

Schlussbericht Februar 2004

Wärmepumpen-Anlage Chestonag Automation AG, Seengen (AG)

ausgearbeitet durch
Dr. Mark Eberhard
EBERHARD & Partner AG
Schachenallee 29, 5000 Aarau

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	2
SUMMARY	2
1. AUFTRAG	3
2. AUSGANGSLAGE / ZIEL	3
3. STANDORT / AUSLEGUNGSDATEN	4
4. ENERGIE	5
5. GEOLOGIE / HYDROGEOLOGIE	5
6. MESSKONZEPT / MESSINSTALLATION	6
7. MESSRESULTATE	6
7.1. Aussen- und Raumtemperaturverhältnisse	6
7.2. Temperaturverhältnisse unmittelbar vor Eintritt in die Wärmepumpe und im Wärmekreislauf	7
7.3. Temperaturverhältnisse in den Sonden in 15, 100 und 250 m Tiefe	8
7.4. Beeinflussung der Sonden untereinander	10
7.5. Stromverbrauch	10
7.6. Betriebsstunden	10
7.7. Durchfluss	10
8. EFFEKTIVER WÄRMEENTZUG, -RÜCKGABE AUS DEN BZW. IN DIE SONDEN	11
9. SAISONALE WÄRMESPEICHERUNG	12
9.1. Temperaturverhältnisse	12
9.2. Wärmespeicherung	12
10. ENERGIEBILANZ	13
11. JAHRESARBEITSSZAHL	13
12. SOLL- IST VERGLEICH	13
13. EFFIZIENZ / WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE	14
14. BETRIEBSERFAHRUNG	14
15. SCHLUSSFOLGERUNGEN	15
16. GRUNDLAGEN / LITERATUR	15
17. ANHANG	15
18. BEILAGEN	16

Zusammenfassung

Das mit 4 Sonden à 250 m ausgestattete Erdwärmesondenfeld der Firma Chestonag Automation AG in Seengen erweist sich im Vergleich mit einem konventionellen Erdwärmesondenfeld mit 10 Sonden à 100 m als effizienter und kostengünstiger. Ein geringerer Stromverbrauch bei der Wärmerückgewinnung steht dabei einem grösseren Stromverbrauch bei der Rückführung der Betriebsabwärme gegenüber. Hierbei kann auch erkannt werden, dass im Heizbetrieb der grösste Anteil der Wärme aus dem Bereich zwischen 250 und 100 m stammt und dass im Freecooling-Betrieb der grösste Anteil der Betriebsabwärme im oberen Bereich, d.h. zwischen 15 und 100 m, ans Erdreich zurückgegeben wird. Mit zunehmendem Durchfluss erhöht sich dabei erwartungsgemäss die Wärmerückgewinnung. Bei der Rückführung der Betriebsabwärme kann in der Sonde mit dem grössten Durchfluss jedoch das Gegenteil beobachtet werden.

Um die Einflussnahme der atmosphärischen Bedingungen der obersten Bodenbereiche sowohl beim Wärmeentzug als auch bei der Wärmerückgabe im Sommer auszuschliessen, wurden bei den Sonden die obersten 8 m und die Zuleitungen zum Haus isoliert.

Insgesamt kann mit dem realisierten System pro Jahr 6'788 kWh Strom eingespart werden. Durch diese erhöhte Effizienz können die Mehrkosten bei den Erstinvestitionen schon nach 2 Jahren vollständig amortisiert werden. Ab diesem Zeitpunkt können pro Jahr rund 789.00 Fr. an Stromkosten eingespart werden.

Mit dem gewählten Sondenabstand von durchschnittlich 10 bis 11 m konnte sowohl im Heiz- wie auch im Freecoolingbetrieb keine gegenseitige Beeinflussung der Sonden festgestellt werden.

Summary

The geothermal tube system of the company Chestonag AG in Seengen consisting of 4 tubes of 250 m each, proves to be more efficient and costs less than a conventional geothermal tube complex made of 10 tubes of 100 m each. There is lower electricity consumption during the heating period, where as the electricity consumption during the freecooling period is higher. During the heating period the main amount of the heat comes from the area between 250 and 100 m below the surface. In the freecooling period most of the waste heat of the rooms is returned to the ground in a depth of 15 to 100 m. As expected the bigger the waterflow, the bigger the heat production. At the same time, in the tube with the biggest heatflow the smallest amount of heat can be transported back to the ground.

The upper most 8 m of each geothermal tube (heat exchanger) as well as the horizontal conductor pipes at ground surface were completely insulated. This in order to reduce / eliminate climatic influences onto the system during heat extraction as well as heat restitution in summer months (i.e. "free cooling").

The total electricity saving in the unconventional system amounts to 6'788 kWh. With this efficiency, the higher investment costs of this system can be amortised in 2 years. From this moment on the annual cost saving is 789.00 Fr. per year.

With a distance of approximately 10 to 11 m between the tubes, no interaction between the tubes can be detected.

1. AUFTRAG

Aufgrund unseres Gesuches vom 7. Dezember 1999 und dessen Erweiterung vom 31. Mai 2000 wurde uns mit Verfügung vom 11. Januar 2000 respektive vom 28. Juni 2000 vom Bundesamt für Energie (BFE) der Auftrag zur Durchführung des vorgeschlagenen Messkonzeptes mit der dafür notwendigen zusätzlichen Anlageinstallation erteilt.

2. AUSGANGSLAGE / ZIEL

Anfangs 2000 wurden in Seengen auf dem Gelände der Firma Chestonag AG vier Erdwärmesondenbohrungen à 250 m abgeteuft (Beilage 1). Die Sonden wurden in ihrem obersten Bereich bis in eine Tiefe von 8 m isoliert, um eine Beeinflussung durch die Oberflächentemperatur so weit möglich auszuschliessen. Alle 4 Sonden wurden mit Temperaturfühlern in 15 m, 100 m und 250 m Tiefe sowie mit Wärmezählern ausgestattet (Beilagen 2-6). Die Anlage wird im Winter zur Beheizung des Gebäudes und im Sommer, unter Umgehung der Wärmepumpen, zu Kühlungs Zwecken (sog. Freecooling) verwendet (Beilage 5).

Ziele des Forschungsprojektes sind:

- Die Ermittlung der Temperaturverhältnisse bei unterschiedlichem Wärmeentzug in den vier Bohrungen
- Die Ermittlung der Speicherkapazitäten des Erdreiches (Freecooling) und dessen Langzeitverhalten
- Der Effizienzvergleich eines solchen Systems mit einem konventionellen Erdwärmesondenfeld
- Die Ermittlung der Beeinflussung der Sonden untereinander
- Neben den eigentlichen Zielen des Forschungsprojektes wurden mittels des Leistungsdiagramms der Wärmepumpen-Firma die Heizwärme und der Stromverbrauch der Verdichter ermittelt um so eine Wärmebilanz erstellen zu können.

Folgende Parameter wurden automatisch in regelmässigen Abständen erfasst:

- Aussentemperatur (in °C)
- Raumtemperatur (in °C)
- Erdwärmesonden (= Primärkreislauf) - Vorlauftemperatur (in °C)
- Erdwärmesonden - Rücklauftemperatur (in °C)
- Heizungs (= Sekundärkreislauf) - Vorlauftemperatur (in °C)
- Heizungs - Rücklauftemperatur (in °C)
- Sonden 1-4: Temperaturen in 15 m, 100 m und 250 m Tiefe (in °C)
- Sonden 1-4: Leistung (in kW)
- Betrieb Umwälzpumpe Heizung (in % bezüglich Dauerbetrieb)
- Betrieb Umwälzpumpe Sole (in % bezüglich Dauerbetrieb)
- Betrieb Wärmepumpen 1-5 (in % bezüglich Dauerbetrieb)

Datenerfassung und Verarbeitung

Nach Erstellen der ersten drei Sonden konnten Ende März 2000 bereits Daten erfasst werden. Am 18. April 2000 begann die periodische Datenerfassung (1 Messung/h). Die Messfrequenz wurde am 1. Mai 2000 auf 6 Messungen/h und am 11. Mai 2000 auf 12 Messungen pro Stunde erhöht, also alle 5 min eine Messung. Die vierte Sonde wurde aufgrund der späteren Realisierung erst Ende September 2000 zugeschaltet. Im Dezember 2001 wurde ein Zwischenbericht erstellt, in dem die Messdaten der Periode April 2000 – September 2001 ausgewertet wurden.

3. STANDORT / AUSLEGUNGSDATEN

Baujahr der Anlage:	1999
Beheizte Fläche:	1'600 m ²
Wärmeverteilung:	Deckenstrahlplatten (Beilage 3c)
Warmwasser:	kein
Wärmeleistungsbedarf Haus:	1600 m ² x 45 W/m ² = 72 kW
Max. Heizleistung WP (bei 0 °C/ 50 °C):	12.8 kW x 5 = 64 kW (Beilage 24)
Max. Heizleistung WP (bei 5 °C/ 50 °C):	15 kW x 5 = 75 kW (Beilage 24)
Länge der EWS (m):	4 x 250 m = 1000 m
Leistung EWS (Verdampfer):	4 x 14 kW = 56 kW
Leistung Kompressor:	5 x 4.7 kW = 23.5 kW
Leistung UP Sondenkreislauf (UP 1):	1.2 + 2.2 kW = 3.4 kW
Leistung UP von WP zu Speicher (UP 2):	5 x 65 W = 325 W
Leistung UP von Speicher zu Wärmeverteilung (UP 3):	610 W
Ventilation in der WP:	5 x 90 W = 450 W
Wärmepumpen Typ:	5 x WPWE 14 KW
Fabrikat:	Stiebel Eltron
Frostmittel im Sondenkreislauf:	kein
Kältemittel:	R290 (Propan)
Aussentemperaturfühler (Typ, Lage):	PT 100, Nordseite des Gebäudes
Innentemperaturfühler (Typ, Lage):	PT 100, an Betonsäule in der Raummitte auf 1.6 m Höhe
Planung/ Beratung/ Installation:	H. Iseli AG, Lenzburg, EBERHARD & Partner AG, Aarau

Im Zusammenhang mit dem Umbau des ehemaligen Fabrikgebäudes in Büroräumlichkeiten wurde im 1999 eine Erdwärmesonden-Wärmepumpen-Anlage mit integriertem Kühlsystem (Freecooling-System) eingerichtet (Beilagen 3 – 6). Hierzu wurden insgesamt 4 Bohrungen à 250 m Tiefe realisiert (Beilage 7). Die mit den Erdwärmesonden gekoppelten Wärmepumpen (5 Stück à 14 kW Nennleistung) entziehen im Winter dem Erdreich die benötigte Wärme. Im Sommer wird die Betriebsabwärme, unter Umgehung der Wärmepumpen, gleichmässig über die 4 Erdwärmesonden dem Erdreich zugeführt (Beilagen 5 und 6). Um die Einflussnahme der atmosphärischen Bedingungen der obersten Bodenbereiche sowohl beim Wärmeentzug (tiefe Bodentemperaturen) als auch bei der Wärmerückgabe im Sommer (hohe Boden

temperaturen) auszuschliessen, wurden bei den Sonden die obersten 8 m und die Zuleitungen zum Haus isoliert (Beilagen 3a und 4).

4. ENERGIE

In der ersten Periode (Sep 00 – Sep 01):	HP *	NP**	FC ***
• erbrachte Heizenergie (kWh/a):	154'808	0	0
• genutzte Erdwärme (kWh/a):	101'974	0	
bzw. rückgeführte Betriebswärme (kWh/a)		0	45'858
• Stromverbrauch (nur WP, kWh/a):	52'834	0	0
• Stromverbrauch (WP, UPs, kWh/a):	59'312	0	4'953
• Verlust Zusatzaggregate (kWh):	6'478	0	
• Betriebsstunden WP 1-5 (h):	12'555	0	0
JAZ (nur WP):	2.9		
JAZ (WP und UP):	2.6		
JAZ (FC):			9.3
Durchschnittliche Raumtemperatur (°C)	21.2	24.8	22.9

*HP = Heizperiode (23.9.00 - 13.5.01), ** NP = Neutrale Phase (13.5.01 – 14.5.01), *** FC = Freecooling (14.5.01 - 5.9.01), WP = Wärmepumpe, UPs = Umwälzpumpe Sole

In der zweiten Periode (Sep 01 – Sep 02):	HP *	NP**	FC ***
• erbrachte Heizenergie (kWh/a):	149'644	0	0
• genutzte Erdwärme (kWh/a):	103'751	0	
bzw. rückgeführte Betriebswärme (kWh/a)		0	43'004
• Stromverbrauch (nur WP, kWh/a):	45'893	0	0
• Stromverbrauch (WP, UPs, kWh/a):	61'928	0	9'405
• Verlust Zusatzaggregate (kWh):	16'035	0	
• Betriebsstunden WP 1-5 (h):	10'440	0	0
JAZ (nur WP):	3.3		
JAZ (WP und UP):	2.4		
JAZ (FC):			4.6
Durchschnittliche Raumtemperatur (°C)	21.2	24.3	23.1

*HP = Heizperiode (24.9.01 - 9.5.02), ** NP = Neutrale Phase (10.5.02 – 10.6.02), *** FC = Freecooling (11.6.02 - 17.9.02), WP = Wärmepumpe, UPs = Umwälzpumpe Sole

5. GEOLOGIE / HYDROGEOLOGIE

Die neu renovierten Büroräumlichkeiten mit den 4 Bohrungen befinden sich im südlichen Teil von Seengen (Beilage 1). Nach einem 6 m mächtigen Gehängelehm aus tonigem Silt folgen bis in eine Tiefe von 20 m Moränenablagerungen, welche sich aus einem tonigen Kies zusammensetzen. Anschliessend verbleiben die Bohrungen bis zur Endtiefe von 250 m im Fels der Oberen Meeresmolasse, der sich aus Sand- und Siltsteinen sowie Konglomeraten zusammensetzt (Beilage 7). In den Moränenablagerungen konnte ab ca. 8 m UKT ein Wassereintritt festgestellt werden. Hierbei handelt es sich um Hangwasser.

6. MESSKONZEPT / MESSINSTALLATION

In jedem der vier 250 m tiefen Erdwärmesondenbohrungen wurde mit dem Einbringen der PE-Rohre ein zusätzliches PE-Rohr für die Temperaturfühler bis zur Endtiefe der Bohrung versetzt (Beilage 3a). Nach Abschluss der Bohrungen und Versetzen der PE-Rohre wurden von uns je 3 Temperaturfühler auf 250 m, 100 m und 15 m versetzt. Im Vor- und Rücklauf des Kühlungskreislaufes wurde ebenfalls je ein Temperaturfühler eingesetzt (Beilage 5). Zusätzlich wurde je ein Wärmezähler am Ausgang jedes Erdwärmesondenkreislaufes vor den Wärmepumpen montiert. Um einen Vergleich der Boden- mit den Aussentemperaturen zu erhalten, wurde an der Nordfassade des Gebäudes ein Aussentemperaturfühler installiert. Im Heizkreislauf wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen und im Büroraum die Raumtemperatur gemessen. Zur Ermittlung der Anlageeffizienz wurden zusätzlich die Betriebsstunden der Wärmepumpen und der Umwälzpumpen erfasst. Ein Datenlogger, welcher allmonatlich vor Ort ausgelesen wurde, speicherte die Messdaten. Insgesamt konnten mit dieser Messinstallation die Ziele erreicht werden. Die von den Wärmepumpen erzeugte Wärme und der dafür aufgewendete Strom wurden mittels des Leistungsdiagramms der Wärmepumpe (Beilage 24) berechnet.

7. MESSRESULTATE

Bei den Messerhebungen werden die Perioden vom 23.9.00 bis 13.5.01 (Heizperiode) und vom 14.5.01 bis 5.9.01 (Freecooling-Betrieb) sowie vom 24.9.01 bis 9.5.02 (Heizperiode) und vom 11.6.02 bis 17.9.02 (Freecooling-Betrieb) betrachtet. Zwischen Heizperiode und Freecooling liegt die neutrale Phase, in der die Anlage weder zum Heizen noch zum Kühlen genutzt wurde (6.9.01 – 23.9.01 und 10.5.02 – 10.6.02). Da man gemäss Forschungsauftrag im Heizkreislauf keine Wärmezähler installierte, wurden die benötigten Werte unter Verwendung einer konstanten Vorlauftemperatur von 56°C (vor Ort Messung) im Heizkreislauf (von der Wärmepumpe zum Speicher) mit dem Leistungsdiagramm des Wärmepumpenlieferanten ermittelt (Beilage 24).

7.1. Aussen- und Raumtemperaturverhältnisse

Aussentemperaturen

Der Aussentemperaturfühler befindet sich an der Nordfassade des Fabrikgebäudes. Während der Heizperioden von Oktober bis Mai 2000/2001 und 2001/2002 lagen die Temperaturen (Tagesmittel) zwischen + 20°C und – 11°C, wobei die Wochen um den Jahreswechsel im 2001/2002 einen Tagesdurchschnitt von – 5°C aufwiesen. Während der Sommermonate lagen die gemessenen Temperaturen (Tagesmittel) zwischen 9 und 29°C, wobei der Sommer 2002 gesamtheitlich betrachtet etwas kühler ausfiel als jener im 2001 (Beilage 10).

Raumtemperaturen

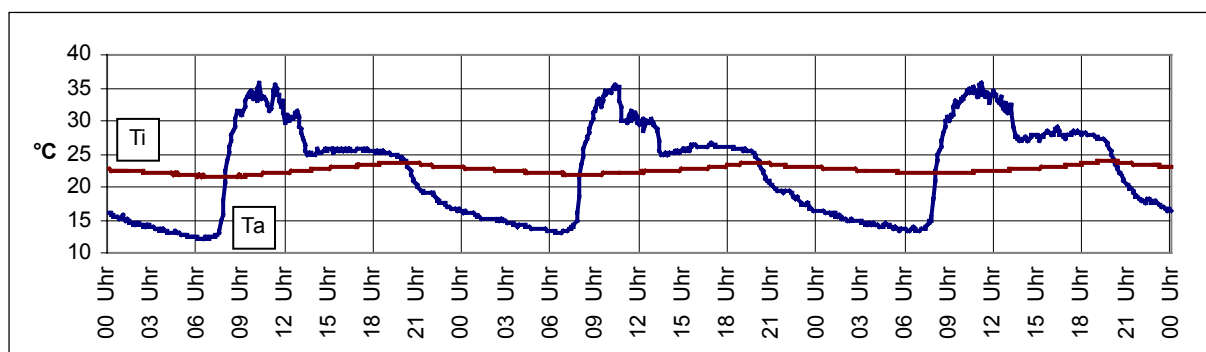
Der Raumtemperaturfühler befindet sich in der Raummitte auf einer Höhe von 1.6 m an einer Betonsäule. Die Raumtemperaturen lagen während der Heizperiode 2000/2001 im Bereich von 18 bis 24°C und während der Sommerperiode 2001 zwischen 20 und 26°C. Während der Heizperiode 2001/2002 lagen die Raumtemperaturen im Bereich von 18 – 23°C, während des restlichen Zeitraumes im Sommer 2002 zwischen 20 und 27°C (Beilage 10).

Kühlung

Im Freecooling-Betrieb 2001 lagen die Raumtemperaturen während des Tages gegenüber den Aussentemperaturen im Schnitt um 4.7 K tiefer, in Einzelfällen resultierte sogar eine Differenz von 16.2 K (Beilage 10, Graphik 1).

Im Freecooling-Betrieb 2002 lagen die Raumtemperaturen während des Tages gegenüber den Aussentemperaturen im Schnitt ebenfalls um 4.7 K tiefer, in Einzelfällen resultierte sogar eine Differenz von 15.6 K (Beilage 10, Graphik 1).

Nachts sanken die Aussentemperaturen unter das Niveau der Raumtemperaturen. Letztere wurden auch in der Nacht mit dem Freecooling System gekühlt (Graphik 1).



Graphik 1: Aussentemperatur (Ta) – Raumtemperatur (Ti) vom 16.-18. Aug. 2002

7.2. Temperaturverhältnisse unmittelbar vor Eintritt in die Wärmepumpe und im Wärmekreislauf

Primärkreislauf (Sonden)

Die Temperaturverhältnisse in den Sonden unmittelbar vor Eintritt respektive Austritt aus den Wärmepumpen ergeben folgendes Bild (Beilage 12):

Im Primärkreislauf lagen die Vorlauftemperaturen während des Heizbetriebs im Monatsmittel zwischen 6 – 17°C, jene im Rücklauf zwischen 4 – 16°C. Im Freecoolingbetrieb lagen sie im Vorlauf zwischen 16 – 20° und im Rücklauf zwischen 16 – 19°C.

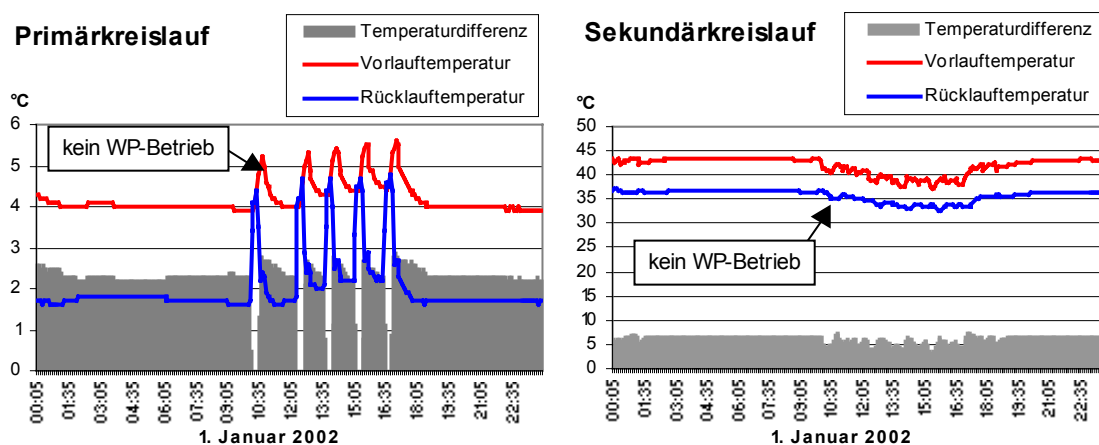
Die Differenzen der gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen (Einzelwerte) betrugen in den beiden Heizperioden durchschnittlich 2.2 – 2.7 K (Graphik 2). In der Freecoolingperiode 2001 betrug die durchschnittliche Temperaturdifferenz 0.7 K, jene im 2002 0.5 K.

