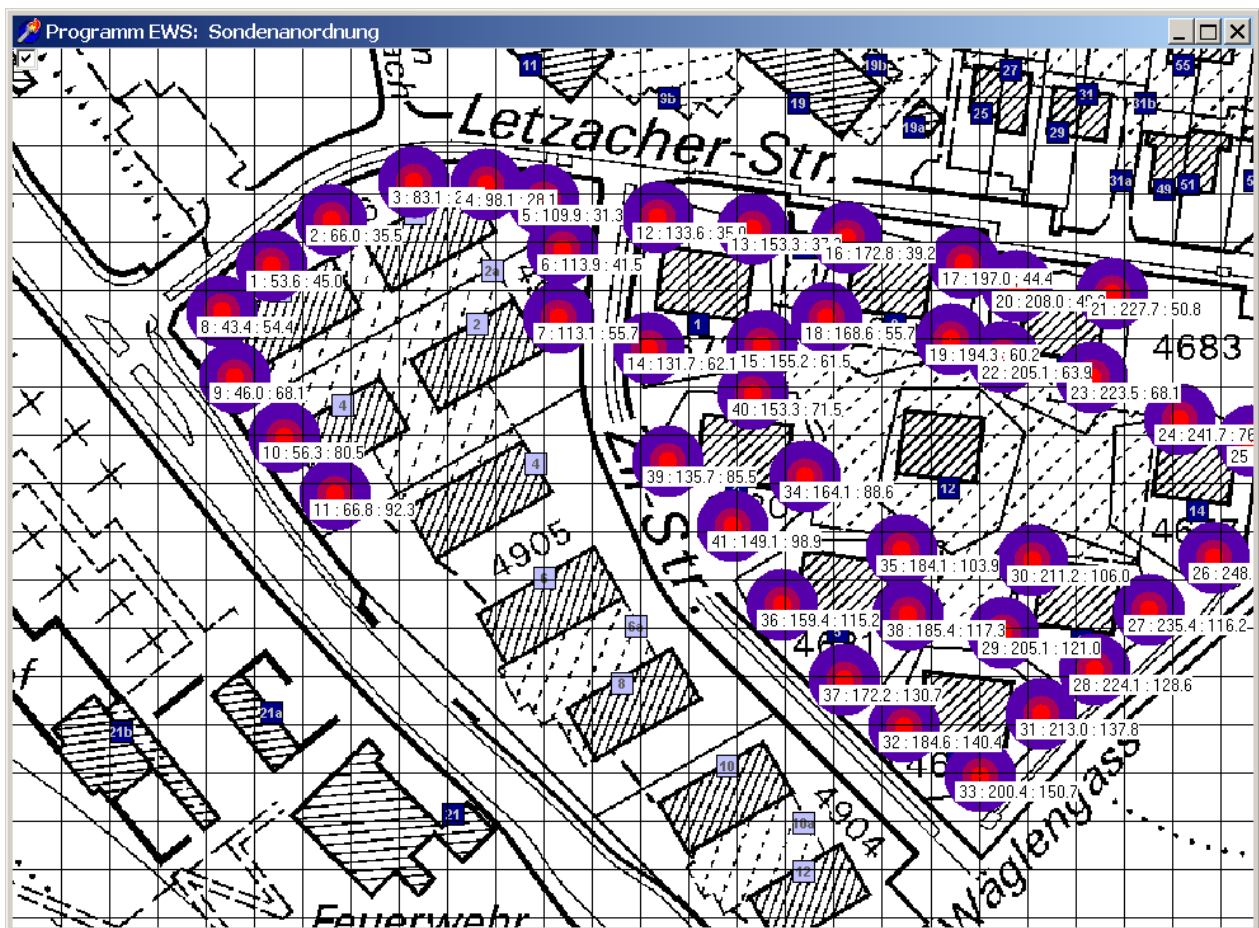


# Benutzerhandbuch zum

# Programm EWS

Version 4.7

## Berechnung von Erdwärmesonden



Arthur Huber

September 2011

## Inhaltsverzeichnis

1	Bedienungsanleitung zum Programm EWS .....	4
1.1	Inhalt und Zweck des Programms EWS .....	4
1.2	Gliederung des Benutzerhandbuchs .....	4
1.3	Was ist neu in der Version 4.7 .....	4
1.4	Weiterführende Literatur .....	4
2	Installation und Lizenzierung .....	5
2.1	Systemanforderungen .....	5
2.2	Programm - Auslieferung .....	5
2.3	Sprach - Versionen .....	5
2.4	Programm - Lizenzen .....	5
2.5	Installation .....	6
2.6	Eingabe der Lizenznummer .....	6
3	Dateneingabe .....	8
3.1	Grundsätze der Dateneingabe .....	8
3.1.1	Fehlende Datei „Lizenz.ews“ .....	8
3.1.2	Dezimal-Punkte .....	8
3.1.3	Default-Werte .....	8
3.1.4	Pull-Down Menüs .....	8
3.2	Blatt "Sonden" .....	9
3.2.1	Auswahl des Sondentyps .....	10
3.2.2	Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde .....	10
3.2.3	Bezeichnungen an der Koaxialsonde .....	11
3.2.4	Auswahl der Sondenanordnung (Einzelsonden und Sondenfelder) .....	12
3.2.5	Eingabe eigener g-functions .....	14
3.3	Beliebige Sondenfelder: Blatt „Sondenanordnung“ .....	16
3.3.1	Setzen, verschieben und löschen von Erdsonden im Sondenfeld .....	17
3.3.2	Einfügen von Karten im Hintergrund in 4 Schritten: .....	18
3.3.3	Optimieren von Sondenfeldern .....	19
3.4	Berechnung Einzelsonde im Sondenfeld .....	19
3.5	Blatt "Sole" .....	20
3.5.1	Eingabe der unbeeinflussten Erdreichtemperaturen .....	21
3.5.2	Automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge .....	22
3.6	Blatt "Info" .....	22
3.7	Blatt "Erde" .....	23
3.7.1	Grundeingaben .....	23
3.7.2	Eingabe mehrerer horizontaler Schichten .....	25
3.7.3	Eingabe der Stoffwerte für die Erde .....	27
3.7.4	Erstellen einer eigenen Bibliothek von Stoffwerten .....	28
3.8	Blatt "Entzug" .....	29
3.9	Blatt "Lastprofil" .....	31
3.10	Blatt "Simulation" .....	33
3.10.1	Einblenden des Blattes "Simulation" .....	33

3.10.2	Eingabe von Entzugsleistungen oder Sonden-Rücklauftemperaturen .....	34
3.10.3	Aktive Zusatzkühlung wenn das Sonden-Freecooling nicht ausreicht .....	34
3.10.4	Frostschutz (minimale Sondentemperatur) und bivalente Anlagen .....	34
3.10.5	Response - Test .....	34
3.11	Blatt "Parameter" .....	36
3.12	Blatt "Druck" .....	37
3.13	Wärmepumpenkenngrossen und Zusatzheizung .....	39
3.14	Direktkühlung .....	40
4	Berechnung .....	42
4.1	Graphische Darstellung von Quellen- und Rücklauftemperatur .....	42
4.2	Graphische Darstellung der Entzugsleistung .....	42
4.3	Resultatblatt .....	43
5	ANHANG A: Modellbeschreibung .....	44
5.1	Simulationsbereich .....	44
5.1.1	Simulation des Zeitschrittes .....	45
5.2	Rechengitter .....	46
5.3	Wärmeleitungsgleichung und Sprungantwort g .....	47
5.3.1	Wärmeleitungsgleichung .....	47
5.3.2	Der radiale Temperatur-Trichter .....	47
5.3.3	Dimensionslose Temperatursprungantwort g .....	48
5.3.4	Vergleich der Modelle .....	49
5.4	Die Berechnung der g-functions mit dem Superpositionsprinzip .....	50
5.5	Die Bohrlochtemperatur $T_b$ und die Fluidtemperatur $T_f$ .....	50
5.5.1	Die Fluidtemperatur $T_f$ .....	51
5.6	Thermische Widerstände $R_a$ und $R_b$ in der Doppel-U-Sonde .....	51
5.6.1	Internen Bohrlochwiderstandes $R_a$ nach Hellström [4] .....	52
5.6.2	Bohrlochwiderstandes $R_b$ nach Hellström [4] .....	52
5.7	Thermische Widerstände $R_a$ / $R_b$ an der Koaxialsonde .....	53
5.7.1	Modellierung des internen Bohrlochwiderstandes $R_a$ .....	53
5.7.2	Modellierung des Bohrlochwiderstandes $R_b$ .....	53
5.8	Analytische Erdsondengleichung .....	54
5.8.1	Konzept der thermischen Widerstände .....	54
5.8.2	thermische Verbraucherwiderstand $R_f$ .....	54
5.8.3	Thermischer Transportwiderstand $R_m$ .....	55
5.8.4	Wärmewiderstand des Bodens $R_g$ .....	56
5.8.5	Analytische Erdwärmesondengleichung .....	56
6	ANHANG B: Eingabe eigener g-functions .....	57
6.1	Beispiel 1: Eingabe einer g-function mittels den Funktionswerten .....	57
7	Symbolverzeichnis .....	59
7.1	Lateinische Symbole .....	59
7.2	Griechische Symbole .....	60
8	Literaturverzeichnis .....	60

# 1 Bedienungsanleitung zum Programm EWS

## 1.1 Inhalt und Zweck des Programms EWS

Das Programm EWS berechnet in der Grundversion das thermische Verhalten von Erdwärmesonden. Dazu wird die Wärmeleitungsgleichung im Erdreich und der Wärmetransport aus der Sonde numerisch gelöst. Das Programm berechnet die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen, sowie die Entzugsleistungen von Erdwärmesonden (Einzelsonden und Sondenfelder) auf stündlicher Basis über eine Zeitdauer von bis zu 60 Jahren. Dabei können alle wichtigen Einfluss-Faktoren berücksichtigt werden. Das Erdreich kann vertikal in bis zu 10 verschiedenen Schichten mit unterschiedlichen, physikalischen Eigenschaften des Erdreichs und der Hinterfüllung aufgeteilt werden. Mit der Möglichkeit, das Sondenfluid auch instationär rechnen zu können, sind auch der Anfahrprozess und Thermal-Response-Tests berechenbar.

In der Vollversion sind einfache, grafische Eingaben möglich und es können ganze Systeme zur Direktkühlung über Erdwärmesonden berechnet werden. Ausgehend von der Rücklauftemperatur des Gebäude-Kühlsystems (TABS, Kühldecken und Lüftung) kann eine hydraulische Einkopplung der Sonden mit Wärmetauschern zur Lüftung und zum hydraulischen Kühlsystem simuliert werden. Bei der Lüftung ist selbst ein komplizierter Lüftungsfahrplan kein Problem.

## 1.2 Gliederung des Benutzerhandbuchs

Das vorliegende Handbuch führt den Benutzer durch die verschiedenen Eingabemasken des Programms EWS und zeigt, wo welche Eingaben einzufüllen sind. Die Kenntnis der physikalischen Grössen wird dabei vorausgesetzt und hier nicht weiter erklärt. Im ersten Teil wird der Benutzer mit der Dateneingabe bekannt gemacht, im zweiten Teil folgen Angaben zur Berechnung.

## 1.3 Was ist neu in der Version 4.7

In der Version 4.7 wurden die folgenden Neuerungen eingebaut: Eingabemöglichkeit von Karten zur vereinfachten, grafischen Eingabe der Sondenanordnung, Automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge entsprechend der Norm SIA 384/6, Eingabemöglichkeit eines Temperaturprofils des unbeeinflussten Erdreichs (Anfangsbedingung der Simulation), freie Sondenanordnung für bis zu 100 Sonden, Druckabfallberechnung für ganzen Sondenkreislauf, neues Lastprofilblatt mit Eingabemöglichkeit des monatlichen Heiz- und Kühlenergiebedarfs, sowie Warmwasserbedarfs für das Gebäude, Eingabemöglichkeit von geologischen Profilen mit unregelmässigen Schichten, Bibliothek mit benutzerdefinierten, geologischen Daten.

## 1.4 Weiterführende Literatur

Bei der Ausarbeitung des Programms EWS wurde grosser Wert darauf gelegt, dass das Verhalten von Erdwärmesonden auch von Benutzern des Programms berechnet werden kann, die keinen tieferen Einblick in die Modelle und die numerischen Zusammenhänge haben. Dazu wurde z.B. jedem Eingabewert ein Defaultwert (Standard-Eingabewerte) zur Seite gestellt, der in den meisten Fällen zu brauchbaren Resultaten führt. Im vorliegenden Handbuch wurde darauf verzichtet, alle verwendeten Modelle zu dokumentieren. Diese Modelle sind aber in wissenschaftlichen Forschungsberichten (inkl. Validierung) sehr detailliert (teilweise inkl. Quell-Code der Programm-Teile) publiziert. Im Literaturverzeichnis ist ein Überblick über diese Forschungsberichte zu finden.

Im Programm EWS wurde das Programm-Modul EWS eingebaut, das im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) in Bern entwickelt wurde (cf. Literatur [5], [6], [8])

## 2 Installation und Lizenzierung

### 2.1 Systemanforderungen

Für einen sinnvollen Einsatz des Programms EWS sind die folgenden Randbedingungen auf Ihrem PC erforderlich:

- mindestens Prozessor Pentium 800 MHz
- Betriebssystem: Windows 2000 / Windows XP / Windows Vista / Windows 7
- mindestens 20 MB freier Speicherplatz
- Bildschirmauflösung: mindestens 1024 x 768 Pixel

### 2.2 Programm - Auslieferung

Das Programm EWS wird aus rechtlichen Gründen nicht physikalisch auf einem Datenträger ausgeliefert. Es kann nur aus dem Internet heruntergeladen oder per Email zugestellt und mit einer Lizenznummer freigeschaltet werden.

### 2.3 Sprach - Versionen

Das Programm EWS ist in verschiedenen Sprachversionen erhältlich (deutsch, französisch, italienisch, spanisch, englisch). Soll das Programm EWS in einer anderen Sprachversion als deutsch geladen werden, so muss sich die Übersetzungsdatei „Sprache.ews“ im gleichen Datei-Ordner befinden wie das Programm „Ews.exe“. Ausserdem kann das Programm EWS auch jederzeit über die Menü-Zeile Info auf eine andere Sprachversion umgeschaltet werden.

### 2.4 Programm - Lizenzen

Der Erwerb einer Programm-Lizenz berechtigt zur Installation des Programms EWS auf einem Rechner des Kunden. Wird der Rechner ausschliesslich durch eine Person genutzt, so kann diese für einen Zweit-Arbeitsplatz (z.B. Laptop oder Heim-PC) ohne Aufpreis eine zweite Lizenznummer erhalten. Beim Kauf eines Ersatz-PCs kann zusätzlich eine dritte Lizenznummer beantragt werden.

Für alle übrigen Fälle sind für Zusatz-Installationen weitere Programm-Lizenzen zu erwerben. Bei Zusatz-Lizenzen des gleichen Kunden wird ein Preisnachlass von 50% gewährt.

Programm-Lizenzen sind nicht übertragbar und können nicht weiterverkauft werden.

Für Schulen gelten besondere Bestimmungen. Schul-Lizenzen dürfen nicht für kommerzielle Berechnungen eingesetzt werden.

