BFE
OFEN
UFE
SFOE

Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)

Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge

ausgearbeitet durch
Sarah Signorelli
Institut für Geophysik
ETH Hönggerberg, 8093 Zürich
signorelli@ig.erdw.ethz.ch

und
PD Dr. Thomas Kohl
Institut für Geophysik
ETH Hönggerberg, 8093 Zürich
kohl@ig.erdw.ethz.ch

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

November 2002 Schlussbericht

Impressum

Auftraggeber:	**Bundesamt für Energie (BFE)** **Sektion erneuerbare Energien** vertreten durch **Prof. Dr. Martin Zogg** Projektbegleiter
Ausführende:	**PD Dr. Thomas Kohl** **Sarah Signorelli, dipl. Natw. ETH** Institut für Geophysik, ETH Zürich
Begleitgruppe:	**Dr. Walter Eugster** Polydynamics Engineering, Zürich **Ernst Fischer** Sekretär PSEL **Dr. Harald L. Gorhan** BFE-Programmleiter "Geothermie" **Arthur Huber** Huber Energietechnik, Zürich **Dr. Daniel Pahud** SUPSI – DCT - LEEE **Wolfgang Rogg** WPZ Töss (NOK, EKZ) **Ernst Rohner-González** Engeo AG, Arnegg **Prof. Dr. Martin Zogg** BFE-Projektbegleiter

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes **Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge** werden drei Schwerpunkte verfolgt: Validierung des Programms EWS, Untersuchung des Einflusses verschiedener Untergrundparameter auf die Erdwärmesonde sowie die Optimierung der Erdwärmesondenlänge.

Als erstes werden die beiden Softwareprodukte zur Auslegung von Erdwärmesondenanlagen *FRACTure* und *EWS* miteinander verglichen. Der Vergleich zeigt für die Simulation des Langzeitverhaltens von Erdwärmesonden eine gute Übereinstimmung. Im Kurzzeiterhalten zeigen sich aber deutliche Unterschiede, die auf eine unterschiedliche Behandlung der Sonden zurückzuführen sind. Um die Temperaturverteilung beim Anfahren einer Anlage exakt simulieren zu können, ist die genaue Lage der Sondenrohre innerhalb der Bohrung wichtig.

Sensitivitätsstudien zum Einfluss verschiedener Parameter, wie Bodenoberflächentemperatur (BOT) oder Geologie, auf die Kälteleistung einer Anlage werden durchgeführt. Die BOT erweist sich als sehr wichtiger Faktor. Weiter zeigt sich, dass die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit entlang einer Erdwärmesonde vernachlässigt werden kann. Zusätzlich wird auch der Wärmeeintrag aufgrund von Grundwasservorkommen untersucht. Ein wichtiger Faktor ist hier das Verhältnis Aquifermächtigkeit zu Sondenlänge.

Zu letzt wird der Einfluss der Sondenlänge bezüglich Wärmeeintrag, Bohrkosten und Druckverlust bei der Fluidzirkulation untersucht. Verschiedene Anlagen mit unterschiedlicher Anzahl Sonden, aber gleicher Gesamtsondenlänge, werden verglichen. Wird der Druckverlust der tieferen Sonden optimiert, sind diese Anlagen im Betrieb effizienter als die Anlagen mit mehreren kurzen Sonden. Zudem sind ihre Installationskosten geringer.

Abstract

In the framework of the project **Validation of the EWS program and Optimisation of borehole hat exchanger length** three main goals were followed: Validation of the EWS program, analysis of the influence of different subsurface parameters on borehole heat exchangers, and optimisation of the depth extend of borehole heat exchangers.

Firstly, the two software packages *FRACTure* and *EWS* for the dimension of borehole heat exchanger systems were compared. The comparison shows a good agreement for the simulation of the long-term behaviour of borehole heat exchangers. However, differences appear due to the different treatment of the tubes at for short-term behaviour. An exact treatment of the position of the tubes inside a borehole is important to simulate exactly the temperature behaviour at operation start.

Sensitivity analyses are performed to investigate the influence of different parameters such as ground surface temperature or geology on the system performance. Especially, the ground surface temperature proved to be of mayor importance. Furthermore, the analyses show that the temperature dependence of thermal conductivity along a borehole heat exchanger can be neglected. Additionally, the gain in thermal energy due to ground water flow was investigated. The ratio of aquifer thickness to depth extend of a borehole heat exchanger was identified to have a main influence.

Finally, the influence of the depth extend of a borehole heat exchanger on thermal energy, the drilling costs, and pressure loss was investigated. Various plants with different amounts of boreholes but the same total borehole length are compared. The deep borehole heat exchanger systems operate more efficient than plants with several short borehole heat exchangers, if the pressure loss is optimised. Moreover, the installation costs are lower.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Vorwort

Die Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Geophysik der ETH Zürich und der NOK ermöglichte eine praxisorientierte und aber auch fundierte theoretische Durchführung des BFE-Projekts Nr. 39710 **Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge**. Die Grundlagen für dieses Projekt wurden mit finanzieller Unterstützung des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) erarbeitet. Die hier präsentierte Arbeit ist Teil des PSEL-Projektes Nr. 203 **Produktivitätsuntersuchung des System Erdwärmesonde mit Wärmepumpe.**

Durch die Begleitgruppe des BFE-Projekts war diese Arbeit zudem auf nationaler Ebene breit abgestützt. Ausserdem bot dieses Gremium die Möglichkeit zur Zusammenarbeit unter den auf diesem Gebiet tätigen Personen. So wurde bei der Analyse und Validierung des *EWS*-Programms mit Herrn Arthur Huber (Huber Energietechnik) zusammengearbeitet. Herr Ernst Rohner (Engeo AG) stellte seine Hilfe bei der Optimierung der Erdwärmesondenlänge, der Umsetzung des Messprogramms und bei der Registrierung von Erdwärmesonden-Betriebsdaten zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis

1 Projektziele 1

2 Vergleich von Software EWS und FRACTure 1

2.1 Zielsetzung 1

2.2 Software 1
2.2.1 FRACTure 1
2.2.2 EWS 3

2.3 Modellaufbau 5
2.3.1 Grundlagen 5
2.3.2 Modellaufbau FRACTure 6
2.3.3 Modellaufbau EWS 8

2.4 Ergebnisse 9
2.4.1 Langzeitverhalten 9
2.4.2 Kurzzeitverhalten 9

2.5 Diskussion 10

3 Sensitivitätsuntersuchung 11

3.1 Variation der Bodenoberflächentemperatur 11

3.2 Variation der Wärmeleitfähigkeit 13

3.3 Variation der Wärmekapazität 15

3.4 Variation des Sondendurchflusses 15

3.5 Zusammenfassung 17

4 Einfluss des Grundwassers 17

4.1 Einleitung 17

4.2 Modellannahmen 17

4.3 Resultate 18

4.4 Zusammenfassung 18

5 Optimierung der Sondenlänge 23

5.1 Ausgangslage 23

5.2 Vorgehen 23

5.3 Referenzgebäude 23

5.4 Dimensionierung der Sole-Umwälzpumpe 24

5.5 Installationskosten 27

5.6 Betriebsverhalten 28
5.6.1 Sonden im Abstand 5 m 28
5.6.2 Sonden im Abstand 7.5 m 29
5.6.3 Diskussion 29

5.7 Betriebskosten 30

5.8 Schlussfolgerungen 34

6 Ausblick 34

7 Symbolverzeichnis 35

8 Referenzen 36

Anhang 39

A. Wärmeleitfähigkeitsmessungen Erdwärmesonde Arnegg 41

B. Klimadaten 42

C. Leistungsdiagramm der Wämrepumpe 43

D. Auslegung der Hydraulik 44

E. Mittelwerte der Soletemperaturen 56

F. Installationskosten 57

1 Projektziele

Das BFE-Projekt Nr. 39710 **Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge** ist integraler Bestandteil des PSEL-Projektes Nr. 203 **Produktivitätsuntersuchung des System Erdwärmesonde mit Wärmepumpe** mit dem Ziel der Produktivitätserfassung und Optimierung des Gesamtsystems Erdwärmesonde mit Wärmepumpe.

Mit diesem Teilprojekt sollen einerseits anhand von Modellrechungen die Programme *FRACTure* und *EWS* verglichen werden. Anderseits wird der Einfluss verschiedener Parameter (wie Geologie, Grundwasser, u.s.w.) auf das Verhalten einer Erdwärmesonde mit dem Simulationsprogramm *FRACTure* untersucht. Als letztes wird der Einfluss der Sondenlänge bezüglich Wärmeeintrag, Bohrkosten und Druckverlust bei der Fluidzirkulation untersucht.

Geplant war, dass diese Arbeit auf Messdaten der Erdwärmesondenanlage Rohner, Arnegg, basiert. Da aufgrund technischer Probleme die Anlage erst Ende Frühling 2002 in Betrieb genommen werden konnte und somit nur wenige Messdaten bis Projektende vorhanden waren, musste eine theoretische Untersuchung durchgeführt werden. Dabei dienen die Anlagecharakteristiken der Erdwärmesondenanlage Arnegg als Grundlage. Seit Anfang der Heizperiode 02/03 werden nun kontinuierlich Daten registriert.

2 Vergleich von Software EWS und FRACTure

2.1 Zielsetzung

Die beiden Softwareprodukte zur Auslegung von Erdwärmesondenanlagen *FRACTure* und *EWS* sollen verglichen werden. Da ein Vergleich anhand realer Daten bis Projektende nicht möglich war (siehe Kapitel 1), werden die beiden Programme anhand einer Sprungfunktion untersucht. Dabei wird die Simulation des Langzeitverhaltens, als Indikator für den Sondenbetrieb, sowie des Anfahrverhaltens verglichen. (Die Auflistung der nachfolgend verwendeten Symbole findet sich in Kapitel 7.)

2.2 Software

2.2.1 FRACTure

FRACTure[1] (Flow, Rock And Coupled Temperature effects) ist in der Lage hydraulische und elastische Prozesse, sowie verschiedene Transportprozesse (thermische, radioaktive, Massen- und Stofftransporte) und deren Koppelung zu simulieren. *FRACTure* basiert auf der Methode der Finiten Elemente (FE). Der FE-Ansatz besitzt den Vorteil einer flexiblen Gittergestaltung und erlaubt dadurch komplexe geologische Strukturen sowie den Aufbau einer Sonde mit Rohrwand zu modellieren. In *FRACTure* sind verschiedene Zeitschrittverfahren von voll implizit, über Crank-Nicholson, zu explizit möglich.

Das Programm basiert auf der Wärmetransportgleichung, wobei getrennte Transportsysteme in fester und flüssiger Phase berücksichtigt werden. Die feste Phase wird als Gesteinsmatrix, die flüssige Phase als Grundwasser in Poren oder Klüften definiert:

Wärmetransportgleichung für die feste Phase:

$$\left[\rho \cdot c_p\right]_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla\left(\lambda_s \cdot \nabla T_s\right) + \alpha \cdot (v_f) \cdot A \cdot (T_f - T_s) + Q_s \qquad (1)$$

Wärmetransportgleichung für die flüssige Phase:

$$\left[\rho \cdot c_p\right]_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\left[\rho \cdot c_p\right]_f \cdot v_f \cdot \nabla T_f + \nabla\left(\lambda_f \cdot \nabla T_f\right) + \alpha \cdot (v_f) \cdot A \cdot (T_s - T_f) + Q_f \qquad (2)$$

In einem porösen Medium wird angenommen, dass $T_f = T_s$, so dass der Wärmeübergangsterm vernachlässigt werden kann. Die Gleichungen (1) und (2) können so mit Hilfe gemittelter Materialwerten als ein einziges System beschrieben werden:

Wärmetransportgleichung für Temperaturverteilung in einem gesättigten, porösem Medium:

$$\overline{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\left(\bar{\lambda} \cdot \nabla T\right) - \rho_f \cdot c_f \cdot v_D \cdot \nabla T + Q \qquad (3)$$

Die mit einem Querstrich gekennzeichneten Terme enthalten Werte aus beiden Phasen. Die einzelnen Parameter werden über die Porosität der Gesteinsmatrix gewichtet.

Der Grundwasserfluss ist in Gleichung 3 im konvektiven Term ($\rho_f \cdot c_f \cdot v_D \cdot \nabla T$) berücksichtigt. Zur Beschreibung des Grundwasserflusses wird meist das Darcy-Gesetz[2] verwendet. Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen dem herrschenden hydraulischen Gradienten und der mittleren Fluidgeschwindigkeit (Darcy-Geschwindigkeit). Das Darcy-Gesetz gilt jedoch nur bei laminarem Fliessen. Das Fliessen wird gemäss Darcy-Gesetz wie folgt beschrieben, wobei das hydraulische Druckpotential h_g als Meter Wassersäule über dem hydrostatischen Druck P angegeben wird:

$$v_D = -K \cdot \nabla h_G \qquad (4)$$

Im Fall einer Erdwärmesondenberechnung gilt für die Wärmetransportgleichung:

Wärmetransportgleichung für einer Fall einer Erdwärmesonde:

$$\left[\rho \cdot c_p\right]_{rohr} \cdot \frac{\partial T_r}{\partial t} = \nabla\left(\lambda_{rohr} \cdot \nabla T_{rohr}\right) + \alpha \cdot (v_f) \cdot A \cdot (T_f - T_{rohr}) + Q_s \qquad (5)$$

Im Gegensatz zu porösen Medien kann der Wärmeübergangsterm hier nicht vernachlässigt werden. Entlang der Rohrwand treffen zwei unabhängige thermische Regime auf engem Raum aufeinander. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Temperatur des Sondenfluids und der Verrohrung unterschiedlich ist. Die Software *FRACTure* behandelt hier den Wärmeübergang wie einen Widerstand. Dieser thermische Widerstand wird über eine angepasste Wärmeleitfähigkeit λ' für die Rohrwand berücksichtigt:

$$\lambda' = \frac{\Delta x \cdot \alpha \cdot \lambda_{Rohr}}{\Delta x \cdot \alpha + \lambda_{Rohr}} \qquad (6)$$

wobei der Wärmeübergangskoeffizient α folgendermassen definiert ist:

$$\alpha = \frac{\lambda_{Fluid} \cdot Nu}{d} \qquad (7)$$

Für laminares Fliessen kann die Nusselt Zahl, Nu, anhand der Prandtl Zahl, Pr, und der Reynoldszahl, Re, berechnet werden:

$$Nu = 1.86 \cdot \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot d}{H}\right)^{1/3} \qquad (8)$$

Für hoch turbulentes Fliessen innerhalb der Sondenrohre gilt nach Bennett und Myers[3]:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \qquad (9)$$

Bei vollständig ausgebildeter Strömung innerhalb eines Rohrs ist die Reynoldszahl, Re, definiert als:

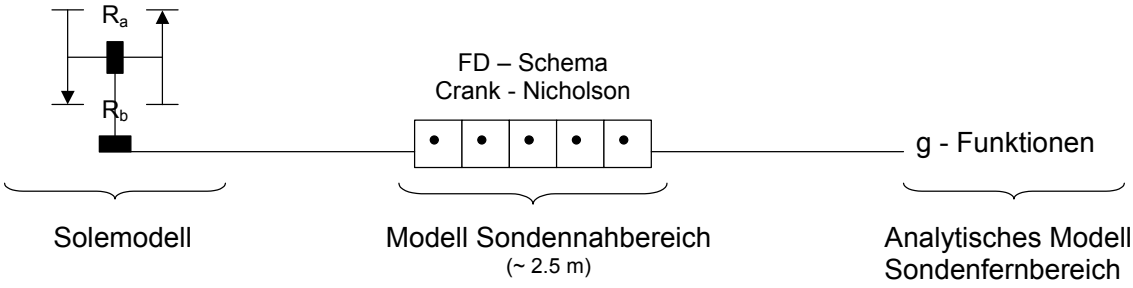
$$\mathrm{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} \qquad (10)$$

Allgemein beschreibt Re > 10^4 vollständig ausgebildetes turbulentes Fliessen, 10^4 > Re > 2300 definiert den Übergangsbereich zwischen turbulentem und laminarem Fliessen und bei Re < 2300 herrscht laminares Fliessen.

FRACTure wird auch für die nachfolgende Sensitivitätsuntersuchung (Kapitel 3) sowie Modellierungen zum Einfluss des Grundwassers auf die Kälteleistung einer Erdwärmesonde (Kapitel 4) verwendet.

2.2.2 EWS

Das Programm-Modul *EWS*[4],[5] wurde zur Simulation von einzelnen Erdwärmesonden und Sondenfeldern über beliebig lange Zeiträume entwickelt. Dabei wird der Untergrund in ein Solemodell, in den Sondennah- und den Sondenfernbereich eingeteilt (vergleiche Figur 1). Hier wird kurz auf die wichtigsten physikalischen Grundlagen eingegangen. Eine detaillierte Beschreibung ist in Huber und Schuler[4] und Huber und Pahud[5] zu finden.



Figur 1: Schematische Übersicht über den Aufbau des Programms EWS. Der Untergrund wird für die Modellierung in drei Bereiche „Sole – Sondennahbereich – Sondenfernbereich" unterteilt.

Im Sondennahbereich (ohne Sondenfluid) wird das Verhalten des Erdreiches entsprechend der Gleichung 3 ohne Konvektionsterm modelliert. Die räumliche Diskretisierung wird mit einem zylindersymmetrischen Finite Differenzen (FD) Schema durchgeführt. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt nach dem Crank-Nicholson-Ansatz. Berechnungen von Eskilson[6] zeigen, dass bei Sonden von über 100 m Länge die vertikale Wärmeleitung im Sondennahbereich (< 3 m Abstand von der Sonde) nicht ins Gewicht fällt. Wird die vertikale Wärmeleitung vernachlässigt, kann die Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten schichtweise 1D gelöst werden, dadurch können im *EWS* auch Schichten mit unterschiedlichen Gesteinseigenschaften berücksichtigt werden.

Das Sondenfluid selbst wird in einem rein expliziten Zeitschrittverfahren berechnet. Dabei werden die zwei Sondenrohre mit gleicher Fliessrichtung zu einem zusammengefasst. Aus der Energiebilanzierung ergibt sich für die Temperatur das absinkende Sondenfluid Tdown_i:

$$\mathrm{Tdown}_{t+1,i} = \mathrm{Tdown}_{t,i} + (\mathrm{Tdown}_{t+1,i-1} - \mathrm{Tdown}_{t,i})\frac{L_0 dt2}{m\,cp} + (\mathrm{TEarth}_{t,i,1} - \mathrm{Tdown}_{t,i})\frac{L_1 dt2}{2\,m\,cp} \qquad (11)$$

Entsprechend wird die Temperatur für das aufsteigende Sondenfluid Tupi berechnet:

$$\mathrm{Tup}_{k+1,i} = \mathrm{Tup}_{k,i} + (\mathrm{Tup}_{k+1,i-1} - \mathrm{Tup}_{k,i})\frac{L_0 dt2}{m\,cp} + (\mathrm{TEarth}_{k,1+\mathrm{DimAxi}-i,1} - \mathrm{Tup}_{k,i})\frac{L_1 dt2}{m\,cp} \qquad (12)$$

Allgemein wird angenommen, dass der Wärmeaustausch zwischen ab- und aufsteigendem Sondenfluid immer über die Hinterfüllung gekoppelt ist. Diese Koppelung wird mit einem Masseknoten T_{Earth} dargestellt (Figur 1). Weiter werden folgende Annahmen für die Berechnung getroffen:

- Die Eintrittstemperatur Tsink entspricht der Temperatur im ersten Sondenelement
- Temperatur am Sondenfuss wird vom absteigenden ins aufsteigende Rohr übergeben
- Temperatur im obersten Element des aufsteigenden Rohrs ist die Austrittstemperatur TSource

Identisch zu *FRACTure* wird in *EWS* an der Grenze zwischen Sondenfluid und Rohrwand ein Wärmeübergang definiert (Gleichung 7). Beim Stillstand der Sonde erfolgt dieser ausschliesslich konduktiv durch Wärmeleitung.

