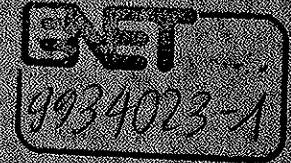


Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)



Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen

ausgearbeitet durch

Arthur Huber

Huber Energietechnik,
Ingenieur- und Planungsbüro SIA
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich
huber@igjzh.com

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Dezember 1999

Schlussbericht

Zusammenfassung

In Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlagen wird teilweise bis zu 20 % der elektrischen Energie für die Sondenpumpe benötigt. Bei einer Optimierung des Sondenkreislaufs lässt sich dieser Wert in der Regel unter 10 % reduzieren.

Im Rahmen des Projektes "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpen" (Afjei et al., 1998) wurde von Michael Wetter an der Hochschule Technik+Architektur, (HTA Luzern), ein Excel - Hilfsprogramm zur Berechnung des Druckabfalls in Erdwärmesonden entwickelt. Im Sinne einer Umsetzung der Forschungsergebnisse soll nun dieses Hilfsprogramm über Internet allgemein zugänglich gemacht werden. Es wurde deshalb in einer Diplomarbeit an der HTA von Felix Kaufmann auf seine Praxistauglichkeit hin untersucht und mit Messwerten einer realer Anlage verglichen (Kaufmann, 1999). Das Validierungsobjekt ist eine nur mit Wasser gefüllte Erdwärmesondenanlage mit 2 Bohrungen von je 168 m Tiefe in Thalwil (Anlage Wehrli). Die detaillierten Messresultate des Druckabfalls wurden von Hr. Christoph Wehrli zur Verfügung gestellt. Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung zeigt Abweichungen von unter 10%. Die Rechnung unterschätzt den tatsächlichen Druckabfall ganz leicht.

Im Verlauf der Arbeit wurde klar, dass zum Erreichen des Ziels (weniger als 10 % Energiebedarf für die Umwälzpumpe) Auslegungsempfehlungen für den Benutzer des Excel-Programms direkt auf der Eingabeoberfläche implementiert sein müssen. Dazu wurden die folgenden Bedingungen formuliert:

- Die Rücklauftemperatur T_{Sink} muss über der Frostgrenze des Sondenfluids liegen.
- Die Quelltemperatur T_{Source} kann nicht höher als die Temperatur des ungestörten Erdreiches T_m sein.

Mit Hilfe der Erdsondengleichung werden die minimale Quelltemperatur T_{Source} und die minimale Rücklauftemperatur T_{Sink} abgeschätzt. Dabei wird vereinfachend von einem konstanten Wärmeentzugsprofil von wahlweise 2, 5 oder 20 Tagen ausgegangen. Damit lässt sich ein minimal nötiger Solemassenstrom abschätzen. Für eine detailliertere Berechnung muss das effektive Entzugsprofil erfasst und in einem Erdwärmesonden-Simulationsprogramm wie z.B. EWS berechnet werden (Huber, Schuler, 1997; Huber, Pahud, 1999).

Die vorliegende Arbeit lässt es nun zu, von der in SIA Dok 0136 (1996) formulierten Empfehlung über den minimalen Solemassenstrom abzuweichen. Der darin geforderte, turbulente Wärmeübergang sollte nicht mehr als Auslegungsrichtlinie verwendet werden, da der Flaschenhals bei einem längeren Wärmeentzug gar nicht beim Wärmeübergang, sondern beim Nachfliessen der Wärme aus dem umliegenden Erdreich liegt. Gerade bei den, für Niedrigenergiehäusern typischen, kurzen Sondenbohrungen führte dies zu unnötig grossen Pumpleistungen. Mit der analytisch hergeleiteten Sondengleichung kann gezeigt werden, dass der Sondenmassenstrom linear mit der Bohrtiefe zunehmen muss, wir also bei kurzen Sondenbohrungen in der Regel laminare Strömungen, bei tiefen Bohrungen andererseits meist turbulente Strömungsverhältnisse in der Erdwärmesonde haben. Zum gleichen Ergebnis kommt auch Afjei et al. (1998).

Ein weiteres Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist der Einbezug der Druckabfälle im Verdampfer der Wärmepumpe, des Sondenverteilers und der horizontalen Zuleitungen. Der Druckabfall dieser Komponenten ist in der gleichen Grössenordnung wie der Druckabfall in der Erdwärmesonde selbst. Diese bisher oft vernachlässigten Grössen sind im vorliegenden Programm berücksichtigt.

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

Für die Beschaffung der notwendigen Produktangaben wurde ein neuer Weg beschritten. Mit einprogrammierten Hyperlinks können diese Daten aktuell aus dem Internet bezogen werden, ohne dass damit das Programm verlassen werden muss. Diese Links können vom Programm-Anwender selbst ergänzt werden.

Das vorliegende Programm kann für alle Benutzer gratis über das Internet herunter geladen werden. Es wurde im Datenformat Excel 97 erstellt, das die automatische Verknüpfung mit dem Internet erlaubt. Mit einer Dokumentengrösse von 200 kByte ist das Herunterladen auch mit analogen Modems problemlos möglich.

Abstract

In ground-coupled heat pump systems, often up to 20 % of the electrical energy is used to power the brine pump. This value can be reduced quite a bit by optimizing the brine cycle. To do so, we have to take into account the following system properties:

- temperature drop in the evaporator
- brine type and its physical properties
- pipe and borehole diameters
- number and length of boreholes
- specific heat extraction load in the borehole
- pressure losses in the manifold and the evaporator
- laminar or turbulent flow regime
- minimal flow rate needed by the heat pump
- efficiency of the brine pump

The number of parameters shown above makes it difficult to design an energetically optimized brine cycle. A simple Excel program has therefore been developed to support this optimization. With pull down menus the most common borehole types in Switzerland and typical brine fluids can be chosen. The nominal pressure loss in the manifold and heat pump is adjusted automatically to the effective flow rate. From the system parameters, a laminar or turbulent flow regime and its pressure drop in the borehole pipes is calculated and thus an optimal brine pump can be used. Hints are given on the input sheet to reach an optimal system layout.

The results of the program were compared with measurements. They showed the importance of a correct representation of the pressure drop in the manifolds. The differences between the calculation and the measurements were within a range of 10 %.

Verdankungen

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprogramms Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW) des Bundesamtes für Energie erstellt. Ich danke Herrn Dr. M. Zogg, Programmleiter UAW für das Zustandekommen dieser Arbeit und Herrn Christoph Wehrli, der die Messresultate seiner Anlage zur Verfügung gestellt hat. Wesentliche Teile des Programms sind an der Hochschule Technik+Architektur, Luzern, von den Herren Michael Wetter und Felix Kaufmann entstanden. Weitere Hinweise zum Programm kamen von Herrn Ernst Rohner, Grundag AG und Herrn Christoph Wehrli, EKZ Zürich. Frau Petra Widmer hat die Benutzeranweisung zum Excel-Eingabeblatt verfasst. Die Arbeit wurde von Herrn Dr. Th. Afjei angeregt und begleitet.

Inhaltsverzeichnis

1	ZIELSETZUNG DER ARBEIT	4
1.1	Einsatzgebiete von Erdwärmesonden	4
1.2	Anforderungen	5
2	ANALYTISCHE ERDSONDENGLEICHUNG	6
2.1	Methode der Antwortfunktionen	6
2.2	Die Bezeichnungen an der Sonde	6
2.3	Dimensionslose Sprungantwort „g-function“ von Eskilson	7
2.4	Berechnung der Quelltemperatur mit der Erdsondengleichung	9
2.5	Druckabfall in der Erdwärmesonde	11
2.6	Ungestörte Erdreichtemperaturen	12
2.7	Der Einfluss der Eigenschaft des Bodens	12
2.8	Stoffwerte des Erdreichs und Bodentemperaturen	13
3	VALIDIERUNG	15
3.1	Rechenresultate	16
3.2	Messresultate	17
3.3	Vergleich Rechnung - Messung	17
4	PROGRAMMBESCHRIEB	18
4.1	Bedienungsanleitung zum Programm EWS-Druck	18
5	SYMBOLVERZEICHNIS	21
6	LITERATURVERZEICHNIS	23
7	ANHANG	24
7.1	Berechnung des Druckabfallkoeffizienten	24

1 Zielsetzung der Arbeit

1.1 Einsatzgebiete von Erdwärmesonden

Erdwärmesonden werden in Einzelsonden oder in Sondenfeldern eingesetzt. Die daraus gewonnene Erdwärme kann direkt (Luftvorwärmung) oder mit Hilfe einer Wärmepumpe genutzt werden. Erdwärmesonden können aber auch zur Kühlung verwendet werden (direkt zur Luft- und Strukturkühlung oder als Rückkühlung für eine Wärmepumpe).