Sekundärkreislauf (Wärmekreislauf)

Die Temperaturverhältnisse im Sekundärkreislauf (hier: Wärmekreislauf nach dem Speicher) ergeben folgendes Bild (Beilage 12):

Die Vorlauftemperaturen in den Heizperioden 2000/2001 lagen zwischen 21 – 36°C. Im Freecooling ergaben sich Temperaturen zwischen 17 und 22°C.

Die Differenzen der gemessenen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen (Einzelwerte) betrugen in beiden Heizperioden durchschnittlich 6.2 K (Graphik 2). In den entsprechenden Freecoolingperioden 2001 und 2002 betrug die durchschnittliche Temperaturdifferenz 1.3 K.



Graphik 2: Links: Temperaturen im Primärkreislauf während des Heizbetriebs, rechts: Temperaturen im Sekundärkreislauf während des Heizbetriebs

7.3. Temperaturverhältnisse in den Sonden in 15, 100 und 250 m Tiefe

Heizperiode

Die Temperaturverhältnisse in den Sonden lassen erkennen, dass in den Heizperioden 2000/2001 und 2001/2002 die tiefsten Temperaturen am tiefsten Punkt also in 250 m und die höchsten Temperaturen in 15 m Tiefe vorliegen (Beilagen 13 – 16, 19a und 19b, Tab. 5). Der Temperaturanstieg von 100 m auf 15 m ist jedoch mit 0.1 K nur noch sehr gering. Der grösste Wärmezufluss erfolgt somit in 250 bis 100 m Tiefe. Die Tatsache, dass die Temperaturen auf 250 m am tiefsten sind, ist darauf zurückzuführen, dass sich das Wasser des Rücklaufes auf dem Weg in die Tiefe zuerst aufwärmen muss. Das Wasser in 250 m Tiefe hat sich somit noch nicht so stark aufgewärmt wie 150 m weiter oben in 100 m Tiefe (Beilagen 13, 19a und 19b).

Freecooling

Im Freecooling-Betrieb (Juni bis August 2001 und Juni bis September 2002) liegen die Temperaturen der Sonden in 250 m Tiefe um rund 18°C, jene auf 100 m um 17°C und auf 15 m um rund 17°C (Beilage 13-16, 19a und 19b, Tab. 5). Es zeigt sich somit, dass im Freecooling-Betrieb die höchsten Temperaturen in 250 m vorliegen. In der Tiefe von 15 bis 100 m werden 1 bis 2 K niedrigere Temperaturen registriert.

Während in den oberen Bereichen der Sonde die Erhöhung der Temperaturen grösstenteils durch den Zufluss von Betriebsabwärme erfolgt, wird in 250 m Tiefe ein Grossteil des Wärmezufusses durch die natürliche Umgebungswärme in diesen Tiefen geliefert (Erhöhung der Temperaturen mit Tiefenzunahme / Geothermischer Tiefengradient 1°C pro 33 m Tiefenzunahme, Beilagen 19a und 19b).

Die Temperaturen in den einzelnen Tiefen und Freecooling-Perioden liegen somit sehr nahe beieinander (Beilage 13, 23). Durch die unterschiedlichen Aussentemperaturen der beiden Jahre gibt es natürlicherweise zeitliche Verschiebungen bei den Maxima und Minima. Wie

schon in den Heizperioden, differieren die Werte der einzelnen Sonden nur leicht untereinander (Beilagen 14 - 16).

Vergleich der Temperaturen unmittelbar vor Eintritt in die Wärmepumpe mit jenen in 15 m Tiefe

Ein Vergleich der Temperaturen unmittelbar vor Eintritt in die Wärmepumpe mit jenen in 15 m Tiefe zeigt, dass in diesem letzten Abschnitt der Sonde und in der Zuleitung zum Haus in der Heizperiode 2000/2001 durchschnittlich 1.3 K und in jener von 2001/2002 durchschnittlich 1.6 K verloren gehen. Dies trotz Isolationen der Zuleitungen zum Haus und der Sonde bis in eine Tiefe von 8 m (Beilage 11).

Aus diesen Daten wird ersichtlich, dass die Sonden bis in eine noch grössere Tiefe als 8 m, also beispielsweise bis in 15 m, zu isolieren sind. Inwieweit hier jedoch auch das ab 8 m Tiefe festgestellte Hangwasser oder / und eine ungenügende Isolation bis zum Haus Einfluss hat, ist im Moment nur zu vermuten. Ein Kaltwassereinfluss dürfte hierbei jedoch eine wesentliche Rolle spielen.

Vergleich der einzelnen Erdwärmesonden untereinander

Ein Temperaturvergleich der einzelnen Erdwärmesonden untereinander lässt erkennen, dass die Temperaturen in den entsprechenden Tiefen sowohl in der Heizperiode wie auch im Freecooling-Betrieb recht nahe beieinander liegen (Beilage 14 - 16). Die Temperaturunterschiede liegen generell bei 0.5 bis 1.4 K.

Tab. 1 zeigt, in welcher Sonde die niedrigsten bzw. höchsten Temperaturen gemessen wurden:

	Heizperiode 2000/2001		Freecooling 2001		Heizperiode 2001/2002		Freecooling 2002	
	Temp.min.*	Temp.max.**	Temp.-min.	Temp.-max.	Temp.-min.	Temp.-max.	Temp.-min.	Temp.-max.
15 m	S 2	S 4	S 2	S 3	S 1	S 2	S 4	S 1
100 m	S 4	S 1	S 1	S 2	S 2	S 4	S 1	S 3
250 m	S 3	S 2	S 3	S 2	S 3	S 2	S 3	S 2

Tab. 1: Temperaturverteilung in den Sonden (Beilagen 14 – 16). S = Sonde, *Temperaturminimum und **Temperaturmaximum der entsprechenden Periode

Beim Studium von Tab. 1 lässt sich Folgendes erkennen:

- 1.) In 250 m Tiefe liegen die tiefsten Temperaturen sowohl im Heiz- wie Freecoolingbetrieb immer in Sonde 3. Ein Blick auf den Wärmeentzug (Kapitel 8) zeigt, dass die Sonde 3 auch am wenigsten Wärme aus dem Untergrund förderte, aber dafür am meisten Betriebsabwärme ins Erdreich zurückführte.
- 2.) In 15 m Tiefe liegen die höchsten Temperaturen während der Heizperioden immer in Sonde 4. Verglichen mit dem Wärmeentzug (Kapitel 8) förderte die Sonde 4 während der Heizperioden auch am meisten Wärme aus den Erdreich, führte jedoch ebenso am wenigsten Betriebsabwärme zurück ins Erdreich.
- 3.) In 250 m Tiefe liegen die höchsten Temperaturen sowohl im Heiz- wie auch im Freecoolingbetrieb immer in Sonde 2. In 15 m Tiefe liegen die tiefsten Temperaturen ebenfalls immer in Sonde 2. Die hohen Temperaturen aus 250 m Tiefe werden somit in Sonde 2 im Vergleich mit den anderen Sonden wieder vernichtet. Da dies sowohl im Heiz- wie auch im Freecoolingbetrieb der Fall ist, könnte dies auf unterirdische Wasserströme (kaltes Hangwasser) zurückzuführen sein.

7.4. Beeinflussung der Sonden untereinander

Wie schon im Kapitel 7.3 dargelegt, konnten während des Heiz- bzw. Freecoolingbetriebes die Temperaturverhältnisse in den einzelnen Erdwärmesonden genauer erfasst werden (Beilagen 14-16, 23). Ein Vergleich der 0-Messungen in den einzelnen Sonden (Sonde 1 bis 3) mit den Temperaturen im Heizbetrieb (Januar 02) zeigt trotz des unterschiedlichen Wärmeentzugs, keine Beeinflussung der Sonden untereinander auf, da sich der ursprüngliche Temperaturverlauf (0-Messung) auch auf einem tieferen Niveau im Heizbetrieb widerspiegelt (Beilage 23).

7.5. Stromverbrauch

Der gesamte Stromverbrauch setzt sich in der Heizperiode und Freecoolingperiode wie folgt zusammen:

Nennleistungen	Heizperioden	Freecooling	Betriebszeit
Umwälzpumpe der Sole	3.4 kW*		Bei WP-Betrieb
Umwälzpumpe der Sole		3.4 kW*	Dauerbetrieb**
Verdichter der WP	5 x 4.7 kW		Bei WP-Betrieb
Umwälzpumpen zwischen WP und Speicher	5 x 65 W		Bei WP-Betrieb
Ventilation der WP***	5 x 90 W		Dauerbetrieb bei WP-Betrieb (Intervallschaltung)
Umwälzpumpe im Heizkreislauf	610 W	610 W	Dauerbetrieb

Tab. 2: WP = Wärmepumpe, *bis November 01 nur eine Pumpe à 1.2 kW, danach eine zusätzliche Pumpe à 2.2 kW, **Schlecht eingestellte Steuerung, ***Die Wärmepumpe wird mit dem Kältemittel R 290 (Propan) betrieben. Die Vorschriften der Betriebssicherheit verlangen aufgrund der Explosionsgefährlichkeit von Propan ein in die Wärmepumpe integriertes Entlüftungssystem (Beilage 3c)

Die monatlichen Stromverbräuche wurden mittels der hier aufgeführten Leistungen und den Betriebsstunden ermittelt und in der Beilage 8 zusammengestellt.

7.6. Betriebsstunden

Die Betriebsstunden der 5 Wärmepumpen wurden einzeln registriert. Beim Studium der Messdaten fällt das unregelmässige Ein- und Ausschalten der 5 Wärmepumpen in der ersten Heizperiode auf (Beilage 18). Im Gegensatz dazu wurden in der zweiten Heizperiode alle 5 Wärmepumpen nacheinander eingeschaltet und nach Lieferung der benötigten Heizenergie der Reihe nach wieder abgeschaltet (Beilage 18).

7.7. Durchfluss

Die Sole (Wasser) der 4 Erdwärmesonden wird mittels zwei Umwälzpumpen im Heizraum umgewälzt (Beilage 3b). Bis im November 2001 war jedoch nur eine Umwälzpumpe mit einer Leistung von 1.2 kW montiert.

Diese Pumpe wälzte total 173.5 l/min Wasser um. Für die einzelnen Sonden ergeben sich somit folgende Durchflusswerte (vgl. untenstehende Tab. 3). Anfangs November 2001 wurde eine zusätzliche Umwälzpumpe mit einer Leistung von 2.2 kW installiert. Mit dieser zusätzlichen Pumpe resultiert somit eine Leistung von 3.4 kW und ein Wasserumsatz von 301 l/min. Die zusätzliche Pumpe wurde notwendig, da die anfängliche Wasserförderung den Anforderungen der Wärmepumpen nicht genügte und es dadurch zu Betriebsunterbrüchen (Störungen) kam. Aufgeteilt auf die 4 Sonden ergeben sich unten stehende Wasserumsätze.

Durchfluss* l/min	Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3	Sonde 4	Total
Periode bis Nov. 01	41.5	43.3	43.6	45.1	173.5
Periode ab Nov. 01	74.0	74.2	74.7	78.2	301.1

Tab. 3: *Durchfluss $V = P / (pc\Delta T)$, P = Wärmeleistung, $pc = 4190 \text{ kJ/m}^3\text{K}$, ΔT = Temp. Vorlauf – Temp. Rücklauf.
rot: grösster, gelb: zweitgrösster, grün: zweitkleinster, blau: kleinster Durchfluss

Der variierende Durchfluss in den einzelnen Sonden kann durch die unterschiedlichen Distanzen der Sonden zum Verteiler und dadurch resultierender unterschiedlicher Druckverluste erklärt werden. Die Sonde mit dem grössten Durchfluss (Sonde 4) liegt dabei am nächsten zum Verteiler.

8. EFFEKTIVER WÄRMEENTZUG, -RÜCKGABE AUS DEN BZW. IN DIE SONDEN

Der gesamte Wärmeentzug bzw. Wärmerückgabe ins Erdreich in den Jahren 2000 – 2002 wurde mit Wärmezählern ermittelt. Die Sonden der Anlage förderten während der Heizperiode 2000/2001 101'974 kWh (S1 25'102, S2 24'823, S3 22'663, S4 29'386 kWh) und während der Heizperiode 2001/2002 103'751 kWh (S1 25'526, S2 25'676, S3 23'958, S4 28'591 kWh) Wärme. Im Sommer 2001 (Freecooling) wurden 45'858 kWh (S1 11'660, S2 11'992, S3 13'449, S4 8'757 kWh) und im Sommer 2002 43'004 kWh (S1 11'195, S2 11'079, S3 12'750, S4 7'980 kWh) ans Erdreich zurückgegeben (Beilagen 9a, 9b). Die durchschnittliche Wärmeentzugsleistung der einzelnen Sonden ist in der untenstehenden Tab. 4 ersichtlich (Beilagen 9a, 9b, 22):

Wärmeentzugsleistung in W/m *	Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3	Sonde 4	Total
Heizbetrieb (Sep. 00 – Mai 01)	40.0	39.5	36.1	46.8	40.6
Sommerbetrieb** (Jun. 01 – Sep. 01)	17.0	17.6	19.7	12.9	16.8
Heizbetrieb (Sep. 01 – Mai 02)	48.9	49.2	45.9	54.8	49.7
Sommerbetrieb** (Jun. 02 – Sep. 02)	19.1	18.9	21.7	13.6	18.3

Tab. 4: *Entzugsleistung pro m Sondenlänge = Wärmeentzug / (Betriebsstunden x Sondenlänge), Sondenlänge 250 m, **Wärmerückgabe ans Erdreich. rot: grösster, gelb: zweitgrösster, grün: zweitkleinster, blau: kleinster Wärmebezug bzw. Wärmerückgabe

Aus Tab. 4 wird ersichtlich, dass in der ersten Heizperiode (Sep. 00 – Mai 01) die Wärmeentzugsleistung und Wärmerückgabeleistung niedriger ausfiel als in der zweiten Heizperiode (Sep. 01 – Mai 02). Dies ist auf die im ersten Jahr zu klein dimensionierte Förderpumpe zurückzuführen. Aus Tab. 4 wird ebenso ersichtlich, dass aus Sonde 3 am wenigsten Wärme gefördert, dafür am meisten Betriebsabwärme ins Erdreich zurückgeführt wurde. In Sonde 4 hingegen wurde am meisten Wärme gefördert, dafür am wenigsten Betriebsabwärme zurückgeführt (Beilagen 9a, 9b, 17).

Betrachtet man die Temperaturverhältnisse, Durchflüsse, Wärmeentzüge und -rückgaben der einzelnen Sonden gesamtheitlich so lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen:

Wie erwartet erhöhen sich mit der Steigerung des Wasserumsatzes die Wärmeentzugsleistungen. So lässt sich erkennen, dass in der ersten Heizperiode, als der Wasserumsatz in den Sonden infolge nur einer Solepumpe gering war, auch die entsprechenden Wärmeentzugsleistungen niedrig ausfielen (Tab. 3, 4). In der 2. Heizperiode erhöhten sich die Entzugsleistungen durch die Montage einer zweiten Solepumpe und demzufolge erhöhter Wasserumsätze. Da in den einzelnen Sonden die Fliessgeschwindigkeiten unterschiedlich ausfielen, variierten auch deren Entzugsleistungen entsprechend stark (Tab.

3 und 4). Anders verhielt es sich bei der Rückspeisung der Betriebsabwärme ans Erdreich. Bei der Sonde mit dem grössten Wasserumsatz wurde am wenigsten Betriebsabwärme ans Erdreich zurückgeführt (Beilage 9a, 9b, Tab. 3 und 4). Dies deutet darauf hin, dass bei grösserem Durchfluss auf der einen Seite die Wärmeentzugsleistung erhöht und auf der anderen Seite bei stark erhöhtem Durchfluss die Wärmerückgabeleistung verringert wird.

Empfehlung

Mit den hier ermittelten Daten wird ersichtlich, dass mit der Montage der 2. Umwälzpumpe im Solekreislauf der Durchfluss wohl wesentlich erhöht wurde. Im Vergleich mit den dadurch verbundenen Entzugs- und vor allem Rückgabeleistungen ist diese zusätzliche Förderpumpe überdimensioniert. Zur Effizienzsteigerung des Systems würden wir vorschlagen, dass zumindest die schwächere Pumpe mit einer Förderleistung von 1.2 kW stillgelegt wird.

9. SAISONALE WÄRMESPEICHERUNG

Da im Boden keine Wärmezähler installiert sind, werden die Verhältnisse der Wärmekapazitäten bzw. -speicherung im Untergrund über die ermittelten Temperaturverhältnisse besprochen.

9.1. Temperaturverhältnisse

Ein Vergleich der 0-Messung mit den Temperaturen unmittelbar nach der ersten Heizperiode 2000/2001 (Neutrale Phase = NP) ergibt, dass sich vor allem die Temperaturen in 250 m Tiefe noch nicht erholt haben (Tab. 5). Unmittelbar nach den Freecooling-Einsätzen im September beider Jahre zeigt sich jedoch, dass sich die Temperaturverhältnisse vollumfänglich regeneriert haben. In 15 und 100 m Tiefe liegen die Temperaturen sogar deutlich über jenen der Nullmessung, während sie auf 250 m Tiefe den Temperaturen des geothermischen Tiefengradienten entsprechen. Mit diesen Werten lässt sich somit erkennen, dass die saisonale Wärmespeicherung sowohl in den oberen Bereichen (15 - 100 m) wie auch in den tieferen Bereichen eine Erhöhung der Temperaturen verursacht. Am tiefsten Punkt der Sonden auf 250 m lässt sich zudem erkennen, dass durch die Wärmerückspeisung nach der zweiten Heizperiode höhere Temperaturen als noch nach der ersten Heizperiode vorliegen. Es ist anzunehmen, dass mit dieser Wärmerückspeisung auch in 250 m Tiefe schlussendlich (in ein bis 2 Jahren) wieder die Temperaturwerte der 0-Messung erreicht werden.

°C	TG	0-M	Beginn FC			Ende FC			Beginn FC			Ende FC		
			HP 00/01	NP 5.01	FC 2001	NP 9.01	HP 01/02	NP 5.02	FC 2002	NP 9.02	HP* 2002			
15 m	10.5	12.3	11.3	12.9	16.9	14.7	11.4	12.6	17.2	14.8	14.1			
150 m	14.5	13.8	11.4	13.3	17.1	14.9	11.3	13.0	16.9	14.5	13.8			
250 m	17.5	18.2	10.9	15.9	18.5	17.4	10.9	16.9	18.4	17.6	15.4			

Tab. 5: Vergleich der Temperaturen (Monatsmittel) mit dem Tiefengradient. TG = Tiefengradient, 0-M = Null-Messung = Messung vor Inbetriebnahme, HP = Heizperiode, NP = Neutrale Phase, FC = Freecooling, HP* 2002 = Heizperiode, nur September 2002

9.2. Wärmespeicherung

Bei konstanten Durchflüssen in den Sonden lassen sich die saisonalen Wärmerückgaben den Temperaturdifferenzen zwischen den Temperaturen des Wärmegradienten (0-Messung) und den effektiv gemessenen Temperaturen gleichsetzen (Beilagen 20a und 20b). Aufgeteilt

auf die 3 Messtiefen lässt sich erkennen, dass die grössten Wärmerückgaben in 15 m und die kleinsten in 250 m erfolgen.

10. ENERGIEBILANZ

In der Heizperiode 2000/2001 stehen 101'974 kWh Wärmeentzug, 59'312 kWh dafür aufgewendeter Strom auf der Primärseite 154'808 kWh Nutzwärme und einem Verlust von 6'478 kWh auf der Sekundärseite gegenüber (Beilagen 8 und 9a).

In der Heizperiode 2001/2002 stehen 103'751 kWh Wärmeentzug und 61'928 kWh dafür aufgewendeter Strom auf der Primärseite 149'644 kWh Nutzwärme und einem Verlust von 16'035 kWh auf der Sekundärseite gegenüber (Beilagen 8 und 9b).

Im Freecooling-Betrieb 2001 stehen 45'858 kWh Wärmeeintrag ins Erdreich einem Stromverbrauch für die Umwälzpumpen von 4'953 kWh gegenüber (Beilagen 8 und 9a).

Im Freecooling-Betrieb 2002 stehen 43'004 kWh Wärmeeintrag ins Erdreich einem Stromverbrauch für die Umwälzpumpen von 9'405 kWh gegenüber (Beilagen 8 und 9b).

Der Stromverbrauch für die Umwälzpumpen ist in der ersten Freecoolingperiode (2001) wesentlich kleiner als in der zweiten (2002). Dies ist auf den Betrieb einer zusätzlichen Soleumwälzpumpe in der zweiten Periode (ab November 2001) zurückzuführen (Beilage 8).

11. JAHRESARBEITSSZAHL

Heizperiode (23.9.00 – 15.5.01): Die Berechnungen der ersten Heizperiode ergeben eine JAZ (WP) – JAZ nur mit Stromverbrauch der Wärmepumpe – von 2.9 und eine JAZ mit allen Stromverbräuchen von 2.6 (Beilagen 8 und 9a).

Heizperiode (24.9.01 – 9.5.02): Die Berechnungen der zweiten Heizperiode ergeben eine JAZ (WP) – JAZ nur mit Stromverbrauch der Wärmepumpe – von 3.3 und eine JAZ mit allen Stromverbräuchen von 2.4 (Beilagen 8 und 9b).

