

CO₂ – Heatpipe Erdwärmesonde – Funktion und Marktreife

von

Wolf Jonas

Hausarbeit zur Vorlesung

Geothermie im WS 2011/2012



Nordhausen, den 11.01.2012

Jonas Wolf

Matr. 22 384

E-mail: jonas.wolf@stud.fh-nordhausen.de

Inhaltsverzeichnis

<u>Kurzfassung.....</u>	<u>4</u>
<u>Einführung.....</u>	<u>4</u>
<u>Grundlagen.....</u>	<u>5</u>
<u>Geothermie.....</u>	<u>5</u>
<u>Kohlendioxid.....</u>	<u>6</u>
<u>Heatpipes.....</u>	<u>6</u>
<u>Bohrtechnik.....</u>	<u>6</u>
<u>Aufbau und Funktion.....</u>	<u>7</u>
<u>Marktreife.....</u>	<u>8</u>
<u>Schlussfolgerung und Ausblick.....</u>	<u>13</u>
<u>Literatur- und Quellenverzeichnis.....</u>	<u>14</u>
<u>Anlagen.....</u>	<u>16</u>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1

Oberflächennaher Temperaturen im Untergrund

http://pm-energieberatung.com/images/p066_1_00.jpg

Abbildung 2 – 13

Temperaturverlauf Sonde 1

TU Darmstadt

Abbildung 14 – 15

Auszug: Geologisches Schichtenverzeichnis

Oliver Sturm

Abbildung 16

Tabelle 2. Mögliche spezifische Entzugsleistungen für Erdwärmesonden

VDI 4640 – Blatt 2

1. Kurzfassung

Die vorliegende Hausarbeit wurde im Rahmen einer Prüfungsersatzleistung im Fachbereich Geothermie erstellt. Die folgende Arbeit soll die Funktion von CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonden beschreiben und erläutern. Dazu werden zunächst die dafür relevanten Grundlagen betrachtet. Des Weiteren wird auf den Begriff der Marktreife eingegangen und mit Hinblick auf die CO₂-Heatpipe-Technologie untersucht. Hierzu wurde die 2006 in Bensheim gebaute Anlage, des Bauherrn Oliver Sturm, betrachtet. Bei dem Objekt handelt es sich um ein neugebautes Niedrigenergiehaus mit einer Wärmepumpe und dazugehöriger CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde als Heizungssystem. Bei der Wahl der Heizungsanlage legte Herr Sturm besonderen Wert darauf, eine effiziente und günstige Alternative zu gas- oder heizölbetriebenen Systemen zu verwenden, im Hinblick auf die knapper werdenden Ressourcen und der damit einhergehende Preisanstieg von fossilen Energieträgern. Deshalb fiel die Wahl auf ein Wärmepumpe-getriebenes System. Bei der Konzeption der Heizanlage strebte Herr Sturm nach höchst möglicher Effizienz, da dies auf Dauer niedrige Heizkosten garantieren sollte. Aus dieser Überlegung heraus entschied er sich für eine CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde als Wärmequelle für die Wärmepumpe, da mit dieser Form der Geothermie, auf dem gleichen Temperaturniveau, theoretisch höhere Jahresarbeitszahlen erreicht werden können als mit konventionellen Sole-Erdsonden, da die Antriebsenergie der Umwälzpumpe des Solekreislaufs wegfällt¹. Die Betrachtung der CO₂-Erdsonde von Herrn Sturm wurde zur Bewertung der Funktionalität und der Marktlage der CO₂-Heatpipe-Technologie hinzugezogen, um eine reale Sicht auf die Sachlage zu bekommen.

2. Einführung

Das Prinzip der Geothermie wird von der Menschheit schon seit Urzeiten genutzt, zum Beispiel in Form von heißen Quellen. Schon im 17. Jahrhundert wurde die Temperaturzunahme im Erdinneren festgestellt und Ende des 18. Jahrhunderts war bereits der Temperaturzunahmegradiant von 3,1K/100m Tiefe bekannt. Im Jahre 1904 gab es in der Toskana die erste geothermische Stromerzeugung, mit Hilfe von heißem Dampf, der aus der Erde austrat. 1945 lief in den USA die erste erdgekoppelte Wärmepumpe und die Technologie erlebte während der Ölkrise der 1970/80er Jahre eine erste Hochphase, die allerdings mit Ende der Ölkrise sich wieder legte.²

Seither werden Verfahren zur effektiveren Nutzung und zur Erschließung von neuen Erdwärmequellen stetig verbessert. Die CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde ist damit verglichen eine noch junge Technologie. Die Heatpipe-Technologie wurde 1944 in den USA entwickelt und patentiert, fand aber erst in den 1960er Jahren Anwendung in der Raumfahrt³. Ab 1975 wurden Heatpipes beim Pipelinebau der Trans-Alaska-Pipeline verwendet, um dem Auftauen des Permafrostbodens entgegenzuwirken.⁴ Als Erdwärmesonden fanden Heatpipes erst später Anwendung. Im Jahre 1999 entwickelte der Österreicher Karl Mittermayr die CO₂-Tiefensonde und ließ sich diese Technologie europaweit patentieren. Während in Österreich schon zahlreiche Anlagen mit dieser Technologie betrieben werden, ist der Anteil der Anlagen mit CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonden in Deutschland sehr überschaubar und äußert sich in einigen wenigen Pilotanlagen, wie beispielsweise der, des Hausbesitzers Oliver Sturm aus Bensheim, dessen Anlage 2006 gebaut und

in Betrieb genommen wurde. Die Anlage wird seither von der TU Darmstadt unter Leitung des Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, Direktor des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik, wissenschaftlich betreut.

Erdwärmearanlagen können in 3 Hauptgruppen unterteilt werden: Erdkollektoren, die flach unter der Oberfläche eingebracht werden, Erdsonden, die üblicherweise in Bohrungen zwischen 30m und 200m Tiefe verbaut sind und Brunnenanlagen, die Grundwasser aus wasserführenden Schichten fördern. Die CO₂-Heatpipe ist eine Form der Erdsonden.

3. Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die für CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonden relevanten Grundlagen erläutert.

3.1. Geothermie

Geothermie bezeichnet neben der wissenschaftlichen Untersuchung der thermischen Situation der Erde auch die ingenieurtechnische Betrachtung und Nutzung von Erdwärme.

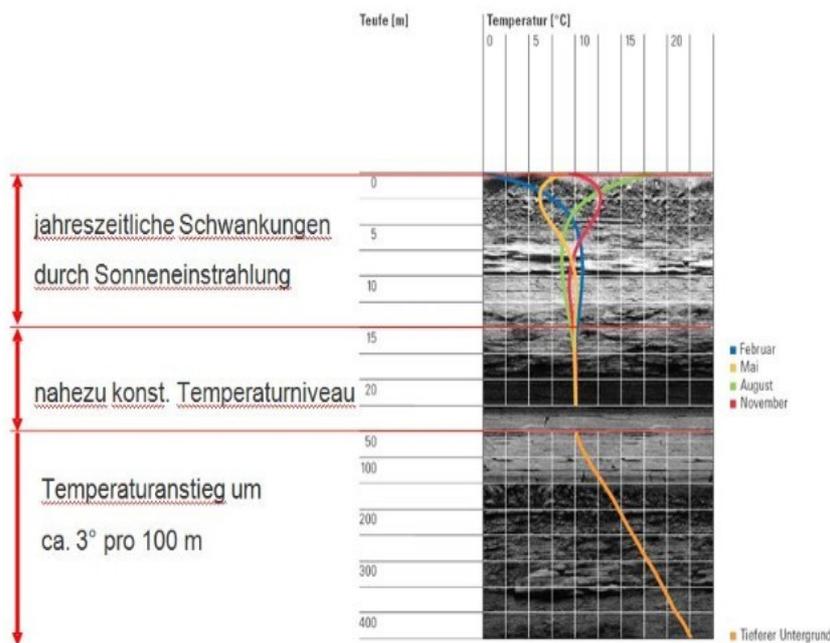


Abbildung 1: Oberflächennahe Temperaturen im Untergrund

Geothermie oder Erdwärme ist thermische Energie, die zu ca. 30-50% aus der Entstehungszeit der Erde stammt. Die restlichen 50-70% stammen aus radioaktiven Zerfallsprozessen im Erdinneren und Gravitationskräften von anderen Himmelskörpern, insbesondere des Mondes. Aktuelle Forschungsergebnisse gehen von 50% Erdwärme durch radioaktiven Zerfall aus.⁵ Oberflächennah spielt außerdem der Wärmeeintrag von Solarstrahlung, Luft und Regen eine Rolle. Die saisonal-beeinflusste Zone erstreckt sich in 10-30m Tiefe, wie in Abbildung 1 zu sehen ist.

Darunter befindet sich die neutrale Zone, sie zeichnet sich dadurch aus, dass die Schwankungen der Temperatur im Jahresverlauf geringer als 0,1K ausfallen⁶. Unterhalb davon kann man mit einer durchschnittlichen Temperaturzunahme von 3K/100m Tiefe rechnen. Dies hängt aber stark von den örtlichen geologischen Gegebenheiten ab. In Gebieten mit vulkanischer Aktivität kann dieser Temperaturgradient auch deutlich höher ausfallen, in anderen Gebieten aber auch deutlich niedriger.

Erdwärme wird überwiegend als Wärmequelle für Wärmepumpen in der Heiztechnik verwendet, findet aber auch in der Kühltechnik Einsatz und wird vereinzelt auch in großtechnischen Anlagen zur Stromerzeugung eingesetzt.

3.2. Kohlendioxid

Kohlendioxid, oder auch Kohlenstoffdioxid genannt, ist ein farb- und geruchloses, nicht brennbares Gas mit der Summenformel CO_2 . Kohlendioxid wirkt ab einer Konzentration von 6% in der Atemluft betäubend und kann bei höheren Konzentrationen tödlich wirken. Kohlendioxid ist Bestandteil der Atmosphäre mit derzeit etwa 0,0393% (392,58ppm)⁷. CO_2 kommt in natürlicher Form in der Umwelt vor und findet unter anderem auch als Getränkezusatz Verwendung, daher ist ein Einsatz von CO_2 -Erdsonden auch in Wasserschutzgebieten grundsätzlich möglich, da keine Umweltgefährdung des Grundwassers besteht.