Der Sondenfernbereich (ab 2.5 m) wird mit analytischen Methoden berechnet. Die hier verwendeten g-Funktionen[6] (dimensionslose Temperatursprungantworten bei konstanter Entzugsleistung) müssen für bestimmte Sondengeometrien individuell bestimmt werden. Bei variabler Entzugsleistung werden die g-Funktionen superponiert, als Summe verschiedener Entzugsleistungen berechnet. Mit den g-Funktionen wird zudem die Temperatur an der seitlichen Berandung zum Sondennahfeldes bestimmt, die als Randbedingung für die Berechnung der Temperaturverteilung im Sondennahfeld dient. Die Temperaturabsenkung einer Sprungfunktion g ist wie folgt definiert:

$$g(Es, \frac{r_b}{H}) = \frac{\Delta T \cdot 2\pi \cdot \lambda_{Erde}}{j} \tag{13}$$

Die g-Funktionen sind sowohl von der Zeit, als auch von der Sondengeometrie abhängig. Angemerkt sein, dass das g-Funktionen-Konzept für alle Bohrlochkonfigurationen angewendet werden kann[6].

Die Temperatur im Erdreich wird als Temperaturdifferenz ΔT zur ungestörten Temperatur, T_m, berechnet. Für die Bohrlochtemperatur am Bohrlochrand, T_b, gilt:

$$T_b = T_m - \frac{j}{2\,\pi\,\lambda}\; g(Es, r_b/H) \tag{14}$$

Für die Temperaturberechnung in beliebigem Abstand zur Sonde ist die g-Funktion dann folgendermassen definiert ist:

$$g(Es, \frac{r_m}{H}) = g(Es, \frac{r_b}{H}) - \ln(\frac{r_m}{r_b}) \tag{15}$$

In *EWS* sind zwei Betriebsarten möglich:

- Vorgabe der Eintrittstemperatur in die Sonde: Anwendbar für Heizen und Kühlen
- Vorgabe Entzugleistung in der Wärmepumpe

Im *EWS* ist es möglich, intern unterschiedliche Zeitschritte zu definieren. Das Sondenfluid wird in Minuten- und der Sondennahbereich in Stundenschritten berechnet. Sofern der Sondennahbereich grösser als 1 m ist, reicht für den Sondenfernbereich eine Berechnung pro Woche[4]. Sensitivitätsuntersuchungen[4] zeigen weiter, dass ein Simulationsradius für den Sondennahbereich von 2.5 m mit einer radialen Unterteilung in fünf Abschnitte für eine Modellierung ausreicht, was bei den nachfolgenden Berechnungen beibehalten wird.

Als Startwert für eine Simulation wird die ungestörte Temperatur vorgegeben, die aus der Oberflächentemperatur und dem Temperaturgradient berechnet wird. Die Oberflächentemperatur bleibt über die ganze Simulationsperiode konstant.

Der Bohrradius und die Verrohrung einer Sonde sind frei definierbar, können aber mit der Tiefe nicht variiert werden. In vertikaler Richtung können 10 horizontale Schichten mit unterschiedlichen Stoffparametern definiert werden, wobei die Schichten die gleiche Mächtigkeit haben. Fallen mehrere geologische Einheiten in eine der Modellschichten, ist der Mittelwert dieser Stoffparameter zu bilden.

Die Eigenschaften des Untergrundes sind durch die Wärmekapazität am Massenpunkt, sowie die thermische Leitfähigkeit zwischen zwei Massenknoten, als Kehrwert des thermischen Widerstandes, berücksichtigt (siehe Figur 2). Für den thermischen Widerstand zwischen den Massenknoten mit den Radien r_i und r_j gilt:

$$R = \frac{1}{2\pi dl\lambda} \ln \frac{r_j}{r_i} \tag{16}$$

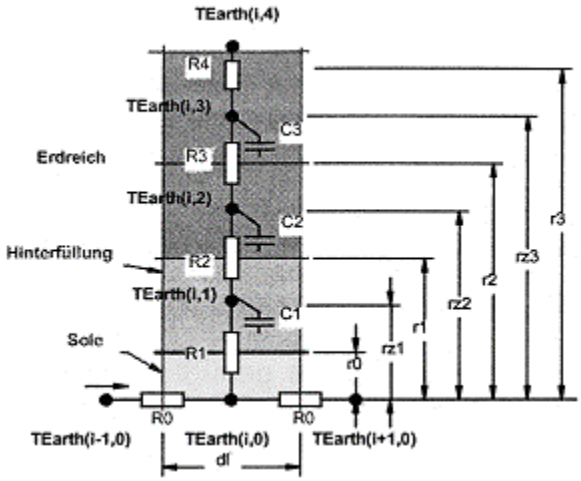
Die Widerstände für die Übergangsfläche zwischen den einzelnen Rechenelementen in Figur 2 werden addiert. Da es strenggenommen unmöglich ist, die 3D Situation einer Doppel-U-Sonde durch die 1D Wärmeleitungsgleichung zu beschreiben, werden oft ein „internal thermal resistence“, R_a, zur Beschreibung des thermischen Widerstandes zwischen dem ab- und aufströmenden Sondenfluid, und

ein „borehole thermal resistence“, R_b, für den Widerstand zwischen Sondenfluid und Hinterfüllung, eingeführt :

$$R_a = 4 \cdot dl \cdot R_1 \tag{17}$$

$$R_b = \frac{dl\left(T_{Sole} - T_b\right)}{j} = R_1 dl + \frac{1}{2\pi\lambda_{Fill}} \ln\frac{r_1}{rz_1} \tag{18}$$

Es wird sich zeigen, dass diese zwei Widerstände für die Modellierung sehr wichtig sind.



Figur 2: Aufbau des Rechengitters mit der Bezeichnungskonvention der einzelnen Radien r_j, Wärmekapazitäten C_j und thermische Widerstände R_j. Als Kreise sind die Massenschwerpunkte eingetragen[4].

2.3 Modellaufbau

2.3.1 Grundlagen

Als Ausgangsmodell werden die Anlagecharakteristiken der Erdwärmesonde Rohner in Arnegg verwendet. Es handelt sich um eine Standard-Doppel-U-Rohr-Sonde mit einer Tiefe von 265 m. Der äussere Durchmesser der Rohre beträgt 40 mm, der innere 36.2 mm. Der Durchmesser der Bohrung ist 135 mm. Die Anlage wird mit Wasser betrieben, dabei beträgt der gemessene Durchfluss im Schnitt 4342 l pro Stunde. Der momentane Heizbedarf des Objektes beträgt 9 kW, im Endausbau werden 12 kW benötigt.

Für die Modellierung wird ein homogener, isotroper Untergrund angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit des Umgebungsgesteins wurde anhand von Messungen an Proben aus der Bohrung Arnegg (Siehe Anhang A) und unter der Annahme einer Porosität von 5 % festgelegt. Die Wärmkapazitäten wurden anhand von Referenzdaten abgeschätzt. Der Wärmefluss, der Temperaturgradient und die Oberflächentemperatur wurden aufgrund von Temperaturmessungen in der Anlage Arnegg bestimmt. Simuliert wird eine Sprungfunktion mit konstantem Betrieb über ein Jahr. Dabei wird die Sondeneintrittstemperatur konstant bei 1 °C gehalten. Die Materialparameter und die Randbedingungen für die durchgeführten Modellierungen, nachfolgend Rechenlauf „EWS“ genannt, sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt. Dieses Modell ist die Basis für alle nachfolgenden Rechenläufe und dient als Referenzmodell für die Sensitivitätsuntersuchungen in Kapitel 3 und 4.

Tabelle 1: Materialparameter für den Rechenlauf „EWS“

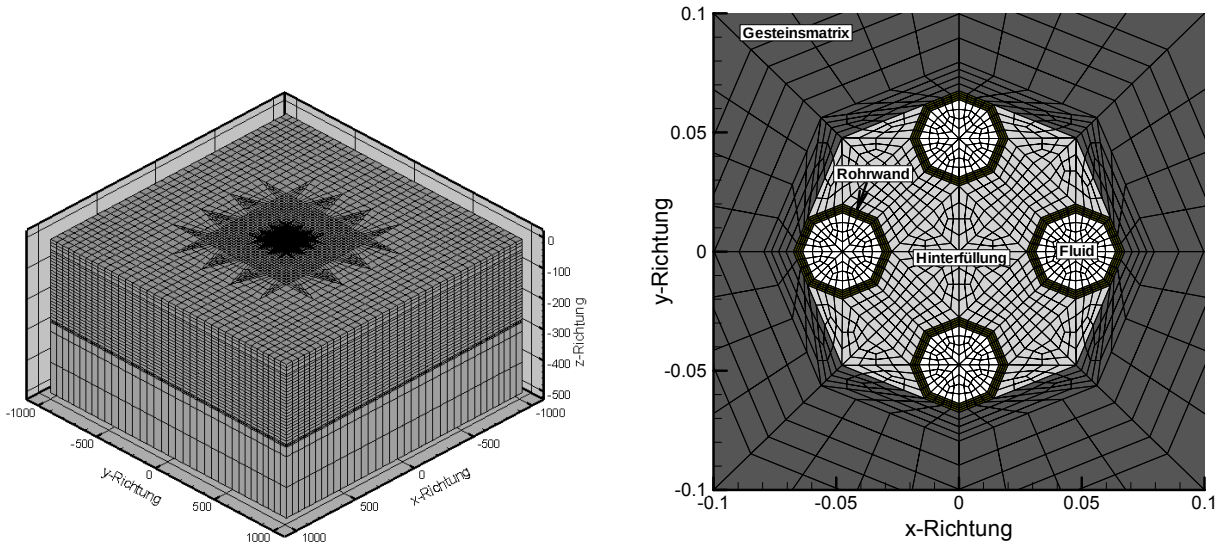
Materialparameter	Wärmeleitfähigkeit [$Wm^{-1}K^{-1}$]	Wärmekapazität [$Jm^{-3}K^{-1}$]
Gestein	2.65	$2.55\ 10^6$
Rohr	0.42	$2.00\ 10^6$
Hinterfüllung	0.81	$1.62\ 10^6$
Sondenfluid (Wasser)	0.6	$4.18\ 10^6$

Tabelle 2: Simulationsbedingungen für den Rechenlauf „EWS“

Betriebsdauer	•	Konstanter Betrieb über ein Jahr (Sprungfunktion)
Randbedingungen	•	Konstanter Basiswärmefluss q_b= 80 mWm^{-2} (aus q_b und der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins ergibt sich ein Temperaturgradient von 28 °C km^{-1})
	•	Konstante Temperatur an der Oberfläche T_0= 10 °C
	•	Eintrittstemperatur des Sondenfluids in die Sonde T_{in}= 1 °C
	•	Durchfluss pro Sondenrohr q= 4342 l h^{-1} (= 0.72 m s^{-1}; = 1.2 kg s^{-1})

2.3.2 Modellaufbau FRACTure

Als Simulationsgitter wird für *FRACTure* ein 3D-Modell verwendet (Siehe Figur 3). An den Seitenrändern findet kein thermischer Austausch statt. Um mögliche Randeffekte ausschliessen zu können, müssen die Ränder einen genügend grossen Abstand zur Sonde aufweisen. Mehrere Diplomarbeiten[7],[8],[9] zeigen, dass eine Gitterdimension von 2000 x 2000 x 1000 m dafür vollkommen ausreicht.

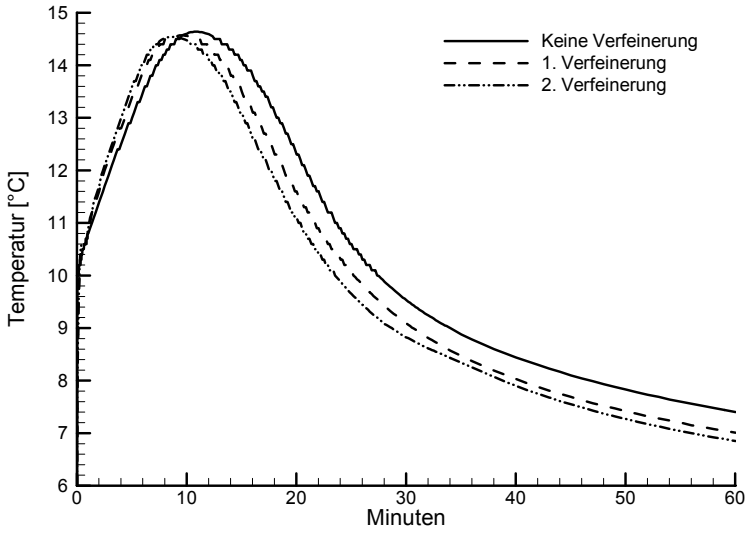


Figur 3: Gitteraufbau, der für die nachfolgenden Modellierungen verwendet wird. Links ist die Diskretisierung der Sonde mit Hinterfüllung und Rohrwand aufgezeigt. Die Sondenrohre liegen peripher an der Aussenwand der Bohrung.

Das Modell ist aus 29 horizontalen Schichten aufgebaut (siehe Figur 3). Deren Abstand beträgt 25 m, mit starken Verfeinerungen am Sondenfuss (mm-Abstände) und an der Erdoberfläche (m-Abstände). Die Sondenrohre sind peripher angeordnet (siehe Figur 3 rechts). Für eine genaue Temperaturverteilung ist ein feines Maschengitter um die Erdwärmesonde nötig. Die benötigte Maschenverfeinerung wurde anhand einer Sensitivitätsstudie basierend auf dem Rechenlauf „EWS“ ermittelt. Ein Grundgitter (25’640 Knoten) wurde dafür zweimal verfeinert. Tabelle 3 vergleicht die Sondenaustrittstemperaturen am Ende der Sprungfunktion nach einem Jahr. Ab der ersten Verfeinerung sind die modellierten Temperaturen fast identisch. Auch für die Modellierung des Anfahrverhaltens ist ein feines Maschengitter sehr wichtig. Figur 4 zeigt, dass der Anfahrpeak für das Modell ohne Verfeinerung gegenüber den verfeinerten Modellen leicht phasenverschoben erscheint. Bei den verfeinerten Modellen erscheint der Peak ungefähr zur gleichen Zeit, mit einem Unterschied von nur 30 Sekunden. Figur 4 zeigt auch, dass die Höchsttemperaturen nicht nach der halben Ausstosszeit von 6.1 Minuten erreicht werden, sondern erst nach 8.7 Minuten. Dies ist auf 3D-Effekte im Sondenrohr zurückzuführen. So gibt das Sondenfluid vom Sondenfuss beim Aufsteigen Wärme an die Rohrwand ab und wird dadurch abgekühlt. Das nachfliessende Fluid aus dem absteigenden Rohr kann sich an dieser Wand im aufsteigenden Rohr zusätzlich aufwärmen, weshalb die Höchsttemperaturen zeitlich leicht verzögert erscheinen. Um die Temperaturverteilung und das Anfahrverhalten exakt abbilden zu können, wird für die nachfolgenden Modellierungen das 2-fach verfeinerte Gitter (399’933 Knoten) verwendet, dargestellt in Figur 3.

Tabelle 3: Vergleich der Austrittstemperatur nach einem Jahr bei verschieden Verfeinerungen des Modellgitters, basierend auf den Annahmen des Rechenlaufs „EWS“ (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

	Austrittstemperatur[°C]
Ausgangsmodell (25’640 Knoten)	2.97
1. Verfeinerung (100’677 Knoten)	2.87
2. Verfeinerung (399’933 Knoten)	2.84



Figur 4: Anfahrverhalten einer Erdwärmesonde in Abhängigkeit der Gitterverfeinerung. Die Simulation basiert auf den Annahmen des Rechenlaufs „EWS“ (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

2.3.3 Modellaufbau EWS

Die notwendige radiale Verfeinerung[4] für eine EWS-Simulation wurde in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Die benötigte vertikale Gitterverfeinerung wird hier basierend auf den Annahmen des Rechenlaufs „EWS“ bestimmt. Dazu wird die Anzahl der homogenen, horizontalen Schichten im EWS-Gitter schrittweise von 1 auf 10 erhöht und jeweils die Austrittstemperaturen nach einer und nach zwei Stunden Betrieb verglichen. Die Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die Abweichungen bezogen auf das genauste Ergebnis, den 10-Schichtenfall.

Tabelle 4 zeigt, dass sich die Austrittstemperaturen des 1 Schichten- und des 10 Schichtenfalles nach einer Stunde Betrieb um rund 20 % unterschieden. Ab 7 Schichten liegt die Abweichung unter 0.1 °C. Beim Einschichtenfall repräsentiert die berechnete Austrittstemperatur die Mitteltemperatur über die gesamte Sonde, wohingegen die Temperatur im 10-Schichtenfall die Mitteltemperatur der obersten Schicht (hier 26.5 m) wiedergibt. Nach zwei Stunden Betrieb (Tabelle 5) haben sich die Abweichungen bereits deutlich reduziert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Sondenfluids bereits mehrfach umgewälzt wurden und die Temperatur sich einem konstanten Wert nähert. Für den nachfolgenden Vergleich mit *FRACTure* wird ein 10-Schichtenmodell verwendet.

Tabelle 4: Vergleich der Austrittstemperaturen nach einer Stunde Betrieb für eine unterschiedliche Anzahl horizontaler Schichten. Die Simulationen basieren auf den Annahmen des Rechenlaufs „EWS“ (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

Anzahl Schichten	Austrittstemperatur	Abweichung	
	[°C]	[°C]	%
1	8.06	0.75	10.3
2	7.90	0.60	8.2
3	7.75	0.44	6.0
4	7.62	0.32	4.3
5	7.53	0.22	3.0
6	7.45	0.14	2.0
7	7.38	0.08	1.1
8	7.33	0.02	0.3
9	7.32	0.01	0.1
10	7.31	-	-

Tabelle 5: Vergleich der Vorlauftemperaturen nach zwei Stunden Betrieb für eine unterschiedliche Anzahl horizontaler Schichten. Die Simulationen basieren auf den Annahmen des Rechenlaufs „EWS“ (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

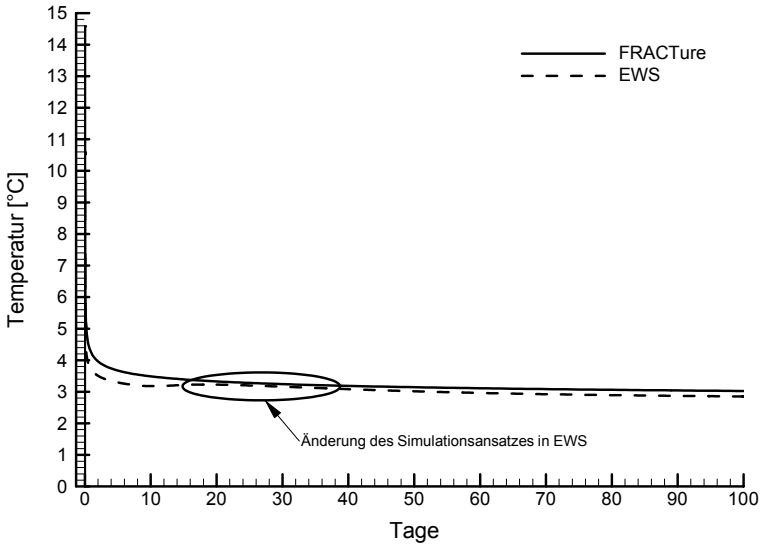
Anzahl Schichten	Vorlauftemperatur	Abweichung	
	[°C]	[°C]	%
1	4.98	0.20	4.2
2	4.94	0.16	3.4
3	4.90	0.12	2.6
4	4.87	0.09	1.9
5	4.84	0.06	1.3
6	4.82	0.04	0.9
7	4.80	0.02	0.5
8	4.78	0.00	0.1
9	4.78	0.00	0.0
10	4.78	-	-

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Langzeitverhalten

Mit dem Vergleich der Sondenaustrittstemperaturen für den Rechenlauf „EWS“ (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2) nach einem Jahr wird das Verhalten der beiden Programme für die Betriebsphase einer Sonde untersucht. Figur 5 zeigt die modellierten Sondenaustrittstemperaturen über die ersten 100 Stunden. Beim Anfahren kann kurzfristig eine Temperatur von über 14 °C gefördert werden. Diese nimmt relativ schnell ab und strebt einem konstanten Wert zu. Nach 100 Stunden liefern die beiden Programme nahezu identische Werte von 3.02 °C im Falle der *FRACTure*-Modellierung und von 2.85 °C bei EWS. Dieser minimale Unterschied von nur 0.17 °C ändert sich mit der Zeit nicht mehr und bleibt auch nach einem Jahr bestehen (2.84 °C gegenüber 2.67 °C). Bei einer maximalen Sondenaustrittstemperatur von über 14 °C und einer Inputtemperatur von 1 °C entspricht dies einem relativen Fehler von ~1 %. Beide Programme simulieren somit das Verhalten einer Erdwärmesonde während der Betriebsphase in vergleichbarer Weise. Dabei ist der Zeitaufwand für die *EWS*-Simulation bedeutend geringer.

