutzummantelung aus PE-HD. Am Sondenkopf befindet sich das Herzstück der CO₂- Sonde, der von der Firma MTEC patentierte Wärmetauscher (Kondensator). In dem wird die aus dem Bohrloch gewonnene Energie dem Kältemittel der Wärmepumpe weitergegeben. Ein großer Vorteil dieser Technologie ist, dass absolut keine Umweltverschmutzung bei einer möglichen Beschädigung der Sonde möglich ist, da CO₂ ein rein natürliches Medium ist. Auch aus diesem Grund ist man von der früheren Verwendung von Ammoniak abgewichen.

Prinzip einer CO₂- Sonde

Ein geschlossenes Rohr ist mit CO₂ gefüllt im Bohrloch verpresst. Bei einem angenommenen Temperaturgradienten von 3°C/100m ist ein Temperaturgefälle über die Länge des Rohres vorhanden. Die Füllmenge an CO₂ ist von dieser Temperatur und vom Durchmesser und Länge des Rohres abhängig. Es ist so weit zu befüllen, bis sich der Sättigungsdampfdruck einstellt und gleichzeitig ein Vorratsdepot am Rohrgrund von etwa 0,5m flüssiges CO₂ vorhanden ist. Somit ist am Boden flüssiges und im Rest des Rohres gasförmiges CO₂ vorhanden und stehen miteinander im Gleichgewicht. Es ist keine Zirkulation vorhanden.

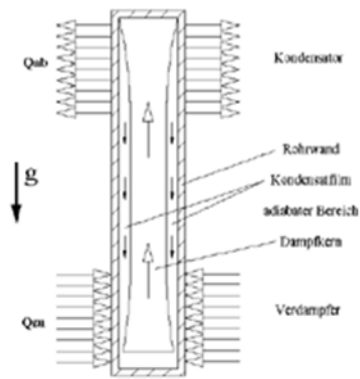


Abb. 5 Funktionsprinzip einer CO₂-Sonde

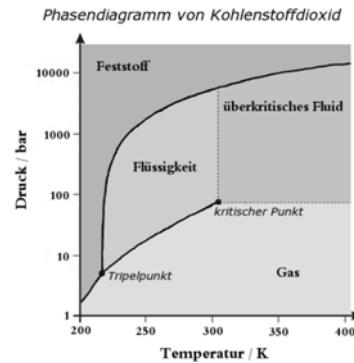


Abb. 6 Phasendiagramm CO₂

Wenn nun wie in Abb. 5 am Sondenkopf eine Temperaturverringerung eingeleitet wird (durch Inbetriebnahme der Wärmepumpe) beginnt die Selbstzirkulation. Es kondensiert das gasförmige CO₂ im Sondenkopf, gibt somit seine gespeicherte Energie ab und rieselt an der Rohrwand durch die Schwerkraft in flüssiger Form wieder in den unteren Bereich. In diesem Zustand ist die Sättigung nicht mehr gegeben und das flüssige CO₂ am Rohrgrund beginnt zu siedeln und steigt gasförmig in Rohrmitte auf. Im Sondenkopf gibt der Dampf die gewonnene Energie wieder an das Kältemittel durch Kondensation ab und der Kreislauf beginnt von Neuem. Dieser Prozess geschieht stets im isobaren Bereich.

Als Material des Energierohres ist, wie schon erwähnt, Kupfer. Es ist als guter und korrosionsbeständiger Wärmeleiter besser geeignet als z.B. Aluminium. Außerdem muss das Material wegen der hohen Betriebsdrücke diffusionsdicht sein.

Hauptaugenmerk der heutigen Forschungen ist die Wahl des idealsten Durchmessers der Rohre, da die Trennung der verschiedenen Phasenzustände (flüssig - gasförmig) für das Funktionieren des Systems ein sensibles Gebiet ist. So ist man von den früher verwendeten DN 14 mm Kupferrohren auf derzeit DN 18 mm Kupferrohren umgestiegen.

Herstellung einer CO₂-Sonde

Die Sonde wird wie herkömmliche Sonden ins Bohrloch eingeführt und verpresst. Beim Einbau ist die Sonde geschlossen und mit Stickstoff gefüllt, weil sonst die Gefahr besteht, dass in die Sonde Feuchtigkeit eintritt, die man später nur mehr schwer entfernen kann. Nach dem Einbau wird das Kupferrohr am oberen Ende abgeschnitten und somit entweicht der Stickstoff. Es ist dabei auf eine gute Belüftung des Schachtes zu achten. Anschließend wird der Sondenkopf (siehe Abb. 7) mit den Kupferrohren verlötet und kurz darauf wird jede Sonde (im Abb. 7 4 Stück) mit CO₂ befüllt. Dies ist nur dann möglich, wenn der CO₂-Behälter wärmer als die Sonde ist. Die Menge beträgt pro Sonde (100 m Länge) in etwa 3 kg CO₂. Prinzipiell muss so viel CO₂ eingefüllt werden bis sich der Sättigungsdampfdruck einstellt. Der liegt zum Beispiel bei einer Temperatur im Bohrloch von 15°C in etwa 52 bar (siehe Abb. 6). Somit steht das System im Sattdampfbereich unter Druck und im Idealfall befindet sich am Boden der Sonde jeweils ein Depot von 0,5 m flüssiges CO₂.

Nach dem Installieren der Kälteleitung (Abb. 8) zur Wärmepumpe ist die Sonde betriebsbereit.



Abb. 7 Sondenkopf Neumarkt



Abb. 8 Sondenkopf mit Kälteleitungen Neumarkt

Über den genauen Aufbau des Wärmetauschers kann ich wegen eines geschützten Patents der Firma M-TEC keine genaueren Auskünfte geben.

2.3.2. Sole Sonde

Eine Sole - Sonde ist im Prinzip ein mit Sole gefülltes Rohr, dass wie schon erwähnt mit einer Umwälzpumpe zirkuliert wird. Als Sole wird ein Gemisch aus herkömmlichen Frostschutzmittel und Wasser verwendet, da es bei dieser Technologie vorkommen kann, dass die Sole bis unter den Gefrierpunkt abgekühlt wird. Außerdem ist für eine etwaige Volumsänderung der Sole ein Ausgleichsbehälter im Solekreis notwendig.

Sondenmaterial

Als Material der Sondenrohre wird hauptsächlich das Kohlenwasserstoffpolymer PE - HD verwendet (Tholen M., 2008).

Dieses ist wegen seiner mechanischen Haltbarkeit (druckstabil, kälteresistent), guter Langzeitstabilität gegenüber der Sole, preiswerter Herstellung, guter Verarbeitbarkeit sowie deren kleinen hydraulischer Rauigkeit als Sondenmaterial sehr gut geeignet. Als einziger Nachteil ist die geringe Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,4 \text{ [W/m}^{\circ}\text{K]}$ zu erwähnen.

Die derzeit üblichen Sondenquerschnitte sind DN 32 mm*2,9 mm Wanddicke (bis zu einer Tiefe von 150 m) und DN 40 mm*3,7 mm Wandstärke (bis zu einer Tiefe von 300 m).

Untergeordnet werden auch Polypropylen (PP) sowie Polybutylen (PB) verwendet.

Bauformen

Grundsätzlich gibt es vier verschiedene Bauformen von Sole - Sonden(siehe Abb. 9):

- U-Sonde (Simplex-Sonde)
- Doppel U-Sonde (Duplex-Sonde)
- Koaxialsonde
- Komplexe Koaxialsonde

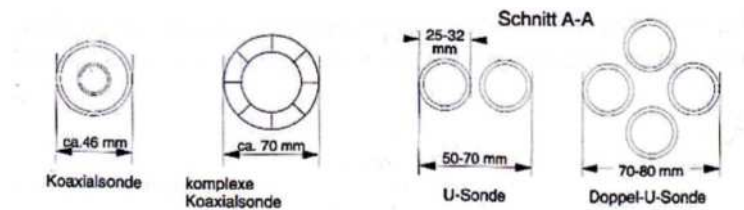


Abb. 9 Querschnitte Sondensysteme

Die U -Sonden und Doppel U - Sonden bestehen aus 2 bzw. 4 Rohren, die am unteren Ende so verbunden sind, dass das Wärmeträgermedium in einem Rohr nach unten und im anderen Rohr wieder nach oben strömen kann. Diese Technologie hat den Vorteil, dass über die gesamte Sondenlänge (2x Bohrlochtiefe) Wärme aufgenommen werden kann. Es ist jedoch auch zu bemerken, dass es zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Sondenrohre kommt.

Bei den Koaxialsonden hingegen ist die Energieaufnahme je nach Strömungsrichtung nur auf einer Länge (1x Bohrlochtiefe) der Sonde möglich.

Beim Einbau in das Bohrloch sind die Sonden mit Wasser gefüllt. Sollte das mit Wasser wirkende Eigengewicht immer noch nicht ausreichen, um einen leichten Einbau zu ermöglichen, dann kann zusätzlich ein Belastungsgewicht am Sondenfuss angebracht werden.



Abb. 10 Sondenfuss einer Simplex - Sonde



Abb. 11 Belastungsgewicht

Bei anschließender Druckprüfung wird auch sichergestellt, ob die Sonden für den anschließenden Betrieb dicht sind. Nach dem Befüllen mit einem Frostschutzgemisch ist die Sonde betriebsbereit.

2.4. Messtechnik

2.4.1. DTS Sensortran - Faseroptische Temperaturmesstechnik (FOT)

Zur Temperaturbestimmung in den Erdwärmesonden wird vom AIT Seibersdorf ein DTS System (Distributed Temperature Sensing) der Firma Sensortran verwendet. Grob besteht das Messsystem aus einem Glasfasermesskabel, einem Halbleiterlaser mit Einkoppeloptik und einem Ramanreflektometer.

Messprinzip

Das DTS Messprinzip beruht auf der Rückstreuung von Licht an Gitterschwingungen. Der gesendete Lichtstrahl wird im Glasfaserkabel reflektiert und kommt mit einer gewissen Streuung wieder zurück. Diese Streuung wird als Raman - Streuung bezeichnet.

Die Raman - Streuung kann man als die inelastische Streuung eines Photons $h\nu_i$ an einem Molekül im Anfangszustand $|i\rangle$ und mit der Energie E_i auffassen, wobei das Molekül in einen höheren Energiezustand E_f übergeht und das gestreute Photon nun die Frequenz ν_s (für Stokes) hat und die Energie $\Delta E = E_i - E_f = h(\nu_i - \nu_f)$ verloren hat (Demtröder, 1991). Für den Anteil von Antistokes - Raman - Streuung nimmt die Frequenz genau um den Wert ν_f zu, somit ist $\Delta E = E_i + E_f = h(\nu_i + \nu_f)$ (Glatz, 2010).

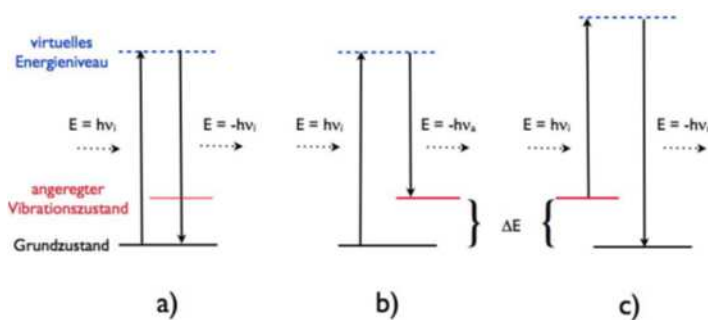


Abb. 12 Ramanstreuung als inelastische Photonenstreuung, a) Rayleigh - Streuung, b) Stokes - Raman Streuung, c) Antistokes - Raman - Streuung

Die Rückstreuung von Licht ohne Frequenzverschiebung bezeichnet man Rayleigh - Streuung. Um den Wert ν_f sind sowohl der Stokes - als auch der Antistokes - Anteil der Ramanstreuung frequenzverschoben. Im Gegensatz zum Stokes - Anteil ist der Antistokes - Anteil temperaturabhängig.

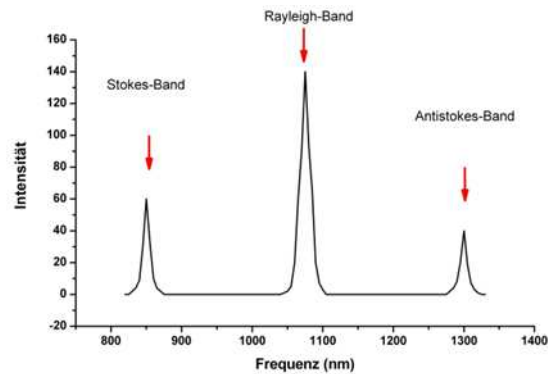


Abb. 13 Darstellung der frequenzabhängigen Ramanstreuung

Das Verhältnis der rückgestreuten Intensitäten des Stokes - und Antistokes - Bandes der Ramanstreuung ist für die orts aufgelöste faseroptische Temperaturmessung wichtig da,

$$\frac{I_a}{I_s} \sim T$$

also das Intensitätsverhältnis proportional der Temperatur ist und man damit direkt auf die Temperatur zurückschließen kann. Um diese Temperaturabhängigkeit genauer zu definieren ist folgender Zusammenhang wichtig:

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{(v_i + v_f)^4}{(v_i - v_f)^4} * e^{\frac{-h*c*v_f}{k*T}}$$

mit:

I_a ... Intensität des Antistokes-Anteils

T ... Temperatur

I_s ... Intensität des Stokes-Anteils

k ... Boltzmannkonstante

v_i ... Frequenz des einfallenden Lichtes

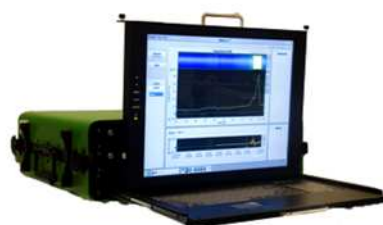
h ... Plank'sches Wirkungsquantum

v_f ... Frequenzverschiebung

c ... Geschwindigkeit des Lichtes

Mit der zusätzlichen vorhandenen optischen Zeitbereichsreflektoskopie (OTDR) ist es möglich, die Dämpfung des verwendeten Glasfaserkabels zu bestimmen. Diese Technologie ermöglicht etwaige Knicke (Verletzungen) oder fehlerhafte Spleiße zu detektieren. Damit wird also die Verlässlichkeit des Glasfaserkabels überprüft und seine Länge bestimmt.

Das Messgerät von der Forschungsstation Seibersdorf ist ein mobiles, leicht zu transportierendes Gerät und wird mit üblichen 220 Volt betrieben (siehe Abb. 14).



Triton™ Portable DTS System

Abb. 14 DTS-System (FOT)

Dieses Gerät hat Anschlüsse für vier Glasfasermesskabeln, die zeitversetzt durch die Messdauer gleichzeitig verwendet werden können.

Glasfasermesskabel

Bei den durchgeführten Messungen wurden zwei unterschiedliche Glasfasermesskabel verwendet. Das in Abb. 15 ersichtliche Kabel der Firma Brugg wurde in einer Sonde bei der Anlage Neumarkt verwendet, alle anderen Sonden wurden mit einem Kabel der Firma Leoni gemessen.

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

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

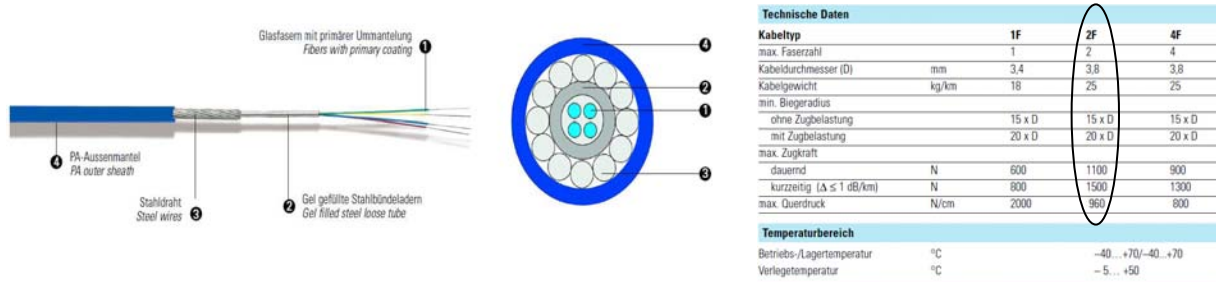


Abb. 15 Glasfaserkabel der Firma Brugg

Kalibrierung der Glasfasermesskabel

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

Der Hersteller gibt die Vorgangsweise bei der Kalibrierung im Manual bereits vor. Er empfiehlt dazu zwei überprüfbar, von der Zimmertemperatur unterschiedliche, Temperaturniveaus. Wie in Abb. 16 ersichtlich, sind das ein mit Eis gekühltes Wasserbad und ein genau temperierbarer Ofen.

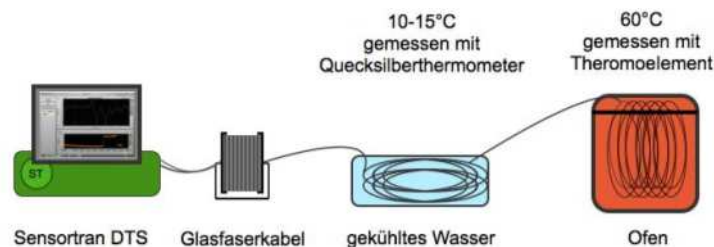


Abb. 16 Messanordnung bei der Kabelkalibrierung

Dabei wird ein jeweils ein mehr als 5 m langes Kabelstück in das beschriebene Gefäß mit Eiswasser bzw. in den Ofen gegeben und deren Temperatur mittels einem geeichten Thermometer gemessen. Die dazu verwendeten Thermometer waren ein Quecksilberthermometer und ein elektronisches Thermometer.

