



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

HYDRAULISCHE AUSLEGUNG VON ERDWÄRMESONDENKREISLÄUFEN MIT DER SOFTWARE „EWSDRUCK“ VERS. 2.0

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Huber A., Ochs M., Huber Energietechnik AG
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich,
huber@hetag.ch, www.hetag.ch

Impressum

Datum: 14. September 2007

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Geothermie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE - Projektleiter: R. Minder, rudolf.minder@bluewin.ch

Projektnummer: 102111

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist eine Überarbeitung und Weiterentwicklung der Software „EWSDruck“, die entwickelt wurde im Rahmen des früheren BFE-Forschungsprojektes „Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen“ (Huber (1999)) innerhalb des Forschungsprogramms Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW).

Die Motivation des Forschungsprojektes war es, dass in Erdwärmesonden-Wärmepumpen-Anlagen teilweise bis zu 20 % der elektrischen Energie für die Sondenpumpe benötigt wird. Bei einer Optimierung des Sondenkreislaufs lässt sich dieser Wert in der Regel unter 10% reduzieren.

Die Software berücksichtigt für die Druckverlustberechnung nebst dem Druckabfall in der Erdsonde auch denjenigen über dem Verdampfer der Wärmepumpe, des Sondenverteilers, der Zuleitungen sowie weiterer wählbarer Komponenten. Die Auslegungssoftware lässt es zu, von der in SIA Dok 0136 (1996) formulierten Empfehlung über den minimalen Solemassstrom abzuweichen.

Die Ziele der vorliegenden Überarbeitung waren:

- Entfernen der Makros aus dem Excel-Auslegungsprogramm „EWSDruck“, da bei unterschiedlichen Excel-Versionen die Makros Probleme verursachen.
- Dokumentation der Methoden zur Berechnung der Druckverlustkoeffizienten.
- Überarbeitung der Bedienungsanleitung von „EWSDruck“.

Es wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Die Makros wurden zuvor benötigt, um Druckverlustkoeffizienten von Strömungen in rauen Rohren iterativ berechnen zu können. Es wurde nun gezeigt, dass die Erdwärmesonden in guter Näherung als hydraulisch glatte Rohre betrachtet werden können (Kap. 2.1.1). So werden keine Iterationen und damit keine Makros mehr benötigt.
- Die verwendeten Methoden zur Berechnung der Druckverlustkoeffizienten wurden ausführlich dokumentiert. Für den turbulenten Strömungsbereich wurde nebst dem bisher verwendeten Ansatz von Blasius neu der Ansatz von Petukhov programmiert (Kap. 2.1). Die überarbeitete Version der Software trägt nun die Versionsnummer 2.0.
- Es wurden höhere Widerstandsbeiwerte für Bögen und Tauchhülsen gewählt.
- Die Berechnung des Druckverlustes in der Sondenzuleitung wurde geändert.
- Für die ausgemessene Anlage Wehrli wurden die Druckverluste neu berechnet. Die Differenz zu den Messungen liegen für übliche Durchflusswerte unter 10 % (Kap. 4).
- Die Berechnungsmethode, die der Frost-Warnung zugrunde liegt, wurde dokumentiert (Kap. 3).
- Die Bedienungsanleitung des Programms „EWSDruck“ wurde ausgebaut (Kap. 5).

Abstract

The present work is a revision and further development of the software "EWSDruck". This Excel program calculates the pressure loss of the brine cycle of a ground-coupled heat pump system and takes into account the pressure loss of the pipes, the heat pump evaporator, the distributing devices, and of other selectable components.

In addition to the existing version 1.1 of the software "EWSDruck" (Huber (1999)), the following work was done:

- All Excel-macros are removed. Pipes of the brine cycle are treated as hydraulically smooth pipes. Thus, no iterations and therefore no macros are needed anymore (chap. 2.1.1).
- All methods to calculate the pressure loss coefficients are documented in detail. For turbulent flows, the method of Petukhov for calculating pressure loss coefficients was programmed (chap. 2.1).
- Higher pressure loss coefficients for pipe bends and immersion sleeves were chosen
- The pressure loss calculation of the loop was changed.
- The pressure losses of the Wehrli plant were again calculated. For usual mass flows, the difference between measurement and calculation is smaller than 10 %. (chap. 4)
- The frost alert was documented (chap. 3).
- The software manual of "EWSDruck" was extended (chap. 5).

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	6
1.1	Einsatzgebiete von Erdwärmesonden	6
1.2	Anforderungen	7
2	DRUCKVERLUSTBERECHNUNGEN	8
2.1	Druckabfall in der Erdwärmesonde	8
2.1.1	Unterschiede zur Vorgängerversion „EWSDruck“ Version 1.1	9
2.2	Weitere Druckverluste	11
3	FROSTWARNUNG	12
3.1	Berechnung der Rücklauftemperatur	12
3.2	Ungestörte Erdreichtemperaturen	14
3.3	Der Einfluss der Eigenschaft des Bodens	15
3.4	Stoffwerte des Erdreichs und Bodentemperaturen	15
4	VALIDIERUNG	18
4.1	Messresultate	19
4.2	Rechenresultate	19
4.3	Vergleich Rechnung - Messung	21
5	BEDIENUNGSANLEITUNG ZUM PROGRAMM „EWSDRUCK“	22
5.1	Blatt "Sondenauslegung"	22
5.2	Blatt "Daten"	25
6	ANHANG	26
6.1	Grundlagen zur Erdwärmesonden-Berechnung	26
6.1.1	Methode der Antwortfunktionen	26
6.1.2	Die Bezeichnungen an der Sonde	26
6.1.3	Dimensionslose Sprungantwort „g-function“ von Eskilson	27
6.2	Sonden-Rücklauftemperatur für Doppel-U-Sonden (Frostschutz)	29
7	SYMBOLVERZEICHNIS	31
8	LITERATURVERZEICHNIS	33

1 Einleitung

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).

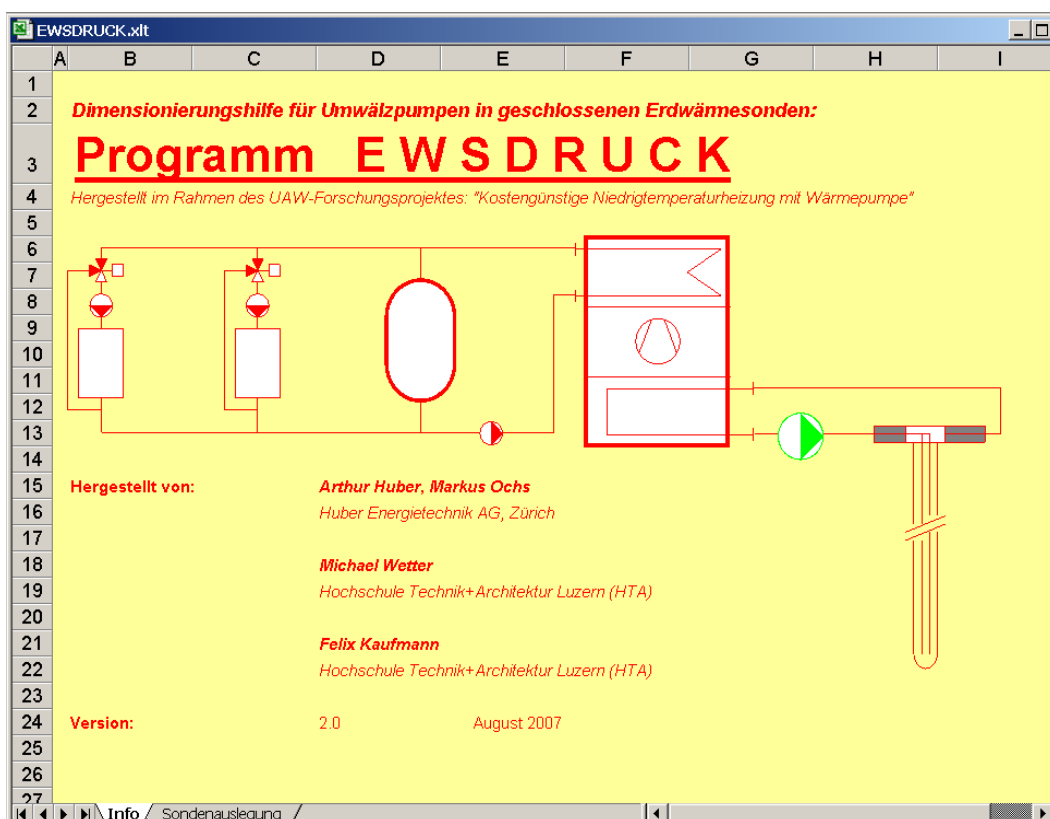


Abb 1-1: Typische Anwendungskonfiguration des Sondenpumpen-Auslegungsprogramms EWSDRUCK.

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 Temperatur T_{Sink} des Sondenrücklaufs (d.h. in die Erdsonde einströmende Sole) 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 Druckverlustberechnungen

Im Folgenden werden die Druckverluste der einzelnen Komponenten des Erdsondenkreislaufes berechnet. Neben dem Druckverlust der Erdwärmesonde werden auch die Druckverluste des Verdampfers der Wärmepumpe, des Sondenverteilers, der Zuleitungen sowie weiterer wählbarer Komponenten berücksichtigt.