Zwischen 15 und 40 Tagen zeigt die EWS-Berechnung eine leichte Temperaturzunahme (vergleiche Figur 5). In EWS wird die Temperaturverteilung im Sondennah- und Sondenfernfeld durch unterschiedliche Ansätze modelliert. Ab ungefähr 15 Tagen ist das Verhalten einer Erdwärmesonde nur noch durch das Fernfeld bestimmt. Die Änderung des Simulationsansatzes zeigt sich hier in den kurzfristig ansteigenden Temperaturen.



Figur 5: Langzeitverhalten einer Erdwärmesonde simuliert mit den Programmen EWS und FRACTure. Die Simulationen basieren auf den Annahmen des Rechenlaufs „EWS“ (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

2.4.2 Kurzzeitverhalten

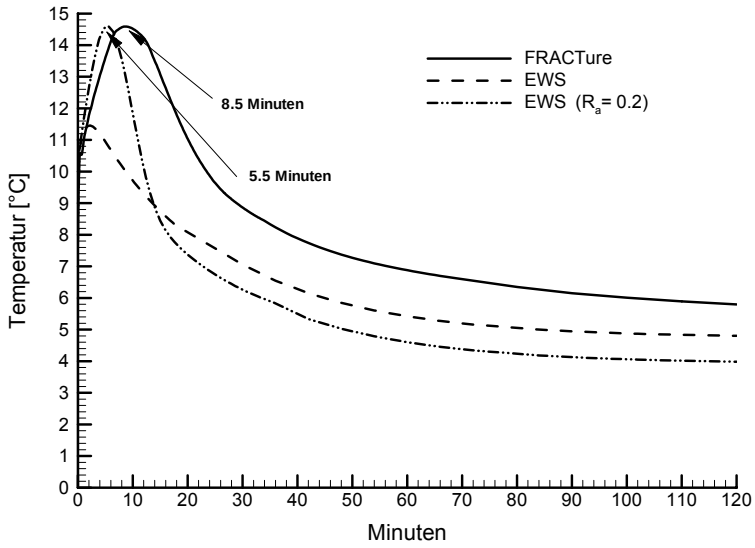
Für den Vergleich des Kurzeitverhaltens anhand des Anfahrens einer Erdwärmesonde sind deutlich grössere Unterschiede zu erwarten, da mit zwei grundlegend unterschiedlichen Codes modelliert wird. So wird im Programm *EWS* die Wärmeleitungsgleichung pro Schicht horizontal 1D gelöst. Vertikale Temperaturänderungen werden dadurch ignoriert. Weiter werden für die Simulation des Sondenfluids die Sondenrohre zusammengefasst und die Sondenaustrittstemperatur entspricht der durchschnittlichen Temperatur in der obersten Gitterschicht. Demgegenüber wird die Wärmeleitungsgleichung im *FRACTure* in 3D für ein komplexes FE-Gitter gelöst und die Fluidzirkulation wird in jedem Rohr separat betrachtet. Dabei ist die Berechnung der Temperaturverteilung sehr sensitiv auf die Gitterverfeinerung (vergleiche Kapitel 2.3.2). Für die Modellierung des Kurzzeitverhaltens sind somit nicht in allen Details übereinstimmende Resultate zu erwarten.

Insbesondere ein Vergleich der Programme anhand des R_a-Wertes (vergleiche Gleichung 13) ist aufgrund des komplexen 3D FE-Gitters im Fall *FRACTure* nicht möglich. Die R_b-Werte sind einfach vergleichbar (vergleiche Gleichung 14) und betragen für den Rechenlauf „EWS“ (Modellannahmen siehe

Tabelle 1 und Tabelle 2) im Falle von *FRACTure* 0.09 und für *EWS* 0.07 K $m^{-1}W^{-1}$. Im *EWS*-Modell kann somit die Energie aus dem Untergrund grundsätzlich besser abgeführt werden, jedoch herrscht aufgrund des kleinen R_a-Wertes von 0.03 K $m^{-1}W^{-1}$ ein sehr guter Kontakt zwischen ab- und aufsteigendem Sondenfluid. Sobald das aufsteigende Fluid auf die absteigende Kaltfront trifft (nach ca. 3 Minuten), kommt es zum Energieaustausch und der Anfahreffekt verwischt, illustriert durch die Kurve „EWS“ in Figur 6. Dieser Fall widerspiegelt eng nebeneinander liegende Sondenrohre. Demgegenüber liegen die Sondenrohre im *FRACTure*-Gitter an der Bohrlochwand und die Kurve „FRACTure“ zeigt für die selben Inputparameter einen deutlichen Anfahrpeak. Um das Anfahren auch mit *EWS* abbilden zu können, muss das aufsteigende Fluid vom absteigenden isoliert werden, durch eine Erhöhung des Widerstands R_a auf 0.2 K $m^{-1}W^{-1}$. Dies ist gleichbedeutend mit einer peripheren Lage der Sondenrohre. Dies hat allerdings einen anschliessenden Temperaturabfall zur Folge (siehe Figur 6), da die Energie aus der Umgebung schlechter vom Sondenfluid aufgenommen werden kann, was zu langfristig tieferen Fördertemperaturen führt. Die 3D-Effekte in der Sonde, die sich im leicht verzögerten Auftreten des Anfahrpeaks zeigen (vergleiche Kapitel 2.3.2), sind mit dem 1D-Ansatz für die Sondenfluidzirkulation in *EWS* nicht möglich.

Durch Variation von R_a und R_b könnten in *EWS* also relativ einfach unterschiedliche Sondenrohrkonfiguration simuliert werden. Ähnliche Modellierungen sind mit *FRACTure* nur mit einem grossen Aufwand möglich, da für jeden individuellen Fall eine neue FE-Diskretisierung nötig ist.

Für den Vergleichsfall aus dem oberen Kapitel zeigen sich also für das kurzzeitige Verhalten deutliche Unterschiede in den ersten 30 Minuten (siehe Figur 6). Es wurde abgeschätzt, dass der Temperaturunterschied zwischen den Kurven „FRACTure“ und „EWS“ einem Energieunterschied von 8 kWh entspricht. Dieser Energiezugewinn beim Anfahren ist nur bei häufigem Takten wichtig. Bei längeren Laufzeiten fällt dies nicht ins Gewicht, so ist auch der Gesamtenergieentzug über den ganzen Rechenlauf „EWS“ für beide Fälle praktisch identisch.



Figur 6: Anfahrverhalten einer Erdwärmesonde simuliert mit den Programmen EWS und FRACTure. Die Simulationen basieren auf den Annahmen des Rechenlaufs „EWS“ (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

2.5 Diskussion

EWS und *FRACTure* sind zwei grundsätzlich verschiedene Codes. *EWS* teilt den Untergrund für die Simulation von Erdwärmesonden in einen Sondennah- und Sondenfernbereich ein. Im Sondennahbereich wird die Wärmeleitung pro horizontale Schicht 1D gelöst, wobei vertikale Effekte ignoriert werden und die Temperatur innerhalb der Schichten konstant bleibt. Im Sondenfernbereich werden g-Funktionen verwendet. Für die Zirkulation in den Sonden werden die Sondenrohre durch ein einzelnes Rohr angenähert. Demgegenüber berücksichtigt *FRACTure* jedes Sondenrohr separat und die Wärmeleitungsgleichung wird für ein komplexes 3D Modell gelöst.

Der Vergleich von *EWS* und *FRACTure* zeigt für die Simulation des Langzeitverhaltens von Erdwärmesonden nahezu identische Resultate, mit einem gleichen Gesamtenergieentzug über die ganz Simulationsperiode. *EWS* liefert schnell gute Ergebnisse. Demgegenüber ist die Erstellung eines Modellgitters in *FRACTure* sehr zeitintensiv und die Software deshalb für die Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen in der Praxis nicht anwendbar. *FRACTure* ermöglicht aber durch die flexible Gestaltung des Gitters und der Variationsmöglichkeit aller Modellparameter die Modellierung von Spezialfällen, wie zum Beispiel Erdwärmekörbe.

Im Kurzzeitverhalten zeigen die beiden Programme deutliche Unterschiede. *FRACTure* bildet einen Anfahrpeak gut nach, dabei werden die Sondenrohre aber an der Aussenwand der Bohrung angenommen. Die Simulation des Anfahrverhaltens ist mit EWS nur mit einer starken Erhöhung des R_a-Widerstands möglich, was allerdings für das Langzeitverhalten bedeutet, dass die Wärme aus dem umgebenden Gestein schlecht nachfliessen kann. Auch kann der 1D-Ansatz für die Berechnung des Sondenfluids in *EWS* das Erscheinen des Anfahrpeaks nicht exakt nachbilden.

Eine exakte Berechnung der Austrittstemperaturen beim Anfahren einer Anlage könnte vor allem bei häufigem Takten einen grossen Einfluss haben, allerdings nur bei grösseren Betriebspausen zwischen den Anfahrten. Um solche Anlagen mit *EWS* exakt simulieren zu können, müssen die R_a und R_b-Widerstände genau bekannt sein. Sie repräsentieren die Lage der Rohre in der Sonde und ihr Werte könnten anhand von Temperaturverläufen beim Anfahren einer Erdwärmesonde geeicht werden. Die Messeinrichtung der Anlage Arnegg erlaubt eine genaue Registrierung eines solchen Datensatzes. Die so ermittelten Werte wären zwar spezifisch für diese Anlage ausgelegt, doch könnte so ihre Grössenordung besser abgeschätzt werden. *FRACTure* braucht für das exakte Simulieren des Anfahrens ebenfalls die genaue Lage der Sondenrohre, was auch mit diesen Messwerten abgeschätzt werden könnte. Eine Studie über den Einfluss der Lage von Sondenrohren auf die Kälteleistung ist momentan am Institut für Geophysik der ETH Zürich in Bearbeitung.

3 Sensitivitätsuntersuchung

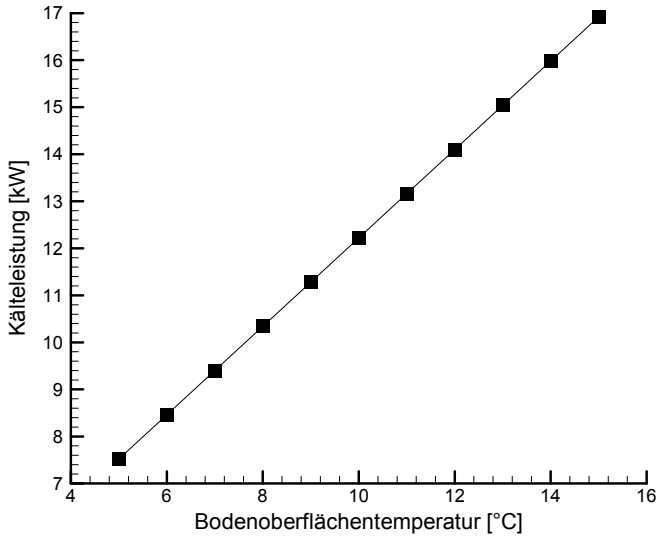
Durch eine Sensitivitätsstudie soll der Einfluss verschiedener thermischer und hydraulischer Parameter auf die Kälteleistung einer Erdwärmesonde untersucht werden. Als Kälteleistung wird die thermische Leistung, die mit einer Erdwärmesonde gefördert wird, bezeichnet. Eine ähnliche Untersuchung zum Einfluss von klimatischen und geologischen Aspekten wurde von Stalder et al.[10] durchgeführt.

Unsere Sensitivitätsuntersuchungen wird mit dem Programm *FRACTure* basierend auf den für den Rechenlauf „EWS“ getroffenen Annahmen (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2) und dem Modellgitter aus Kapitel 2.3.2 durchgeführt, mit dem Unterschied, dass hier von einem konstanten Betrieb von 1800 Stunden pro Jahr gerechnet wird. Variiert wird jeweils nur ein Parameter, wobei die Berechnung basierend auf den Annahmen in Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 Stunden als Referenzmodell dient. Verglichen wird dabei die während 1800 Stunden erbrachte mittlere Kälteleistung für die unterschiedlichen Simulationsschritte.

Durch einen konstanten Betrieb während 1800 Stunden wird der Untergrund überdurchschnittlich abgekühlt. Diese Sensitivitätsstudie dient aber nicht der Bestimmung der effektiven Leistung, sie soll lediglich den Einfluss der einzelnen Parameter auf das System aufzeigen. Die nachfolgend gezeigten Resultate sind nur für diese hier verwendete, spezielle Anlage und den in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführten Annahmen gültig.

3.1 Variation der Bodenoberflächentemperatur

Als Erstes wird der Einfluss der mittleren jährlichen Bodenoberflächentemperatur (BOT) auf die Kälteleistung untersucht. Dazu wird die BOT zwischen 5 und 15 °C in 1 °C-Schritten variiert. Dies entspricht in der Schweiz ungefähr einem Höhenbereich zwischen 200 und 1800 m.ü.M.[11].



Figur 7: Abhängigkeit der Kälteleistung von der Oberflächentemperatur. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

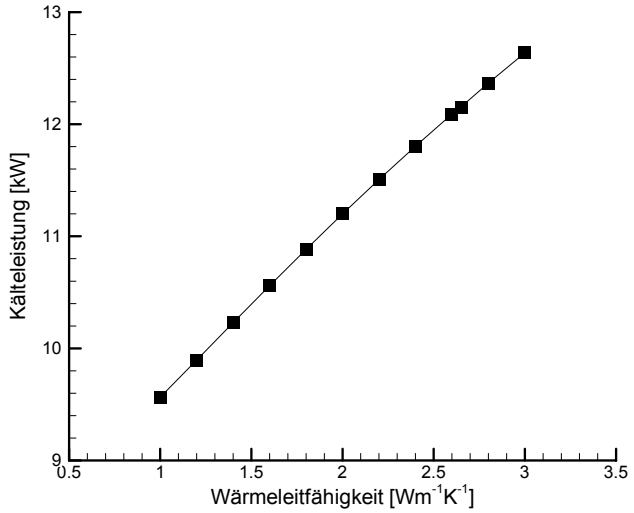
Wie Figur 7 und Tabelle 6 zeigen, nimmt die Kälteleistung linear mit der BOT zu. Bei einem Anstieg von 1 °C erhöht sich die Kälteleistung um 0.94 kW. Der Vergleich der Kälteleistungen bei 10 °C und bei 5 °C zeigt, dass die Anlage bei tieferer BOT eine um fast 40 % geringere Leistung bringt. In der Schweiz ist die Variabilität der BOT aufgrund grosser topografischer Unterschiede sehr hoch und die genaue Kenntnis der BOT somit wichtig für die Bestimmung des nutzbaren Wärmeinhaltes im Untergrund. Dieses Resultat unterstreicht die Notwendigkeit einer fachgerechten Planung von Erdwärmesonden vor allem in höheren Lagen, wo die geringere Leistung mit höherer Sondenlänge kompensiert werden muss[10]. Eine aktuelle Untersuchung der BOT-Verteilung in der Schweiz ist in Signorelli und Kohl[11] zu finden.

Tabelle 6: BOT, die dazugehörigen Kälteleistung und deren Zuwachs sowie Abweichung der Leistung bezüglich dem Referenzmodell. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

BOT [°C]	Kälteleistung [kW]	Zunahme bzgl. dem nächst tieferen BOT - Wert	Abweichung gegenüber dem Referenzmodell [%]
5	7.52	-	-38.4
6	8.46	12.5	-30.8
7	9.40	11.1	-23.1
8	10.34	10.0	-15.4
9	11.28	9.1	-7.7
10 (Referenzmodell)	12.22	8.3	-
11	13.16	7.7	7.7
12	14.10	7.1	15.4
13	15.04	6.7	23.1
14	15.98	6.3	30.8
15	16.92	5.9	38.4

3.2 Variation der Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein wichtiger Gesteinsparameter, dessen Einfluss auf die Kälteleistung hier untersucht wird. Die Wärmeleitfähigkeiten werden zwischen 1.0 – 3.0 $Wm^{-1}K^{-1}$ in Schritten von 0.2 $Wm^{-1}K^{-1}$ variiert. Dies entspricht ungefähr dem im Mittelland zu erwartenden Wertebereich. Zusätzlich wird eine Berechnung für die in Tabelle 1 angenommene Referenzwärmeleitfähigkeit von 2.65 $Wm^{-1}K^{-1}$ durchgeführt.



Figur 8: Abhängigkeit der Kälteleistung von der Wärmeleitfähigkeit. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

In Figur 8 sind die Kälteleistungen dargestellt und in Tabelle 7 aufgelistet. Die Zunahme der Kälteleistung verhält sich nicht ganz linear. Bei rein konduktivem Wärmetransport resultiert eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit in einer entsprechenden Änderung des Temperaturgradienten. Da bei unserer Simulation die Oberflächentemperatur konstant gehalten wird, kann sich der Temperaturgradient nicht frei ändern, was durch diese leichte Nichtlinearität angedeutet wird. Durchschnittlich steigt die Kälteleistung um ca. 0.3 kW bei einer Zunahme der Wärmeleitfähigkeit um 0.2 $Wm^{-1}K^{-1}$.

Tabelle 7: Wärmeleitfähigkeiten, die dazugehörigen Kälteleistung sowie deren Zunahme pro Simulationsschritt. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

Wärmeleitfähigkeit	Kälteleistung	Zunahme bzgl. dem nächst tieferen Wert	
[$Wm^{-1}K^{-1}$]	[kW]	[kW]	[%]
1.0	9.56		
1.2	9.90	0.33	3.5
1.4	10.23	0.33	3.4
1.6	10.56	0.33	3.2
1.8	10.88	0.32	3.1
2.0	11.20	0.32	2.9
2.2	11.51	0.31	2.7
2.4	11.80	0.30	2.6
2.6	12.09	0.29	2.4
2.8	12.37	0.28	2.3
3.0	12.64	0.27	2.2
2.65 (Referenzmodell)	12.15	-	-

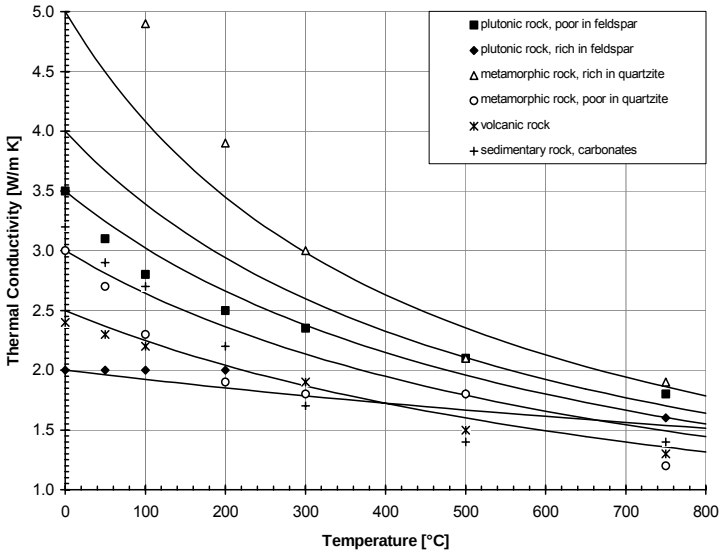
Die durchgeführte Simulation, basierend auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr, geht von einem homogenen, isotropen Untergrund aus. Die Wärmeleitfähigkeit eines Gesteins kann aber stark anisotrop sein. Dabei ist die Wärmeleitfähigkeit parallel zu einer ausgeprägten Schieferung oder Schichtung meist deutlich grösser als senkrecht dazu. Die Sedimente des Mittellandes besitzen allerdings keine bedeutende Anisotropie[12]. Hier sind vielmehr die Heterogenitäten innerhalb von Schichten massgebend.