## 2.5 Installation

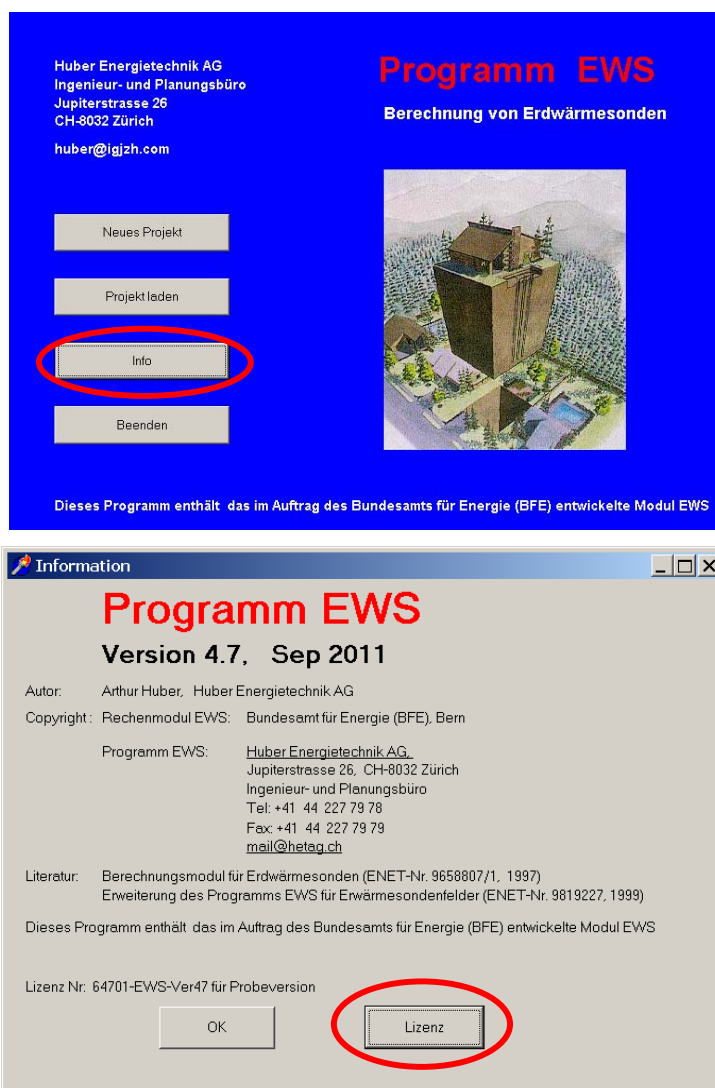
Für das Programm EWS ist keine Installation erforderlich. Ein einfaches Kopieren des Files Ews.exe in den gewünschten Zielordner genügt. Das Programm wird sodann durch die Eingabe einer Lizenznummer freigeschaltet. Dabei wird zwischen 3 Arten von Lizenznummern unterschieden:

1. Lizenznummer für Testversion (4701)
2. Lizenznummer für Grundversion
3. Lizenznummer für Vollversion

Je nach Eingabe der Lizenznummer stehen dann ein unterschiedlicher Funktionsumfang zur Verfügung.

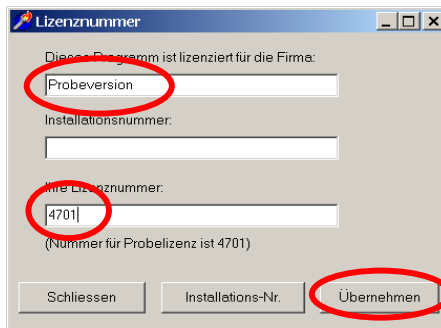
## 2.6 Eingabe der Lizenznummer

Sowohl die Testversion, als auch die Grund- und Vollversion müssen durch die Eingabe einer Lizenznummer freigeschaltet werden. Nachfolgend ist das Vorgehen dazu beschrieben:



**Testversion:**

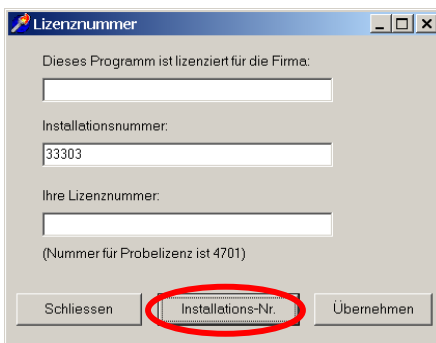
Um die Testversion freizuschalten, muss anstelle der Firma das Wort „**Probeversion**“ eingegeben werden. Die Lizenznummer der Testversion ist **4701**.



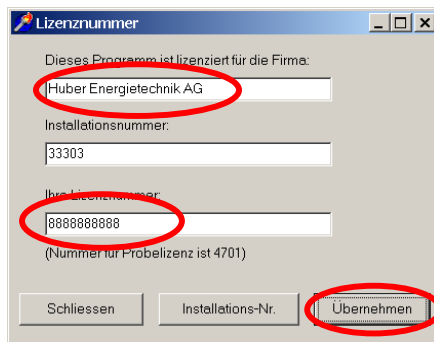
Mit der Testversion steht nun jedermann der Funktionsumfang der Vollversion offen, wobei allerdings einzelne Eingabefelder (z.B. Sondenlänge und Stoffwerte) nicht verändert werden können.

**Grund- und Vollversion:**

Durch drücken des Buttons „Installations-Nr.“ wird nun die Installationsnummer angezeigt. Diese Installationsnummer ist eine rechner-spezifische Grösse und hat für jeden PC einen anderen Wert. Diese Nummer ist nun zusammen mit dem Firmennamen per Mail an [mail@hetag.ch](mailto:mail@hetag.ch) zu senden. In der Regel wird dann innert 48h die individuelle Lizenznummer zurückgeschickt.



Die Lizenznummer ist nun zusammen mit dem Firmennamen in den dafür vorgesehenen Feldern einzutragen. Bewahren Sie die Lizenznummer sorgfältig auf, es kann notwendig werden, diese nach dem Ablauf einer gewissen Zeit nochmals einzugeben.



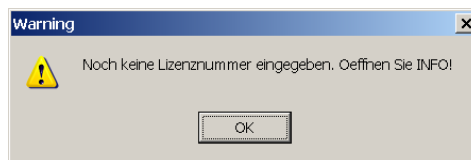
Nach Beendigung der Installation muss mit dem Programm einmal ein Berechnungs-Run mit den unveränderten Default-Werten durchgeführt werden. Erst danach kann mit der Dateneingabe fortgefahren werden.

### 3 Dateneingabe

#### 3.1 Grundsätze der Dateneingabe

##### 3.1.1 Fehlende Datei „Lizenz.ews“

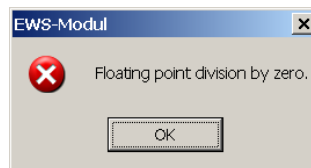
Erscheint beim Aufstarten des Programms die folgende Fehlermeldung, so wurde die Lizenznummer noch nicht eingetragen (cf. Kapitel 2.6)



Haben Sie die Lizenznummer bereits früher eingetragen und die Fehlermeldung erscheint trotzdem, so überprüfen Sie, ob die Datei „Lizenz.ews“ sich im gleichen Ordner befindet wie das Programm „Ews.exe“. Falls dies nicht der Fall ist, so kopieren Sie die Datei „Lizenz.ews“ in den aktuellen Ordner oder geben Sie die Lizenznummer gemäss Kapitel 2.6 erneut ein.

##### 3.1.2 Dezimal-Punkte

Es ist streng darauf zu achten, dass bei Eingaben nie ein Dezimal-Komma, sondern immer ein Dezimal-Punkt verwendet wird. Bei der Eingabe von Dezimal-Kommas werden alle Eingaben nach dem Komma ignoriert, was zu einer Fehlermeldung „Floating point division by zero“ führen kann.



##### 3.1.3 Default-Werte

Allen Simulations-Parametern ist beim Aufstarten des Programms ein Standard-Wert („Default-Wert“) zugeordnet. Bei all diesen Default-Werten wurde darauf geachtet, möglichst gebräuchliche und realistische Werte zuzuordnen. Wenn ein Simulationsparameter nicht bekannt sein sollte, oder der Sinn eines solchen unklar ist, so kann in der Regel mit dem Default-Wert gearbeitet werden.

##### 3.1.4 Pull-Down Menüs

An verschiedenen Stellen sind Pull-Down Menüs als Hilfe für zur Dateneingaben vorhanden. Bei der Anwahl eines solchen Pull-Down Menü werden in der Regel mehrere Eingabeparameter auf die dazu passenden Werte gesetzt. Dabei ist zu beachten, dass diese veränderten Eingabeparameter nachträglich trotzdem noch von Hand verändert werden können. In dem Fall kann es vorkommen, dass die Pull-Downs nicht mehr mit den dazugehörigen Eingabefeldern übereinstimmen. Bei einem solchen „Widerspruch“ rechnet das Programm EWS grundsätzlich mit den von Hand gesetzten Werten in den Eingabefeldern und ignoriert die Pull-Down-Auswahl.

→ **Das Programm EWS rechnet grundsätzlich nicht mit den Angaben der Pull-Down-Auswahlfeldern, sondern immer mit den dazu gehörenden Eingabefeldern, die in jedem Fall unabhängig von den Pull-Down Menüs eingestellt werden können.**



### 3.2 Blatt "Sonden"

Im Blatt "Sonden" werden die Sondenanzahl, die Bohrtiefe H, die Sondenart und die Sondenanordnung definiert.

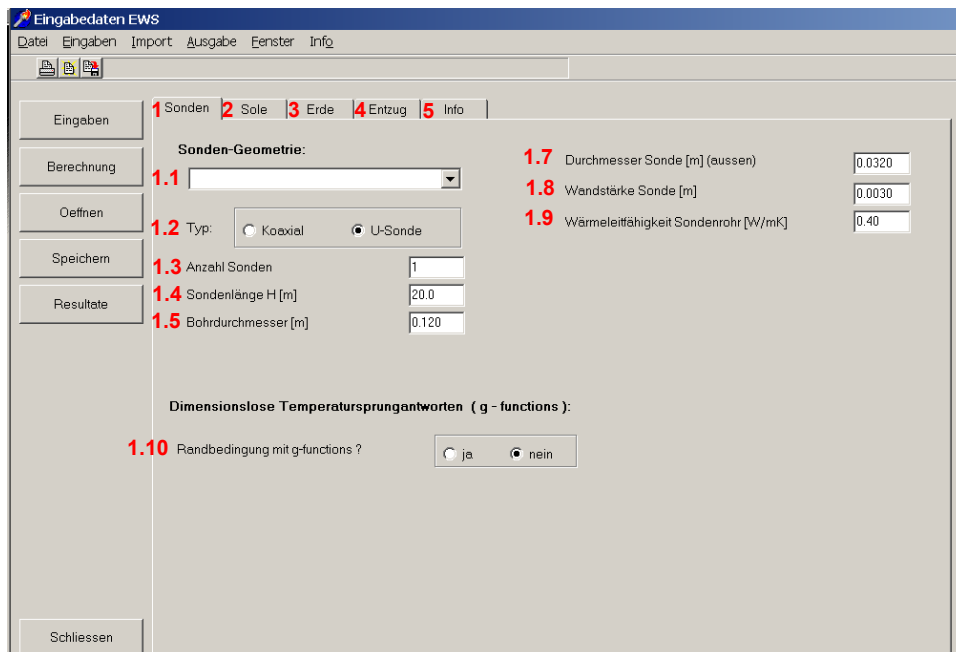


Abb. 3.1: Blatt "Sonden" mit den Default-Einstellungen.

Im **Feld 1.4** wird die Bohrtiefe H, im **Feld 1.3** die Anzahl der Sonden eingegeben. Werden im **Feld 1.3** mehr als eine Sonde eingegeben, so erscheinen zusätzliche Eingabefelder (cf. Abb. 3.2). Nun ist im **Feld 1.6** auch der Sondenabstand B einzugeben und im **Feld 1.11** kann die Sondenanordnung gewählt werden.

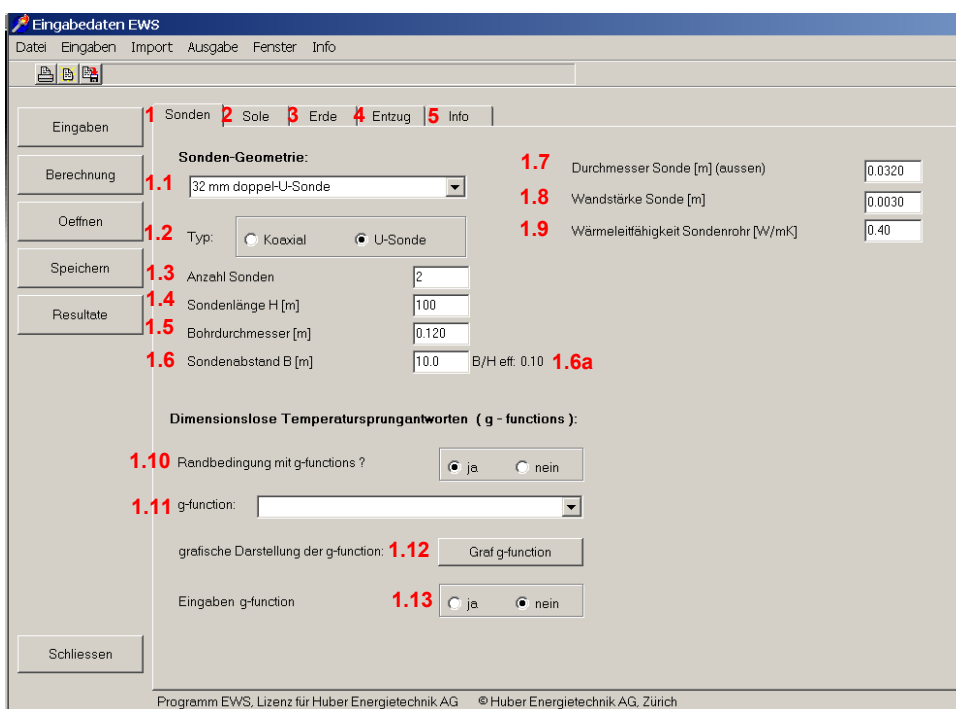
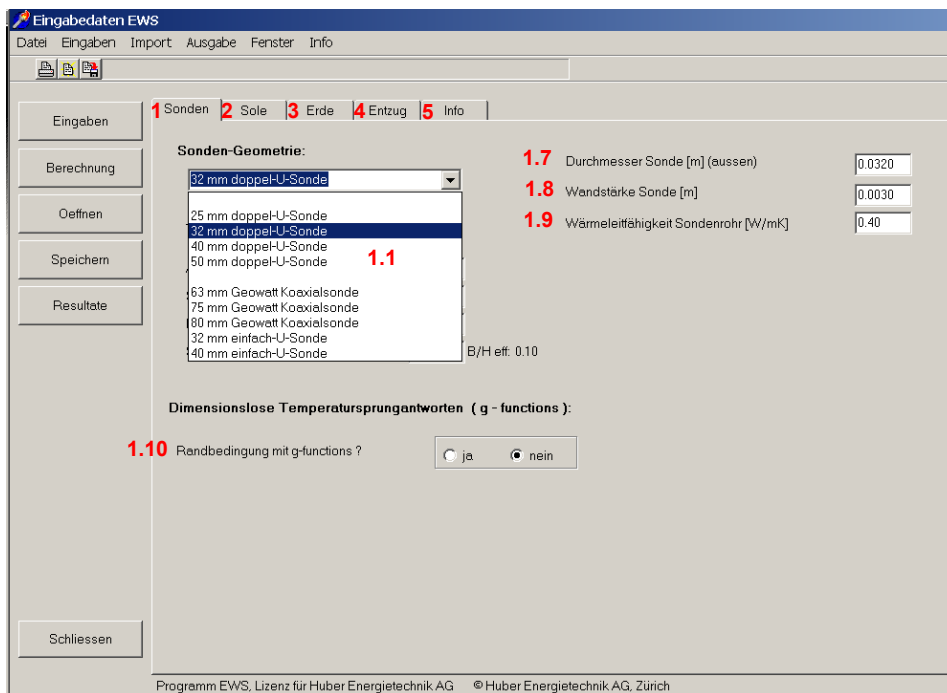


Abb. 3.2: Blatt "Sonden", zusätzliche Auswahlfelder bei 2 oder mehr Sonden auf Feld 1.3.

### 3.2.1 Auswahl des Sondentyps

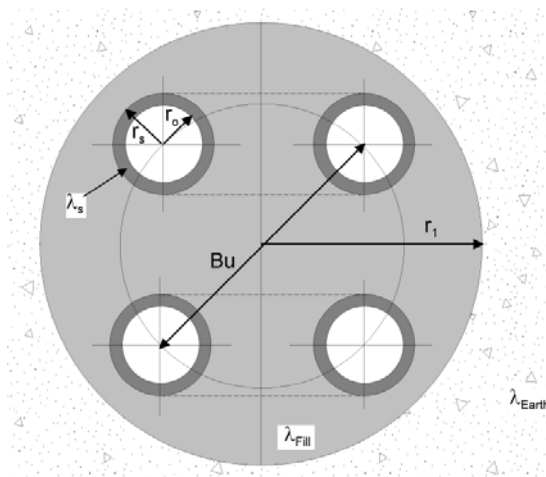
Durch die Auswahl im **Pull-Down-Feld 1.1** (cf Abb. 3.3) werden Default-Werte zum Sondentyp (U- oder Koaxialsonden, **Feld 1.2**), Bohrdurchmesser  $[2 \times r_1]$  (**Feld 1.5**), Durchmesser der Sondenrohre  $[2 \times r_s]$  (**Feld 1.7**), Wandstärke  $[r_s - r_o]$  (**Feld 1.8**) und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_s$  der Sondenrohre (**Feld 1.9**) automatisch eingefüllt. Diese Parameter können allerdings auch noch von Hand angepasst werden.