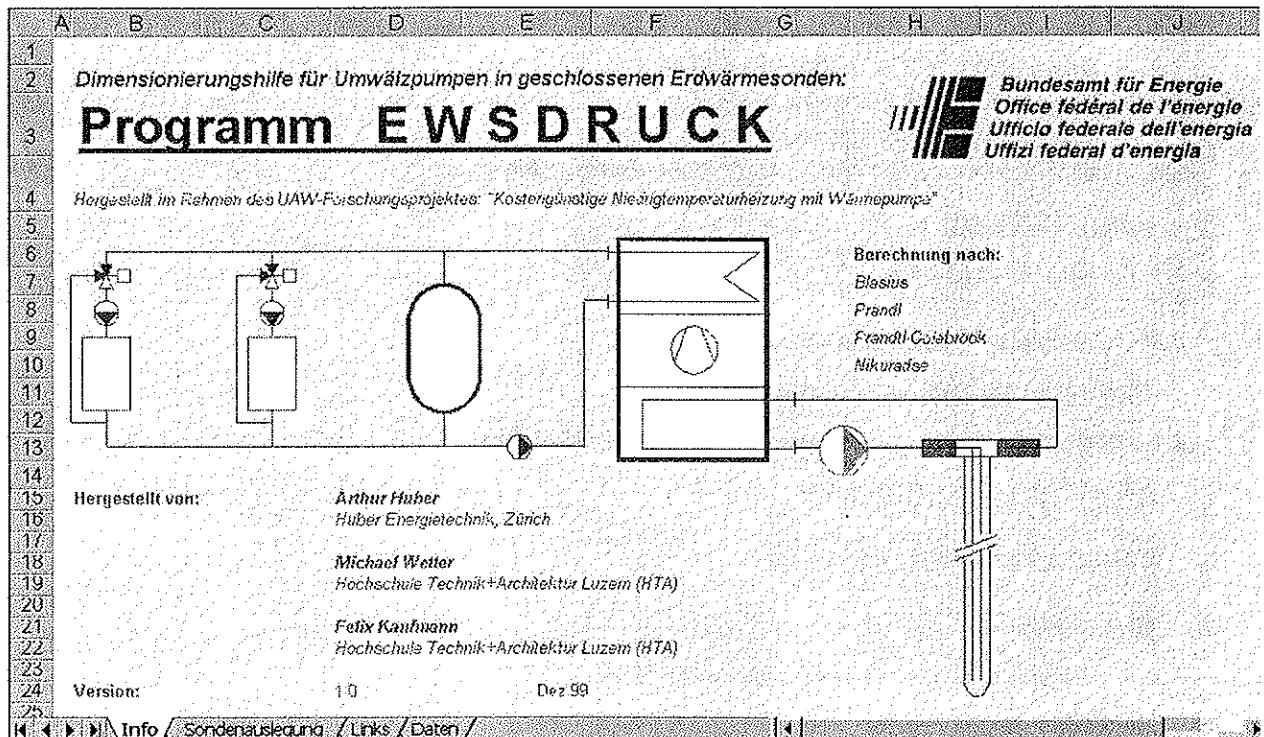


Abb 1-1: Typische Anwendungskonfiguration des Sondenpumpen-Auslegungsprogramms EWSDRUCK.

Die bis anhin häufigste Einsatzart ist die Kombination von Heizungs-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden als Wärmequelle (Abb 1-1). Das in einer geschlossenen Erdwärmesonde zirkulierende Sondenfluid wird als Wärmequelle für eine Wärmepumpe verwendet und dort im Verdampfer abgekühlt. Die dafür nötige Sondenpumpe ist teilweise für bis zu 20 % des Stromverbrauchs der ganzen Wärmepumpenanlage verantwortlich. Durch eine richtige Auslegung kann dieser Wert in der Regel unter 10 % gesenkt werden. Die wichtigsten Auslegungsgrößen sind:

-
- Auslegungswert der Temperaturspreizung von Sondenvorlauf zu Sondenrücklauf
 - Richtige Dimensionierung der Sondenverteiler und Zuleitungen
 - Durchmesser der Erdwärmesonden
 - Sondenlänge und Anzahl Sonden
 - Wahl des Sondenfluids (reines Wasser oder Wasser-Frostschutz-Gemisch)
 - Wahl der richtigen Sondenpumpe

Von untergeordneter Bedeutung sind hingegen die Empfehlungen der Wärmepumpenhersteller, da diese für den „worst case“, d.h. für unterdimensionierte Erdwärmesonden ausgelegt sind. Wir gehen aber hier von genügend tief gebohrten Erdwärmesonden aus, bei denen die Sondenrücklauftemperatur T_{Sink} nie unter den minimal nötigen Wert der Wärmepumpe sinkt. Um die Sondenlänge für den individuellen Betriebsfall richtig auszulegen sei hier auf die entsprechenden Erdwärmesondenprogramme wie EWS (Huber, Schuler, 1997; Huber, Pahud, 1999) verwiesen. Als Resultat der Anwendung des vorliegenden Druckberechnungsprogramms kann aber resultieren, dass die Bohrtiefe grösser gewählt werden muss, damit das Ziel von weniger als 10 % Pumpenenergie eingehalten werden kann.

1.2 Anforderungen

Das Computerprogramm erfüllt die folgenden Anforderungen:

- Übersichtliche Eingabe und Berechnung von Druckverlusten
- Dimensionierungshilfe für optimierte Pumpenauslegungen
- Einfache und benutzerfreundliche Bedienung des Programms in einer Excel-Tabelle
- Einfaches Einfügen von Wärmepumpen- und Umwälzpumpendaten, die direkt aus dem Internet abgerufen werden können
- Genauigkeit der berechneten Werte von 9 %
- Übersichtliches und zusammengefasstes Ausgabeblatt

2 Analytische Erdsondengleichung

2.1 Methode der Antwortfunktionen

Unter Vernachlässigung der konvektiven Transportvorgänge im Erdreich (d. h. kein Wärmetransport durch fließendes Grundwasser) kann das thermische Verhalten der Erde mit der Wärmeleitungsgleichung („Fourier-Gleichung“)

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T \quad \text{Gl. 2-1}$$

allgemein beschrieben werden. Die Temperaturleitfähigkeit a ist definiert als

$$a = \frac{\lambda_{\text{Erde}}}{c_{p_{\text{Erde}}} \rho_{\text{Erde}}} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Die Wärmeleitungsgleichung ist linear. Dies bedeutet, dass das Verhalten des Systems „Erde“ durch die Beschreibung einer Antwortfunktion, die das ganze Frequenzspektrum abdeckt, und durch Vorgabe der Anfangs- und Randbedingungen zu jeder Zeit eindeutig definiert ist. Oder mit anderen Worten: Die Antwortfunktion ersetzt uns die geometrischen Angaben über das System. Kennen wir die Antwortfunktionen, so benötigen wir keine Angaben mehr über Lage und Form eines Sondenfeldes.

Eine Sprungantwort ist immer nur für eine spezielle Anordnung eines Sondenfeldes mit Erdwärmesonden der Bohrtiefe H im Erdreich mit der Temperaturleitfähigkeit a und in einem definierten Abstand r_b von der Bohrung gültig. Wir benötigen also Gesetzmässigkeiten, um aus einer einzigen Sprungantwort das ganze Temperaturfeld für verschiedene Sondenlängen H und Temperaturleitfähigkeiten a abzuleiten.

2.2 Die Bezeichnungen an der Sonde

Bevor wir uns den Gesetzmässigkeiten von Erdwärmesonden zuwenden, betrachten wir einen Schnitt durch eine Doppel-U-Sonde. Bei diesem Sondentyp wird zunächst eine Bohrung mit dem Radius r_1 erstellt. Darin werden 4 Sondenrohre eingeführt und mit einer Zement-Bentonitmischung hinterfüllt. In 2 dieser Sondenrohre fließt das Sondenfluid hinunter und in 2 wieder hinauf. Die Rohre sind unten verbunden, wir betrachten also einen geschlossenen Sondenkreislauf. Am Rand dieser Bohrung, also auf dem Radius r_1 , ist die Bohrlochtemperatur T_b definiert. Wenn das Sondenfluid die Sonde verlässt hat es eine Quellentemperatur von T_{source} .

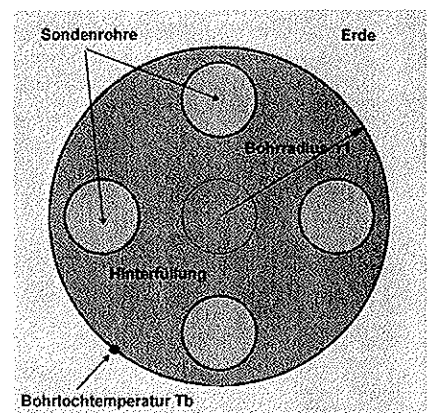


Abb 2-1: Sondenquerschnitt

2.3 Dimensionslose Sprungantwort „g-function“ von Eskilson

Sowohl Einzelsonden, als auch Sondenfelder bei geometrischer Ähnlichkeit auch ähnliche Temperatur-Sprungantworten aufweisen. Der Zeitmassstab muss dabei mit der Sondenzeitkonstante t_s

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \quad \text{Gl. 2-3}$$

dimensionsbefeit werden. Die dimensionslose Zahl Es von Eskilson

$$Es = \frac{t \cdot 9a}{H^2} \quad \text{Gl. 2-4}$$

kann somit als dimensionslose Zeit für Sondenfelder und Einzelsonden betrachtet werden.