2.1 Druckabfall in der Erdwärmesonde

Der Druckverlust Δp der Rohrströmung in der Erdwärmesonde berechnet sich wie folgt:

$$\Delta p = \xi \frac{2H}{D_i} \frac{\rho_{\text{Sole}}}{2} v^2 \quad \text{Gl. 2-1}$$

Dabei ist ξ der (dimensionslose) Druckverlustkoeffizient (in der Literatur manchmal auch als Rohrreibungszahl bezeichnet), $2H$ die Gesamtlänge der Sonde (H die Bohrlochtiefe), D_i der Innendurchmesser der Sonde, ρ_{Sole} die Dichte des Sondenfluids und v die mittlere Geschwindigkeit des Sondenfluids.

Für die Berechnung des Druckverlustkoeffizienten ξ wird zwischen dem laminaren und dem turbulenten Bereich unterschieden.

Im laminaren Bereich ($Re < 2'300$) gilt:

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

Im turbulenten Bereich ($Re > 2'300$) kann der Benutzer zwischen den Ansätzen von Blasius und Petukhov wählen.

Ansatz von Petukhov (Incropera, DeWitt (1996); $2'300 < Re < \approx 5 \cdot 10^6$):

$$\xi = [0.790 \ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Ansatz von Blasius (Zierep (1993); $2'300 < Re < \approx 10^5$):

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

In Abb 2-1 sind die Druckverlustkoeffizienten ξ der verschiedenen Ansätze dargestellt. Verglichen mit dem Ansatz von Blasius ergibt der Ansatz von Petukhov etwas höhere Druckverlustkoeffizienten. Aus der Abbildung ist zudem ersichtlich, dass der Ansatz von Petukhov statt bis $Re = 3'000$, wie in der Literatur empfohlen (Incropera, DeWitt (1996)), problemlos auch bis $Re = 2'300$ anwendbar ist.

Beim Umschlagspunkt von laminarer zu turbulenter Strömung ($Re = 2'300$) ergibt sich ein Sprung im Druckverlustkoeffizienten ξ . Dieser Sprung kommt in der Praxis meist nicht „scharf“ vor, sondern „verschmiert“ über einen bestimmten Re -Bereich, den sog. Übergangsbereich

($2'300 < Re < ca. 5'000$). Es wird hier nicht versucht, diesen Übergangsbereich genauer zu berechnen. Die Annahme eines Sprungs hat zur Folge, dass der Druckverlustkoeffizient im Übergangsbereich verglichen mit realen Werten eher zu grosse Werte annimmt, was im Sinne einer sicheren Abschätzung für den Druckverlust ist.

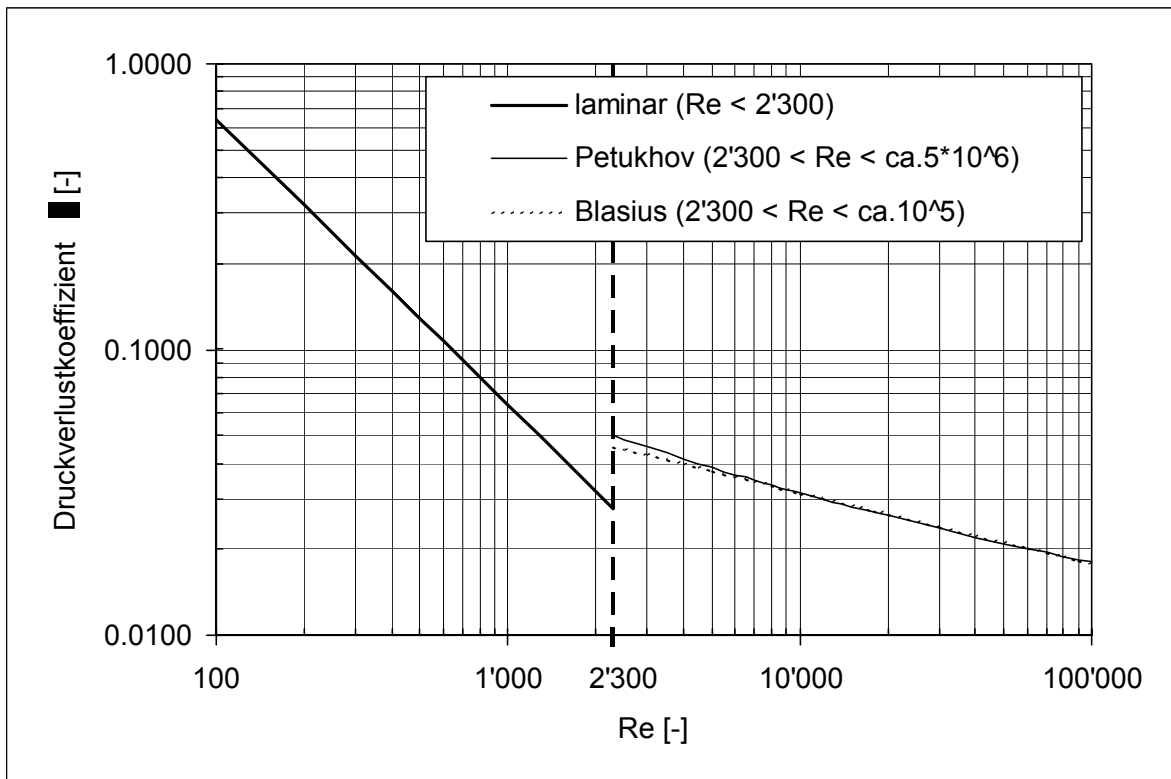


Abb 2-1: Vergleich des Druckverlustkoeffizienten ξ für hydraulisch glatte Rohre in Abhängigkeit der Re-Zahl berechnet für den laminaren Bereich ($Re < 2'300$) sowie für den turbulenten Bereich nach den Ansätzen von Petukhov und Blasius.

Es wird empfohlen, den Ansatz von Petukhov zu verwenden. Dies aus den folgenden Gründen: Dieser Ansatz ergibt etwas höhere Druckverlustkoeffizienten und ist damit für eine Auslegung etwas konservativer und damit sicherer. Zudem wird der Ansatz auch im Erdwärmesonden-Simulationsprogramm „EWS“ verwendet. Häufig wird das Pumpendimensionierungs-Programm „EWSDruck“ vorgängig oder parallel zum Erdwärmesonden-Programm „EWS“ eingesetzt.

2.1.1 Unterschiede zur Vorgängerversion „EWSDruck“ Version 1.1

Für den turbulenten Bereich ($Re > 2'300$) wurde in der Vorgängerversion 1.1 (Sept. 2000) des Programms „EWSDruck“ die Rauigkeit der Rohrrinnenfläche berücksichtigt. Dadurch ergaben sich Formeln für den Druckverlustkoeffizienten ξ , die iterativ gelöst werden mussten.

Die folgende Abschätzung zeigt, dass für die eingesetzten Rohre und die auftretenden Re-Zahlen der Einfluss der Rauigkeit in guter Näherung vernachlässigt werden kann.

Eingesetzt werden für Erdwärmesonden und deren Zuleitungen v. a. PE-Rohre. Die Rauigkeit für PE-Rohre ist $\varepsilon = 0.007$ mm (Recknagel, Sprenger, Schramek (2003), p. 254). Die kleinsten Innendurchmesser von Erdwärmesonden betragen $D_i = 20$ mm. Dies ergibt $\varepsilon/D_i = 0.00035$. Die auftretenden Re-Zahlen sind in den allermeisten Fällen $< 10'000$. (Ansonsten werden die Druckverluste Δp prop. $\xi \cdot v^2$ zu gross.) Aus Abb 2-2 ist ersichtlich, dass für diese Randbedingungen

der Unterschied des Druckverlustkoeffizienten ξ (in der Grafik als Reibungszahl λ bezeichnet) für rauhe und glatte Rohre vernachlässigbar ist. Daher können die Erdwärmesonde und deren Zuleitungen als hydraulisch glattes Rohr behandelt werden.

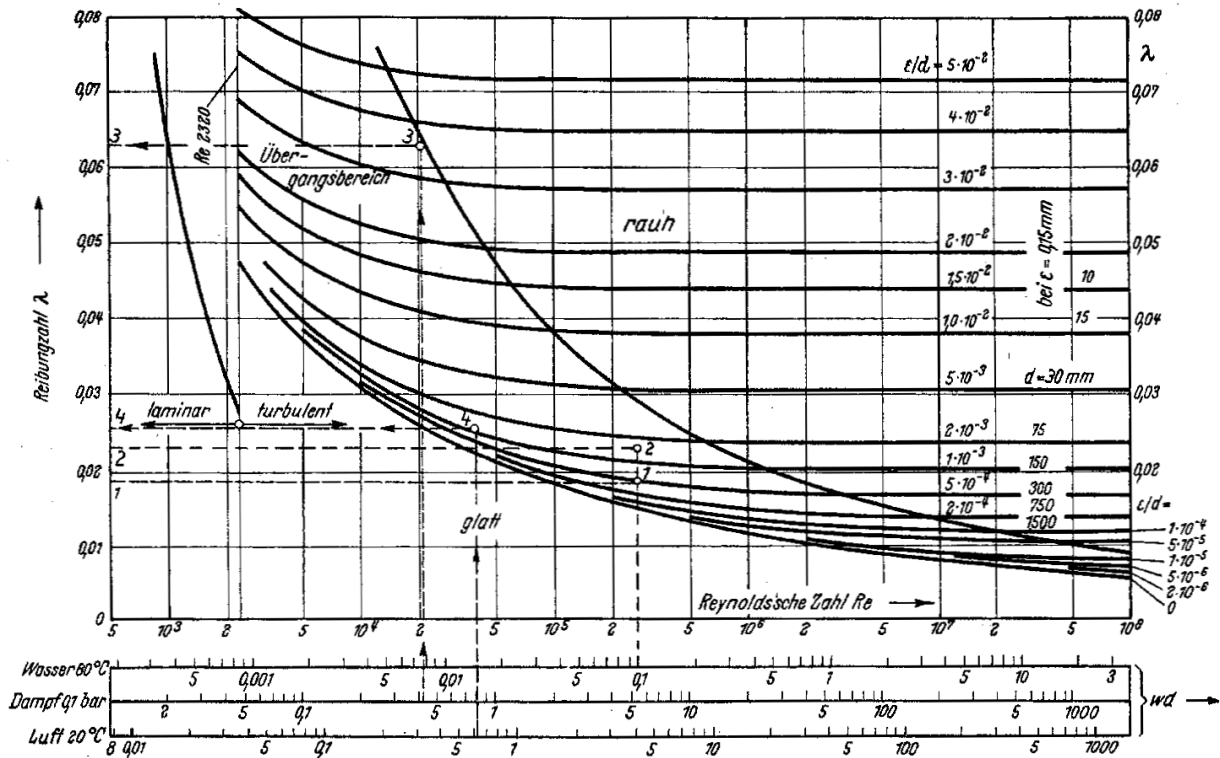


Abb 2-2: Druckverlustkoeffizient ξ (hier als Reibungszahl λ bezeichnet) in Abhängigkeit von Re -Zahl und Rauigkeit ϵ/D_i (hier als ϵ/d bezeichnet) (Recknagel, Sprenger, Schramek (2003), p. 255).