**Abb. 3.3:** Blatt "Sonden", Auswahl des Sondentyps unter Feld 1.1.

Gerade beim Bohrdurchmesser können je nach Bohrfirma und Bohrgrund grössere Abweichungen von den Default-Werten vorkommen. Eine Überprüfung des Bohrdurchmessers (Feld 1.5) ist daher angezeigt.

### 3.2.2 Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde



Die Sondengeometrie kann wie folgt eingegeben werden:

- Feld 1.5** Bohrdurchmesser =  $2 \times r_1$
- Feld 1.7** Durchmesser Sonde aussen =  $2 \times r_s$
- Feld 1.8** Wandstärke Sonde =  $r_s - r_o$
- Feld 1.9** Wärmeleitfähigkeit Sondenrohre  $\lambda_s$
- Feld 3.11** Rohrabstand „shank spacing“ = Bu
- Feld 3.3** Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung  $\lambda_{Fill}$

**Abb. 3.4:** Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde.

### 3.2.3 Bezeichnungen an der Koaxialsonde

Durch die Auswahl des koaxialen Sondentyps (Feld 1.2) erscheinen die für die Koaxialsonde zusätzlichen Eingabefelder 1.22, 1.23 und 1.24 (Angaben zum koaxialen Innenrohr):

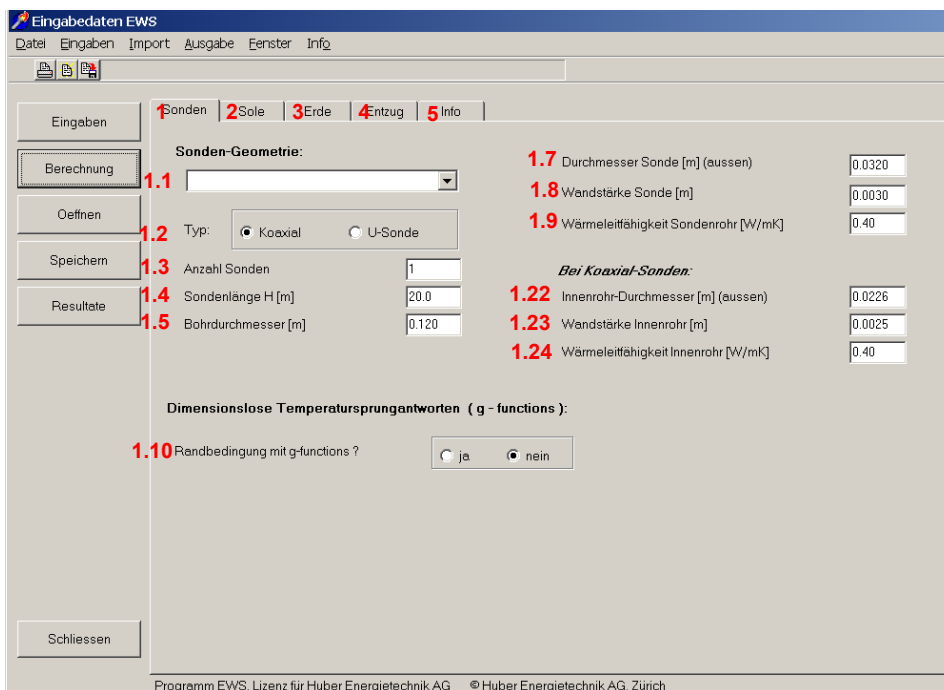


Abb. 3.5: Blatt "Sonden", Auswahl der Koaxialsonde in Feld 1.2.

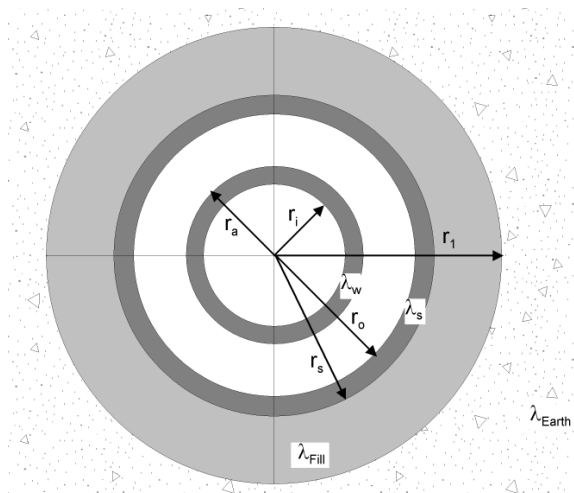


Abb. 3.6: Bezeichnungen an der Koaxialsonde.

Die Sondengeometrie kann wie folgt eingegeben werden:

- Feld 1.5 Bohrdurchmesser =  $2 \times r_1$
- Feld 1.7 Durchmesser Sonde aussen =  $2 \times r_s$
- Feld 1.8 Wandstärke Sonde =  $r_s - r_o$
- Feld 1.9 Wärmeleitfähigkeit Sondenrohre  $\lambda_s$
- Feld 1.22 Innenrohr-Durchmesser aussen =  $2 \times r_a$
- Feld 1.23 Wandstärke Innenrohr =  $r_a - r_i$
- Feld 1.24 Wärmeleitfähigkeit Innenrohre  $\lambda_w$
- Feld 3.3 Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung  $\lambda_{Fill}$

### 3.2.4 Auswahl der Sondenanordnung (Einzelsonden und Sondenfelder)

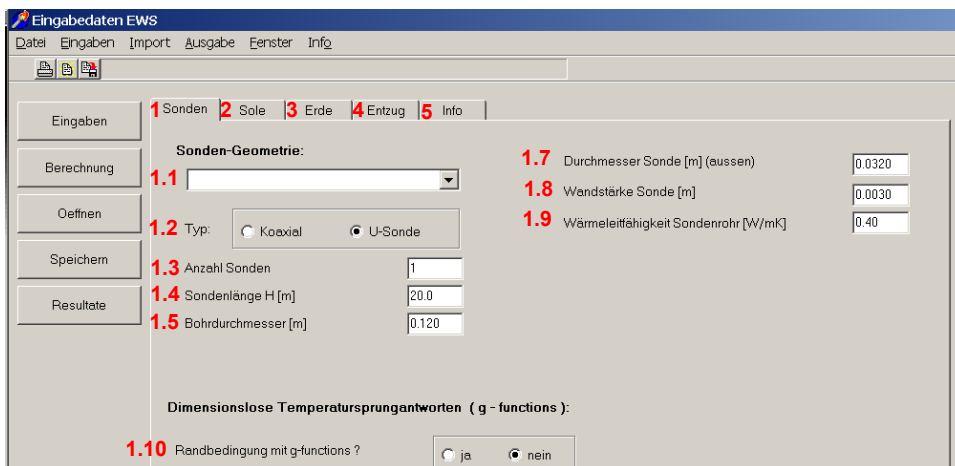


Abb. 3.7: Blatt "Sonden" mit den Default-Einstellungen.

Jede Sondenanordnung kann durch ihre dimensionslose Temperatur-Sprungantwort (= g-function, cf. Gl. 5.8) beschrieben werden. Diese wird im Programm EWS als äussere Randbedingung für das Simulationsgebiet eingesetzt. Für Einzelsonden kann alternativ dazu die analytische Lösung für unendliche Linienquellen von Carslaw & Jaeger [1] gemäss Gl. 5.11 eingesetzt werden. Dies wird im Feld 1.10 bestimmt. Wird dieses Feld auf „ja“ gesetzt, so werden die g-functions als Randbedingung zur Bestimmung der Sondenanordnung verwendet, anderenfalls wird der Ansatz von Carslaw & Jaeger verwendet. Diese Randbedingung ist allerdings nur für Einzelsonden für Simulationszeiträume bis zur Sondenzeitkonstanten Gl. 5.12 geeignet.

Sobald in Feld 1.3 mehr als eine Sonde angewählt wird, wird das Feld 1.10 auf „ja“ gesetzt und die Randbedingungen werden mit den g-functions von Eskilson ([2] und [3]) berechnet. Nun erscheint das Pull-Down-Feld 1.11 mit einer Auswahl an Sondenanordnungen. Dabei bedeutet B/H das Verhältnis von Sondenabstand B zu Sondentiefe H.

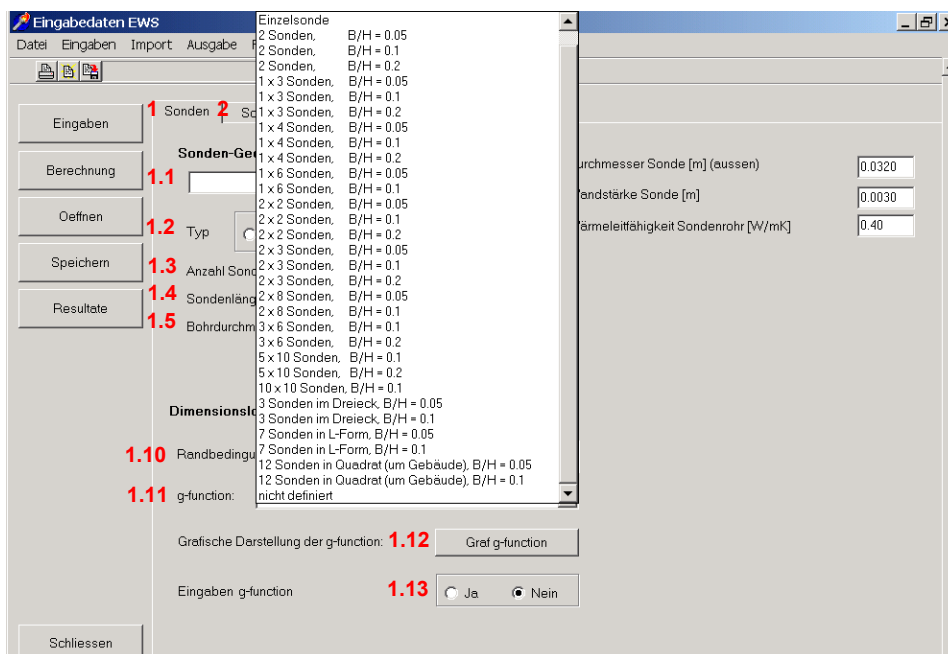

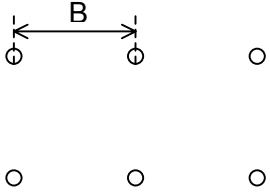
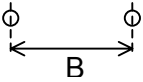
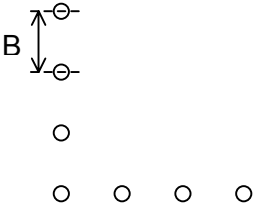
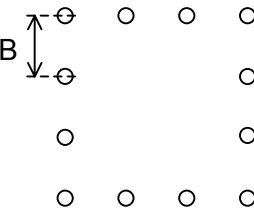
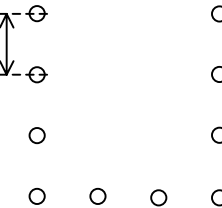


Abb. 3.8: Blatt "Sonden", Auswahl der Sondenanordnung unter 1.11.

Die Sondenanordnungen in Feld 1.11 sind wie folgt zu verstehen:

<ul style="list-style-type: none"> <li>„Einzelsonde“:</li> </ul>	<p>Es wird die g-function nach Eskilson für eine einzelne Sonde verwendet.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>1 x n Sonden, Bsp. 1 x 4 Sonden:</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>m x n Sonden, Bsp. 2 x 3 Sonden:</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>3 Sonden im Dreieck:</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>7 Sonden in L-Form:</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>12 Sonden im Quadrat (um Gebäude):</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>10 Sonden in U-Form:</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>„nicht definiert“:</li> </ul>	<p>Jede der Sonden wird gemäss Carslaw &amp; Jaeger (Gl. 5.11) berechnet (einzelne unendliche Linienquelle).</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>„eigene Eingabe“:</li> </ul>	<p>Beschreibung cf. Kap. 3.2.5.</p>

Zu beachten ist folgendes: Auch wenn die Sondenanzahl in Feld 1.3 nicht mit der Sondenanzahl der Auswahl in Feld 1.11 übereinstimmt, so wird die Anzahl in Feld 1.3 nicht automatisch angepasst! Für die Berechnung massgebend ist immer der Wert in Feld 1.3.

Jede g-function ist immer nur für ein bestimmtes Verhältnis von Sondenabstand B zu Sondentiefe H gültig. Weicht nun das effektive Verhältnis  $B/H_{\text{eff}}$  (Feld 1.6a) vom B/H der gewählten g-function ab, so wird die gewählte g-function automatisch auf  $B/H_{\text{eff}}$  extrapoliert. Die Grundlagen dazu sind bei Huber & Pahud [6] zu finden. Da jede Extrapolation eine gewisse Unsicherheit beinhaltet, sollte bei der g-function immer diejenige ausgewählt werden, deren Verhältnis B/H am nächsten beim effektiven Wert (Feld 1.6a) liegt. Durch das Drücken des Buttons 1.12 kann nun diese extrapolierte g-function, die für die Berechnung verwendet wird, grafisch dargestellt werden.

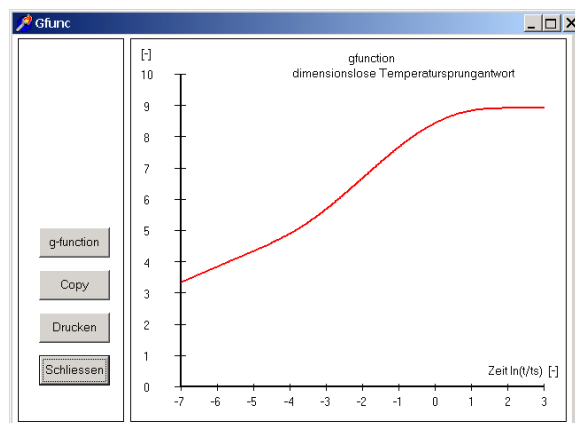


Abb. 3.9: Blatt "Sonden", grafische Darstellung der durch Extrapolation berechneten g-function.

### 3.2.5 Eingabe eigener g-functions

Das Programm EWS bietet als Alternative zur Wahl einer Sondenanordnung aus der Bibliothek (Feld 1.11) auch die Möglichkeit, eigene g-functions einzugeben. In der Literatur (z.B. in [3]) ist eine Vielzahl von g-functions publiziert. Weiter ist es möglich, aus den Bibliothekswerten neue g-functions zu interpolieren. Wird zum Beispiel die g-function für eine Sondenanordnung von 1 x 5 Sonden gesucht, so lässt sich diese mit genügender Genauigkeit aus den vorhandenen Bibliothekswerten für die Sondenanordnungen von 1 x 4 und 1 x 6 Sonden interpolieren.

Nachfolgend wird gezeigt, wie der Benutzer eigene g-functions-Werte eingeben kann. Dies ist nur dann notwendig, wenn die effektive Sondenanordnung mit keiner Auswahl aus Feld 1.11 beschrieben werden kann. Dazu wird im Feld 1.11 der letzte Auswahlpunkt „eigene Eingabe“ ausgewählt, dann wird bei den Feldern 1.10 und 1.13 „ja“ angewählt. Daraufhin erscheinen rechts die Felder 1.14 bis 1.21 (cf. Abb. 3.10).