Nach Eskilson kann bis zum Zeitpunkt $Es = 1$ die vertikale Wärmeleitung im Erdreich (bei einem maximalen Fehler von 7 %) vernachlässigt werden, ab ca. $Es = 10$ ist der Gleichgewichtszustand im Erdreich beinahe hergestellt. Im Gleichgewichtszustand fließt im Jahreschnitt die gleiche Energiemenge, die mit der Sonde dem Erdreich entzogen wird, von der Erdoberfläche und zu einem kleineren Teil vom Erdinnern vertikal wieder nach. Es findet somit keine weitere Auskühlung mehr statt.

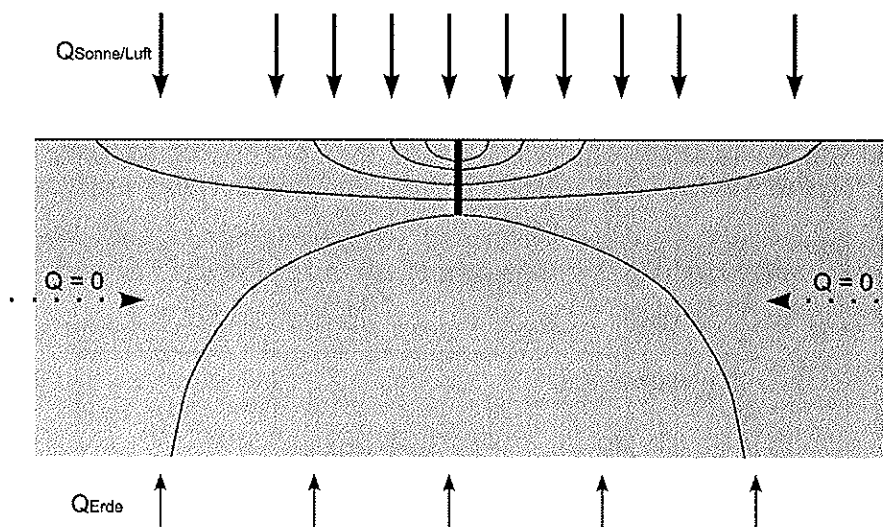


Abb 2-2: Wärmeflusslinien für Einzelsonden im Gleichgewichtszustand

Die Dimensionsbefreiung der Temperaturabsenkung ΔT bei einer spezifischen Wärmeentzugsleistung \dot{q} erfolgt mit \dot{q} , der Wärmeleitfähigkeit der Erde λ_{Erde} und der Sondenlänge H . Damit kann die dimensionslose Temperaturabsenkung g definiert werden als

$$g \left(Es, \frac{r_b}{H} \right) = \frac{\Delta T \cdot 2 \pi \cdot \lambda_{\text{Erde}}}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Die dimensionslose Temperatursprungantwort g (=„g-function“) ist nach Eskilson (1987) sowohl für Einzelsonden, als auch für Sondenfelder einzig ein Funktion der dimensionslosen Zeit Es und des dimensionslosen Sondenabstandes r_b/H . Es wird dabei von einem konstanten, spezifischen Wärmeentzug pro Sondenlänge \dot{q} ausgegangen. Für eine Einzelsonde im Bereich $5r_b^2/a < t < t_s$ kann die Funktion g bei einem maximalen Fehler von 7 % angenähert werden mit

$$g(Es, r_b / H) = \ln\left(\frac{H}{2r_b}\right) + 0.5 \ln(Es) \quad \text{Gl. 2-6}$$

Um die absolute Temperatur im Erdreich zu erhalten, kann nun die Sprungantwort ΔT einfach von der Anfangstemperatur T_m abgezählt werden (Superpositionsprinzip). Die Bohrlochtemperatur T_b z.B. kann aus g und T_m wie folgt berechnet werden:

$$T_b = T_m - \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}}} g(Es, r_1 / H) \quad \text{Gl. 2-7}$$

T_m ist die mittlere Erdreichtemperatur im ungestörten Zustand in halber Sondentiefe. Sie berechnet sich aus der durchschnittlichen Jahres-Erdoberflächentemperatur T_{mo} und dem Temperaturgradienten T_{Grad} wie folgt:

$$T_m = T_{mo} - T_{\text{Grad}} \frac{H}{2} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Die durchschnittliche Jahres-Erdoberflächentemperatur T_{mo} ist gleich der durchschnittlichen Jahres-Lufttemperatur plus einer mittleren Bodenerwärmung von 0.8 bis 2 Grad, der Temperaturgradient schwankt von 0.03 bis 0.04 Grad/m.

Was jetzt noch fehlt, ist die Abhängigkeit der g -Funktion vom Sondenabstand r_1 . Dafür gilt nach Eskilson der folgende, logarithmische Zusammenhang:

$$g(Es, r_1 / H) = g(Es, r_b / H) - \ln(r_1 / r_b) \quad \text{Gl. 2-9}$$

Diese Formel ist im Sonden-Nahbereich gültig und ermöglicht es uns, mit einer einzigen Sprungantwort g das Temperaturverhalten im ganzen Sonden-Nahbereich zu bestimmen.

In Bild 2 sind als Beispiel die dimensionslosen Temperatur-Sprungantworten („ g -function“) von 2 Erdwärmesonden im Abstand B eingezeichnet. Im Vergleich dazu ist gestrichelt die g -function einer Einzelsonde zu finden.

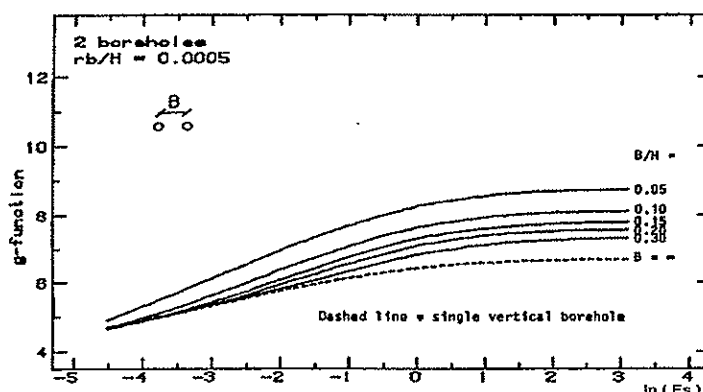


Abb 2-3: Dimensionslose Sprungantwort „ g -functions“ für 2 Erdwärmesonden mit dem Abstand B nach Eskilson (1987). Die Sprungantwort einer Einzelsonde ist gestrichelt eingezeichnet.

2.4 Berechnung der Quelltemperatur mit der Erdsondengleichung

Mit der Formel Gl. 2-7 kann die zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Bohrlochtemperatur berechnet werden, sofern die Temperatur-Sprungantwort g bekannt ist. In diesem Abschnitt soll nun gezeigt werden, wie sich damit die Quelltemperatur T_{Source} , d.h. die durchschnittliche Temperatur des Sole, die aus der Sonde kommt, bestimmen lässt.

Mit der mittleren Fluidtemperatur T_f in der Sonde und der Bohrlochtemperatur T_b kann der Bohrlochwiderstand R_b definiert werden als

$$R_b = \frac{T_b - T_f}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Der Bohrlochwiderstand R_c setzt sich zusammen aus dem Bohrloch-Hinterfüllungswiderstand (typischer Wert 0.08 Km/W) und dem Wärmeübergangswiderstand R_α von der Hinterfüllung ans Sondenfluid:

$$R_b = R_\alpha + R_c \quad \text{Gl. 2-11}$$

Ansätze für die Berechnung von R_b sind zum Beispiel bei Hellström (1991) oder Huber und Schuler (1997) zu finden. Gehen wir nun vereinfachend davon aus, dass die mittlere Fluidtemperatur in der Sonde dem arithmetischen Mittel der Quelltemperatur T_{Source} und der Rücklauftemperatur T_{Sink} entspricht

$$T_f \cong \frac{T_{\text{Source}} + T_{\text{Sink}}}{2} \quad \text{Gl. 2-12}$$

wobei die Rücklauftemperatur bestimmt ist durch

$$T_{\text{Sink}} = T_{\text{Source}} - \frac{\dot{q} H}{c p_{\text{Sole}} \dot{m}_{\text{Sole}}} \quad \text{Gl. 2-13}$$

so kann damit die Quelltemperatur T_{Source} berechnet werden als

$$T_{\text{Source}} = T_b - \left[R_b - \frac{H}{2 \dot{m}_{\text{Sole}} c p_{\text{Sole}}} \right] q \quad \text{Gl. 2-14}$$

Der thermische Widerstand R_b kann aufgeteilt werden in den Wärmeübergangswiderstand der Sole an die Sonde und den thermischen Widerstand R_c bis zum Bohrlochradius:

$$T_{\text{Source}} = T_m - \left[\frac{g(t, H)}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}}} + \frac{1}{8 \pi \alpha r_o} + R_c - \frac{H}{2 \dot{m} c p} \right] q \quad \text{Gl. 2-15}$$

Bei der Quellen-Mitteltemperatur (=durchschnittliche Temperatur der Sondenflüssigkeit im Verdampfer) fällt in der Erdsondengleichung für die Bestimmung der Quelltemperatur sogar der Solemassenstrom heraus:

$$T_{\text{Quellen-Mitteltemperatur}} = T_m - \left[\frac{g(t, H)}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}}} + \frac{1}{8 \pi \alpha r_o} + R_c \right] q \quad \text{Gl. 2-16}$$

Für die Sonden-Rücklauftemperatur T_{Sink} (massgebend für die Frostsicherheit) muss der Solemassenstrom allerdings wieder mit einbezogen werden:

$$T_{\text{Sink}} = T_m - \left[\frac{g(t, H)}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}}} + \frac{1}{8 \pi \alpha r_o} + R_c + \frac{H}{2 \dot{m} cp} \right] q \quad \text{Gl. 2-17}$$

Für die Verdampfungstemperatur (und somit für den Wirkungsgrad der Wärmepumpe) ist ausschliesslich die Rücklaufftemperatur T_{Sink} massgebend. Für einen maximalen Wirkungsgrad der Wärmepumpe (COP) muss somit der Solemassenstrom hoch gewählt werden. Dies ist auch der Grund, dass die meisten Wärmepumpen in den Herstellerangaben einen (physikalisch nicht begründbaren), hohen Solemassenstrom fordern. Unser Ziel sollte es aber nicht sein, den Wärmepumpenwirkungsgrad (COP), sondern die Jahresarbeitszahl (JAZ) der Gesamtanlage, die auch den Strombedarf der Solepumpe beinhalten, zu maximieren. Und da liegt das Optimum in der Regel bei weit geringeren Solemassenströmen.