In der Vorgängerversion des Programms wurde allein der Ansatz von Blasius verwendet. Er ist in der vorliegenden Version weiterhin als Option aufgeführt, um vorhandene Berechnungen der Vorgängerversion mit neuen Berechnungen vergleichen zu können.

In der Vorgängerversion wurde zudem für laminare Strömungen von einem minimalen Wert des Druckverlustkoeffizienten ausgegangen, der durch Turbulenzproduktion in der Umwälzpumpe entsteht. Dieser wurde angenommen als

$$\xi_{\text{Min}} = 0.0455 \quad \text{Gl. 2-5}$$

Der Wert wurde so gewählt, dass er dem Druckverlustkoeffizienten nach dem Ansatz von Blasius an der Stelle $Re = 2'300$ entspricht.

In der jetzigen Version wird diese Methode des minimalen Druckverlustkoeffizienten nicht mehr angewendet. In Erdwärmesonden wird sich eine Strömung mit $Re < 2'300$ nach allfälligen Hindernissen (Pumpen, Bögen etc.) wieder laminarisieren, da die Rohrlänge im Verhältnis zum Rohrdurchmesser genügend gross ist. Im der Literatur wird davon ausgegangen, dass zur Laminarisierung einer Strömung ca. eine Rohrlänge von 30 bis 100 Rohrdurchmessern nötig ist. Dies ist bei Erdwärmesonden bereits nach relativ kurzer Strömungstrecke der Fall.

2.2 Weitere Druckverluste

Der Druckverlust Δp der Sondenanschlüsse wird analog berechnet wie der Druckverlust der Erdwärmesonde (vgl. Kap. 2.1) unter Verwendung des Innendurchmessers $D_{zul,i}$ und der Länge L_{zul} der Anschlussleitungen (die Länge L_{zul} entspricht der Distanz vom Verteiler bis zur vertikalen Sonde):

$$\Delta p = \xi \frac{2L_{zul}}{D_{zul,i}} \frac{\rho_{Sole}}{2} v^2 \quad \text{Gl. 2-6}$$

Die übrigen Druckverluste werden mit Hilfe von Widerstandsbeiwerten ζ berechnet:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_{Sole}}{2} v^2 \quad \text{Gl. 2-7}$$

Dabei ist ζ der (dimensionslose) Widerstandsbeiwert, ρ_{Sole} die Dichte des Sondenfluids und v die mittlere Geschwindigkeit des Sondenfluids.

Für Bögen ($\zeta = 2$) und Tauchhülsen ($\zeta = 1$) können die Stückzahlen eingegeben werden. Zudem kann ein weiterer ζ -Wert für sonstige Druckverluste eingegeben werden. Der Sondenfuss mit der 180°-Umlenkung ist fix eingerechnet mit einem Widerstandsbeiwert $\zeta = 4$.

Die Druckverluste von WP-Verdampfer, Verteiler, Volumenstrommesser und einem weiteren, frei wählbaren Element werden mittels Druckverlusten bei Nennmassenströmen berechnet. Dabei ist bei einem bestimmten Nennmassenstrom \dot{m}_N der Druckverlust Δp_N bekannt (z. B. aus einer Messung). Damit lässt sich mit Gl. 2-7 zuerst der Widerstandsbeiwert ζ bestimmen und daraus mit ebendieser Gleichung der Druckverlust Δp für beliebigen Massenstrom \dot{m} :

$$\Delta p = \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_N} \right)^2 \Delta p_N \quad \text{Gl. 2-8}$$

Diese Einbauten befinden sich zwischen Verdampfer und Verteiler. Beim Massenstrom handelt es sich daher um den Massenstrom durch den Verdampfer.

3 Frostwarnung

Bei zu grosser Wärmeentzugsleistung durch die Erdsonden (z.B. durch eine grosse benötigte Heizleistung oder eine geringe Bohrtiefe der Sonde) besteht die Gefahr, dass die Sole gefriert. Um solche Dimensionierungsfehler möglichst früh zu erkennen, ist im vorliegenden Druckverlustberechnungs-Programm eine sogenannte Frostwarnung einprogrammiert. Die Frostwarnung erscheint (im Tabellenblatt „Sondenauslegung“, Zelle I5), wenn die Sole-Rücklauf-temperatur T_{Sink} (Temperatur der in die Erdsonde einströmenden Sole) unter den Sole-Gefrierpunkt fällt.

Es muss allerdings betont werden, dass die dahinterliegenden Berechnungen nur Näherungen sind. Es wird daher empfohlen zu überprüfen, ob die Sole-Rücklauf-temperatur T_{Sink} (aufgeführt im Tabellenblatt „Daten“, Zelle C49) in die Nähe des Sole-Gefrierpunktes (aufgeführt im Tabellenblatt „Sondenauslegung“, Zelle I10) zu liegen kommt. Wenn dies der Fall sein sollte, wird empfohlen, eine detailliertere Berechnung mit einem Erdwärmesonden-Simulationsprogramm wie z.B. „EWS“ durchzuführen (Huber, Schuler (1997), Huber, Pahud (1999)).

Bei grosser spezifischer Wärmeentzugsleistung der Sonde erscheint ebenfalls eine Warnung, unabhängig vom Gefrierpunkt der Sole. Diese Warnung erscheint (im Tabellenblatt „Sondenauslegung“, Zelle A27), wenn in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} der Erde folgende spezifische Wärmeentzugsleistungen \dot{q} überschritten werden:

- Für $\lambda_{\text{Erde}} \leq 1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$: $\dot{q} > 40 \text{ W/m}$
- Für $1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} < \lambda_{\text{Erde}} \leq 2.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$: $\dot{q} > 50 \text{ W/m}$
- Für $2.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} < \lambda_{\text{Erde}} \leq 3.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$: $\dot{q} > 55 \text{ W/m}$
- Für $\lambda_{\text{Erde}} > 3.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$: $\dot{q} > 80 \text{ W/m}$

3.1 Berechnung der Rücklauf-temperatur

Im Folgenden wird die für die Frostwarnung massgebende Rücklauf-temperatur T_{Sink} berechnet. Dabei wird der Wärmeaustausch von der hinaufströmenden zur hinabströmenden Sole vernachlässigt. Eine genauere Herleitung von T_{Sink} ist im Anhang (Kap. 6.2) zu finden.

Ausgangspunkt ist der Zusammenhang zwischen der längenspezifischen Wärmeentzugsleistung \dot{q} der Erdsonde und der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Erdreichtemperatur T_m im ungestörten Zustand und der Temperatur T_b am Bohrlochrand, der durch die dimensionslose Temperatursprungantwort g („g-function“) gegeben ist (Gl. 6-7 im Anhang):

$$T_b = T_m - \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}}} g$$

Die Temperaturdifferenz zwischen der Bohrlochtemperatur T_b und der Fluidtemperatur T_f in der Sonde kann durch den thermischen Bohrlochwiderstand R_b (vom Fluid bis zum Bohrlochradius) ausgedrückt werden:

$$R_b = \frac{T_b - T_f}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 3-9}$$

Der thermische Bohrlochwiderstand R_b (vom Fluid bis zum Bohrlochradius) setzt sich zusammen aus dem Bohrloch-Hinterfüllungswiderstand R_c (vom Sondenrohr- bis zum Bohrlochradius) und dem Wärmeübergangswiderstand R_α von der Hinterfüllung bis zur Sole an der Sonde:

$$R_b = R_c + R_\alpha \quad \text{Gl. 3-10}$$

Der Wärmeübergangswiderstand R_α beträgt:

$$R_\alpha = \frac{1}{8\pi \alpha r_o} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Dabei ist α der Wärmeübergangskoeffizient vom Sondenfluid an die Sondenwand, r_o ist der Radius des Sondenrohres. (Weitere Ansätze für die Berechnung von R_b sind zum Beispiel bei Hellström (1991) oder Huber und Schuler (1997) zu finden.)