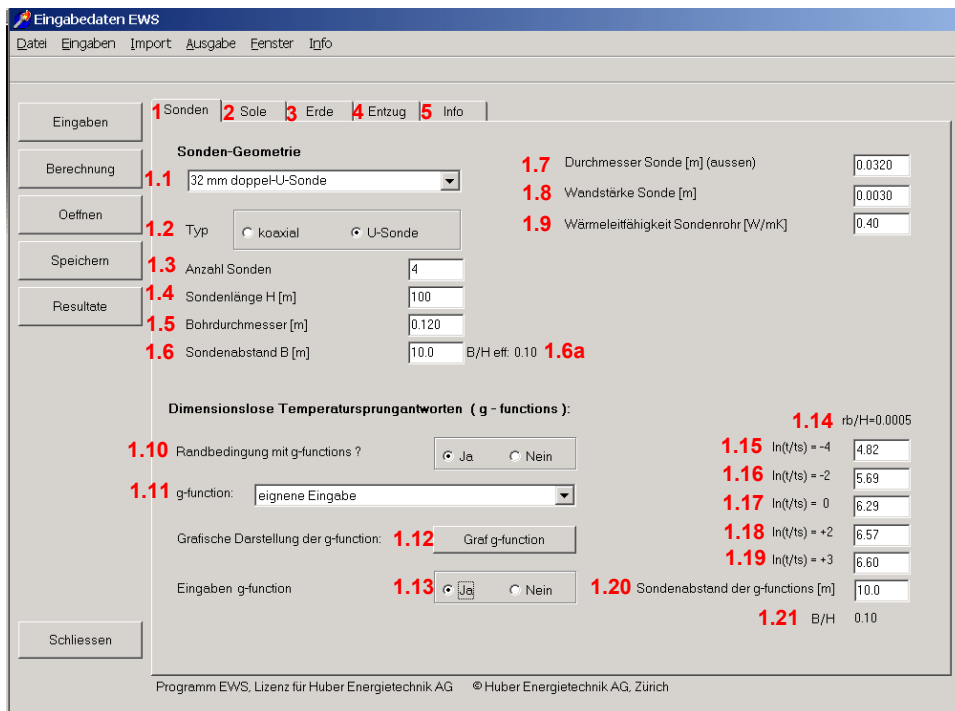


Abb. 3.10: Blatt "Sonden" bei Eingabe eigener g-functions.

Die **Felder 1.15 bis 1.19** beschreiben die g-function mit Hilfe der Funktionswerte der g-function an den Stützstellen  $\ln(t/t_s) = -4, -2, 0, +2, +3$ . Publierte oder selber berechnete g-functions gelten immer für ein bestimmtes Verhältnis B/H. Das in **Feld 1.21** angezeigte Verhältnis B/H ist berechnet aus dem Sondenabstand in **Feld 1.20** und der Sondenlänge H in **Feld 1.4**. Zuerst muss das **Feld 1.21** in Übereinstimmung gebracht werden mit dem B/H-Verhältnis der einzugebenden g-function. Dies geschieht durch Anpassen des Sondenabstandes in **Feld 1.20**. (Die Sondenlänge H in **Feld 1.4** muss auf dem effektiven Wert belassen werden.) Dann können die Funktionswerte der einzugebenden g-function an den Stützstellen  $\ln(t/t_s) = -4, -2, 0, +2, +3$  in die **Felder 1.15 bis 1.19** eingegeben werden. Die g-function ist nun vollständig definiert durch die **Felder 1.15 bis 1.21**.

Bemerkungen:

- **Feld 1.14** gibt das Verhältnis von Bohrlochradius  $r_b$  zur Sondenlänge H an. Dieses Verhältnis beträgt für alle hinterlegten (und auch für die meisten publizierten) g-functions 0.0005. Es kann nicht verändert werden und ist der Vollständigkeit halber angegeben.
- Für die Berechnungen ist weiterhin das effektive Verhältnis B/H eff in **Feld 1.6a** massgebend (und nicht etwa B/H aus **Feld 1.21**). Beim nächsten Berechnungs-Run wird durch das Programm automatisch die eingegebene g-function auf das effektive Verhältnis B/H eff extrapoliert.
- Falls wie empfohlen die g-function in **Feld 1.11** unter der Auswahl „eigene Eingabe“ eingegeben wird, so wird sie nach dem Speichern eines Berechnungs-Runs auch bei einem späteren Laden dieses Runs wieder unter der Auswahl „eigene Eingabe“ zur Verfügung stehen.
- Nähere Angaben zu g-functions sind im Anhang zu finden.

### 3.3 Beliebige Sondenanordnungen: Blatt „Sondenanordnung“

Nur in der **Vollversion** des Programms EWS gibt es eine weitere, elegante Möglichkeit zur Eingabe von beliebigen Sondenanordnungen. Dazu wird zunächst in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Eingaben“ das Blatt „Sondensfeld“ angewählt (cf. Abb. 3.11)

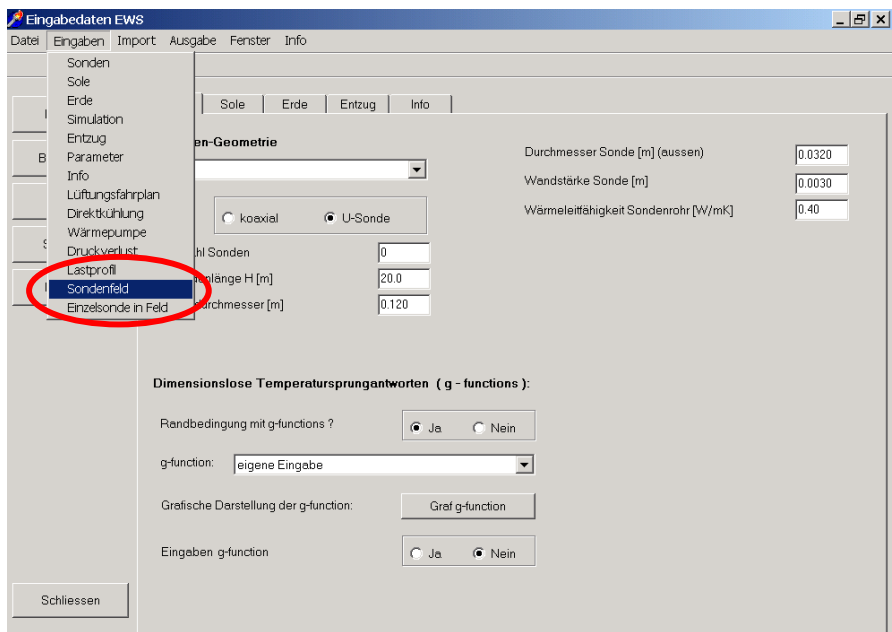


Abb. 3.11: Aufruf des Blattes "Sondensfeld" unter der Rubrik „Eingaben“.

In der Vollversion des Programms EWS erscheint nun das Blatt „Sondenanordnung“ mit einem Rasterfeld. Der Abstand zwischen je zwei Rasterlinien entspricht einem Meter. Alle 10 Meter ist die Rasterlinie dicker gezeichnet. Die Rasterlinien entsprechen einem Koordinatennetz, wobei die linke, obere Ecke die Koordinaten 0 / 0 hat.

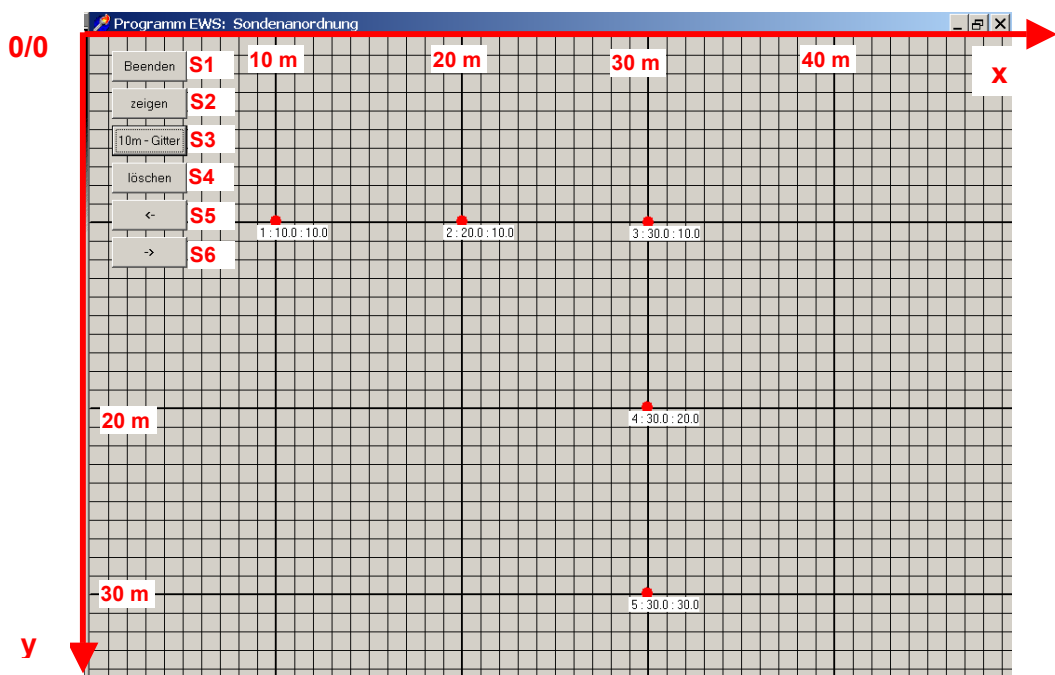


Abb. 3.12: Blatt „Sondenanordnung“ mit Rasterfeld (1 Linie pro Meter).



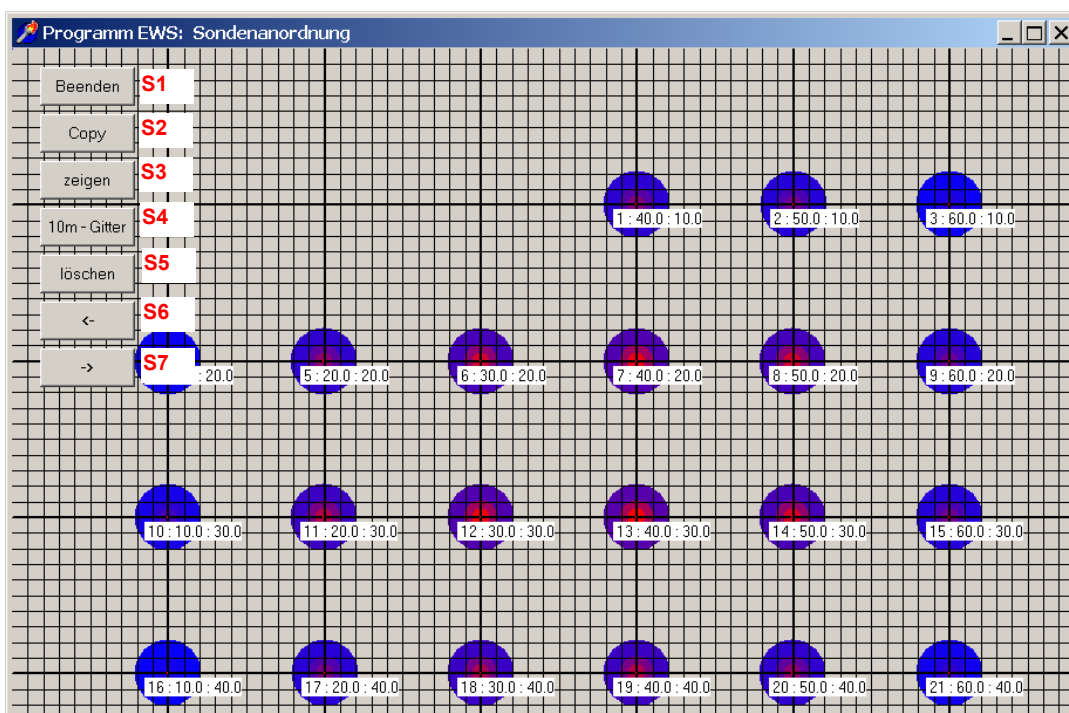
### 3.3.1 Setzen, verschieben und löschen von Erdsonden im Sondenfeld

Mit der linken Maustaste können nun **bis zu 100 Erdwärmesonden** beliebig auf dem Sondenfeld angeordnet werden. Direkt unterhalb jeder so angeordneten Sonde erscheint die Sonden-Nummer (von 1 hochgezählt in der Reihenfolge, wie die Sonden auf dem Feld gesetzt wurden), gefolgt von der x-Koordinate und von der y-Koordinate der Sonde. x-Koordinate und y-Koordinate entsprechen dem Abstand in Metern von der linken, oberen Ecke des Sondenfeldes. Mit der Taste **S4** kann das Gitternetz von einem 1m-Abstand auf einen 10m-Abstand gesetzt werden. Jede Sonde kann auf 10cm genau gesetzt werden und jederzeit mit der Maus wieder **verschoben** werden. Dazu wird die Sonde im Zentrum mit der **linken Maustaste** angewählt und mit gedrückter, linker Maustaste verschoben. Überzählige Sonden können auch wieder **gelöscht** werden. Dazu wird die Sonde im Zentrum mit der **rechten Maustaste** angewählt und verschoben. Dabei verschwindet die entsprechende Erdwärmesonde. Die Sonden werden dabei neu nummeriert.

Mit der Taste **S3** erscheinen 3 konzentrische Kreise um jede Sonde, wobei die Farben einen Hinweis geben über den g-Wert im Sondenfeld: Rot ist ein Hinweis auf einen hohen g-Wert, blau auf einen tiefen g-Wert, wobei die Farbzuzuweisung nicht absolut, sondern relativ ist: Der höchste Wert im Feld hat immer das gleiche Rot, der tiefste immer das gleiche Blau. Die Farben geben also einen Hinweis auf die relative Temperaturverteilung im Erdreich um die Erdwärmesonden.

Ist das Sondenfeld grösser als der Anzeigebereich auf dem Bildschirm, so kann der das Sondenfeld mit der Taste **S6** vergrößert werden, mit der Taste **S7** wird der Anzeigebereich wieder verkleinert, wobei Koordinaten 0/0 immer im linken, oberen Eck bleiben. Mit der Taste **S5** „löschen“ werden **alle** Sonden aus dem Feld gelöscht.

Mit der Taste **S2** kann die ganze Darstellung in die Zwischenablage kopiert werden und mit der Taste **S1** verlässt man das Blatt „Sondenanordnung“, wobei alle Eingaben übernommen werden (Anzahl und Koordinaten der Sonden, Sondenabstände, g-functions). Die g-function-Werte werden in die Felder 1.15 – 1.19 des Blattes Sonden übertragen und können dort überprüft werden.“



**Abb. 3.13: Blatt „Sondenanordnung“ mit 21 Erdwärmesonden. „Blaue“ Sonden ergeben einen hohen Ertrag, „rote“ Sonden einen tiefen Ertrag.**

### 3.3.2 Einfügen von Karten im Hintergrund in 4 Schritten:

In der Vollversion des Programms gibt es auch die Möglichkeit, Karten für die Sondenanordnung massstäblich zu hinterlegen. Die Karte muss dazu im BMP-Format sein und zunächst in die Zwischenablage (z.B. mit „Printscreen“ aus einem GIS-Browser) und von dort mit Hilfe der **mittleren Maustaste (Rad)** durch Klicken ins Blatt „Sondenanordnung“ kopiert werde. Anschliessend kann das Gitternetz auf der Karte so skaliert werden, dass dieses mit dem Kartenmassstab übereinstimmt (mit Hilfe der Taste **S8** „Messen“ und der frei einsetzbaren Distanz **S9**). Mit Hilfe der Tasten **S6** und **S7** kann die Karte und das Gitternetz sodann auf die gewünschte Grösse auf dem Bildschirm angepasst werden. Jetzt ist das Blatt „Sondenanordnung“ bereit für das Einfügen der Erdwärmesonden (cf. Kapitel 3.3.1). Sobald Sonden auf dem Blatt eingegeben sind, kann die Hintergrundkarte nicht mehr verändert werden. Nachfolgend sind die 4 Schritte für das Einfügen einer Hintergrundkarte ausführlich dargestellt:

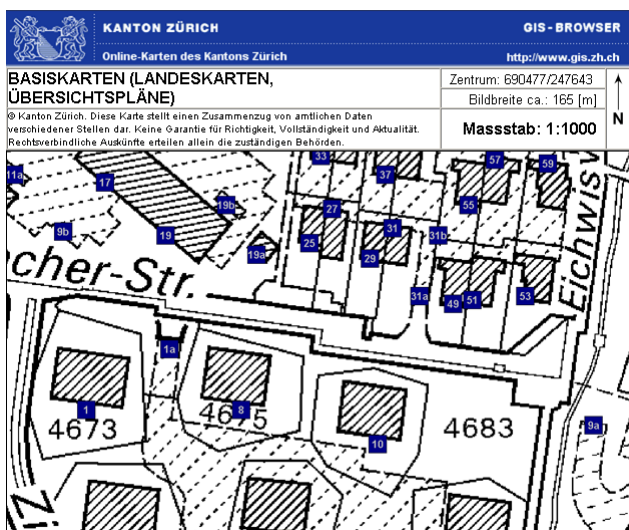


Abb. 3.14: **1. Schritt:** Geeignete Karte in die Zwischenablage kopieren (z.B. mit Printscreen von einem GIS-Browser wie [www.gis.zh.ch](http://www.gis.zh.ch))

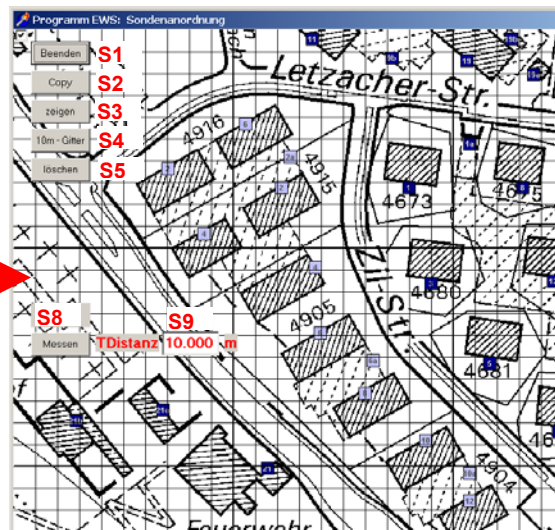


Abb. 3.15: **2. Schritt:** Mit der mittleren Maustaste (Rad) irgendwo in das Blatt „Sondenanordnung“ klicken. Zwischenablage wird eingefügt.