3.3. Heatpipes

Heatpipes, zu deutsch Wärmerohre, sind Rohre, die dazu benutzt werden, thermische Energie gezielt in axialer Richtung zu transportieren. Heatpipes funktionieren über den Transport von latenter Wärme, der durch Verdampfungs- und Kondensationsprozesse eines Wärmeträgermediums erfolgt. Diese Technologie fand ursprünglich Einsatz in der Raumfahrttechnik. Sie wurde zuerst im Satellitenbau eingesetzt, um den Temperaturgradienten zwischen Sonnen- und Schattenseite zu verringern.

Es gibt zwei verschiedene Arten von Heatpipes, zum einen das Wärmerohr, das aus einem Metallrohr mit einem Drahtgeflecht im Inneren besteht. Dabei wird durch die Kapillarwirkung des Drahtgeflechts der Stofftransport gewährleistet.

Die zweite Variante ist der Zwei-Phasen-Thermosiphon. Dabei handelt es sich um ein Metallrohr ohne besondere Innenstruktur, der Stofftransport erfolgt hierbei durch die Schwerkraft. Deshalb werden Thermosiphons in einer vertikalen Ausrichtung oder einer Schräglage eingesetzt.

Beiden Varianten liegt das gleiche Funktionsprinzip zugrunde. Das Rohr der jeweiligen Ausführung ist mit einem Wärmeträgermedium unter einem bestimmten Druck befüllt, sodass im Rohr sowohl eine flüssige, als auch eine gasförmige Phase vorhanden ist. Das Rohr befindet sich an der einen Seite an einer Wärmequelle und endet an der anderen Seite in einer Wärmesenke. Durch die Aufnahme von thermischer Energie an der Wärmequelle beginnt das Wärmeträgermedium zu sieden und das dabei entstehende Gas strömt in Richtung der Wärmesenke, aufgrund von Druckunterschieden. An der Seite der Wärmesenke wird dem Gas thermische Energie entzogen und kondensiert dabei. Der flüssige Wärmeträger wird im Wärmerohr durch Kapillarwirkung, im Thermosiphon durch die Schwerkraft wieder auf die Seite der Wärmequelle transportiert.

3.4. Bohrtechnik

Die Bohrtechnik für CO_2 -Sonden unterscheidet sich nicht von der für andere Erdwärmesonden. Die Art der Bohrung hängt in der Regel von den Gegebenheiten des Untergrunds ab. Üblicherweise wird entweder mit einem Hammerbohrverfahren oder mit einer Spülbohrung verfahren. Das Hammerbohrverfahren wird bei Festgestein Bodenarten überwiegend eingesetzt, der Bohrkopf wird mit Druckluft vorangetrieben

und zerkleinert das Gestein. Eine Spülbohrung wird bei weichen Böden (Sand, Kies, Ton) eingesetzt. dabei wird das vom Bohrkopf zerkleinerte Bohrgut mit Hilfe von Wasser aus dem Bohrloch gespült. Das Wasser wird unter Druck in das Bohrloch gepumpt und hat eine stabilisierende Wirkung auf die Bohrlochwand, sodass eine Verrohrung des Bohrlochs nur auf den ersten Metern der Bohrung nötig ist. Anhand des, durch das Wasser geförderte, Bohrgut kann ein geologisches Schichtenverzeichnis des Untergrunds erstellt werden und somit Erkenntnisse über die Beschaffenheit des Bodens gewonnen werden.

4. Aufbau und Funktion

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau und die Funktion der CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde beschrieben.

Die CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde gibt es in zwei verschiedenen Ausführungen. Sie besteht entweder aus einem Kupferrohr oder einem Edelstahlwellrohr. In der Ausführung mit Kupferrohr wird eine PE-Ummantelung hinzugefügt, um es gegen Korrosion zu schützen, abseihen davon unterscheiden sich beide Varianten nicht grundlegend im Aufbau. Das Innenrohr der Anlage wird an dem oberen Ende von einem Wärmetauscherkopf abgeschlossen, sodass die Sonde ein geschlossenes System bildet. Ein geschlossenes System zeichnet sich dadurch aus, dass kein Stofftransport über die Systemgrenze erfolgen kann, jedoch ein Energietransport möglich ist⁸. Am Wärmetauscher wird die thermische Energie je nach Ausführung entweder von einem Zwischenkreislauf, oder direkt von dem Kältemittelkreislauf der Wärmepumpe absorbiert.

In das geschlossene Metallrohr wird Kohlendioxid unter einem bestimmten Druck im flüssigen Zustand eingebracht. Beim Befüllen expandiert das CO₂ teilweise, sodass sich eine flüssige und eine gasförmige Phase im Rohr befindet. Im Rohr stellt sich üblicherweise ein Druck von 30 bis 45 bar ein, abhängig von der Bohrlochtemperatur⁹. Der Druck ist so gewählt, dass der Siedepunkt des CO₂ sich der Bohrlochtemperatur anpasst. Sinkt beispielsweise die Temperatur im Bohrloch während des Betriebs der Wärmepumpe, so fällt damit auch der Druck in der Sonde ab und der Siedepunkt des CO₂ damit auch. Dies ergibt sich aus folgendem Zusammenhang bei isochoren Zustandsänderungen:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{Gl.(1-1)}$$

Daraus ergibt sich der Druck p_2 aus folgender Formel:

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} \quad \text{Gl.(1-2)}$$

Die nachfolgende Tabelle stellt die Siedekurve des Kohlendioxid im, für die CO₂-Heatpipe relevanten, Bereich dar:

Tabelle 1: Siedekurve Kohlendioxid¹⁰

ϑ [°C]	p [bar]
-4	31,3
-2	33,04
0	34,85
2	36,73
4	38,69
6	40,72
8	42,83
10	45,02

Die Funktion der CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde basiert auf dem Prinzip des Zwei-Phasen-Thermosiphons. Der Boden fungiert als Wärmequelle und gibt dort gespeicherte thermische Energie an die Heatpipe ab. Das am unteren Ende der Heatpipe befindliche flüssige Kohlendioxid nimmt die von außen zugeführte Energie aufgenommen und bringt das flüssige CO₂ zum Sieden. Dieses steigt aufgrund von Druck- und Dichteunterschieden in der Heatpipe nach oben und gelangt in den Wärmetauscher. Dort wird dem gasförmigen CO₂ über einen Wärmetauscher Energie, je nach Ausführung, entweder von einem Zwischenkreislauf oder direkt von dem Kältemittel der Wärmepumpe entzogen, was dazu führt, dass es kondensiert und von der Schwerkraft getrieben an der Rohrwandung wieder nach unten strömt. Am Boden der Heatpipe angekommen, nimmt das flüssige CO₂ wieder Energie aus dem Boden auf und der Kreislauf startet erneut. Dieser Prozess läuft angetrieben durch die im Boden gespeicherte thermische Energie und benötigt keine elektrische Zusatzenergie.

5. Marktreife

Das Kapitel Marktreife beschreibt die derzeitige Marktsituation der CO₂-Heatpipe-Technologie. Hierzu wird zunächst auf die Definition des Wortes Marktreife eingegangen und anschließend anhand der 2006 gebauten Anlage von Herrn Sturm die Produktreife erörtert.

Unter der Marktreife des Produktes „CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde“ oder der Produktreife versteht man das Stadium des Produktes, in dem es den qualitativen Ansprüchen des Verbrauchers gerecht wird. Dafür muss die Funktionalität des Produktes gewährleistet sein und technische Mängel minimiert werden. Wenn diese Voraussetzungen gegeben sind, kann das Produkt in die Serienfertigung gehen und damit zu einem angemessenen Preis auf den Markt gebracht werden. Ist dies geschehen, hat das Produkt Marktreife erlangt.

Im Jahr 2006 plante Oliver Sturm den Bau seines Wohnhauses, dabei war es ihm ein Anliegen, die laufenden Betriebskosten seines Hauses gering zu halten und legte daraufhin das Haus auf einen niedrigen Energiebedarf und hohe Energieeffizienz aus. Bei der Planung der Heizungsanlage legte er Wert darauf, unabhängig von fossilen Energieträgern zu sein, im Hinblick auf die steigenden Preise für Öl und Gas und die knapper werdenden Ressourcen. Daher entschied er sich für eine Wärmepumpe als Heizsystem für sein Haus. Um eine Wärmepumpe effizient zu betreiben, muss die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Nutzwärmeniveau möglichst niedrig gehalten werden, da somit weniger elektrische Energie aufgewendet werden muss um das Temperaturniveau des Heizungsvorlauf zu erreichen. Die Effizienz einer Wärmepumpe wird in der Regel mit der Leistungszahl ε angegeben.

$$\varepsilon = \frac{Q_{WP}}{P_{el}} \quad \text{Gl.(2-1)}$$

Die Leistungszahl der Wärmepumpe ist ein Momentanwert und wird unter Normbedingungen auf einem Prüfstand ermittelt. Sie gibt das Verhältnis von abgegebener thermischer Leistung der Wärmepumpe Q_{WP} zur eingesetzten elektrischen Leistung P_{el} an. Eine bessere Bewertung der Effizienz eines Heizsystems ermöglicht die Jahresarbeitszahl β . Sie gibt das Verhältnis des Jahresertrages an Heizarbeit W_{nutz} [kWh/a] zur aufgewendeten Antriebs- und Hilfsenergie W_{el} [kWh/a] an¹¹.