Weiter zeigt die Wärmeleitfähigkeit eine deutliche Temperaturabhängigkeit. Diese wurde von Buntebarth[13] an Gesteinsproben untersucht. Clauser und Huenges[14] haben diese und weitere Messdaten ausgewertet (siehe Figur 8). Im Allgemeinen zeigen Gesteine mit hoher Wärmeleitfähigkeit eine stärkere Temperaturabhängigkeit als solche mit tieferen. Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kann durch eine hyperbolische Funktion beschrieben werden:

$$\lambda(T) = \frac{1}{(A + B \cdot (T - 20K))} \tag{19}$$

wobei A und B von der Lithologie abhängig sind. Der Parameter A ist der reziproke Wert der Wärmeleitfähigkeit bei T= 20 °C. Parameter B beschreibt den Abfall der Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur. Basierend auf den von Clauser und Huenges[14] publizierten Daten kann B linear zwischen einem Maximum von $4.5 \cdot 10^{-4}$ m W^{-1} bei $\lambda_{T=0°C} > 2.5$ W $m^{-1}K^{-1}$ und einem Minimum von $2.0 \cdot 10^{-4}$ m W^{-1} bei $\lambda_{T=0°C} < 2.0$ W $m^{-1}K^{-1}$ interpoliert werden. Diese Beziehung ist in *FRACTure* implementiert.

Figur 9 zeigt, dass im für Erdwärmesonden relevanten Temperaturbereich von 0 bis ungefähr 20 °C mit keiner grossen Änderung der Wärmeleitfähigkeit gerechnet werden muss. Um die Auswirkungen der Temperaturabhängigkeit besser abschätzen zu können, wurden Berechnungen für das Referenzmodell und ein weiteres, homogenes Modell mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3 $Wm^{-1}K^{-1}$ durchgeführt. Die Kälteleistung steigt im Fall des Referenzmodells um 50 W auf 12.72 kW, bei einer Wärmeleitfähigkeit von 3 $Wm^{-1}K^{-1}$ um 60 W auf 13.24 kW. Dies entspricht in beiden Fällen einer Zunahme von weniger als 1 %. Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit ist somit entlang von Erdwärmesonden vernachlässigbar.

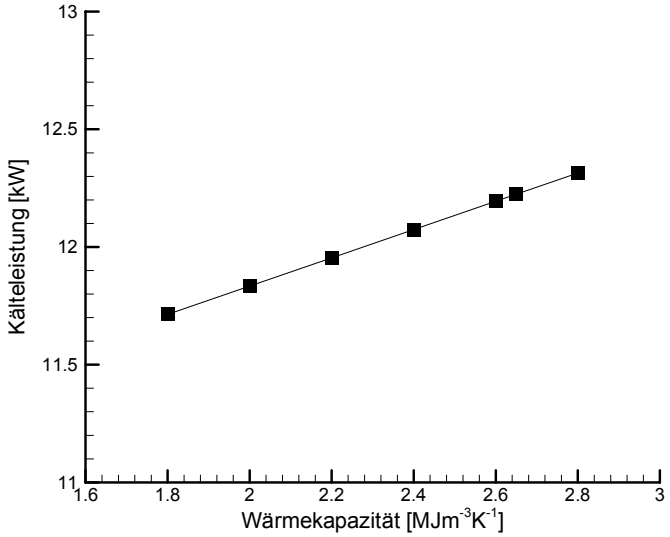


Figur 9: Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen bei einem Druck von 1 bar[14].

3.3 Variation der Wärmekapazität

Um den Einfluss der Wärmekapazität auf die Kälteleistung abzuschätzen, wird diese zwischen 1.8 – 2.8 $MJm^{-3}K^{-1}$ jeweils um 0.2 $MJm^{-3}K^{-1}$ erhöht. Dies entspricht wiederum dem Werte Bereich im Mittelland[15]. Zusätzlich wird auch eine Berechnung für den Referenzfall mit einer Wärmekapazität von 2.55 $MJm^{-3}K^{-1}$ (vergleiche Tabelle 1) durchgeführt.

Figur 10 zeigt die lineare Abhängigkeit der Kälteleistung von der Wärmekapazität. Allerdings ist der Einfluss der Wärmekapazität mit nur 0.12 kW Zugewinn bei einer Erhöhung um 0.2 $kJm^{-3}K^{-1}$ ziemlich gering. Diese Untersuchung zeigt, dass auch schon eine grobe Abschätzung der Wärmekapazität zu guten Resultaten führt.



Figur 10: Abhängigkeit der Kälteleistung von der Wärmekapazität. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

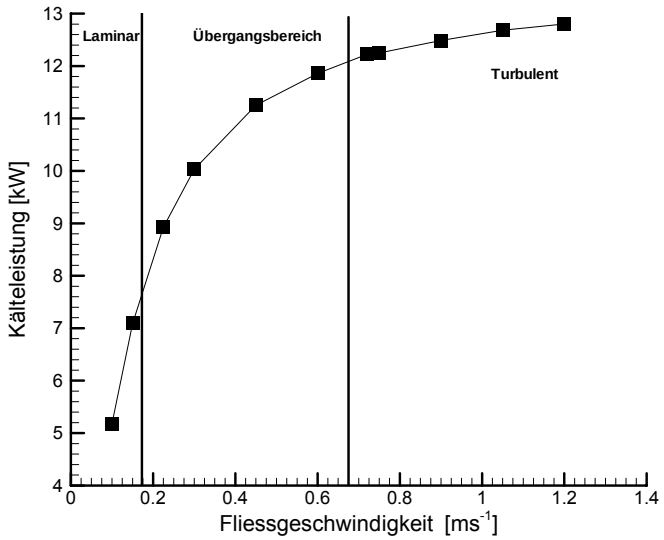
3.4 Variation des Sondendurchflusses

Als letztes wird der Einfluss des Sondendurchflusses auf die Kälteleistung untersucht. Da in *FRACTure* die Fluidgeschwindigkeit definiert werden muss, wird von der Geschwindigkeit und nicht von der Durchflussmenge ausgegangen. Grundsätzlich wird bei jedem Modellierungsschritt die Geschwindigkeit des Sondenfluids um 0.15 ms^{-1} erhöht. Um die Abhängigkeit der Leistung vom Durchfluss genau nachzubilden, wurden bei den tieferen Fluidgeschwindigkeiten engere Abstände modelliert (Siehe Tabelle 8 und Figur 11). Eine Änderung des Sondendurchflusses bewirkt auch immer eine Änderung des Übergangskoeffizienten α (vergleiche Gleichung 7). Die daraus resultierende Änderung der angepassten Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand (vergleiche Gleichung 6) wurde bei jedem Simulationsschritt berücksichtigt. Die hier gezeigten Resultate sind nur für die in Kapitel 2.3.1 beschriebene Anlage und unter den Annahmen in Tabelle 1 und Tabelle 2 gültig.

Bei geringen Durchflüssen, vor allem bei laminarem Fliessen, kann aber eine geringe Erhöhung eine deutliche Leistungssteigerung zur Folge haben (vergleiche Figur 11). Im turbulenten Bereich liegt die Zunahme der Kälteleistung im Prozentbereich (vergleiche Tabelle 8). Sonden mit höherem Durchfluss haben eine höhere Leistung, jedoch benötigen sie auch für die Sole-Umwälzpumpe höhere elektrische Anschlussleistungen (vergleiche Kapitel 5)

Tabelle 8: Fliessgeschwindigkeit, die dazugehörigen Kälteleistung sowie die Zunahme bezüglich dem nächst tieferen Durchfluss in %. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

Fliessgeschwindigkeit [ms^{-1}]	Kälteleistung [kW]	Zunahme bezüglich dem nächst tieferen Durchfluss [%]
0.10	5.18	
0.15	7.09	37
0.225	8.93	26
0.30	10.03	12
0.45	11.25	12
0.60	11.86	5
1.20	12.22	3
0.75	12.49	2
0.90	12.68	2
1.05	12.80	1
0.72 (Referenzmodell)	12.25	-



Figur 11: Abhängigkeit der Kälteleistung vom Fliessgeschwindigkeit in der Sonde. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr. Die Resultate sind somit nur für diesen Spezialfall gültig.

3.5 Zusammenfassung

Die Resultate der Sensitivitätsuntersuchung decken sich mit den von Stadler et al.[10]. Hier werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst:

- Die BOT ist ein wichtiger Faktor bei der Dimensionierung einer Erdwärmesondenanlage. Es besteht eine lineare Beziehung zwischen der BOT und Kälteleistung. Eine genaue Kenntnis über die BOT-Verteilung ist deshalb sehr wichtig.
- Die Wärmeleitfähigkeit hat verglichen mit der Wärmekapazität den grösseren Einfluss auf die Kälteleistung eine Erdwärmesonde. Ihre Temperaturabhängigkeit kann im für Erdwärmesonden relevanten Temperaturbereich vernachlässigt werden. Für die Wärmekapazität zeigt sich, dass kleine Unsicherheiten bei der Bestimmung der beiden Parameter einen geringen Einfluss auf die Bestimmung der Leistung haben.
- Die Kälteleistung nimmt mit steigender Fliessgeschwindigkeit in einer Sonde zu. Für die hier simulierte Modellanlage hat eine Verdoppelung der Fliessgeschwindigkeit im laminaren Bereich einen weit grösseren Einfluss als im turbulenten Bereich.

4 Einfluss des Grundwassers

4.1 Einleitung

Trotz der relativ tiefen Wärmeleitfähigkeit von 0.6 $Wm^{-1}K^{-1}$ (bei 20 °C), kann das Grundwasser durch Konvektion in Poren und Klüften sehr grosse Mengen an thermischer Energie transportieren. Der konvektive Wärmetransport ist deshalb in vielen Fällen effizienter als der konduktive. Die mögliche Anwesenheit von Grundwasser im Untergrund steigert somit die Leistung einer Erdwärmesondenanlage. Für einen Wärmespeicher kann jedoch Grundwasservorkommen problematisch sein. Grundwasser besitzt über ein Jahr mehr oder weniger die selbe Temperatur. Die Grundwasserströmung bringt so nicht nur konstant neue Energie zur Sonde, sondern transportiert auch laufend das vom Erdwärmesondenbetrieb abgekühlte Wasser weg. Untersuchungen zum Einfluss von Grundwasser auf die Kälteleistung einer Anlage finden sich zum Beispiel in Kangas[16] oder Pahud et al.[17]. Im nachfolgenden Kapitel soll der Einfluss von Grundwasserströmung durch Variation der Aquifermächtigkeit, der Tiefenlage sowie der Strömungsgeschwindigkeit untersucht werden.

4.2 Modellannahmen

Die nachfolgenden Berechnungen basieren auf den für den Rechenlauf „EWS“ getroffenen Annahmen (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2), dem Modellgitter (Kapitel 2.3.2) und einem konstanten Berieb von 1800 h pro Jahr. Neben der 265 m tiefen Erdwärmesonde werden auch Berechnungen für eine 100 m Sonde, mit analogem Modellaufbau, durchgeführt. Für die Berechung der Wärmeleitfähigkeit und –wärmekapazität im Aquifer wurde eine Porosität von 20 %[18] angenommen. Daraus resultiert ein λ von 2.42 $Wm^{-1}K^{-1}$ und ρc_p von 2.83 10^6 $Jm^{-3}K^{-1}$. Der Beitrag des Grundwassers zur Kälteleistung der einzelnen Modelle wird jeweils mit dem Fall ohne Aquifer verglichen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Kälteleistung für den Fall ohne Aquifer im Untergrund.

Sondenlänge	Kälteleistung [kW]
100 m	4.0
265 m	12.2

Um den Einfluss der Aquifermächtigkeit zu eruieren, werden Aquifere mit vertikalen Ausdehnungen von 1 m, 10 m respektive 20 m untersucht, wobei jeweils Berechnungen für zwei Tiefen von 10 m und 50 m durchgeführt werden. In diesen insgesamt 6 Grundmodelle wurden für Strömungsgeschwindigkeiten von 0.25 m pro Tag bis 5 m pro Tag Simulationen durchgeführt (siehe Tabelle 11 bis Tabelle 14).

4.3 Resultate

In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind die Resultate für die 100 m Sonde für die Aquifertiefen von 10 m respektive 50 m aufgelistet und in Figur 12 grafisch dargestellt. Eine geringe Aquifermächtigkeit von 1 m hat auch bei sehr hohen Grundwassergeschwindigkeiten keinen Einfluss auf die Kälteleistung. Bei einer Mächtigkeit von 10 m ist der Einfluss aber deutlich erkennbar. Eine Verdoppelung der Mächtigkeit auf 20 m resultiert auch in einer Verdoppelung im Leistungszugewinnes. Weiter steigt die Kälteleistung mit der Fliessgeschwindigkeit im Aquifer an. Der Zuwachs an Leistung nimmt allerdings der Geschwindigkeit ab. Die Tiefe des Grundwasserleiters hat einen geringen Einfluss.

Figur 14 und Figur 15 vergleichen die Temperaturfelder um eine 100 m Sonde ohne und mit Aquifer (Mächtigkeit 10 m, Fliessgeschwindigkeit 1 m pro Tag). Dargestellt ist Temperaturverteilung in 50 m Tiefe nach 1800 Stunden Betrieb. Der Vergleich zeigt für den Fall des Aquifers nur eine geringe Auskühlung mit einer Kältefahne in Richtung des Grundwasserfliessens. Durch das fliessende Grundwasser wird kontinuierlich Wasser mit der ungestörten Umgebungstemperatur herangeführt, wodurch sich die Gesteinsmatrix nur geringfügig auskühlt.

In Tabelle 14 sind die Resultate für den Fall einer 265 m Sonde zusammengefasst und in Figur 12 dargestellt. Im Fall der 265 m Sonde beträgt die Mächtigkeit des Aquifers maximal 7.5 % der Sondenlänge, im Fall der 100 m Sonde waren dies 20 %. Deshalb ist auch der Einfluss des Grundwasserleiters auf die Kälteleistung deutlich geringer. Die wichtigsten Einflussparameter bleiben aber weiterhin die Mächtigkeit des Aquifers und die Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers. Es zeigt sich aber deutlich, dass die Mächtigkeit des Aquifers im Vergleich zur Gesamtlänge einer Sonde bedeutend ist.

4.4 Zusammenfassung

In der Praxis wird bei der Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen meist der Einfluss von Grundwasser nicht berücksichtigt. Da sich Grundwasservorkommen auf den Erdwärmesondenbetrieb zu Heizzwecken aber grundsätzlich positiv auswirkt, wird die Kälteleistung einer Anlage dadurch lediglich unterschätzt. Ein grosser Zugewinn an Leistung ist bei einer grossen Aquifermächtigkeit und einer hohen Strömungsgeschwindigkeit zu erwarten. Die Signifikanz der Strömungs- und Aquiferparameter ist in Tabelle 10 zusammengefasst:

Tabelle 10: Signifikanz der Strömungs- und Aquiferparameter

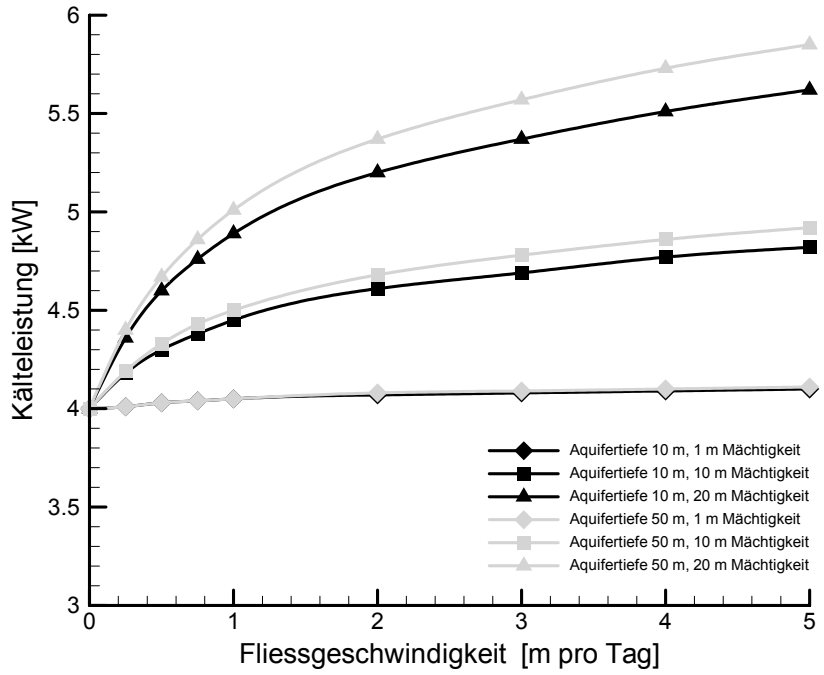
Parameter	Signifikanz
Verhältnis Aquifermächtigkeit - Sondenlänge	Sehr hoch
Aquifermächtigkeit	Sehr hoch
Strömungsgeschwindigkeit	Hoch
Aquifertiefe	Tief

Tabelle 11: Einfluss des Grundwassers auf die Kälteleistung einer 100 m Sonde für verschiedene Aquifermächtigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten im Falle eines Aquifers in einer Tiefe von 10 m. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

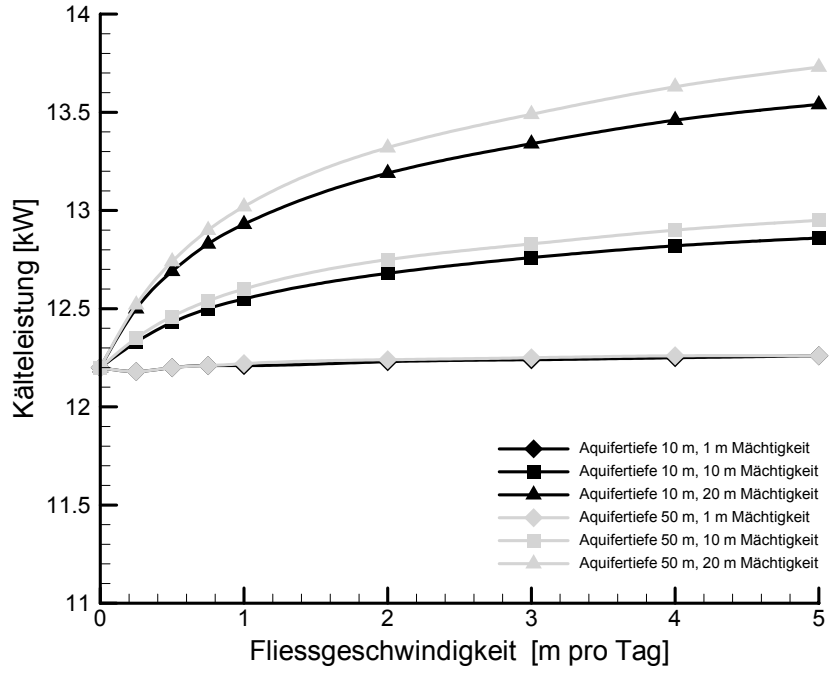
Mächtigkeit [m]		0.25 m pro Tag	0.5 m pro Tag	0.75 m pro Tag	1 m pro Tag	2 m pro Tag	3 m pro Tag	4 m pro Tag	5 m pro Tag
1	Kälte-	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1
10	leistung	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.8
20	[kW]	4.4	4.6	4.8	4.9	5.2	5.4	5.5	5.6
1	Zunahme	0.5	0.9	1.2	1.4	2.0	2.3	2.5	2.7
10	in %	4.7	7.7	9.8	11.5	15.4	17.6	19.4	20.7
20		9.1	15.2	19.4	22.6	30.3	34.6	38.1	40.7

Tabelle 12: Einfluss des Grundwassers auf die Kälteleistung einer 100 m Sonde für verschiedene Aquifermächtigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten im Falle eines Aquifers in einer Tiefe von 50 m. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