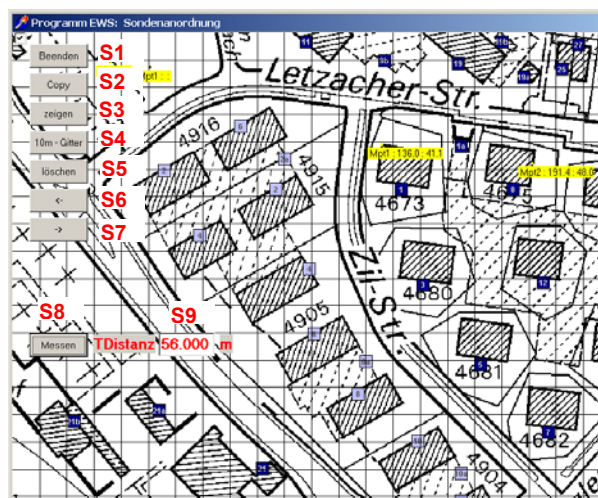


Abb. 3.16: **3. Schritt,** Gitternetz skalieren: Auf der Karte 2 markante Punkte auswählen, Distanz bestimmen und in Feld **S9** eingeben. Anschliessend beide Messpunkte mit Maus auf Karte anwählen und durch Klicken mit der Maus irgendwo auf Blatt abschliessen.

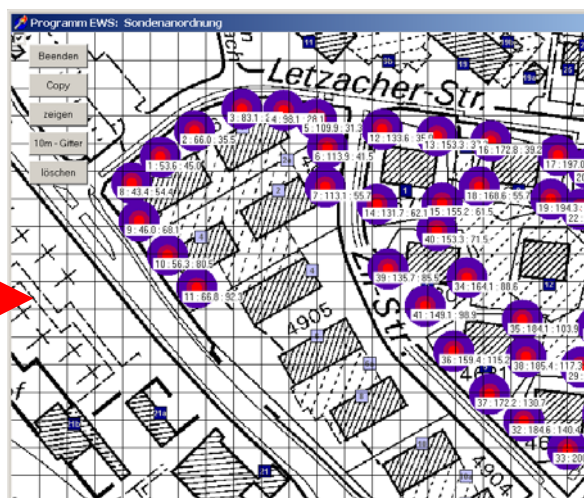


Abb. 3.17: **4. Schritt:** Kartengrösse mit Taste **S6** und **S7** auf die gewünschte Grösse skalieren und Sonden gemäss Beschreibung Kapitel 3.3.1 eingeben. **Achtung:** Sobald Erdwärmesonden angewählt sind, kann die Karte nicht mehr angepasst werden.

### 3.3.3 Optimieren von Sondenfeldern

An einem Beispiel mit 5 x 10 Sonden soll das Vorgehen beim Optimieren von Sondenfeldern dargestellt werden. Die Sonden mit dem grössten Ertrag zeigen eine blaue Farbe, die Sonden mit geringerem Ertrag (im Zentrum des Feldes, wo die Wärme schlecht nachfliessen kann) sind aussen violett und innen stark rot. Mit Hilfe der grafischen Darstellung der g-functions mit der **Taste 1.12** wird der Unterschied sofort sichtbar: Durch das einfache Versetzen der 4 innersten Sonden kann die g-function des Sondenfeldes um 8% gesenkt werden. Dies bedeutet, dass die Bohrlochtemperatur im Gleichgewichtszustand im rechten Beispiel 8% weniger stark sinkt als links.

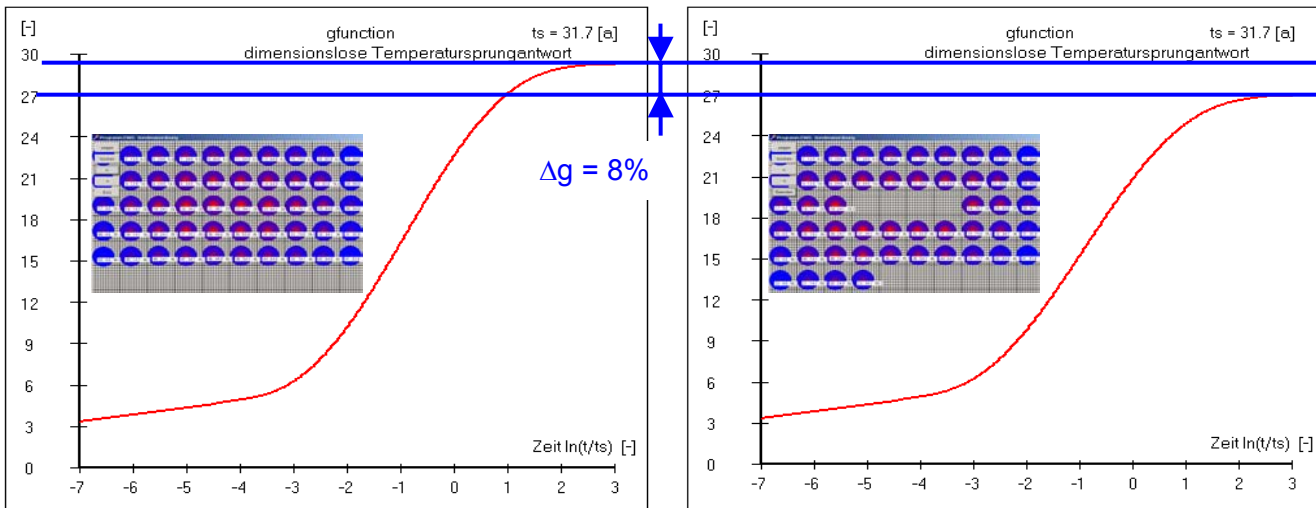


Abb. 3.18: Vergleich von 2 Anordnungen mit je 50 Sonden à 100m Bohrtiefe und 10m Abstand.

### 3.4 Berechnung Einzelsonde im Sondenfeld

Wurde das Sondenfeld entsprechend der Beschreibung in Kapitel 3.3 definiert, so besteht auch die Möglichkeit, die g-function einer Einzelsonde im Sondenfeld zu berechnen (cf. Abb. 3.19)

ln(t/ts)	g-function	Key
0	9.895	1.17
+2	11.263	1.18
+3	11.409	1.19
Einzelsonde Nr. xy berechnen? (0=alle)	2	1.23

Abb. 3.19: Berechnung einer Einzelsonde im Sondenfeld.

### 3.5 Blatt "Sole"

Im Blatt "Sole" werden Angaben zum Fluid und zu der Sonden hinterfüllung eingesetzt.

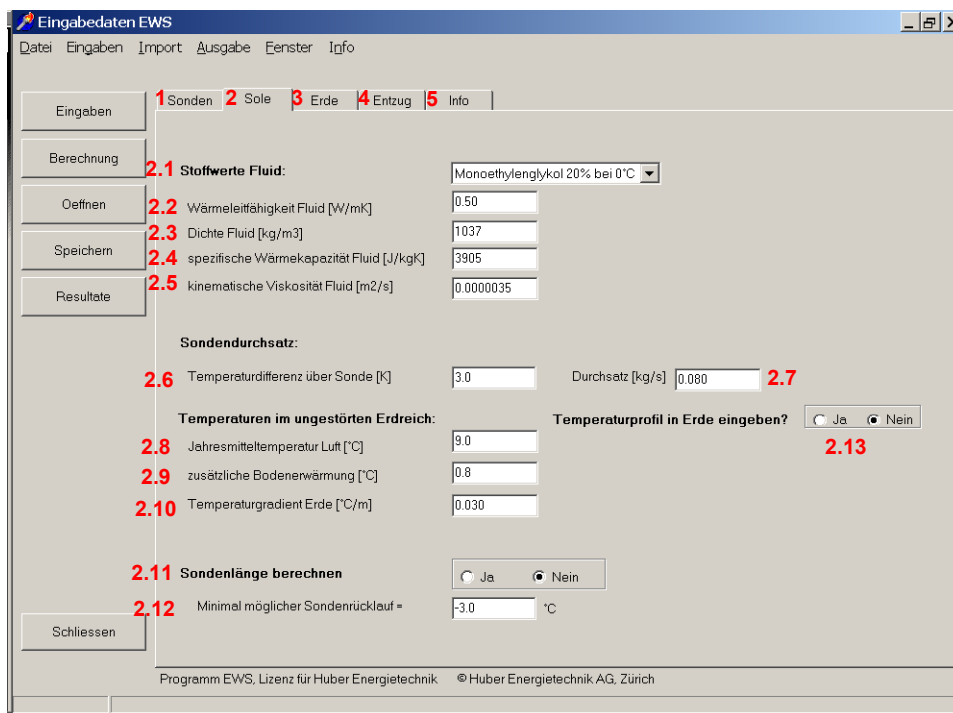


Abb. 3.20: Blatt „Sole“.

**Feld 2.1** Durch die Auswahl des Sondenfluids werden die übrigen Daten zu der Leitfähigkeit, Dichte, spezifischen Wärmekapazität und kinematischen Viskosität des Fluids automatisch eingefügt. Wird ein nicht aufgeführtes Sondenfluid verwendet, besteht die Möglichkeit, in Feld 2.1 den letzten Auswahlpunkt "nicht definiert" anzuwählen und die Werte der **Felder 2.2 bis 2.5** manuell einzugeben.

**Felder 2.6/2.7** Der Auslegungsmassenstrom (**Sondendurchsatz durch alle Sonden zusammen**) wird in **Feld 2.7** eingegeben. Als Alternative zum Sondendurchsatz kann in **Feld 2.6** auch die Temperaturdifferenz zwischen Sondenvor- und Sondenrücklauf eingegeben werden. Bei diesem Feld handelt es sich um eine reine Eingabehilfe, die für die Berechnung nicht verwendet wird. Wird Feld 2.6 angepasst so berechnet das Programm mit Hilfe der Beziehung

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T \cdot c_p} \tag{Gl. 3.1}$$

den Sondendurchsatz in **Feld 2.7** aus der Entzugsleistung Q (**Feld 4.4**), der Temperaturdifferenz (**Feld 2.6**) und der Wärmekapazität der Sole (**Feld 2.4**) gemäss Gl. 3.1 sofort neu.

Ist andererseits der Sondendurchsatz bekannt, so kann dieser ohne Anpassung des Feldes 2.6 direkt in **Feld 2.7** eingegeben werden. In diesem Fall erfolgt keine automatische Anpassung des Feldes 2.6, da dieser Wert für die Berechnung nicht benötigt wird. Es kann also vorkommen, dass der Wert 2.6 nicht mit dem Wert 2.7 übereinstimmt! Wird andererseits später die Entzugsleistung Q (Feld 4.4) oder die Wärmekapazität cp (Feld 2.4) angepasst, so wird immer sofort der Sondendurchsatz gemäss Gl. 3.1 neu berechnet. Es empfiehlt sich deshalb, in Feld 2.6 immer den korrekten Wert einzugeben, selbst wenn der Sondendurchsatz in Feld 2.7 direkt eingegeben wird.

### 3.5.1 Eingabe der unbeeinflussten Erdreichtemperaturen

Für die Eingabe der unbeeinflussten Erdreichtemperatur in Abhängigkeit der Tiefe (= Startbedingung für die Simulation) gibt es 2 Methoden:

1. Angabe der Jahresmitteltemperatur der Luft (**Feld 2.8**), der zusätzlichen Bodenerwärmung (**Feld 2.9**) und des Temperaturgradienten  $\Delta T_{Grad}$  in der Tiefe (**Feld 2.10**). Bei der Jahresmitteltemperatur der Luft ist die Höhenabhängigkeit zu berücksichtigen (Abnahme der Temperatur von ca. 0.47K pro 100m Höhe). Die mittlere Lufttemperatur und die Oberflächenerwärmung werden im Programm einfach addiert. Für den Temperaturgradienten  $\Delta T_{Grad}$ , den geothermischen Wärmestrom aus dem Erdinnern  $\dot{q}_{geo}$  und die Wärmeleitfähigkeit der Erde  $\lambda_{Earth}$  gilt dabei der folgende Zusammenhang:

$$\dot{q}_{geo} = \lambda_{Earth} \cdot \Delta T_{Grad} \quad [W / m^2] \quad \text{Gl. 3.2}$$

2. Direkte Eingabe des Temperaturprofils auf maximal 10 Stützstellen (**Felder 2.15**). Die Oberflächentemperatur wird dabei aus der 1. und 2. Stützstelle und der weitere Verlauf in der Tiefe aus der letzten und zweitletzten Stützstelle linear extrapoliert.

Um von der Methode 1 auf die 2. Methode zu wechseln, muss **Auswahlfeld 2.13** auf „Ja“ gestellt werden. Dann verschwinden die Eingabefelder 2.8 – 2.10 und es erscheinen neu die **Felder 2.15** und der **Button 2.14** („Grafik“). Damit kann das Temperaturprofil dargestellt werden.

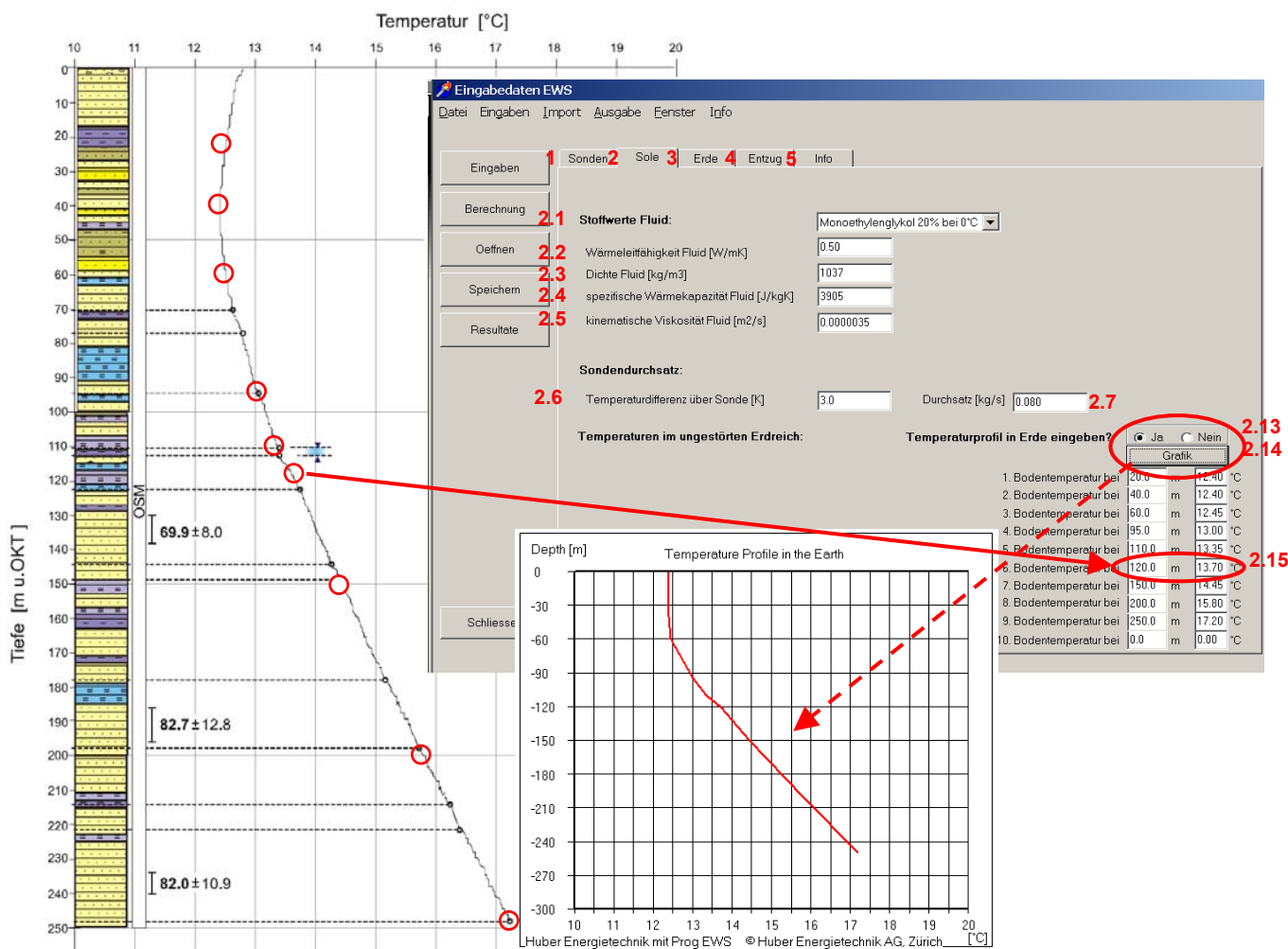


Fig. 3.21: Eingabe des Temperaturprofils der unbeeinflussten Erde aus Messung in der Erdwärmesonde (Messung Dr. U. Schärli / E. Rohner [16]).