$$\beta = \frac{W_{Nutz}}{W_{el}} \quad \text{Gl.(2-2)}$$

Die Jahresarbeitszahl eignet sich besser zur Bewertung eines Heizsystems, da in sie anlagenspezifische Werte mit einfließen. Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle(BAFA) schreibt hierzu: „Die Jahresarbeitszahl bei elektrisch angetriebenen Wärmepumpen ist das Ergebnis der Division der abgegebenen Wärmemenge durch die eingesetzte Strommenge einschließlich der Strommenge für den Betrieb der peripheren Verbraucher, insbesondere der Grundwasserpumpe, der Soleumwälzpumpe, des Notheizstabes und der Regelung.“¹² Da es für das Erreichen einer hohen Jahresarbeitszahl wichtig ist, dass alle Systemkomponenten auf einander abgestimmt sind, wählte Herr Sturm eine Niedrigenergiebauweise im Rahmen des KfW-40-Haus Standards und ließ Flächenheizkörper(Fußbodenheizung) installieren, da mit Flächenheizkörpern niedrigere Vorlauftemperaturen des Heizkreises benötigt werden. Da in die Bilanzierung der Jahresarbeitszahl, wie oben ersichtlich, auch die Antriebsenergie der Soleumwälzpumpe mit einfließt, wurde hierbei die CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde als Wärmequelle der Wärmepumpe gewählt, da bei dieser Sondenform keine Umwälzpumpe für den Wärmetransport benötigt wird und somit theoretisch eine höhere Jahresarbeitszahl als mit Sole-Erdsonden erreicht werden kann. Laut einer Studie des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) aus dem Jahre 2010 mit dem Titel „Wärmepumpen Effizienz“ erreichten Erdreich-Wärmepumpen niedriger Leistungsklassen im Zeitraum von 2005 bis 2010 in einem Feldtest durchschnittliche Jahresarbeitszahlen von 3,9¹³. Ein wissenschaftliches Monitoring der Wärmepumpenanlage von Herrn Sturm wird durch Mitarbeiter des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Aktuelle Daten dazu können im Internet unter folgender URL abgerufen werden: http://www.co2-erdsonde-bensheim.de/pages/onlineanlage_bensheim.php¹⁴.

Laut den Daten der TU Darmstadt erreichte die Anlage seit Beginn des Messzyklus am 01.10.2011 eine kombinierte Jahresarbeitszahl (Heizung und Trinkwarmwasser) von 5,65 (Stand 04.01.2012, 15:00Uhr). Diese und archivierte Daten von den Jahren 2006 bis 2010 finden sich auch auf der Internetseite des Wärmepumpenherstellers Heliotherm unter folgender URL: <http://referenzen.heliotherm.com/index.aspx?id=1>.

So waren laut der dort archivierten Daten die Jahresarbeitszahlen der vergangenen Jahre wie folgt:

Tabelle 2: Jahresarbeitszahlen 2006-2009

Jahr	Jahresarbeitszahl
2006	6,24
2007	6,26
2008	6,14
2009	5,93

Das Erreichen dieser überdurchschnittlichen Jahresarbeitszahlen ist hauptsächlich auf die geringe Temperaturdifferenz zwischen Verdampfertemperatur des Kältemittelkreislaufs und Nutzwärmeniveau zurückzuführen. Aufgrund der Verwendung von Flächenheizkörpern reicht eine maximale Vorlauftemperatur von 31°C für den Heizkreislauf aus. Da im Haus kein Trinkwasserspeicher installiert ist, sondern ein Wasserspeicher der über einen Wärmetauscher Frischwasser erwärmt, muss der Wasserspeicher nur auf maximal 50°C erwärmt werden, um warmes Brauchwasser bereitzustellen, nicht aber über die vom Bundesamt für Umwelt empfohlenen 60°C zur Abtötung von Keimen¹⁵.

Im Zuge des Monitoring der Anlage durch die TU Darmstadt wurden Temperaturmessfühler in die Bohrungen der Erdwärmesonden eingebracht. Pro Bohrung wurden jeweils 6 Temperatursonden eingebracht in 5m, 18m, 31m, 44m, 57m und 70m Tiefe. Anhand der Abbildungen 2 -13 ist zu erkennen, dass die Bohrlochtemperaturen verhältnismäßig hoch sind und auch während der Heizperiode nicht unter 3°C fallen. Darüber hinaus zeigt sich das gute Regenerationsvermögen der Bodentemperatur, da die Bohrlochtemperatur bereits relativ kurz nach Ende der Heizperiode (01.06.2008 siehe Abbildung 9) den Ausgangswert von 11°C aufweist. Aufgrund der geringen und nicht nachhaltigen Auskühlung des Bodens kann die Wärmepumpe mit höheren Verdampfungstemperaturen arbeiten und kommt somit auf hohe Arbeitszahlen.

Dimensionierung der Anlage:

Vor dem Bau der Heizungsanlage wurde für die Dimensionierung eine Heizlast von 10kW angenommen. Da die genaue Beschaffenheit des Bodens unbekannt war, nahm man eine maximale Entzugsleistung von 50W/Bohrmeter an. Mit einem Sicherheitszuschlag von rund 11% kam man auf eine Entzugsleistung von 44,4W/Bohrmeter und somit auf eine Sondenlänge von 225 Bohrmeter.

$$\frac{10000W}{44,4 W / m} = 225,23 m \quad (\text{Gl. 3-1})$$

Aufgrund einer bergbaurechtlichen Genehmigung für Bohrungen tiefer als 100m entschied man sich für 3 Sonden mit jeweils 75m Tiefe, anstatt 2 Sonden mit je 112,5m Tiefe. Bei den Bohrarbeiten für die Sonden wurde ein geologisches Schichtenverzeichnis erstellt, aus dem hervorgeht, dass im Untergrund überwiegend feinsandige Bodenarten vorherrschen (Abbildung 14). Aus der Abbildung 15 geht hervor, dass ab einer Bohrtiefe von 16,20m Grundwasser geführt wird. Aus den spezifischen Entzugsleistungen der VDI 4640 (siehe Abbildung 16) kann damit eine durchschnittliche maximale Entzugsleistung des Bodens berechnet werden. Die oberen 16 Bohrmeter können als „Kies, Sand, trocken“ angenommen werden und bei einer durchschnittlichen Betriebsdauer von 1800h/a kann eine Entzugsleistung von 12,5W/m angesetzt werden. Die darunterliegenden 59 Bohrmeter (16m-75m Tiefe) können als „Kies, Sand, wasserführend“ mit einer Entzugsleistung von 72,5W/m gesetzt werden. Damit ergibt sich aus der Überschlagsrechnung für die durchschnittliche Entzugsleistung des Bodens folgender Wert:

$$[(16m \cdot 12,5 W / m) + (59m \cdot 72,5 W / m)] / 75m = 59,7 W / m \quad (\text{Gl. 3-2})$$

Exakte Werte hierfür lassen sich nur experimentell mit Hilfe eines Thermal Response Test (TRT) ermitteln.

Im Betriebsjahr 2008 erfasste der Wärmemengenzähler für Trinkwarmwasser und Heizung eine Wärmemenge von 14871kWh, der vom Stromzähler der Wärmepumpe ermittelte elektrische Aufwand dafür betrug 2423kWh. Damit beträgt die dem Boden entzogene Wärmemenge:

$$14871kWh - 2423kWh = 12448kWh \quad (\text{Gl. 3-3})$$

Bei einer Betriebsdauer von 1800h der Wärmepumpe ergibt das eine Entzugsleistung der CO₂-Erdsonde von 6,916kW:

$$\frac{12448kWh}{1800h} = 6,916 kW \quad (\text{Gl. 3-4})$$

Auf die Sondenlänge von 225m übertragen ergibt das die spezifische Entzugsleistung von 30,74W/m:

$$\frac{6916W}{225m} = 30,74 W / m \quad (\text{Gl. 3-5})$$

Von der maximalen Entzugsleistung von 59,7W/m (siehe Gl. 3-2) wurde nur rund die Hälfte der Leistung abgerufen. Das erklärt die, in den Abbildungen 2-13 ersichtliche, geringe Abkühlung des Untergrunds. Die schnelle Regeneration der Bodentemperatur außerhalb der Heizperiode ist auf die Wasserführung des Bodens zurückzuführen.

Eine Dimensionierung der Sonde, mit der in Gleichung 3-2 berechneten Entzugsleistung von 59,7W/m und der angenommenen maximalen Heizlast von 10kW, ergäbe eine erforderliche Mindestlänge von rund 168m:

$$\frac{10000W}{59,7W/m} = 167,5m \quad (\text{Gl. 3-6})$$

Die tatsächliche Sondenlänge liegt damit 57m über der erforderlichen Mindestlänge von 168m. Das bedeutet, bei den Investitionen für die Bohrungen und die Erdwärmesonden hätten rund 25,3% eingespart werden können.

$$\frac{57m}{225m} = 0,253 \quad (\text{Gl. 3-7})$$

Allerdings begünstigt die Überdimensionierung der Erdsonden das Erreichen von hohen Jahresarbeitszahlen und eine damit einhergehende Verbesserung der CO₂-Bilanz und Reduktion der Heizkosten, aufgrund der geringeren Auskühlung des Bodens und somit höheren Verdampfertemperaturen des Kältemittelkreislaufs der Wärmepumpe.

Kostenvergleich CO₂-Erdsonde/Sole-Erdsonde :

Für eine abschließende Betrachtung der Marktsituation der CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde ist eine Betrachtung der Kosten dieser Technologie, im Vergleich zur konkurrierenden Technologie der Sole-Erdsonden, erforderlich.