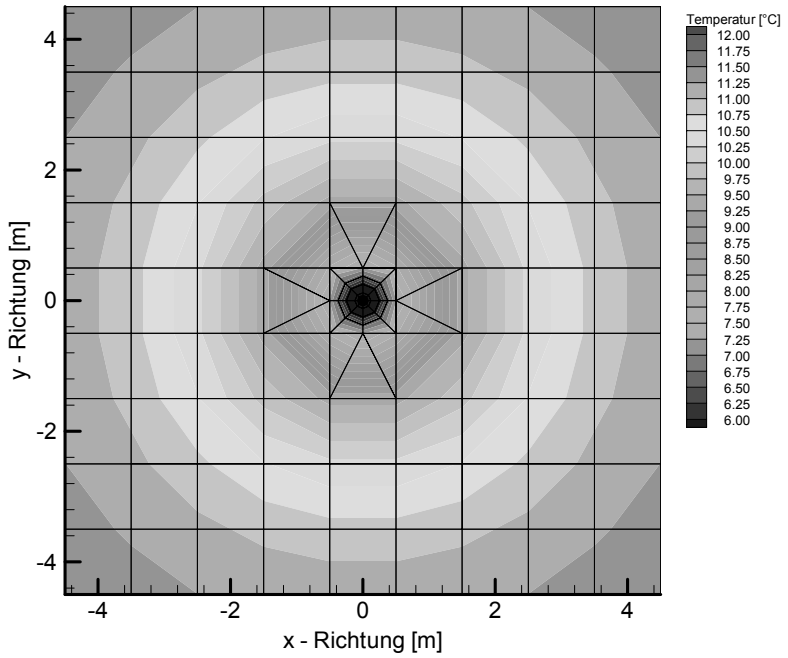
Mächtigkeit [m]		0.25 m pro Tag	0.5 m pro Tag	0.75 m pro Tag	1 m pro Tag	2 m pro Tag	3 m pro Tag	4 m pro Tag	5 m pro Tag
1	Kälte-	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
10	leistung	4.2	4.3	4.4	4.5	4.7	4.8	4.9	4.9
20	[kW]	4.4	4.7	4.9	5.0	5.4	5.6	5.7	5.9
1	Zunahme	0.5	1.0	1.3	1.6	2.2	2.5	2.8	3.0
10	in %	5.0	8.5	10.9	12.8	17.2	19.7	21.7	23.2
20		10.2	17.1	21.9	25.6	34.5	39.5	43.6	46.6



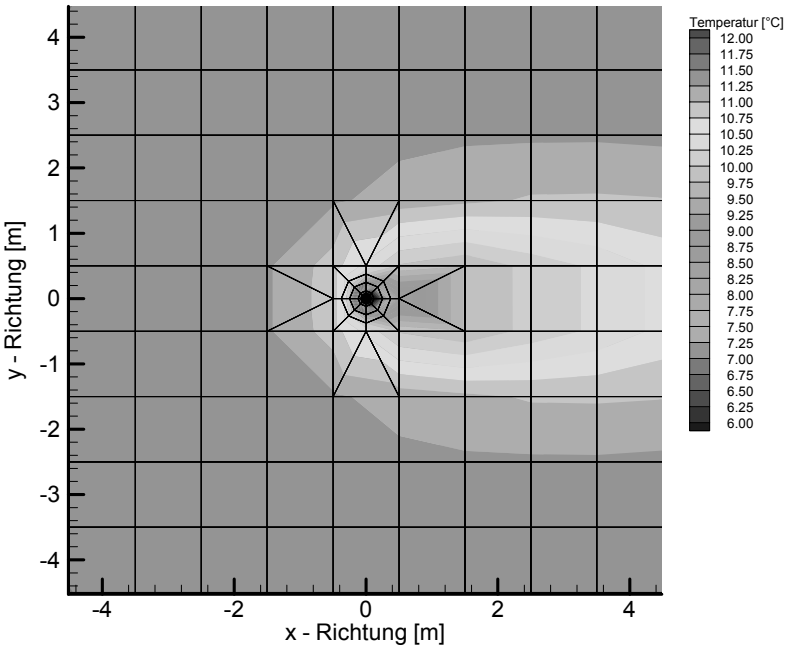
Figur 12: Einfluss von Grundwasser auf die Kälteleistung einer 100 m tiefen Erdwärmesonde. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.



Figur 13: Einfluss von Grundwasser auf die Kälteleistung einer 265 m tiefen Erdwärmesonde. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.



Figur 14: Temperaturverteilung um eine 100 m tiefe Erdwärmesonde in einer Tiefe von 50 m nach einem konstanten Betrieb von 1800 Stunden.



Figur 15: Temperaturverteilung um eine 100 m tiefe Erdwärmesonde in einer Tiefe von 50 m nach einem konstanten Betrieb von 1800 Stunden für den Fall eines 10 m mächtigen Aquifers und einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m pro Tag..

Tabelle 13: Einfluss des Grundwassers auf die Kälteleistung einer 265 m Sonde für verschiedene Aquifermächtigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten im Falle eines Aquifers in einer Tiefe von 10 m. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

Mächtigkeit [m]		0.25 m pro Tag	0.5 m pro Tag	0.75 m pro Tag	1 m pro Tag	2 m pro Tag	3 m pro Tag	4 m pro Tag	5 m pro Tag
1	Kälte-	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3
10	leistung	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.8	12.9
20	[kW]	12.5	12.7	12.8	12.9	13.2	13.3	13.5	13.5
1	Zunahme	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7
10	in %	1.3	2.2	2.7	3.2	4.3	4.9	5.4	5.7
20		2.7	4.3	5.4	6.3	8.4	9.6	10.6	11.3

Tabelle 14: Einfluss des Grundwassers auf die Kälteleistung einer 265 m Sonde für verschiedene Aquifermächtigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten im Falle eines Aquifers in einer Tiefe von 50 m. Die Simulationen basieren auf den Annahmen gemäss Tabelle 1 und Tabelle 2 und einem konstanten Betrieb von 1800 h pro Jahr.

Mächtigkeit [m]		0.25 m pro Tag	0.5 m pro Tag	0.75 m pro Tag	1 m pro Tag	2 m pro Tag	3 m pro Tag	4 m pro Tag	5 m pro Tag
1	Kälte-	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3
10	leistung	12.3	12.5	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0
20	[kW]	12.5	12.7	12.9	13.0	13.3	13.5	13.6	13.7
1	Zunahme	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8
10	in %	1.5	2.4	3.0	3.6	4.8	5.5	6.0	6.4
20		2.9	4.7	6.0	7.0	9.5	10.9	12.0	12.8

5 Optimierung der Sondenlänge

5.1 Ausgangslage

Der Einfluss des erhöhten Energiebezugs bei tieferen Erdwärmesonden wurde von einigen Energieberatungsstellen oft ignoriert oder als nicht relevant dargestellt. Schon erste überschlagsmässige Betrachtungen mit dem Programm *EED* ergaben für eine 300 m tiefer Erdwärmesonde einen höheren Energiebezug von bis zu 25 % im Vergleich zu zwei Erdwärmesonden à 150 m. Die Folgerungen daraus bezüglich Bohrkosten, Druckverlust für die Fluidzirkulation sowie für die Wärmepumpe sind bislang wenig untersucht worden. Für ein virtuelles Gebäude mit definiertem Heizbedarf sollen deshalb Betriebs- und Installationskosten für verschiedene Sondenkonfigurationen mit gleicher Gesamtlänge, aber unterschiedlicher Anzahl Sonden, ermittelt werden.

5.2 Vorgehen

Es wird von einer Gesamterdwärmesondenlänge von 300 m, aufgeteilt auf verschiedene Anzahl Sonden, ausgegangen. Dabei wird eine Linienanordnung der Sonden angenommen. Es ergeben sich 4 verschiedene Grundtypen, für die Berechnungen für Sondenabstände von 5 und 7.5 m durchgeführt werden:

- Anlagetyp 1: Eine 300 m Sonde, mit 40 mm Rohrdurchmesser
- Anlagetyp 2: Zwei 150 m Sonden, mit 32 mm Rohrdurchmesser
- Anlagetyp 3: Drei 100 m Sonden, mit 32 mm Rohrdurchmesser
- Anlagetyp 4: Sechs 50 m Sonden, mit 32 mm Rohrdurchmesser

Bei der Wahl der Erdwärmesondenkonfiguration ist immer auch der Platzbedarf massgeblich. So wird schon aus Platzgründen in den seltensten Fällen eine 6 mal 50 m Anlage in Frage kommen. Diese Konfiguration ist jedoch nicht grundsätzlich als unrealistisch einzustufen, da gesetzliche Bestimmungen ein tieferes Bohren in gewissen Gebieten nicht zulässen (z.B.: Grundwasserschutzzonen, Kt. Solothurn, Stadt Baden).

Alle nachfolgenden Modellierungen basieren auf einem von der Engeo AG erstellten Modul im Excel-Format, womit die Hydraulik der Anlagen dimensioniert werden kann und welches basierend auf dem Auslegungsprogramm *EED*[19] das Betriebsverhalten von Erdwärmesonde simuliert.

5.3 Referenzgebäude

Als erstes werden die Eigenschaften des virtuellen Gebäudes definiert.

Geologie und Klima des virtuellen Gebäudes

Der momentane Heizbedarf eines Hauses ist stark von der Höhenlage und den klimatischen Bedingungen abhängig. Als hypothetischer Standort wurde die Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) in Zürich gewählt. Hier werden Klimadaten, wie Strahlung, Bodenoberflächen- und Lufttemperatur, routinemässig registriert, die in Kapitel 5.6 für die Berechnung des Heizbedarfes benötigt werden. Die Werte für ein Durchschnittsjahr sind im Anhang A aufgeführt.

Die Geologie wird anhand von vier Bohrprofilen in der Umgebung der SMA angeschätzt. In Tabelle 15 sind die Untergrundsstruktur und die dazugehörigen thermischen Eigenschaften aufgelistet. Unterhalb einer 14 m mächtigen Moränenschicht folgt eine Wechsellagerung von Mergel (zu 73 %), Mergel-Sandstein (zu 13 %) und Sandstein (zu 13 %). Die thermischen Eigenschaften der Formationen wurden mit dem Programm SwEWS[20] ermittelt.

Tabelle 15: Geologie die für die Modellierungen angenommen wurde.

Tiefenbereich [m]	Formation	Wärmeleitfähigkeit [$Wm^{-1}K^{-1}$]	Dichte [kgm^{-3}]	Wärmekapazität [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
0 – 14	Moräne	2.1	1277	1800
	Darunter Wechsellagerung aus:			
14 - 300	73 % Mergel	2.43	901	2681
	13 % Mergel-Sandstein	2.43	901	2681
	13 % Sandstein	2.91	1198	2573

Wärmebedarf und Wärmepumpe

Die Wahl der Wärmepumpe hängt vom Wärmebedarf eines Gebäudes ab. Unser Referenzobjekt soll einen Wärmebedarf aufweisen, der die gewählte Sondengesamtlänge von 300 m rechtfertigt. Deshalb wird für die 3 mal 100 m Erdwärmesonde mit 7.5 m Sondenabstand die Kälteleitung bei eine Standardauslegung von 0 / -3 und einer jährlichen Betriebszeit von 1800 Stunden berechnet und eine entsprechende Wärmepumpe festgelegt. Diese ergibt eine Kälteleistung von 16.8 kW. Das Wärmepumpenmodell Natura BW220.1 der Satag Thermotechnik AG ist für diese Kälteleistung ausgelegt. Die Leistungsdaten bei B0/W35 sind:

- 16.8 kW Kälteleistung
- 21.6 kW Heizleistung
- 5400 l h^{-1} Volumenstrom
- 110 mbar Druckverlust Verdampfer
- COP von 4.49

Aus dem Leistungsdiagramm (siehe Anhang A) wurde anhand der obigen Kälteleistung für ein Haus mit Fussbodenheizung (Vorlauftemperatur 35 °C) ohne Warmwassererzeugung eine Heizleistung von 21.6 kW bestimmt. Die Wärmepumpe wird im Allgemeinen stets etwas überdimensioniert, weshalb wir einen Wärmebedarf für das virtuelle Gebäude von 19 kW annahmen (siehe unten).

Gebäudedaten des Referenzgebäude

Geht man von einem Gebäude heutigen Standards mit einer spezifischen Leistung von 35 Wm^{-2} aus, ergibt sich bei einem Heizbedarf von 19 kW eine zu beheizende Fläche von 543 m^2, was zum Beispiel einem Mehrfamilienhaus mit 5 Wohnungen à 108 m^2 entsprecht. Weiter wird angenommen, dass das Verhältnis von Grund- zu Fensterfläche 20 % beträgt. Über diese Fläche wird aufgrund der Sonneneinstrahlung Energie ins Gebäude aufgenommen, was zur Reduktion des Wärmebedarfs führt (Siehe Kapitel 5.6). Angenommen wird eine Bodenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C, ohne Warmwassererzeugung. Die Heizgrenze wird bei 14 °C Aussentemperatur angenommen und die Heizung wird auf -8 °C ausgelegt. Gefordert wird eine Raumtemperatur von 20 °C.

5.4 Dimensionierung der Sole-Umwälzpumpe

Der Druckverlust einer Anlage und die daraus resultierende Förderhöhe definiert die benötige Leistung der Sole-Umwälzpumpe. Der Gesamtdruckverlust errechnet sich aus den einzelnen Druckverlusten im Verdampfer der Wärmepumpe, im Solekreislauf, in den Erdwärmesonden und deren Zuleitungen. Dabei sind die Leitungslänge und deren Durchmesser, die Anzahl Rohreinbauten (Bögen und Schieber) und deren Winkel sowie das Sondenfluid (20 % Ethylenglykol für alle Anlagen) zu berücksichtigen. Angenommen wird eine korrekte Dimensionierung mit deutlich geringerem Druckverlust in der Zuleitung, als in der Erdwärmesonde. Bei schlecht installierten Zuleitungen kann der Druckverlust der Zuleitung bedeutend grösser werden[21], als hier berechnet.

In einem ersten Schritt wird für die obengenannten vier Grundanlagetypen der Druckverlust bestimmt (Siehe Anhang D). Dieser Druckverlust muss von der Sole-Umwälzpumpe erbracht werden. Bei der Auswahl der Umwälzpumpe wurde auf möglichst geräuscharme und stromsparende Modell geachtet.

Um eine passende Sole-Umwälzpumpe zu finden, musste zum Teil der Nenn-Sole-Durchfluss im Verdampfer leicht angepasst werden. Dabei wurde jeweils der Durchfluss reduziert, um die elektrische Anschlussleistung nicht zu erhöhen. Die ausgewählten Pumpen, die Reduktion des Nenndurchflusses, des effektiven Durchflusses pro Sondenkreislauf und die elektrische Anschlussleistung sind in Tabelle 17 aufgelistet.

Die zwei tiefen Anlagen (Anlage 1.1 und 2.1, siehe Tabelle 16) weisen sehr hohe Pumpleistungen auf. So ist die Pumpleistung Erdwärmesondenanlage 2.1 (zwei 150 m Sonden) fast zweimal höher als die der Anlage 3 (drei 100 m Sonden). Die Anschlussleistung der Anlage 1.1 (einer 300m Sonde) ist gar fast dreimal höher. Hohe Anschlussleistungen der Sole-Umwälzpumpe können beim Betrieb einer Erdwärmesondenanlage zu hohem Stromverbrauch und zu schlechten JAZ führen. Deshalb wird versucht, die tiefen Anlagen so zu optimieren, dass ihr Stromverbrauch minimal gehalten werden kann.

Folgende zwei Möglichkeiten wurden in Betracht gezogen:

- Reduktion des Sole-Durchflusses

  Der Sole-Durchfluss, welcher von einer Wärmepumpe vorgegeben wird, kann gemäss Herstellerfirmen maximal um -20 % und +100 % variiert werden (Persönliche Mitteilung SATAG Thermotechnik AG), wobei sich jedoch eine etwas andere Temperaturspreizung ergibt. Durch die Reduktion des Durchflusses wird der Druckverlust reduziert und es kann eine kleinere Umwälzpumpe eingesetzt werden. Aufgrund des kleineren Durchflusses wird sich zwar die Kälteleistung etwas verringern, was sich in etwas höheren Laufzeiten und einem kleineren COP zeigen wird. Doch aufgrund der kleineren Anschlussleistung der Sole-Umwälzpumpe kann mit einer deutlich höheren JAZ und somit mit einer effizienteren Gesamtanlage gerechnet werden.

- Erhöhung des Sondenrohrdurchmessers

  Werden 40 mm anstelle von 32 mm Durchmesser-Rohren verwendet, reduziert sich der Druckabfall ebenfalls und die JAZ steigt.

Es werden drei neue Anlagetypen eingeführt (siehe Tabelle 16): Anlage 1.2 und 2.2, die beide mit reduziertem Sole-Durchfluss gefahren werden, und Anlage 2.3, bei der die 32 mm durch eine 40 mm Sonde ersetzt wird. Die Nummerierung aus Tabelle 16 wird nachfolgend bei der Diskussion der verschiedenen Anlagen als Abkürzung verwendet.

Durch die Reduktion des Nenndurchflusses um 17.9 % kann im Falle der 300 m Sondenanlage 1.2 die elektrische Anschlussleistung der Sole-Umwälzpumpe um fast 40 % von 778 W auf 476 W reduziert werden (Siehe Tabelle 17). Wird beim Anlagetyp 2 der Nenn-Sole-Durchfluss um 16.3 % gesenkt, wird eine Reduktion der Anschlussleistung von 524 W auf 405 W erzielt. Werden die 32 mm Sonden gar durch 40 mm Sonden ersetzt, ist eine Erniedrigung um rund die Hälfte auf 228 W möglich. Dieser Wert liegt zudem deutlich unter den 269 W, die für den Anlagetyp 3 benötigt wird. Zu bemerken gilt es zudem, dass die Anlage 4 unter den oben ausgeführten Bedingungen im laminaren Bereich fährt.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass wenn die 300 m Sonde mit Wasser anstellte von Glykol betrieben würde, sich der Druckverlust um 20 % reduziert. Aufgrund der Soletemperaturen ist dies hier allerdings nicht möglich (Vergleiche Anhang E).

Tabelle 16: Anlagetypen die nachfolgend untersucht werden.

- Anlagetyp 1.1: Eine 300 m Sonde, mit 40 mm Rohrdurchmesser, leicht angepasster Sole-Durchfluss
- Anlagetyp 1.2: Eine 300 m Sonde, mit 40 mm Rohrdurchmesser, reduzierter Nenn-Sole-Durchfluss
- Anlagetyp 2.1: Zwei 150 m Sonde, mit 32 mm Rohrdurchmesser, leicht angepasster Sole-Durchfluss
- Anlagetyp 2.2: Zwei 150 m Sonde, mit 32 mm Rohrdurchmesser, reduzierter Nenn-Sole-Durchfluss
- Anlagetyp 2.3: Zwei 150 m Sonde, 40 mm Rohrdurchmesser, leicht angepasster Sole-Durchfluss
- Anlagetyp 3: Drei 100 m Sonde, mit 32 mm Rohrdurchmesser, leicht angepasster Sole-Durchfluss
- Anlagetyp 4: Sechs 50 m Sonde, mit 32 mm Rohrdurchmesser, leicht angepasster Sole-Durchfluss

Tabelle 17: Die Sole-Umwälzpumpe sowie die dazugehörigen Kennzahlen für jeden Anlagetypen.

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.	4
Druckverlust [mWS]	29.9	20.5	12.5	10.3	5.4	5.2	2.4
Sole-Umwälzpumpe	CRN 8-30	CRN 8-20	UPS 40-180/3 20%E	UPS 40-180/2 20%E	UPS 32-120/1	EV4-75-2C/4	TOP S 30-10/3
Variation des Durchfluss [%]	-1.8	-17.9	-6.50	-16.30	-5.60	-2.50	-5.30
Durchfluss pro Sonden-kreislauf [l s^{-1}]	1.53	1.23	0.70	0.63	0.71	0.46	0.24
Antriebsleistung [W]	778	476	524	405	227	230	163

5.5 Installationskosten

Hier werden die initalen Kosten der verschiednen Anlagetypen miteinander verglichen. Die Installationskosten setzen sich aus folgenden Hauptpositionen zusammen:

- Bohrkosten
- Kosten für die geologische Begleitung
- Kosten der Wärmepumpe
- Kosten der Sole-Umwälzpumpe inkl. Lieferung und Montage
- Kosten der Erdarbeiten für die Zuleitung
- Kosten für Elektriker
- Gebühren

Die Preise von Wärme- und Sole-Umwälzpumpen wurden den aktuellen Herstellerkatalogen entnommen. Für die Kostenermittlung von Bohrung und Anschluss wurden namhafte Schweizer Firmen (Hastag und Engeo AG) um eine Offerte angefragt. In Tabelle 18 sind die totalen Installationskosten der einzelnen Anlagetypen aufgeführt. Details über die einzelnen Positionen sind Anhang F zu entnehmen.