### 3.5.2 Automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge

Das Programm EWS ist in der Lage, eine automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge entsprechend der Norm SIA 384/6 [18] durchzuführen. Dazu ist die Simulationsdauer in Feld 4.8 oder Feld 10.15 auf **50 Jahre** zu setzen und der minimal mögliche Sondenrücklauf in **Feld 2.12** und die Temperaturdifferenz über die Sonde in **Feld 2.6** so zu setzen, dass der Mittelwert zwischen minimalem Sonden-Vorlauf und Sonden-Rücklauf  $-1.5^{\circ}\text{C}$  beträgt (z.B. minimaler Sondenrücklauf in **Feld 2.12** auf  $-3.0^{\circ}\text{C}$  und Temperaturdifferenz über der Sonde in **Feld 2.6** auf 3.0 K setzen). Um die automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge zu starten, ist das **Auswahlfeld 2.11** auf „Ja“ zu setzen und die Berechnung mit dem Button „Berechnung“ zu starten. Das Programm EWS berechnet nun die minimale Sondenlänge, mit der die formulierten Bedingungen eingehalten werden können. Die notwendige Sondenlänge kann nach der Berechnung nun im **Feld 1.4** ausgelesen werden.

### 3.6 Blatt "Info"

Dieses Blatt dient dazu, Projekt, Varianten und Ersteller näher zu spezifizieren sowie weitere Anmerkungen einzufügen.

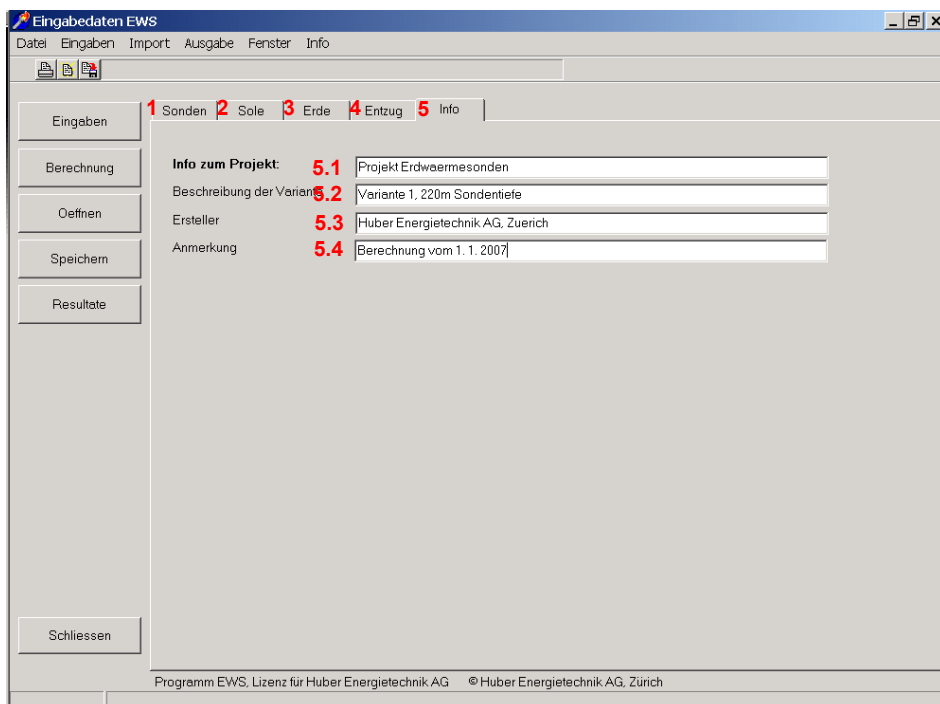


Abb. 3.22: Blatt „Info“.

### 3.7 Blatt "Erde"

Auf dem Blatt "Erde" werden die Stoffwerte der Erde und der Sonden hinterfüllung angegeben. Zudem wird festgelegt, mit wie vielen, horizontalen Schichten im Erdreich gerechnet wird (3.1, maximal 10). Die thermischen Bohrlochwiderstände  $R_b$  und  $R_a$  können direkt eingegeben werden. Falls diese nicht bekannt sind, können sie aus der Bohrlochgeometrie und den Stoffwerten der Hinterfüllung mit 2 Methoden berechnet werden (cf. Kapitel 5.6).

#### 3.7.1 Grundeingaben

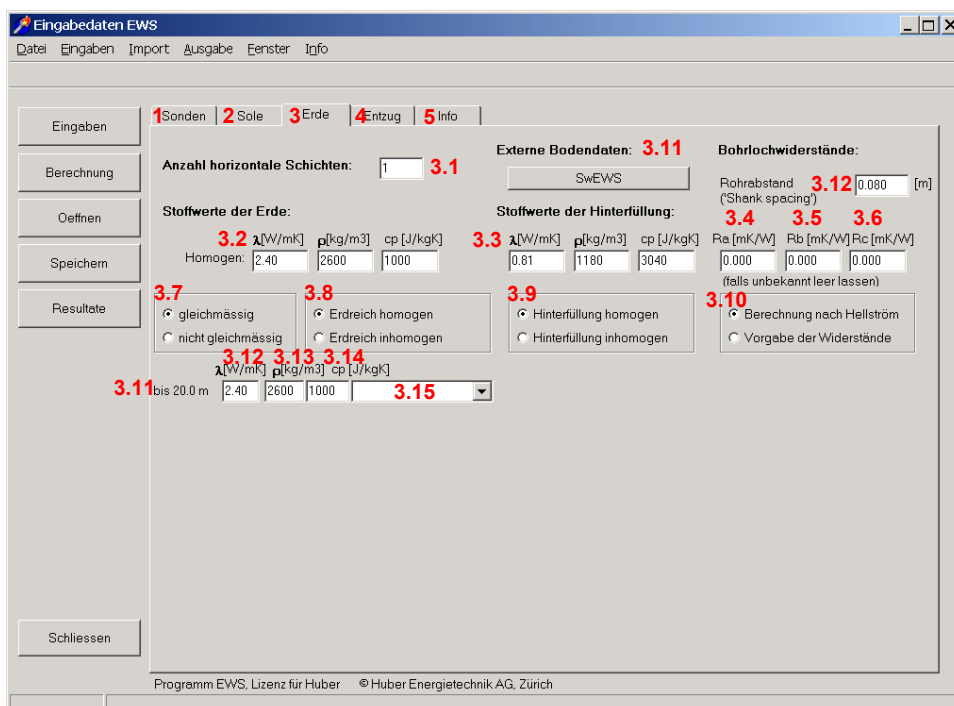


Abb. 3.23: Blatt „Erde“ (mit einer einzigen horizontalen Schicht).

3.1 Zunächst muss vom Programm benutzer festgelegt werden, mit wie vielen horizontalen Schichten im Erdreich gerechnet werden soll. Für die Berechnung werden gleichmässige Schichtabstände verwendet. Die Berechnung mit nur einer horizontalen Schicht (und durchschnittlichen Stoffwerten über die ganze Bohrtiefe) liefert kürzere Rechenzeiten, aber etwas ungenauere Resultate (numerische Auflösung im Rechengitter). Für eine Grobauslegung und bei Sonden bis 100m Bohrtiefe ist dies aber oft ausreichend.

Das Programm EWS rechnet aus numerischen Gründen intern selbst dann mit gleichmässigen Schichtabständen, wenn in Feld 3.7 ein nicht gleichmässiger, geologischer Schichtabstand angewählt wurde (nur in der Vollversion des Programms möglich). Für die numerischen Rechenschichten werden dann die Stoffwerte aus dem ungleichmässigen, geologischen Schichtaufbau (Felder 3.11-3.15) pro Rechenschicht arithmetisch gemittelt. Diese Mittelung wird vor jedem Rechengang neu durchgeführt, so dass der Benutzer in diesem Fall selbst bei einer Variation der Bohrtiefe keine Anpassungen beim geologischen Schichtaufbau mehr vornehmen muss.

**3.2** „homogene Stoffwerte“ der Erde: Falls in **Feld 3.7** gleichmässige Schichtabstände und in **Feld 3.8** „Erdreich homogen“ angewählt wurde, so können in den **Eingabefeldern 3.2** die Mittelwerte der Stoffeigenschaften über die ganze Bohrtiefe eingegeben werden ( Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK], Dichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], spezifische Wärmekapazität  $c_p$  [J/kgK] ). Diese Werte werden dann vom Programm in die **Felder 3.12 – 3.14** automatisch übertragen. Das Programm rechnet intern immer mit den Werten in den Feldern 3.12 – 3.14. Werden nachträglich die Werte in den Feldern 3.12 – 3.14 angepasst, so kann es vorkommen, dass diese Werte nicht mehr mit den Feldern 3.2 übereinstimmen. In diesem Fall werden die Eingaben aus den Feldern 3.2 ignoriert und bei der nächsten Neuberechnung angepasst.

Ausserdem berechnet das Programm EWS bei jedem Rechengang den arithmetischen Mittelwert der Stoffwerte aus den Feldern 3.12 - 3.14 über die Bohrtiefe (Eingabe aus **Feld 1.4**) und zeigt diese Werte nach jedem Rechengang neu an.

Bei den Feldern 3.2 handelt es sich somit einerseits um eine Eingabenhilfe und andererseits ein Ausgabefeld mit der Information über den Mittelwert der Stoffwerte über die ganze Bohrtiefe. In keinem Fall wird mit diesen Werten direkt weitergerechnet.

**3.3** Falls in **Feld 3.9** „Hinterfüllung homogen“ angewählt wurde (was in der Regel der Fall ist), oder nur mit einer horizontalen Schicht gerechnet wird (Feld 3.1 = 1), so können in den **Eingabefeldern 3.3** die Stoffeigenschaften der Bohrlochhinterfüllung eingegeben werden ( Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK], Dichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], spezifische Wärmekapazität  $c_p$  [J/kgK] ). Die Stoffeigenschaften der Hinterfüllung werden zur Berechnung der thermischen Bohrlochwiderstände  $R_a$  und  $R_b$  verwendet (cf. Kapitel 5.6).

**3.4 – 3.6** In den Feldern 3.4 – 3.6 sind die **Bohrlochwiderstände  $R_a$ ,  $R_b$  und  $R_c$**  zu finden. Für die Definitionen der Widerstände  $R_a$ ,  $R_b$  und  $R_c$  sei auf Kap. 5.6. verwiesen.

In der Default-Einstellung des Programms werden die Bohrlochwiderstände mit den Formeln von Hellström (cf. Kapitel 5.6, Auswahl in **Feld 3.10**) berechnet. In diesem Fall werden die Eingaben in den Feldern 3.4 – 3.6 ignoriert (es ist also **keine Eingabe notwendig**) und die Bohrlochwiderstände vor jedem Rechengang mit den Gleichungen von Hellström (Kapitel 5.6) aus den Stoffwerten (**Feld 3.3**), dem Sondendurchsatz im Auslegungsfall (**Feld 2.7**) und dem Rohrabstand der Sondenrohre im Bohrloch (**Feld 3.12**) neu berechnet. Die berechneten Werte für  $R_a$ ,  $R_b$  und  $R_c$  werden nach jedem Rechengang neu in den Feldern 3.4 – 3.6 angezeigt.

Wird in **Feld 3.10** „Vorgabe der Widerstände“ angewählt, so können der interne Bohrlochwiderstand  $R_a$  (**Feld 3.4**) und der Bohrlochwiderstand  $R_b$  (**Feld 3.5**) frei eingegeben werden.  $R_c$  (**Feld 3.6**) **muss** in diesem Fall **Null gesetzt** werden. Wird in  $R_c$  (Feld3.6) trotzdem ein Wert eingesetzt, so wird  $R_b$  mit Gl. 5.30 neu berechnet und damit die Eingabe überschrieben. Da  $R_a$  und  $R_b$  von der Fliessgeschwindigkeit des Sondenfluids abhängen (über den Wärmübergangswert  $\alpha$ ), werden  $R_a$  und  $R_b$  (nicht aber  $R_c$ ) bei einer Anpassung des Sondendurchsatzes (**Feld 2.7**) auf Null gesetzt und mit dem aktuellen Durchsatz mit Gl. 5.30 neu berechnet. Der exakte Rechengang und alle möglichen Eingabevarianten sind in [5] beschrieben.



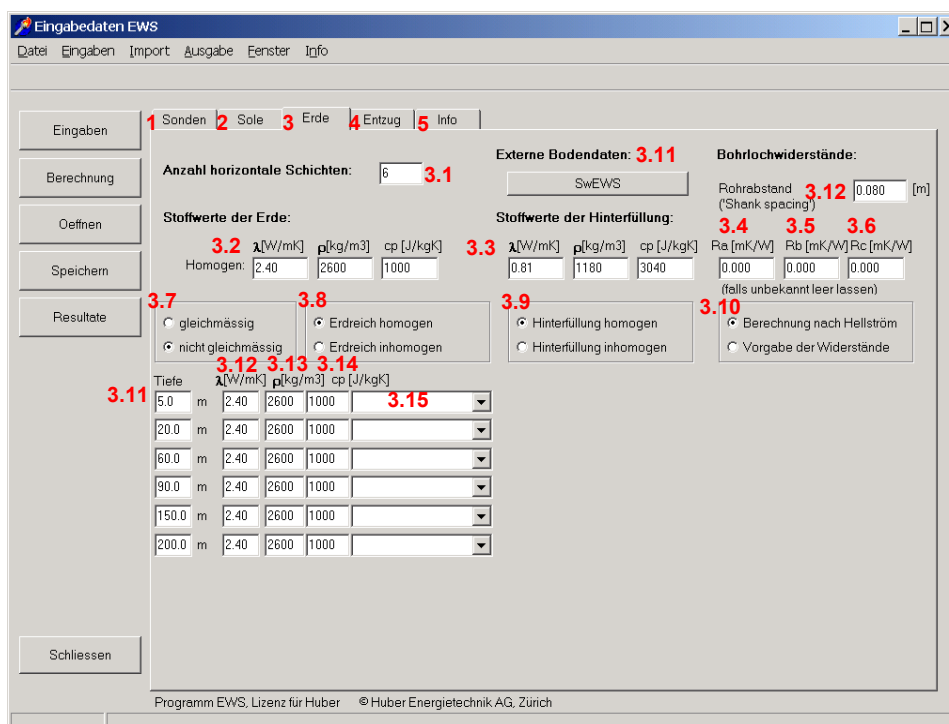
**3.10 / 3.12:** Falls in **Feld 3.10** die Berechnungsart nach Hellström gewählt wird, muss in den **Feldern 3.4 - 3.6** kein Wert für die thermischen Widerstände eingegeben werden, da diese im nächsten Rechengang vom Programm selber berechnet werden. Bei der Berechnungsart nach Hellström ist jedoch in **Feld 3.12** der Rohrabstand des hinaufströmenden zum hinunterströmenden Fluid (shank spacing) einzugeben (siehe Kap. 3.2.2). Üblicherweise kann für den Rohrabstand der vorgeschlagene Default-Wert verwendet werden. Dabei wird der Rohrabstand aus dem Bohrdurchmesser und dem Sondendurchmesser berechnet, unter der Annahme dass die Sondenrohre eher nahe am Bohrlochrand liegen. Bei einer nachträglichen Anpassung der Bohrdurchmessers wird der Rohrabstand allerdings nicht automatisch neu angepasst.