Aus einer Kostenauflistung von Herrn Sturm lässt sich entnehmen, dass die Investitionskosten der Erdwärmesonde für die Sondenlänge 225m (3x75m) 11.612€ (3x3336,69€ + 16% Steuer) betragen. Hinzu kamen Kosten für die Erdbohrung von 52€/m. Daraus ergeben sich kombinierte Kosten von 23312€, was auf einen Bohrmeter gerechnet 103,61€/m ergibt:

$$\frac{23312\text{€}}{225m} = 103,61\text{€ / m} \quad (\text{Gl. 4-1})$$

Die Preisspanne bei Sole-Erdwärmesonden liegt bei verschiedenen Anbietern zwischen 30€ und 70€ pro Meter Sondenlänge. Bei einem mittleren Preis von 50€/m wäre die CO₂-Erdsonde bei den Investitionen um den Faktor 2 teurer als die Sole-Erdsonde. Die Mehrkosten für die CO₂-Erdsonde entstehen hauptsächlich durch die höheren Materialkosten des für die Sonden verwendeten Kupfers, gegenüber dem für Sole-Erdsonden verwendeten Polyethylen(PE). Dem stehen allerdings die geringeren Heizkosten gegenüber: Bei dem gleichen Heizenergiebedarf des Jahres 2008 von 14871kWh und einer durchschnittlichen Jahresarbeitszahl von 3,9 ergäbe das einen elektrischen Aufwand von 3813,1kWh:

$$\frac{14871kWh}{3,9} = 3813,08kWh \quad (\text{Gl. 4-2})$$

Das wäre im Vergleich zu den tatsächlich benötigten 2423kWh ein Mehraufwand von 1390kWh (+57%), was bei den Stromkosten zusätzlich 340,55€ wären, bei einem Preis von 24,5Ct/kWh (GGEW ÖkoPlus 2, seit 01.01.2012¹).

¹ Stromtarif von Herr Sturm

Im Jahre 2009 waren in Deutschland rund 334.000 Wärmepumpen installiert, davon 48% mit Sole-Erdwärmesonden (rund 160.000 Anlagen)¹⁷. Daran gemessen ist der Anteil der Anlagen mit CO₂-Erdwärmesonde verschwindend gering mit geschätzt etwa 1.500 installierten Anlagen¹⁸.

Aufgrund des höheren Preises nimmt die CO₂-Erdsonde auf dem Markt eher eine Nischenrolle ein im Hocheffizienzbereich.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

Die CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde ist eine umweltfreundliche und effiziente Art der Erdwärmenutzung. Durch die Nutzung des Funktionsprinzip des Zwei-Phasen-Thermosiphons kann die Effizienz von Erdwärmeanlagen gesteigert werden. Die Erhöhung der Jahresarbeitszahl führt zu einer Verbesserung der CO₂-Bilanz, da bei gleichem Heizenergiebedarf der Primärenergiebedarf sinkt, und somit auch zu einer Reduktion der Stromkosten. Die höhere Effizienz schlägt sich allerdings in höheren Investitionskosten gegenüber Sole-Erdwärmesonden nieder.

Mit dem Abnehmen der fossilen Energieträger und steigenden Energiepreisen könnte die CO₂-Heatpipe-Erdwärmesonde in Zukunft jedoch zunehmend eine bedeutendere Rolle im Heizungs- und Erdwärmemarkt spielen, wenn die Vorteile durch Kosteneinsparung bei den Heizkosten die höheren Investitionskosten überwiegen. Da diese Technologie erst seit dem Jahr 2000 im Einsatz ist, sind die Möglichkeiten zur Optimierung der Sonde, beispielsweise im Bereich der Füllmenge beziehungsweise des Drucks des CO₂ und in der Abstimmung der einzelnen Systemkomponenten, noch offen.

7. Literatur- und Quellenverzeichnis

Print-Publikationen:

Groll, M.; Zimmermann, P.: *Wärme- und Stoffübertragung: Das stationäre- und instationäre Betriebsverhalten von Wärmerohren*. Band 4, Springer, Stuttgart, (1971). S. 39-47

Hahne, E.: *Technische Thermodynamik*. 4.Auflage. Oldenbourg, vgl. S.29

Loose, Peter (2007): *Erdwärmenutzung: Versorgungstechnische Planung und Berechnung*

Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 4640*, Blatt 1, 2.2 Definitionen. (Stand: 2000)

Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Wärmeatlas*, 10.Auflage 2006: Stoffwerte von Kohlendioxid, Dbd 3

Zorn, Roman et al.: *CO₂-Erdsonde basierend auf dem Prinzip des Gravitationswärmerohrs*. In: bbr Jahresmagazin 12/2007, S.3

Elektronische-Publikationen:

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle:

Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt

http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/vorschriften/energie_ee_richtlinie_15_03_2011.pdf

Review: 03.01.2012, 17:03Uhr

Bundesamt für Umwelt:

Energiesparen bei der Warmwasserbereitung – Vereinbarkeit von Energieeinsparung und Hygieneanforderungen an Trinkwasser, September 2011

http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/downloads/trinkwasser/warmwasserbereitung_energiesparen_stellungnahme_uba.pdf

Review: 05.01.2012, 15:43Uhr

CO₂-Erdsonde-Bensheim, Oliver Sturm:

<http://www.co2-erdsonde-bensheim.de/>

Review:04.01.2012, 14:10Uhr

Erdwärme-Zeitung.de: *Wärmepumpen & Erdwärme in Zahlen*. Stand:2011

<http://www.erdwaerme-zeitung.de/waermepumpen/waermepumpen-in-zahlen-12789456/index.php>

Review:11.01.2012, 17:49

Fraunhofer ISE, Freiburg i. Breisgau: *Wärmepumpen Effizienz*, 27.05.2011, vgl. S.33

http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/download/wp_effizienz_endbericht_kurzfassung.pdf

Review:04.01.2012, 12:17Uhr

GtV Bundesverband Geothermie

<http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossar-lexikon/h/heat-pipe.html>

Review: 10.01.2012, 13.30Uhr

IBS – Ingenieurbüro für Haustechnik Schreiner, Rudolstadt, Thüringen:

Kriterien, Kennzahlen, Wirtschaftlichkeit und Hinweise zur Auswahl von Wärmepumpen.

http://energieberatung.ibs-hlk.de/planwp_kriter.htm

Review: 03.01.2012, 16:12Uhr

Nature Publishing Group: *Nature Geoscience* 4, 17.07.2011

<http://www.nature.com/ngeo/journal/v4/n9/full/ngeo1205.html>

Review: 17.12.2011, 11:33Uhr

Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA:

Scripps CO₂ Programm: CO₂ Concentration at Mauna Loa Observatory, Hawaii. (Stand:15.11.2011)

http://scrippsco2.ucsd.edu/data/in_situ_co2/monthly_mlo.csv

Review:12.12.2011, 17:42Uhr

Persönliche Auskünfte erhalten durch:

Herrn Oliver Sturm

Herrn Karl Mittermayr, M-TEC Mittermayr GmbH

Herrn Andreas Bangheri, Heliotherm Ges.m.b.H

8. Anlagen

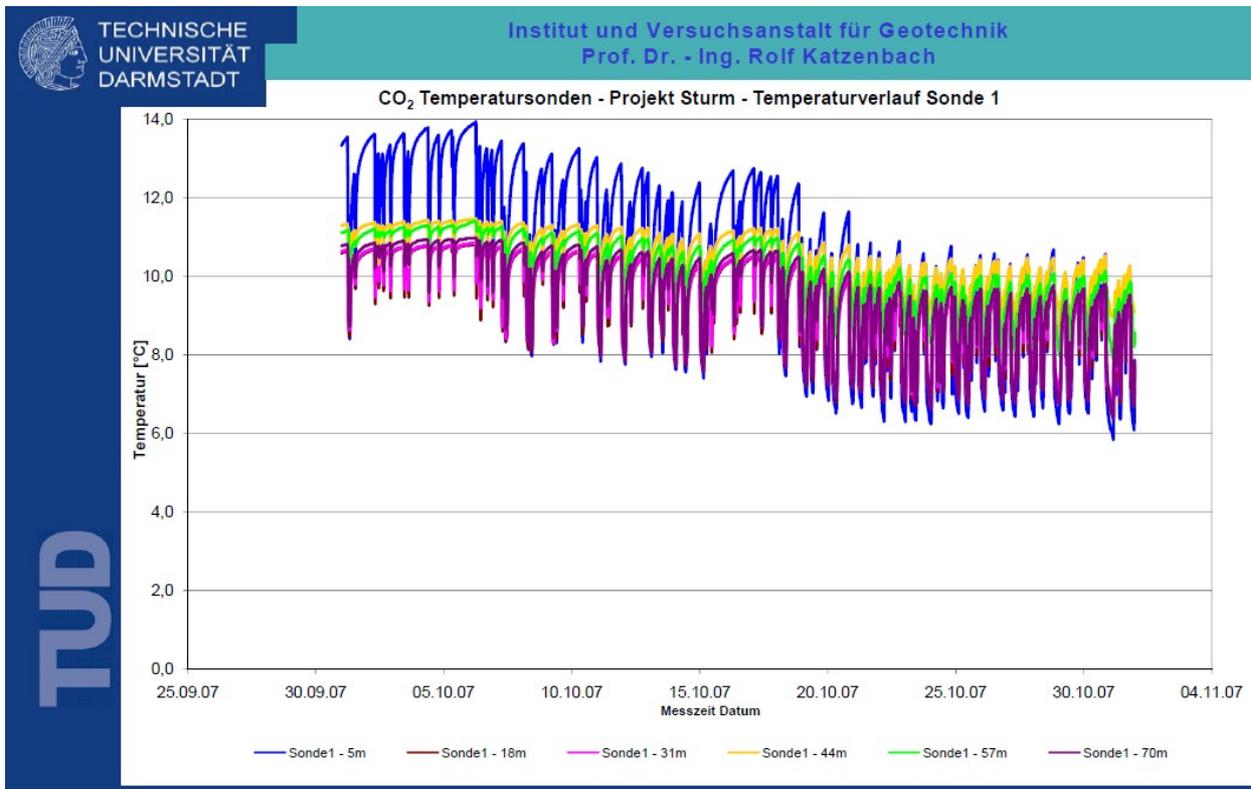


Abbildung 2: Temperaturverlauf Sonde 1 - 25.09.2007 bis 04.11.2007

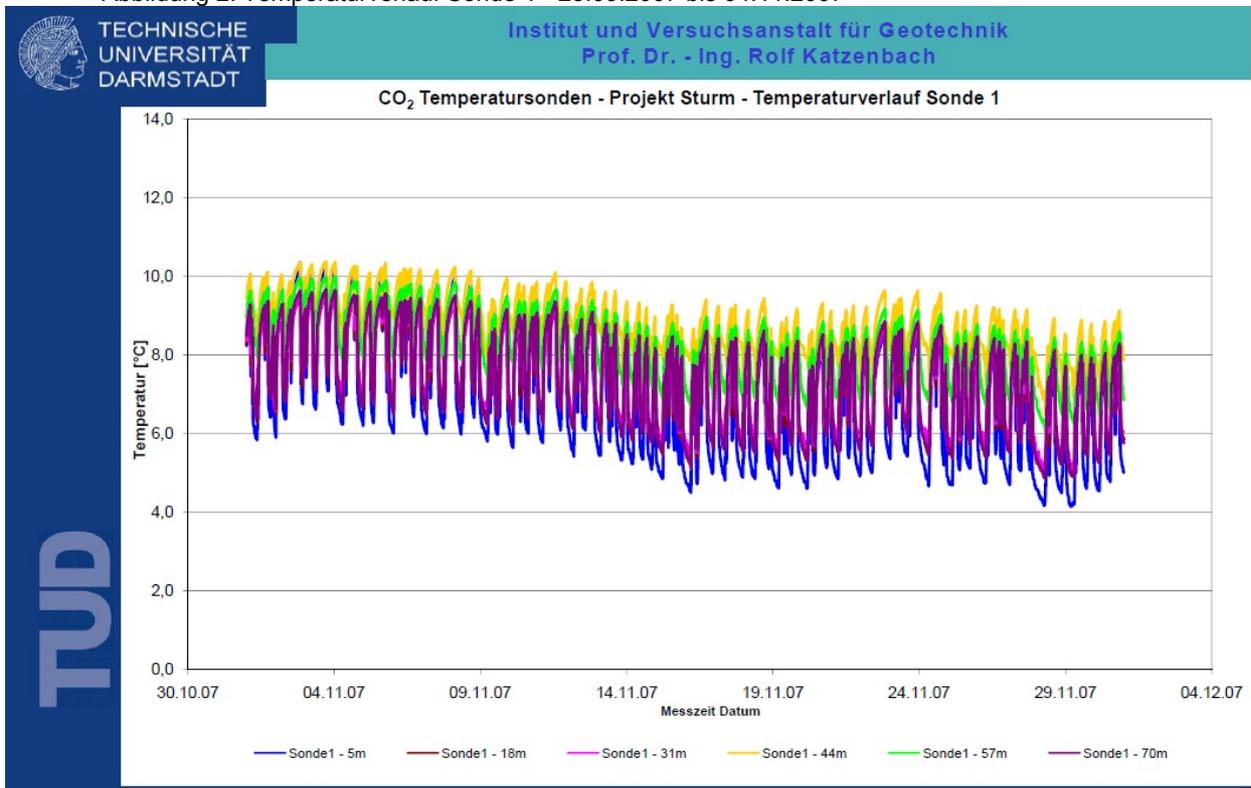


Abbildung 3: Temperaturverlauf Sonde 1 - 30.10.2007 bis 04.12.2007

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

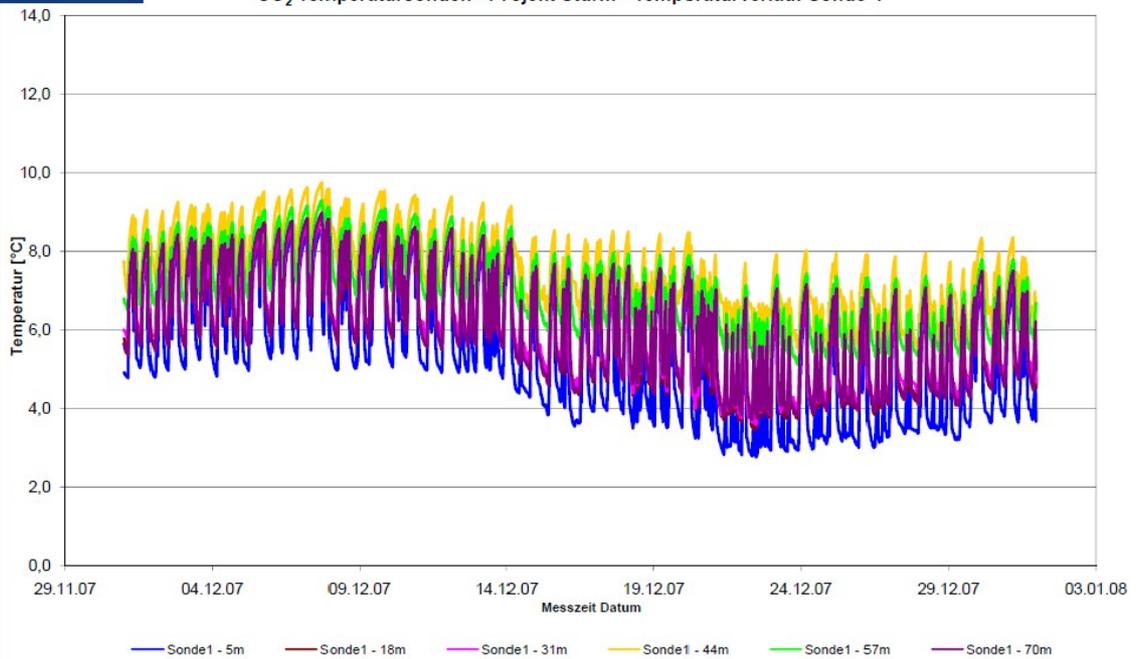


Abbildung 4: Temperaturverlauf Sonde 1 - 29.11.2007 bis 03.01.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

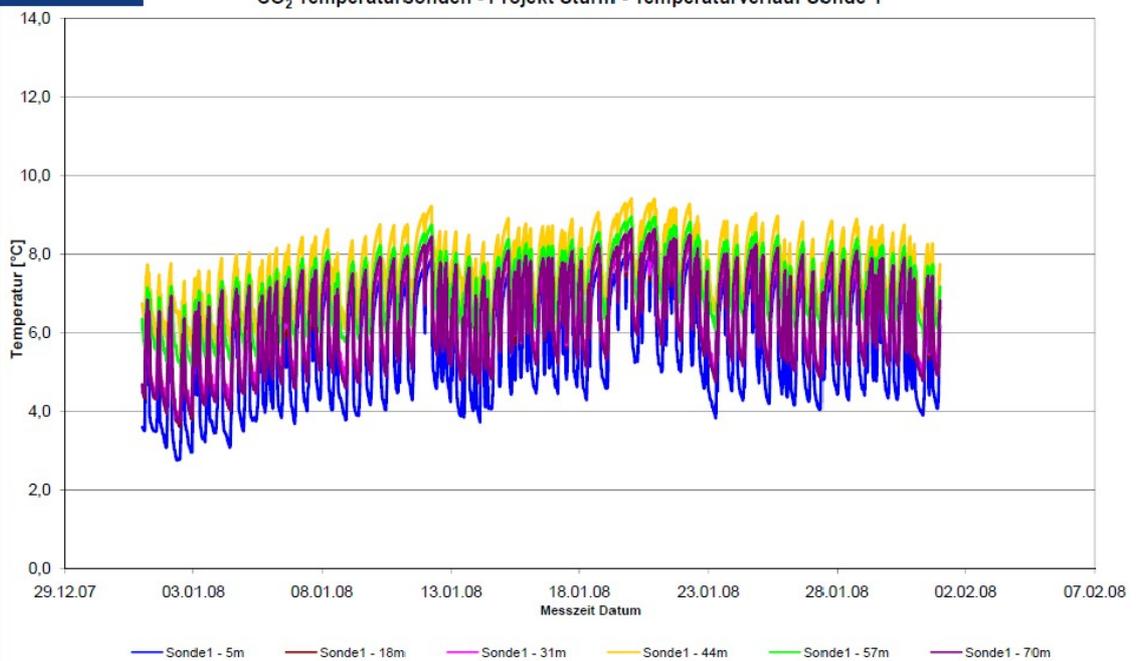


Abbildung 5: Temperaturverlauf Sonde 1 - 29.12.2007 bis 07.02.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

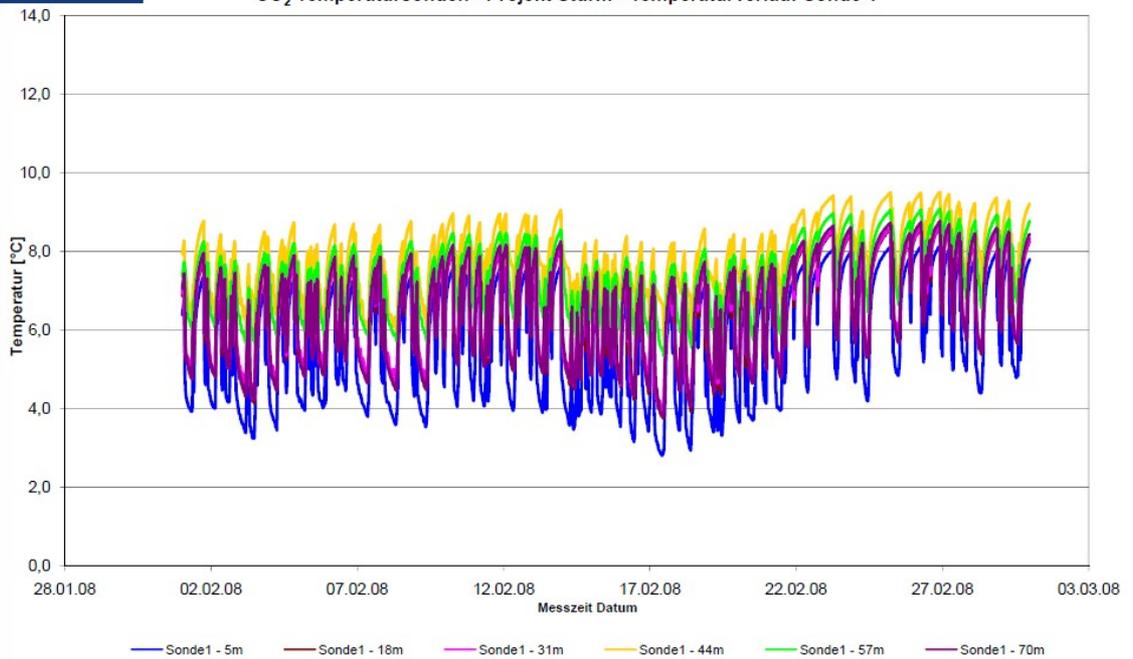


Abbildung 6: Temperaturverlauf Sonde 1 - 28.01.2008 bis 03.03.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