Zusätzlich gilt die Energiebilanz:

$$\dot{q} H = \dot{m}_{Sole} c_{p,Sole} (T_{Source} - T_{Sink}) \quad \text{Gl. 3-12}$$

Wenn nun als Näherung angenommen wird, dass die mittlere Fluidtemperatur T_f in der Sonde dem arithmetischen Mittel der Quelltemperatur T_{Source} (Temperatur der aus der Erdsonde ausströmenden Sole) und der Rücklauftemperatur T_{Sink} entspricht

$$T_f \cong \frac{T_{Source} + T_{Sink}}{2} \quad \text{Gl. 3-13}$$

so ergibt sich aus den obigen Gleichungen als Hauptresultat dieses Kapitels die für die Frostsicherheit massgebende Sonden-Rücklauftemperatur T_{Sink} :

$$T_{Sink} = T_m - \left[\frac{g}{2\pi \lambda_{Erde}} + \frac{1}{8\pi \alpha r_o} + R_c + \frac{H}{2 \dot{m}_{Sole} c_{p,Sole}} \right] \dot{q} \quad \text{Gl. 3-14}$$

Für den Bohrloch-Hinterfüllungswiderstand R_c wird im Programm „EWSDruck“ als typischer Wert 0.08 K·m/W eingesetzt.

Die Temperatursprungantwort g wird mittels der Näherung gemäss Gl. 6-6 berechnet. Für die darin benötigte Zeitdauer t kann im Programm „EWSDruck“ (Tabellenblatt „Sondenauslegung“, Zelle C22) vereinfachend ein konstantes Wärmeentzugsprofil von 2, 5 oder 20 Tagen gewählt werden ($t = 172'800$ s, $432'000$ s, $1'728'000$ s). Dieses ist eine Abschätzung für die Dauer des ununterbrochenen Betriebes während der grössten Belastung im Winter (im allg. Februar).

Der Wärmeübergangskoeffizient α wird dimensionslos mit der Nusseltzahl Nu angegeben:

$$Nu = \frac{\alpha D_i}{\lambda_{Sole}} \quad \text{Gl. 3-15}$$

Darin ist D_i der Innendurchmesser des Sondenrohres.

Für den laminaren Bereich ($Re < 2'300$) gilt (Merker (1987), p. 133):

$$Nu_{lam} = 4.36 \quad \text{Gl. 3-16}$$

Für den turbulenten Bereich ($Re > 2'300$) gilt (Merker (1987), p. 188):

$$Nu_{urb} = 0.012 (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} \left[1 + \left(\frac{D_i}{2H} \right)^{2/3} \right] \quad \text{Gl. 3-17}$$

Diese Beziehung gilt für $1.5 < Pr < 500$. Die verwendeten Sondenfluide liegen in diesem Bereich von Pr-Zahlen.

In den folgenden Kapiteln wird näher auf die restlichen benötigten Grössen eingegangen, nämlich auf die mittlere ungestörte Erdreichtemperatur T_m und die Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} des Erdreichs eingegangen.

Abschliessend noch eine Betrachtung zum minimal benötigten Solemassenstrom \dot{m}_{Sole} . Es sind die folgenden Bedingungen einzuhalten:

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

Mittels diesen Bedingungen lässt sich zeigen (Huber (1999)), dass für den Solemassenstrom gelten muss:

$$\dot{m}_{\text{Sole}} \geq \frac{H}{c_{p,\text{Sole}} R_b} \quad \text{Gl. 3-18}$$

Da der Widerstand R_b wiederum eine Funktion des Solemassenstromes ist, kann diese Gleichung nicht geschlossen aufgelöst werden.

3.2 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 $2.5 - 4^\circ\text{C}$ 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

Tabelle 3-1: Ungestörte Erdreichtemperaturen T_m in Abhängigkeit der Erdreichtiefe und der Lage.

3.3 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 besteht in der Regel aus 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.

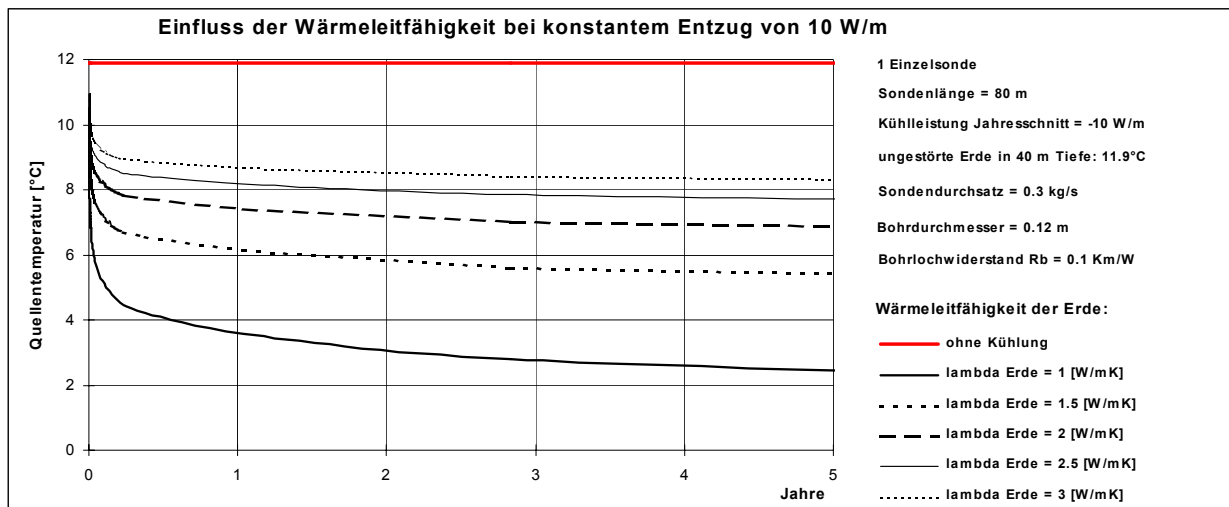


Abb 3-1: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs bei konstantem Wärmeentzug von 10 W/m.

3.4 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, 2006). 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.

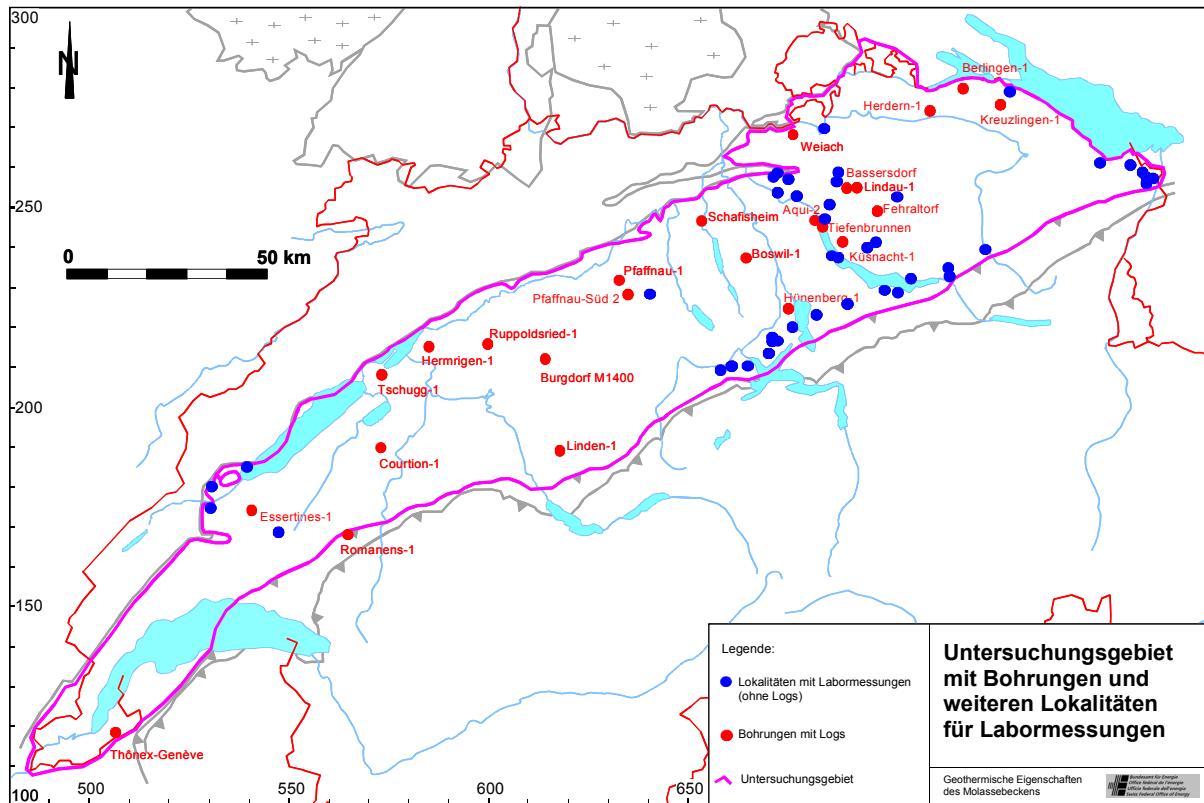


Abb 3-2: Bodeneigenschaft des schweizerischen Mittellandes können aus dem Programm SwEWS-99 (Leu et al. 1999) exportiert und in das Programm EWS importiert werden.