**3.11** Mit dem **Button 3.11** können Stoffwerte aus dem Schweizer Molassebecken, die mit dem Programm SwEWS [11] erzeugt wurden, in das Programm EWS eingelesen werden.

**Achtung:** Immer zuerst die Anzahl Schichten (**Feld 3.1**) eingeben, bevor die Stoffdaten von SwEWS eingelesen werden.

### 3.7.2 Eingabe mehrerer horizontaler Schichten

Mit der Wahl der Schichtanzahl > 1 (**Feld 3.1**) wird das Erdreich in die entsprechende Anzahl horizontale Schichten unterteilt (Abb. 3.24). Es können maximal 10 horizontale Schichten definiert werden. Falls in **Feld 3.7** „gleichmässig“ gewählt wird, sind die Schichten äquidistant. Um Schichten mit unterschiedlicher Dicke einzugeben, muss die Option „nicht gleichmässig“ in **Feld 3.7** selektiert werden (**nur in Vollversion möglich**). Die gewählte Anzahl geologischer Schichten entspricht der Anzahl der numerischen Rechenschichten, wobei diese immer gleichmässig über die Bohrtiefe verteilt sind. Die Tiefe der letzten, geologischen Schicht muss immer >= der Bohrtiefe sein.



**Abb. 3.24: Blatt „Erde“ mit 6 horizontalen Schichten von unterschiedlicher Schichtdicke.**

**Achtung:** Die Tiefe gibt nicht die Schichtdicke, sondern das untere Ende der jeweiligen Schicht unter der Oberfläche (Bohrtiefe) an.

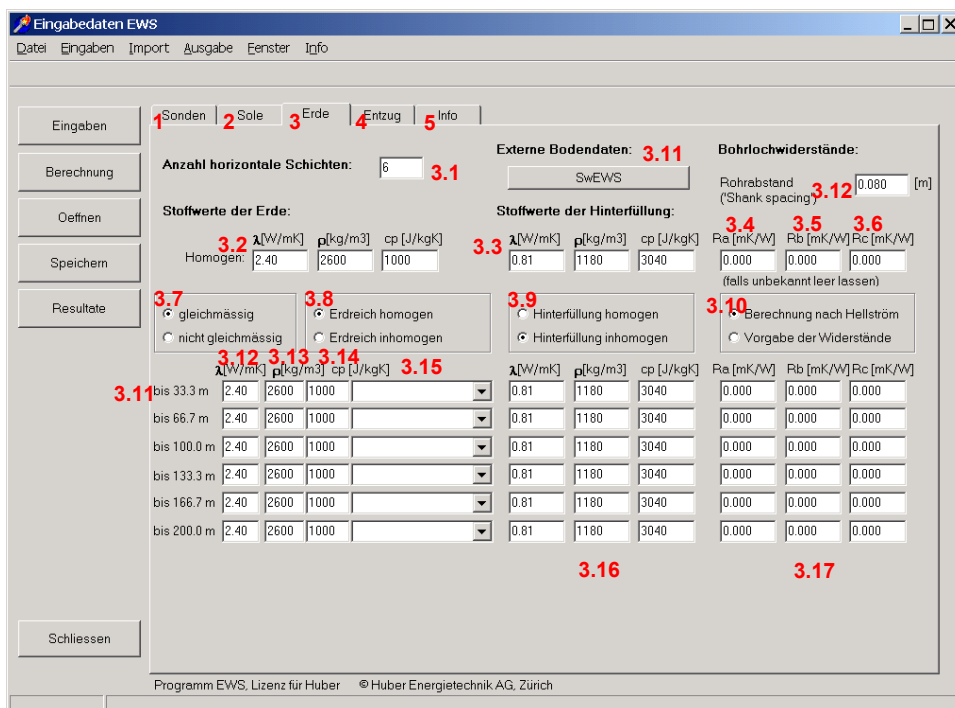
Für jede Schicht können nun verschiedene Stoffwerte für das Erdreich eingegeben werden. Es können auch Schichten eingegeben werden, die tiefer als die Erdsonde liegen. Diese werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt, solange die Erdsonde diese Schichten nicht erreicht. Deshalb wird empfohlen, die gesamte, bekannte Geologie einzutragen. So wird auch bei einer nachträglichen Verlängerung der Erdsonde mit den richtigen Stoffwerten gerechnet.

Wenn auch die Hinterfüllung horizontal unterschiedliche Stoffwerte aufweisen soll, so kann im **Feld 3.9** „Hinterfüllung inhomogen“ angewählt werden. Diese Option ist nur möglich, falls die Schichten äquidistant aufgeteilt sind, d.h. in **Feld 3.7** „gleichmässig“ gewählt wurde. Es erscheinen dann für die gleiche horizontale Unterteilung wie bei den Erdschichten zusätzliche Zeilen zur Eingabe der Stoffwerte der Hinterfüllung (**Felder 3.16**) sowie der Bohrlochwiderstände (**Felder 3.17**). Als Default-Werte werden die Stoffwerte aus Feld 3.3 bzw. 3.4-3.6 übernommen.

**3.16** Die Stoffwerte der horizontalen Hinterfüllungsschichten können direkt in die Zellen eingegeben werden.

**3.17** Für die Eingabe der Bohrlochwiderstandswerte  $R_a$ ,  $R_b$  und  $R_c$  sind die analogen Punkte wie die Eingabe der Felder 3.4 - 3.6 in Kapitel 3.7.1 zu beachten.

**3.4 – 3.6** Nach der Durchführung jeder Berechnung werden in **Feld 3.3 - 3.6** die arithmetischen Mittelwerte der Felder 3.16 - 3.17 angezeigt.



**Abb. 3.25: Blatt „Erde“ mit zusätzlich inhomogener Hinterfüllung.**

### 3.7.3 Eingabe der Stoffwerte für die Erde

Für jede horizontale Erdschicht erscheint eine Zeile mit den einzugebenden Stoffwerten. Die Stoffwerte können entweder direkt eingegeben werden (Feld 3.12 - 3.14), oder es können im Pull-down-Menü Gesteinsarten mit hinterlegten Stoffwerten ausgewählt werden (siehe Abb. 3.26).

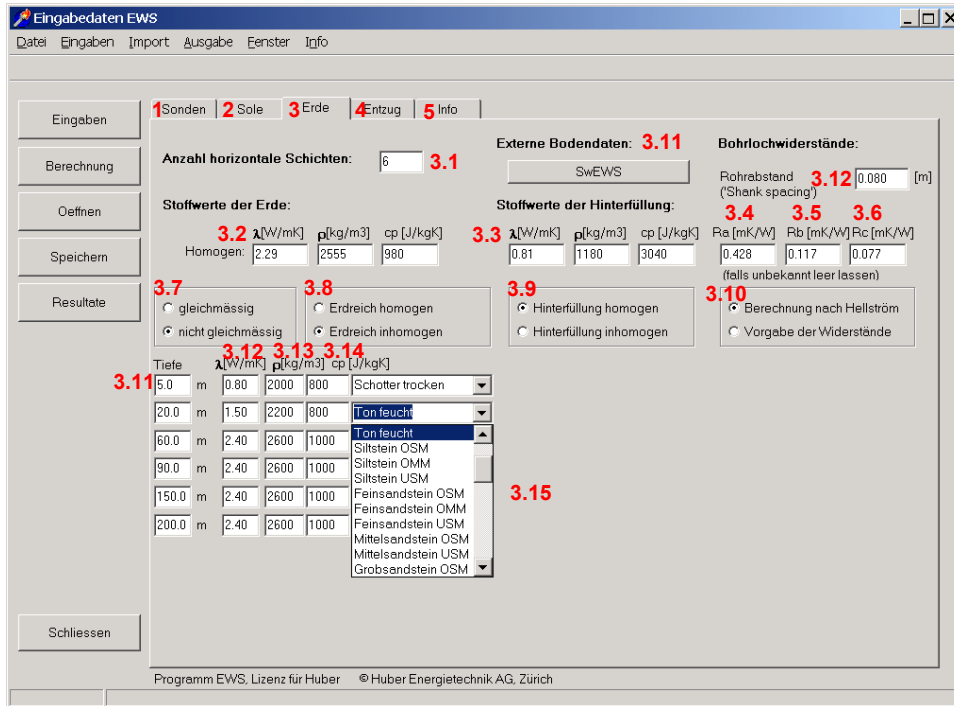


Abb. 3.26: Blatt „Erde“ mit Pull-down - Menü zur Auswahl der Gesteinsart für jede Erdschicht.

Auch die Eingabe eigener Gesteinsbezeichnungen ins Pull-down-Feld 3.15 ist möglich (Abb. 3.27).

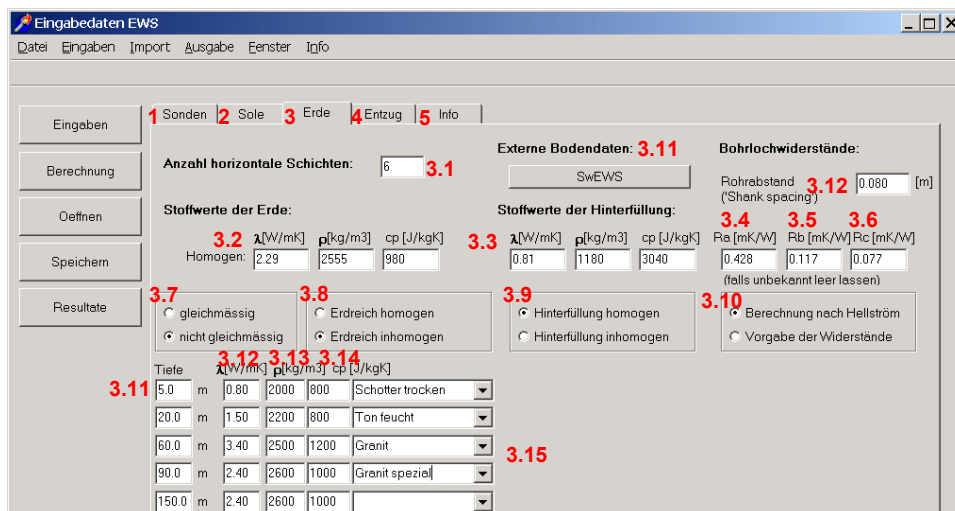


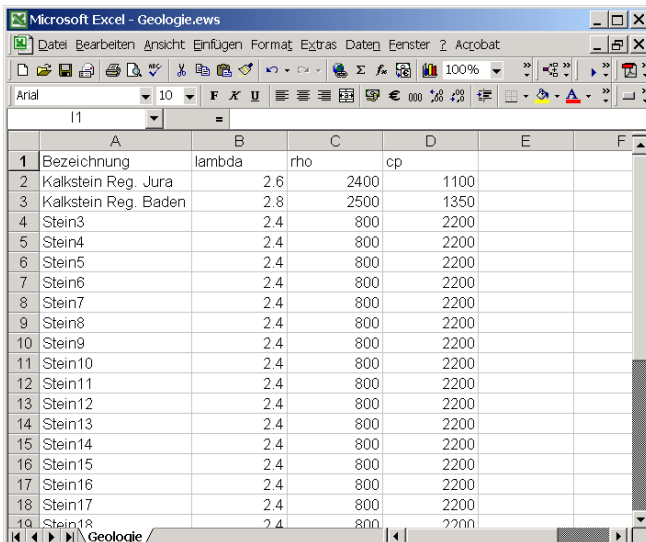
Abb. 3.27: Blatt „Erde“, Gesteinsbezeichnung und Eingabe von eigenen Stoffwerten.

### 3.7.4 Erstellen einer eigenen Bibliothek von Stoffwerten

Jeder Benutzer des Programms EWS kann eine eigene Bibliothek mit 30 verschiedenen Gesteinsarten und den entsprechenden Stoffwerten selbst erstellen, die dann bei jedem Programmstart automatisch eingelesen werden und im **Pulldown 3.15** erscheinen. Dazu erstellt man in Excel eine Tabelle der Gesteinsarten und Stoffwerte (siehe Abb. 3.28). Die Gesteinsarten müssen direkt nach der Kopfzeile in die Zeilen 2-31 eingetragen werden. In die 1. Spalte kommt die Gesteinsbezeichnung, in die 2. Spalte deren  $\lambda$ -Wert, in die 3. Spalte der entsprechende  $\rho$ -Wert und in die 4. Spalte die Wärmekapazität des Gesteins. Im Beispiel wurden zwei verschiedene Kalksteintypen (Region Jura und Region Baden) eingetragen. Die Tabelle muss als **Text-Datei (.txt)** im **selben Ordner wie das EWS Programm** unter dem Namen „Geologie.txt“ gespeichert und dann in den Namen „**Geologie.ews**“ umbenannt werden. Nun stehen die in der Tabelle eingetragenen Gesteinsarten im Pull-Down-Menü zur Auswahl (siehe Abb. 3.29).

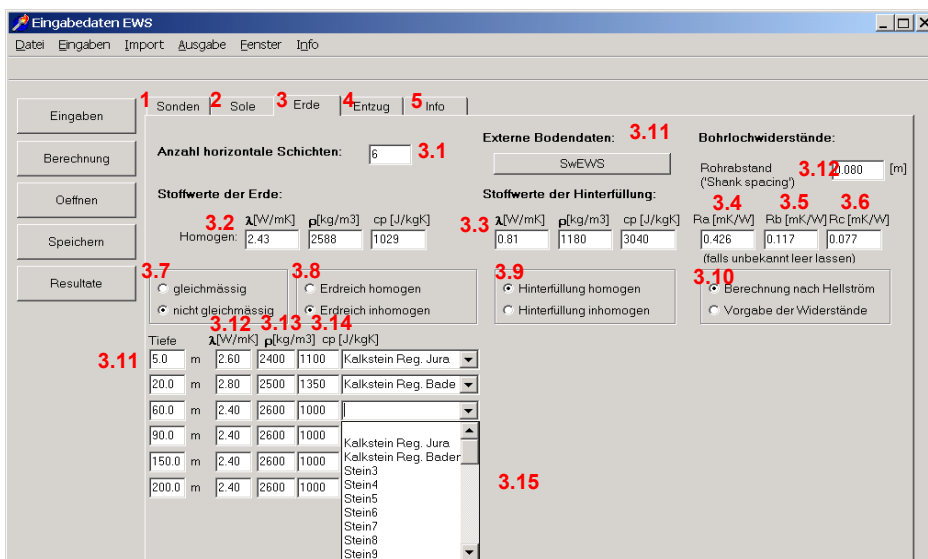
**Achtung:** Programm EWS akzeptiert nur den Dezimalpunkt (kein Komma).

**Tipp:** Windows Ländereinstellung auf Deutsch(Schweiz) umstellen.



	A	B	C	D	E	F
1	Bezeichnung	lambda	rho	cp		
2	Kalkstein Reg. Jura	2.6	2400	1100		
3	Kalkstein Reg. Baden	2.8	2500	1350		
4	Stein3	2.4	800	2200		
5	Stein4	2.4	800	2200		
6	Stein5	2.4	800	2200		
7	Stein6	2.4	800	2200		
8	Stein7	2.4	800	2200		
9	Stein8	2.4	800	2200		
10	Stein9	2.4	800	2200		
11	Stein10	2.4	800	2200		
12	Stein11	2.4	800	2200		
13	Stein12	2.4	800	2200		
14	Stein13	2.4	800	2200		
15	Stein14	2.4	800	2200		
16	Stein15	2.4	800	2200		
17	Stein16	2.4	800	2200		
18	Stein17	2.4	800	2200		
19	Stein18	2.4	800	2200		

Abb. 3.28: Exel-Datenblatt mit eingefügten Gesteinsarten.