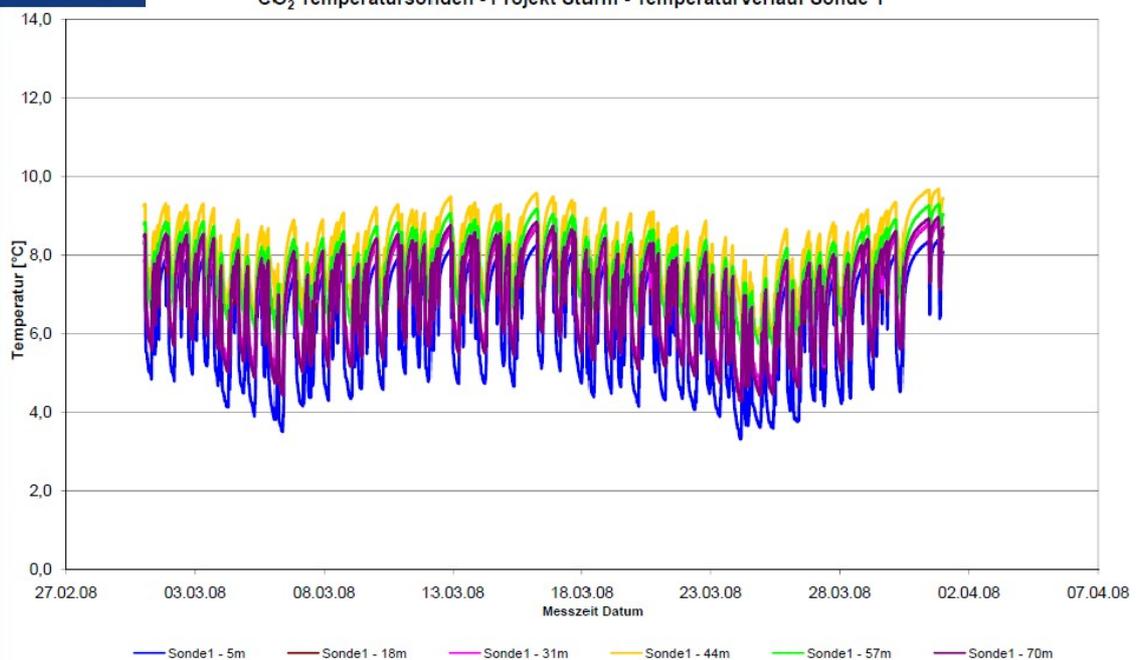


Abbildung 7: Temperaturverlauf Sonde 1 - 27.02.2008 bis 07.04.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

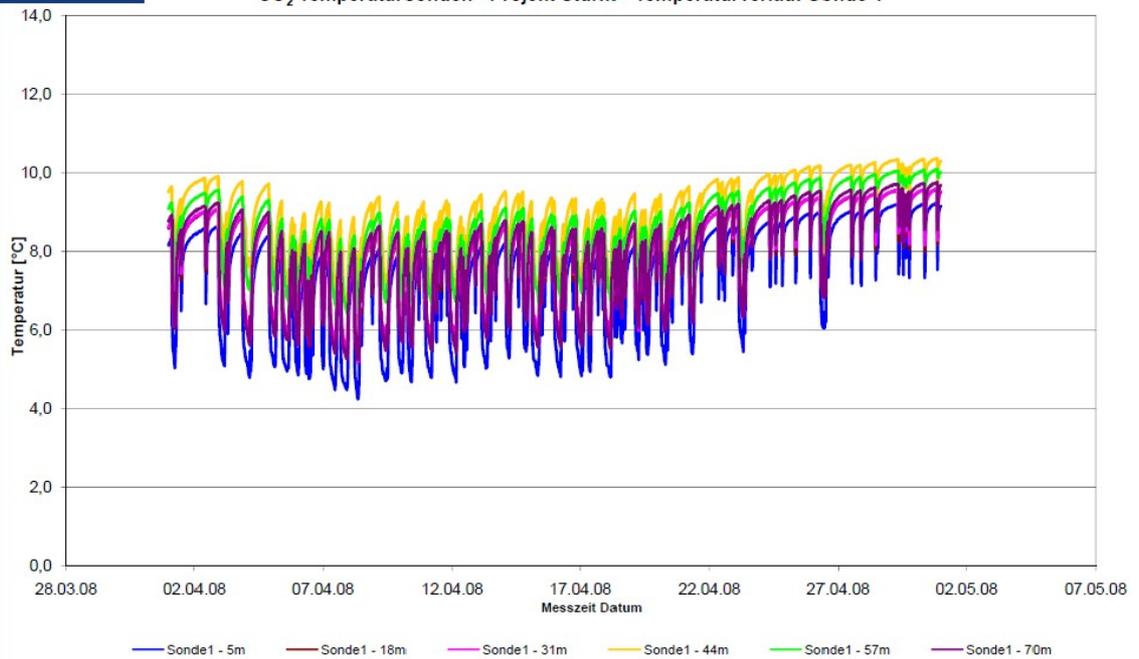


Abbildung 8: Temperaturverlauf Sonde 1 - 28.03.2008 bis 07.05.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

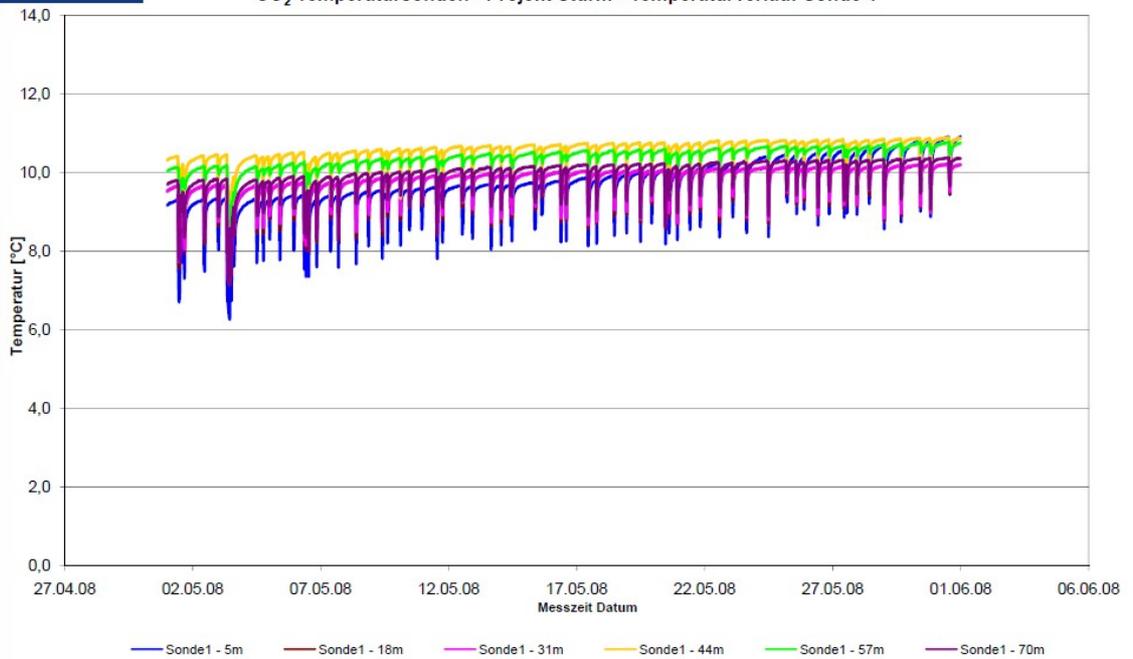


Abbildung 9: Temperaturverlauf Sonde 1 - 27.04.2008 bis 06.06.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

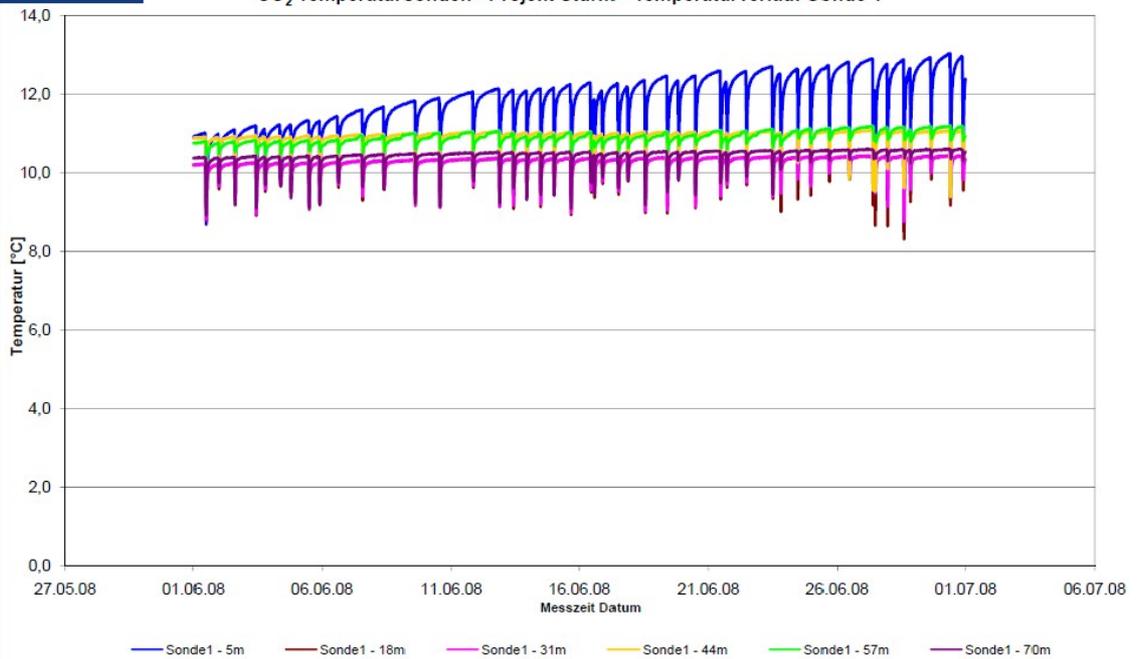


Abbildung 10: Temperaturverlauf Sonde 1 - 27.05.2008 bis 06.07.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