Die Kosten liegen zwischen 52’654 und 59’407 SFr. Die Bohrkosten bilden bei allen Anlagetypen den Hauptanteil. Bei den 40 mm Sonden sind die Bohrkosten aufgrund des höheren Meterpreises und der Anzahl an benötigten Mulden am höchsten und machen fast 50 % der Kosten aus. Bei den 32 mm Sonden liegt der prozentuale Anteil der Bohrkosten an den Gesamtkosten zwischen 40 und 45 %. Der nächst grösste Posten (~30 %) ist die Wärmepumpe, der aber für alle Anlagetypen gleich ist. Die Sole-Umwälzpumpe ist für tiefere Sonden leicht teurer, da hier Pumpen mit höherer Leistung benötigt werden. Der Preis der Sole-Umwälzpumpe hat aber auf die Gesamthöhe der Installationskosten einen geringen Einfluss. Die Kosten für die Erdwärmesondenanschlüsse und die Verbindung zur Wärmepumpe sind für die tieferen Sonden deutlich geringer, da hier die Anzahl an Erdwärmesondenverlängerungen und Mauerdurchführungen kleiner sind. Damit zusammen hängen auch die nötigen Erdarbeiten, die mit der Anzahl Sonden steigt. Die Kosten für geologische Begleitung, Elektriker und Gebühren sind für alle Anlagen gleich hoch und liegen ca. bei 5 % der Gesamtkosten.

Die günstigen Systeme sind die tiefen Sonden (Typ 1 und 2), mit ~53'000 SFR.. Der Typ 4 ist der teuerste, wegen der grossen Grabarbeiten und der hohen Zahl an Erdwärmesondenverlängerungen und Mauerdurchführungen. Wird der Sondenabstand von 5 auf 7.5 m erhöht, steigen die Kosten aufgrund der längeren Zuleitung und der daraus folgend grösseren Erdarbeiten für diesen Typ nochmals um 1540 SFr. an (siehe Anhang F).

Tabelle 18: Totale Installationskosten für die verschiedenen Anlagetypen für den Abstand 5 m.

Anlagetyp	Total [SFr]	Differenz [SFr]
1.1	52’654	
1.2	52’571	-83
2.1	52’718	+64
2.2	52’718	+64
2.3	55’212	+2558
3	53’921	+1266
4	59’407	+6752

5.6 Betriebsverhalten

Das von der Engeo AG erstellten Berechnungsmodul ermittelt anhand von stündlichen Klimadaten, wie Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur, den monatlichen Heizbedarf eines Gebäudes. Dazu ist die Angabe der gewünschten Raumtemperatur (20 °C), der Einsatzgrenze der Heizung (14 °C), der Auslegungstemperatur (-8 °C) sowie der Vorlauftemperatur der Heizung (35 °C, ohne Warmwasseraufbereitung) erforderlich. Weiter werden auch der passive Energiezugewinn durch Sonneneinstrahlung (Annahme: 65 % der auf die Fensterfläche einfallenden Globalstrahlung wird in interne Wärme umgewandelt) und interne Quellen (wie elektrische Geräte und Menschen) berücksichtigt. Aus dem monatlichen Wärmebedarf wird die nötige Kälteleistung ermittelt. Im Programm EED werden anschliessend der Sondendurchfluss pro Solekreislauf (Kapitel 5.4), die Eigenschaften des Sondenfluids (20 % Ethylenglykol), die geothermischen Eigenschaften des Untergrundes (Kapitel 5.3), die Bodenoberflächentemperatur (Anhang A), die Energieflüsse pro Monat und der Spitzenbedarf eingegeben. Daraus werden die Soletemperaturen im Erdreich (vergleiche Anhang E) ermittelt, was wiederum Einfluss auf das Betriebsverhalten der Wärmepumpe hat, das heisst, die Entzugsleistung aus der Erdwärmesonde ändert sich. Nach einigen Iterationsschritten ist die Simulation stabil und die Energiebilanzen, Laufzeiten, die Stromaufnahme etc. sind bestimmt. Daraus wird die COP und die JAZ für das 10. Betriebsjahr berechnet. Diese beiden Parameter sind wie folgt definiert:

COP beschreibt das Verhältnis von abgegebener Heizleistung $P_{Heizleistung}$ [W] zu aufgenommener elektrischer Leistung der Wärmepumpe $P_{Elektrisch}$ [W] und stellt ein Momentanwert dar:

$$COP = \frac{P_{Heizleistung}}{P_{Elektrisch}} \tag{20}$$

Die JAZ beschreibt das Verhältnis von produzierter Energie der Wärmepumpe $E_{ProduktionWP}$ [kWh/Jahr] und der insgesamt zugeführten Energie für die Wärmepumpe $E_{AufnahmeWP}$ [kWh/Jahr] und alle Hilfsantriebe $E_{Hilfsantrieb}$ [kWh/Jahr] (wie Sole-Umwälzpumpe, Ladeumwälzpumpe, u.s.w.) über ein Jahr:

$$JAZ = \frac{E_{Pr\,oduktionWP}}{E_{AufnahmeWP} + E_{Hilfsantrieb}} \tag{21}$$

In einem ersten Schritt werden Sondenkonfigurationen mit einem Abstand von 5 m untersucht. Anschliessend wird der Abstand auf 7.5 m erhöht. Für alle nachfolgenden Vergleiche wird die Anlage 1.1 mit einer 300 m Sonde als Vergleichsbasis genommen.

5.6.1 Sonden im Abstand 5 m

Tabelle 19 fasst die Resultate für einen Sondenabstand von 5 m zusammen. Der Anlagetyp 1.1 weist eine jährliche Laufzeit von 1791 Stunden auf. Wird der Durchfluss wie beim Typ 1.2 stark reduziert, erhöht sich die Laufzeit leicht. Die Laufzeiten aller anderen Anlagetypen liegen fast 10 % bis über 20 % höher. Analoges zeigt sich auch bei den COP-Werten. Der COP der Anlagen 1.1 und 1.2 liegt mindestens 7 % höher als der der anderen Anlagen.

Für die JAZ zeigt sich ein etwas anderes Bild. Hier geht die elektrische Anschlussleistung der Sole-Umwälzpumpe in die Betrachtung mit ein, die bei tieferen Anlagen wesentlich höher ist als bei Anlagen mit relativ untiefen Sonden. So gleichen sich die JAZ der Anlagetypen, die ungefähr mit dem Nenn-Sole-Durchfluss betrieben werden (1.1, 2.1 und 3) an. Die Anlage 3 weist wegen ihres geringen Stromverbrauchs sogar eine höhere JAZ als die Anlage 2.1 auf. Nur die Anlage 4 ist, trotz der sehr niedrigen Anschlussleistung, aufgrund der hohen Laufzeiten immer noch rund 7 % schlechter.

Durch Reduktion der Förderhöhe, sei es durch Reduktion des Durchflusses (Anlagen 1.2 und 2.2) oder durch den Einsatz von grösseren Rohrdurchmesser (Anlage 2.3), und die darausfolgende Reduktion des Stromverbrauches (Siehe Tabelle 17), wird eine bessere JAZ erreicht. Deutlich erkennbar ist dies bei der Anlage 1.2., die aufgrund der kleineren Anschlussleistung zusammen mit der geringen Laufzeit eine rund 5 % bessere JAZ als die Anlage 1.1 aufweist. Auch beim Anlagetyp 2 wirkt sich die Reduktion des Durchflusses, aber vor allem die Erhöhung des Sondendurchmessers positiv aus. Die Anlage 2.3 weist ebenfalls eine bessere JAZ als die Anlage 1.1 auf.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der monovalente Betrieb. Bei den Anlagen 3 und 4 kann der Heizbedarf des Gebäudes nach 10 Jahren Betrieb nicht mehr voll gedeckt werden. Die Anlagen laufen zwar immer noch fast zu 100 % monovalent, aber an Tagen mit Temperaturen unter –8 °C bringt die Anlage nicht mehr die erforderliche Leistung. Für ein mittleres Jahr ist dies an der meteorologischen

Station SMA Zürich lediglich an drei Tage der Fall. Dies zeigt aber, dass für Regionen mit rauerem Klima, zum Beispiel in höheren Lagen, diese beiden Anlagen problematisch werden könnten.

Tabelle 19: Resultate für die verschiedenen Anlagen mit Sondenabstand bei den Konfiguration von 5 m

Anlagetyp	Laufzeit		COP		JAZ		Monovalent
	[h]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]	[%]
1.1	1791		5.235		4.35		100
1.2	1795	+0.2	5.226	-0.2	4.58	+5.3	100
2.1	1956	-9.2	4.85	-7.3	4.21	-3.2	100
2.2	1958	-9.3	4.85	-7.4	4.30	-1.1	100
2.3	1971	-10.0	4.82	-7.9	4.42	+1.7	100
3	2040	-13.9	4.68	-10.7	4.29	-1.4	99.9
4	2209	-23.3	4.36	-16.8	4.05	-7.0	99.8

5.6.2 Sonden im Abstand 7.5 m

Wird der Abstand von 5 m auf 7.5 m erhöht, wird die gegenseitige Beeinflussung der Sonden geringer, wodurch sich die Effizienz erhöht. Durch die Vergrösserung des Sondenabstandes vergrössert sich die Zuleitungslänge, was jedoch auf den Druckverlust und die Anschlussleistung keinen nennenswerten Einfluss hat (Siehe Anhang D). Zu bemerken gilt es, dass bei den Anlagen mit 2 mal 150 m tiefen Sonden keine Vergrösserung der Zuleitungslänge angenommen wird, da man davon ausgeht, dass hier lediglich der horizontale Abstand der Sonden vergrössert wird.

Die Resultate in Tabelle 20 sind analog denen im letzten Kapitel. Aufgrund der geringern gegenseitigen Beeinflussung nehmen die Laufzeiten der Anlagetypen 2, 3 und 4 ab und demzufolge verbessern sich der COP und die JAZ gegenüber den Anlagen 1.1 und 1.2. Die Anlage 1.2 bleibt aber weiterhin die Effizienteste. Auch bei einem Sondenabstand von 7.5 m vermögen die Anlagen 3 und 4 den Heizbedarf nicht vollständig zu decken.

Tabelle 20: Resultate für die verschiedenen Anlagen mit Sondenabstand bei den Konfiguration von 7.5 m

Anlagetyp	Laufzeit		COP		JAZ		Monovalent
	[h]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]	[%]
1.1	1791		5.235		4.35		100
1.2	1795	-0.2	5.226	-0.2	4.58	+5.3	100
2.1	1939	-8.2	4.89	-6.6	4.25	-2.4	100
2.2	1941	-8.3	4.89	-6.7	4.34	-0.3	100
2.3	1954	-9.1	4.86	-7.2	4.46	+2.4	100
3	2009	-12.2	4.74	-9.5	4.32	-0.8	99.9
4	2152	-20.1	4.46	-14.8	4.14	-4.8	99.8

5.6.3 Diskussion

Betrachtet man lediglich die Laufzeiten und den COP sind die Anlagen mit 300 m tiefen Sonden immer besser. Wird die elektrische Anschlussleistung der Sole-Umwälzpumpe, wie bei der JAZ, mitberücksichtigt, gleichen sich die andern Anlagen in ihrer Effizienz der tiefen Anlage an. Die elektrische Anschlussleistung der Sole-Umwälzpumpe ist somit der entschiedende Faktor. Kann sie minimal gehalten werden, sind die tiefen Sonden die effizienteren.

Weiter ist klar erkennbar, dass die Anlagen einen möglichst grossen Abstand von einander haben müssen. Ein grosser Abstand vermindert die gegenseitige Beeinflussung. Dadurch nehmen die Laufzeiten ab und der COP und die JAZ verbessern sich.

5.7 Betriebskosten

Neben dem Betriebsverhalten ist vor allem der Stromverbrauch und die daraus resultierenden Betriebskosten von Interesse. Der Stromverbrauch setzt sich aus dem Verbrauch der Heizungs- und der Sole-Umwälzpumpe zusammen. In den Tabelle 22 und Tabelle 23 ist der Stromverbrauch der verschiedenen Anlagen pro Jahr für den Abstand 5 m bzw. 7.5 m aufgelistet. Weiter wird der Anteil der Sole-Umwälzpumpe am Gesamtverbrauch untersucht. Dieser sollte bei einer optimal ausgelegten Anlage unter 10 % liegen[21].

Der Stromverbrauch der Anlagen liegt zwischen 9878 und 11157 kWh. Die Antriebsarbeit für den Betrieb der Wärmepumpe ist für die beiden Anlagen des Typs 1 ähnlich gross. Durch die Reduktion des Durchflusses kann der Strombedarf für die Sole-Umwälzpumpe um fast 40 % erniedrigt werden und das Gesamtsystem 1.2 verbraucht somit deutlich weniger Strom. Auch fällt dadurch der Anteil der Sole-Umwälzpumpe am Gesamtverbrauch unter 10 %. Ein analoges Bild zeigt sich für die Anlagen des Typs 2. Alle drei Anlagen besitzen ungefähr den gleichen Strombedarf für den Betrieb der Wärmepumpe. Der entscheidende Unterschied tritt beim Verbrauch der Sole-Umwälzpumpe auf. Durch Reduktion des Durchflusses im Falle der Anlage 2.2 kann der Stromverbrauch der Umwälzpumpe um über 20 % und im Falle von 2.3, durch den Einsatz von 40 mm Rohren, gar um über 50 % reduziert werden. Der Anteil der Sole-Umwälzpumpe liegt bei diesen Anlagen durchwegs unterhalb 10 %, mit einem Minimum von 4.4 % für die Anlage 2.3. Die Anlagen 3 und 4 haben aufgrund der langen Laufzeiten einen deutlich höheren Verbrauch bei der Wärmepumpe. Ihre Sole-Umwälzpumpe benötigt jedoch sehr wenig Strom und macht lediglich 4.5 bzw. 3.2 % beim Gesamtverbrauch aus. Den niedrigsten Gesamtstrombedarf weisst die Anlage 1.2 auf, dies aufgrund der geringen Laufzeiten und wegen der Optimierung des Stromverbrauches der Sole-Umwälzpumpe.

Aus dem Stromverbrauch des Gesamtsystems werden nun die Betriebskosten ermittelt. Da unser Testobjekt in Zürich steht, werden die Stromtarife für Wärmepumpenanlagen des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich (ewz) verwendet. Es gibt vier verschiedene Tarife: Hoch- und Niedertarif für Winter und Sommer (Siehe Tabelle 21). Die Wintertarife gelten vom 1. Oktober bis zum 31. Mai. Im Vergleich zum Schweizer Mittel sind diese Tarife relativ günstig.

Tabelle 21: Stromtarife für Wärmepumpenanlagen in der Stadt Zürich

Hochtarif Winter	SFr. 0.15 / kWh
Niedertarif Winter	SFr. 0.11 / kWh
Hochtarif Sommer	SFr. 0.07 / kWh
Niedertarif Sommer	SFr. 0.05 / kWh

Unsere Modellierungen liefern die Laufzeiten pro Monat, daraus kann die prozentuelle Verteilung von Laufzeiten im Winter und Sommer bestimmt werden. Das Verhältnis beträgt 83 % Winterlaufzeit zu 17 % im Sommer. Weiter wird als Vereinfachung angenommen, dass 40 % des Betriebs im Niedertarif läuft. In den Tabelle 24 und Tabelle 25 sind die Betriebskosten der verschiedenen Anlagen im Abstand 5 m bzw. 7.5 m Abstand aufgeführt.

Analog zum Stromverbrauch ist die Anlage 1.2 die Preiswerteste, rund 40 SFr. günstiger als die nächst billigere Anlage 2.3. Alle andern Anlagen sind im Betrieb teurer. Durch Erhöhung des Sondenabstandes auf 7.5 m verbilligen sich die Betriebskosten der Sondenkonfigurationen aufgrund der kürzeren Laufzeiten. Der grösste Unterschied ergibt sich bei der Anlage 4 von rund 30 SFr..

Tabelle 22: Stromverbrauch in kWh für die verschiedenen Anlagetypen mit Abstand 5m

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3	4
Antriebsarbeit Sole-Umwälzpumpe	1394	854	1025	793	449	469	360
Antriebsarbeit Wärme-pumpe	9008	9024	9713	9721	9779	10074	10797
Total kWh	10402	9878	10738	10514	10228	10544	11157
Anteil Sole-Umwälz-pumpe [%]	13.4	8.6	9.5	7.5	4.4	4.5	3.2

Tabelle 23: Stromverbrauch in kWh für die verschiedenen Anlagetypen mit Abstand 7.5 m

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3	4
Antriebsarbeit Sole-Umwälzpumpe	1394	854	1016	786	446	541	353
Antriebsarbeit Wärme-pumpe	9008	9024	9640	9648	9706	9943	10553
Total kWh	10402	9878	10656	10434	10151	10483	10906
Anteil Sole-Umwälz-pumpe [%]	13.4	8.6	9.5	7.5	4.4	5.2	3.2

Tabelle 24:Betriebskosten für die verschiedenen Anlagetypen mit Abstand 5m

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3	4
Winter Hochtarif	774.60	735.62	799.64	782.98	761.67	785.18	830.88
Winter Niedertarif	378.70	359.64	390.94	382.79	372.37	383.86	406.21
Sommer Hochtarif	75.39	71.60	77.83	76.21	74.13	76.42	80.87
Sommer Niedertarif	35.90	34.09	37.06	36.29	35.30	36.39	38.51
Total	**1'264.59**	**1'200.95**	**1'305.46**	**1'278.27**	**1'243.47**	**1'281.85**	**1'356.47**
Differenz		**-63.64**	**40.87**	**13.68**	**-21.12**	**17.26**	**91.88**

Tabelle 25:Betriebskosten für die verschiedenen Anlagetypen mit Abstand 5m

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3	4
Hochtarif Winter	774.60	735.62	793.53	777.00	755.96	780.69	812.14
Niedertarif Winter	75.39	71.60	77.23	75.62	73.58	75.98	79.04
Hochtarif Sommer	378.70	359.64	387.95	379.87	369.58	381.67	397.05
Niedertarif Sommer	35.90	34.09	36.78	36.01	35.04	36.18	37.64
Total	**1'264.59**	**1'200.95**	**1'295.49**	**1'268.50**	**1'234.14**	**1'274.52**	**1'325.87**
Differenz		**-63.64**	**30.90**	**3.91**	**-30.44**	**9.93**	**61.29**

Tabelle 26:Zusammenfassung der Installations- und Betriebskosten für Anlagen im Abstand 5 m

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3	4
Installationskosten	52654	52571	52718	52718	55212	53921	59407
Differenz		-83	64	64	2558	1266	6752
Betriebskosten pro Jahr	1265	1201	1305	1278	1243	1282	1356
Differenz		-64	41	14	-21	17	92

Tabelle 27:Zusammenfassung der Installations- und Betriebskosten für Anlagen im Abstand 7.5 m

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3	4
Installationskosten	52654	52571	52718	52718	55212	53921	60947
Differenz		-83	64	64	2558	1266	8293
Betriebskosten pro Jahr	1265	1201	1295	1269	1234	1275	1326
Differenz		-64	31	4	-30	10	61

5.8 Schlussfolgerungen

Untersucht wurden verschiedene Anlagen mit der gleichen Gesamtsondenlänge und verschiedener Anzahl Sonden, mit Sondenabständen von 5 m bzw. 7.5 m.

Vergleicht man die nicht optimierten Erdwärmesondenanlagen (1.1, 2.1, 3 und 4 in den Tabelle 26 und Tabelle 27), ist die Anlage 1.1 mit der 300 m tiefen Sonde bei den Installations- und Betriebskosten die günstigere. Sie hat die geringste Laufzeit, den höchsten COP, hingegen hebt sich ihre JAZ, vor allem bei einem Sondenabstand von 7.5 m, nur unwesentlich von den andern Anlagen ab. Bei den Betriebskosten ist die Anlage 3 sogar fast gleich gut, hat jedoch deutlich höhere Installationskosten.