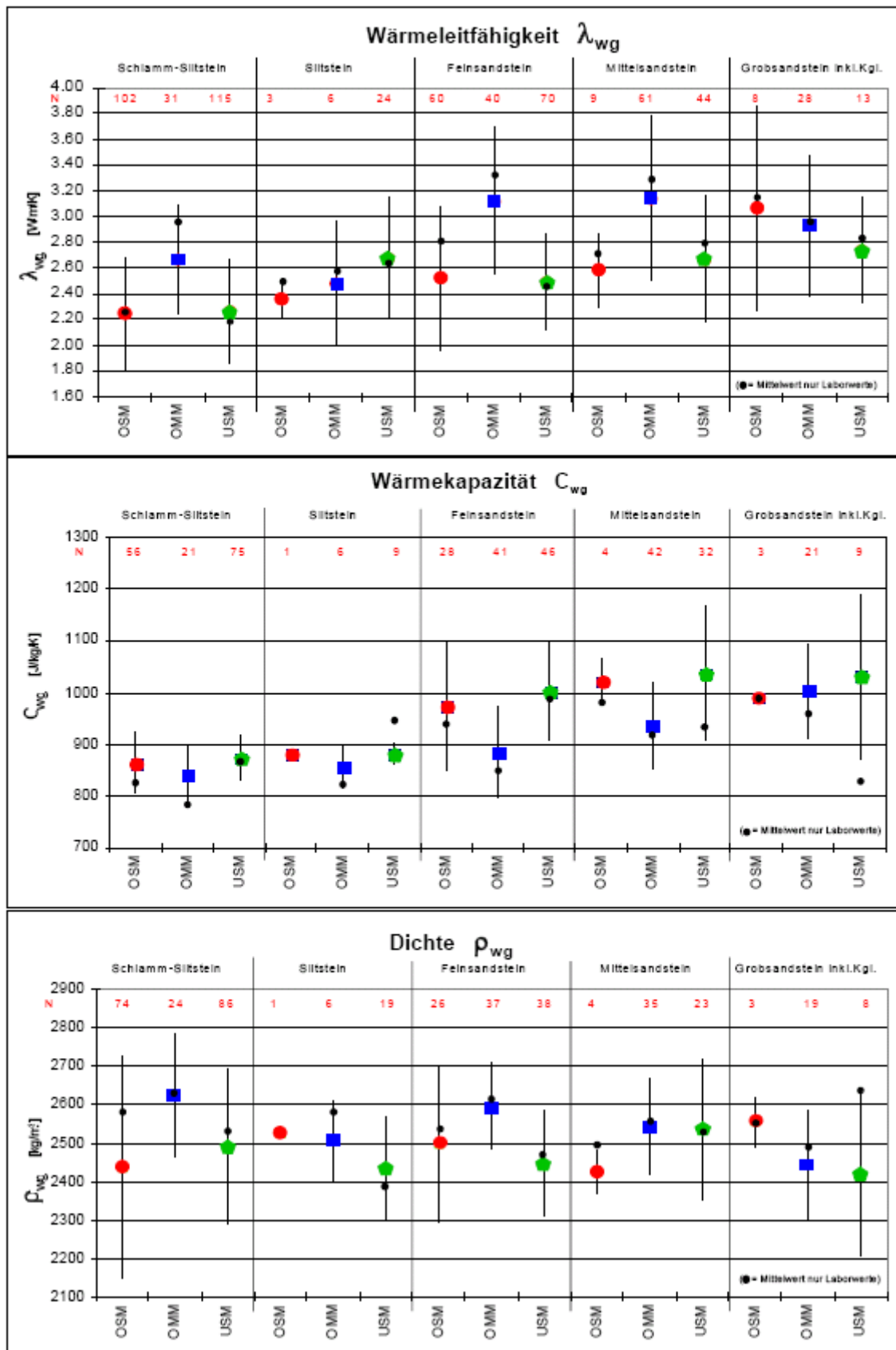


Abb 3-3: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Stoffwerte des Bodens im Molassebecken des schweizerischen Mittellandes nach Leu et al. (2006).

4 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 4-1: Betriebspunkt der Sondenpumpe der Anlage Wehrli im Nennbetrieb

4.1 Messresultate

Es wurde der Sondendurchsatz variiert und der Druckabfall über den einzelnen Elementen des Sondenkreislaufes gemessen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Sonden- durchsatz [m ³ /h]	Gemessene Druckverluste Δp [mbar]						Total
	Verteiler	Sonden- zuleitung	Vol.strom- messer	Sonde	WP- Verdampfer	Diverses	
1.5	13	18	14	115	50	6	216
2.0	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
3.0	48	65	55	394	135	24	721

Tabelle 4-1: Messung der Druckverluste an der Anlage Wehrli in Thalwil (Messung: Ch. Wehrli)

4.2 Rechenresultate

Die Druckverluste der verschiedenen Elemente sind berechnet wie in Kap. 2.1 und 2.2 beschrieben.

Für Erdwärmesonde und Sondenzuleitung wird der Druckverlustkoeffizient ξ der turbulenten Rohrströmung nach dem Ansatz von Petukhov berechnet.

Der Nennmassenstrom \dot{m}_N für Verteiler, Volumenstrommesser und „sonstige Elemente“ beträgt 2700 kg/h, und als Nenndruckverluste Δp_N werden für diese Elemente die gemessenen Druckverluste eingesetzt. Diese Nenndruckverluste Δp_N sind in Tabelle 4-2 mit * gekennzeichnet.

Für den WP-Verdampfer beträgt der Nennmassenstrom 2650 kg/h.

Bemerkung: Die Variation des Sondendurchsatzes \dot{m} geschieht im Programm indirekt über die Änderung der Temperaturdifferenz ΔT von Vorlauf zu Rücklauf. Der Zusammenhang lautet $\dot{m} = \dot{Q}/(\Delta T c_p)$, wobei \dot{Q} die Entzugsleistung der Erdwärmesonde ist. (Den Massenströmen des WP-Verdampfers $\dot{m} = 1500, 2000, 2500, 2700, 3000$ kg/h entsprechen die Temperaturdifferenzen Vorlauf/Rücklauf von $\Delta T = 5.750, 4.312, 3.450, 3.195, 2.875$ K.)

In Abb 4-2 sind für die Anlage Wehrli die Eingabeparameter bei Nennmassenstrom abgebildet. In Tabelle 4-2 sind die berechneten Druckverluste Δp für die einzelnen Komponenten im Sondenkreislauf sowie der gesamte Druckverlust dargestellt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Pumpen-Auslegungsprogramm für Erdsonden											
2	Objekt:	Anlage Wehri, Thalwil										
3												
4	Gebäude und Standort						Stoffwerte Sondenfluid					
6	Wärmebedarf	13.2 kW										
7	Warmwasserbedarf	kW										
8	Andere	kW										
9	Gebäude Total	13.2 kW										
10	Lage	Mittelland 500m										
11	Jahresmitteltemperatur	9.6 °C										
12	Wärmeleitfähigkeit der Erde	2.5 W/mK										
13	mittlere Erdreichtemperatur	13.3 °C										
14												
15	Wärmepumpe						Druckverluste in Verteiler, Zuleitung und Sonde					
17	Fabrikat:	Lexeta				Typ:	WI 13P					
18	Nennleistung Wärmepumpe	13 kW										
19	COP bei obiger Nennleistung	4.5										
20	Nenndruckverlust Verdampfer	11.7 kPa										
21	Nennmassenstrom Verdampfer	2650 kg/h										
22	Entzugsprofil / Schaltintervall	Mittel (5 Tage)										
23	Leistungsaufnahme (elektrisch)	2.9 kW										
24	Massenstrom Verdampfer	2700 kg/h										
25												
26	Sondenparameter						Druckverluste in Verteiler, Zuleitung und Sonde					
28	spezifische Sondenleistung	30 W/m										
29	Bohrtiefe	168 m										
30	Anzahl Sonden	2										
31	Temperaturdifferenz Vorl./Rückl.	3.195 K										
32	Bohrlochdurchmesser	15 cm										
33	Rohrdimension	32 mm Doppel-U										
34												
35	Strömungswerte (für 1 Sonden-Rohr)						Sonden - Umwälzpumpe					
37	Massenstrom in Sondenrohr	675 kg/h										
38	Geschwindigkeit in Sondenrohr	0.35 m/s										
39	Art der Strömung (laminar/turbul.)	turbulent										
40	mittlerer spezifischer Druckverlust	88.8 Pa/m										
41	Druckverlust im Sondenrohr	29.85 kPa										
42												
							Verteiler Nenndruckverlust: 3.9 kPa					
							Verteiler Nennmassenstrom: 2700 kg/h					
							Vol.strommesser Nenndruckverlust: 4.5 kPa					
							Vol.strommesser Nennmassenstrom: 2700 kg/h					
							Sonstige Elemente Nenndruckverlust: 1.75 kPa					
							Sonstige Elemente Nennmassenstrom: 2700 kg/h					
							Sondenanschlüsse Innendurchmesser: 26 mm					
							Sondenanschlüsse Länge horizontale: 20 m					
							Sonden am Bohrkopf zusammengefasst: nein					
							Bogen 90° (ζ = 2): 0 Stk.					
							Tauchhülsen (ζ = 1): 0 Stk.					
							Sonstige ζ-Werte oder Σζ: 0					
							Methode Berechn. Druckverlustkoeff. ξ: Petukhov (empfohlen)					
							Fabrikat: Smedegard Typ: T3-71-2					
							Totaler Druckabfall: 55.94 kPa					
							5.70 m					
							Volumenstrom: 0.00075 m³/s					
							2.70 m³/h					
							benötigte Leistung der Pumpe: 42.0 W					
							Wirkungsgrad der Pumpe: 25 %					
							Leistungsaufnahme Pumpe: 171 W					
							Anteil der Pumpenenergie am Stromverbrauch					
							Anteil Sondenpumpe: 5.6 %					

Abb 4-2: Eingabeparameter für die Berechnungen der Anlage Wehri beim Nennmassenstrom von 2700 kg/h

Sonden- durchsatz [m³/h]	Berechnete Druckverluste Δp [mbar]						
	Verteiler	Sonden- zuleitung	Vol.strom- messer	Sonde	WP- Verdampfer	Diverses	Total
1.5	12	13	14	111	38	6	194
2.0	21	21	25	180	67	11	325
2.5	33	31	39	262	104	17	487
2.7	39*	36	45*	299	121	20*	559
3.0	48	43	56	357	150	25	678

Tabelle 4-2: Berechnung der Druckverluste der Anlage Wehri in Thalwil (mit * gekennzeichnete Werte sind die Messwerte bei Nennmassenstrom)

4.3 Vergleich Rechnung - Messung

Die Berechnungen ergeben eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Für übliche Sondendurchsätze bleiben die Differenzen unter der 10 %.