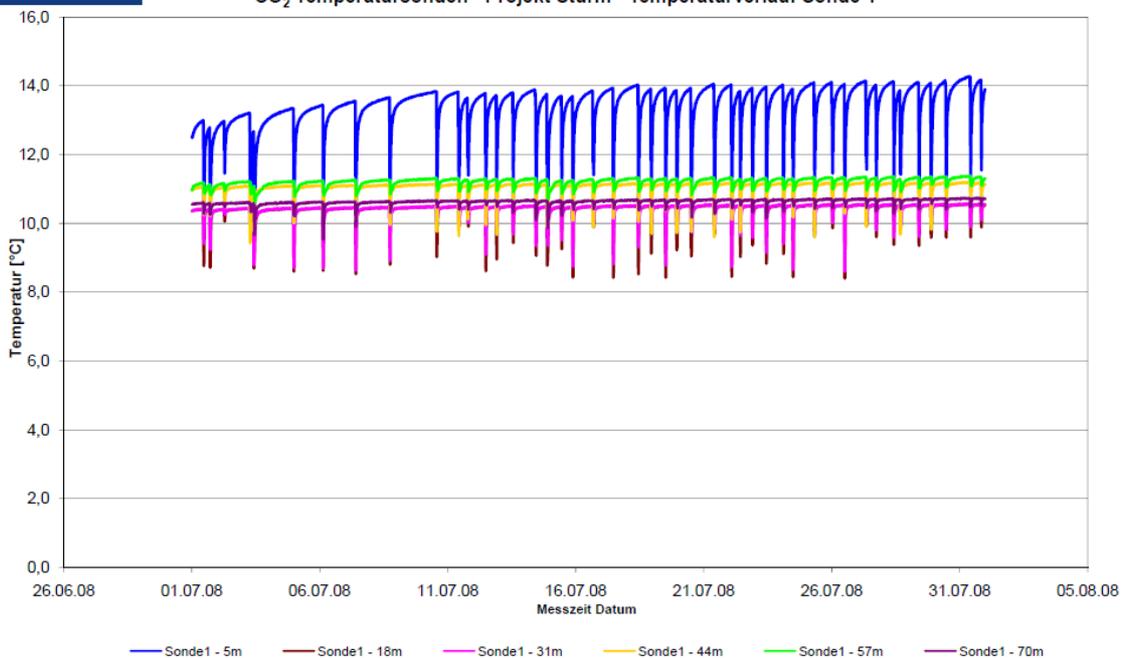


Abbildung 11: Temperaturverlauf Sonde 1 - 26.06.2008 bis 05.08.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