Die gesamte JAZ ist in der zweiten Heizperiode (2001/2002) etwas tiefer als in der ersten Heizperiode (2000/2001). Dies ist durch den zusätzlichen Stromaufwand, welche die zweite Soleumwälzpumpe verursacht zu erklären.

12. SOLL- IST VERGLEICH

Der bei der Planung der Anlage berechnete benötigte Wärmeentzug aus den Sonden beträgt 101'376 kWh/a. Der dafür aufzuwendende Stromverbrauch 52'224 kWh/a. Nach unseren Messungen (zweites Jahr) förderten die Sonden 103'751 kWh/a. Der entsprechende Stromverbrauch betrug 61'928 kWh/a. Die Anlage entspricht somit den gestellten Anforderungen.

24.9.01 – 9.5.02	Sollwert		Istwert (1 Jahr)		Istwert (2. Jahr)	
Wärmeentzug	66.0 %	101'376 kWh/a	64.4 %	101'974 kWh/a	62.6 %	103'751 kWh/a
Stromverbrauch	34.0 %	52'224 kWh/a	35.6 %	59'312 kWh/a	37.4 %	61'958 kWh/a
JAZ (WP)		3.7*		2.9**		3.3**

Tab. 6: Vergleich der Soll- und Istwerte. *Leistungsdiagramm WPWE 14 KW (S7/W50), **ca. (S8/W56)

13. EFFIZIENZ / WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE

Ein Vergleich der vier 250 m tiefen Erdwärmesonden (realisiertes System) mit einem konventionellen, 10 Bohrungen à 100 m Tiefe umfassenden Erdwärmesondenfeld, ergibt Folgendes (siehe auch Beilage 25):

Effizienz

Wärmeentzug

Zur Förderung des benötigten durchschnittlichen jährlichen Wärmebedarfs von 150'000 kWh resultiert im Idealfall bei der realisierten Anlage ein Stromverbrauch von 51'268 kWh und beim konventionellen System ein solcher von 58'906 kWh. Die ausgewiesene Differenz resultiert aus den durch tiefere Temperaturen im Untergrund verursachten längeren Betriebszeiten und aus dem durch Glykolumsatz (Frostmittel) verursachten grösseren Druckverlust im konventionellen System.

Freecooling

Unter der Voraussetzung identischer Wärmerückgabe ans Erdreich ergibt sich beim realisierten System ein Stromverbrauch von 4'253 kWh. Beim konventionellen System reduziert sich der Stromverbrauch infolge der höheren potentiellen Wärmerückgabe ans Erdreich auf 3'403 kWh, da diese Rückgabe periodisch und nicht permanent erfolgt.

Über das Jahr gesehen stehen somit 55'521 kWh des realisierten Systems 62'309 kWh des konventionellen Systems gegenüber. Das realisierte System mit $\frac{2}{3}$ Wärme- und $\frac{1}{3}$ Kälteleistung ist somit effizienter.

Wirtschaftlichkeit

Vergleicht man die Investitionskosten des realisierten mit dem konventionellen System, so ist das realisierte System 1'555.-- Fr. teurer. Hierbei ist zu beachten, dass beim realisierten System auch die Kosten für die zusätzliche Isolation (inkl. Anpassungen des Bohrdurchmessers) bis auf 8 m Tiefe eingerechnet wurden. Auf der Betriebskostenseite sind die Ausgaben für das konventionelle System aufgrund der erhöhten Druckverluste durch das Glykol pro Jahr um 789.-- Fr. höher. Die realisierte Anlage ist somit schon nach knapp 2 Jahren amortisiert.

14. BETRIEBSERFAHRUNG

Die im Herbst 2000 in Betrieb genommene Wärmepumpenanlage des Bürogebäudes der Chestonag Automation AG in Seengen lief in der ersten Heizperiode mit einer für das System unterdimensionierten Förderpumpe im Primärkreislauf. Im zweiten Jahr wurde eine zweite Förderpumpe installiert und in der Folge verlief der Betrieb störungsfrei. Wie die Auswertung der Daten gezeigt hat ist das Fördersystem jetzt überdimensioniert. Zudem laufen diese Förderpumpen ständig, so dass ein viel zu hoher Stromverbrauch resultiert. Durch Optimierungen der Primärumwälzpumpen (abschalten der kleineren Pumpe, Laufenlassen der Pumpen nur bei Bedarf) könnte eine deutliche Effizienzsteigerung der Anlage erfolgen. Mittels des Freecoolingbetriebes können in den Sommermonaten die Betriebsräume auf angenehme Temperaturen hinuntergekühlt werden.

15. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die in diesem Forschungsprojekt ermittelten Daten lassen Folgendes erkennen:

- 1.) Eine gegenseitige Beeinflussung der Sonden ist sowohl im Heiz- wie auch im Freecooling-Betrieb nicht zu erkennen.
- 2.) Mit zunehmendem Durchfluss in den Sonden erhöht sich erwartungsgemäss die Wärmeentzugsleistung. Bei der Wärmerückgabe kann jedoch in der Sonde mit dem grössten Wasserdurchfluss ein Gegenteiliges Verhalten festgestellt werden indem bei stark erhöhtem Durchfluss die Wärmerückgabeleistung verringert wird.
- 3.) Im Freecooling-Betrieb erfolgen die grössten Wärmerückgaben in 15 bis 100 m Tiefe, wohingegen von 100 bis 250 m die Wärmerückgabe von der immer kleiner werdenden Differenz zwischen Umgebungs- und Sondentemperatur stark beeinflusst wird.
- 4.) Ein Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen dem hier realisierten Sondenfeld à 4 x 250 m und einem konventionellen Erdwärmesondenfeld à 10 x 100 m zeigt auf, dass ersteres Sondenfeld gesamtheitlich effizienter arbeitet ($\frac{2}{3}$ Wärme- und $\frac{1}{3}$ Kälteleistung) und nach einer Amortisationszeit von knapp 2 Jahren auch wesentlich wirtschaftlicher ist.

16. GRUNDLAGEN / LITERATUR

- ▶ Gesuche an das BFE „WP-Anlage Chestonag Automation AG, Seengen (AG)“ und „Erweiterung des Projektes zu einem eigentlichen Tiefen-Erdwärmesondenfeld“ mit Verfügung des BFE vom 11. Januar 2000 respektive vom 28. Juni 2000.
- ▶ EBERHARD & Partner AG, „Wärmepumpen-Anlage Chestonag Automation AG“, Seengen AG, Zwischenbericht, Dezember 2001
- ▶ EBERHARD & Partner AG, „Wärmepumpen-Anlage Chestonag Automation AG“, Seengen AG, Dezember 2002
- ▶ David R. Linde, „Handbook of Chemistry and Physics“, 75th Edition 1994
- ▶ STIEBEL ELTRON, „Wärmepumpen-Systeme, Planung und Installation“, 2003

17. ANHANG

Beilagen

Projektleitung: Dr. M. Eberhard

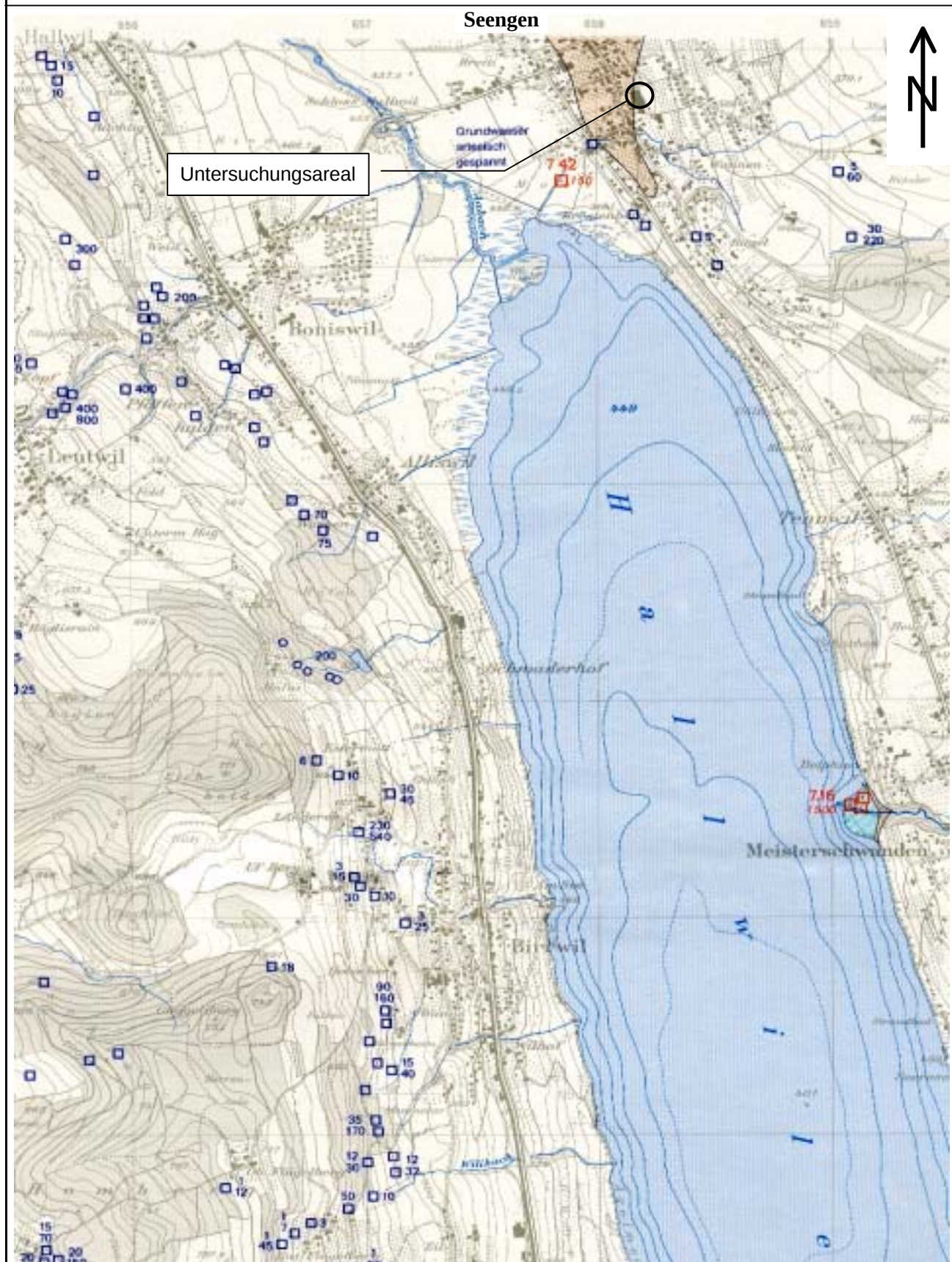
Aarau, 27. Februar 2004

EBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt

18. BEILAGEN

- 1 Ausschnitt aus der Grundwasserkarte des Kantons Aargau, Blatt Muri, Stand 1997, mit eingezeichnetem Standort der Anlage
- 2 Lageplan der vier Erdwärmesonden der Chestonag Automation AG in Seengen
- 3 Photodokumentation der Überbauung, des Bohrvorganges der Einbringung von PE-Rohren mit Isolation des Heizraums und der Deckenstrahlplatten
- 4 Schematische Übersicht, Schnitt und Grundriss der Anlage
- 5 Übersicht über das Messkonzept und Messkonzept / Anlageschema
- 6 Prinzipschema Heizung - Kühlung
- 7 Geologisches Profil mit Verrohrungsschema
- 8 Zusammengefasste Energie- und Leistungsdaten
- 9 Energiebilanz 1. Jahr
- 9b Energiebilanz 2. Jahr
- 10 Aussen- und Raumtemperatur (Monats- und Tagesmittel)
- 11 Vorlauftemperatur im Primärkreislauf in 15 m Tiefe und vor der Wärmepumpe sowie die Temperaturdifferenz
- 12 Temperaturen primär Vor- und Rücklauf, sekundär Vor- und Rücklauf, Aussen- und Raumtemperatur (Monatsmittel)
- 13 Sondentemperaturen auf 15 m, 100 m und 250 m (Ø der 4 Sonden)
- 14 Temperaturverhältnisse in den Sonden 1 – 4 auf 15 m
- 15 Temperaturverhältnisse in den Sonden 1 – 4 auf 100 m
- 16 Temperaturverhältnisse in den Sonden 1 – 4 auf 250 m
- 17 Wärmeentzug und -rückgabe der 4 Sonden
- 18 Wärmeerzeugung der Wärmepumpen im Heizbetrieb (berechnet)
- 19a Temperaturverläufe in den Erdwärmesonden während September 2000 bis September 2001
- 19b Temperaturverläufe in den Erdwärmesonden während September 2001 bis September 2002
- 20a Wärmeentnahme und -rückgabe der Erdwärmesonden in der Periode September 2000 bis September 2001
- 20b Wärmeentnahme und -rückgabe der Erdwärmesonden in der Periode September 2001 bis September 2002
- 21 Gegenüberstellung Wärmeentzug und Wärmerückgabe im Vergleich mit den Sondentemperaturen
- 22 Effektiver Wärmeentzug aus dem Erdreich (Monatsmittel), Aussen- und Raumtemperatur (Monatsmittel)
- 23 Temperaturgradienten: Null-Messung und Sondentemperaturen
- 24 Leistungsdiagramm der WP zur Berechnung der Leistungsaufnahme und –Abgabe
- 25 Effizienz / Wirtschaftlichkeitsermittlung

Ausschnitt aus der Grundwasserkarte des Kantons Aargau, Blatt Muri



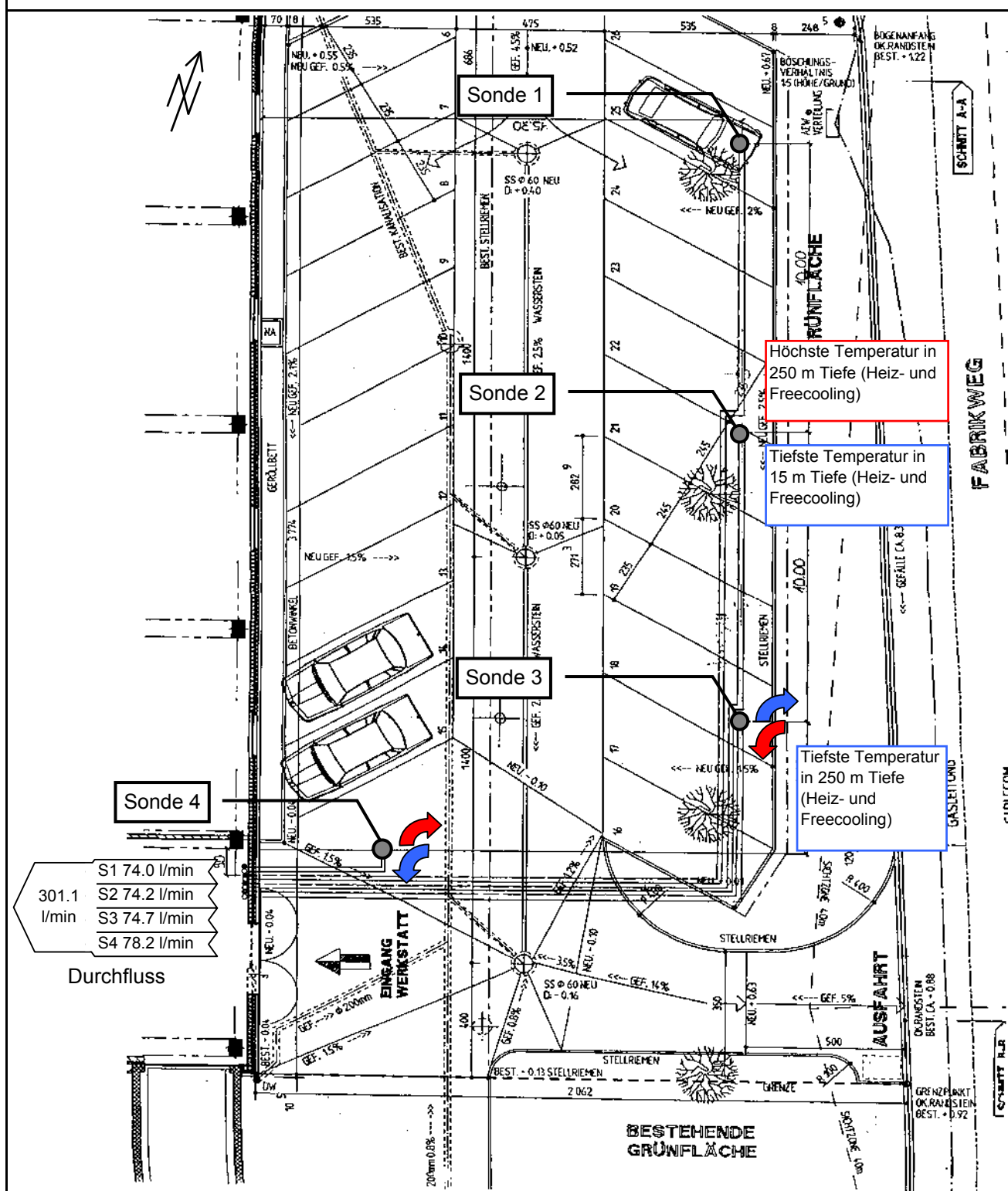
A269

13.02.2004

Forschungsprojekt Wärme-
pumpen Chestonag AG

1:25'000

EBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt



 grösste  Wärmeentnahme
 kleinste  Wärmerückgabe

Photodokumentation



Abb. 1: Ansicht des Gebäudes der Chestonag Automation AG

Zusätzliches PE-Rohr zur
Überwachung der
Temperaturen in 15, 100
und 250 m Tiefe



Abb. 2: Bohrarbeiten

Abb.3: Bohrung mit Erdwärmesonden und Isolation
(Tubolit, 2 mm Wandstärke)

Photodokumentation

Temperaturfühler
Vorlauf Primärkreislauf

Temperaturfühler
Rücklauf Primärkreislauf

Die Temperaturfühler
des Sekundärkreislaufs
liegen unterhalb der
Raumdecke (Vorlauf und
Rücklauf)

Umschaltventil:
Heiz-
Kühlbetrieb



Abb.4: Vor - und
Rücklauf sowie die
Kreiselpumpen des
Primärkreislaufs

Kreiselpumpe 1.2 kW

Kreiselpumpe 2.2 kW

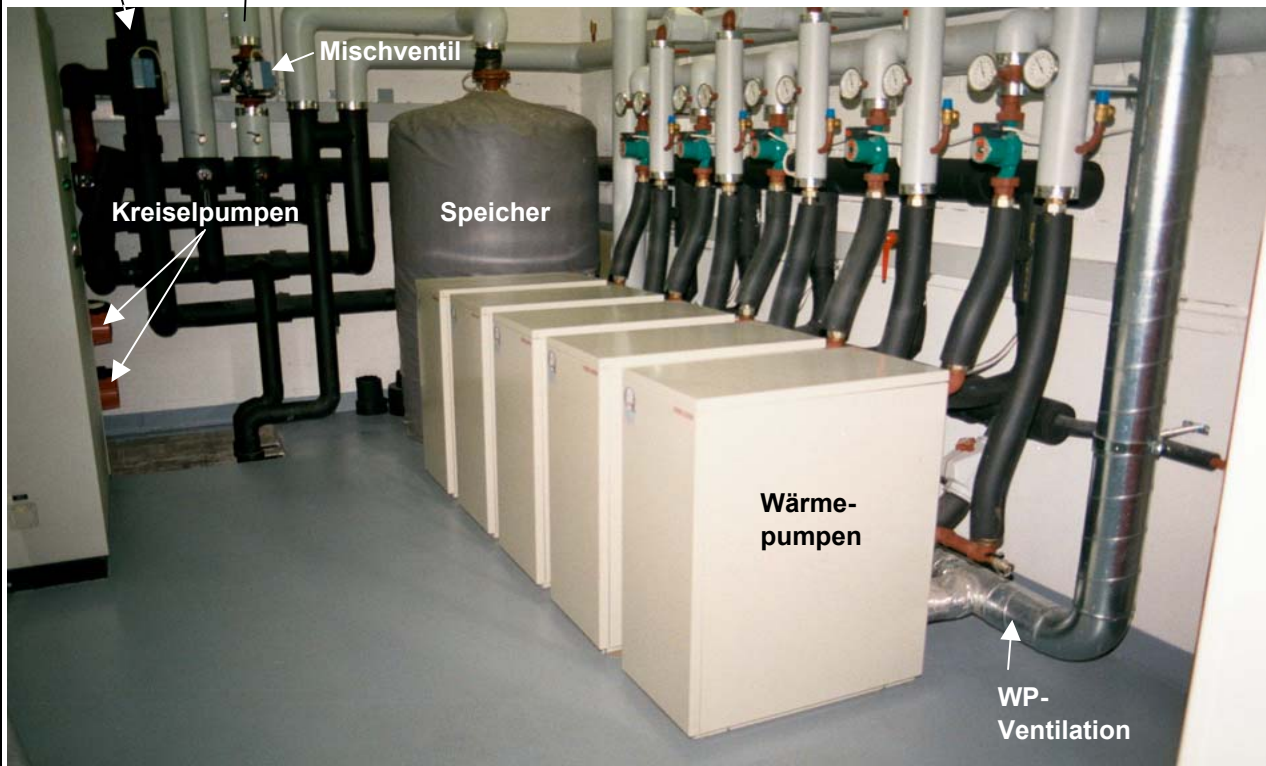


Abb.5: Heizraum mit den 5 Wärmepumpen (WPWE 14 kW, Stiebel Eltron) und dem Speicher

A269

13.02.2004

Forschungsprojekt Wärmepumpen
Chestonag Automation AG

EBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt

Photodokumentation



Abb.6:
Sicht auf die Deckenstrahlplatten (Zehnder) in der Chestonag AG in Seengen.
Zehnder Deckenstrahlplatten eignen sich als statisches Heizsystem hervorragend. Sie sind ausserdem zur Raumkühlung einsetzbar (Decken-Kühlung).