Sonden- durchsatz [m ³ /h]	Differenz der gemessenen und berechneten Druckverluste			
	Sondendruckverlust		Totaler Druckverlust	
	Diff. absolut [mbar]	Diff. relativ zu Messung [%]	Diff. absolut [mbar]	Diff. relativ zu Messung [%]
1.5	4	3.5	22	10.2
2.0	12	6.3	30	8.5
2.5	23	8.1	43	8.1
2.7	28	8.6	45	7.5
3.0	37	9.4	43	6.0

Tabelle 4-3: Vergleich der gemessenen und berechneten Druckverluste der Anlage Wehrli in Thalwil

5 Bedienungsanleitung zum Programm „EWSDruck“

5.1 Blatt "Sondenauslegung"

Das Blatt „Sondenauslegung“ ist das Hauptblatt des Programms „EWSDruck“. Es enthält sowohl alle Benutzereingaben als auch alle Resultate. Das Blatt ist an sich selbsterklärend.

Die blau hinterlegten Zellen sind Eingabezellen. Falls sich neben einer blauen Zelle eine dunkelgelb hinterlegte Zelle befindet und in der blauen Zelle nichts eingegeben wird, so wird in der dunkelgelben Zelle ein Resultat ausgegeben. Die übrigen Zellen enthalten Rechenresultate.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Pumpen-Auslegungsprogramm für Erdsonden											
2	Objekt:	Anlage Wehrli, Thalwil		1								
3												
4	Gebäude und Standort	2							Stoffwerte Sondenfluid			
5												
6	Wärmebedarf	13.2 kW							Wasser			
7	Warmwasserbedarf	kW							4 °C			
8	Andere	kW							Dichte ρ			
9	Gebäude Total	13.2 kW							1000 kg/m ³			
10	Lage	Mittelland 500m							Kinematische Viskosität ν			
11	Jahresmitteltemperatur	9.6 °C							1.604 mm ² /s			
12	Wärmeleitfähigkeit der Erde	2.5 W/mK							spez. Wärmekapazität c_p			
13	mittlere Erdreichtemperatur	13.3 °C							4.22 kJ/(kg·K)			
14												
15	Wärmepumpe	3							Druckverluste in Verteiler, Zuleitung und Sonde			
16												
17	Fabrikat:	Lexeta		Typ: WI 13P							7	
18	Nennleistung Wärmepumpe	13 kW							Verteiler Nenndruckverlust			
19	CDP bei obiger Nennleistung	4.5 -							3.9 kPa			
20	Nenndruckverlust Verdampfer	11.7 kPa							Verteiler Nennmassenstrom			
21	Nennmassenstrom Verdampfer	2650 kg/h							2700 kg/h			
22	Entzugsprofil / Schaltintervall	Mittel (5 Tage)							Vol.strommesser Nenndruckverlust			
23	Leistungsaufnahme (elektrisch)	2.9 kW							4.5 kPa			
24	Massenstrom Verdampfer	2700 kg/h							Vol.strommesser Nennmassenstrom			
25												
26	Sondenparameter	4							Sonstige Elemente Nenndruckverlust			
27												
28	spezifische Sondenleistung	30 W/m							1.75 kPa			
29	Bohrtiefe	168 m							Sonstige Elemente Nennmassenstrom			
30	Anzahl Sonden	2							2700 kg/h			
31	Temperaturdifferenz Vorl./Rückl.	3.195 K							Sondenanschlüsse Innendurchmesser			
32	Bohrlochdurchmesser	15 cm							26 mm			
33	Rohrdimension	32 mm Doppel-U							Sondenanschlüsse Länge horizontale			
34												
35	Strömungswerte (für 1 Sonden-Rohr)	5							Sonden am Bohrkopf zusammengefasst			
36												
37	Massenstrom in Sondenrohr	675 kg/h							nein			
38	Geschwindigkeit in Sondenrohr	0.35 m/s							Bogen 90° ($\zeta = 2$)			
39	Art der Strömung (laminar/turbul.)	turbulent							0 Stk.			
40	mittlerer spezifischer Druckverlust	88.8 Pa/m							Tauchhülsen ($\zeta = 1$)			
41	Druckverlust im Sondenrohr	29.85 kPa							0 Stk.			
42												
43												
44												
45												
46												
47												
48												
49												
50												
51												
52												
53												
54												
55												
56												
57												
58												
59												
60												
61												
62												
63												
64												
65												
66												
67												
68												
69												
70												
71												
72												
73												
74												
75												
76												
77												
78												
79												
80												
81												
82												
83												
84												
85												
86												
87												
88												
89												
90												
91												
92												
93												
94												
95												
96												
97												
98												
99												
100												

Abb 5-1: Das Blatt „Sondenauslegung“ enthält im oberen Teil Benutzereingaben und Resultate (hier gezeigt am Beispiel der Anlage Wehrli in Thalwil)

1. Objektbezeichnung

2. Im Tabellenteil "Gebäude und Standort" werden Angaben eingegeben zu:

- Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes
- Leistungsbedarf für das Warmwasser
- andere Energieleistungsbedarfe, die genauer bezeichnet werden können.

Diese Werte werden benötigt, um daraus zusammen mit dem COP die Sondenbelastung (Wärmeentzugsleistung) 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 im Kommentarfeld der Zelle angezeigt (vgl. auch Abb 3-3). Aus diesen Angaben wird die mittlere Erdreichtemperatur berechnet (Temperatur der Erde im ungestörten Zustand auf halber Tiefe der Erdwärmesonde).

3. Im Tabellenteil "Wärmepumpe" werden Angaben zu Fabrikat, Typ, Nennleistung der Wärmepumpe, COP bei der gewählten Nennleistung und Nenndruckverlust des Verdampfers bei Nennmassenstrom gemacht.

Zudem wird ein Entzugsprofil/Schaltintervall eingegeben. Dieses ist eine Abschätzung für die Dauer des ununterbrochenen Betriebes während der grössten Belastung im Winter (im allg. Februar). Häufig kann hier eine Dauer von 2 oder 5 Tagen gewählt werden. Eine zu hohe Wärmeentzugsleistung der Sonde kann zum Gefrieren der Sondenflüssigkeit führen. Falls diese Gefahr auftritt, gibt das Programm in der Zelle I5 eine „Frostwarnung“ aus.

Es wird empfohlen zu überprüfen, ob die Sole-Rücklauftemperatur T_{Sink} (aufgeführt im Tabellenblatt „Daten“, Zelle C49) in die Nähe des Sole-Gefrierpunktes (aufgeführt im Tabellenblatt „Sondenauslegung“, Zelle I10) zu liegen kommt. Wenn dies der Fall sein sollte, wird empfohlen, eine detailliertere Berechnung mit einem Erdwärmesonden-Simulationsprogramm wie z.B. „EWS“ durchzuführen (Huber, Schuler (1997), Huber, Pahud (1999)).

Aus diesen Angaben wird die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe sowie der Massenstrom im WP-Verdampfer berechnet.

4. Im Tabellenteil "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 zu Anzahl Sonden (Anzahl = 1 entspricht 1 Doppel-U-Sonde wie sie in Abb 6-1 dargestellt ist), Temperaturdifferenz Vorlauf/Rücklauf, Bohrlochdurchmesser und Rohrdimension müssen alle ausgefüllt werden.

Übliche Werte für Bohrlochdurchmesser sind:

- 26 mm und 32 mm Doppel-U-Sonden: 12 cm Bohrlochdurchmesser
- 40 mm Doppel-U-Sonden: 15 cm Bohrlochdurchmesser

Bei grosser spezifischer Wärmeentzugsleistung der Sonde erscheint in Zelle A27 eine Warnung.

5. Der Tabellenteil "Strömungswerte (für 1 Sonden-Rohr)" ist eine reine Resultatetabelle. Es werden Strömungswerte für ein einzelnes Sondenrohr berechnet. Das Hauptresultat ist der Druckverlust eines Sondenrohrs der Länge $2H$.

6. Im Tabellenteil "Stoffwerte Sondenfluid" können das Sondenfluid und die mittlere 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.

7. Im Tabellenteil "Druckverluste in Verteiler, Zuleitung und Sonde" erfolgen die Eingaben zu Nenndruckverlust und Nennmassenstrom je eines Verteilers, eines Volumenstrommessers sowie von sonstigen Elementen. Diese Einbauten befinden sich zwischen Verdampfer und Verteiler. Beim Massenstrom handelt es sich daher um den Massenstrom durch den Verdampfer. Die Nennmassenströme der einzelnen Komponenten müssen nicht übereinstimmen. (Ebenso müssen diese Nennmassenströme nicht mit demjenigen des WP-Verdampfers aus dem Tabellenteil „Wärmepumpe“ übereinstimmen.)

Für den Sondenanschluss ist der Innendurchmesser sowie die Länge der Anschlussleitung einzugeben. Die Länge der Anschlussleitung entspricht der Distanz vom Verteiler bis zur vertikalen Sonde.