Wir wollen deshalb im folgenden darstellen, welches der minimal nötige Solemassenstrom ist. Dazu müssen diese Bedingungen eingehalten werden:

- Die Rücklaufftemperatur T_{Sink} muss über der Frostgrenze des Sondenfluids sein
- Die Rücklaufftemperatur T_{Sink} muss in jedem Fall über der minimalen Verdampfungstemperatur der Wärmepumpe liegen
- Die Quelltemperatur T_{Source} kann nicht über der Temperatur des ungestörten Erdreiches T_m liegen.

Bei den ersten beiden Bedingungen ist nun die durchschnittliche Laufzeit der Sondenpumpe massgebend, da $g(t, H)$ eine Funktion der Zeit ist und mit der Zeit auch immer grösser wird. Das Märchen von der unbedingt nötigen, turbulenten Strömung in der Sonde lässt sich leicht widerlegen, wenn man bedenkt, dass die minimale Quelltemperatur immer am Ende einer Entzugsperiode liegt, wenn $g(t, H)$ und somit der Faktor R_g um Faktoren grösser wird als R_b . Für die ersten beiden Bedingungen müssen wir somit die Sondenlaufzeit bis zum Betrachtungszeitpunkt kennen, damit $g(t, H)$ bestimmt werden kann.

Die letzte Bedingung kann mit Gl 2-12 auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$\frac{g(t, H)}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}}} + R_b \geq \frac{H}{2 \dot{m} cp} \quad \text{Gl. 2-18}$$

Da der minimale Wert von $g(t=0, H)$ beim Anlaufen der Erdwärmesonde Null ist, kann die Bedingung für den Solemassenstrom auch geschrieben werden als

$$\dot{m} \geq \frac{H}{2 cp R_b} \quad \text{Gl. 2-19}$$

Die Gleichung 2-17 sieht zwar einfach aus, doch sollte man bedenken, dass R_b wiederum eine Funktion des Solemassenstromes \dot{m} ist und deshalb nicht geschlossen aufgelöst werden kann. Da bei der Formulierung dieser Bedingung der Temperaturtrichter nicht berücksichtigt ist, wurde im Programm eine etwas restriktivere Bedingung formuliert, bei der der doppelte Solemassenstrom verlangt wird:

$$\dot{m} \geq \frac{H}{cp R_b} \quad \text{Gl. 2-20}$$

Für die Berechnung von R_b wird der Wärmeübergangskoeffizient α vom Fluid an die Sondenrohre benötigt. Er wird üblicherweise dimensionslos mit der Nusseltzahl Nu für die ausgebildete Rohrströmung angegeben:

$$Nu(Re, Pr) = \frac{\alpha_1 D_i}{\lambda_{Sole}} \quad \text{Gl. 2-21}$$

Für Reynoldszahlen $Re < 2'300$ liegen wir immer im laminaren Bereich und benützen die folgende Beziehung:

$$Nu_{lam} = \left[49 + \frac{4.17 Re Pr}{2H} \right]^{1/3} \quad \text{Gl. 2-22}$$

Im turbulenten Bereich $Re > 2'300$ gilt die folgende Beziehung:

$$Nu_{turb} = 0.012 (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} \left[1 + \left(\frac{D_i}{2H} \right)^{2/3} \right] \quad \text{Gl. 2-23}$$

2.5 Druckabfall in der Erdwärmesonde

Es wird immer mit hydraulisch glatten Röhren gerechnet, was bei den meist eingesetzten PE-Röhren keinen all zu grossen Fehler ergibt. Für die Berechnung des Druckabfalls unterscheiden wir zwischen einem laminaren und einem turbulenten Bereich.

Im laminaren Bereich ($Re < 2320$) gilt:

$$\xi = \frac{64}{Re} \quad \text{Gl. 2-24}$$

Im turbulenten Bereich ($2320 < Re < 100'000$) wird der folgende Ansatz verwendet:

$$\xi = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \quad \text{Gl. 2-25}$$

Für $Re > 100'000$ gilt

$$\xi = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \quad \text{Gl. 2-26}$$

Um der Turbulenzproduktion in der Umwälzpumpe Rechnung zu tragen, wird von einem minimalen Wert des Druckverlustkoeffizienten ausgegangen:

$$\xi_{Min} = 0.0455 \quad \text{Gl. 2-27}$$

Daraus berechnet sich der Druckabfall mit:

$$\Delta p = \frac{H \xi \rho_{Sole} v^2}{2D_i} \quad \text{Gl. 2-28}$$

2.6 Ungestörte Erdreichtemperaturen

Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen sind bis in Tiefen von 10-15 Metern messbar, darunter herrschen konstante Temperaturen. In 10 Metern Tiefe ist das Erdreich etwa 1°C wärmer als die Lufttemperaturen im Jahresschnitt. In städtischen Gebieten liegt dieser Wert bei 2°C und in schneereichen Gegenden bis 4°C. Die Temperaturen nehmen mit 2.5 - 4°C pro 100 Meter Tiefe zu.

Tiefe:	freie Lage Mittelland	Zürich Basel	Davos (mit Schnee)
-25 m	11.3	12.5	8.0
-50 m	12.0	13.5	8.7
-75 m	12.8	14.5	9.5
-100 m	13.5	15.5	10.2
-125 m	14.3	16.5	11.0
-150 m	15.0	17.5	11.7
-175 m	15.8	18.5	12.5
-200 m	16.5	19.5	13.2

2.7 Der Einfluss der Eigenschaft des Bodens

Verschiedenen Böden haben verschiedene Wärmeleitfähigkeiten. Bei den Erdsonden kommt der Widerstand der Hinterfüllung (Füllmaterial zwischen den Sondenrohren und dem Bohrloch) hinzu. Diese Hinterfüllung ist in der Regel Bentonit, das eine bedeutend kleinere Wärmeleitfähigkeit als das Erdreich hat (ca. 0.81 W/mK). Die folgende Grafik zeigt die Quellentemperaturen bei Böden mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten.

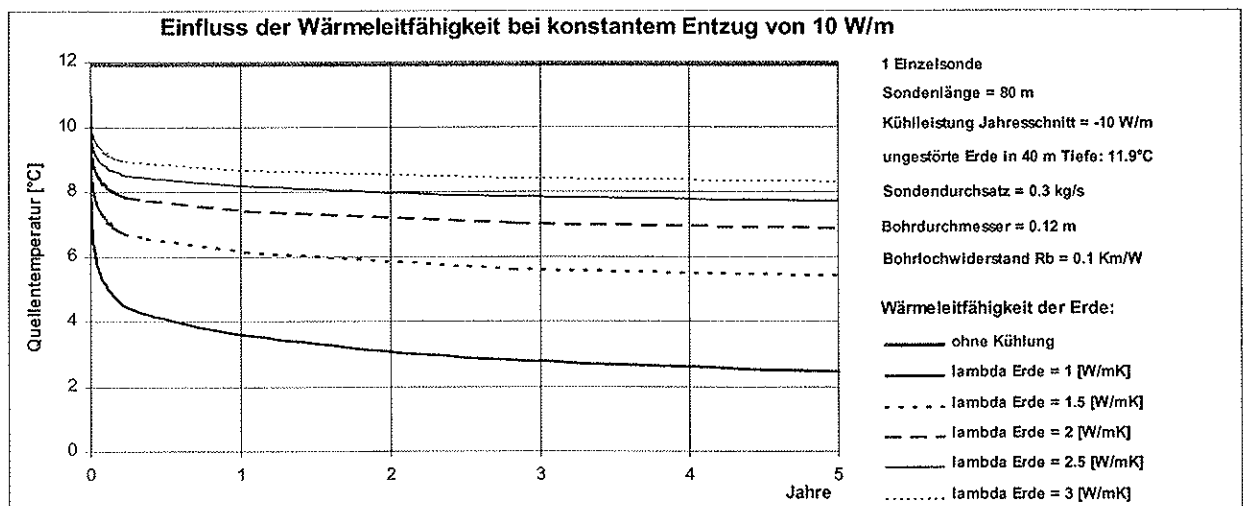


Abb 2-1: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit bei konstantem Wärmeentzug von 10W/m