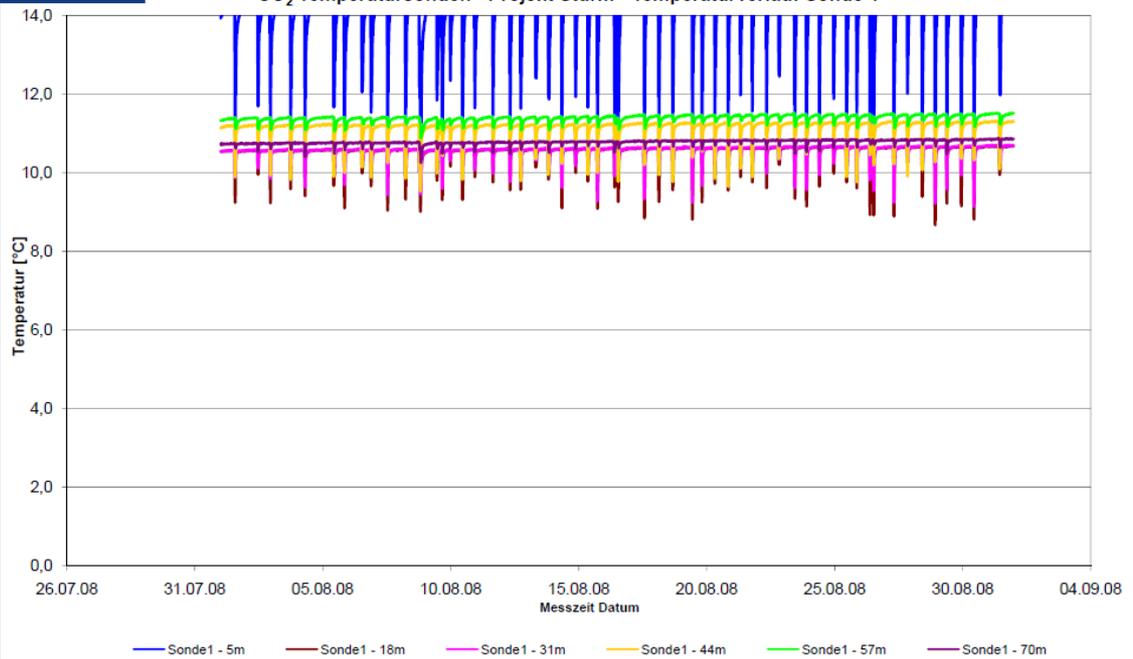


Abbildung 12: Temperaturverlauf Sonde 1 - 26.07.2008 bis 04.09.2008

CO₂ Temperatursonden - Projekt Sturm - Temperaturverlauf Sonde 1

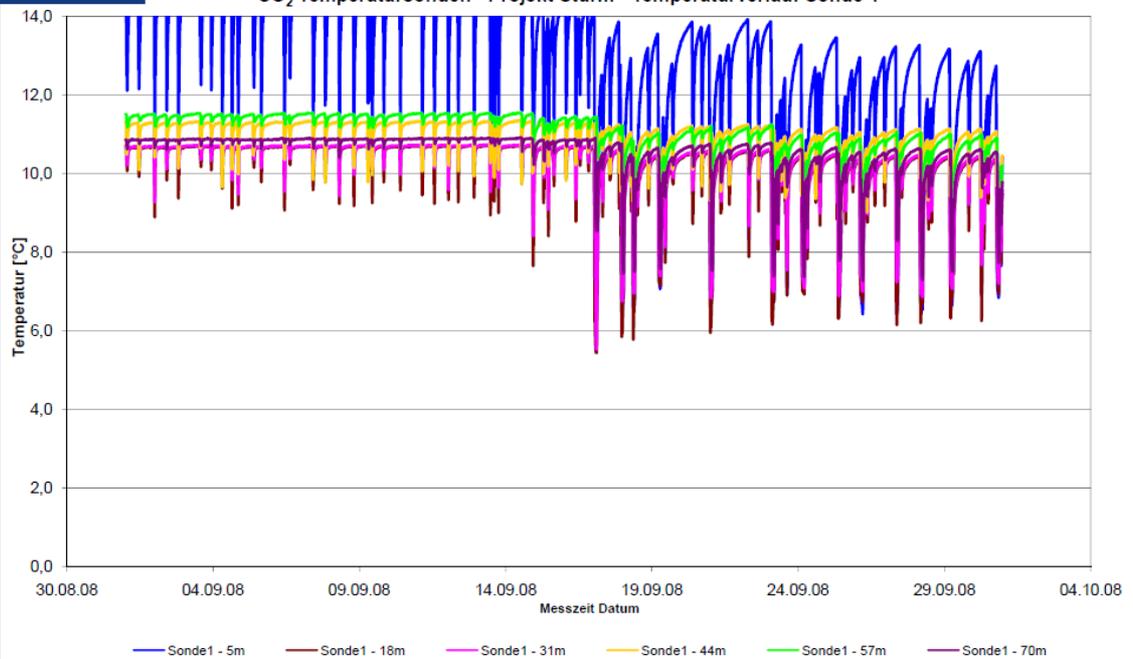


Abbildung 13: Temperaturverlauf Sonde 1 - 30.08.2008 bis 04.10.2008

Ort: Bensheim-Auerbach

Bohrung: Wb 1-3

Anlage 2, Blatt 1/1

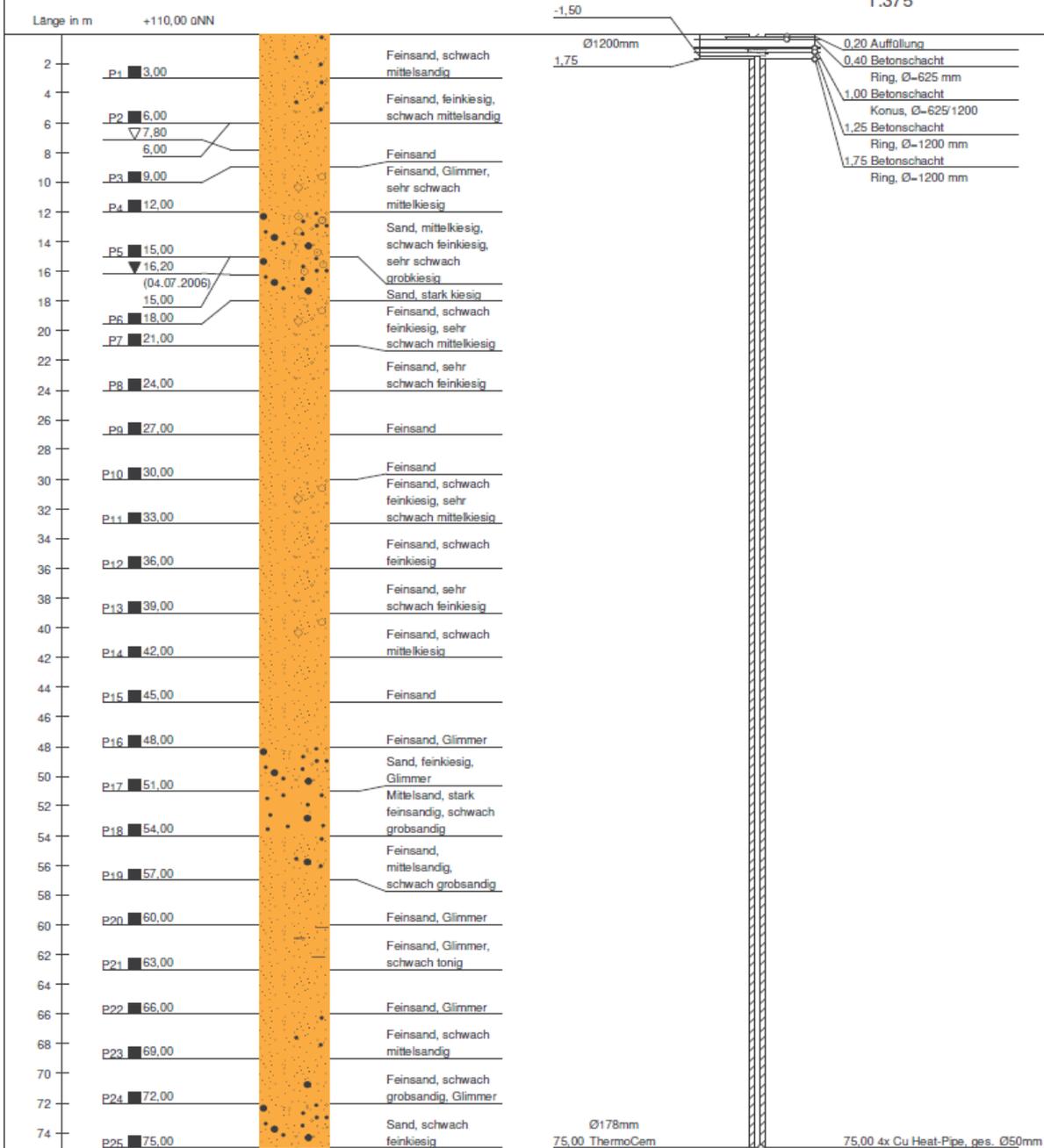
Datum:

03.07. - 08.07.2006

Höhenmaßstab:

1:375

Länge in m +110,00 oNN



DIPL.-ING BERND ENGERT, ÖBUI SACHVERSTÄNDIGER, PLANUNGS- UND GUTACHTERBÜRO FÜR BRUNNENBAU UND BOHRTECHNIK

Im Schollrain 20 • D - 64342 Seeheim - Jugenheim • Telefon: +49 (0) 62 57 / 90 30 - 29
Telefax: +49 (0) 62 57 / 90 30 - 39 • <http://www.bernd-engert.de> • info@bernd-engert.de



Abbildung 14: Geologisches Schichtenverzeichnis

		<h2>Schichtenverzeichnis</h2> <p>für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben</p>			Aktenzeichen: BV Sturm Archiv Nummer:		
Ort: Bensheim-Auerbach							
Bohrung: Wb 1-3 Anlage 1, Blatt 2/6					Datum: 03.07. - 08.07.2006		
1	2			3	4	5	6
15,00	a) Sand, mittelkiesig, schwach feinkiesig, sehr schwach grobkiesig			WSP in Ruhe	P	5	15,00
	b)						16,20
	c)	d)	e) hellbraun				
	f)	g)	h) i)				
18,00	a) Sand, stark kiesig				P	6	18,00
	b)						
	c)	d)	e) hellbraun				
	f)	g)	h) i)				
21,00	a) Feinsand, schwach feinkiesig, sehr schwach mittelkiesig				P	7	21,00
	b)						
	c)	d)	e) graubraun				
	f)	g)	h) i)				
24,00	a) Feinsand, sehr schwach feinkiesig				P	8	24,00
	b)						
	c)	d)	e) braun				
	f)	g)	h) i)				
27,00	a) Feinsand				P	9	27,00
	b)						
	c)	d)	e) braun				
	f)	g)	h) i)				
<p>DIPL.-ING BERND ENGERT, ÖBUIV SACHVERSTÄNDIGER, PLANUNGS- UND GUTACHTERBÜRO FÜR BRUNNENBAU UND BOHRTECHNIK</p> <p>Im Schollrain 20 • D - 64342 Seeheim - Jugenheim • Telefon: +49 (0) 62 57 / 90 30 - 29 Telefax: +49 (0) 62 57 / 90 30 - 39 • http://www.bernd-engert.de • info@bernd-engert.de</p>							
							

Abbildung 15: Auszug Schichtenverzeichnis

Untergrund	spezifische Entzugsleistung	
	für 1800 h	für 2400 h
<i>Allgemeine Richtwerte:</i>		
Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) ($\lambda < 1,5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	25 W/m	20 W/m
Normaler Festgesteins-Untergrund und wassergesättigtes Sediment ($\lambda = 1,5\text{--}3,0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	60 W/m	50 W/m
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda > 3,0 \text{ W/(m} \cdot \text{L)}$)	84 W/m	70 W/m
<i>Einzelne Gesteine:</i>		
Kies, Sand, trocken	< 25 W/m	< 20 W/m
Kies, Sand, wasserführend	65–80 W/m	55–65 W/m
Bei starkem Grundwasserfluss in Kies und Sand, für Einzelanlagen	80–100 W/m	80–100 W/m
Ton, Lehm, feucht	35–50 W/m	30–40 W/m
Kalkstein (massiv)	55–70 W/m	45–60 W/m
Sandstein	65–80 W/m	55–65 W/m
saure Magmatite (z.B. Granit)	65–85 W/m	55–70 W/m
basische Magmatite (z.B. Basalt)	40–65 W/m	35–55 W/m
Gneis	70–85 W/m	60–70 W/m
Die Werte können durch die Gesteinsausbildung wie Klüftung, Schieferung, Verwitterung erheblich schwanken.		

Abbildung 16: Spezifische Entzugsleistung nach VDI 4640 - Blatt 2 S.16

- 1 Zorn, Roman et al.: *CO₂-Erdsonde basierend auf dem Prinzip des Gravitationswärmerohrs*. In: bbr Jahresmagazin 12/2007, S.3
- 2 Vorlesungsskript Geothermie: Thomas Schabbach, (Stand: 18.10.2011)
- 3 Groll, M.; Zimmermann, P.: *Wärme- und Stoffübertragung: Das stationäre- und instationäre Betriebsverhalten von Wärmerohren*. Band 4, Springer, Stuttgart, (1971). S. 39-47
- 4 GtV Bundesverband Geothermie, <http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossar-lexikon/h/heat-pipe.html> (Review: 10.01.2012, 13.30Uhr)
- 5 Nature Publishing Group: *Nature Geoscience* 4, 17.07.2011, <http://www.nature.com/ngeo/journal/v4/n9/full/ngeo1205.html>
- 6 Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4640 Blatt 1, 2.2 Definitionen. (Stand: 2000)
- 7 Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA: *Scripps CO₂ Programm: CO₂ Concentration at Mauna Loa Observatory, Hawaii*. http://scrippsco2.ucsd.edu/data/in_situ_co2/monthly_mlo.csv , (Stand:15.11.2011 Review:12.12.2011, 17:42Uhr)
- 8 Hahne, E.: *Technische Thermodynamik*. 4.Auflage. Oldenbourg, vgl. S.29
- 9 Karl Mittermayr(M-TEC GmbH) an Jonas Wolf, AW: Anfrage bezüglich CO₂-Erdwärmesonde, 17.12.2011, liegt dem Verfasser vor.
- 10 Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Wärmeatlas*, 10.Auflage 2006: Stoffwerte von Kohlendioxid, Dbd 3
- 11 IBS – Ingenieurbüro für Haustechnik Schreiner, Rudolstadt, Thüringen: *Kriterien, Kennzahlen, Wirtschaftlichkeit und Hinweise zur Auswahl von Wärmepumpen*. http://energieberatung.ibs-hlk.de/planwp_kriter.htm (Stand:15.11.2011 Review: 03.01.2012)
- 12 Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: *Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt*. http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/vorschriften/energie_ee_richtlinie_15_03_2011.pdf (Stand:11.03.2011, Review: 03.01.2012, 17:03Uhr)
- 13 Fraunhofer ISE, Freiburg i. Breisgau: *Wärmepumpen Effizienz*, 27.05.2011, vgl. S.33 http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/download/wp_effizienz_endbericht_kurzfassung.pdf (Review:04.01.2012, 12:17Uhr)
- 14 CO₂-Erdsonde-Bensheim, Oliver Sturm: <http://www.co2-erdsonde-bensheim.de/> (Review:04.01.2012, 14:10Uhr)
- 15 Bundesamt für Umwelt: *Energiesparen bei der Warmwasserbereitung – Vereinbarkeit von Energieeinsparung und Hygieneanforderungen an Trinkwasser*, September 2011 http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/downloads/trinkwasser/warmwasserbereitung_energiesparen_stellungnahme_uba.pdf (Review: 05.01.2012, 15:43Uhr)
- 17 Erdwärme-Zeitung.de: *Wärmepumpen & Erdwärme in Zahlen*. <http://www.erdwaerme-zeitung.de/waermepumpen/waermepumpen-in-zahlen-12789456/index.php> (Stand:2011, Review:11.01.2012, 17:49)
- 18 Persönliche Auskunft: Herr Andreas Bangheri, Geschäftsführer Heliotherm GmbH