Nach dem Einstellen des Geräts auf die Kalibrierung und dem Auswählen des verwendeten Glasfaserkabels kann mit der Kalibrierung begonnen werden. Dabei ist es von großer Bedeutung, die Temperaturen in den beiden Referenzmedien genau zu beobachten.

Das verwendete Kabel der Firma Leoni beinhaltet zwei Glasfasern, die Leoni 1 und Leoni 2 benannt worden sind.

Nach der Erstmessung und dem gleichzeitigen Ablesen der Referenztemperaturen ergibt sich wie in Abb. 17 folgendes Bild. Die rote Linie (Leoni1) ist gegenüber der grünen Linie (Leoni2) verschieden

in ihrer Lage. Die blauen Linien sind die beiden gemessenen Temperaturen (Wasserbad unten, Ofen oben).

Nun gibt es drei Parameter, mit denen man die Kurve an die beiden Referenztemperaturen angleichen kann:

- **DAF:** Die Neigung der Kurve wird geändert
- **C₀:** Je höher dieser Parameter, umso mehr wird die Kurve nach oben verschoben (in y-Richtung)
- **C₁:** Je niedriger dieser Parameter, umso mehr wird die Kurve zusammengezogen (gestaucht in y-Richtung)
- **C₂:** wird bei Temperaturen von über 300°C benötigt

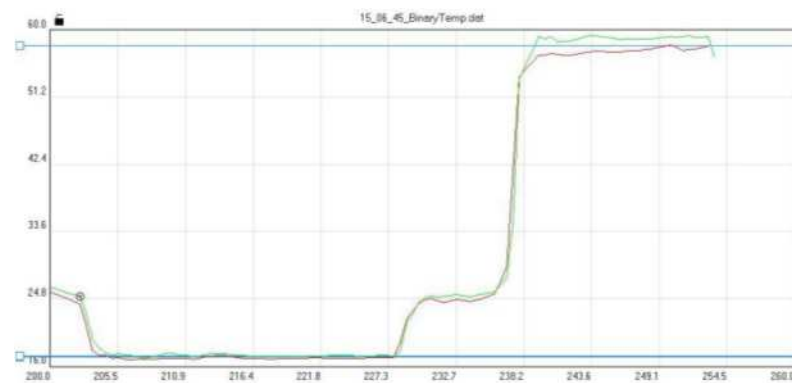


Abb. 17 Temperaturverläufe vor der Kalibrierung

Nach erfolgter Kalibrierung sollte der Temperaturverlauf der beiden Messfasern des Glasfaserkabels gut mit den beiden gemessenen Temperaturen übereinstimmen (Abb. 18). Das Kabel ist somit kalibriert und kann für die Temperaturbestimmung verwendet werden.

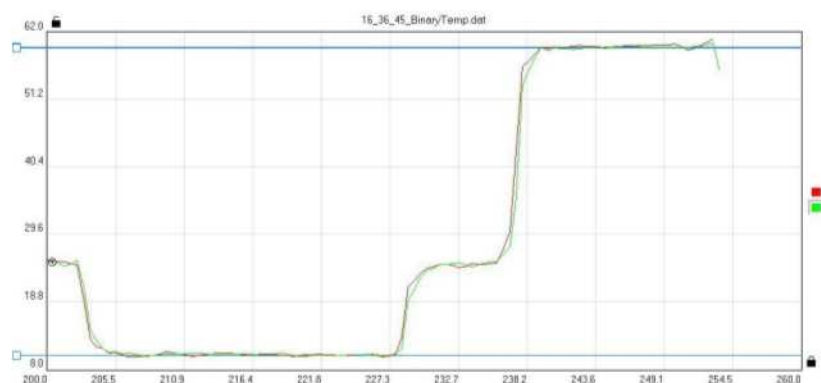


Abb. 18 Temperaturverläufe nach der Kalibrierung

Es ist dabei noch zu erwähnen, dass die kalibrierten Kabel nur auf jenen Anschlüssen, an denen sie kalibriert wurden, verwendet werden sollen. Bei Verwendung eines anderen Anschlusses ist eine neue Kalibrierung erforderlich.

Messparameter und Messanordnung

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

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

Die örtliche Lage des Messkabels zur Erdwärmesonde ist je nach Sondentechnologie verschieden. Während bei den Sole - Sonden der Einbau des Messkabels direkt in die Sonde möglich ist, ist bei der CO₂ - Sonde ein zusätzliches "Messrohr"(DN 25 mm) neben der Sonde nötig.

Beim Einbau in der Sole - Sonde wurde eine Klemmmuffe am Sondenkopf eingebaut (sieheAbb. 19).

Das Glasfasermesskabel ließ sich leicht einführen und unter dem Eigengewicht des Kabels erkannte man auch das Erreichen des Sondenfußes. Nach dem Nachlassen des Zuges durch die Gravitation zog man das Kabel so weit wieder heraus, bis man das Gewicht des Kabels wieder spürte. In dieser Position wurde es mit der Klemmmuffe fixiert und abgedichtet. Somit wurde sichergestellt, dass sich das Kabel freihängend in der Sonde befindet.



Abb. 19 Sole - Sondenkopf mit Glasfasermesskabel

2.4.2. Messung der Betriebsdaten - Monitoring

Das Konzept des Monitorings ist, mittels der Ergebnisse die Funktion und Effizienz der errichteten Wärmepumpenanlagen nachzuweisen. Dieses gliedert sich in folgende drei Stufen:

- Ein Fragebogen für den Anlagenbetreiber, wobei sämtliche erforderlichen Daten aufgenommen werden, welche nicht von der Datenerfassung gemessen werden können.
- Mithilfe von Datenloggern werden sämtliche Messwerte von der Anlage erfasst, die über ein GSM- Modems an den Monitoring - Server im arsenal - research weitergeleitet werden.
- Die Daten werden mittels einer eigens dafür entwickelten Datenbank ausgewertet und analysiert.

Eine Anlagenvermessung muss möglichst informativ und effizient sein, daher muss genau festgelegt werden welche Messdaten aufzuzeichnen sind. Doch zuerst muss definiert werden, welche Ergebnisse die Auswertung liefern soll.

Es sollte folgender Ergebniskatalog gelten (G.Glasner):

- Stromaufnahme
- Wärmeabgabe
- Jahres-, Monats- und Tagesarbeitszahl
- Betriebsstunden der Wärmepumpe
- Mittlere Stromaufnahme
- Mittlere Heizleistung
- Mittlere Tageslaufzeit
- Schalthäufigkeit/Tag
- Außen- und Innentemperatur
- Wärmequellen- und Wärmesenkentemperatur
- TEWI (total equivalent warming impact)
- Schadstoffemissionen

Die Messung der erforderlichen Daten werden zum Teil mit bereits installierten Messgeräten von dem Anlagenbetreiber durchgeführt, sie müssen jedoch ÖKD kalibriert und geeicht sein. Ansonsten werden PT 100 Temperaturfühler und Wärmemengenzähler (Sontex Superstatic 440, Kampstrup MC 401) und übliche Stromzähler eingebaut.

Während des Zeitraums der Datenerfassung werden die Messdaten in einem 2 Sekunden Intervall gemessen und dann als 15 Minuten Mittelwerte abgespeichert, damit aussagekräftige Trendlinien dargestellt werden können.

Die an den Monitoring Servers übertragenen Daten werden periodisch auf Plausibilität geprüft und am Ende der Datenerfassungsperiode ausgewertet.

2.5. Geologie

2.5.1. Das Kristallin der Böhmisches Masse

Entstehungsgeschichte und Zuordnung

Als Böhmisches Masse wird das alte Rumpfgebirge in Bayern, Tschechien und Österreich bezeichnet. Es ist ein stark erodierter Rest eines alten Gebirgsmassivs Mitteleuropas.

Im mittleren Paläozoikum (Kambrium) wurde durch die Kollision der Kontinentalmassen Gondwana (einschließlich dem nördlichsten Teil Armorica), Sibiria und Laurussia die variszische Orogenese eingeleitet. Dabei entstand der Großkontinent Pangäa. Die Varisziden erstrecken sich über weite Teile West- und Mitteleuropas, aber auch Gebirgszüge in Asien werden dieser Entstehungszeit zugeordnet. (Murawski, 2004)

Dabei bildet das Böhmisches Massiv zusammen mit den Vogesen in Frankreich und dem Schwarzwald in Deutschland den zentralen Bereich des mitteleuropäischen variszischen Gebirges.

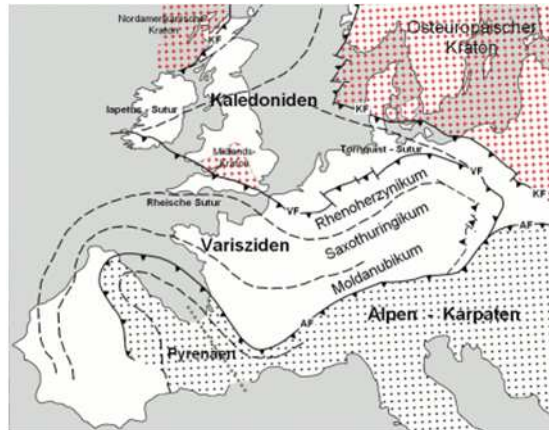


Abb. 20 Einteilung der Varisziden

Der österreichische Anteil der Böhmisches Masse wird nach (Tollman, 1985) in folgende geologische Großeinheiten gegliedert (von Ost nach West):

- Moravikum
- Moldanubikum
- Südböhmisches Granitareal
- Bavarikum

Das **Moldanubikum**, benannt nach den Flüssen Moldau und Donau, umfasst laut Kossmat (1927) (Murawski, 2004) das französische Zentralmassiv, die oberrheinischen Massive und die böhmische Masse. Diese Zone besteht aus alten Metamorphiten mit geringmächtiger und lückenhafter Sedimenthülle. Hier hatten Bruchtektonik und ausgedehnte magmatische Intrusionen den Vorrang gegenüber der eigentlichen variszischen Falten tektonik.

Das **Moravikum**, benannt nach dem Gebiet Mähren, unterscheidet sich zum Moldanubikum durch einen geringeren Metamorphosegrad und einen höheren Anteil von vorvariszischen Granitgneis (Tollman, 1985).

Es ist jedoch zu bemerken, dass es speziell bei der Böhmisches Masse (Moldanubikum, Moravikum) hinsichtlich der genauen Datierung der Entstehung divergente Meinungen gegeben hat und teils immer noch gibt.

Die Böhmisches Masse wird auch das alte Dach Europas genannt. Bei der Entstehung der Alpen kann man Sie als Gegenstück des alpinen Stockes sehen. Sie ist sogar durch abgeteufte Bohrungen unter den nördlichen Kalkalpen nachgewiesen worden. Ebenso ist das Kristallin der Böhmisches Masse mitsamt den Sedimentgesteinen des Karbons, Perms, Jura und Kreide unter der Molassezone, die in südlicher und östlicher Richtung die Böhmisches Masse überlagert, vorhanden.

Geographisch betrachtet erstreckt sich die Böhmisches Masse in Österreich über das Mühlviertel und dem Sauwald in Oberösterreich, sowie über das Waldviertel in Niederösterreich. Über weite Strecken bildet die Donau die südliche Abgrenzung.

2.5.2. Die Molassezone

Die Molassezone erstreckt sich über die gesamte Länge an der Nordseite der Alpen, von der Mittelmeerküste über die Rhone - Niederung, das Schweizer-, Bayrische- und Österreichische Alpenvorland bis hin zum Vorland der Karpaten.

Der etwa 300 km lange österreichische Anteil schwankt in seiner Breite zwischen 5 und 50 km und erreicht eine Mächtigkeit von bis zu 5000 m (Tollman, 1985).

Gefüllt ist der Streifen von Niederungen mit Sedimenten aus dem Quartär und Tertiär, die von den noch sich hebenden Alpen und auch zu einem geringen Teil von der Böhmisches Masse stammen. Die Schotter, Sande und Tone wurden in unterschiedlichen Sedimentationsräumen wie Deltas, Küsten oder auch Schelfgebieten abgelagert, tiefmarine Bildungen (submarine Canyons; Beckenbildungen) und Umlagerungsprozesse (submarine Rutschungen) spielten jedoch eine große Rolle (www.geologie.ac.at, 2011).

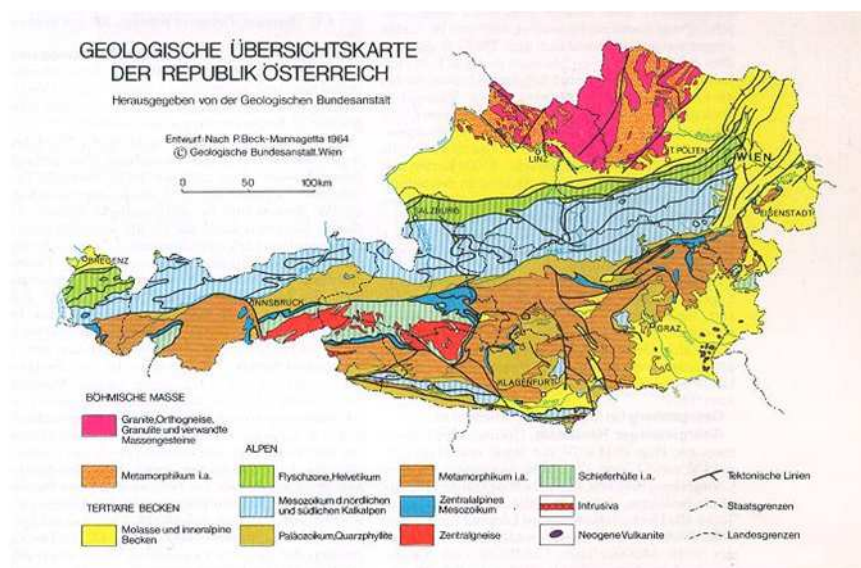


Abb. 21 geologische Übersicht Österreichs mit der Molassezone

In Abb. 21 sieht man den österreichischen Anteil der Molassezone (gelbe Schraffierung). Von der Herkunft muss man noch zwischen einigen Sachen unterscheiden. Es wechseln bei der Entstehung marine Episoden (Meeresmolasse) mit limnischen Abschnitten (Süßwassermolasse). Als Subalpine Molasse (Faltenmolasse) bezeichnet man den Streifen unmittelbar vor dem Alpenrand, der noch von der alpinen Deformation betroffen wurde. Es sind noch ältere Ablagerungen aus dem Vorland der Varisziden bekannt (Nagelfluh, Tegel) (Murawski, 2004).

3. Untersuchte Anlagen

3.1. Thermal Response Test

Bei der Auslegung größerer Erdwärme-Sondenanlagen ist die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Untergrundes eine wesentliche Voraussetzung.

Mit einem TRT ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und des Bohrlochwiderstandes möglich.

Theoretischer Hintergrund:

Beim TRT wird über eine Erdwärmesonde dem Untergrund eine konstante thermische Leistung zugeführt oder entzogen. Die Auswertung erfolgt nach der Kelvin'schen Linienquellentheorie.

Es ergibt sich für die Fluidtemperatur folgender mathematischer Zusammenhang

$$T_f = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} * \ln(t) + \frac{\dot{Q}}{H} * \left(\frac{1}{4\pi\lambda} * \left(\ln\left(\frac{4a}{r_0^2}\right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_s$$

T_fmittlere Fluidtemperatur [K]

T_sungestörte Ausgangstemperatur des Untergrundes [K]

$\dot{Q}$Heizleistung [W]

HTiefe der Erdwärmesonde [m]

R_bthermischer Bohrlochwiderstand [mK/W]

r_0 Bohrlochradius [m]

tZeit [h]

aTemperaturleitfähigkeit [m²/s]

λWärmeleitfähigkeit des Untergrundes[W/mK]

γEuler Konstante (0,5772)

Die obige Gleichung ist nur dann gültig, wenn folgendes Zeitkriterium erfüllt ist:

$$t > 5 * r_0^2 / a$$

Sie kann dann vereinfacht durch $T_f = m * \ln(t) + n$ dargestellt werden.

Trägt man die mittlere Fluidtemperatur gegen den Logarithmus der Zeit auf, so kann dann aus der Steigung die effektive Wärmeleitfähigkeit λ bestimmt werden. Mit dieser lässt sich dann der Bohrlochwiderstand R_b ermitteln.

3.2. Co2 Sonden

3.2.1. Anlage Neumarkt/Mühlkreis - Granit

3.2.1.1. Lagebeschreibung

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

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



Abb. 22 Übersichtsplan Neumarkt

Adresse: Hagerweg 5, 4212 Neumarkt im Mühlkreis

Koordinaten (GK M31): Rechtswert: 85918m

 Hochwert: 365640m

 Seehöhe: 630 m ü.A.

Die zwei CO₂ Erdwärmteiefensonden wurden im Garten des Grundstücks abgeteuft. Der horizontale Abstand der beiden Sonden beträgt 18m.

Auf demselben Grundstück befindet sich ein vom Eigentümer benutzter Trink- und Nutzwasserbrunnen. Der Abstand zu den beiden Sonden beträgt 15 bzw. 33 m.

Die Übersicht (Abb. 23) lässt die Hanglage erkennen, im rechten Bild (Abb. 24) sind die Erdwärmesonden mit gelben Punkten, der Brunnen mit einem roten Punkt markiert.



Abb. 23 Orthofoto Neumarkt



Abb. 24 Lage der Sonden Neumarkt

3.2.1.2. Geologie und Hydrogeologie

Die Anlage befindet sich im Kristallin der Böhmisches Masse.

Laut geologischer Karte (Abb. 25) befindet sich der Standort in einer Vermischungszone von Weinsberger Granit zu Migmagranit, Engerwitzdorfer Granit und Diatexit.