2.8 Stoffwerte des Erdreichs und Bodentemperaturen

Für die korrekte Berechnung des thermischen Verhaltens von Erdwärmesonden und Sondenfeldern sind die Stoffeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} , Wärmekapazität $c_{p_{\text{Erde}}}$, Dichte ρ_{Erde}) und die Temperaturen des ungestörten Erdreiches von entscheidender Bedeutung. Deshalb wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energie das Programm SwEWS entwickelt, das auf der Basis von 230 Messungen im Schweizer Molassebecken Vorschlagswerte für diese Stoffeigenschaften in verschiedenen Schichten bis 500 m Tiefe generiert (Leu et al, 1999). Als Eingabeparameter wird die geografische Länge und Breite, die Schichtdicke und die Zuordnung zu einer geologischen Schicht des Molassebeckens verlangt (USM, OMM, USM, Schlamm-Siltstein, Siltstein, Feinsandstein, Mittelsandstein, Grobsandstein und Konglomerat). Diese Angaben sind oft aus Bohrprofilaufnahmen von Erdwärmesonden in der Nähe abschätzbar (erhältlich bei den kantonalen Bewilligungsbehörden, bei den Bohrfirmen oder den lokalen Geologiebüros). Als weitere Hilfestellung kann die nächstgelegene, in der Datenbank enthaltene Bohrung angezeigt werden. Eine gewisse Unsicherheit kommt aus der notwendigen Abschätzung der Schichtdicke des über der Molasse liegenden Schotter- und Moränengebietes.

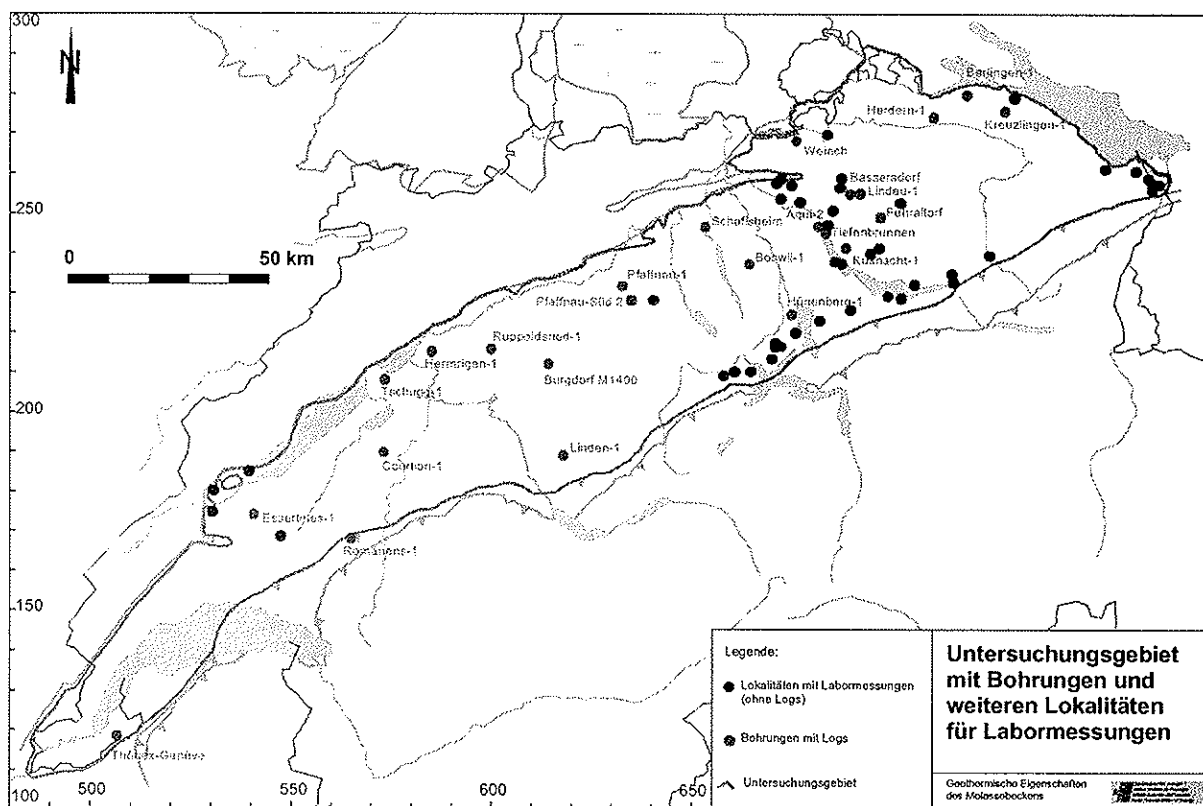


Abb 2-2: Bodeneigenschaft des schweizerischen Mittellandes können aus dem Programm SwEWS-99 (Leu et al. 1999) exportiert und in das Programm EWS importiert werden.

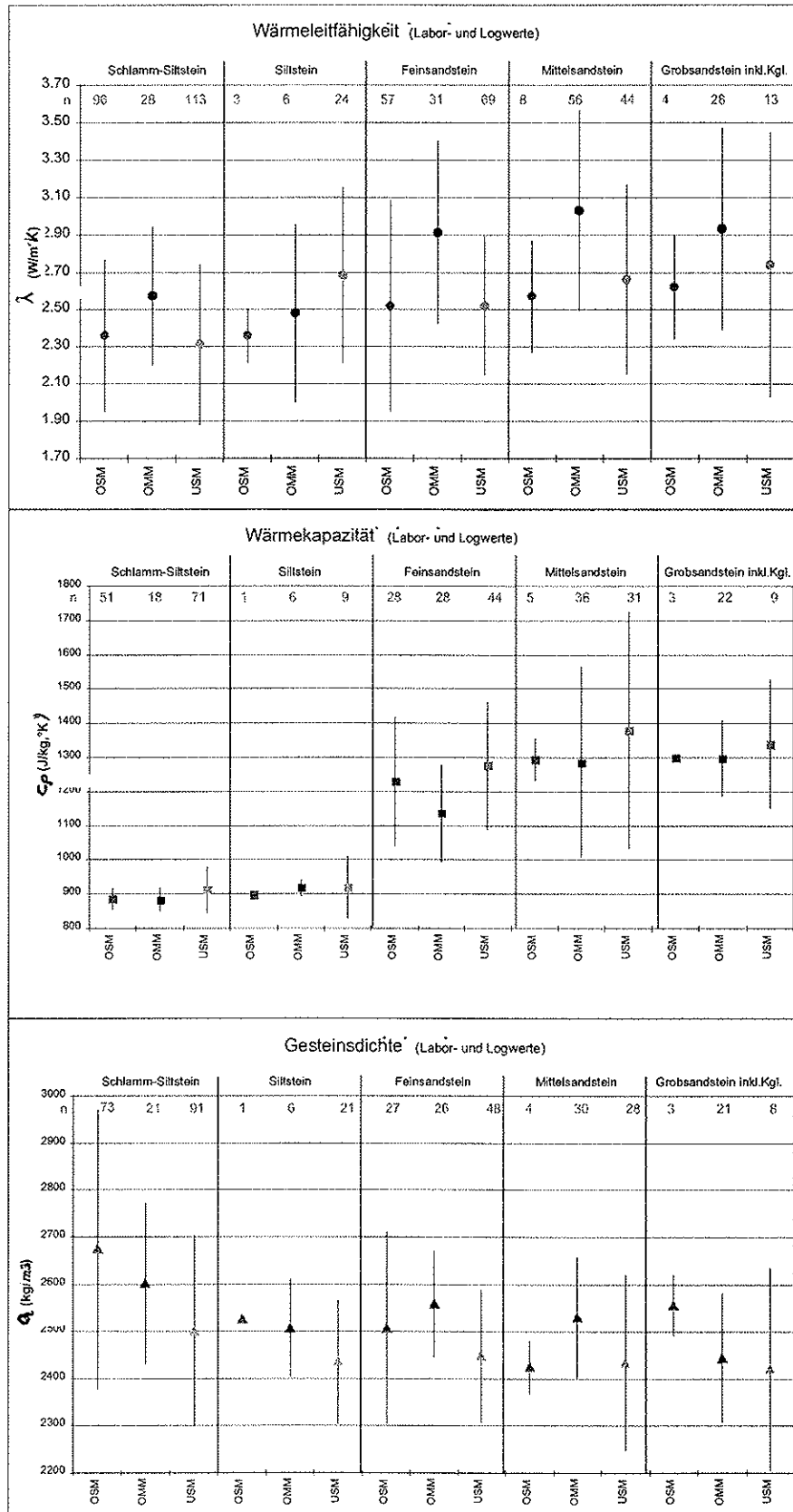


Abb 2-3: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Stoffwerte des Bodens im Molassebecken des schweizerischen Mittellandes nach Leu et al. (1999).