Bei den optimierten Anlagen reduzieren sich die Betriebskosten deutlich. Die allgemein günstigste Anlage bei der Installation und im Betriebskosten und die Anlage mit dem besten Betriebsverhalten ist die Anlage 1.2 mit einer 300 m tiefen Sonde. Die Anlage 2.3 hat zwar gegenüber den andern 2-Sonden-Anlagen relativ hohe Installationskosten, ist im Betrieb jedoch günstiger. Verglichen mit der Anlage 2.1 wären die höheren Installationskosten nach rund 28 Jahren durch die Einsparungen bei den Betriebskosten gedeckt. Verglichen mit der Anlage 1.1 würden sich die geringeren Betriebskosten gegenüber den Installationskosten bei einem Abstand von 7.5 m nach 63 Jahren, bei einem 5 m Abstand aber erst nach 91 Jahren auszahlen.

Der entscheidende Faktor ist die Anschlussleistungen der Sole-Umwälzpumpen. Gelingt es deren Strombedarf zu reduzieren, sei es durch Reduktion des Durchflusses oder durch Einbau einer 40 mm anstelle einer 32 mm Sonde, sind die tiefen Erdwärmesonden im Betriebsverhalten die effizienteren Anlagen. Zudem haben sie die tiefsten Installationskosten und der Platzbedarf ist gering. Bei den untiefen Erdwärmesonden ist nicht die Anschlussleistung der Sole-Umwälzpumpe der Grund für die Höhe der Betriebskosten, sondern die Laufzeit. Bei Sondenkonfiguration ist ferner darauf zu achten, dass der Abstand möglichst gross gehalten wird

6 Ausblick

Die Arbeit umfasste die drei Schwerpunkte: 1) Validieren des Programms *EWS*, 2) Sensitivitätsuntersuchungen an einem Erdwärmesondenmodell und 3) Optimieren der Erdwärmesondenlänge.

Aufgrund technischer Probleme konnte die Anlage Arnegg die sowohl als Grundlage für die Validierung des Programms *EWS*, als auch für die Optimierung der Erdwärmesondenlänge vorgesehen war, erst Ende Frühling 2002 in Betrieb genommen werden. Da diese Anlage nur zu Heizzwecken dient, ist die bis Projektende aufgezeichnete Datenmenge als Grundlage für die Untersuchungen zu gering. Deshalb wurde die Validierung des Programms *EWS* und die Optimierung der Erdwärmesondenlänge auf theoretischer Ebene durchgeführt.

Der Vergleich von *EWS* und *FRACTure* zeigt eine gute Übereinstimmung für die Simulation des Langzeitverhaltens einer Erdwärmesondenanlage. Im Kurzzeitverhalten zeigen sich deutliche Unterschiede, die aber aufgrund der grundsätzlich unterschiedlichen Programm-Codes zu erwarten sind. Für die exakte Simulation des Temperaturverlaufs beim Anfahren einer Erdwärmesondenanlage, was vor allem bei der Modellierung von Anlagen mit häufigem Takten wichtig ist, haben sich die R_a- und R_b–Widerstände und somit die Position der Rohre als Haupteinflussfaktoren erwiesen. Dies muss anhand von realen Daten weiteruntersucht werden. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass *EWS* schnell gute Resultate liefert. *FRACTure*-Modellierungen sind aufgrund der erforderlichen Gitterverfeinerung sehr zeitintensiv und für die Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen in der Praxis nicht einsetzbar. Aufgrund der flexiblen Gittergestaltung ist *FRACTure* eine gute Methode für Spezialanwendungen.

Die Sensitivitätsuntersuchung zeigt den grossen Einfluss der BOT auf die Kälteleistung. Eine genaue Kenntnis über die BOT-Verteilung ist deshalb sehr wichtig. Von den thermischen Eigenschaften des Untergrundes hat die Wärmeleitfähigkeit verglichen mit der Wärmekapazität den grösseren Einfluss auf die Kälteleistung. Weiter steigt die Kälteleistung mit steigender Fliessgeschwindigkeit in einer Sonde. Die Fliessgeschwindigkeit kann vor allem bei geringen Werten im laminaren Bereich einen grossen Einfluss haben.

Die Aquifermächtigkeit und die Fliessgeschwindigkeit eines Grundwasserleiters können die Kälteleistung einer Erdwärmesonde stark beeinflussen. Der Einfluss des Grundwassers ist vor allem bedeu-

tend, wenn die Aquifermächtigkeit einen grossen Teil der Sondentiefe abdeckt. Die Tiefe in der der Aquifer auftritt, spielt eine untergeordnete Rolle.

Der Einfluss der Sondenlänge bezüglich Wärmeeintrag, Bohrkosten und Druckverlust bei der Fluidzirkulation wurde untersucht, indem für verschiedene Anlagen die Anzahl Sonden, bei gleicher Gesamtsondenlänge, variiert wurden. Die tiefen Anlagen haben die kleinsten Installationskosten und sind im Betrieb die effizienteren. Entscheidend ist hierfür allerdings eine Optimierung der Anschlussleistung der Sole-Umwälzpumpe. Dies kann durch Reduktion des Sondendurchflusses oder durch Verwenden von grösseren Sondenrohren erreicht werden. Kann eine tiefe Erdwärmesonde mit Wasser betrieben werden, reduziert sich der Druckverlust allein dadurch schon deutlich.

Zukünftig werden die Arbeiten im Rahmen des PSEL-Projektes Nr. 203 weitergeführt, wobei vor allem Arbeiten im Bereich der theoretischen Entwicklung von EDV basierten Systemen durchgeführt werden. So soll ein Tool entwickelt werden, das die Erstellung von Modellgitter zur Simulation von Erdwärmesondenanlagen mit *FRACTure* erleichtert. Weiter wird der Einfluss der Position der Sondenrohre auf die Kälteleistung eingehend untersucht. An einem 3D-Modell soll zudem der Effekt der Topographie untersucht und eine Bilanzierung der einzelnen Energieströme im Untergrund erstellt werden.

7 Symbolverzeichnis

A = Austauschfläche [m^2]

c_p = spezifische Wärmekapazität [$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

C = Wärmekapazität [$J \cdot K^{-1}$]

d = Rohrdurchmesser [m]

dl = Schichtdicke [m]

$Es = \frac{t \cdot 9a}{H^2}$ = dimensionslose Zeit [-]

g = Erdbeschleunigung [$m\ s^{-2}$]

h_G = hydraulisches Potential [m]

h_H = hydrostatische Wasserhöhe [m]

H = Sondenlänge [m]

j = spezifische Entzugsleistung [Wm^{-1}]

K = hydraulische Leitfähigkeit [$m \cdot s^{-1}$]

$L_0 = 2\pi r_0^2 v \rho_{Sole} cp_{Sole}$ thermische Leitfähigkeit im Sondenfluid

L_1 = thermische Leitfähigkeit zwischen Sondenfluid und Hinterfüllung [$W\ K^{-1}$]

Nu = Nusselt-Zahl (Gleichungen 8 und 9)

r_b = Bohrlochradius, [m]

rz: radialer Massenschwerpunkt eines Rohrringes [m]

Q = Quellterm [$W \cdot m^{-3}$]

Re= Reynoldszahl [-](Gleichung 10)

R_a = „internal thermal resistance“: Widerstand zwischen ab-/ aufsteigendem Sondenfluid [$K\ m^{-1}W^{-1}$]

R_b = „thermal borehole resistance“: Widerstand zwischen Sondenfluid und Bohrradius r_b [$K\ m^{-1}W^{-1}$]

R_1 = Thermischer Widerstand zwischen Sondenfluid und Hinterfüllung [$K\ m^{-1}W^{-1}$]

P = Druck [Pa]

Pr= Prandtl Zahl [-]

t = Zeit [s]

T = Temperatur [°C]

T_O = mittlere Bodenoberflächentemperatur (BOT) [°C]

T_b = Temperatur an der Bohrlochwand [°C]

Tdown = Temperatur des absteigenden Sondenfluids [°C]

T_{Earth} = Temperatur des Erdreiches [°C]

T_m = ungestörte Temperatur des Erdreiches [°C]

Tup = Temperatur des aufsteigenden Sondenfluids [°C]

T_s = Temperatur des Sondenfluids [°C]

Tsink = Sondeneintrittstemperatur [°C]

Tsource = Sondenaustrittstemperatur [°C]

v= Advektionsgeschwindigkeit [$m \cdot s^{-1}$]

v_D= Darcy-Geschwindigkeit [$m \cdot s^{-1}$]

α = Übergangskoeffizient [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

λ = Wärmeleitfähigkeit [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

λ' = angepasste Wärmeleitfähigkeit des Sondenrohres [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

λ_{Rohr} = Wärmeleitfähigkeit des Sondenrohres [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

λ_{Erde} = die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins [$JWm^{-1}K^{-1}$]

λ_{Fluid} = Wärmeleitfähigkeit des flüssigen Wärmeträgermediums [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

λ_{Fill} = Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

ρ = Dichte [$kg \cdot m^{-3}$]

υ = kinematische Viskosität des Sondenfluids [$m^2\ s^{-1}$]

Indizes

f = Index für die flüssige Phase

i = Index für axiale Ortskoordinate

s = Index für die feste Phase

t = Index für Zeitkoordinate

8 Referenzen

[1] Kohl, T., Hopkirk, R.J., 1995: "FRACTure" a simulation code for forced fluid and transport in fractured porous rock. Geothermics 24 (3), 345 - 359

[2] Turcotte, D.L., Schubert, G. (1982): Geodynamics, Application of Continuum Physics to Geological Problems. John Wiley und Sons., New York, 450 pp.

[3] Bennett, C.O., Myers, J.E., 1982: Momentum, Heat, and Mass Transfer. 3rd ed., Wiley, New York.

[4] Huber, A., Schuler, O., 1997: Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Bundesamt für Energie, Schlussbericht, ENET-Nr. 9658807, Gratis-Download www.waermepumpe.ch/fe.

[5] Huber, A, Pahud, D., 1999: Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Bundesamt für Energie, Schlussbericht, ENET-Nr. 9819227, Gratis-Download www.waermepumpe.ch/fe.

[6] Eskilson, P., 1987: Thermal Analysis of Heat Extraction Borehole. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

[7] Salton M., 1999, Untersuchungen zum Verhalten von Erdwärmesonden, Diplomarbeit, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

[8] Maraini S., 2000, Vergleich von Software zur Dimensionierung von Erdwärmesonden-Anlagen, Diplomarbeit, Institut für Geophysik, ETH Zürich

[9] Brenni R., 2000: Modellsimulationen von Tiefenerdwärmesonden-Anlagen an den Fallbeispielen Weggis und Medyaguino, Diplomarbeit, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

[10] Stalder, T., Hopkirk, R.J., 1995. Auswirkungen von Klima, Bodentyp, Standorthöhe auf die Dimensionierung von Erdwärmesonden in der Schweiz. Schlussbericht. Bundesamt für Energiewirtschaft.

[11] Signorelli S., Kohl T., 2001, Produktivitätsuntersuchung des System Erdwärmesonde mit Wärmepumpe. Jahresbericht, Bundesamt für Energie.

[12] Schärli, U., 1980: Methodische Grundlagen zur Erstellung eines Wärmeleitfähigkeits-Kataloges Schweizer Gesteine. Diplomarbeit, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

[13] Buntebarth G., 1991: Thermal properties of KTB Oberpfalz - VB Core samples at elevated temperature and pressure, Scientific Drilling, 2, pp 73-80

[14] Clauser C. & E. Huenges, 1995: Thermal conductivity of rocks and minerals, in: T.J.Ahrens (Edt.), Rock physics and phase relations - A Handbook of Physical Constants, AGU Reference Shelf, 3, pp.105-126, American Geophysical Union, USA

[15] Schärli, U., Kohl, T., 2002. Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. Beitrage zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 36. Publiziert durch die Schweizerische Geophysikalische Kommission. Druckerei am Schanzengraben, Zürich.

[16] Kangas, M.T., 1997: Thermohydraulic analysis of ground as a heat source for heat pumps using vertical pipes. Publication V, Journal of Energy Resource Technology.

[17] Pahud, D, Kohl, T., Megel, T., 2002: Langzeiteffekt von Mehrfach-Erdwärmesonden. Bundesamt für Energie, Schlussbericht.

[18] Megel, T., 1996: Aquifer-Bewirtschaftung bei der geothermischen Energienutzung. Diss. ETH Nr. 11983, ETH Zürich.

[19] Hellström, G., Sanner, B., 1994: PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden. IZW Bericht 1/94, S. 341 – 350, Karlsruhe.

[20] Leu, W., Keller, B., Mégel, T., Schärli, U., Rybach, L. (1999): PC-Programm für die Berechnung geothermischer Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0 – 500 m). Benutzerhandbuch zu SwEWS (Version 1.0). Bundesamt für Energie, Schlussbericht.

[21] Huber, A., 1999: Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen. Bundesamt für Energie, Schlussbericht.

ANHANG

A. WÄRMELEITFÄHIGKEITSMESSUNGEN ERDWÄRMESONDE ARNEGG

Tabelle A1: Wärmeleitfähigkeitsmessungen an den Cuttings der Bohrung Arnegg

Bezeichnung	Tiefe [m]	Wärmeleitfähigkeit [W $m^{-1}K^{-1}$]
Konglomerat	18-36	4.16
Mergel	37-40	4.16
Feinsandstein	41-47	2.35
Feinsandstein	48-49	2.20
Mergel	50-65	1.81
Feinsandstein	66-70	1.72
Siltstein und Mergel	71-74	2.29
Konglomerat	75-81	2.45
Mergel	82-84	1.93
Mittelsandstein	85-88	2.26
Konglomerat	89-91	2.45
Feinsandstein	92-98	3.02
Feinsandstein und Mergel	99-104	2.13
Mergel	105-118	2.02
Konglomerat	119-121	2.16
Mergel	122-128	3.15
Siltstein	128-133	2.00
Feinsandstein	134-140	1.67
Feinsandstein	141-143	2.31
Mergel/Siltstein	144-147	1.88
Feinsandstein	148-160	1.85
Konglomerat	161-164	2.53
Sandstein	165-165	3.15
Sandstein	166-167	2.37
Sandstein	168-171	3.12
Konglomerat	172-181	3.32
Feinsandstein	182-188	5.00
Mittelsandstein	189-199	2.40
Konglomerat	200-203	3.30
Konglomerat	204-215	4.51
Konglomerat	216-223	3.79

Weiterführung der Tabelle der vorherigen Seite

Bezeichnung	Tiefe [m]	Wärmeleitfähigkeit [W $m^{-1}K^{-1}$]
Feinsandstein	224-227	2.48
Mittelsandstein	228-237	2.84
Mittelsandstein	238-248	3.90
Konglomerat	249-254	3.19
Mittelsandstein	255-258	4.21
Mittelsandstein	259-264	2.53
	Gewichteter Mittelwert	2.88
Unter Annahme einer Porosität von 5 % [17]		2.65

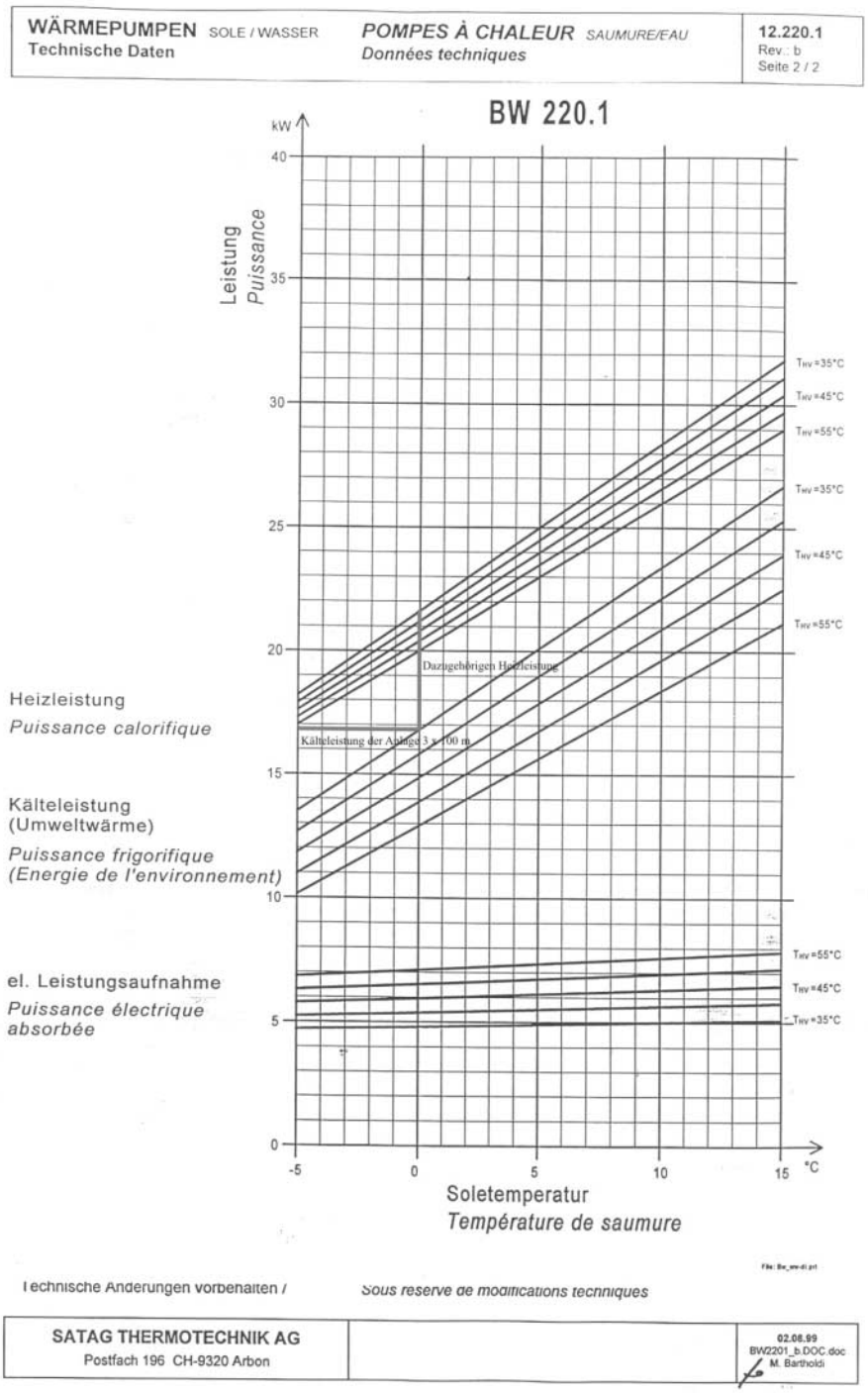
B. KLIMADATEN

Die nachfolgende Aufstellung zeigt die klimatologischen Daten aufgezeichnet an der meteorologischen Station SMA-Zürich für ein mittleres Jahr (Siehe Kapitel 5.3).

Lufttemperatur	Minimum	-14.90°C
	Maximal	32.50 °C
	Mittel	9.06 °C
Bodenoberflächentemperatur	Mittel	11.1 °C
Globalstrahlung 3:	Mittel	124 Wm^{-1}

C. LEISTUNGSDIAGRAMM DER WÄMREPUMPE

Leistungsdiagramm der für die Optimierung der Sondenlänge verwendeten Wärmepumpe. Eingezeichnet ist die Kälte- und dazugehörige Heizleistung der Anlage mit drei 100 m Sonden bei einer Standardauslegung von 0 / -3 (Siehe Kapitel 5.3).



D. AUSLEGUNG DER HYDRAULIK

Nachfolgend sind die Details über die Dimensionierung der Hydraulik für die bei der Optimierung der Sondenlänge verwendeten Erdwärmesondenanlagen aufgeführt. Aufgeführt sind jeweils die Kenndaten der Wärmepumpe, der Erdwärmesonde und der Sole-Umwälzpumpe (Siehe Kapitel 5.4).

1.1: Hydraulik der Anlage mit einer 300 m tiefen Sonde und 40 mm Rohrdurchmesser.