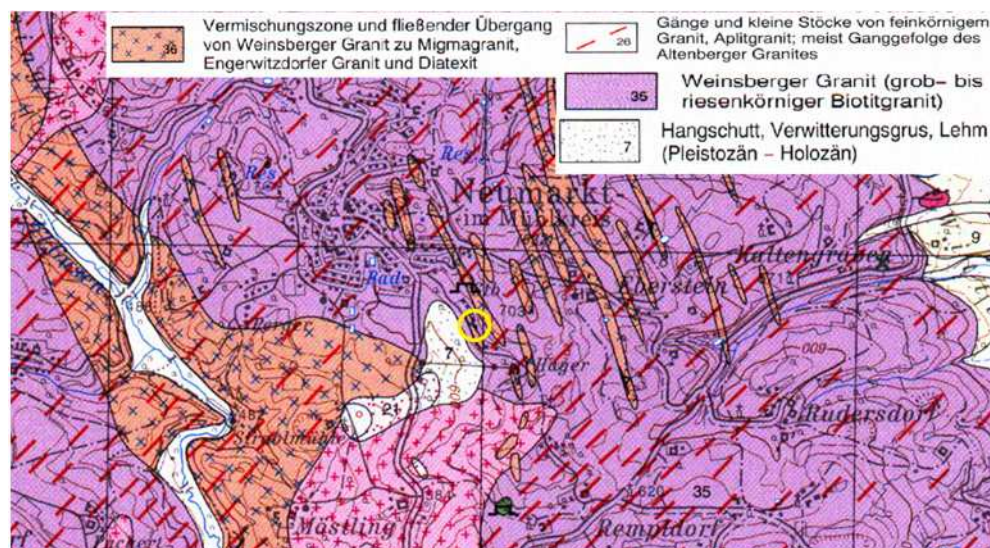


Abb. 25 Geologische Karte Neumarkt/Mühlkreis

Weinsberger Granit ist ein grob - bis riesenkörniger, porphyrischer Granit. Charakteristisch sind die dicktafeligen, nach dem Karlsbader Gesetz verzwillingten Alkalifeldspat-Einsprenglinge, die nicht selten 10 bis 18 cm Länge erreichen.

Bei der Betrachtung der Bohrprofile (siehe Anhang) kann man die geologischen Verhältnisse folgend beschreiben:

Bis zu einer Tiefe von etwa 4m ist das Kristallin mit einer lehmig, grusigen Verwitterungsdecke samt Humusschicht überlagert. Danach folgt ein klüftig, hartes Festgestein mit großer Tiefernerstreckung, dass schon nach wenigen Metern standfest ist. Wie aus den Bohrprofilen ersichtlich ist, handelt es sich um eine Abfolge aus braunen, grauen, sowie teils grünen bis schwarz-weißen Graniten.

Die Grundwasserverhältnisse sind durch den schon bestehenden Hausbrunnen (DN 115 mm, Brunnentiefe 30 m, hergestellt 1999) gut bekannt. Der Grundwasserkörper (wassererfüllter

Kluftaquifer) wurde in einer Tiefe von 16 m unter GOK im gespannten Zustand angetroffen. Der Ruhewasserspiegel liegt bei etwa 2,8 - 8,5 m unter GOK. Die Dotierung dieses Kluftaquifers erfolgt durch Infiltration von Niederschlagswasser. Durch Temperaturmessungen des Betreibers wurde eine Grundwassertemperatur zwischen 8,8 °C und 10 °C beobachtet.

3.2.1.3. Anlagenbeschreibung

Herstellung der Sonden

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

Die Besonderheit bei dieser Anlage besteht darin, dass Sonde 1 als Brunnenbohrung, d.h. ohne Ringraumverpressung, und Sonde 2 wie herkömmliche Sonden mittels Verpressmaterial (Thermocem) verfüllt wurde. Es ist dabei zu erwähnen, dass eine solche Ausführung als Brunnenbohrung nur im standfestem Material möglich ist und es bezüglich Grundwasservorkommen nicht zu einem Kurzschluss von mehreren Aquiferen kommen darf, d.h. von vorherein bekannt sein muss, dass es sich um einen zusammenhängenden Aquifer handelt.

Anlagedaten und Bemessungswerte

In der Tab. 3 sind die wichtigsten Anlagedaten ersichtlich.

Tab. 3 Bemessungswerte Neumarkt

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

Als Wärmepumpe wird ein frequenzgesteuertes Fabrikat der Firma Heliotherm verwendet. Als Wärmequelle dienen 2 CO₂-Erdwärmefiefensonden. Die technischen Daten sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4 Anlagendaten Neumarkt

Wärmepumpe		CO2-Sonden	
Fabrikat/Type	HP12E-M-Web	Anzahl Bohrungen	2
Kältemittel	R410a	Tiefe/Bohrung	100m
Füllmenge/Kältemittel	4,5-5,5kg	Durchmesser Bohrung	150mm
Bauart Verdichter	Scroll	Anzahl Sondenrohre/Bohrung	4
Kompressoröl	Esteröl	Füllmenge Co2/Sondenrohr	2,5kg
Füllmenge/Kompressoröl	1,8l	Rohrdurchmesser Sonde	18mm
Betriebsweise	monovalent	Rohrwanddicke	1mm
Sperrzeit/EVU	1h	Werkstoff Sondenrohr	SF-CU F22
Leistungsaufnahme bei V5/W50	3,98 kW	Wandstärke Hüllrohr	1mm
Kälteleistung bei V5/W50	8,19 kW	Werkstoff Hüllrohr	PE-HD
Heizleistung bei V5/W50	12,18 kW	Verpressmaterial Sonde 2	Thermocem
Leistungszahl bei V5/W50	3,06		

3.2.1.4. Messmethodik

Bei der **Messperiode 2009** wurden folgende Betriebszustände durchgeführt:

- Betriebszustand 1: verpresste Sonde 2 im Vollastzustand, unverpresste Sonde 1 im Ruhezustand
Betriebszeit Sonde 2: 21.07.2009 17.21Uhr - 25.07.2009 12.13 Uhr
- Betriebszustand 2: unverpresste Sonde 1 im Vollastzustand, verpresste Sonde 2 im Ruhezustand
Betriebszeit Sonde 1: 26.07.2009 21.30 Uhr - 31.07.2009 11.30 Uhr
- Betriebszustand 3: beide Sonden im Ruhezustand, Grundwasser-Umwälzpumpe in Betrieb
Betriebszeit UW-Pumpe: 09.08.2009 17.45 Uhr-10.08.2009 17.00Uhr
- Betriebszustand 4: unverpresste Sonde 1 im Vollastzustand mit Umwälzung des Grundwassers, verpresste Sonde 2 im Ruhezustand
Betriebszeit Sonde 1: 22.08.2009 12.02 Uhr - 27.08.2009 16.53 Uhr

Bei der Umwälzung des Grundwassers wurde eine herkömmliche Gartenpumpe verwendet. Dabei wurde das Grundwasser im oberen Sondenbereich durch das Messrohr entnommen und in den Ringraum gepumpt. Dadurch das das Messrohr unten offen ist, kam es zur Umwälzung des Grundwassers im Ringraum.

Bei der **Messperiode 2010** wurden im Prinzip nur die Temperaturminima der Sonden beobachtet.

3.3.1.2. Geologie und Hydrogeologie

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

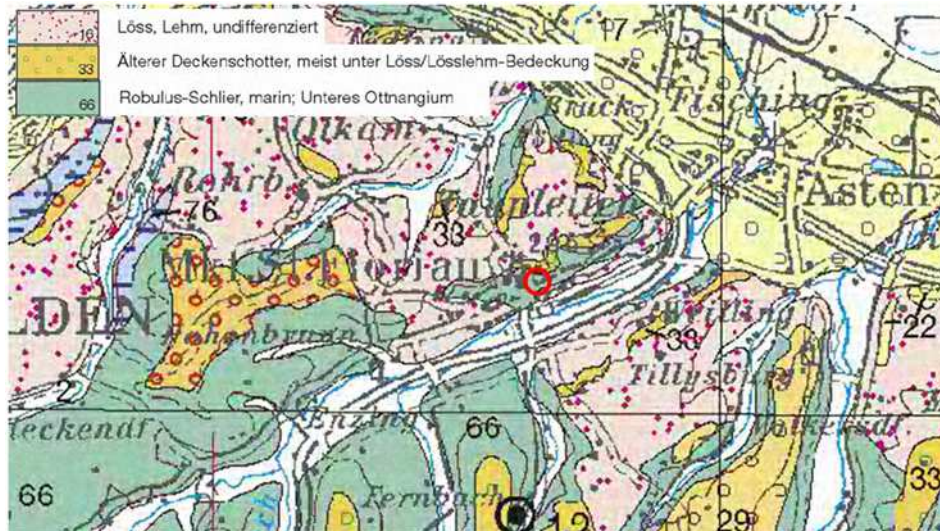


Abb. 29 geologische Karte Sankt Florian

Bei der Betrachtung der Bohrprofile (siehe Anhang) lässt sich gleiches erkennen. Nach einer Deckschicht aus schluffig, tonigen Material kommt eine Mittelkiesschicht mit einer Mächtigkeit von etwa 4m. Ab einer Tiefe von etwa 9m unter GOK besteht der Untergrund aus blauem Schlier, der nur in einer Tiefe von etwa 28m für wenige cm verfestigt ist (Flinzstein). Schlier ist eine lokale Ausdrucksform Oberösterreichs für einen feinschluffigen Mergel.

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

3.3.1.3. Anlagenbeschreibung

Herstellung der Sonden

Die beiden Erdwärmteiefensonden wurden mittels Rotationstrockenbohrung je 100 m abgeteuft. Eine Hilfsverrohrung DN 140 mm besteht bei beiden Bohrungen bis zu einer Tiefe von je 12 m. Danach misst die Bohrung einen Durchmesser von 115 mm.

Die Besonderheit dieser Anlage besteht in der Verwendung unterschiedlicher Verpressmaterialien. Nachdem beide Bohrungen mit jeweils einer Duplex- Solesonde DN 32 mm bestückt wurden, wurde Sonde 1 mit einer Zement - Bentonit Suspension (Mischungsverhältnis 5:1) und Sonde 2 mittels herkömmlichen Verpressmaterial (Thermocem) verpresst. Sonde 1 ist außerdem mit einem Messrohr DN 25 mm ausgestattet.

Anlagedaten und Bemessungswerte

Tab. 5 Bemessungswerte Sankt Florian

beheizte Fläche	400 m ²
Heizsystem	Fußbodenheizung /-kühlung
Bausubstanz	150 m ² saniert, 250 m ² Neu
erforderliche Heizleistung	12 kW
Vorlauftemperatur	35°C
Betriebsstunden	Mo-Do 6:00-19:00h Fr 6:00-13:00h
angenommene Entzugsleistung	50 W/m
Wärmepumpe	Vaillant

Tab. 6 Anlagedaten Sankt Florian

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

3.3.2. Anlage Amstetten - Molasse

3.3.2.1. Lagebeschreibung

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



Abb. 30 Lageplan Amstetten

Koordinaten (GK M31): Rechtswert: 114228 m
 Hochwert: 334095 m
 Seehöhe: 291 m

Wie in Abb. 31 erkennbar ist die Erdwärmetiefensonde etwa 4m vom Gebäude entfernt. Die Sonde führt direkt ohne Schacht in den Keller des Wohnhauses.



Abb. 31 Orthofoto mit Katasterlageplan Amstetten

3.3.2.2. Geologie und Hydrogeologie

Die Anlage befindet sich in der Molassezone. Laut geologischer Karte treten dort der Ältere Schlier des Egeriums sowie Sandstreifenschlier des Ottnangium auf, die von Schotterlagen des obersten Neogen überlagert sein können.

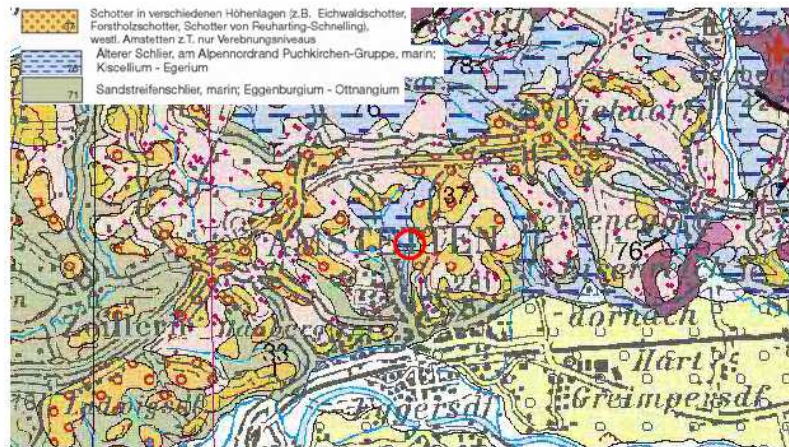


Abb. 32 geologische Karte Amstetten

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

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

Es befindet sich am selben Grundstück noch ein Nutzwasserbrunnen.

3.3.2.3. Anlagenbeschreibung

Herstellung der Sonde

Die Bohrung DN 168 mm wurde im Rotationsbohrverfahren hergestellt. Eine Hilfsverrohrung wurde bis zu einer Tiefe von 12 m eingesetzt. Nach dem Erreichen der Endtiefe von 126 m wurde nach dem Einsetzen der Duplex - Solesonde (4x DN 32 mm) das Bohrloch mittels Stüwatherm fachgerecht verpresst. Die Sonde wurde direkt in das Kellergeschoß geführt.

Bemessungswerte und Anlagedaten

Die genauen Anlagedaten und Bemessungswerte sind in Tab. 7 und Tab. 8 zu entnehmen.

Die Besonderheit dieser Anlage besteht aus der Kombination der Erdwärmetiefensonde mit der vorhandenen Solaranlage. Es wird nicht nur wie üblich das Heizsystem bzw. die Warmwasserproduktion damit gespeist, sondern es wird die überschüssige Solarwärme über einen Wärmetauscher in den Untergrund eingebracht.

Tab. 7 Bemessungswerte Amstetten

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

Tab. 8 Anlagedaten Amstetten

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

3.3.3. Anlage Sankt Oswald - Granit

3.3.3.1. Lagebeschreibung

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



Abb. 33 Übersichtsplan Sankt Oswald

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

Adresse: Markt 33, 4271 Sankt Oswald

Koordinaten (GK M31) Rechtswert: 92921m

Hochwert: 374351m

Seehöhe: 612m.ü.A.

Aus Platzgründen wurden die 2 Erdwärmefensonden 1.5 m vor dem Gebäude auf öffentlichem Grund (Grundstück 1120/6) mit einem Abstand von 6,3 m zueinander abgeteuft.



Abb. 34 Orthofoto mit Kataster und Höhenschichtlinien



Abb. 35 Lage der Erdwärmesonden

In Abb. 34 ist die leichte Hanglage erkennbar, in Abb. 35 sind die beengten Platzverhältnisse und die Lage plus Zuleitung der beiden Erdwärmesonden ersichtlich.

3.3.3.2. Geologie und Hydrogeologie

Die Anlage befindet sich im Kristallin der Böhmisches Masse. Laut geologischer Karte (Abb. 36) liegen die beiden Bohrungen im Bereich von quartären Sedimenten.

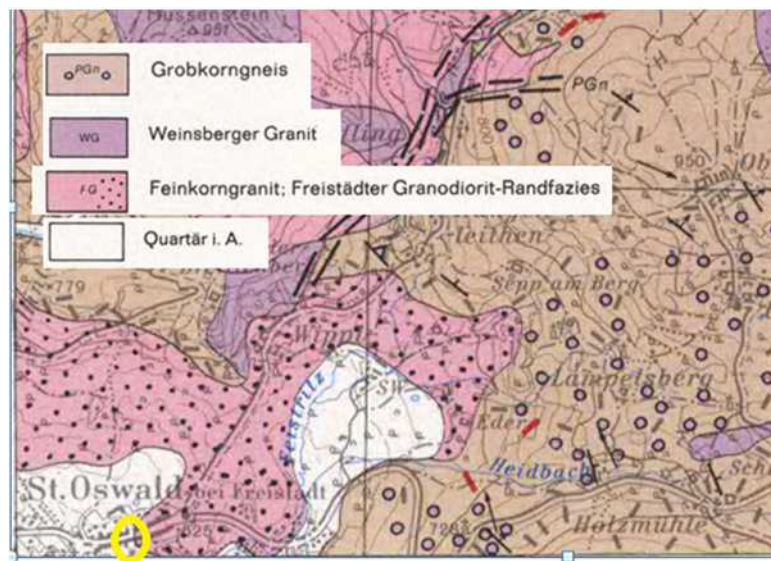


Abb. 36 geologische Karte Sankt Oswald

Anhand des Bohrprotokolls wurde folgende Geologie angetroffen. Bis zu einer Tiefe von 4,6 m trat eine Schicht mit Flinz und Steinen zu Tage. Verwitterter brauner Granit wurde bis zu einer Tiefe von etwa 14 m angetroffen, darunter befand sich kompakter, grau- rötlicher Granit.

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

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

3.3.3.3. Anlagenbeschreibung

Herstellung der Sonden

Die Bohrung DN 115 mm wurde im Trockenbohrverfahren mit Luftspülung jeweils 150m abgeteuft. Bis zu einer Tiefe von 16,5m (Sonde 1) bzw. 18m (Sonde 2) wurde wegen des Verwitterungsgrades des anstehenden Gesteins eine Hilfsverrohrung mit DN 140 mm eingebaut.

Aus rein wissenschaftlichen Zwecken wurden zwei unterschiedliche Sondensysteme eingebaut, die im Betriebszustand bei gleicher geologischer Grundlage beobachtet und hinsichtlich Effizienz ausgewertet werden können.

Die Sonde 1 besteht aus einer Simplexsonde mit einem Rohrdurchmesser von DN 40 mm. Die Sonde 2 besteht aus einer Duplexsonde mit einem Rohrdurchmesser DN 30. Beide Tiefensonden wurden mit einem Bentonit - Zement Gemisch verpresst. Die genauen Daten sind in Tab. 10 ersichtlich.