3 Validierung

Für die Validierung wurden von Herrn Christoph Wehrli Messungen an seiner eigenen Erdwärmesondenanlage in Thalwil zur Verfügung gestellt. Die Anlage weist die folgenden Kenn-
daten auf:

- Standort: Tischenloostr. 30 a, Thalwil (ca. 430 m. ü. M.)
- Heizleistungsbedarf: 13.2 kW
- Wärmepumpe: Wasser-Wasser-WP, Lexeta WI 13P
- Anzahl Erdwärmesonden: 2
- Bohrtiefe: 2 x 168 m
- Sondenfluid: Wasser ohne Frostschutzmittel
- Sondenpumpe: Smedegaard Inlinepumpe T3-71-2
- el. Nennleistung Sondenpumpe: 250 W
- effektive el. Leistungsaufnahme: 171 W bei Nennbetrieb von 2.7 m³/h und 604 mbar
- Wirkungsgrad Sondenpumpe: 27.0 % bei Nennbetrieb

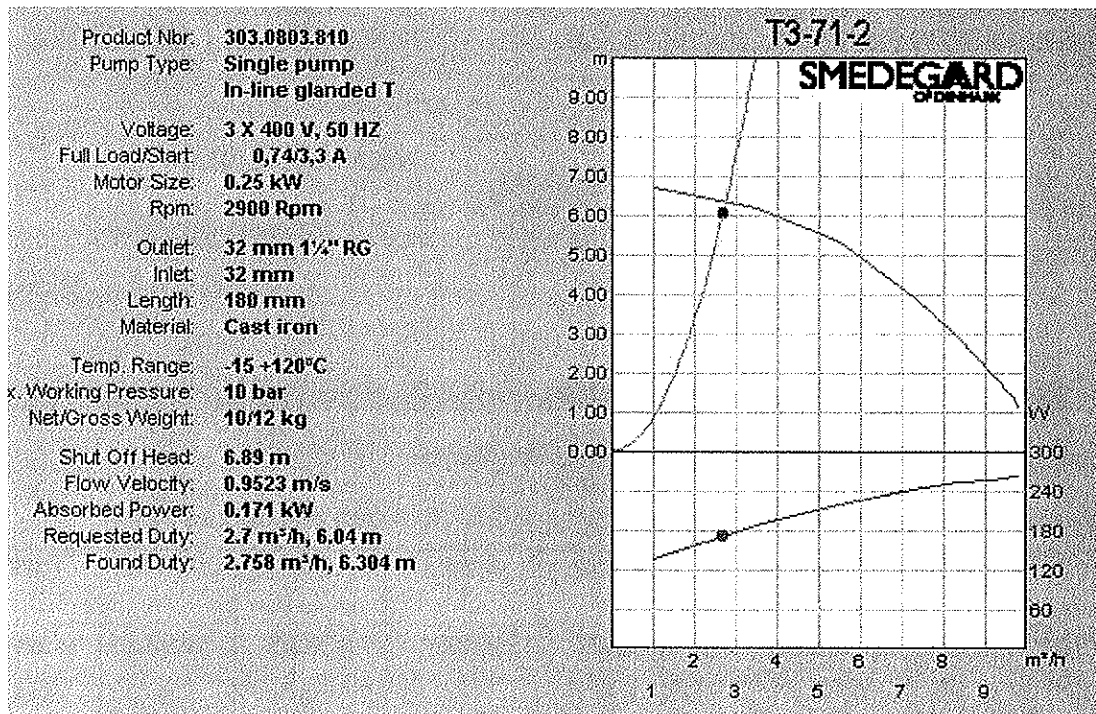


Abb 3-1: Betriebspunkt der Sondenpumpe der Anlage Wehrli im Nennbetrieb

3.1 Rechenresultate

In der folgenden Abbildung sind Eingabeparameter für den Nennbetrieb der Anlage Wehrli abgebildet:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
4	Gebäude und Standort					Stoffwerte Sondenfluid				
5										
6	Wärmebedarf		13 kW			Wasser		4 °C		
7	Warmwasserbedarf		kW			Dichte ρ		1000 kg/m ³		
8	Andere		kW			Kinematische Viskosität ν		1.604 mm ² /s		
9	Gebäude Total		13 kW			spez. Wärmekapazität c_p		4.22 kJ/(kg·K)		
10	Lage		Mittelland 500m			Frost bei		0 °C		
11	Jahresmitteltemperatur		9.6 °C			Wärmeübergangskoeffizient α		1151 W/m ² K		
12	Wärmeleitfähigkeit der Erde		2.5 W/mK			Info				
13	mittlere Erdoberflächtemperatur		13.3 °C							
14						Druckverluste im Verteiler und Zuleitung				
15	Wärmepumpe		Informationen über W/P (Internet)			Nenndruckverlust Verteiler		3.9 kPa		
16						Nennvolumenstrom Verteiler		2700 kg/h		
17	Fabrikat: Lexeta		Typ: LI10P			Nenn-V Volumenstrommesser		4.5 kPa		
18	Nennleistung Wärmepumpe		13 kW			Nenn-V Vol.strommesser		2700 kg/h		
19	COP bei obiger Nennleistung		4.5 -			Nenndruckverlust Fest		2 kPa		
20	Nenndruckverlust Verdampfer		11.7 kPa			Nennvolumenstrom Fest		2700 kg/h		
21	Nennvolumenstrom Verdampfer		2650 kg/h			Innendurchmesser Anschlüsse		20.4 mm		
22	Entzugsprofil / Schaltintervall		Mittel (5Tage)			Länge horizontaler Anschlüsse		20 m		
23	Leistungsaufnahme (elektrisch)		2.9 kW			Bogen 90° ($\zeta = 0.3$)		0 Stk.		
24	Massenstrom Wärmepumpe		2700 kg/h			Tauchhülsen ($\zeta = 0.2$)		0 Stk.		
25						andere ζ -Werte oder $\Sigma \zeta$		0 -		
26	Sondenparameter					Sonden - Umwälzpumpe				
27						Informationen über U/W/P (Internet)				
28	spez. Sondenleistung		30 W/m			Fabrikat: Smedegard		Typ: T3-80-2		
29	Bohrtiefe		168 m			Totaler Druckabfall		57.4 kPa		
30	Anzahl Sonden		2					5.86 m		
31	Temperaturspannung VL-RL		3.195 K							
32	Bohrlochdurchmesser		15 cm							
33	Rohrdimension		32 mm doppel-U							

Abb 3-2: Berechnung der Anlage Wehrli im Nennbetrieb

Eine Variation des Sondendurchsatzes führt auf die folgenden Rechenresultate:

V	Verteiler	Schlauch DN25 (3.5 m)	Wärme-zähler	Sonde	WP	Diverses	Total
[m ³ /h]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]
1.5	12	20	14	105	38	6	194
2	21	33	25	173	67	11	330
2.5	33	48	39	256	104	17	498
2.7	39*	53*	45*	300	122	20*	574
3	48	66	56	353	150	25	698

Tabelle 3-1: Berechnung der Anlage Wehrli in Thalwil

Der Druckabfall in der Sonde und der Wärmepumpe sind berechnet, der Druckabfall der übrigen Komponenten (Werte mit einem * gekennzeichnet) wurden im Nenndurchsatz von der Messung übernommen.

3.2 Messresultate

Durch Anpassungen an der Sondenpumpe konnte der Sondendurchsatz variiert und der Druckabfall auf den einzelnen Elementen des Sondenkreislaufes wie folgt gemessen werden:

V	Verteiler	Schlauch DN25 (3.5 m)	Wärme- zähler	Sonde	WP	Diverses	Total
[m ³ /h]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]
1.5	13	18	14	115	50	6	216
2	22	30	25	192	75	11	355
2.5	34	46	38	285	110	17	530
2.7	39	53	45	327	120	20	604
3	48	65	55	394	135	24	721

Tabelle 3-2: Druckmessungen an der Anlage Wehrli in Thalwil (Messung: Ch. Wehrli)

3.3 Vergleich Rechnung - Messung

Der gemessene Druckverlust ist generell etwas grösser, als der berechnete. Die Resultate bestätigen aber die Berechnungen. Betrachtet man nur den Druckverlust der Sonde sind die Fehler etwas grösser, als diejenigen des gesamten Druckverlustes. Alle bleiben aber unter der 10%-Grenze.

V̇	Sonde		Totaler Druckverlust	
	[m ³ /h]	[mbar]	[mbar]	[%]
1.5	10	8.7	22	10.2
2	19	9.9	25	7.0
2.5	29	10.2	32	6.0
2.7	27	8.3	30	5.0
3	41	10.4	23	3.2

Erkenntnisse:

Die Berechnung stimmt mit einer grossen Genauigkeit. Bisweilen ist fraglich, ob die Messwerte, oder die Berechnung die grösseren Fehler aufweisen. Wenn die Werte also genau eingegeben werden können, stimmt die Berechnung mit einem maximalen Fehler von 10 % !

4 Programmbeschreibung

4.1 Bedienungsanleitung zum Programm EWS-Druck

Die Angaben werden im Excel-Blatt "Sondenauslegung" eingegeben.