Abb.7:
Sicht auf die Deckenstrahlplatten (Zehnder) beim Empfang der Chestonag AG in Seengen.
An der Betonsäule in der Raummitte auf der Höhe von 1.6 m befindet sich der Innentemperaturfühler .

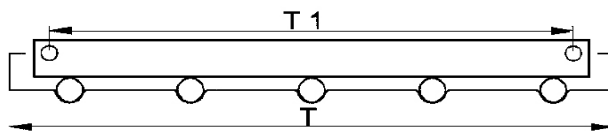


Abb.8:
Profilschema der Deckenstrahlplatten (Zehnder)

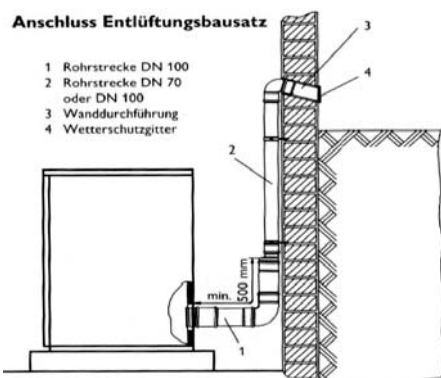
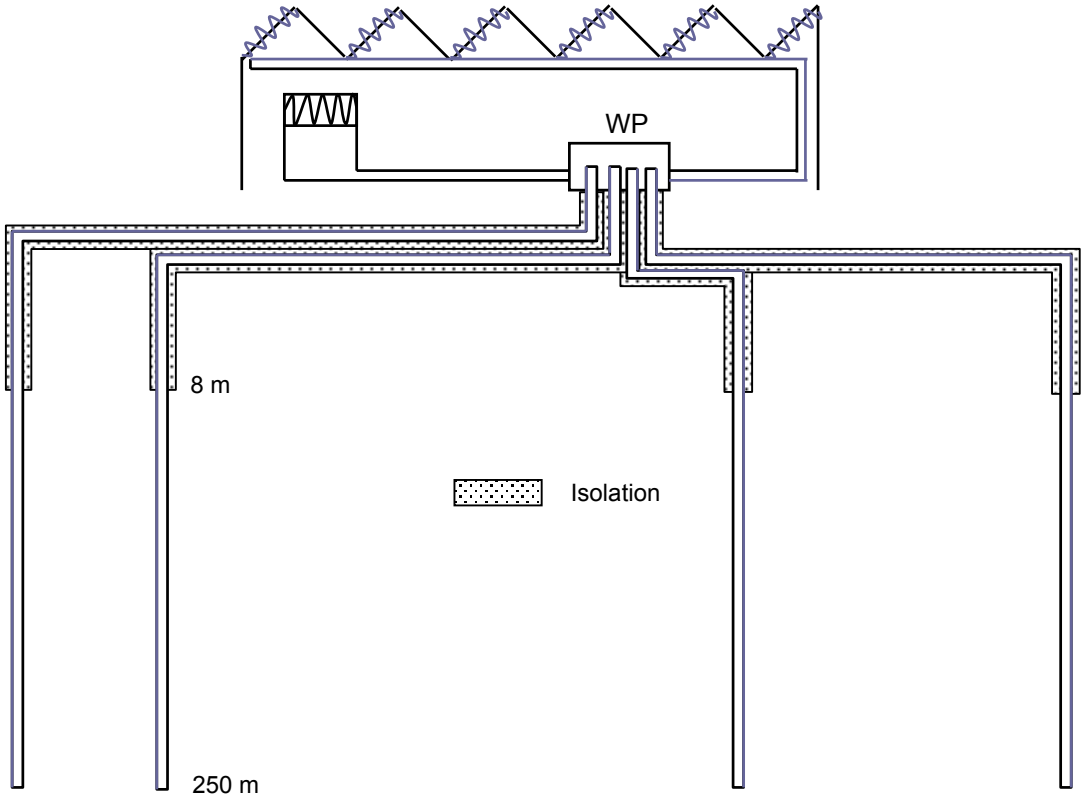


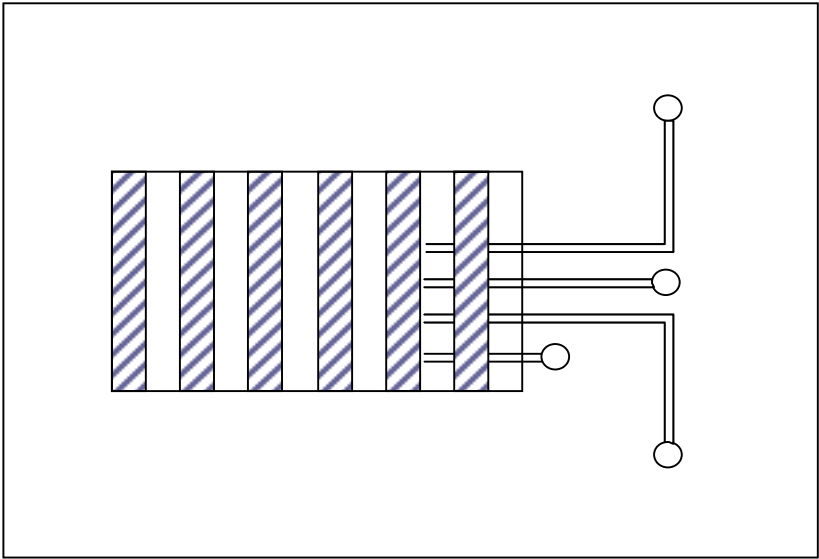
Abb.9:
Ventilation
Die Wärmepumpen werden mit dem Kältemittel R 290 (Propan) betrieben. Die Vorschriften der Betriebssicherheit verlangen aufgrund der Explosionsgefährlichkeit von Propan ein in die Wärmepumpe integriertes Entlüftungssystem (siehe nebenstehendes Prinzipschema).

Schematische Übersicht, Schnitt und Grundriss der Anlage

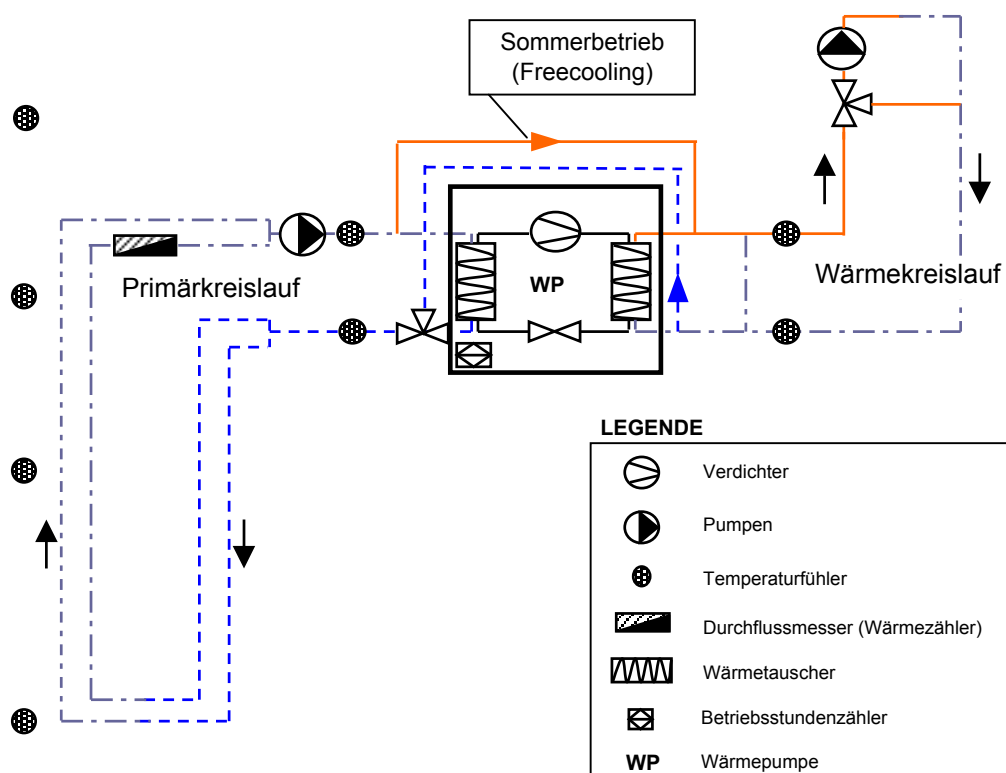
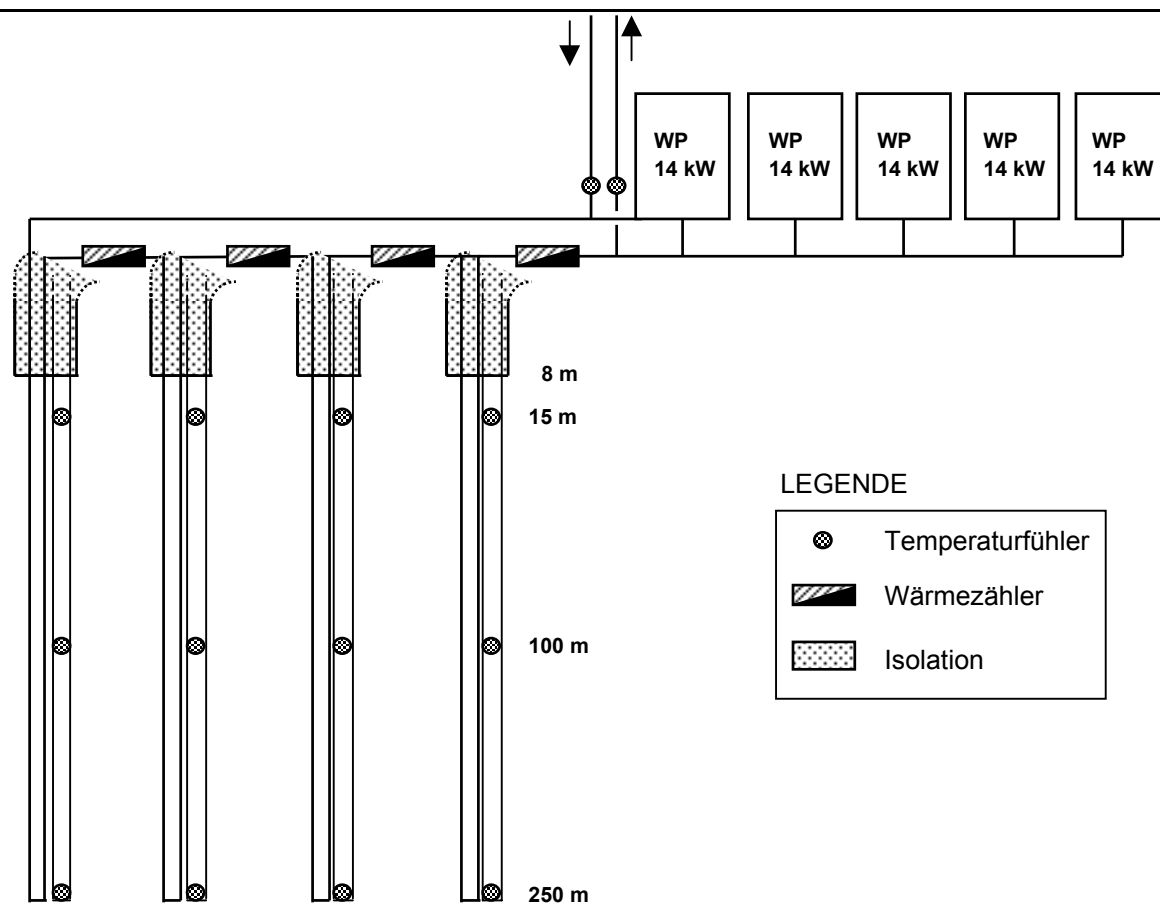
Schematisches Profil durch die Anlage



Schematischer Grundriss der Anlage



Übersicht über Messkonzept und Anlagenschema



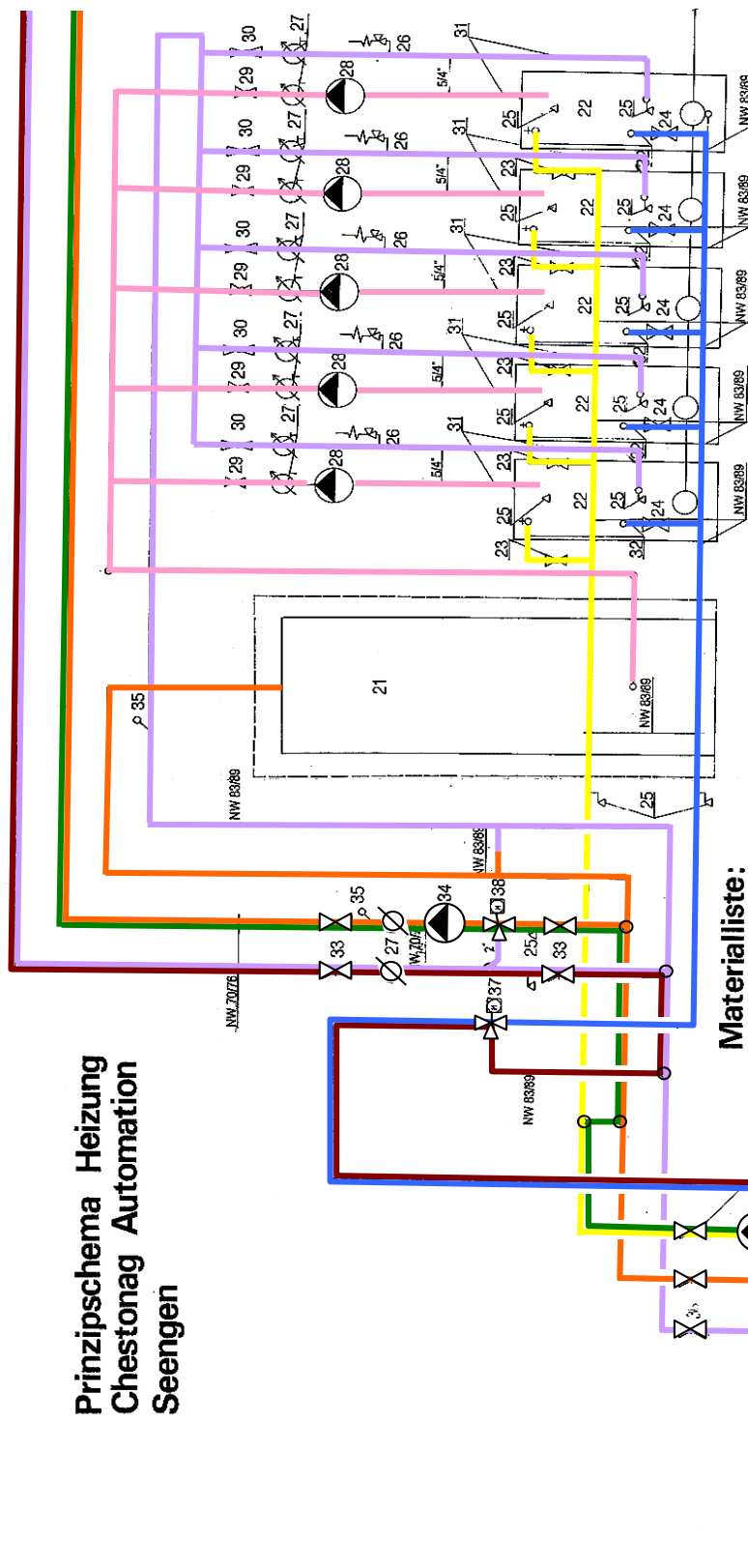
A269

13.02.2004

Forschungsprojekt Wärme-
pumpen Chestonag AGnicht
massstäblichEBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt

Prinzipschema Heizung - Kühlung

Zu den Deckenstrahlern

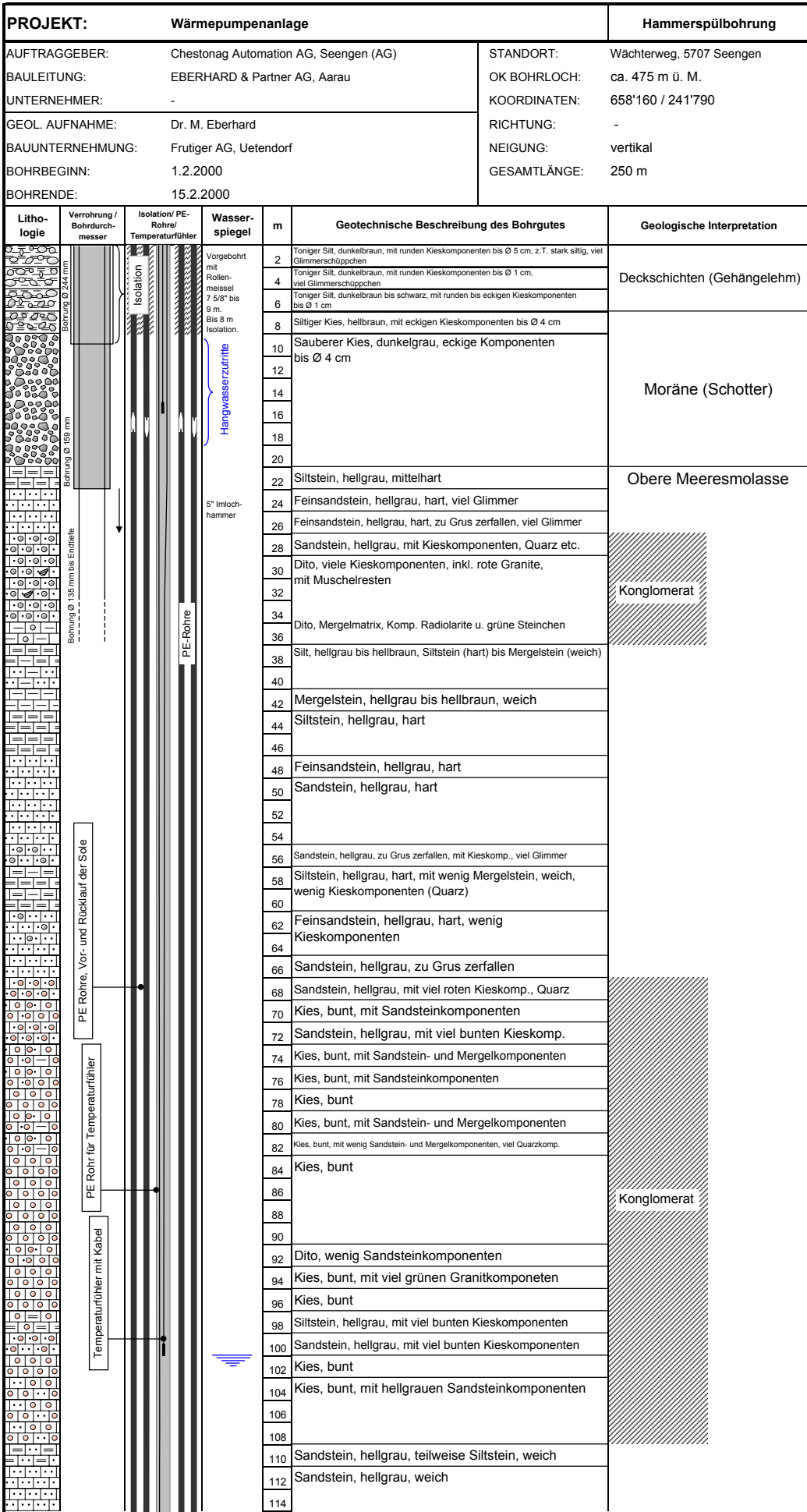
Prinzipschema Heizung
Chestonag Automation
Seengen

Materialliste:

21. Speicher Fabr. Teller Typ S 180/180 Liter
 22. Wärmepumpe Fabr. Siebel Elton WPWE 14 (kW)
 23. STA-D Ventil 1 1/2"
 24. Robtex Kugelhahn 1 1/2"
 25. Entlüftung 12"
 26. Sicherheitsventil 3 bar 1/2"
 27. Thermometer Rönti d=100 mm
 28. ENB Pumpen Typ RS 30/4 220 V
 29. STA-D Ventil 5/4"
 30. Robtex Kugelhahn 5/4"
 31. Filterflanschlange 5/4" Länge 1000 mm
 32. Filterflanschlange 1 1/2" Länge 300 mm
 33. Ebo Absperklappe PN 6/10/16 Typ Z 011-K1 them NW 65
 34. ENB Pumpen Typ Top-E 50/1-10 220V
 35. Elctrohublöser Typ SPS 150 mm
 36. Kugelhahn NW 2"
 37. Umschaltventil NW 65 Typ VZF 21.65 mit SOX 31.00
 38. Druckschventil NW 50 Typ VZF 21.50 mit SOX 31.00
 39. Ebo Absperklappe PN 6/10/16 Typ Z 011-K1 them NW 80
 40. ENB Pumpen Typ Top-S 65/1-10 3400V

Vorlauf
RücklaufVorlauf
RücklaufPrimärkreislauf
Sekundärkreislauf
BetriebswärmeVorlauf
RücklaufZu Strahlern
im UG