Anlagedaten und Bemessungswerte

In Tab. 9 sind die Bemessungswerte ersichtlich.

Tab. 9 Bemessungswerte Sankt Oswald

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

Als Wärmepumpe wurde ein Fabrikat der Marke Ochsner gewählt. Die genauen Daten sind in Tab. 10 ersichtlich.

Tab. 10 Anlagedaten Sankt Oswald

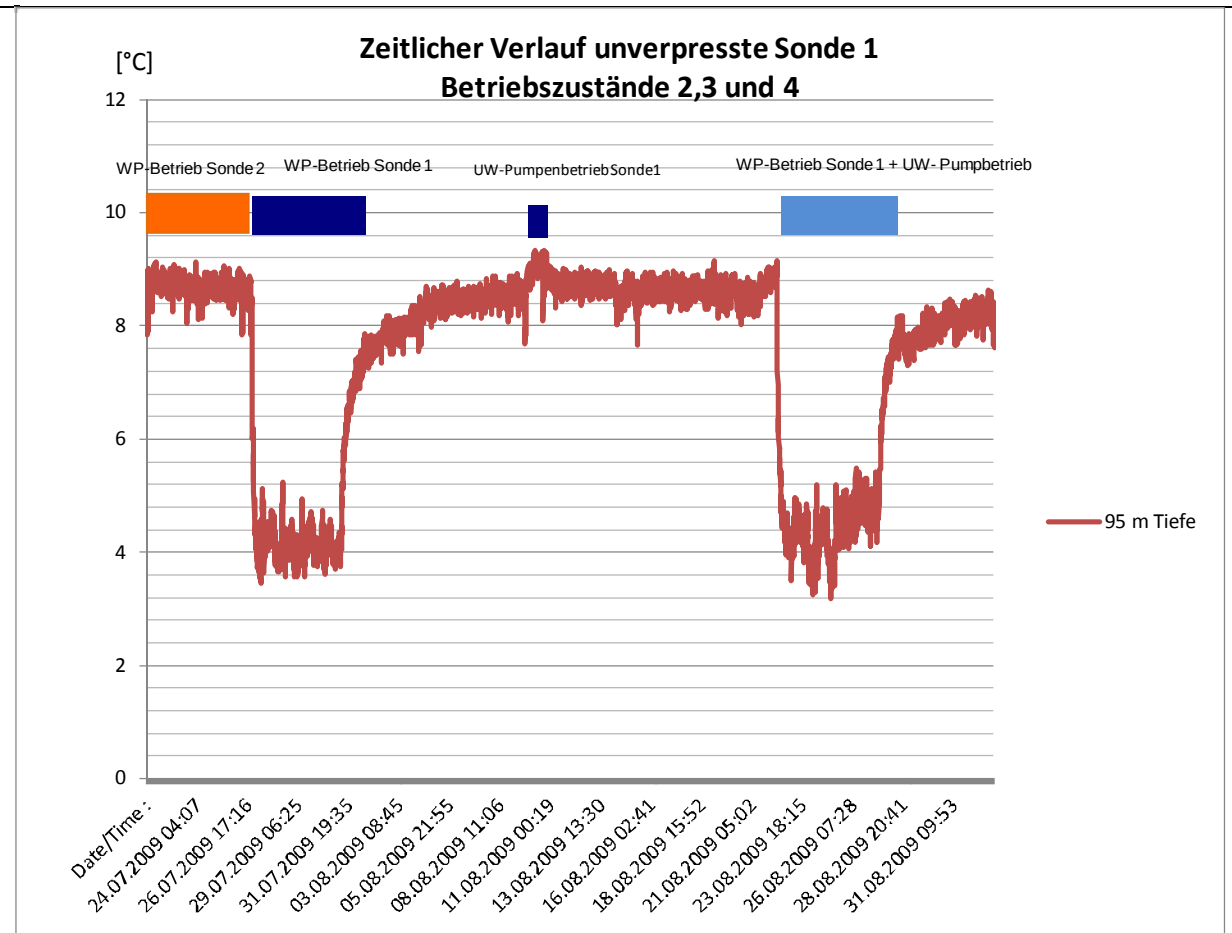
Wärmepumpe		Sole-Sonden	
Fabrikat/Type	GMSW 18	Anzahl Bohrungen	2
Kältemittel	R 407 C	Tiefe/Bohrung	150m
Füllmenge/Kältemittel	1,3 kg	Durchmesser Bohrung	140/115mm
Bauart Verdichter	Scroll	Anzahl Sondenrohre/Bohrung	2 (Sonde 1)/4 (Sonde 2)
Kompressoröl	EMKARATE RL 325	Sonden-Rohrdurchmesser mm	40 (Sonde 1)/32 (Sonde 2)
Füllmenge/Kompressoröl	1,85 l	Rohrwanddicke mm	3,7(Sonde 1)/2,9 (Sonde 2)
Betriebsweise	monovalent	Werkstoff Sondenrohr	PE-HD PE 100 PN 16
Sperrzeit/EVU	1h	Frostschutzmittelgemisch Sole:Wasser	01:01
Leistungsaufnahme bei S0/W35	3,05 kW	Frostschutzmittel	Ethanol 60%
Kälteleistung bei S0/W35	10,45	Verpressmaterial Zement:Bentonit:Wasser	75kg:10kg:140l
Heizleistung bei S0/W35	13,5 kW		
Leistungszahl bei S0/W35	4,4		

4. Ergebnisse

4.1. Interpretation der Temperaturprofile

4.1.1. Wärmeentzug

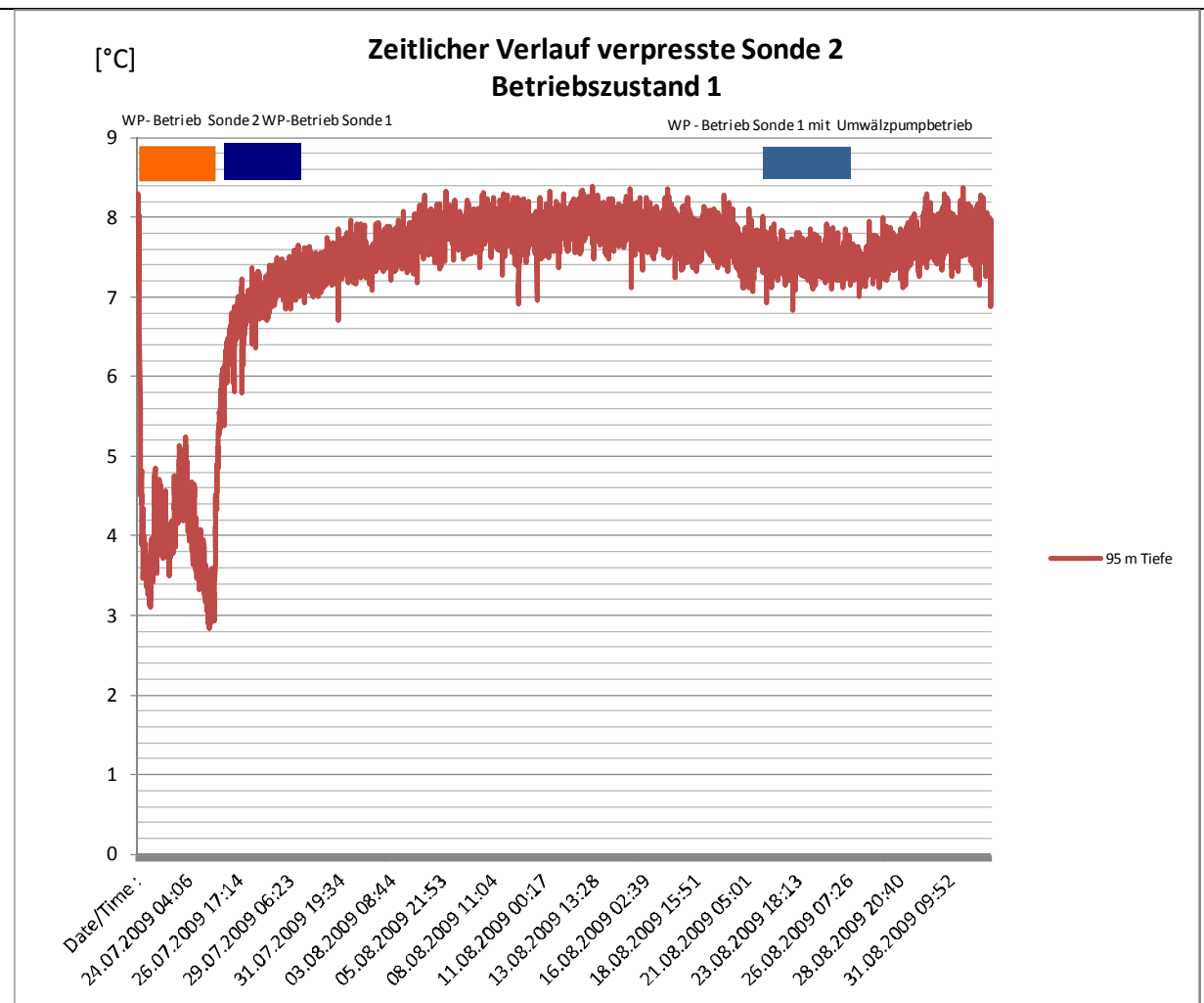
4.1.1.1. Anlage Neumarkt



In diesem Diagramm sieht man den zeitlichen Verlauf der ersten Messungen in Neumarkt im Sommer 2009. Der Graph zeigt die Temperatur der Sonde 1 in 95 m Tiefe an. Es ist gut zu erkennen, wie sich die Untergrundtemperatur relativ rasch wieder in den Ausgangszustand regeneriert. Der Vergleich der Entzugsstadien (links ohne Umwälzpumpe, rechts mit Umwälzpumpe) lässt erkennen, dass die Umwälzung des Wassers im Ringraum einen positiven Einfluss auf das Minimum der Absenkung hat.

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

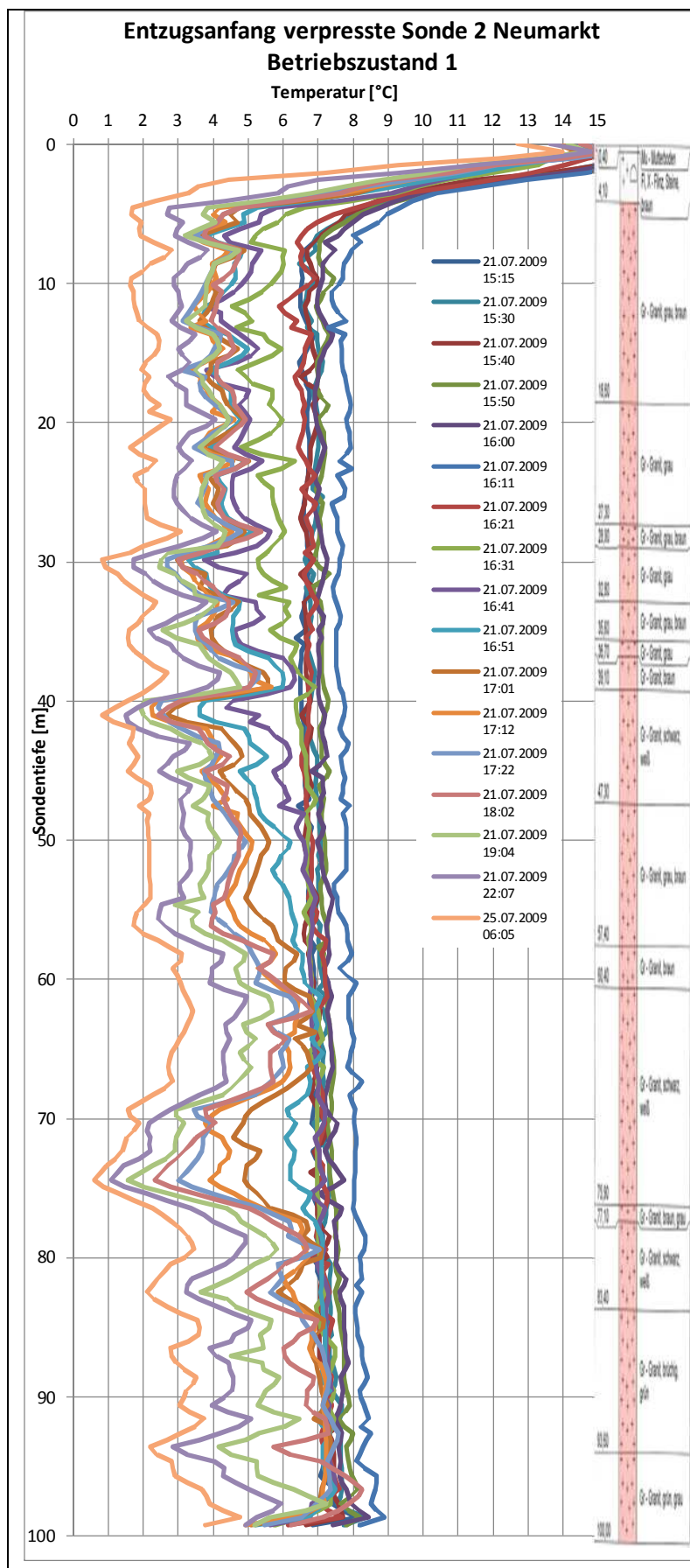
Bei der Umwälzung des Grundwassers ohne Sondenbetrieb (Betriebszustand 3) ist eine Temperatursteigerung erkennbar. Grund dafür dürfte der Wärmetransport durch die Konvektion sein.



In diesem Diagramm ist der zeitliche Verlauf der Temperaturen der verpressten Sonde 2 in Neumarkt zu sehen. Klar zu erkennen ist die periodische Schwingung in der Entzugsphase, sowie die Regenerationskurve, die jedoch während dem Betriebszustand 2 der Sonde 1 stattfindet. Interessant ist die Temperaturabnahme während in der Sonde 1 (Betriebszustand 4) der Entzug mit Grundwasser-Umwälzung stattgefunden hat (22.-27.08.2009). Dies ist erklärbar, weil die Sonde 2 in Grundwasserströmungsrichtung liegt und somit ein Einfluss von der Sonde 1 gegeben ist.

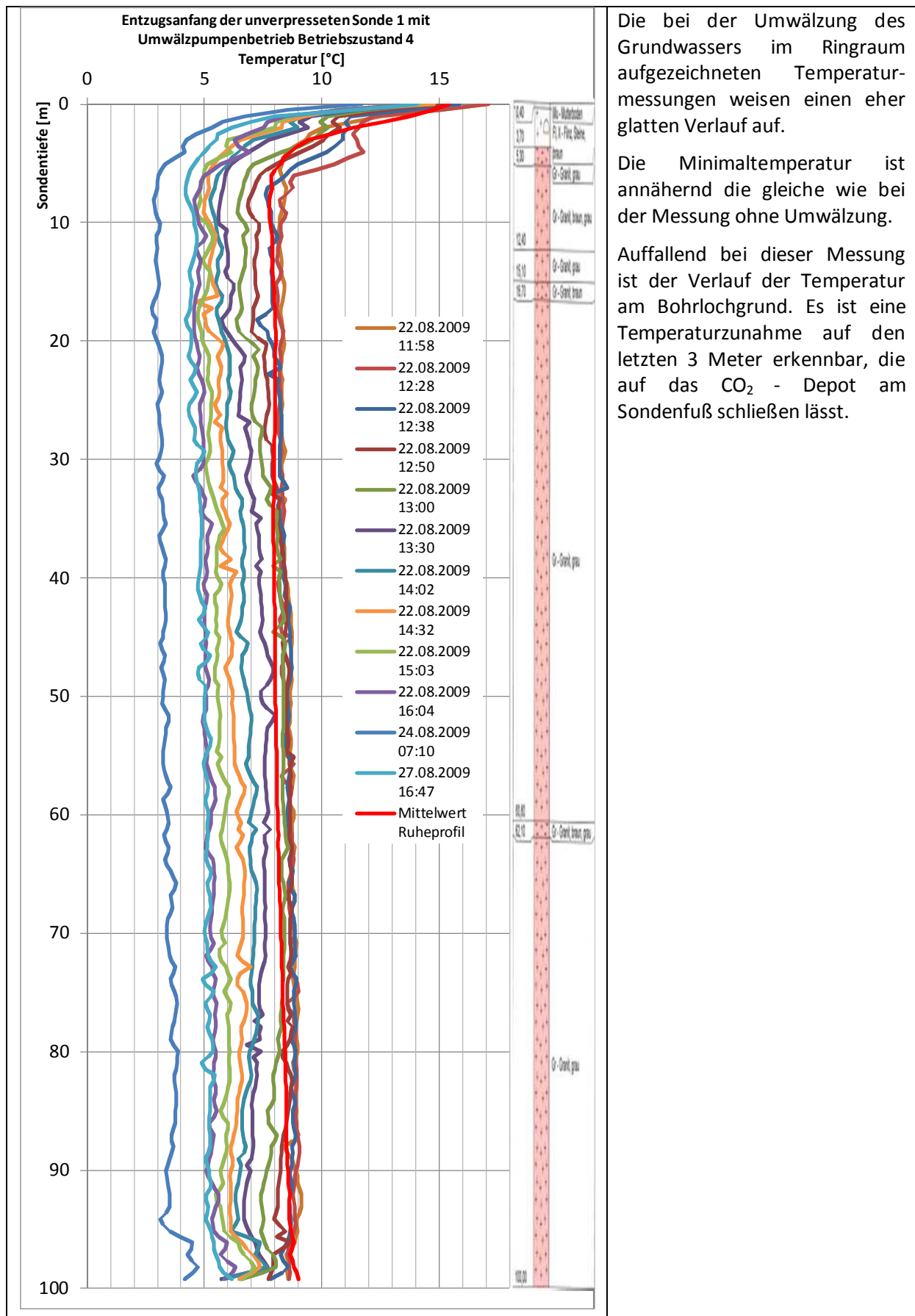
The figure is a geological cross-section of the Müritzersee area, oriented North-South. The vertical axis represents depth in meters (Sondentiefe [m]), ranging from 0 to 100. The horizontal axis represents temperature in degrees Celsius (Temperatur [°C]), ranging from 0 to 6. Five temperature profiles are plotted, corresponding to different dates and times: 27.07.2009 08:44 (green), 25.08.2009 05:47 (olive), 15.02.2010 17:24 (light blue), 24.02.2010 05:33 (dark blue), and MW-27.07.2009-9.00 (red). The profiles show a general increase in temperature with depth, with the 24.02.2010 05:33 profile reaching the highest temperatures (up to 6°C) and the 27.07.2009 08:44 profile reaching the lowest (around 4°C). The geological layers are indicated on the right side of the plot, with a legend at the top right. The layers are: Müritzersee (0-1.40 m), Fl. X - Flötz, Sande, Geröll (1.40-3.00 m), Gr.-Geröll, grau (3.00-12.40 m), Gr.-Geröll, braun, grau (12.40-15.10 m), Gr.-Geröll, grau (15.10-16.70 m), Gr.-Geröll, braun (16.70-60.00 m), Gr.-Geröll, grau (60.00-82.10 m), and Gr.-Geröll, grau (82.10-100.00 m). The layers are color-coded: Müritzersee (light blue), Fl. X - Flötz, Sande, Geröll (light blue), Gr.-Geröll, grau (light blue), Gr.-Geröll, braun, grau (light blue), Gr.-Geröll, grau (light blue), Gr.-Geröll, braun (light blue), Gr.-Geröll, grau (light blue), and Gr.-Geröll, grau (light blue).