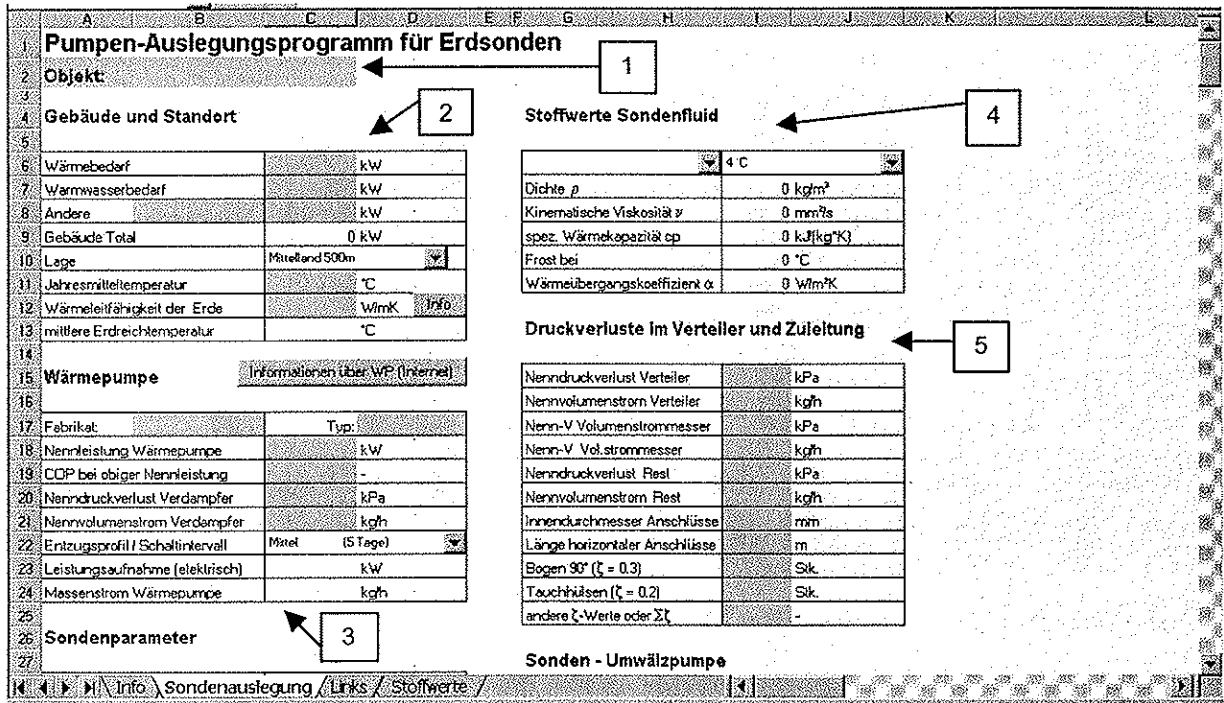


Abb 4-1: Eingabebildschirm (1. Teil) des Excel-Programms EWSDRUCK

1. Objekt benennen
2. In der Tabelle "Gebäude und Standort" werden Angaben über
 - den Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes
 - den Leistungsbedarf für das Warmwasser und
 - andere Energieleistungsbedarfe, die genauer bezeichnet werden können, eingefügt.

Diese Werte werden benötigt, um daraus zusammen mit dem COP die Sondenbelastung zu berechnen.

Die Lage des Objekts kann als Mittelland, Voralpen und Alpen bezeichnet werden. Die Lageangabe wird benötigt, um die Differenz der mittleren Erdreichtemperatur zu der Jahresmitteltemperatur der Luft abschätzen zu können. Somit müssen noch die Jahresmitteltemperatur und die Wärmeleitfähigkeit der Erde angegeben werden. Typische Werte für verschiedene Bodentypen werden angezeigt, wenn das **Info-Feld** angewählt wird.

3. In der Tabelle "Wärmepumpe" werden Angaben über Fabrikat, Typ, Nennleistung der Wärmepumpe, COP bei der gewählten Nennleistung, Nenndruckverlust des Verdampfers und Nennvolumenstrom des Verdampfers gemacht und ein Entzugsprofil eingegeben.

Wird das Feld "Informationen über WP (Internet)" angewählt, wird auf verschiedene Wärmepumpenhersteller verwiesen, bei denen die gesuchten Angaben gefunden werden können. Weitere Internetadressen von Wärmepumpenherstellern können im Excel-Blatt "Links" eingetragen werden (siehe auch Punkt 8).

4. In der Tabelle "Stoffwerte Sondenfluid" können das Sondenfluid und die Temperatur des Fluids ausgewählt werden. Als verschiedene Fluide stehen zur Verfügung:

- Wasser
- Monoethylenglykol 25 %
- Monoethylenglykol 33 %
- Monopropylenglykol 25 %
- Monopropylenglykol 33 %

Mit diesen beiden Angaben zum Fluid und seiner Temperatur werden vom Programm die Dichte, Viskosität, Wärmekapazität, Frosttemperatur und der Wärmeübergangskoeffizient berechnet.

5. In der Tabelle "Druckverluste im Verteiler und Zuleitung" werden Angaben zum Nenndruckverlust im Verteiler, Nennvolumenstrom im Verteiler, Nennvolumen-Volumenstromdurchmesser, Nennvolumen-Volumenstrommesser, restlichen Nenndruckverlust, restlichen Nennvolumenstrom, Innendurchmesser der Anschlüsse, zur Länge der horizontalen Anschlüsse, Anzahl 90° - Bogen und Tauchhülsen und zu anderen ξ -Werten eingefügt.

Die Angaben in dieser Tabelle sind optional, d. h. nur wenn zusätzliche Druckverluste vorhanden sind, einzufügen. Die Nennvolumenströme der einzelnen Komponenten müssen nicht übereinstimmen.

Sondenparameter		Sonden - Umwälzpumpe																							
28	spez. Sondenleistung		W/m																						
29	Bohrtiefe		m																						
30	Anzahl Sonden																								
31	Temperaturspannung VL-RL	K																							
32	Bohrlochdurchmesser	cm																							
33	Bohrdimension	32 mm doppel-U																							
Strömungswerte (für Doppel U-Rohr)																									
37	Massenstrom Sonde(n) (mittel)	kg/h																							
38	Geschwindigkeit Sonde(n) #-	0.00 m/s																							
39	Hydraulisch glattes Rohr	laminare Strömung																							
40	mittlerer spez. Druckverlust	0 Pa/m																							
41	mittlerer Druckabfall einer Sonde	0.0 kPa																							
		<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Informationen über UWP (Internet)</td> </tr> <tr> <td>Fabrikat</td> <td>Typ</td> </tr> <tr> <td>Totaler Druckabfall</td> <td>0.0 kPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.00 m</td> </tr> <tr> <td>Volumenstrom</td> <td>0.00000 m³/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.00 m³/h</td> </tr> <tr> <td>benötigte Leistung der Pumpe</td> <td>0.0 W</td> </tr> <tr> <td>Wirkungsgrad der Pumpe</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Leistungsaufnahme Pumpe</td> <td>W</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Anteil der Pumpenenergie am Stromverbrauch</td> </tr> <tr> <td>Anteil Sondenpumpe</td> <td>0.0 %</td> </tr> </table>		Informationen über UWP (Internet)		Fabrikat	Typ	Totaler Druckabfall	0.0 kPa		0.00 m	Volumenstrom	0.00000 m³/s		0.00 m³/h	benötigte Leistung der Pumpe	0.0 W	Wirkungsgrad der Pumpe	%	Leistungsaufnahme Pumpe	W	Anteil der Pumpenenergie am Stromverbrauch		Anteil Sondenpumpe	0.0 %
Informationen über UWP (Internet)																									
Fabrikat	Typ																								
Totaler Druckabfall	0.0 kPa																								
	0.00 m																								
Volumenstrom	0.00000 m³/s																								
	0.00 m³/h																								
benötigte Leistung der Pumpe	0.0 W																								
Wirkungsgrad der Pumpe	%																								
Leistungsaufnahme Pumpe	W																								
Anteil der Pumpenenergie am Stromverbrauch																									
Anteil Sondenpumpe	0.0 %																								

Abb 4-2: Eingabebildschirm (2. Teil) des Excel-Programms EWSDRUCK

6. In der Tabelle "Sondenparameter" muss die spezifische Sondenleistung **oder** die Bohrtiefe eingegeben werden. Falls beide Felder ausgefüllt werden, erscheint ein rot geschriebener Hinweis.

Die restlichen Felder mit Angaben zur Anzahl Sonden, Temperaturspreizung VL-RL, zum Bohrlochdurchmesser und zur Rohrdimension müssen alle ausgefüllt werden.

Übliche Werte für Bohrlochdurchmesser sind:

- 26 mm und 32 mm Sondenrohre: 12 cm Bohrlochdurchmesser
- 40 mm Sondenrohre: 15 cm Bohrlochdurchmesser

7. In der Tabelle "Sonden-Umwälzpumpe" werden das Fabrikat und der Typ sowie der Wirkungsgrad **oder** die Leistungsaufnahme der Pumpe eingetragen. Falls beide Felder ausgefüllt werden, erscheint ein rot geschriebener Hinweis. Wirkungsgrade von 25 % sind heute erreichbar.

Der errechnete Druckabfall multipliziert mit dem angegebenen Volumenstrom ergibt die benötigte Leistungsaufnahme der Pumpe.

Das Feld "Informationen über UWP (Internet)" verweist auf die Internetadressen von verschiedenen Herstellern, bei denen Informationen über verschiedene Sonden-Umwälzpumpen gefunden werden können. Weitere Internetadressen von Umwälzpumpenherstellern können im Excel-Blatt "Links" eingegeben werden (siehe auch Punkt 9).

Sind alle erforderlichen Angaben eingetragen, berechnet das Programm den Anteil der Pumpenenergie am gesamten Stromverbrauch in Prozent.

Wird der Befehl "Drucken" ausgeführt, so wird automatisch ein zusammenfassendes Blatt erstellt und ausgedruckt.