Erdbärmesonden

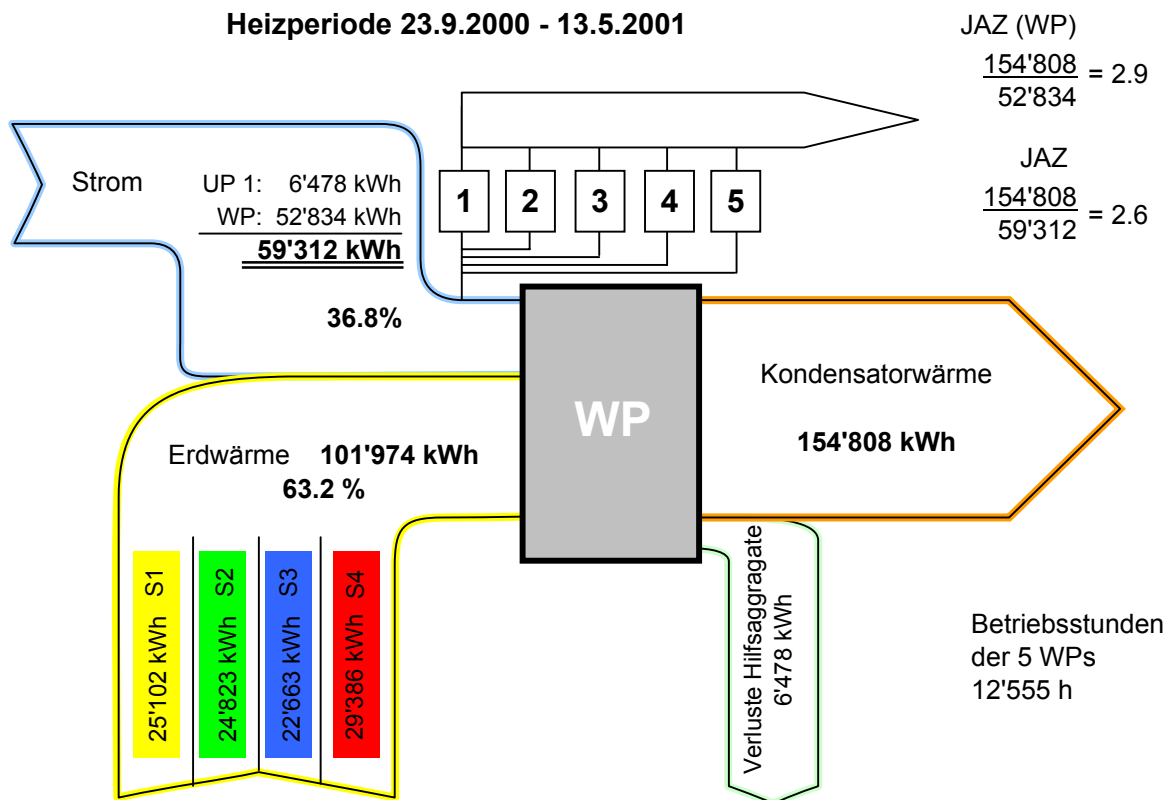


116	dito, z.T. hart
118	
120	
122	
124	Sandstein, hellgrau, hart, mit einzelnen Kieselsteinen
126	(Quarz)
128	Dito, weich
130	Sandstein, hellgrau, hart
132	
134	
136	Sandstein, hellgrau, z.T. weich
138	
140	
142	
144	Sandstein, hellgrau, hart
146	
148	
150	
152	
154	
156	
158	
160	
162	
164	Sandstein, hellgrau, z.T. weich
166	Sandstein, hellgrau, z.T. hart
168	
170	Sandstein, hellgrau, z.T. weich
172	
174	Sandstein, hellgrau, total zu Grus zerfallen
176	
178	
180	
182	
184	
186	
188	
190	
192	
194	
196	
198	
200	
202	
204	
206	
208	
210	
212	
214	Sandstein, hellgrau, hart, mit viel Calcitstückchen (Schalenreste)
216	
218	Sandstein, hellgrau, hart, einzelne Calcitstückchen (Schalenreste)
220	Dito, einzelne Quarzkomponenten
222	
224	Sandstein, hellgrau, mit einzelnen Calcit- und schwarzen Kohlestückchen, hart
226	Sandstein, hellgrau, hart
228	Sandstein, hellgrau, mit einzelnen Calcitstückchen
230	Sandstein, hellgrau, teilw. weich
232	Sandstein, hellgrau, mit einzelnen Calcitstückchen, hart
234	Sandstein, hellgrau, hart
236	Sandstein, hellgrau, teilw. weich
238	
240	
242	
244	Sandstein, hellgrau, hart, mit schwarzen Kohlestückchen
246	Sandstein, hellgrau, hart
248	Sandstein, hellgrau, hart, mit Calcitstückchen
250	Sandstein, hellgrau, hart

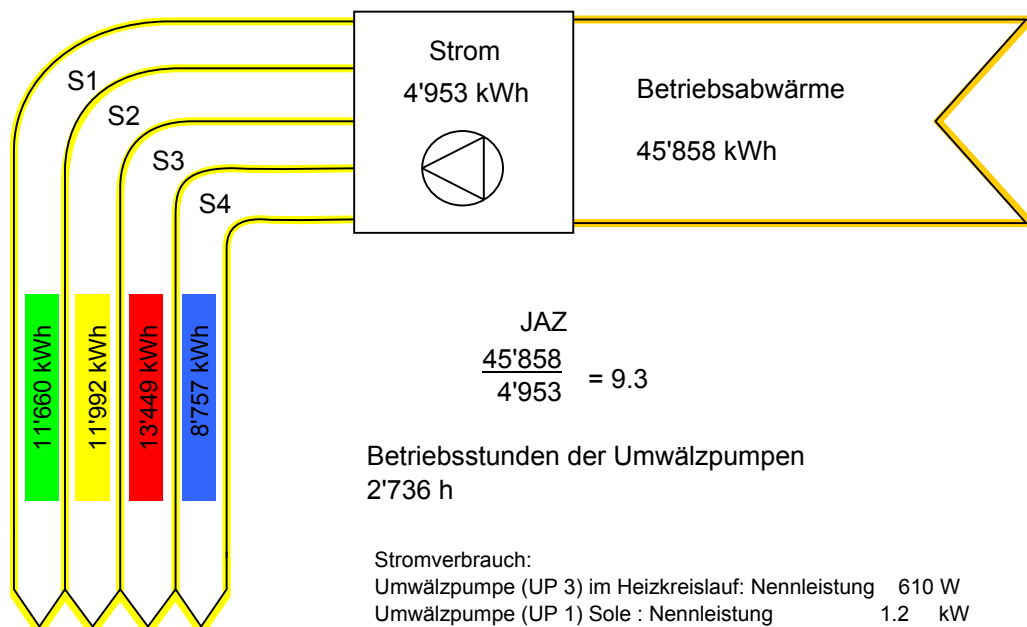
Zusammengefasste Energie- und Leistungsdaten														
Monat		Erdwärme- sonden	Strom Verdichter	Strom UP 1 pri.	Strom 5 x UP 2	Stom UP 3 sek.	Strom Ventilatoren	Strom total	Heiz- wärme	Verlust Zusatz- aggregate	JAZ (WP)	JAZ	Betri.-St. UP 1 pri.	Betri.-St. WP
		[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]			[h]	[h]
		gemessen	ber. SE	ber. BSZ	ber. BSZ	ber. BSZ	ber. BSZ		ber. SE	cal			gemessen	ber. SE
Heizperiode	Sep 00	1'021	551	117	17	98	52	668	1'572	117	2.85	2.35	97	125
	Okt 00	6'344	3'392	894	37	364	201	4'286	9'736	894	2.87	2.27	745	780
	Nov 00	14'463	7'508	853	113	351	194	8'361	21'971	853	2.93	2.63	711	1'780
	Dez 00	15'257	7'783	820	106	357	201	8'603	23'040	820	2.96	2.68	684	1'880
	Jan 01	21'645	11'138	892	120	363	201	12'030	32'783	892	2.94	2.73	744	2'665
	Feb 01	17'575	8'911	806	86	328	181	9'717	26'486	806	2.97	2.73	672	2'165
	Mrz 01	14'247	7'531	890	55	363	201	8'421	21'778	890	2.89	2.59	742	1'755
	Apr 01	10'392	5'495	864	45	351	194	6'359	15'887	864	2.89	2.50	720	1'280
	Mai 01	1'030	525	341	12	139	84	866	1'555	341	2.96	1.80	284	125
		0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
Free- cooling	Mai 01	6'614	0	490	0	249	0	739	0			8.95	408	
	Jun 01	11'044	0	864	0	439	0	1'303	0			8.48	720	
	Jul 01	13'897	0	893	0	454	0	1'347	0			10.32	744	
	Aug 01	13'041	0	893	0	454	0	1'347	0			9.68	744	
	Sep 01	1'262	0	144	0	73	0	217	0			5.82	120	
		0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
Heizperiode	Sep 01	1'713	764	336	16	236	39	1'100	2'477	336	3.24	2.62	280	170
	Okt 01	4'829	2'224	891	68	453	167	3'115	7'053	891	3.17	2.73	742	485
	Nov 01	18'179	8'092	2'087	121	434	194	10'179	26'271	2'087	3.25	2.88	696	1'830
	Dez 01	22'864	9'656	2'530	156	454	201	12'186	32'520	2'530	3.37	2.94	744	2'300
	Jan 02	21'614	9'287	2'530	151	454	201	11'817	30'901	2'530	3.33	2.90	744	2'175
	Feb 02	14'402	6'522	2'271	101	408	181	8'793	20'924	2'271	3.21	2.70	668	1'450
	Mrz 02	12'063	5'558	2'526	95	453	201	8'084	17'621	2'526	3.17	2.51	743	1'215
	Apr 02	6'758	3'152	2'404	65	431	194	5'556	9'910	2'404	3.14	2.09	707	680
	Mai 02	1'329	638	460	11	83	58	1'098	1'967	460	3.08	2.02	135	135
		0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
Free- cooling	Jun 02	11'322	0	1'581	0	284	0	1'865	0			6.07	465	
	Jul 02	14'709	0	2'530	0	454	0	2'984	0			4.93	744	
	Aug 02	12'041	0	2'530	0	454	0	2'984	0			4.04	744	
	Sep 02	4'932	0	1'333	0	239	0	1'572	0			3.14	392	
		0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
	Sep 02	2'385	1'090	166	3	81	36	1'375	3'475	165	3.44	2.72	132	240
Sep 00 - Mai 01		101'974	52'834	6'478	591	2'714	1'510	59'312	154'808	6'478	2.9	2.6	5'398	12'555
Mai 01 - Sep 01		45'858	0	3'284	0	1'669	0	4'953	0			9.3	2'736	0
Sep 01 - Mai 02		103'751	45'893	16'035	785	3'405	1'437	61'928	149'644	16'035	3.3	2.4	5'460	10'440
Jun 02 - Sep 02		43'004	0	7'974	0	1'431	0	9'405	0			4.6	2'345	0
UP = Umwälzpumpe, pri. = primär, sek. = sekundär, WP = Wärmepumpe, Betri.-St.= Betriebsstunden ber. SE = mit dem Leistungsdiagramm der Stiebel Eltron berechnet, ber.BSZ = berechnet mit Nennleistung x Betriebsstunden, cal = Erdwärme + Strom - Heizwärme														

Energiebilanz 1. Jahr

Heizperiode 23.9.2000 - 13.5.2001



Freecooling-Periode 14.5.2001 - 5.9.2001



S1 - S4 : Sonde 1 bis Sonde 4

WP: Wärmepumpe, UP: Umwälzpumpen

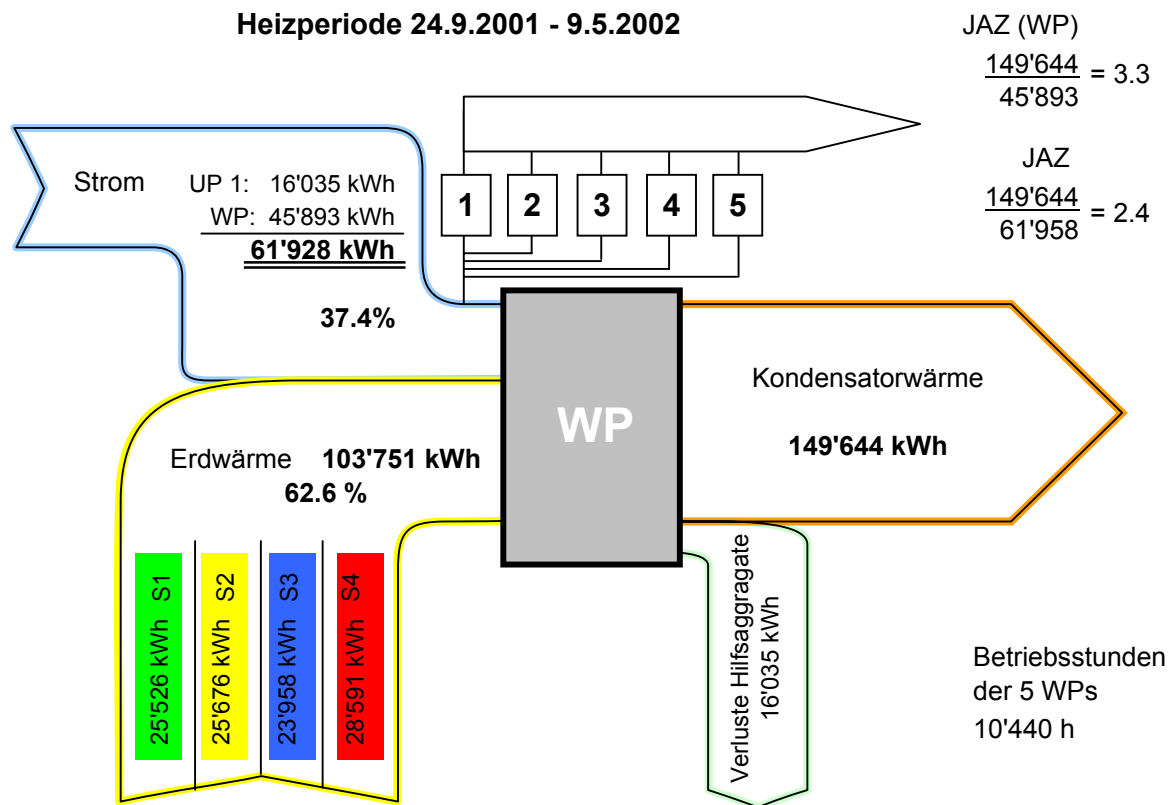
A269

13.02.2004

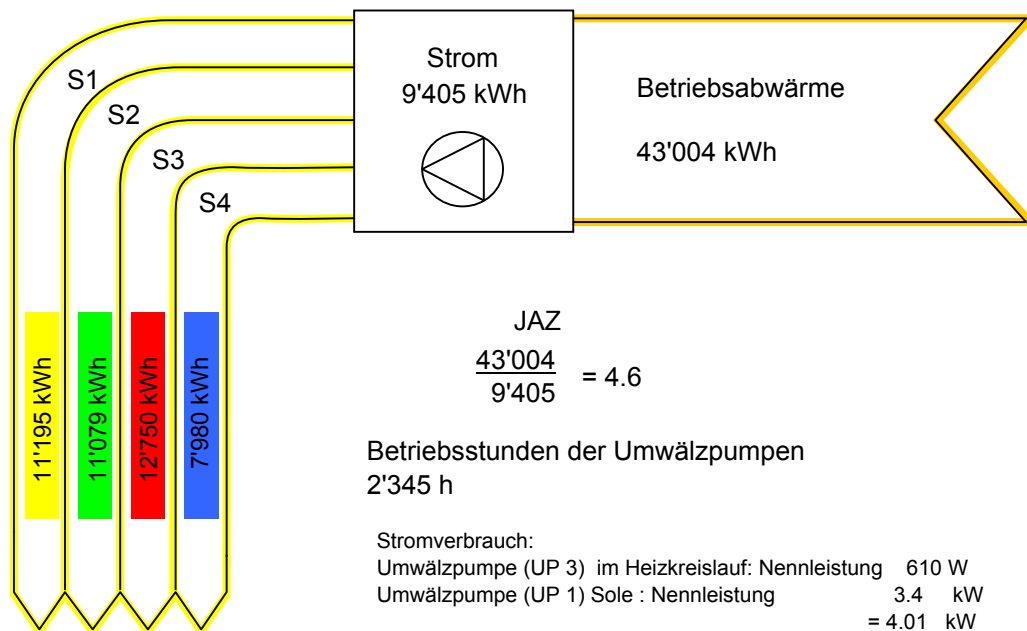
Wärmepumpenanlage
Chestonag Automation AG, SeengenEBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt

Energiebilanz 2. Jahr

Heizperiode 24.9.2001 - 9.5.2002



Freecooling-Periode 11.6.2002 - 17.9.2002



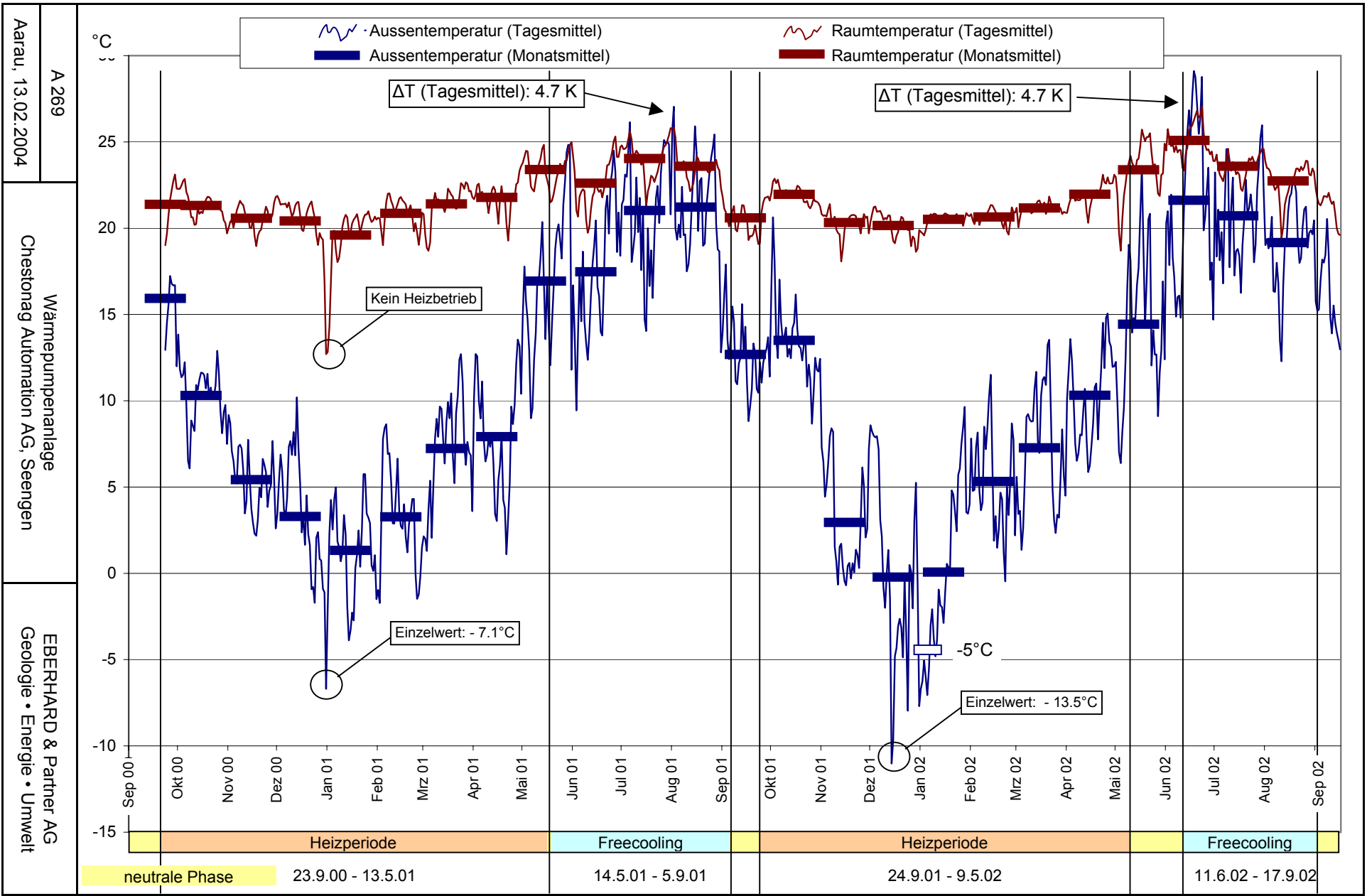
S1 - S4 : Sonde 1 bis Sonde 4

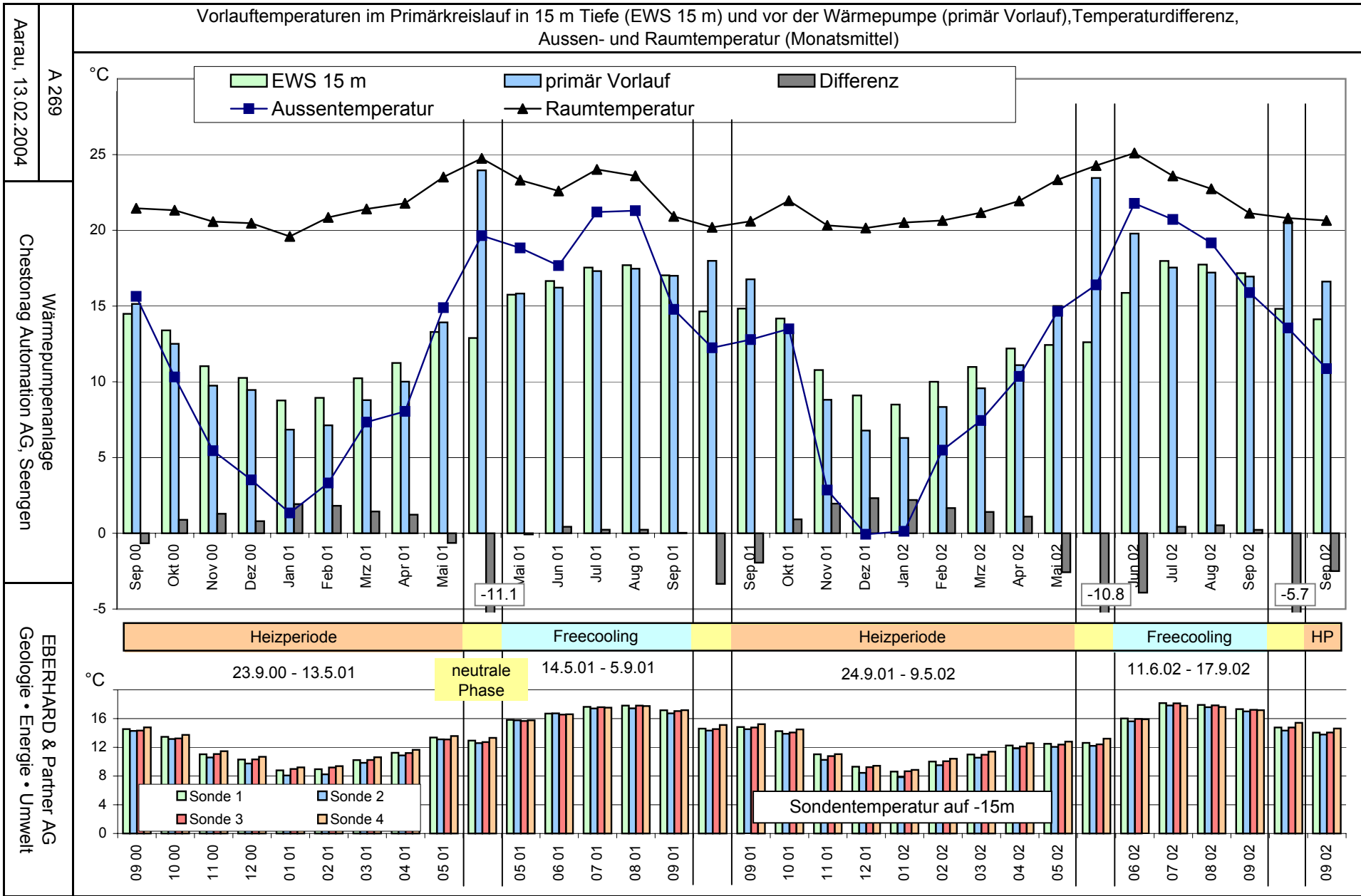
WP: Wärmepumpe, UP: Umwälzpumpen

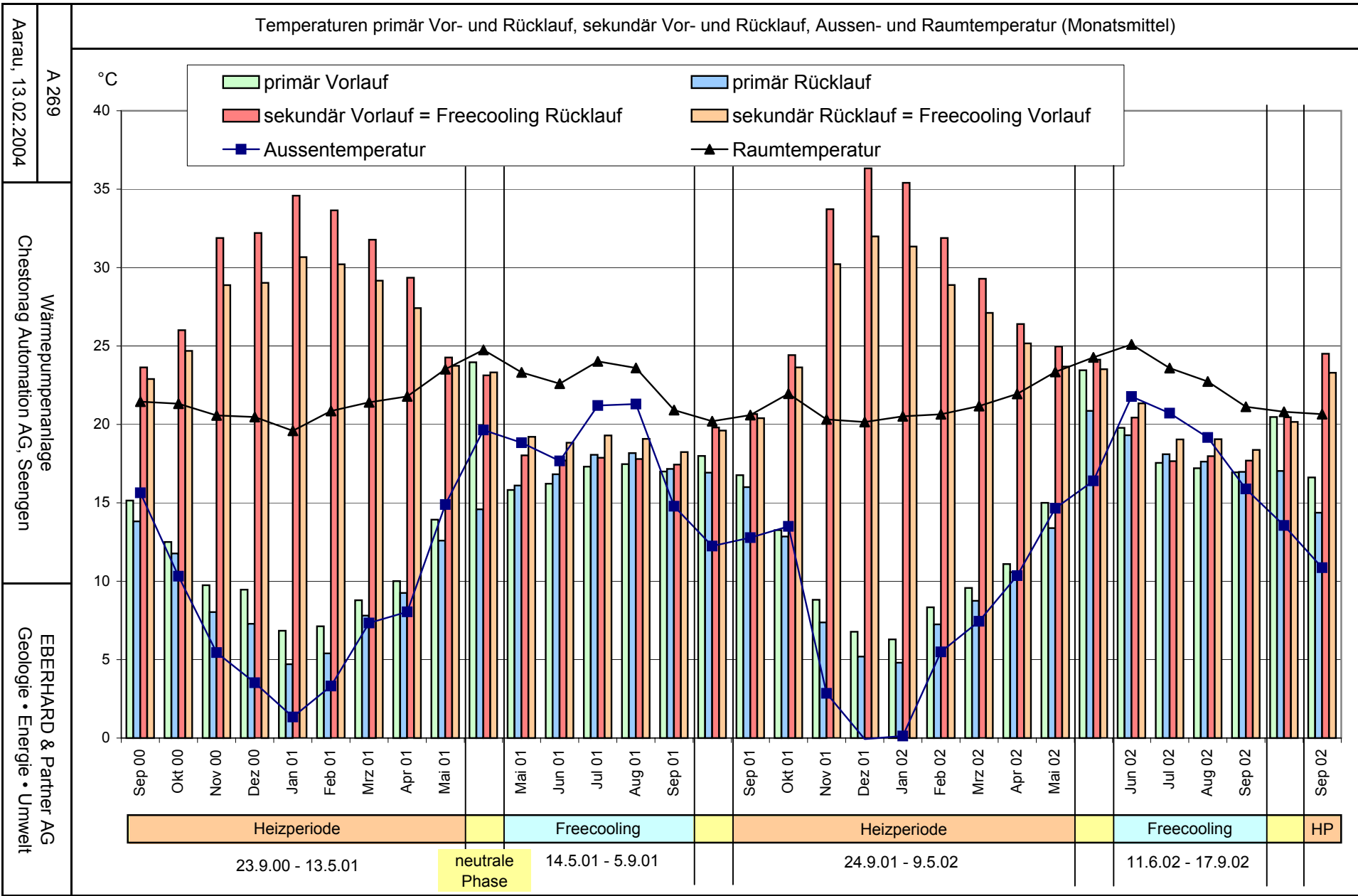
A269

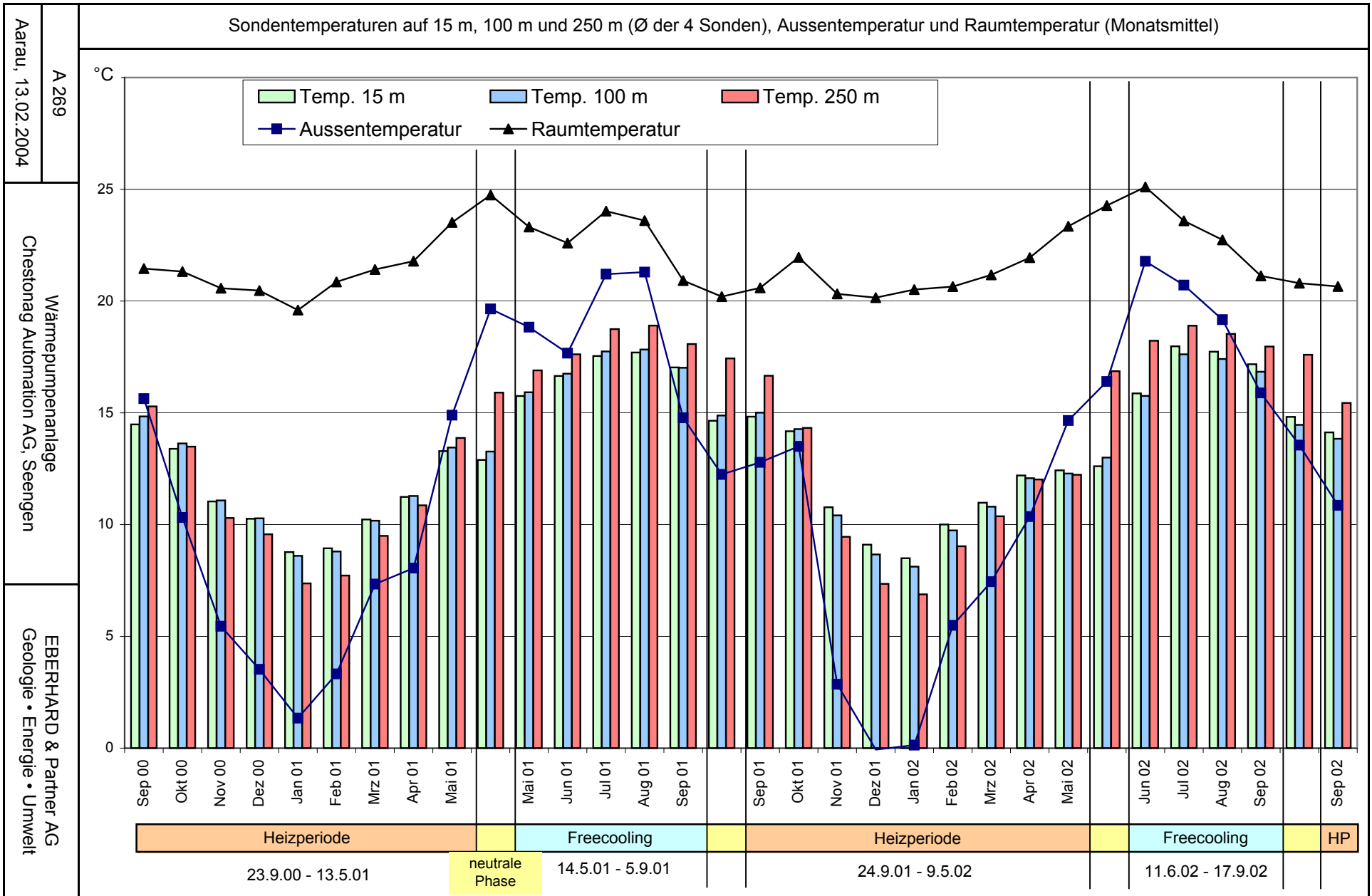
13.02.2004

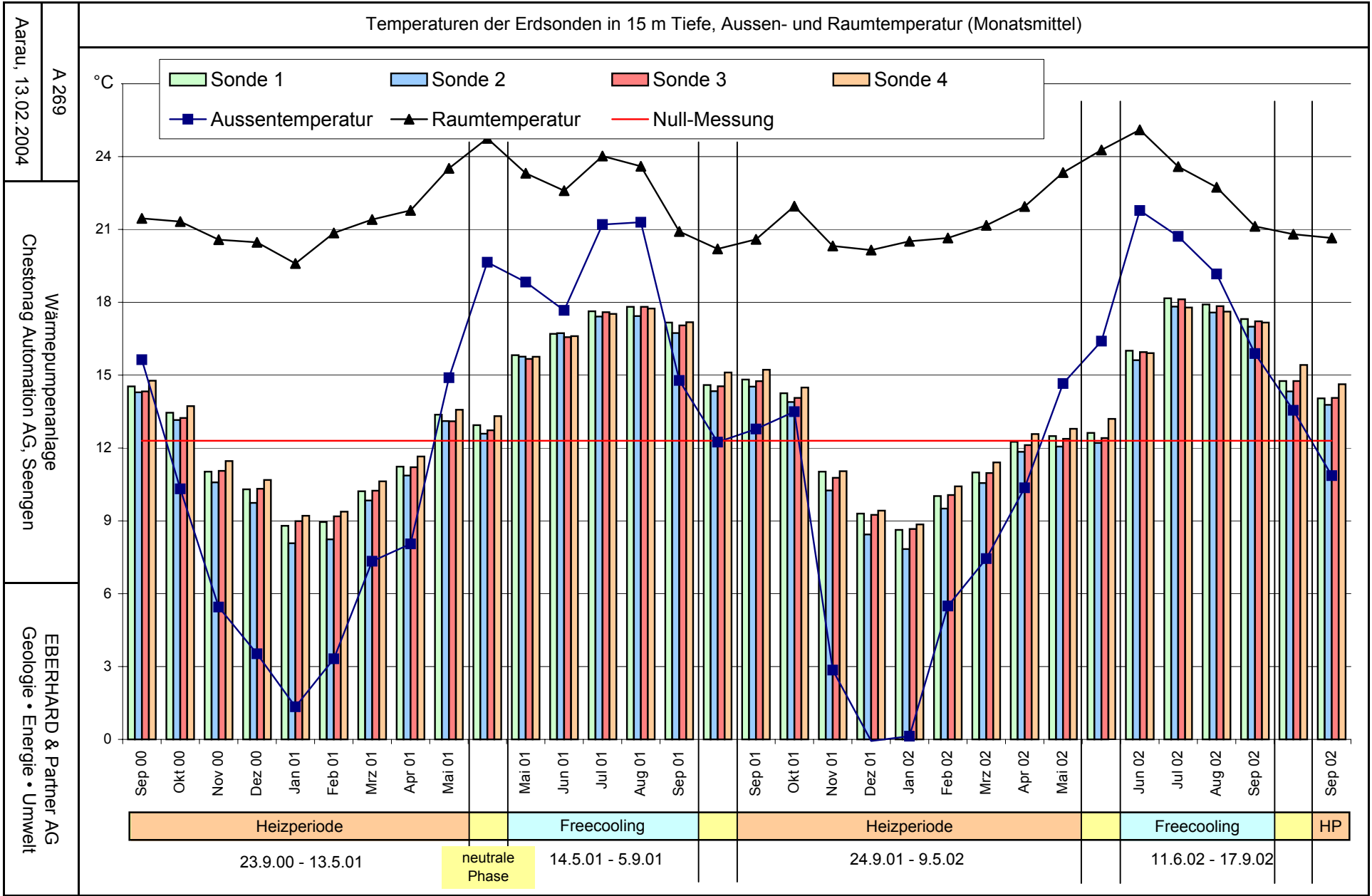
Wärmepumpenanlage
Chestonag Automation AG, SeengenEBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt

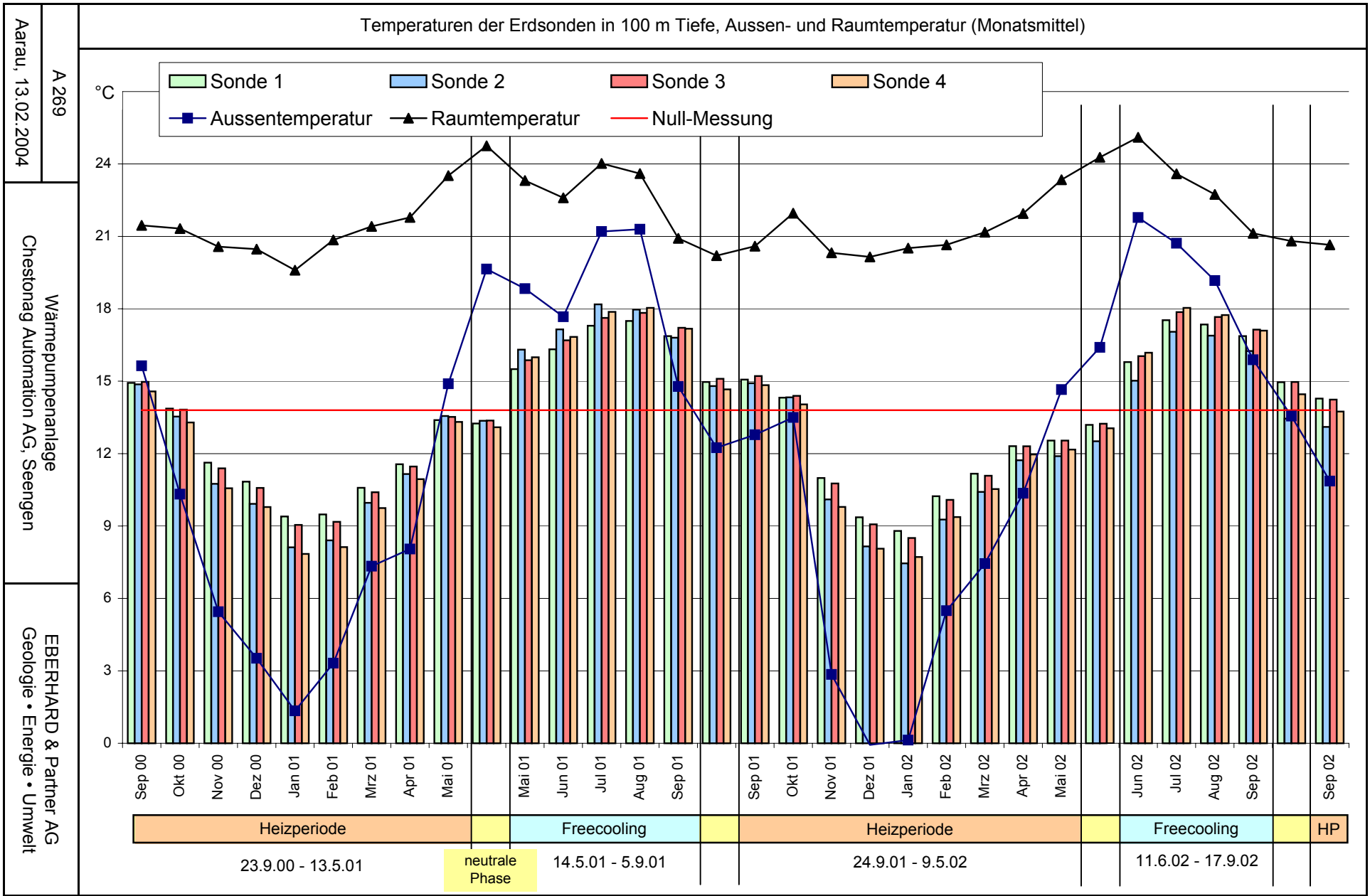


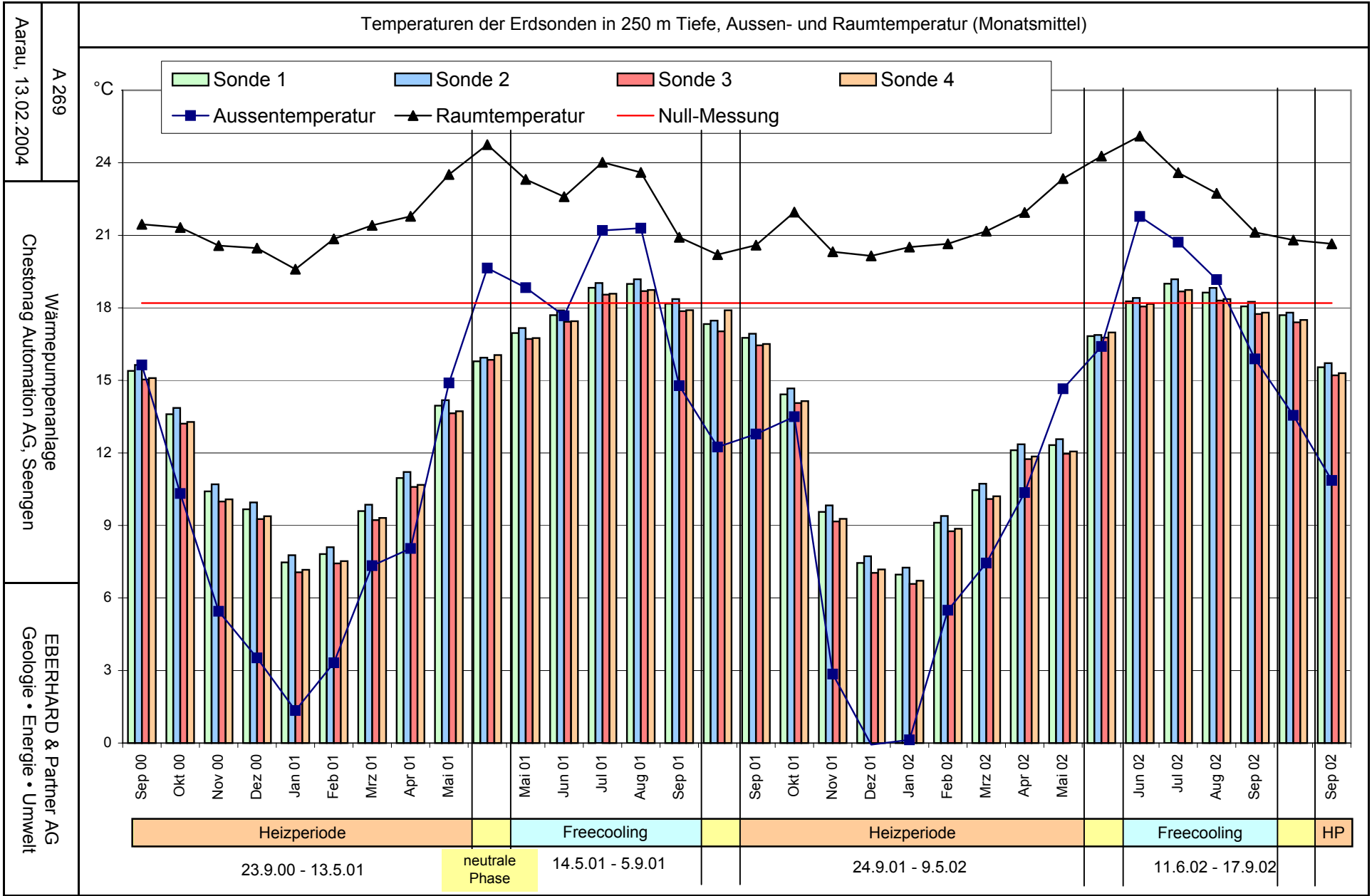








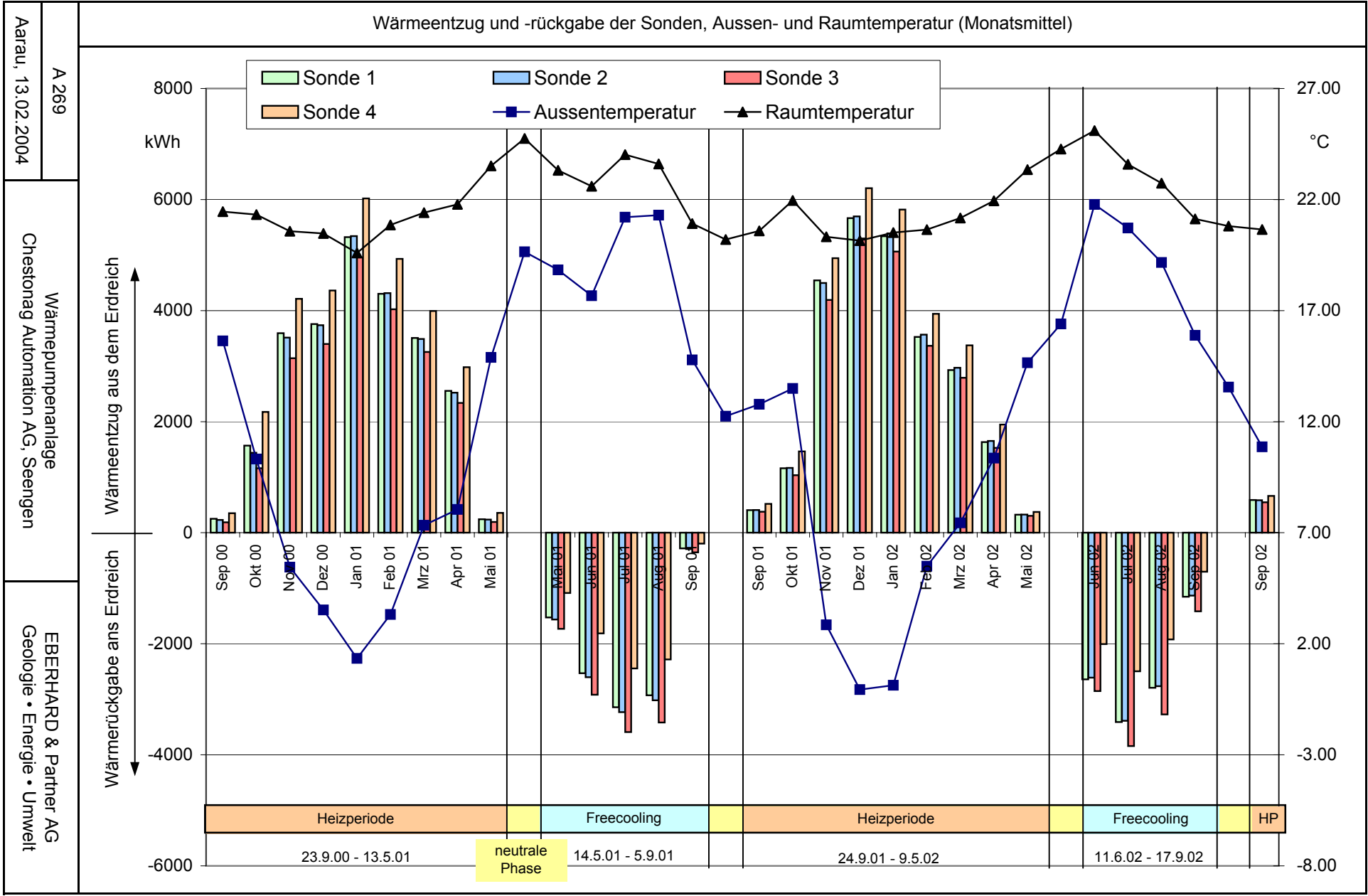


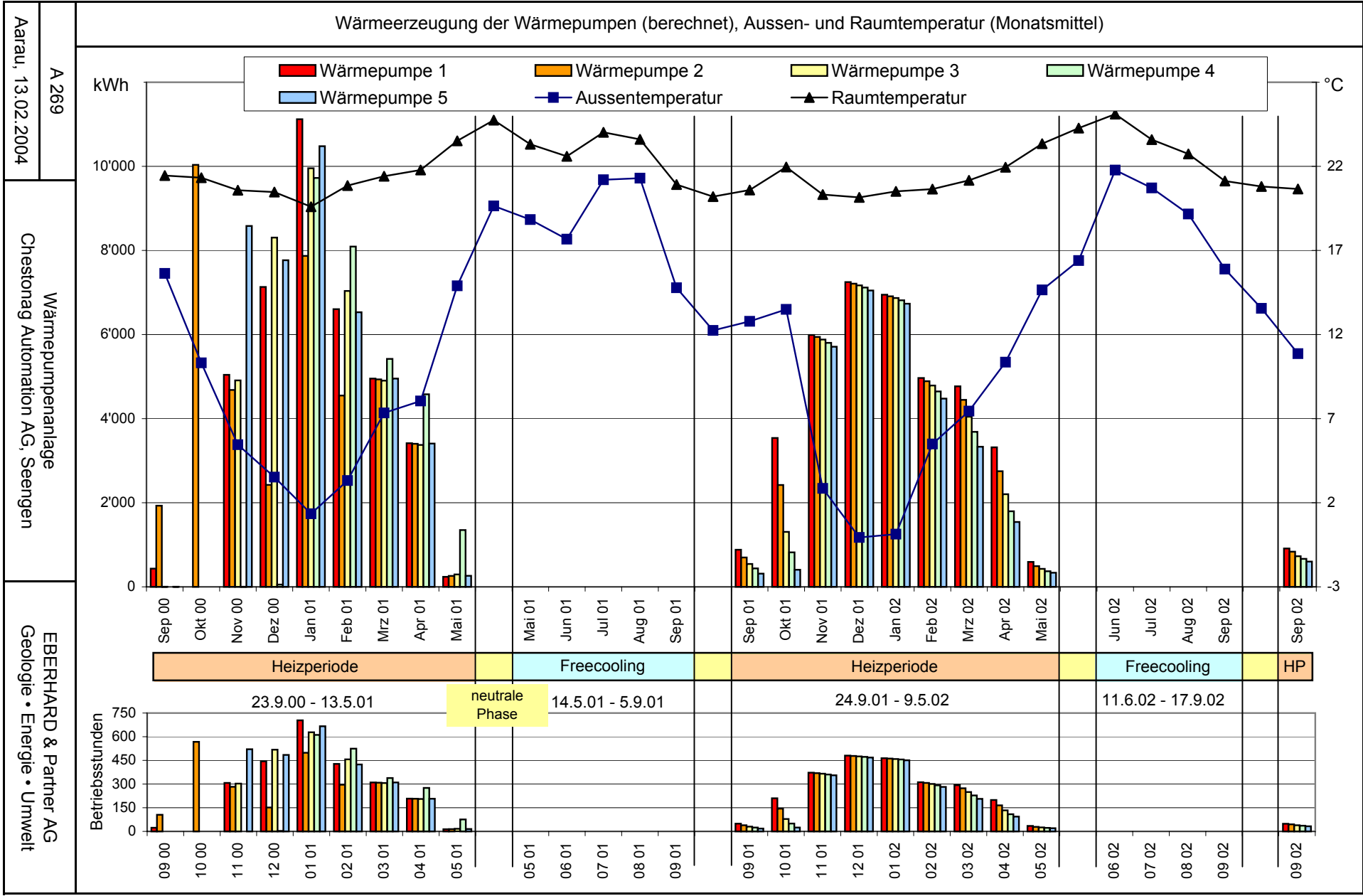


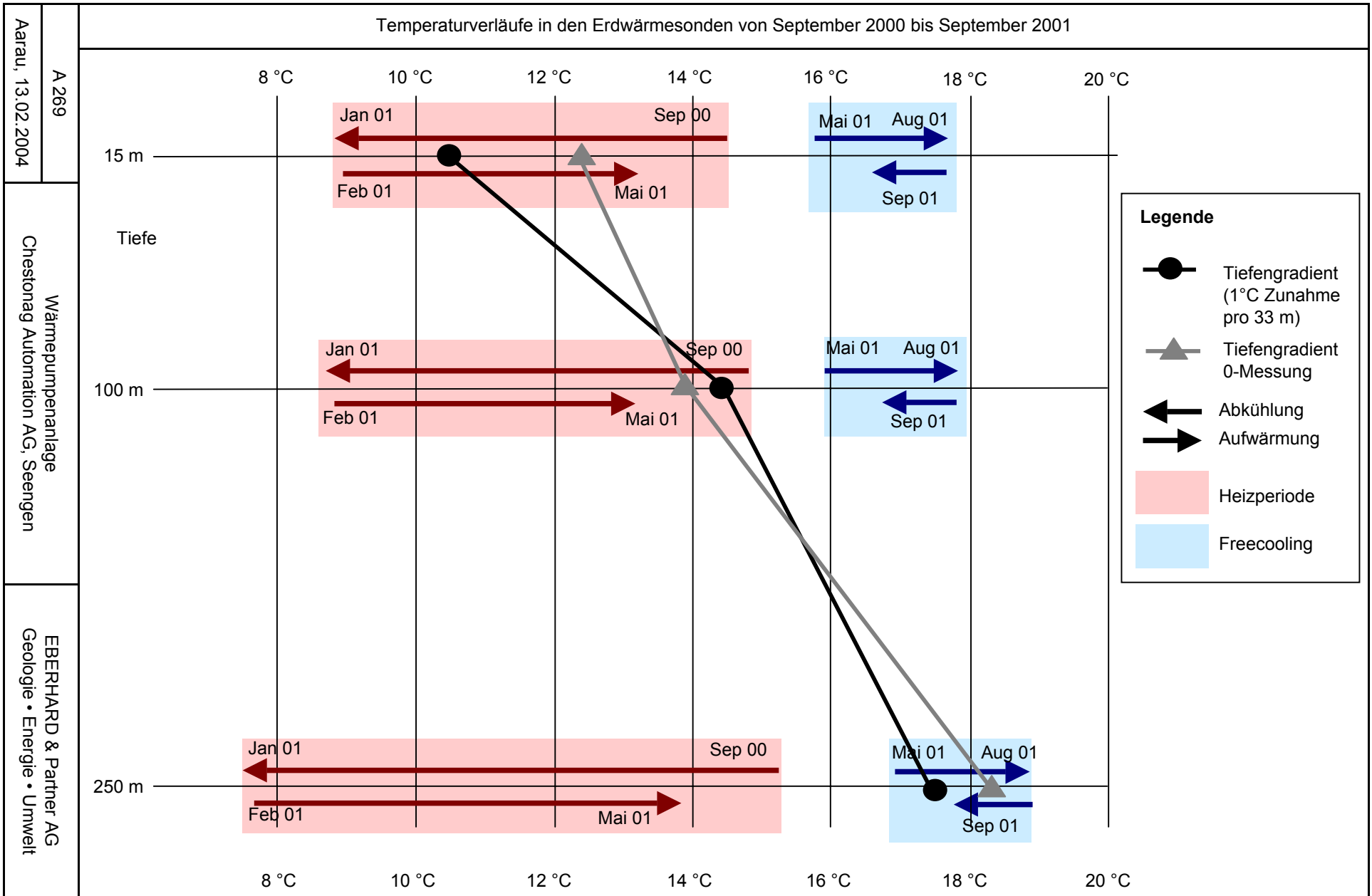
A 269
Aarau, 13.02.2004

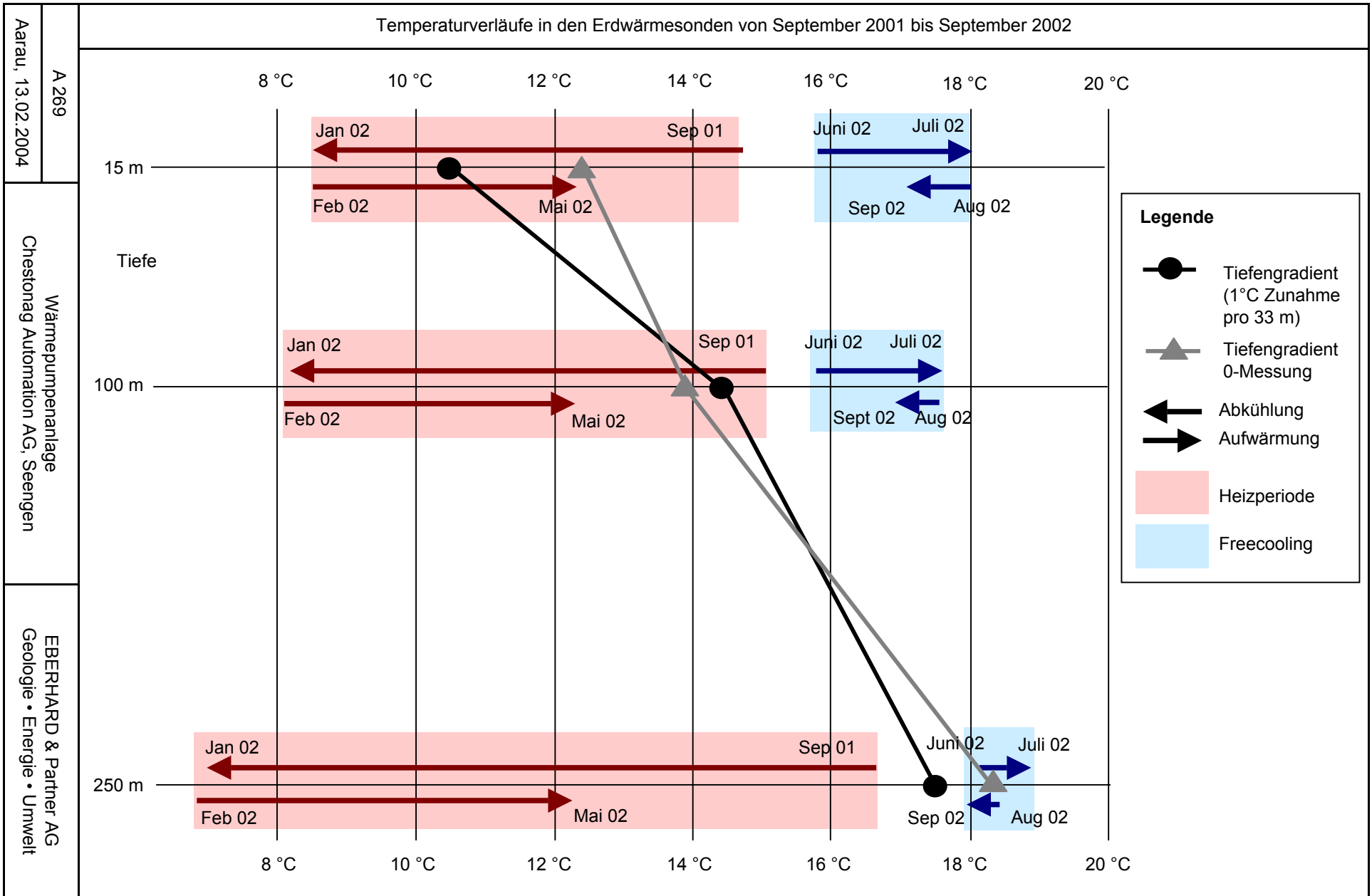
Wärmepumpenanlage
Chestonag Automation AG, Seengen

EBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt





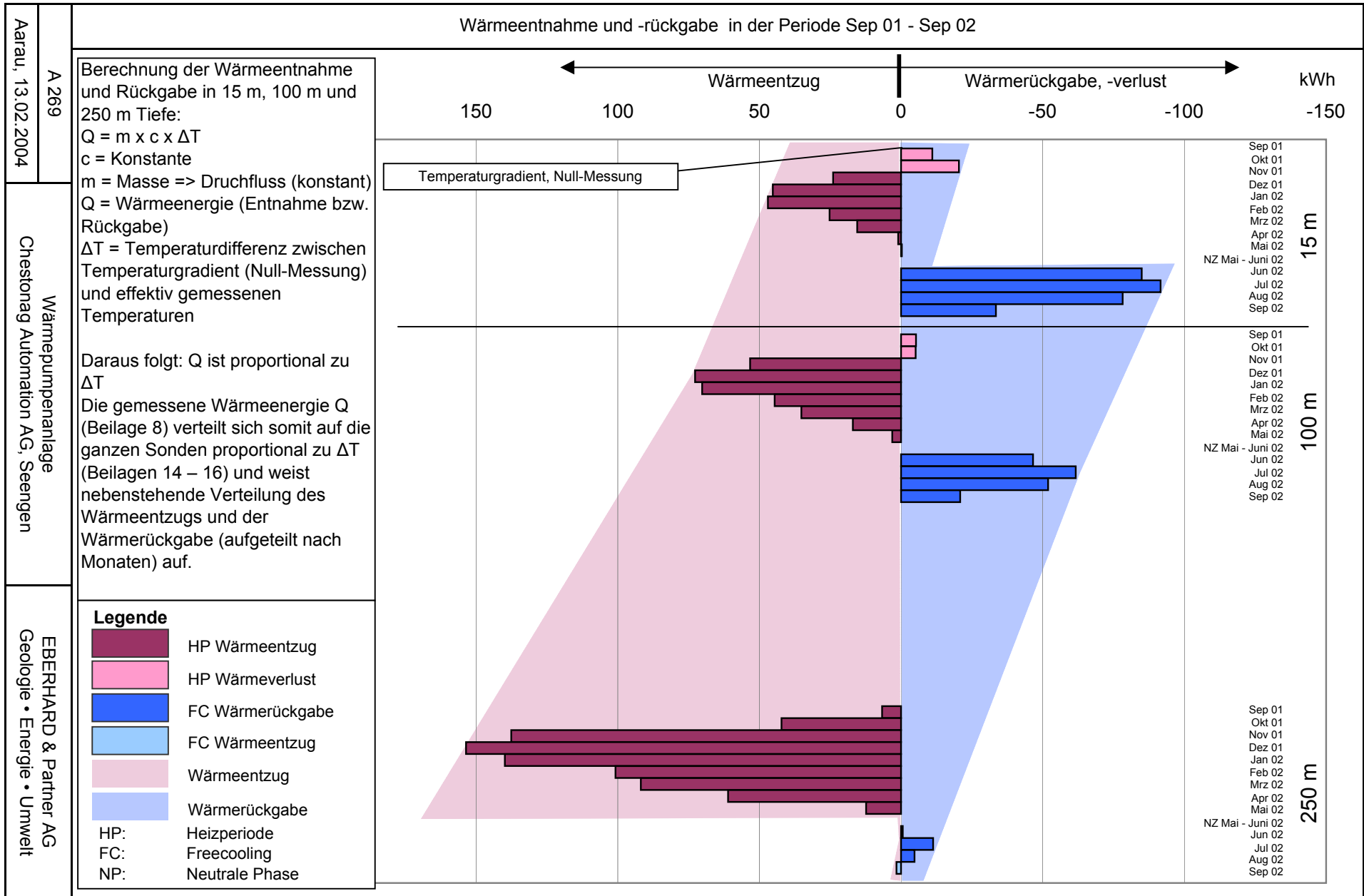


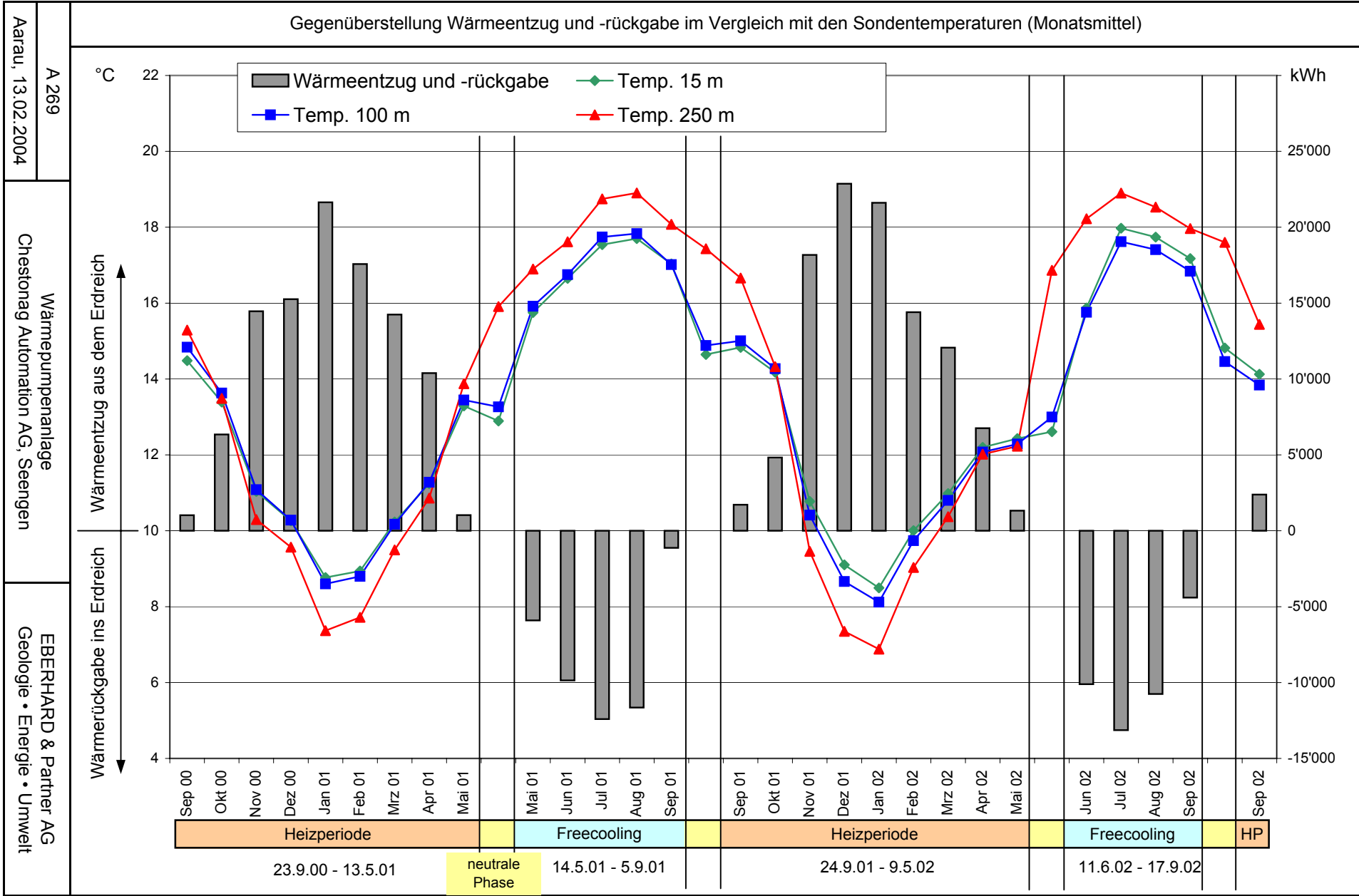


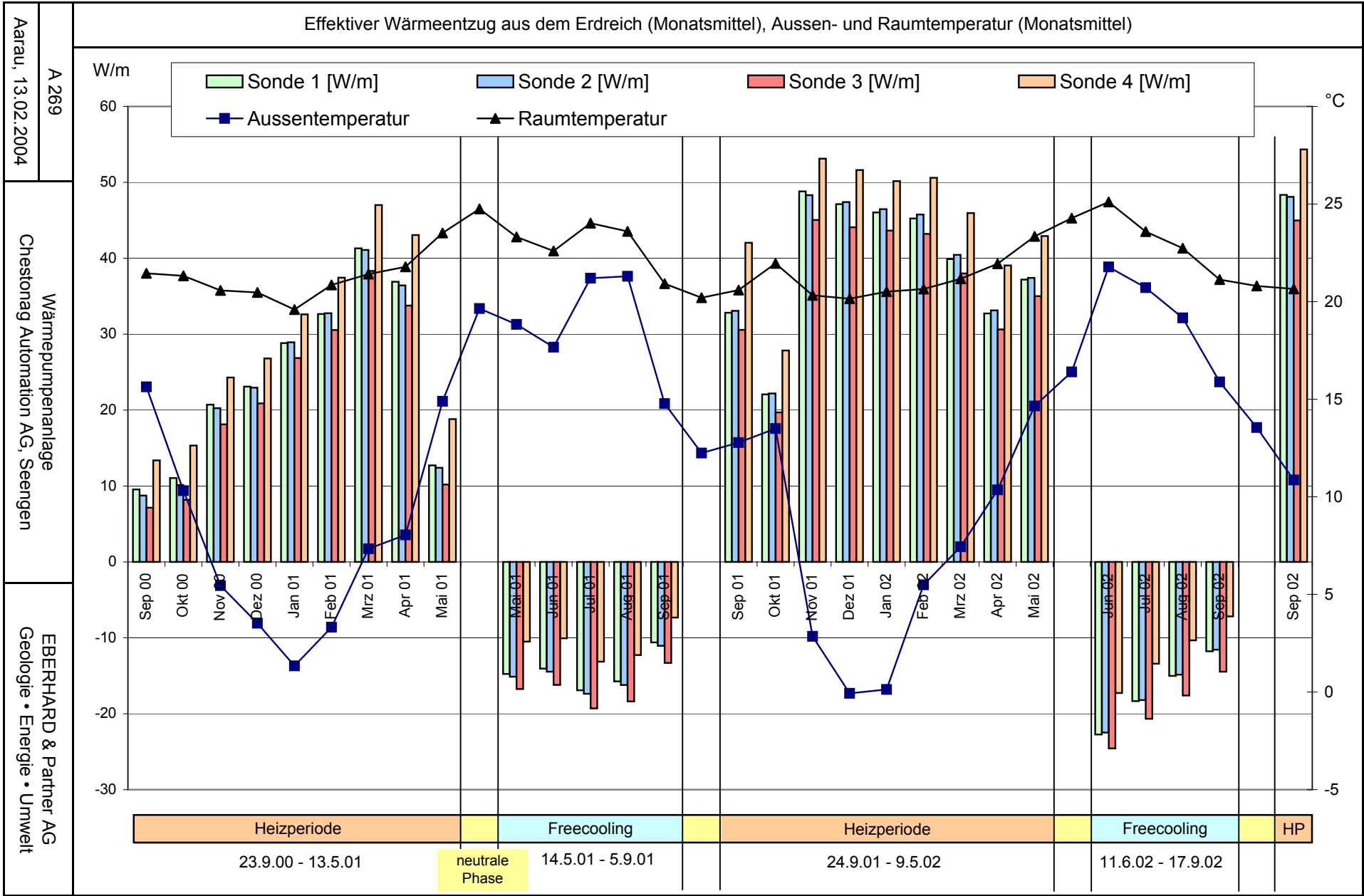
Daraus folgt: Q ist proportional zu ΔT
Die gemessene Wärmeenergie Q (Beilage 8) verteilt sich somit auf die ganzen Sonden proportional zu ΔT (Beilagen 14 – 16) und weist nebenstehende Verteilung des Wärmeentzugs und der Wärmerückgabe (aufgeteilt nach Monaten) auf.

	HP Wärmeentzug
	HP Wärmeverlust
	FC Wärmerückgabe
	FC Wärmeentzug
	Wärmeentzug
	Wärmerückgabe
HP:	Heizperiode
FC:	Freecooling
NP:	Neutrale Phase









Temperaturgradienten: Null-Messung und Sondentemperaturen

Abb. A

Temperaturen Januar 2002

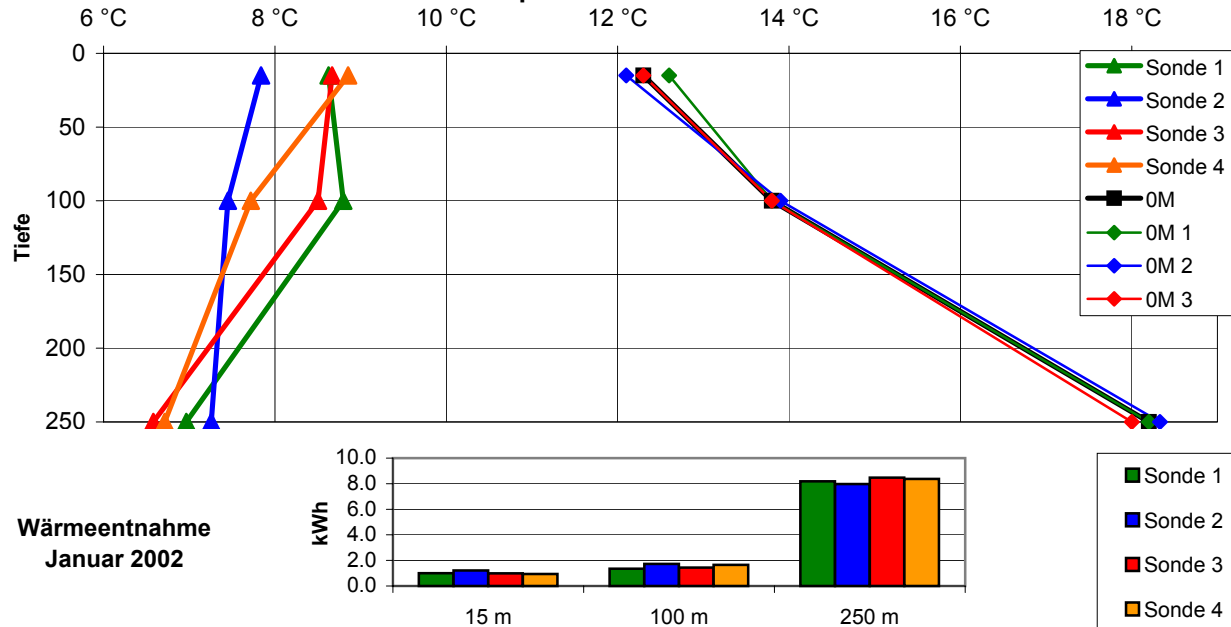


Abb. B

Neutraler Zeitbereich

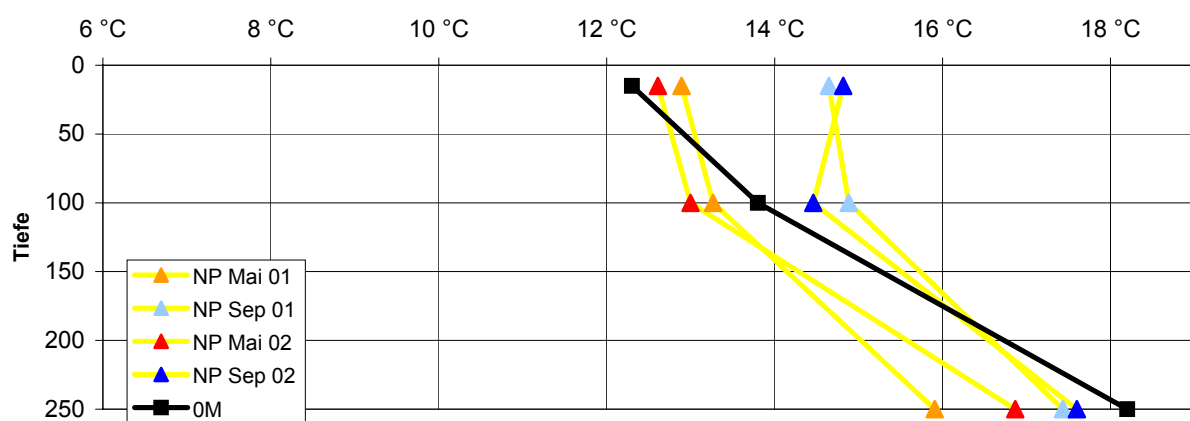
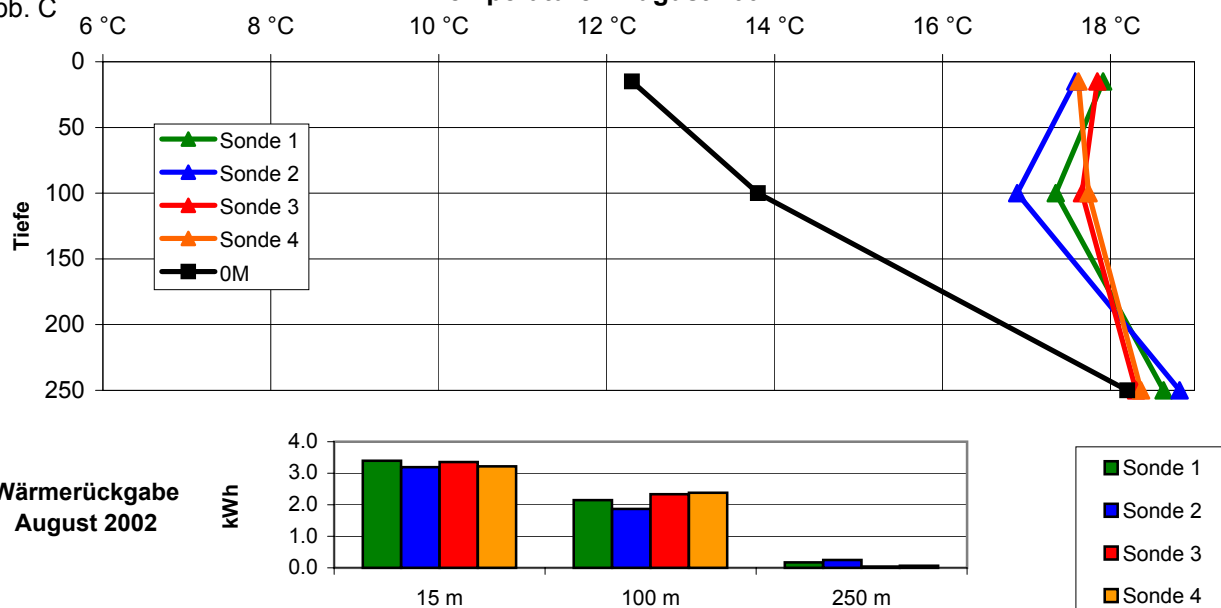


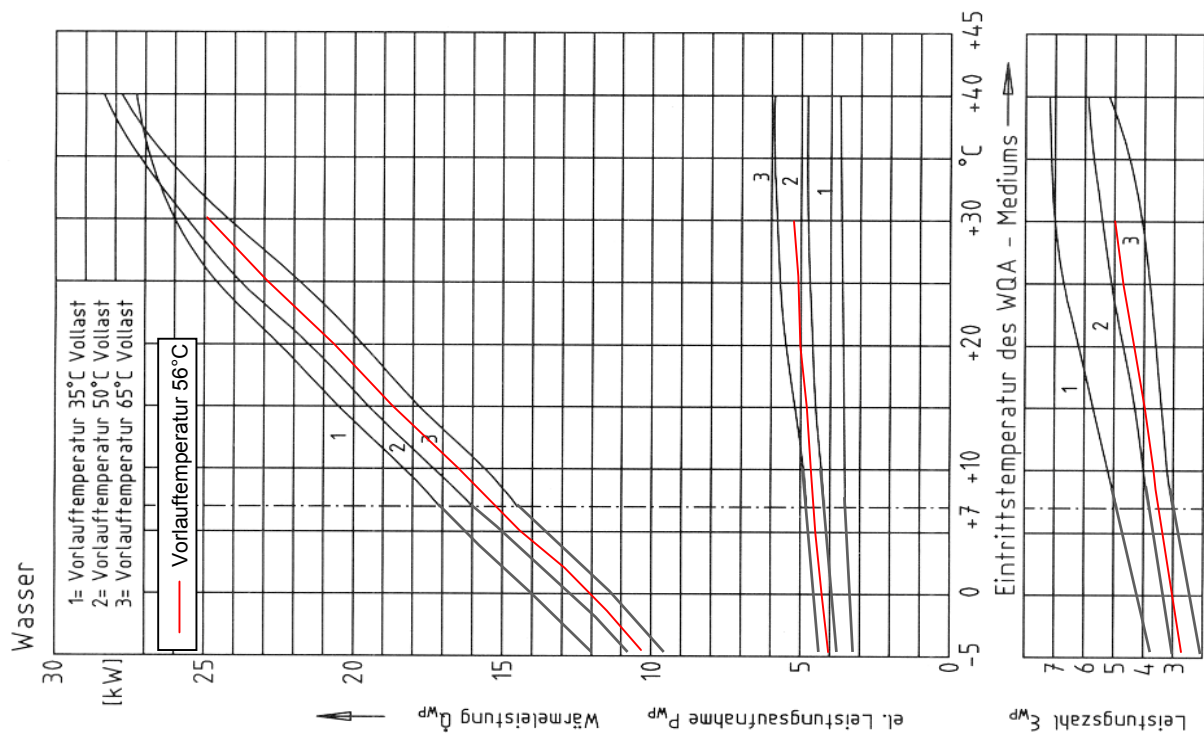
Abb. C

Temperaturen August 2002

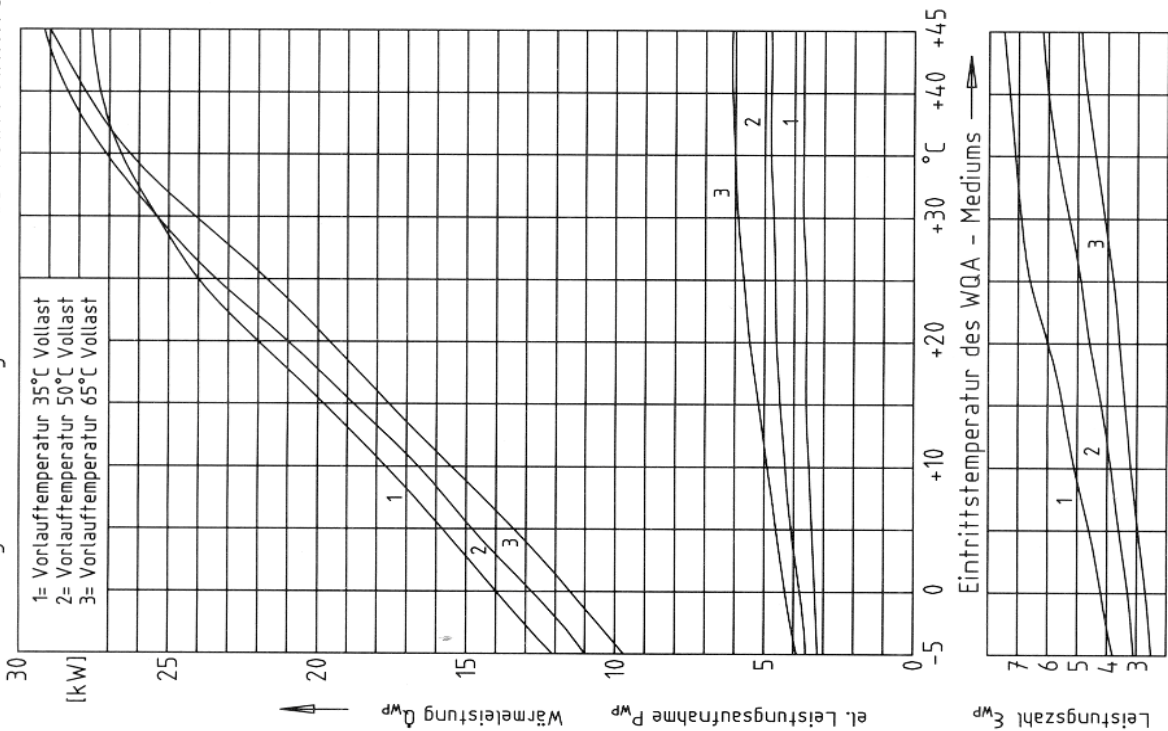


OM = Null-Messung, NP = Neutrale Phase

Leistungsdiagramm der WPWE 14KW der STIEBEL ELTRON



Antifrogen N/Wassergemisch mit 33 Vol.% Antifrogen N



A269

13.02.2004

Forschungsprojekt Wärmepumpen
Chestonag Automation AGEBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt

Effizienzermittlung / Wirtschaftlichkeitsermittlung

Effizienzermittlung**4 x 250 m Sonden****10 x 100 m Sonden****Wärme aus den Sonden**

Temperatur am tiefsten Punkt		17.5 °C	12.5 °C
Erwartete Soletemperatur (Beilage 12)		8.5 °C	3.5 °C
Wärmeleistung aus den Erdwärmesonden		(S8.5/W56)* 15.8 kW	(S3.5/W56)* 13.7 kW
Betriebsstunden (150'000 kWh)	h	9'494 h	10'949 h
Leistungsaufnahme der Wärmepumpe	Pwp	(S8.5/W56) 4.5 kW	(S3.5/W56) 4.3 kW
Stromverbrauch für 150'000 kWh Wärme (WP) = Pwp x h		42'723 kWh	47'081 kWh
Stromverbrauch für 150'000 kWh Wärme (UP**) = h/5 x 4.5 kW		8'545 kWh	9'854 kWh
Zusätzlicher Stromverbrauch durch Glykol*** (+ 20%)			1'971 kWh
Stromverbrauch für 150'000 kWh Wärme	total	51'268 kWh	58'906 kWh

Kühlung mittels der Sonden

Kühlung	Pk	43'000 kWh	43'000 kWh
Zusätzlicher Stromverbrauch durch Glykol*** (+ 20%)			567 kWh
Stromverbrauch	total	4'253 kWh	3'403 kWh
Betriebsstunden (Sommer 2002)	h	2'350 h	1'567 h
Kühlleistung	= Pk / h	18.3 kW	27.4 kW

Totaler jährlicher Stromverbrauch**55'521 kWh****62'309 kWh****Wirtschaftlichkeitsermittlung****4 x 250 m Sonden****10 x 100 m Sonden****Investitionskosten**

Preis pro Laufmeter Bohrung	68.00	65.00
Total Bohrung	68'000.00	65'000.00
Grösserer Bohrdurchmesser in den oberen 8 m für Einbringung der Isolation	3'500.00	
Isolation Tubolit, Wandstärke 20 mm 4 x 8 m = 32 m à Fr. 4.90	157.00	
Einbau Isolation (4 Gruppenstunden)	928.00	
Glykolzusatz 20% (980 kg à Fr. 6.15)		6'030.00
Totale Kosten	72'585.00	71'030.00

Mehrkosten**1'555.00****Betriebskosten**

Wärmeerzeugung (Stromkosten 0.116 Fr. / kWh)	5'947.00	6'605.00
Zusätzlicher Stromverbrauch durch Glykol (+ 20%)		229.00
Kühlung	493.00	329.00
Zusätzlicher Stromverbrauch durch Glykol (+ 20%)		66.00

Kosten pro Jahr**6'440.00****7'229.00****Mehrkosten****789.00****Amortisation**

Die Angaben beziehen sich auf das behandelte Objekt mit $\frac{2}{3}$ Wärme- zu $\frac{1}{3}$ Kälteleistung.

Die Mehrkosten für die Anlage mit 4 x 250 m Sonden beläuft sich auf Fr. 1'555.00. Der Mehraufwand für den Betrieb der Anlage mit 10 x 100 m Sonden beträgt jährlich Fr. 789.00. Die höheren Investitionskosten für die Anlage mit 4 x 250 m Sonden sind somit nach knapp 2 Jahren Betriebsdauer amortisiert.

* Angaben aus dem Leistungsdiagramm der Stiebel Eltron Beilage 24,

** UP = 8 x Umwälzpumpen und 5 x Ventilatoren (Abschnitt 7.5),

*** Glykol hat eine höhere Dichte ($\rho=1.111$ g/ml) und Viskosität ($\eta=20$ mPa·s), aber eine kleinere Wärmekapazität ($c_p=2.39$ J/g·K) und Wärmeleitfähigkeit ($\lambda=0.256$ W/m·K) als Wasser ($\rho=0.9982$ g/ml, $\eta=1.005$ mPa·s, $c_p=4.1829$ J/g·K, $\lambda=0.595$ W/m·K)

**** Für den Stromverbrauch des Systems mit 10 x 100 m Sonden wurde angenommen, dass bei gleichem Wasserdurchsatz die Wärmerückgabe 1.5 mal höher ist als beim System mit 4 x 250 m Sonden (vgl. Beilage 20a, 20b). Im System mit den 10 untiefen Sonden kann durch die durchschnittlich tiefere Bodentemperatur mehr Wärme zurückgegeben werden. Bei gleichem Stromaufwand könnte somit 1.5 mal mehr Wärme zurück ins Erdreich gegeben werden.