Bestimmung des Druckverlustes und der Umwälzpumpe		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**300**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**1**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**-**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	40	mm
Volumen pro m Sonde	3.34	l
Inhalt Erdwärmesonden	1002	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	50	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	1.29	l
Zuleitungsrohre (Weg)	10.00	m
Inhalt Zuleitung	26	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	1.8%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5494.5	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	2747 l/h	5495 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.91 m/s	1.18 m/s
Reynoldszahl	8540	13715
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	26.88 mWs	1.28 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	28.17	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	1.16	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.62	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	1057	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	25	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	29.9	mWs
Fördervolumen	5495	l/h
vorgeschlagene Pumpe : CRN 8-30 3x400V 50 Hz	5495	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	29.9	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	778	W
Max. Aufnahmestrom	-	A

1.2: Hydraulik der Anlage mit einer 300 m tiefen Sonde, 40 mm Rohrdurchmesser und knapp dimensionierter Sole-Umwälzpumpe

Bestimmung des Druckverlustes und der Umwälzpumpe		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**300**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**1**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**-**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	40	mm
Volumen pro m Sonde	3.34	l
Inhalt Erdwärmesonden	1002	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	50	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	1.29	l
Zuleitungsrohre (Weg)	10.00	m
Inhalt Zuleitung	26	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-17.9%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	4436.1	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	2218 l/h	4436 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.74 m/s	0.95 m/s
Reynoldszahl	6895	11073
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	18.49 mWs	0.87 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	19.36	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	0.76	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.41	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	1057	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	25	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	20.5	mWs
Fördervolumen	4436	l/h
vorgeschlagene Pumpe : CRN 8-20 3x400V 50 Hz	4436	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	20.5	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	476	W
Max. Aufnahmestrom	-	A

2.1: Hydraulik der Anlage mit zwei 150 m tiefen Sonden im Abstand von 5 m und 32 mm Rohrdurchmesser.

Zusammenstellung Berechnung der Erdwärmesondenlänge		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**150**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**2**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	32	mm
Volumen pro m Sonde	2.12	l
Inhalt Erdwärmesonden	637	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	40	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	0.83	l
Zuleitungsrohre (Weg)	20.00	m
Inhalt Zuleitung	33	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-6.5%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5049	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	1262 l/h	2525 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.66 m/s	0.84 m/s
Reynoldszahl	4920	7848
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	10.10 mWs	0.88 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	10.98	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	0.98	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.53	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	696	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	18	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	12.5	mWs
Fördervolumen	5049	l/h
vorgeschlagene Pumpe : UPS 40-180/3 20%E 3x400V 50 Hz	5049	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	12.5	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	524	W
Max. Aufnahmestrom	1.30	A

2.2: Hydraulik der Anlage mit zwei 150 m tiefen Sonden im Abstand von 5 m, 32 mm Rohrdurchmesser und einer knapp dimensionierter Sole-Umwälzpumpe

Zusammenstellung Berechnung der Erdwärmesondenlänge		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**150**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**2**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	32	mm
Volumen pro m Sonde	2.12	l
Inhalt Erdwärmesonden	637	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	40	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	0.83	l
Zuleitungsrohre (Weg)	20.00	m
Inhalt Zuleitung	33	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-16.3%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	4519.8	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	1130 l/h	2260 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.59 m/s	0.75 m/s
Reynoldszahl	4404	7025
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	8.32 mWs	0.73 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	9.05	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	0.79	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.43	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	696	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	18	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	10.3	mWs
Fördervolumen	4520	l/h
vorgeschlagene Pumpe : UPS 40-180/2 20%E 3x400V 50 Hz	4520	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	10.3	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	405	W
Max. Aufnahmestrom	0.94	A

2.3: Hydraulik der Anlage mit zwei 150 m tiefen Sonden im Abstand von 5 m und 40 mm Rohrdurchmesser.

Zusammenstellung Berechnung der Erdwärmesondenlänge		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**150**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**2**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	40	mm
Volumen pro m Sonde	3.34	l
Inhalt Erdwärmesonden	1002	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	50	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	1.29	l
Zuleitungsrohre (Weg)	20.00	m
Inhalt Zuleitung	52	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-5.6%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5097.6	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec
	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	1274 l/h	2549 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.42 m/s	0.55 m/s
Reynoldszahl	3962	6362
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	3.51 mWs	0.32 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	3.83	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	1.00	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.54	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	1079	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	18	l
Daten Umwälzpumpe		
Förderhöhe	5.4	mWs
Fördervolumen	5098	l/h
vorgeschlagene Pumpe : UPS 32-120/1 3x400V 50 Hz	5098	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	5.4	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	228	W
Max. Aufnahmestrom	0.42	A

2.1: Hydraulik der Anlage mit zwei 150 m tiefen Sonden im Abstand von 7.5 m und 32 mm Rohrdurchmesser (Hier wird keine Vergrösserung der Zuleitungslänge angenommen, da man davon ausgeht, dass in diesem Fall lediglich der horizontale Abstand der Sonden vergrössert wird.).

Bestimmung des Druckverlustes und der Umwälzpumpe		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**150**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**2**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**7.5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	32	mm
Volumen pro m Sonde	2.12	l
Inhalt Erdwärmesonden	637	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	40	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	0.83	l
Zuleitungsrohre (Weg)	20.00	m
Inhalt Zuleitung	33	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-6.5%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5049	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec
	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	1262 l/h	2525 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.66 m/s	0.84 m/s
Reynoldszahl	4920	7848
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	10.10 mWs	0.88 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	10.98	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	0.98	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.53	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	696	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	18	l
Daten Umwälzpumpe		
Förderhöhe	12.5	mWs
Fördervolumen	5049	l/h
vorgeschlagene Pumpe : UPS 40-180/3 20%E 3x400V 50 Hz	5049	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	12.5	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	524	W
Max. Aufnahmestrom	1.30	A

2.2: Hydraulik der Anlage mit zwei 150 m tiefen Sonden im Abstand von 7.5 m, 32 mm Rohrdurchmesser und einer knapp dimensionierter Sole-Umwälzpumpe (Hier wird keine Vergrösserung der Zuleitungslänge angenommen, da man davon ausgeht, dass in diesem Fall lediglich der horizontale Abstand der Sonden vergrössert wird.).

Bestimmung des Druckverlustes und der Umwälzpumpe		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**150**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**2**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**7.5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	32	mm
Volumen pro m Sonde	2.12	l
Inhalt Erdwärmesonden	637	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	40	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	0.83	l
Zuleitungsrohre (Weg)	20.00	m
Inhalt Zuleitung	33	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-16.3%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	4522.5	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	1131 l/h	2261 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.59 m/s	0.75 m/s
Reynoldszahl	4407	7029
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	8.33 mWs	0.73 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	9.06	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	0.79	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.43	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	696	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	18	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	10.3	mWs
Fördervolumen	4523	l/h
vorgeschlagene Pumpe : UPS 40-180/2 20%E 3x400V 50 Hz	4523	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	10.3	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	405	W
Max. Aufnahmestrom	0.94	A

2.3: Hydraulik der Anlage mit zwei 150 m tiefen Sonden im Abstand von 7.5 m und 40 mm Rohrdurchmesser (Hier wird keine Vergrösserung der Zuleitungslänge angenommen, da man davon ausgeht, dass in diesem Fall lediglich der horizontale Abstand der Sonden vergrössert wird.).

Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**150**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**2**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**7.5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	40	mm
Volumen pro m Sonde	3.34	l
Inhalt Erdwärmesonden	1002	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	50	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	1.29	l
Zuleitungsrohre (Weg)	20.00	m
Inhalt Zuleitung	52	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-5.6%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5119.2	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	1274 l/h	2549 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.43 m/s	0.55 m/s
Reynoldszahl	3978	6389
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	3.53 mWs	0.33 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	3.86	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	1.01	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.54	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	1079	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	18	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	5.4	mWs
Fördervolumen	5119	l/h
vorgeschlagene Pumpe : UPS 32-120/1 3x400V 50 Hz	5119	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	5.4	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	227	W
Max. Aufnahmestrom	0.42	A

3: Hydraulik der Anlage mit drei 100 m tiefen Sonden im Abstand von 5 m und 32 mm Rohrdurchmesser.

Bestimmung des Druckverlustes und der Umwälzpumpe

Objekt : Zürich

Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**100**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**3**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	32	mm
Volumen pro m Sonde	2.12	l
Inhalt Erdwärmesonden	637	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	10.00	m
Durchmesser der Zuleitung	40	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	0.83	l
Zuleitungsrohre (Weg)	25.00	m
Inhalt Zuleitung	42	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-7.2%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5011.2	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	835 l/h	1670 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.44 m/s	0.56 m/s
Reynoldszahl	3255	5193
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	3.27 mWs	0.42 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	3.70	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	0.97	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.52	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	704	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	18	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	5.2	mWs
Fördervolumen	5011	l/h
vorgeschlagene Pumpe : EV4-75-2C/3 3x400V	5011	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	5.2	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	230	W
Max. Aufnahmestrom	0.74	A

3: Hydraulik der Anlage mit drei 100 m tiefen Sonden im Abstand von 7.5 m und 32 mm Rohrdurchmesser.

Bestimmung des Druckverlusts und der Umwälzpumpe		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**100**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**3**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**7.5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	32	mm
Volumen pro m Sonde	2.12	l
Inhalt Erdwärmesonden	637	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	15.00	m
Durchmesser der Zuleitung	40	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	0.83	l
Zuleitungsrohre (Weg)	37.50	m
Inhalt Zuleitung	63	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-2.5%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5265	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 20%	
Wärmeträger Dichte	1040	kg/m3
kinematische Zähigkeit	3.49	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	878 l/h	1755 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.46 m/s	0.58 m/s
Reynoldszahl	3420	5456
Strömungsart	Turbulent glatt	Turbulent glatt
Druckverlust	3.57 mWs	0.67 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	4.23	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	1.07	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.57	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	725	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	18	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	5.9	mWs
Fördervolumen	5265	l/h
vorgeschlagene Pumpe : EV4-75-2C/4 3x400V	5265	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	5.9	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	269	W
Max. Aufnahmestrom	0.74	A

4: Hydraulik der Anlage mit sechs 100 m tiefen Sonden im Abstand von 5 m und 32 mm Rohrdurchmesser.

Bestimmung des Druckverluts und der Umwälzpumpe		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**50**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**6**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	32	mm
Volumen pro m Sonde	2.12	l
Inhalt Erdwärmesonden	637	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	20.00	m
Durchmesser der Zuleitung	40	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	0.83	l
Zuleitungsrohre (Weg)	90.00	m
Inhalt Zuleitung	150	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-4.9%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5135.4	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 30%	
Wärmeträger Dichte	1059	kg/m3
kinematische Zähigkeit	4.94	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	428 l/h	856 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.22 m/s	0.28 m/s
Reynoldszahl	1178	1880
Strömungsart	Laminar	Laminar
Druckverlust	0.57 mWs	0.20 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	0.76	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	1.01	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.58	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	816	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	25	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	2.4	mWs
Fördervolumen	5135	l/h
vorgeschlagene Pumpe : TOP S 30-10/3	5135	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	2.4	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	163	W
Max. Aufnahmestrom	0.35	A

4: Hydraulik der Anlage mit sechs 100 m tiefen Sonden im Abstand von 7.5 m und 32 mm Rohrdurchmesser.

Bestimmung des Druckverlusts und der Umwälzpumpe		
Objekt : Zürich		
Wärmepumpe	**Satag BW 220.1**	
Anzahl Wärmepumpen	1	
Erdwärmesondendaten		
Tiefe der Erdwärmesonden	**50**	**m**
Anzahl Erdwärmesonden	**6**	**Stück**
Abstand der Erdwärmesonden (Minimum)	**7.5**	**m**
Durchmesser der Erdwärmesonden	32	mm
Volumen pro m Sonde	2.12	l
Inhalt Erdwärmesonden	637	l
Anschluss mit Y-Stück	ja	ja/nein
Zuleitungsrohre längste Länge (Weg)	25.00	m
Durchmesser der Zuleitung	40	mm
Volumen pro m Zuleitung (1 Rohr)	0.83	l
Zuleitungsrohre (Weg)	105.00	m
Inhalt Zuleitung	175	l
Hydraulikdaten		
Durchflussmenge Verdampfer Soll	5400	l/h
Korrektur Durchfluss vom Soll (max +/-20%)	-5.3%	
Durchflussmenge Verdampfer Ist	5116.5	l/h
Wärmeträger	Ethylenglykol 30%	
Wärmeträger Dichte	1059	kg/m3
kinematische Zähigkeit	4.94	mm2/sec

	EWS	Zuleitung
Durchflussmenge je Leitung (Kreis)	426 l/h	853 l/h
Durchflussgeschwindigkeit	0.22 m/s	0.28 m/s
Reynoldszahl	1174	1873
Strömungsart	Laminar	Laminar
Druckverlust	0.57 mWs	0.24 mWs
Druckverlust EWS & Zuleitung	0.81	mWs
Druckverlust Wärmepumpe	1.01	mWs
Innendurchmesser Verteilleitung	40.80	mm
Verteilungslänge	5.00	m
Druckverlust Verteilung	0.57	mWs
Anschluss Solekreis an Wärmepumpe, Schwingungsdämpfer	1 ¼" IG inb.	
Totalinhalt Anlage	841	l
Expansiongefäss Grösse bei 1 bar Vordruck	25	l

Daten Umwälzpumpe

Förderhöhe	2.4	mWs
Fördervolumen	5117	l/h
vorgeschlagene Pumpe : TOP S 30-10/3	5117	l/h
Förderhöhe der vorgeschlagenen Pumpe	2.4	mWs
Versorgungsspannung Pumpe	3 x 400 V	
Aufnahmeleistung Pumpe (P1)	164	W
Max. Aufnahmestrom	0.35	A

E. MITTELWERTE DER SOLETEMPERATUREN

Untenstehende Tabelle zeigt die mittleren Soletemperaturen der für die Optimierung der Sondenlänge verwendeten Anlagetypen im einem Sondenabstand von 5 m für jeden Monat nach einer Betriebsdauer von 10 Jahren.

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3	4
Januar	1.58	1.50	-1.45	-1.48	-1.72	-2.83	-5.28
Februar	2.58	2.52	-0.57	-0.60	-0.83	-1.99	-4.44
März	3.75	3.68	0.46	0.44	0.21	-1.00	-3.54
April	4.95	4.88	1.61	1.58	1.35	0.13	-2.45
Mai	6.56	6.48	3.15	3.12	2.89	1.65	-1.01
Juni	8.02	7.95	4.60	4.57	4.34	3.06	0.35
Juli	9.11	9.04	5.72	5.69	5.41	4.19	1.41
August	9.40	9.33	6.00	5.96	5.72	4.46	1.69
September	8.05	7.97	4.79	4.76	4.52	3.30	0.57
Oktober	5.89	5.82	2.76	2.73	2.49	1.30	-1.32
November	3.46	3.39	0.43	0.39	0.15	-1.00	-3.59
Dezember	2.21	2.14	-0.83	-0.87	-1.11	-2.24	-4.76

Untenstehende Tabelle zeigt die mittleren Soletemperaturen der für die Optimierung der Sondenlänge verwendeten Anlagetypen im einem Sondenabstand von 7.5 m für jeden Monat nach einer Betriebsdauer von 10 Jahren.

Anlagetyp	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3	4
Januar	1.58	1.50	-1.13	-1.16	-1.39	-2.34	-4.45
Februar	2.58	2.52	-0.20	-0.23	-0.46	-1.44	-3.53
März	3.75	3.68	0.86	0.84	0.60	-0.40	-2.57
April	4.95	4.88	2.00	1.97	1.74	0.75	-1.47
Mai	6.56	6.48	3.50	3.48	3.25	2.27	-0.02
Juni	8.02	7.95	4.91	4.88	4.65	3.69	1.29
Juli	9.11	9.04	5.98	5.96	5.72	4.75	2.27
August	9.40	9.33	6.22	6.19	5.94	5.02	2.50
September	8.05	7.97	4.98	4.95	4.71	3.76	1.32
Oktober	5.89	5.82	2.96	2.92	2.69	1.74	-0.60
November	3.46	3.39	0.64	0.62	0.37	-0.57	-2.88
Dezember	2.21	2.14	-0.56	-0.59	-0.84	-1.79	-3.99

F. INSTALLATIONSKOSTEN

Installationskosten der verschiedenen Anlagetypen, die für die Optimierung der Sondenlänge verwendet wurden.

Anlagetyp		**1.1**	**1.2**	**2.1**	**2.2**	**2.3**
Total		**52654.30**	**52571.30**	**52718.35**	**52718.35**	**55212.20**
Bohren						
EWS Durchmesser (32,40)		40	40	32	32	40
Tiefe		300	300	150	150	150
Anzahl		1	1	2	2	2
EWS Gesamtmeter		300	300	300	300	300
Mulden		4	4	3	3	4
	Einzelpreis	Positionspreise	Positionspreise			
Installation	1'200.00	1'200.00	1'200.00	1'200.00	1'200.00	1'200.00
EWS 32 mm	68.00	-	-	20'400.00	20'400.00	-
EWS 40 mm	74.00	22'200.00	22'200.00	-	-	22'200.00
Mulden	550.00	2'200.00	2'200.00	1'650.00	1'650.00	2'200.00
Arteserdeckung erste EWS	350.00	350.00	350.00	350.00	350.00	350.00
Arteserdeckung weitere EWS	150.00	-	-	150.00	150.00	150.00
Total exkl. MwSt		SFr. 25'950.00	SFr. 25'950.00	SFr. 23'750.00	SFr. 23'750.00	SFr. 26'100.00
Wärmepumpe		Satag BW 220.1	Satag BW 220.1	Satag BW 220.1	Satag BW 220.1	Satag BW 220.2
Kosten		SFr. 16'189	SFr. 16'189	SFr. 16'189	SFr. 16'189	SFr. 16'189
Sole-Umwälzpumpe		CRN 8-30 3x400V 50 Hz	CRN 8-20 3x400V 50 Hz	UPS 40-180/3 20%E 3x400	UPS 40-180/2 20%E 3x400V	UPS 32-120/1 3x400V 50 Hz
Preis Pumpe		SFr. 1'396.00	SFr. 1'313.00	SFr. 1'322.00	SFr. 1'322.00	SFr. 984.00
Anschluss		SFr. 4'769.30	SFr. 4'769.30	SFr. 6'857.35	SFr. 6'857.35	SFr. 7'339.20
Geologe		SFr. 1'000.00	SFr. 1'000.00	SFr. 1'000.00	SFr. 1'000.00	SFr. 1'000.00
Graben		500.- pauschal + 100/m	500.- pauschal + 100/m	500.- pauschal + 100/m	500.- pauschal + 100/m	500.- pauschal + 100/m
		SFr. 1'500.00	SFr. 1'500.00	SFr. 1'750.00	SFr. 1'750.00	SFr. 1'750.00
Gebüren		SFr. 350.00	SFr. 350.00	SFr. 350.00	SFr. 350.00	SFr. 350.00
Elektriker		SFr. 1'500.00	SFr. 1'500.00	SFr. 1'500.00	SFr. 1'500.00	SFr. 1'500.00

Anlagetyp		**3**	**4 (5 m)**	**4 (7.5 m)**
Total		**53920.60**	**59406.60**	**60947.05**

Bohren				
EWS Durchmesser (32,40)		32	32	32
Tiefe		100	50	50
Anzahl		3	6	6
EWS Gesamtmeter		300	300	300
Mulden		3	3	3
	Einzelpreis			
Installation	1'200.00	1'200.00	1'200.00	1'200.00
EWS 32 mm	68.00	20'400.00	20'400.00	20'400.00
EWS 40 mm	74.00	-	-	-
Mulden	550.00	1'650.00	1'650.00	1'650.00
Arteserdeckung erste EWS	350.00	350.00	350.00	350.00
Arteserdeckung weitere EWS	150.00	300.00	750.00	750.00
Total exkl. MwSt		SFr. 23'900.00	SFr. 24'350.00	SFr. 24'350.00

Wärmepumpe		Satag BW 220.1	Satag BW 220.1	Satag BW 220.1
Kosten		SFr. 16'189	SFr. 16'189	SFr. 16'189

Sole-Umwälzpumpe		EV4-75-2C/3 3x400V	TOP S 30-10/3	TOP S 30-10/3
Preis Pumpe		SFr. 964.00	SFr. 632.00	SFr. 632.00
Anschluss		SFr. 8'017.60	SFr. 11'635.60	SFr. 11'926.05

Geologe		SFr. 1'000.00	SFr. 1'000.00	SFr. 1'000.00

Graben		500.- pauschal + 100/m	500.- pauschal + 100/m	500.- pauschal + 100/m
		SFr. 2'000.00	SFr. 3'750.00	SFr. 5'000.00

Gebüren		SFr. 350.00	SFr. 350.00	SFr. 350.00

Elektriker		SFr. 1'500.00	SFr. 1'500.00	SFr. 1'500.00