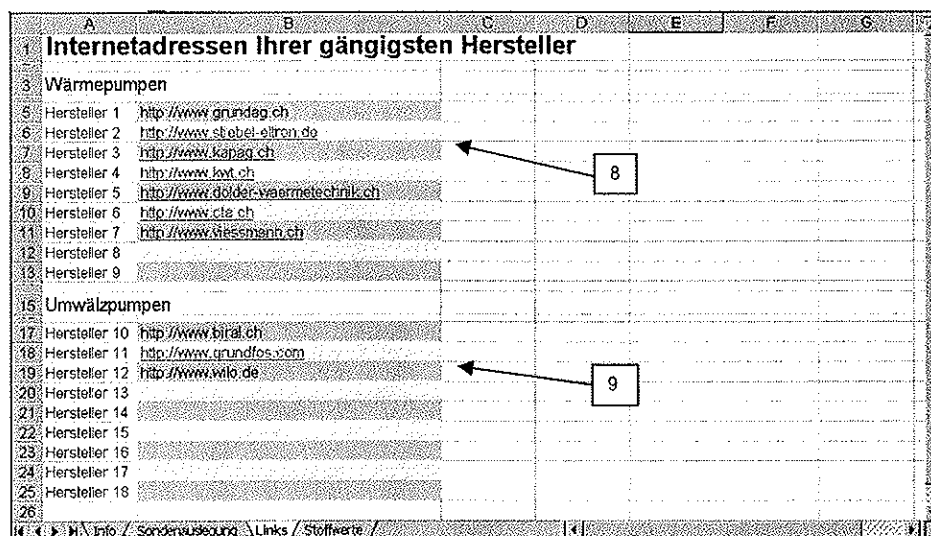


Abb 4-3: Eingabe der Hyperlinks im Programm EWSDRUCK

8. Anpassen und Einfügen von Internetadressen von Wärmepumpenhersteller (auf Excel-Blatt "Links").
9. Anpassen und Einfügen von Internetadressen von Umwälzpumpenhersteller (auf Excel-Blatt "Links").

5 Symbolverzeichnis

Lateinisches Alphabet

a	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit ($\lambda/\rho c_p$)
B	m	Sondenabstand benachbarter Erdwärmesonden
c _p	J/kgK	spezifische Wärmekapazität
D _b	m	Bohrdurchmesser
D _i	m	Durchmesser der Sondenrohre (Innen-Mass)
H	m	aktive, vertikale Sondenlänge
L	W/K	thermische Leitfähigkeit, 1/R
L ₀	W/K	thermische Leitfähigkeit der fließenden Sole (axial), $2 \pi r_o^2 v \rho_{\text{Sole}} c_{p\text{Sole}}$
L ₁	W/K	thermische Leitfähigkeit zwischen Sole (alle 4 Sondenrohre) und Hinterfüllung
\dot{m}	kg/s	Solemassenstrom (Durchsatz durch Pumpe)
q	W/m	spezifische Wärmeentzugsleistung, \dot{Q}/dl
r	m	radialer Abstand von der Rohrachse
r _o	m	Innen-Radius der Sondenrohre
r ₁	m	Radius der Bohrung
R	K/W	thermischer Widerstand, 1/L
R _a	Km/W	internal thermal resistance
R _b	Km/W	borehole thermal resistance
t	s	Zeit
t _s	s	Sondenzeitkonstante ($t_s = H^2 / 9a$)
T	°C	Temperatur
T _b	°C	borehole temperature, Temperatur am Bohr-Radius
T _{Grad}	°C/m	vertikaler Temperaturgradient des ungestörten Erdreiches
T _{mo}	°C	Mittlere Jahrestemperatur der Erdoberfläche
T _{Source}	°C	Quellentemperatur, Temperatur der aus der Sonde austretenden Sole
T _{Sink}	°C	Rücklauftemperatur der Sole, Verdampfer-Austrittstemperatur der Sole
v	m/s	Strömungsgeschwindigkeit der Sole

Griechisches Alphabet

α	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
π	-	Pi, 3.1415..
ρ	kg/m ³	Dichte
ξ	-	Druckverlustkoeffizient

Indizes

dia	Diagramm - Wert, z.B. B_{dia} = Sondenabstand aus dem g-function-Diagramm
eff	effektiver Wert, z.B. B_{eff} = effektiver Sondenabstand
lam	laminar
turb	turbulent
Erde	Erde
Fill	Hinterfüllung
Sole	Sole, generell Wärmeträger-Fluid

Kennzahlen

Es	$t \cdot 9a / H^2$	Eskilsonzahl, dimensionslose Zeit
Nu	$\alpha \cdot D / \lambda$	Nusseltzahl, gebildet mit dem Rohrdurchmesser und λ Fluid
Pr	ν / a	Prandtlzahl
Re	$D \cdot v / \nu$	Reynoldszahl, gebildet mit dem Rohrdurchmesser

6 Literaturverzeichnis

- Afjei, Th. et al. (1998): Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Burkhart, R.; Hopkirk, R.; Eugster W.; Rybach L. (1989): Erdwärmesonden-Heisanlagen: Durch Messungen und Berechnungen bestimmte Auslegungsgrößen. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern. Studie Nr. 46.
- Claesson, J.; Eskilson, P.: Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.
- Eskilson, P. (1987): Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- Kaufmann, F. (1999): Pumpen-Auslegungsprogramm für Erdsonden. Diplomarbeit Nr. DV-99-08, Hochschule für Technik+Architektur Luzern, Abteilung Heizung-Lüftung-Klima.
- Hellström, G. (1991): Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Huber, A.; Mösch, H. (1995): Umweltwärme effizient nutzen: Heizen mit Elektro-Wärmepumpen. Impulsprogramm PACER, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern. ISBN 3-905232-65-0
- Huber, A.; Müller, Ch.; Berchtold, O.; Eggenberger, H. (1996): Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern. Phase 1, Kosten-Nutzen-Analyse. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern. ENET-Nr. 9554499 / 1.
- Huber, A.; Schuler, O. (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9658807/1, 1997.
- Huber, A.; Pahud, D. (1999): Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie? Forschungsprogramm Geothermie. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Huber, A.; Pahud, D. (1999): Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Leu, W.; Keller, G.; Mégel, Th.; Schärli, U.; Rybach, L. (1999): Programm SwEWS-99. Berechnungsprogramm für geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (0-500m). Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern. ENET-Nr. 9723763.
- Leu, W.; Keller, G.; Matter, A.; Schärli, U.; Rybach, L. (1999): Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500m). Bundesamt für Energie, Programm Geothermie, Bern.
- Merker, G. (1987): Konvektive Wärmeübertragung. Springer-Verlag.
- Sanner, B. (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. In: IZW-Berichte 2/92. Karlsruhe: Fachinformationszentrum.
- SIA (1996): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. SIA Dok D0136.
- Wetter, M.; Huber A. (1997): TRNSYS Type: Vertical Borehole Heat Exchanger, EWS Model. Zentralschweizerisches Technikum ZTL, Luzern.
- Zimmermann, M. et al. (1999): Handbuch der passiven Kühlung. EMPA (ZEN)/ Bundesamt für Energie BFE, Bern. ISBN 3-905594-06-4.

7 Anhang

7.1 Berechnung des Druckabfallkoeffizienten

```
Function LambdaPipe(Re, eps, d)

    Re_eps_d = Re * eps / d
    i = 0
    IterMax = 50
    ErrorVal = 10000

    Select Case Re_eps_d
    Case Is < 65
        Select Case Re
        Case Is < 2320
            Lambda = 64 / Re
        Case Is >= 2320 And Re < 100000
            Lambda = 0.3164 * Re ^ (-0.25) ' Blasius
        Case Is >= 100000 And Re < 1000000
            Lambda = 0.0032 + 0.221 * Re ^ (-0.237)
        Case Is >= 1000000
            ' Prandtl
            Subst = 0.2
            DiffSubst = 100
            While DiffSubst > 0.001
                SubstOld = Subst
                Subst = 2 * Log(Re / Subst) / Log(10) - 0.8
                DiffSubst = Abs(Subst - SubstOld)
                If i >= IterMax Then
                    DiffSubst = 0
                    Subst = 1 / (ErrorVal ^ 0.5)
                End If
            Wend
            Lambda = 1 / (Subst ^ 2)

        End Select

    Case Is >= 65 And Re_eps_d < 1300
        ' Prandtl-Colebrook
        Subst = 0.2
        DiffSubst = 100
        While DiffSubst > 0.001
            SubstOld = Subst
            Subst = -2 * Log((2.51 / Re * Subst) / Log(10) + eps / 3.72 / d)
            DiffSubst = Abs(Subst - SubstOld)
            If i >= IterMax Then
                DiffSubst = 0
                Subst = 1 / (ErrorVal ^ 0.5)
            End If
        Wend
        Lambda = 1 / (Subst ^ 2)
    Case Is >= 1300
        ' Nikuradse
        Lambda = 1 / (-2 * Log(d / eps) / Log(10) + 1.14) ^ 2
    End Select

    If ((Re < 2320) And (Lambda < 0.0455)) Then Lambda = 0.0455
    LambdaPipe = Lambda
    ' empirischer Einfluss der Turbulenzerzeugung durch die Pumpe

End Function
```