In dieser Darstellung ist auch der Einflussbereich der Sonne im oberen Bereich gut erkennbar (Vergleich Februar - Juli).

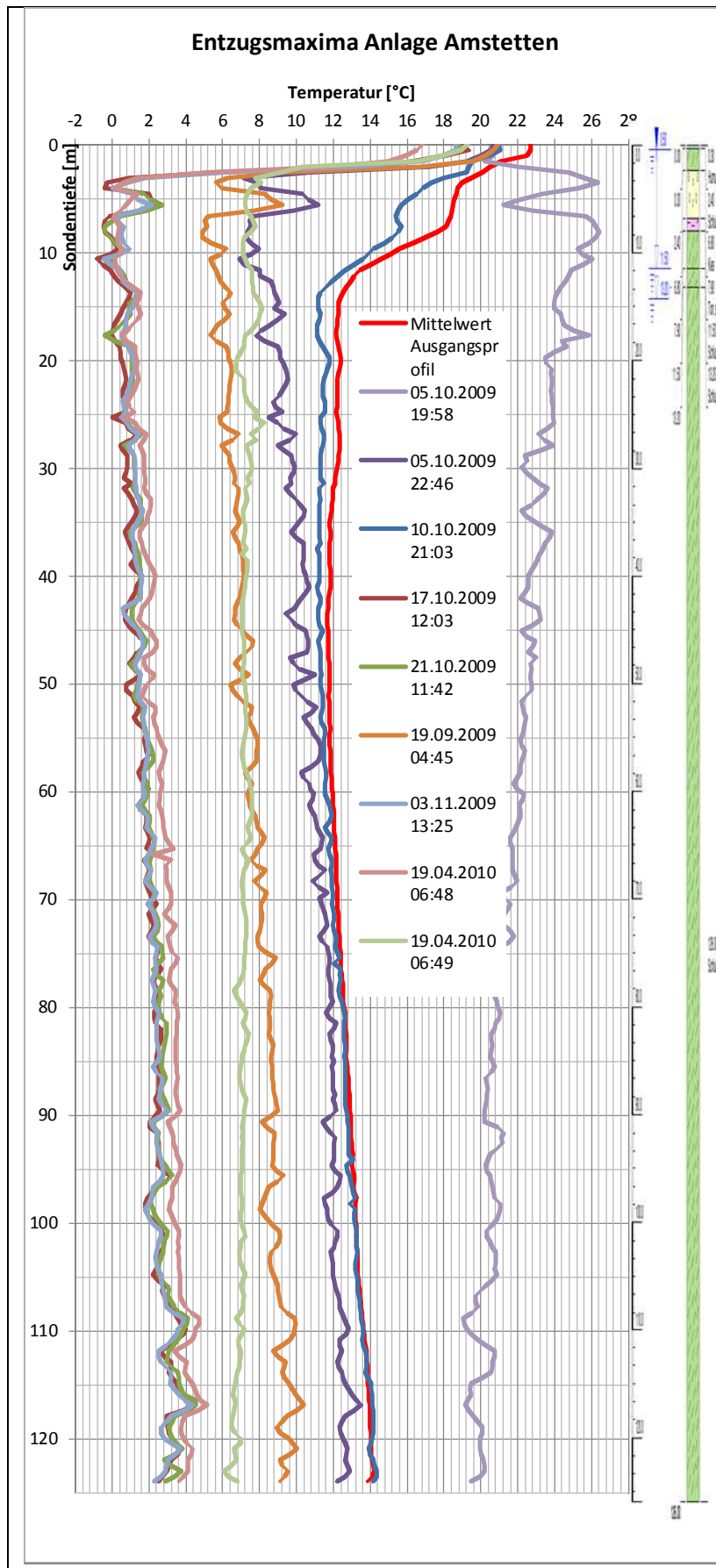


In diesem Diagramm sind die Entzugsprofile der verpressten Sonde 2 im Anfangsstadium dargestellt. Das Maximum der Abkühlung ist am 25. 07.2009.

Erkennbar sind die auffällig großen Sprünge der Temperaturen, die auf die Lage des Messkabels zur Sonde schließen lässt. Bei dieser Messung wurde das Kabel der Firma Brugg verwendet, welches wegen des stabileren Stahlmantels einen steiferen Zustand als das Kabel der Firma Leoni aufweist und deshalb eine spiralförmige Lage vermuten lässt.



4.1.1.2. Anlage Heigl

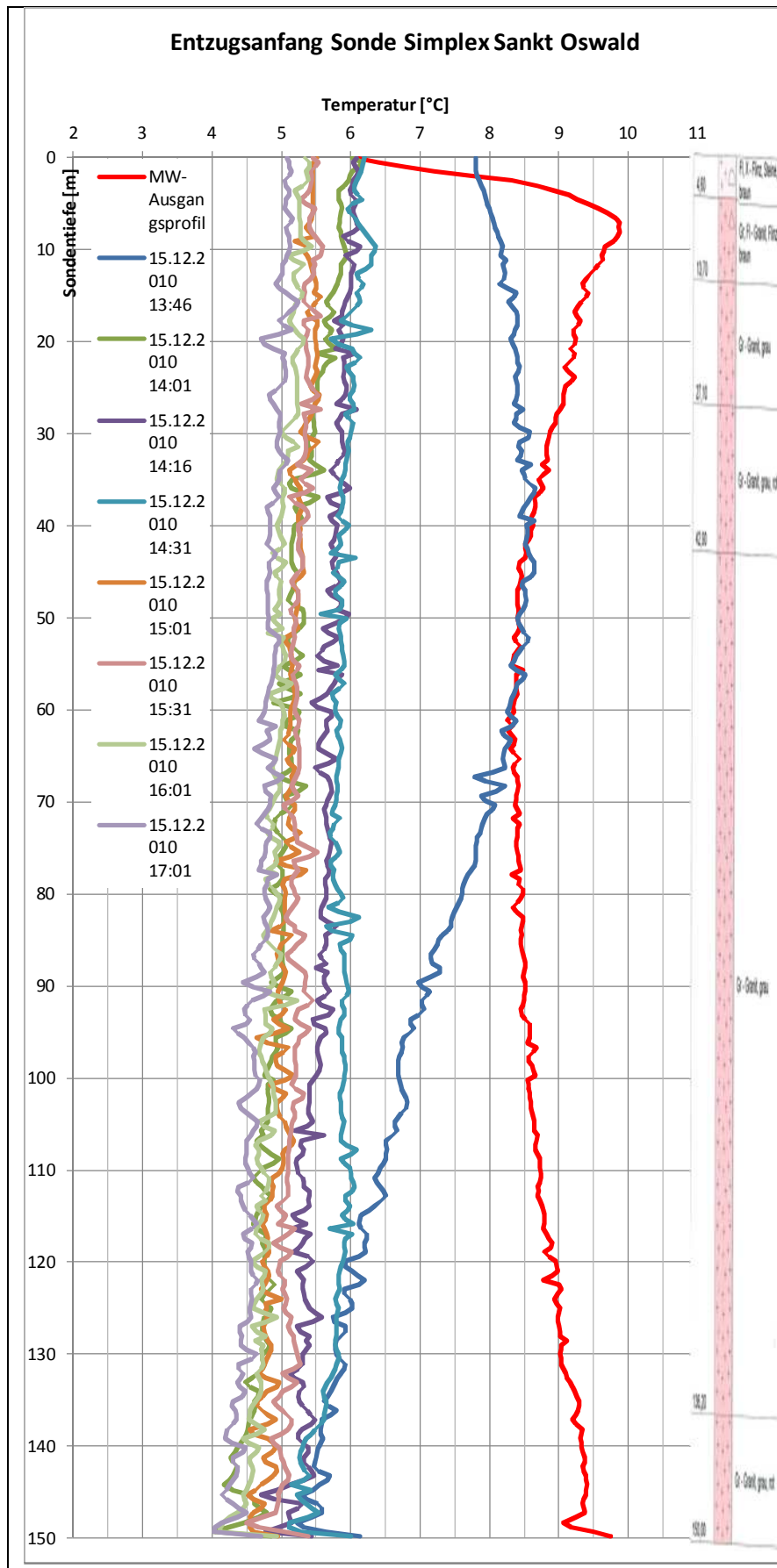


Bei der Sole - Anlage in Amstetten sieht man bei den Messgraphen, dass es bei jeder Kurve der Temperaturgradient ($2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) im Vergleich zur CO_2 - Sonde klar zu erkennen ist. Dies ist auch davon abzuleiten, dass sich das Messkabel im Vorlaufrohr der Sonde befindet, wo eine Temperaturzunahme erwartet wird. Die maximale Abkühlung erreicht hier im oberen Sondenbereich knapp den Gefrierpunkt, was negativ zu bewerten ist. Da das Messkabel sich direkt in der Sole der Sonde befindet, sind die Schwankungen eher gering.

Ganz rechts befindet sich die Messkurve der maximal erreichten Solaren Erwärmung.

Beim Vergleich der Temperatur-Unregelmäßigkeiten in den Messkurven lässt sich zwischen Input und Output ein deutlicher Zusammenhang herstellen. Bei den gegenseitig verlaufenden Zacken handelt es sich um Bereiche besserer bzw. schlechterer Übergangswiderstände zum Gestein. Ob die Ursache beim Gestein oder beim Verpressmaterial liegt, lässt sich jedoch nicht feststellen.

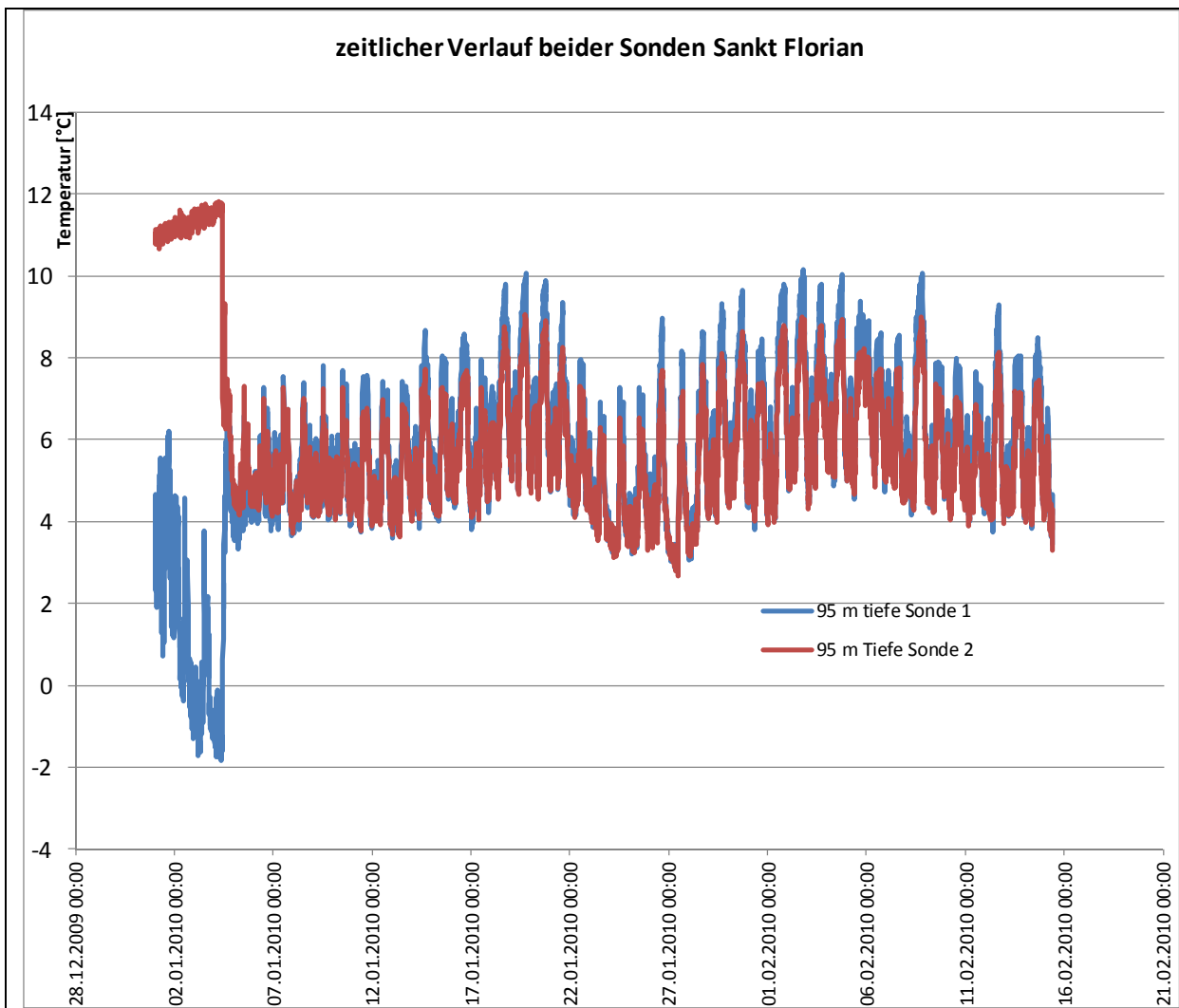
4.1.1.3. Anlage Sankt Oswald



Bei der Sole - Anlage in Sankt Oswald liegt das Ausgangsprofil im erwarteten Bereich und weist einen Temperaturgradienten von etwa $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ auf.

Die dargestellten Messkurven sind im Rücklauf der Sole- Sonde gemessen worden und man kann erkennen, dass die im Vorlauf gewonnene Energie im Rücklauf weiter gesteigert werden kann und somit eine eventuelle Wärmedämmung im oberen Sondenbereich nicht empfehlenswert ist.