Für 90°-Bögen und Tauchhülsen sind bereits Widerstandsbeiwerte ζ aus der Literatur eingegeben ($\zeta = 2$ bzw. 1); es kann die Anzahl dieser Elemente eingegeben werden. Schliesslich ist es auch möglich, einen weiteren ζ -Wert (z. B. die Resultierende von mehreren ζ -Werten) einzugeben. Diese Einbauten befinden sich nach dem Verteiler, d. h. beim Massenstrom handelt es sich hier um den Massenstrom durch ein einzelnes Sondenrohr.

Als letzter Punkt muss die Methode zur Berechnung des Druckverlustkoeffizienten ξ gewählt werden. Mit ihr wird der Druckverlust in den Sondenrohren sowie in den horizontalen Sondenanschlüssen ermittelt. Es wird empfohlen, die Methode von Petukhov zu wählen.

8. Im Tabellenteil "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.

Die benötigte Leistungsaufnahme der Pumpe ist gegeben durch das Produkt von errechnetem Druckabfall und angegebenem Volumenstrom.

9. Als Hauptresultat wird der Anteil der Pumpenenergie am gesamten Stromverbrauch in Prozent berechnet.

5.2 Blatt "Daten"

Der Benutzer benötigt dieses Blatt für eine Auslegungsberechnung nicht. Hier sind verwendete Daten (Stoffwerte u.a.) zusammengestellt sowie einige Zwischenresultate von Berechnungen.

A	B	C	D	E	F	G	H
1							
2	spez. Wärmekapazität der Erde	$c_{p \text{ Erde}}$		800 J/(kg*K)		qspez.	
3	mittlere Dichte der Erde	$\rho \text{ Erde}$		2600 kg/m ³		max.	
4	thermischer Sondenwiderstand	R_e		0.08 Km/W		55	
5							
6							
7	Sole <small>Stoffwerte nach Höchst, Antitrogen N/L</small>						
8	Medium	Dichte	bei -10°C	Viskosität	bei 10°C	cp	Frost
9		kg/m³	m²/s	0°C	m²/s	kJ/(kg*K)	°C
10				m²/s			
11							
12	Wasser	1000	0.0000018	0.0000018	0.00000131	4.22	0
13	Monoethylenglykol 25%	1053	0.00000627	0.00000415	0.00000291	3.8	-14
14	Monoethylenglykol 33%	1067	0.00000851	0.00000547	0.00000373	3.56	-21
15	Monopropylenglykol 25%	1032	0.00000967	0.00000598	0.00000394	3.92	-10
16	Monopropylenglykol 33%	1040	0.00001515	0.00000886	0.00000558	3.72	-17
17							
18							
19	Sonde			Wärmeübergang			
20		Aussendurch.	Wandst.	Innendurch.		nach Cerbe-	
21		m	m	m		Hoffmann	
22							
23	DN 25 mm Doppel-U	0.025	0.0023	0.0204		Nusselt turb.	50.11
24	DN 32 mm Doppel-U	0.032	0.003	0.026		Nusselt lam.	4.36
25	DN 40 mm Doppel-U	0.04	0.0037	0.0326		lambda Fluid	0.60
26						Alpha	1151
27							
28							
29	Standort		Entzugsprofil				
30		Faktor			Zeit	g(t,H)	
31		K			s	-	
32	Mittelland 500m	0.8		Schnell	172800	2.209883481	
33	Voralpen 1000m	1.4		Mittel	432000	2.668026847	
34	Alpen 1500m	2		Lang	1728000	3.361176028	
35							
36	Info / Sondenauslegung / Daten						

Abb 5-2: Blatt „Daten“ mit Stoffwerten und sonstigen Kennwerten

A	B	C	D	E	F	G
36	Aktuelle Werte:					
37	dinnen	0.026 m		<i>externe Druckverluste:</i>		
38	Reynoldszahl Sonde	5724		horizontale Sondenzuleitung		3.55 kPa
39	Prandtl-Zahl	11.33		WP-Verdampfer		12.14 kPa
40	g-funktion	2.66803		Verteiler		3.90 kPa
41	α -Wert	1151 W/m ² K		Volumenstrommesser		4.50 kPa
42	"R α "	0.0027 Km/W		Bögen und Tauchhülsen		0.00 kPa
43	p_dyn,Sonde	62 Pa		aus eingegebenem ζ - oder $\Sigma\zeta$		0.00 kPa
44	R-Wert	89 Pa/m		Sonstige Elemente		1.75 kPa
45	"Rg"	0.1699 Km/W		Sondenfuss		0.25 kPa
46	"Rm"	0.1062 Km/W		<i>Total externe Druckverluste:</i>		26.09 kPa
47	T_Sink (Rücklauf)	2.55 °C				
48	Entzugsleistung Qerde	10.11 W		Druckverlustkoeff. ξ Sonde		0.03705
49	"Rb"	0.083 Km/W				
50	mittlere Geschw. in Zuleitung	0.353 m/s				
51	Reynoldszahl Zuleitung	5724				
52	Druckverlustkoeff. ξ Zuleitg.	0.037047864				
53						
54						
55						
56						
57						
58						
59						
36	Info / Sondenauslegung / Daten					

Abb 5-3: Einige nützliche Zwischenresultate der Berechnungen (hier gezeigt am Beispiel der Anlage Wehrli in Thalwil)

6 Anhang

6.1 Grundlagen zur Erdwärmesonden-Berechnung

6.1.1 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“)

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T \quad \text{Gl. 6-1}$$

allgemein beschrieben werden. Die Temperaturleitfähigkeit a ist definiert als

$$a = \frac{\lambda_{Erde}}{c_{p,Erde} \rho_{Erde}} \quad \text{Gl. 6-2}$$

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.

6.1.2 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 Quelltemperatur von T_{source} .

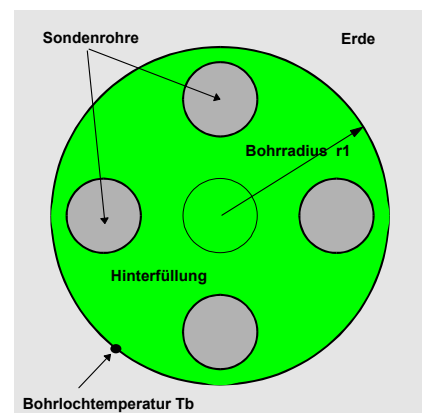


Abb 6-1: Querschnitt einer Doppel-U-Sonde

6.1.3 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

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \quad \text{Gl. 6-3}$$

dimensionsbefreit werden. Die dimensionslose Zahl E_s von Eskilson

$$E_s = \frac{t \cdot 9a}{H^2} \quad \text{Gl. 6-4}$$

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

Nach Eskilson kann bis zum Zeitpunkt $E_s = 1$ die vertikale Wärmeleitung im Erdreich (bei einem maximalen Fehler von 7 %) vernachlässigt werden, ab ca. $E_s = 10$ 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.

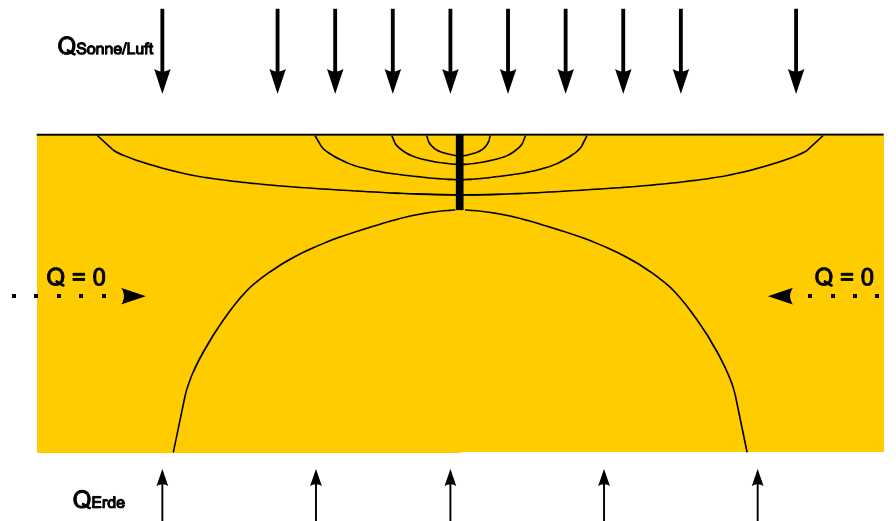


Abb 6-2: Wärmeflusslinien für Einzelsonden im Gleichgewichtszustand

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

$$g(r, t) = \frac{\Delta T(r, t) \cdot 2\pi \cdot \lambda_{\text{Erde}}}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 6-5}$$

Die dimensionslose Temperatursprungantwort g (= „g-function“) ist nach Eskilson (1987) sowohl für Einzelsonden, als auch für Sondenfelder einzig ein Funktion der dimensionslosen Zeit E_s und des dimensionslosen Sondenabstandes r_1/H (r_1 ist der Bohrlochradius). Es wird dabei von einem konstanten, spezifischen Wärmeentzug pro Sondenlänge \dot{q} ausgegangen. Für eine Einzelsonde im Bereich $5r_1^2/a < t < t_s$ kann die Funktion g bei einem maximalen Fehler von 7 % angenähert werden mit

$$g(t, r_1) = \ln\left(\frac{H}{2r_1}\right) + 0.5 \ln(Es) \quad \text{Gl. 6-6}$$

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:

$$T_b = T_m - \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda_{\text{Erde}}} g(r, t) \quad \text{Gl. 6-7}$$

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:

$$T_m = T_{mo} + T_{\text{Grad}} \frac{H}{2} \quad \text{Gl. 6-8}$$

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

Für die Abhängigkeit der g -Funktion vom Sondenabstand r gilt nach Eskilson der folgende, logarithmische Zusammenhang:

$$g(r) = g(r_1) - \ln(r/r_1) \quad \text{Gl. 6-9}$$

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

Als Beispiel sind in Abb 6-3 die dimensionslosen Temperatur-Sprungantworten („ g -functions“) von zwei Erdwärmesonden mit Abstand B eingezeichnet. Im Vergleich dazu ist gestrichelt die g -function einer Einzelsonde zu finden.