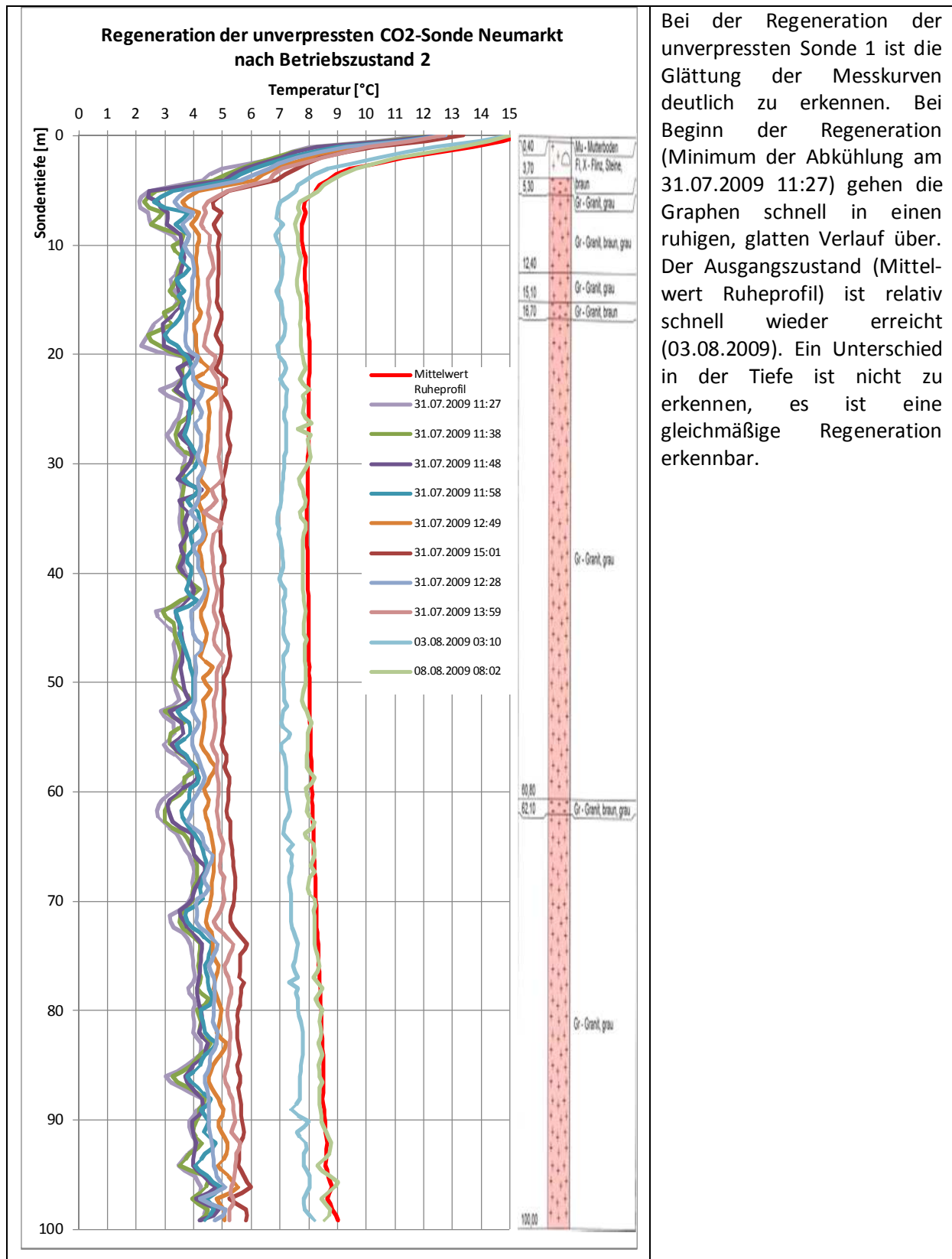
Anlage Sankt Florian

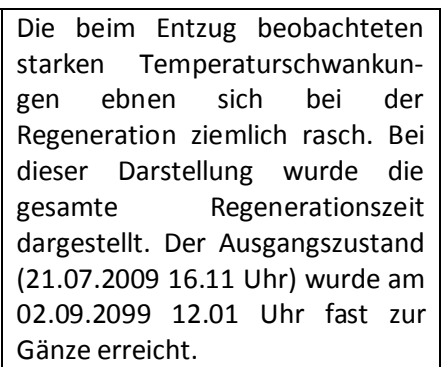


Bei der zeitlichen Darstellung sind die Temperaturverläufe beider Sonden ersichtlich. Es ist schön zu erkennen, wie sehr die Sonde im alleinigen Betrieb bis in den Minus Bereich abgekühlt wird. Beim Betrieb beider Sonden gleichen sich die erreichten Temperaturen der Sonden an. Während des Betriebs der Sonde 1 ist bei der Sonde 2 eine Regeneration erkennbar (zuvor in Betrieb). Somit kann eine Beeinflussung der Sonden zueinander ausgeschlossen werden.

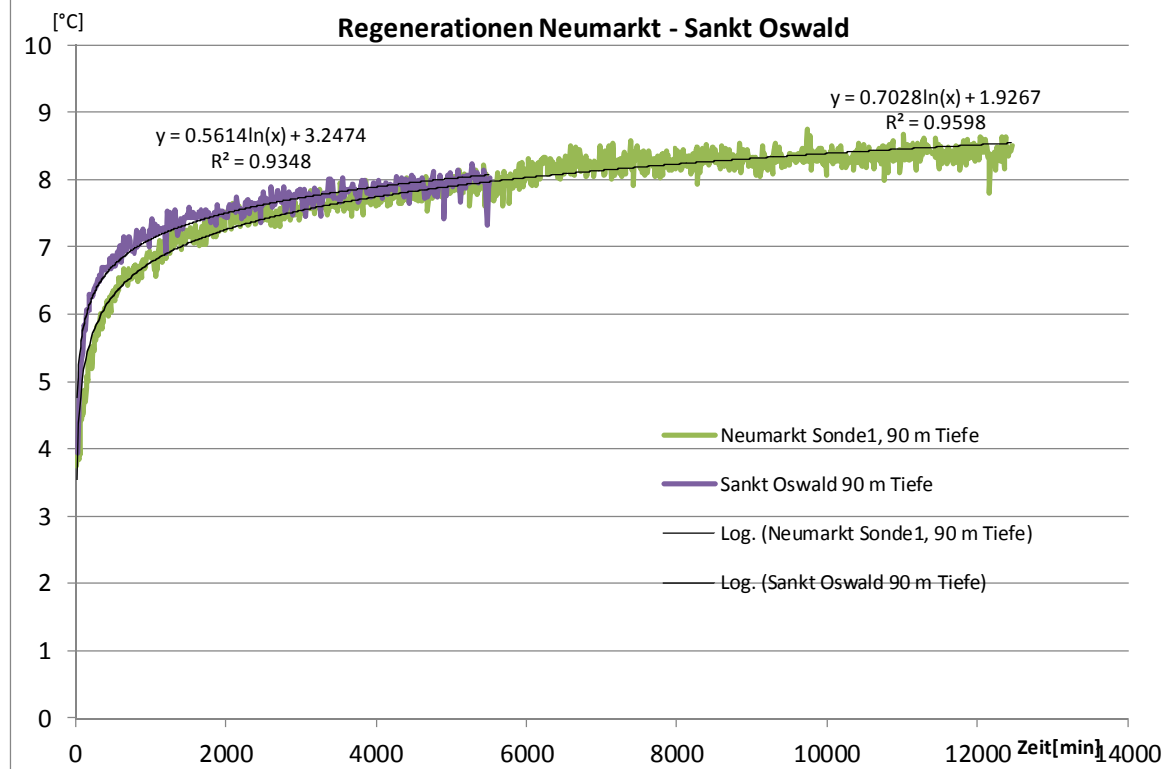
4.1.2. Regeneration

4.1.2.1. Anlage Neumarkt



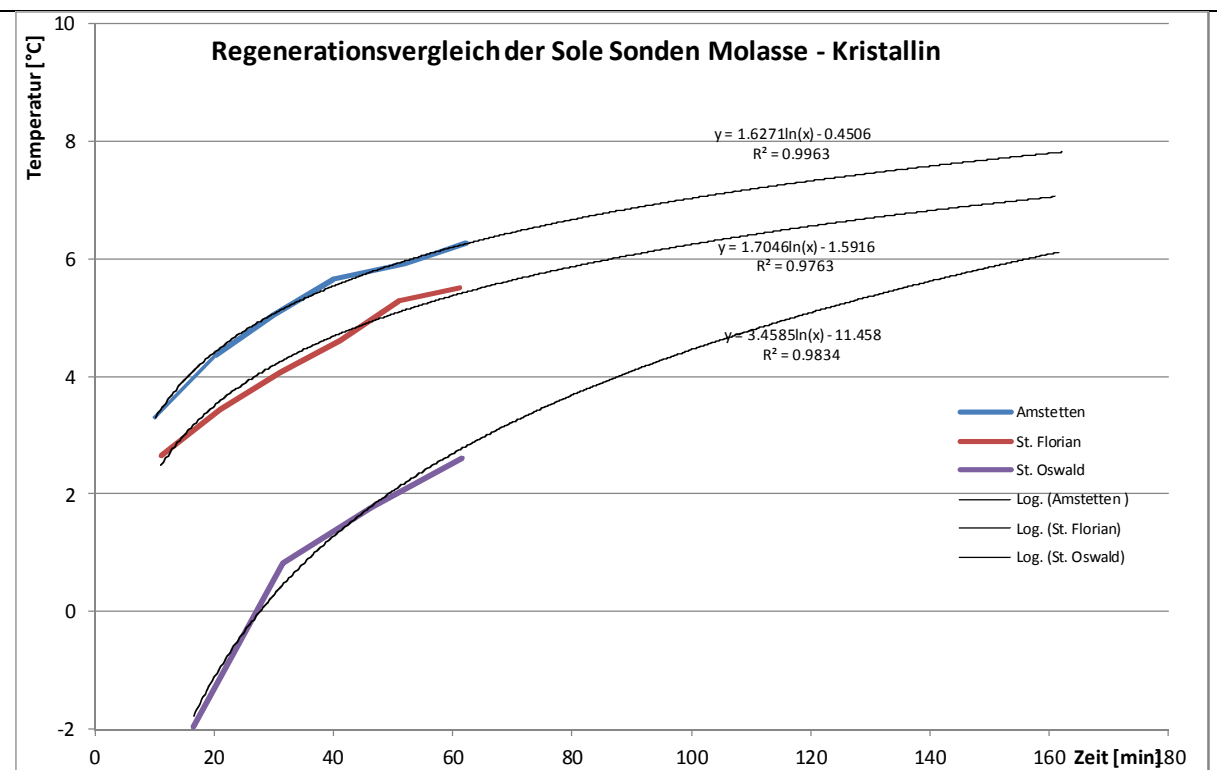


4.1.2.2. Vergleich der Regenerationen Neumarkt - Sankt Oswald (Granit)



Im oberen Diagramm sind die Regenerationen der Anlagen Neumarkt und Sankt Oswald, die sich beide im Kristallin (Granit) befinden, gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Anlage in Sankt Oswald ein wenig besseres Regenerationsverhalten aufweisen kann, d.h. sie passt sich früher an die Umgebungstemperatur an. Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass die Regeneration im Granit nicht von der Sondentechnologie abhängig ist.

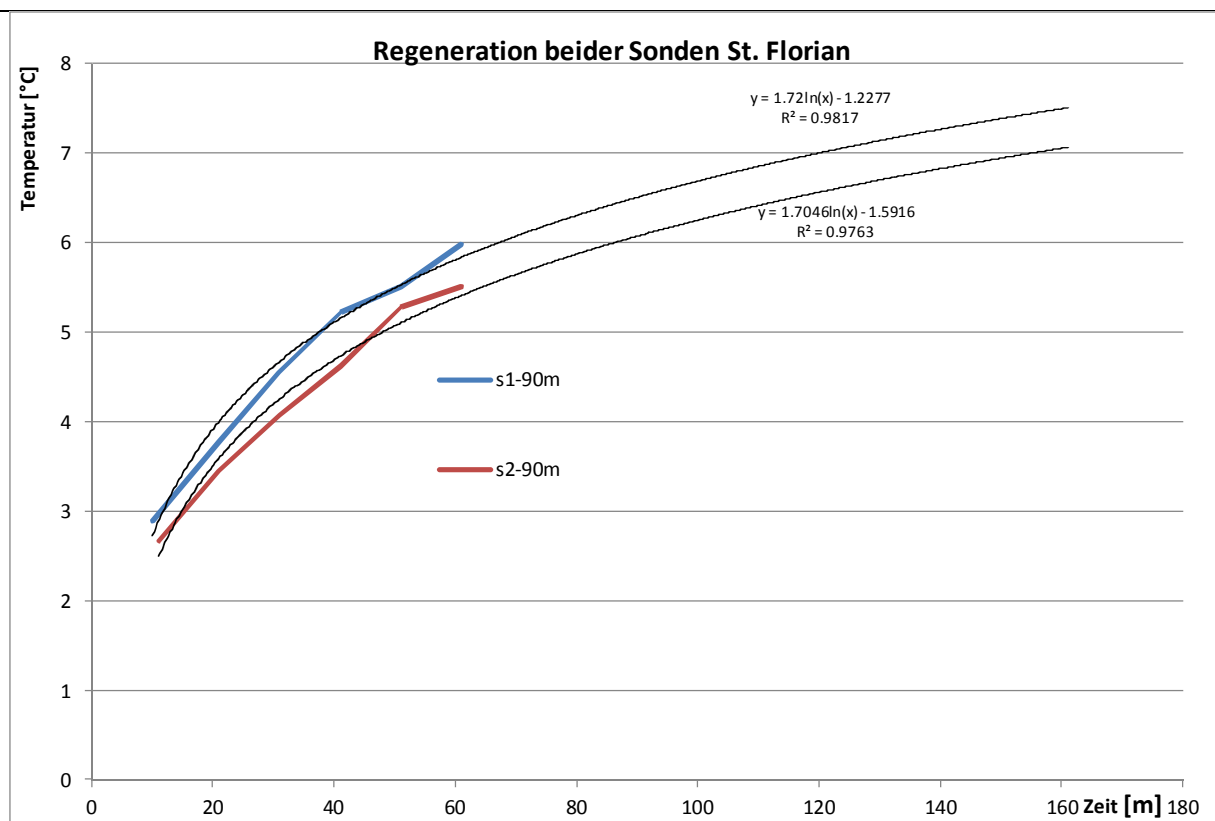
4.1.2.3. Regenerationsvergleich Molasse - Kristallin



Stellt man die Regenerationsfunktionen im Granit den Regenerationsfunktionen im Schlier gegenüber, so kann man erkennen, dass die Regeneration im Granit wesentlich schneller vor sich geht, im Vergleich zum Schlier. Der Einfluss des Verpressmaterial spielt in den betrachteten Bereich eine untergeordnete Rolle.

Aus Vergleichsgründen wurden hier nur die Regenerationsfunktionen der Sole-Anlagen herangezogen, die beide eine gleiche Regenerationsfunktion besitzen.

4.1.2.4. Regenerationsvergleich Verpressmaterial

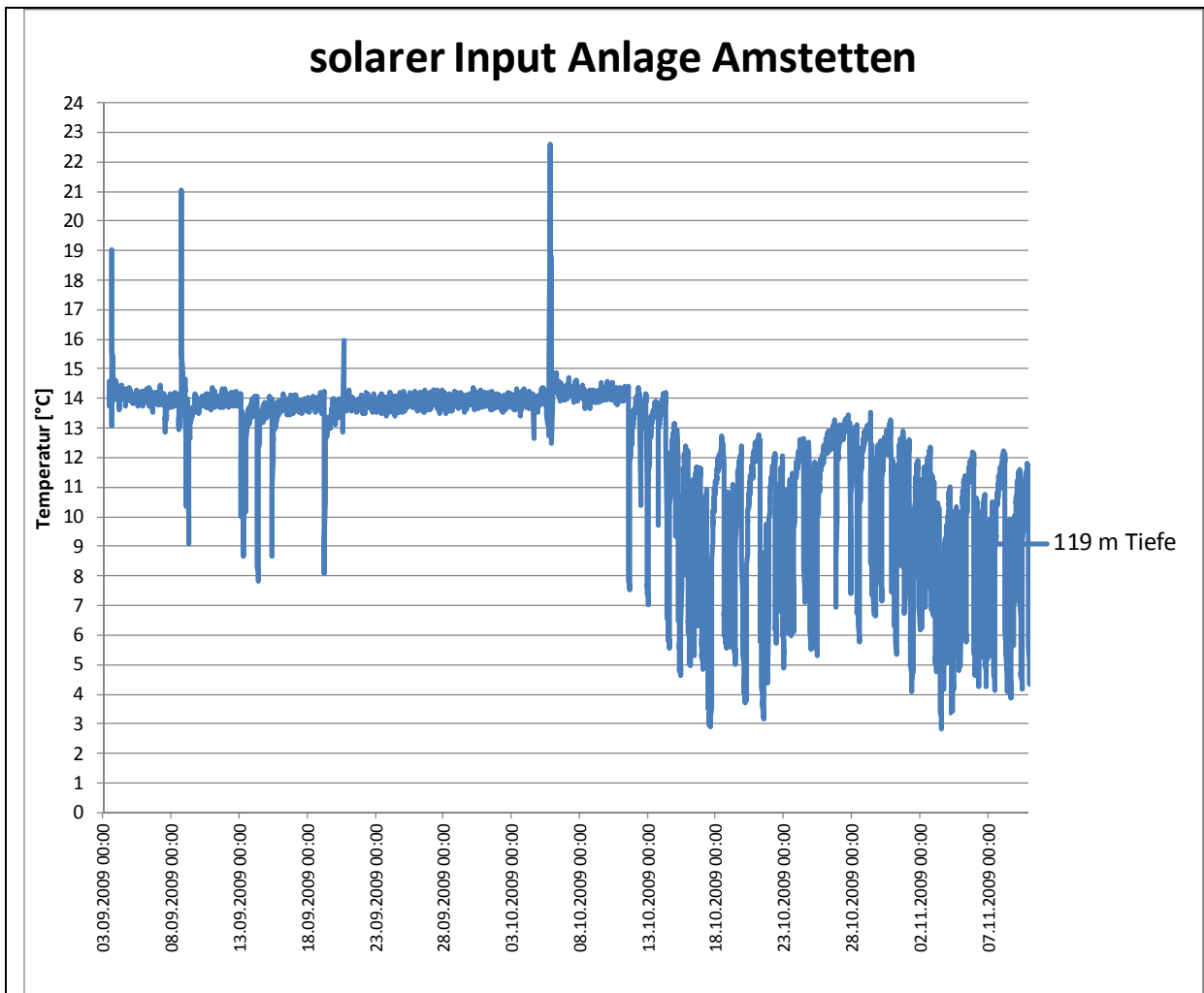


Die Besonderheit der Anlage Sankt Florian besteht an der Verwendung unterschiedlicher Verpressmaterialien. Während Sonde 1 mit einer Bentonit - Zement Mischung verpresst wurde, besteht in Sonde 2 die Verpressung aus Thermocem.

Bei der näheren Betrachtung des Regenerationsverhaltens beider Sonden konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Es wurde eine Regeneration während der EVU-Zeit (von 11.00 - 12.00 Uhr) ausgewertet, d.h. über einen relativ kurzen Bereich.

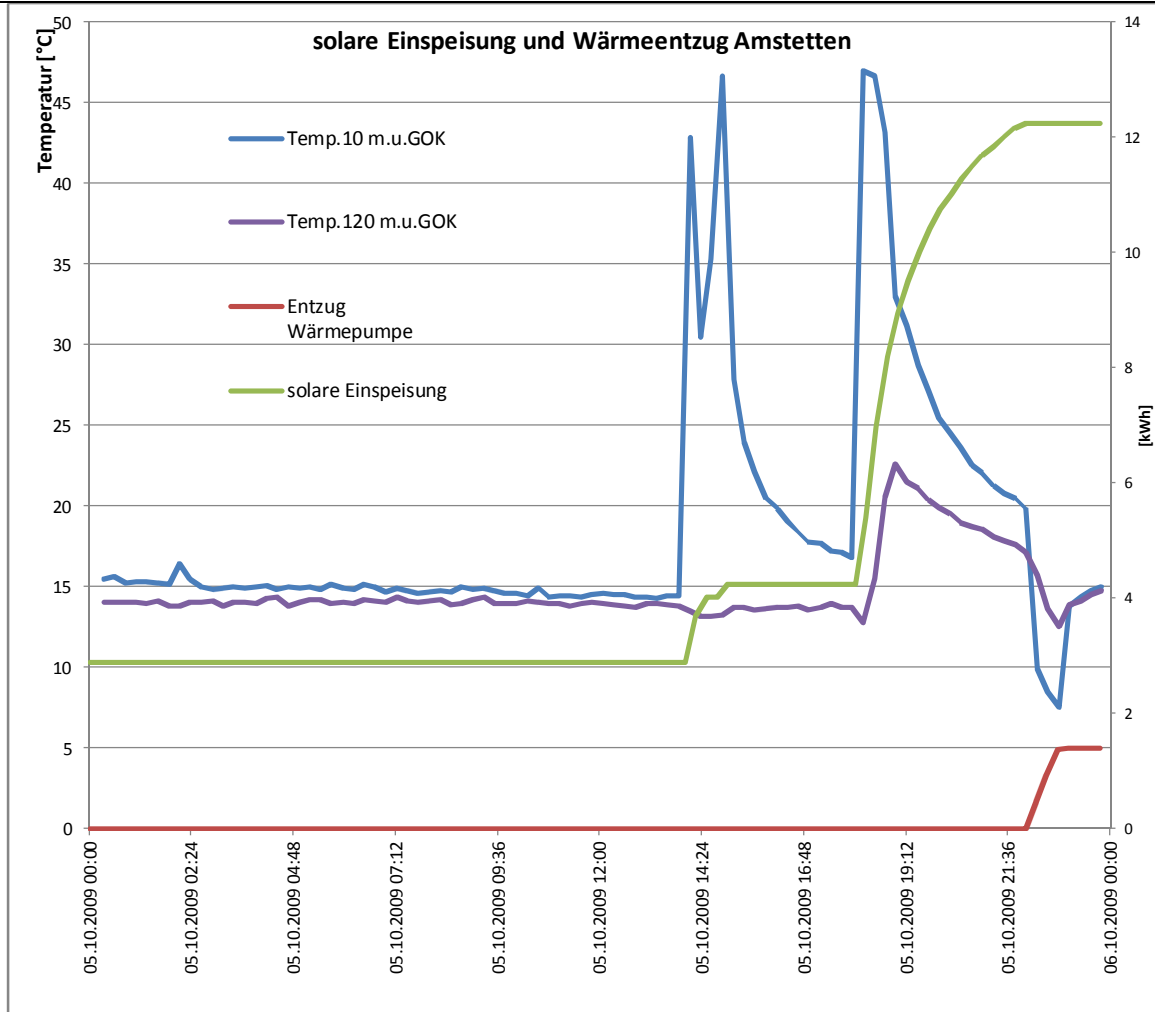
4.1.3. Solarenergie - Einspeisung

4.1.3.1. Anlage Amstetten



In diesem Diagramm sieht man den solaren Input der Anlage Amstetten in 119 m Tiefe. Man kann erkennen, dass die Tiefensonde viermal mit solarer Überschussenergie gespeist wurde. Das Verhalten des Untergrunds ist eher träge anzusehen. Man kann annehmen dass die eingebrachte Energie durch die Konvektion des Grundwassers schnell wieder verteilt wird.

Die Einspeisung am 05.10.2009 wird im nachfolgenden Diagramm näher betrachtet.



Im obigen Diagramm ist über die Zeit der solare Input (grün) und das Verhalten der Sole im Untergrund dargestellt. Man kann erkennen, dass die zugeführte Wärme rasch in den Untergrund abgegeben wird, besonders im oberen Bereich, wo das Grundwasser einen Einfluss hat (siehe vorheriges Diagramm). Die Wärme des Inputs erreicht das Bohrlochende erst bei einer gewissen Menge von eingebrachter Energie und mit einer gewissen Zeitverzögerung und nimmt anschließend relativ rasch wieder ab.

4.2. Quantitative Beschreibung

4.2.1. Kennzahlen

4.2.1.1. Anlage Neumarkt

Durch Aufzeichnungen des Anlagenbetreibers und den Daten des Monitorings lassen sich folgende Kennzahlen ermitteln:

Messperiode Sommer 2009:

Betriebszustand 1 Sonde 2 (Länge 100m)

Entzugsdauer : 91 h

Entzugswärme: 490 kWh

Stromverbrauch: 174,5 kWh

Kälteleistung: 315,5 kWh

Spez. Entzugsleistung: 34,7 W/m

Betriebszustand 2 Sonde 1 (Länge 100 m)

Entzugsdauer: 109 h

Entzugswärme: 620 kWh

Stromverbrauch: 226,9 kWh

Kälteleistung: 393,1 kWh

Spez. Entzugsleistung: 36,1 W/m

Betriebszustand 4 Sonde 1

Entzugsdauer: 124,5 h

Entzugswärme: 700 kWh

Stromverbrauch: 246,14 kWh

Kälteleistung: 453,9 kWh

Spez. Entzugsleistung: 36,5 W/m

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

Messperiode Februar 2011

Bei dieser Bilanzierung war nur die unverpresste Sonde 1 mit Umwälzung des Grundwassers in Betrieb und ist als maximale Entzugsleistung der Sonde zu sehen.

Entzugsdauer : 63 h

Entzugswärme: 570 kWh

Stromverbrauch: 189 kWh

Kälteleistung: 381 kWh

Spez. Entzugsleistung: 66,0 W/m

Leistungsbilanz Heizperiode 2008/2009 (17.10.2008 - 09.04.2009)

- Stromverbrauch: 6039 kWh
- Wärmeleistung heizungsseitig: 21590 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,57

Leistungsbilanz Heizperiode 2009/2010 (14.10.2009 - 22.05.2010)

- Stromverbrauch: 6586,1 kWh
- Wärmeleistung heizungsseitig: 23810 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,62

Leistungsbilanz Heizperiode 2010/2011 (17.09.2010 - 03.04.2011)

- Stromverbrauch: 6478 kWh
- Wärmeleistung heizungsseitig: 22300 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,44

4.2.1.2. Anlage Sankt Oswald

Durch Aufzeichnungen des Anlagenbetreibers sind folgende Bilanzen aufstellbar:

Leistungsbilanz Heizperiode 2008/2009 (11.10.2008 - 04.05.2009)

- Stromverbrauch: 3039 kWh
- Wärmeleistung heizungsseitig: 10165 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,34

Leistungsbilanz Heizperiode 2009/2010 (13.11.2009 - 29.04.2010)

- Stromverbrauch: 3727,8 kWh
- Wärmeleistung heizungsseitig: 14134 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,79

Leistungsbilanz Heizperiode 2010/2011 (15.12.2010 - 22.04.2011)

- Stromverbrauch: 2909 kWh
- Wärmeleistung heizungsseitig: 10186 kWh

Jahresarbeitszahl: 3,50

5. Zusammenfassung

Die Temperaturmessung mit dem faseroptischen Temperaturmesssystem der Firma Sensortran ist eine gut geeignete Messmethode, um die grundsätzliche Verhalten von Erdwärmefonten bei unterschiedlichen Betriebszuständen zu untersuchen. Um vertrauenswürdige Messungen zu erhalten muss allerdings die Lage des Glasfasermesskabels in der Erdwärmefontsonde bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt werden. Es ist daher zu empfehlen, das Glasfaserkabel schon beim Bau der Sonde zu installieren, um die Lage des Kabels in der Sonde genau zu kennen. Weiters ist die Schleifenmessung einer einfachen Messung mit offenem, nicht terminiertem Ende vorzuziehen, da es am offenen Ende des Messkabels zu Reflexionen und folglich zu verfälschten Messergebnissen kommt. Bei einer sorgfältigen Kalibrierung liegen die erreichbaren Genauigkeiten bei $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Die durchgeführten Arbeiten umfassten FOT- Messungen über einen bestimmten Zeitraum einer Heizperiode. Da nur ein FOT- Messgerät zu Verfügung stand, beschränkte sich dieser Zeitraum auf wenige Wochen. Diese Messungen sind daher als Stichproben anzusehen und spiegeln nicht das Langzeitverhalten wider. Da die untersuchten Sondentypen im Betrieb ein sehr dynamisches thermisches Verhalten zeigten, war mit Hilfe der FOT Messungen die Darstellung dieser dynamischen Abläufe sowie der wesentlichen thermischen Eigenschaften möglich. Es konnte zum Beispiel die rasche Regenerierbarkeit des Untergrundes zwischen einzelnen Wärmeentnahmen nachgewiesen werden. Auch bei der Einspeisung von solarer Überschussenergie war das Reagieren des Untergrundes gut zu beobachten.

Anhand der untersuchten Anlagen war eine generelle Charakterisierung der Standorte möglich, einen direkten Vergleich konnte auf Grund der sehr unterschiedlichen Ausführungsformen nicht durchgeführt werden. Die Schwierigkeit bestand darin, bereits bestehende Anlagen zu finden, wo deren Betreiber ein Interesse hatten, diese mit der Messtechnik zu bestücken. Die zur Verfügung stehenden Anlagen wurden daher so gut wie möglich ausgewertet und qualitativ verglichen.

Ein ursprüngliches Ziel dieser Arbeit, etwaige Konvektionswalzen im Ringraum der unverpressten CO_2 - Sonde in Neumarkt zu detektieren, konnte auf Grund der messtechnischen Anordnung der Glasfaserkabel nicht zielführend untersucht werden. Da die Messkabel in einem eigenen Messrohr mit kleinem Durchmesser eingebaut wurden, konnten mögliche Konvektionen im Ringraum nicht erfasst werden. Zur Untersuchung dieser Phänomene ist eine freie Anordnung des Kabels über die gesamte Ringraumlänge zweckmäßig.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit bestand darin, aus den zur Verfügung stehenden Messdaten, die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes zu bestimmen. Die Betriebsweise der Wärmepumpen und die spezifischen Anlagenkonfigurationen gestalteten diese Aufgabe jedoch zu einem nicht löslichen Problem. Bei einem konstanten Betrieb der Wärmepumpe und einer günstigen Sondenausführung wäre es durchaus möglich, bei einem passenden Monitoring der Betriebsdaten diesen Parameter wie bei einem Thermal - Response Test zu bestimmen.

Generell konnte dennoch verdeutlicht werden, dass diese Technologie eine große Zukunft besitzt und einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Kyoto-Ziele leisten kann. Es sollten deutlich mehr Anlagen untersucht werden, um so eine statistisch und wissenschaftlich untermauerte Darstellung des technischen Standes der Wärmepumpentechnologie darstellen zu können.

6. Literaturverzeichnis

www.geologie.ac.at. (06. 08 2011). Abgerufen am 06. 08 2011 von <http://www.geologie.ac.at>

www.mineralienatlas.de. (06. 08 2011). Abgerufen am 06. 08 2011 von <http://www.mineralienatlas.de>

Böge, A. (1989). *Das Techniker Handbuch, Band 1*. Braunschweig: Vieweg.

Demtröder, W. (1991). *Laserspektroskopie*. Berlin: Springer.

G.Glasner, H. H. (kein Datum). *Analyse von Wärmepumpenanlagen - Standardmonitoring*. Wien: arsenal research.

Glatz, E. (2010). *Protokoll zur Überprüfung einer DTS-Messanordnung*. Seibersdorf.

Hoffmann, T. (2007). *Geo - Atlas Österreich*. Wien: Böhlau.

Kaltschmitt, M. (1999). *Energie aus Erdwärme*. Stuttgart: DVG.

Murawski, H. (2004). *Geologisches Wörterbuch 11.Auflage*. München: Elsevir GmbH.

ÖWAV. (2009). ÖWAV - Regelblatt 207. *Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds - Heizen und Kühlen*. Wien.

Tholen M., W. -H. (2008). *Arbeitshilfen Geothermie*. Bonn: wvgw.

Tollman, A. (1985). *Geologie von Österreich, Band 2*. Wien: Franz Deutike.

Wärmeatlas, V. (1991). *Wärmeatlas*. Düsseldorf: VDI.

7. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Funktionsprinzip einer Wärmepumpe im Dreikreisssystem.....	9
Abb. 2 Geothermischer Wärmestrom Österreichs und deren Nutzung (Geo-Atlas, GBA)	12
Abb. 3 Schema CO ₂ - Sonde.....	13
Abb. 4 Schema Duplex - Sole - Sonde	13
Abb. 5 Funktionsprinzip einer CO ₂ - Sonde	14
Abb. 6 Phasendiagramm CO ₂	14
Abb. 7 Sondenkopf Neumarkt	15
Abb. 8 Sondenkopf mit Kälteleitungen Neumarkt.....	15
Abb. 9 Querschnitte SONDENSYSTEME	16
Abb. 10 Sondenfuß einer Simplex - Sonde.....	16
Abb. 11 Belastungsgewicht	16
Abb. 12 Ramanstreuung als inelastische Photonenstreuung, a) Raleigh - Streuung, b) Stokes - Raman Streuung, c) Antistokes - Raman - Streuung.....	17
Abb. 13 Darstellung der frequenzabhängigen Ramanstreuung	18
Abb. 14 DTS-System (FOT)	18
Abb. 15 Glasfaserkabel der Firma Brugg.....	19
Abb. 16 Messanordnung bei der Kabelkalibrierung	19
Abb. 17 Temperaturverläufe vor der Kalibrierung	20
Abb. 18 Temperaturverläufe nach der Kalibrierung	20
Abb. 19 Sole - Sondenkopf mit Glasfasermesskabel	21
Abb. 20 Einteilung der Varisziden.....	23
Abb. 21 geologische Übersicht Österreichs mit der Molassezone	24
Abb. 22 Übersichtsplan Neumarkt	26
Abb. 23 Orthofoto Neumarkt	27
Abb. 24 Lage der Sonden Neumarkt	27
Abb. 25 Geologische Karte Neumarkt/Mühlkreis.....	27
Abb. 26 Übersichtsplan Sankt Florian.....	30
Abb. 27 Orthofoto mit Höhenschichtlinien.....	30
Abb. 28 Lage der Erdwärmefontänen	30
Abb. 29 geologische Karte Sankt Florian.....	31
Abb. 30 Lageplan Amstetten	33
Abb. 31 Orthofoto mit Katasterlageplan Amstetten	33
Abb. 32 geologische Karte Amstetten	34

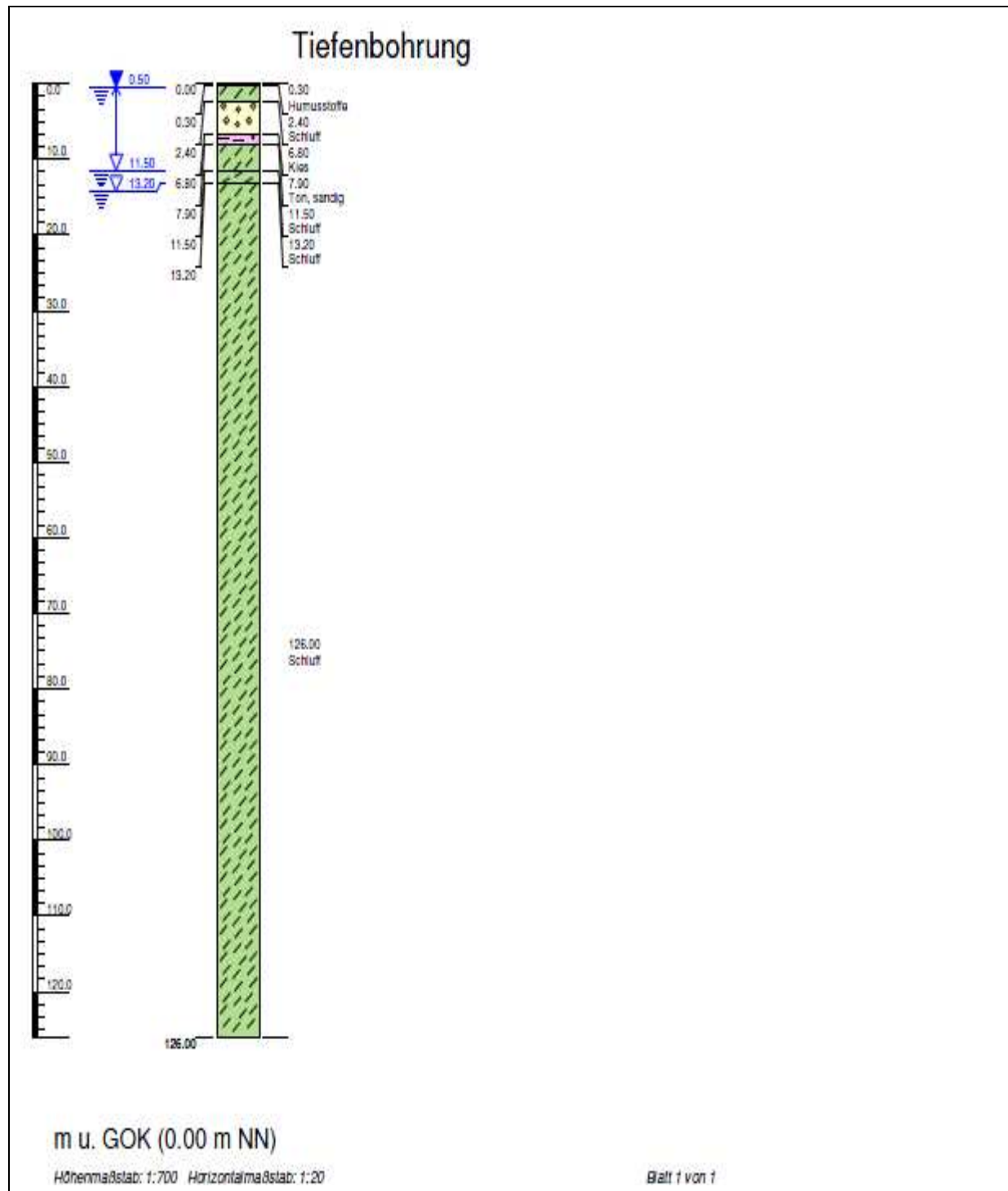
Abb. 33 Übersichtsplan Sankt Oswald	36
Abb. 34 Orthofoto mit Kataster und Höhenschichtlinien	36
Abb. 35 Lage der Erdwärmesonden.....	36
Abb. 36 geologische Karte Sankt Oswald	37