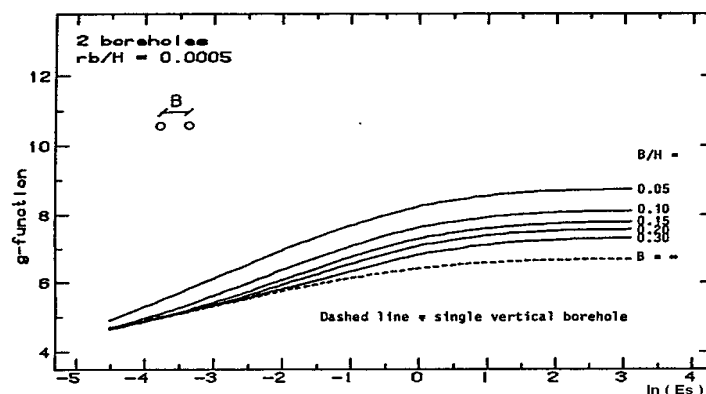


Abb 6-3: Dimensionslose Sprungantwort „ g -functions“ für zwei Erdwärmesonden mit dem Abstand B nach Eskilson (1987). Die Sprungantwort einer Einzelsonde ist gestrichelt eingezeichnet.

6.2 Sonden-Rücklauf­temperatur für Doppel-U-Sonden (Frostschutz)

Wie in Kap. 3.2 erwähnt, wird im Folgenden die für den Frostschutz massgebende Rücklauf­temperatur T_{Sink} genauer hergeleitet (Details in Huber (2005), p. 11-16).

Ausgangspunkt ist die zu Gl. 6-7 analoge Gleichung, diesmal ausgedrückt mit der über der Tiefe gemittelten Bohrlochtemperatur \bar{T}_b und der über der Tiefe gemittelten Temperatur \bar{T}_m des ungestörten Erdreichs.

$$\bar{T}_b = \bar{T}_m - \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}}} g(r, t) \quad \text{Gl. 6-10}$$

Die Energiebilanz lautet:

$$\dot{q} H = \dot{m}_{\text{Sole}} c_{p, \text{Sole}} (T_{\text{Source}} - T_{\text{Sink}}) \quad \text{Gl. 6-11}$$

Die mittlere Fluidtemperatur ist definiert als:

$$\bar{T}_f = \frac{1}{2} (T_{\text{Source}} + T_{\text{Sink}}) \quad \text{Gl. 6-12}$$

Der effektive Bohrloch­widerstand R_b^* wird mittels der gemittelten Bohrlochtemperatur \bar{T}_b und der mittlere Fluidtemperatur \bar{T}_f definiert:

$$R_b^* = \frac{\bar{T}_b - \bar{T}_f}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 6-13}$$

Es kann gezeigt werden, dass für Doppel-U-Sonden gilt:

$$R_b^* = R_b + \frac{H^2}{3 R_a \dot{m}^2 c_{p, \text{Sole}}^2} \quad \text{Gl. 6-14}$$

wobei R_b durch Gl. 3-10 gegeben ist und R_a durch:

$$R_a = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\text{Fill}}} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot b \cdot r_1}{r_o} \right) - \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot b \cdot r_1}{r_o} \right) - \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \ln \left(\frac{1 - b^4}{1 + b^4} \right) \right] + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \alpha} + R_s \quad \text{Gl. 6-15}$$

wobei der thermische Widerstand R_s der Sondenrohrwand gegeben ist durch

$$R_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln \left(\frac{r_s}{r_o} \right) \quad \text{Gl. 6-16}$$

sowie

$$\sigma = \frac{\lambda_{\text{Fill}} - \lambda_{\text{Erde}}}{\lambda_{\text{Fill}} + \lambda_{\text{Erde}}} \quad \text{Gl. 6-17}$$

wobei λ_{Fill} die Wärmeleitfähigkeit der Bohrloch­hinterfüllung, und

$$b = \frac{\text{Bu}}{2 \cdot r_1} \quad \text{Gl. 6-18}$$

wobei Bu der Abstand der Quellen- zur Rücklaufsonde ist.

Aus allem ergibt sich für die Sonden-Rücklauf­temperatur T_{Sink} , die massgebend ist für die Frost­sicherheit:

$$T_{Sink} = T_{mo} + T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t, r_1)}{2\pi \lambda_{Erde}} + \frac{1}{8\pi \alpha r_o} + R_c + \frac{1}{3} \frac{1}{R_a} \frac{H^2}{\dot{m}_{Sole}^2 c_{p,Sole}^2} + \frac{H}{2 \cdot \dot{m}_{Sole} c_{p,Sole}} \right] \dot{q} \quad \text{Gl. 6-19}$$

Grundvoraussetzung für die Gültigkeit der Erdwärmesondengleich ist der konstante Wärmeeintrag \dot{q} über die ganze Bohrtiefe. Für Tiefe Erdwärmesonden und kleine Sondendurchsätze \dot{m} ist diese Grundvoraussetzung oft nicht mehr gegeben. Für diesen Fall ist eine Simulationslösung wie im Programm-Modul EWS erforderlich.

7 Symbolverzeichnis

Lateinisches Alphabet

a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit ($\lambda/\rho \cdot c_p$)
B	m	Sondenabstand benachbarter Erdwärmesonden
c_p	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Wärmekapazität
D_b	m	Bohrdurchmesser
D_i	m	Innendurchmesser der Sondenrohre
$D_{\text{zul},i}$	m	Innendurchmesser der horizontalen Sondenanschlussleitung
H	m	Bohrtiefe bzw. aktive, vertikale Sondenlänge
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 (4 Sondenrohre) und Hinterfüllung
L_{zul}	m	Länge der horizontalen Sondenanschlussleitung
\dot{m}	kg/s	Solemassenstrom (Durchsatz durch Pumpe), $\dot{m} = \dot{Q}/(\Delta T c_p)$
\dot{Q}	W	Wärmeentzugsleistung $\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$
\dot{q}	W/m	spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde pro Länge, \dot{Q}/dl
r	m	radialer Abstand von der Rohrachse
r_o	m	Innen-Radius der Sondenrohre
r_1	m	Radius des Bohrloches
R_a	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$	interner Sondenwiderstand (hinauf- zu hinabströmenden Fluid) pro Länge
R_α	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$	Wärmeübergangswiderstand (von Fluid zu Sondenrohrradius) pro Länge
R_b	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$	thermischer Bohrlochwiderstand (von Fluid bis Bohrlochradius)
R_c	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$	thermischer Hinterfüllungswiderstand (Sondenrohr- zu Bohrlochradius)
t	s	Zeit
t_s	s	Sondenzeitkonstante ($t_s = H^2 / 9a$)
T	K	Temperatur
T_b	K	Bohrlochtemperatur (in der Tiefe z), Temperatur am Bohrlochradius
T_{Grad}	K/m	vertikaler Temperaturgradient des ungestörten Erdreiches
T_m	K	ungestörte mittlere Erdreichtemperatur (in der Tiefe z)
T_{mo}	K	Mittlere Jahrestemperatur der Erdoberfläche
T_{Source}	K	Quellentemperatur (Temperatur der aus der Sonde ausströmenden Sole)
T_{Sink}	K	Rücklauftemperatur (Temperatur der in die Sonde einströmenden Sole)
v	m/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Sole, $v = \dot{m} / [\rho \pi (D_i/2)^2]$

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 (auch als Rohrreibungszahl bezeichnet)
ζ	-	Widerstandsbeiwert

Indizes

dia	Diagramm-Wert, z.B. B_{dia} = Sondenabstand aus 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	$\alpha D / \lambda$	Nusseltzahl, gebildet mit dem Rohrdurchmesser und λ Fluid
Pr	ν / a	Prandtlzahl
Re	$D_i v / \nu$	Reynoldszahl, gebildet mit dem Rohrinne Durchmesser

8 Literaturverzeichnis

- 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.; Schuler, O. (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9658807/1, 1997.
- Huber, A. (1999): Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- 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.
- Huber, A. (2005): Erdwärmesonden für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation. Forschungsprogramm Geothermie. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Incropera, F. P.; DeWitt, D. P. (1996): Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4. Auflage. John Wiley & Sons.
- 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.; Mégel, Th.; Schärli, U. (2006): Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500m). Überarbeitung. Bundesamt für Energie, Programm Geothermie, Bern.
- Merker, G. (1987): Konvektive Wärmeübertragung. Springer-Verlag.
- Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.; (2003): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 71. Auflage. Oldenbourg Industrieverlag München.
- SIA (1996): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. SIA Dok D0136.
- Zierep, J. (1993): Grundzüge der Strömungslehre. 5. Auflage. Springer-Verlag.
- Zimmermann, M. et al. (1999): Handbuch der passiven Kühlung. EMPA (ZEN)/ Bundesamt für Energie BFE, Bern. ISBN 3-905594-06-4.