8. Tabellenverzeichnis

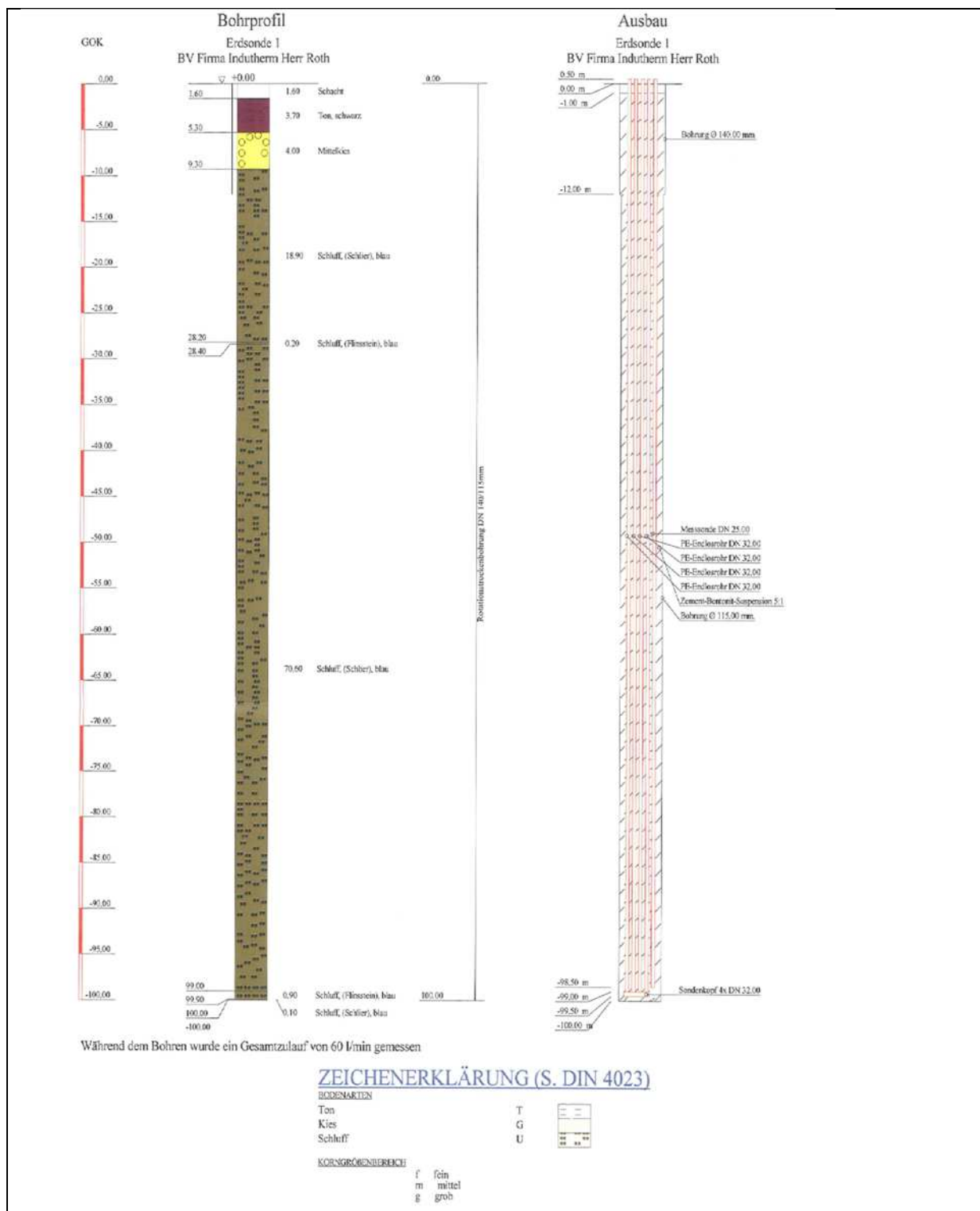
Tab. 1 wärmetechnische Stoffwerte.....	8
Tab. 2 spezifische Entzugsleistung nach VDI 4640	10
Tab. 3 Bemessungswerte Neumarkt.....	28
Tab. 4 Anlagedaten Neumarkt	29
Tab. 5 Bemessungswerte Sankt Florian	32
Tab. 6 Anlagedaten Sankt Florian	32
Tab. 7 Bemessungswerte Amstetten	35
Tab. 8 Anlagedaten Amstetten.....	35
Tab. 9 Bemessungswerte Sankt Oswald	38
Tab. 10 Anlagedaten Sankt Oswald	38

9. Anhang

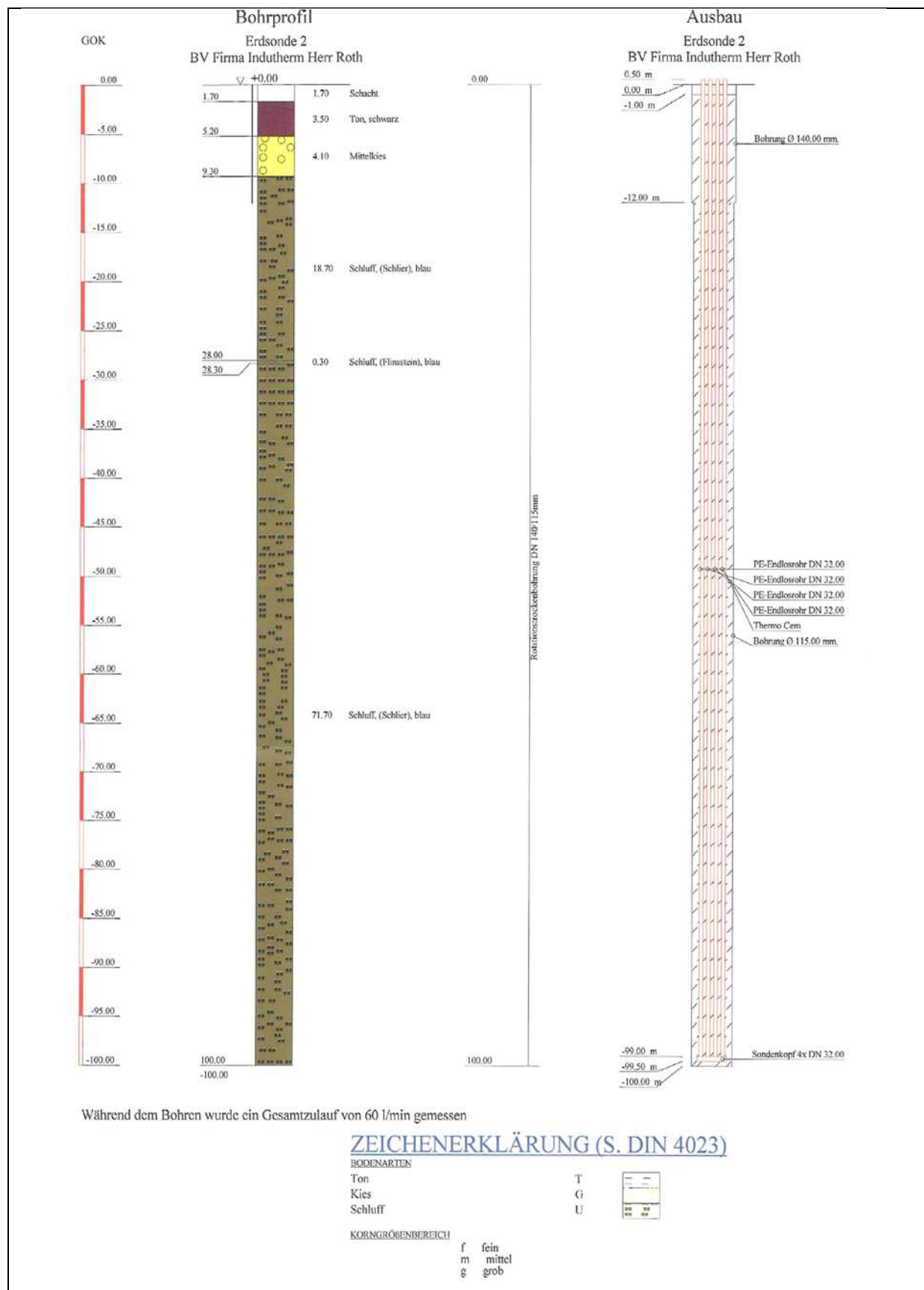
Bohrprofil Amstetten



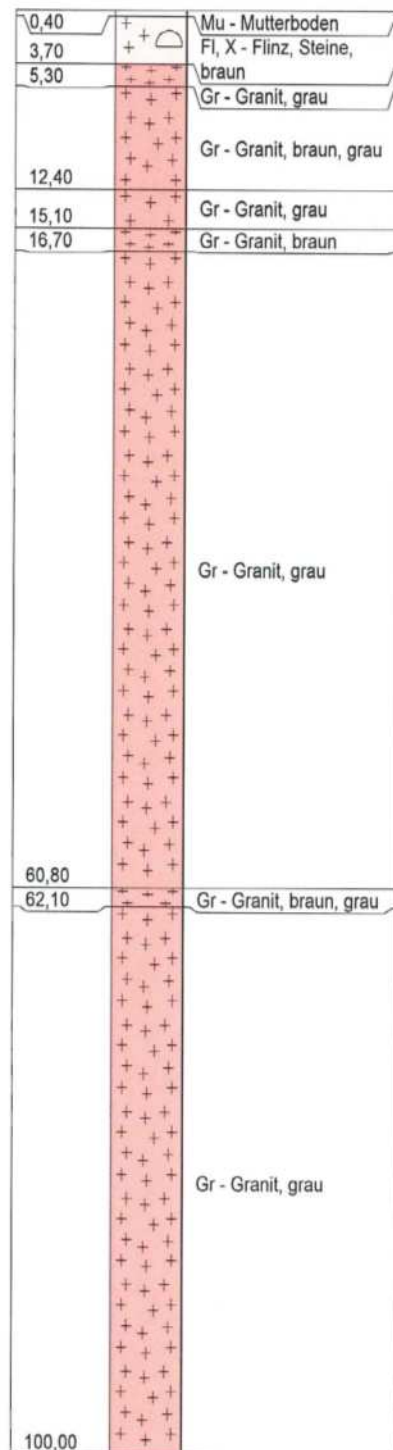
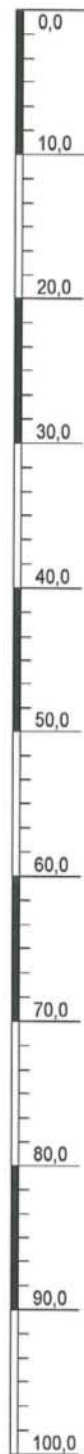
Bohrprofil Sankt Florian Sonde 1



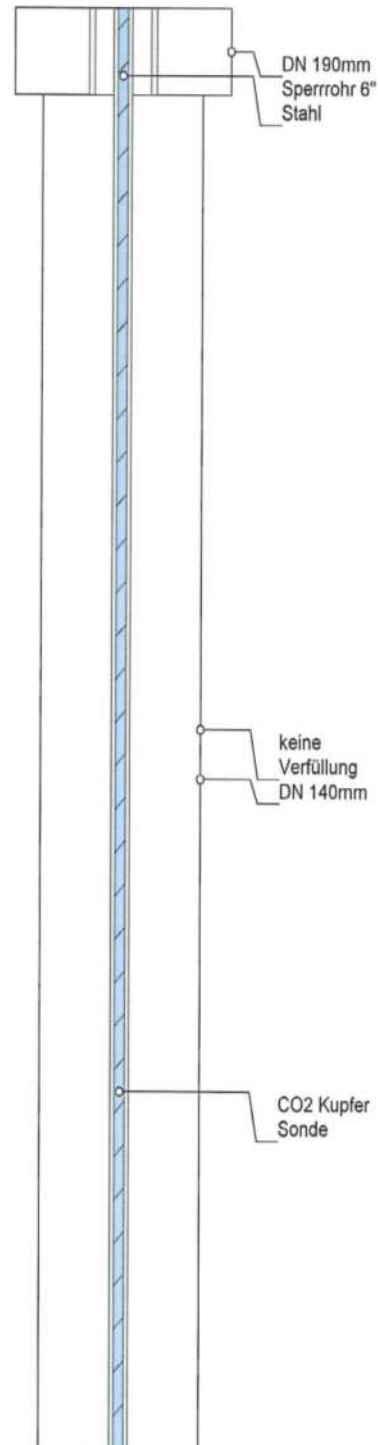
Bohrprofil Sankt Florian Sonde 2



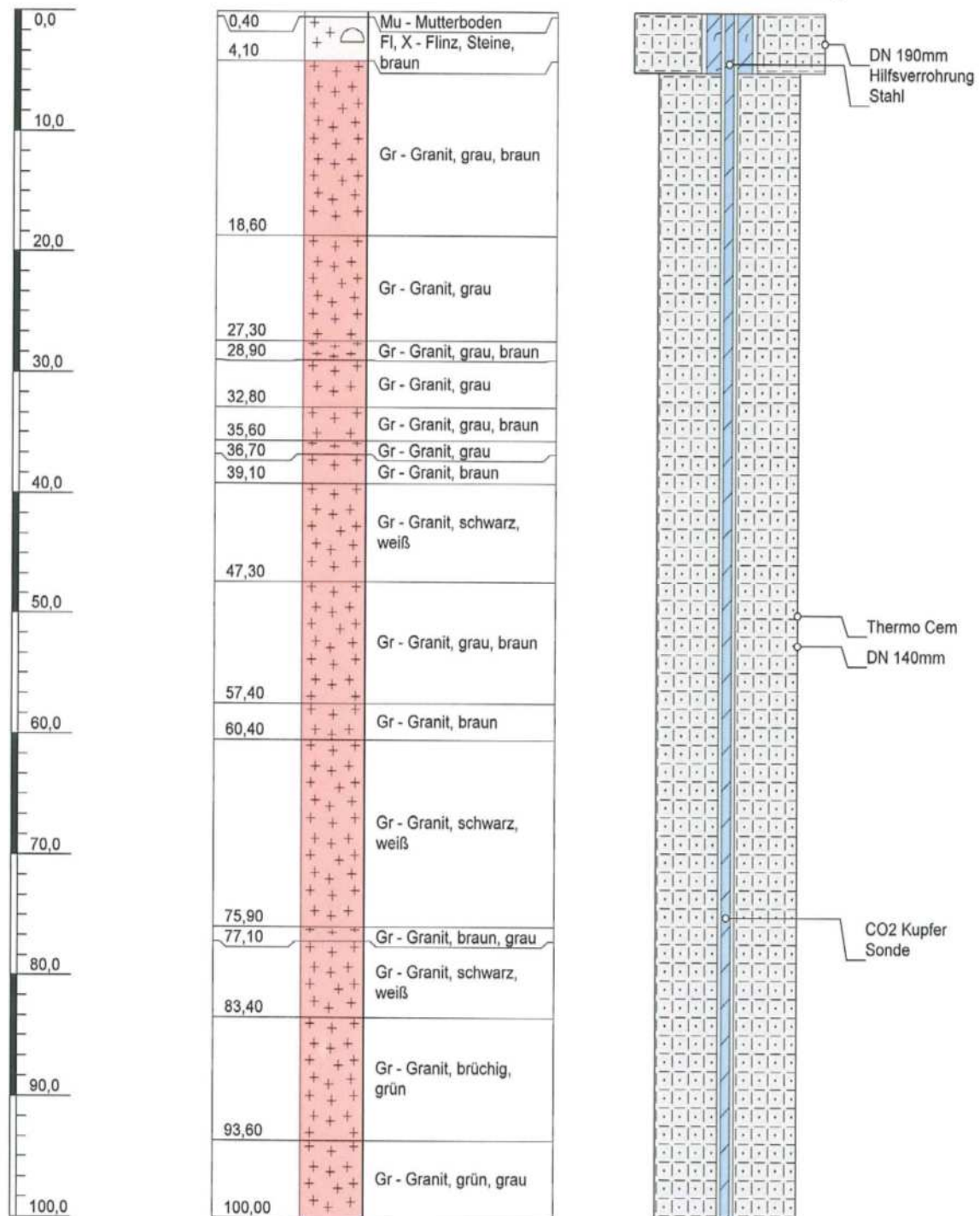
Sonde 1



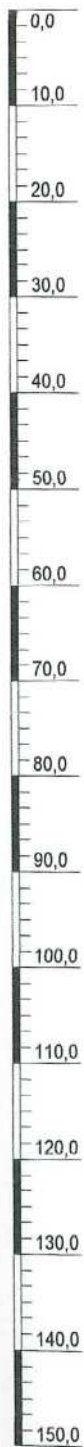
Detail lt. Anhang



Sonde 2



Sonde 1



4,60	+	FI, X - Flinz, Steine, braun
13,70	+	Gr, FI - Granit, Flinz, braun
27,10	+	Gr - Granit, grau
42,90	+	Gr - Granit, grau, rot
136,20	+	Gr - Granit, grau
150,00	+	Gr - Granit, grau, rot

Detail lt. Anhang