**Eingabedaten EWS**

1 Sonden 2 Sole 3 Erde 4 Entzug 5 Info

Anzahl horizontale Schichten: 6 **3.1**

Stoffwerte der Erde:

Homogen:	<b>3.2</b> $\lambda$ [W/mK]: 2.43	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]: 2588	cp [J/kgK]: 1029
----------	-----------------------------------	-----------------------------------	------------------

Stoffwerte der Hinterfüllung:

<b>3.3</b> $\lambda$ [W/mK]: 0.81	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]: 1180	cp [J/kgK]: 3040
-----------------------------------	-----------------------------------	------------------

Externe Bodendaten: **3.11** SwEWS

Bohrlochwiderstände:

Rehrabstand ("Shank spacing") **3.12** 2.080 [m]

**3.4** Ra [mK/W]: 0.426 **3.5** Rb [mK/W]: 0.117 **3.6** Rc [mK/W]: 0.077

(falls unbekannt leer lassen)

**3.7**  gleichmässig **3.8**  Erdreich homogen **3.9**  Hinterfüllung homogen **3.10**  Berechnung nach Hellström

nicht gleichmässig  Erdreich inhomogen  Hinterfüllung inhomogen  Vorgabe der Widerstände

Tiefe **3.11** **3.12** **3.13** **3.14** **3.15**

Tiefe	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	cp [J/kgK]	
5.0 m	2.60	2400	1100	Kalkstein Reg. Jura
20.0 m	2.80	2500	1350	Kalkstein Reg. Bade
60.0 m	2.40	2600	1000	
90.0 m	2.40	2600	1000	
150.0 m	2.40	2600	1000	Kalkstein Reg. Jura Kalkstein Reg. Bader
200.0 m	2.40	2600	1000	Stein3 Stein4 Stein5 Stein6 Stein7 Stein8 Stein9

Abb. 3.29: Blatt „Erde“ mit selbst erstellter Auswahl an Gesteinsarten.

### 3.8 Blatt "Entzug"

Auf dem Blatt "Entzug" wird das Lastprofil für die Erdwärmesonde eingegeben (cf. Abb. 3.30).

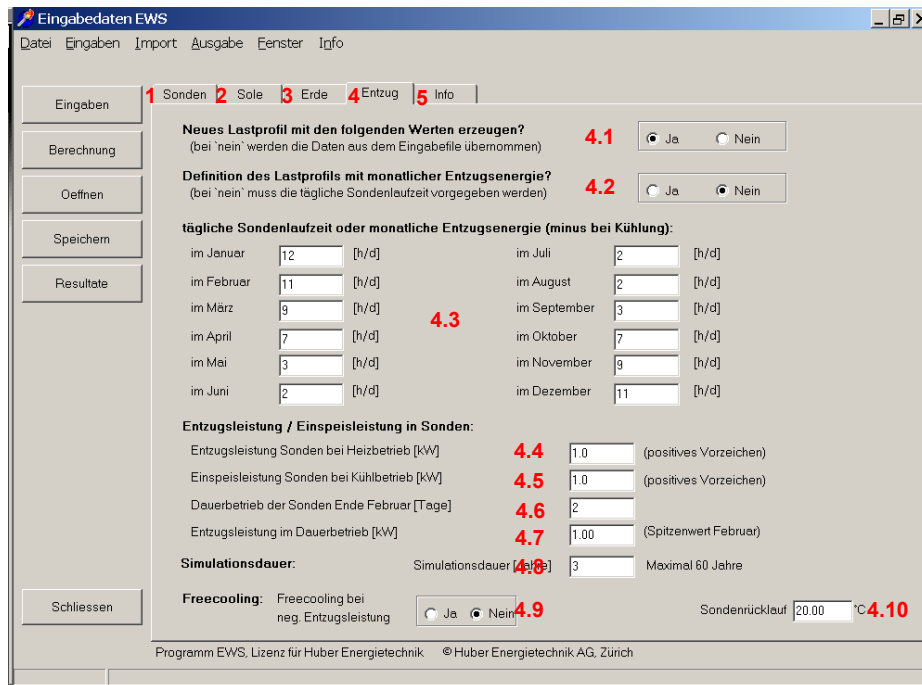


Abb. 3.30: Blatt „Entzug“ mit Eingabe der täglichen Sondenlaufzeiten.

- 4.1 Wird bei der Frage "Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen" mit "Ja" geantwortet, so muss im Folgenden ein Lastprofil eingegeben werden. Bei "Nein" werden Default-Werte des Programms übernommen und eine eigene Eingabe des Lastprofils erübrigt sich.
- 4.2 Bei der Eingabe des Lastprofils kann zwischen der Eingabe von täglichen Sondenlaufzeiten und von monatlichen Lastentzugsenergien ausgewählt werden.
- 4.3 Wird in Feld 4.2 "nein" ausgewählt, so müssen in Feld 4.3 die täglichen Sondenlaufzeiten (je pro Monat unterschieden) eingegeben werden. Wird eine Erdwärmesonde zur Kühlung benutzt, d. h. Wärme der Sonde zugeführt, so müssen die Sondenlaufzeiten in den entsprechenden Monaten mit einem Minuszeichen versehen werden
- 4.11 Wird in Feld 4.2 "ja" ausgewählt, so müssen in Feld 4.11 (cf. Abb. 3.31) die monatlichen Entzugsenergien eingegeben werden. Auch bei dieser Option müssen Kühllasten mit einem Minuszeichen versehen werden.
- 4.4 Bei einer Nutzung der Sonde für Heizzwecke wird die Entzugsleistung der Sonde mit einem positiven Vorzeichen eingetragen. Wird die Entzugsleistung verändert, so wird in Feld 2.7 (im Blatt „Sole“) der Sondendurchsatz entsprechend angepasst (cf. Beschreibung unter Feld 2.6/2.7).
- 4.5 Bei einer Nutzung der Sonde für Kühlzwecke wird die Einspeisleistung der Sonde ebenfalls mit einem positiven Vorzeichen eingetragen.

4.6/4.7 Soll die maximale Belastung der Erdwärmesonde für Heizzwecke simuliert werden, so kann in Feld 4.6 die Dauer (Anzahl Tage) eingegeben werden, während der die Sonden Ende Februar (kälteste Jahreszeit) im Dauerbetrieb laufen, sowie in Feld 4.7 die Entzugsleistung während dieser Zeit (entspricht üblicherweise der Entzugsleistung unter Feld 4.4).

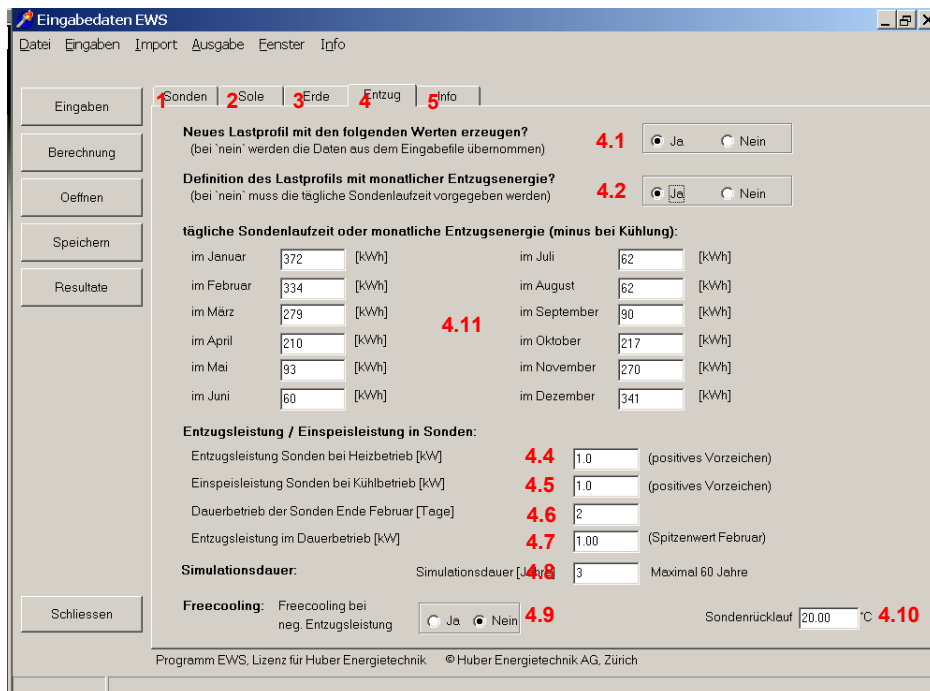


Abb. 3.31: Blatt „Entzug“ mit Eingabe der monatlichen Entzugsenergie.

### 3.9 Blatt "Lastprofil"

Als Alternative zum Blatt „Entzug“ (Kapitel 3.8), bei dem die Sondenbelastung direkt eingegeben werden muss, kann **in der Vollversion** des Programms EWS auch das Blatt „Lastprofil“ verwendet werden. Auf dem Blatt „Lastprofil“ wird die benötigte, monatliche Endenergie definiert und mit Hilfe der COP-Werte vom Programm direkt in eine Sondenbelastung umgerechnet. Dazu wird zunächst in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Eingaben“ das Blatt „Lastprofil“ angewählt (cf.

Abb. 3.31). Das Blatt „Lastprofil“ kann nicht mit dem Blatt „Wärmepumpe“ kombiniert werden.

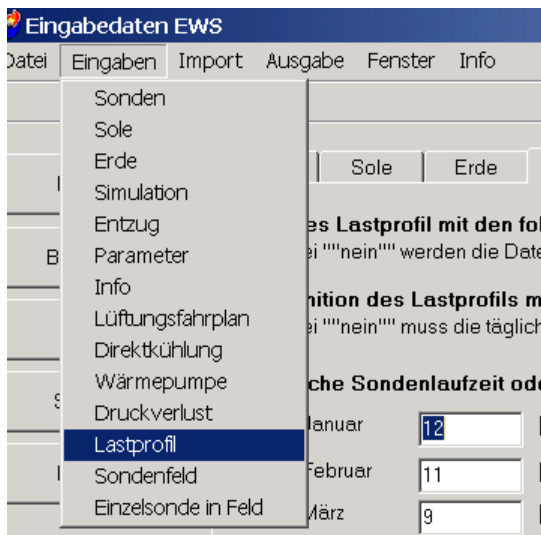


Abb. 3.32: Öffnen des Blatts „Lastprofil“ (nur in Vollversion).

Darauf erscheint das Blatt „Lastprofil“ (Abb. 3.33) und das Blatt „Entzug“ wird ausgeblendet.

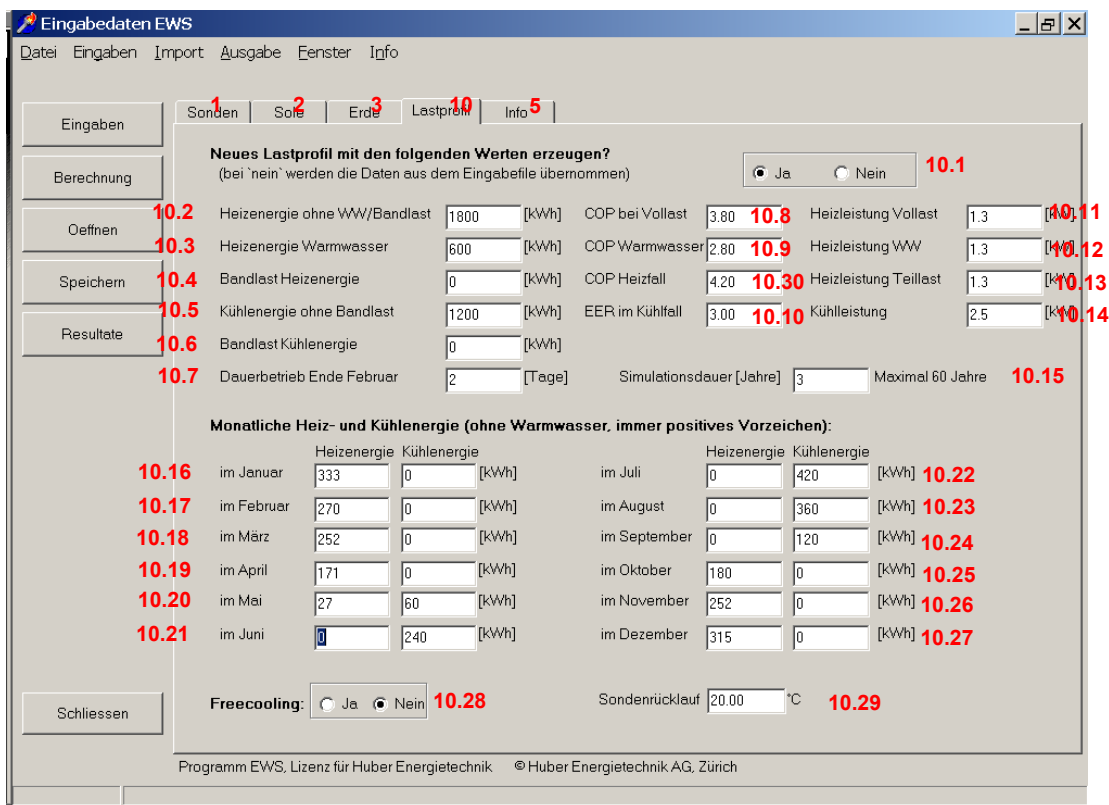
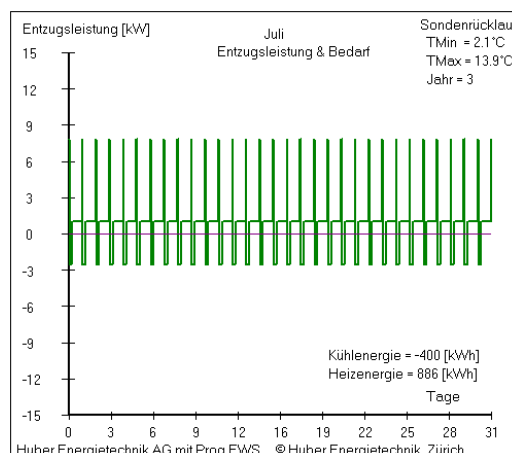


Abb. 3.33: Blatt „Lastprofil“ mit Eingabe des monatlichen Endenergiebedarfs.

Auf dem Blatt „Lastprofil“ wird der monatlichen Heiz- und Kühlenergiebedarf definiert. Im Gegensatz zum Blatt „Entzug“ sind auf dem Blatt „Lastprofil“ sowohl der Heizenergie- als auch der Kühlenergiebedarf in kWh mit **positivem Vorzeichen** einzugeben. Das Programm EWS berechnet aus dem Lastprofil, unter Berücksichtigung der COP und der Heiz- und Kühlleistung ein taktendes Lastprofil. Davon ausgenommen ist die Bandlast (**10.4** und **10.6**), die unabhängig von der installierten Heiz- und Kühlleistung ins Lastprofil einfließt. Im Heizfall wird die Sondenbelastung um die Kompressorleistung reduziert, die sich aus dem COP berechnet. Im Kühlfall wird die Rückkühlleistung um die Kompressorleistung erhöht, die sich aus dem EER berechnet.

Der SONDENDURCHSATZ wird jeweils so gewählt, dass die Temperaturdifferenz in **2.7** eingehalten ist (d.h. variabler SONDENDURCHSATZ).

- 10.1** Wird bei der Frage "Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen" mit "Ja" geantwortet, so wird das Lastprofil aus 10.2 – 10.27 berechnet. Bei "Nein" wird das Lastprofil aus dem Eingabefile übernommen und die Eingaben 10.2-10.29 nicht beachtet.
- 10.7** Dauer des Vollastfalles (Dauerbetrieb) Ende Februar in Tagen.
- 10.8** COP der Wärmepumpe im Auslegungsfall (Vollastfall, **10.11**).
- 10.10** Eingabe des EER der Kältemaschine (= Kälte-COP<sub>C</sub>, d.h. Verhältnis von Kühlenergie zu Stromaufnahme). Wird die Freecooling-Option unter **10.28** angewählt so, so ist hier ein hoher Wert (z.B. 999) einzusetzen.
- 10.11** Leistung im Auslegungsfall, Ende Februar. Die Dauer wird in **10.7** definiert.
- 10.13** Leistung im Teillastfall. Diese Leistung wird so gerundet, dass die Gesamt-Heizenergie in 10.16 – 10.27 eingehalten werden kann.
- 10.15** Dauer der Simulation (maximal 100 Jahre). Ausgewertet wird jeweils das letzte Simulationsjahr.
- 10.28** Bei Auswahl der Freecooling – Option wird die Kühlleistung durch den Sondenrücklauf begrenzt. Eine etwaige Unterdeckung ist auf dem Resultatblatt ersichtlich.
- 10.29** Temperatur des Sondenrücklaufs im Freecooling – Fall. **Achtung:** Rücklauftemperatur in Sonde ist meist tiefer als Rücklauftemperatur des Kühlkreislaufes (wegen Wärmetauscher).
- 10.30** Mittlerer COP im Heizfall (Teillastfall, **10.13**)



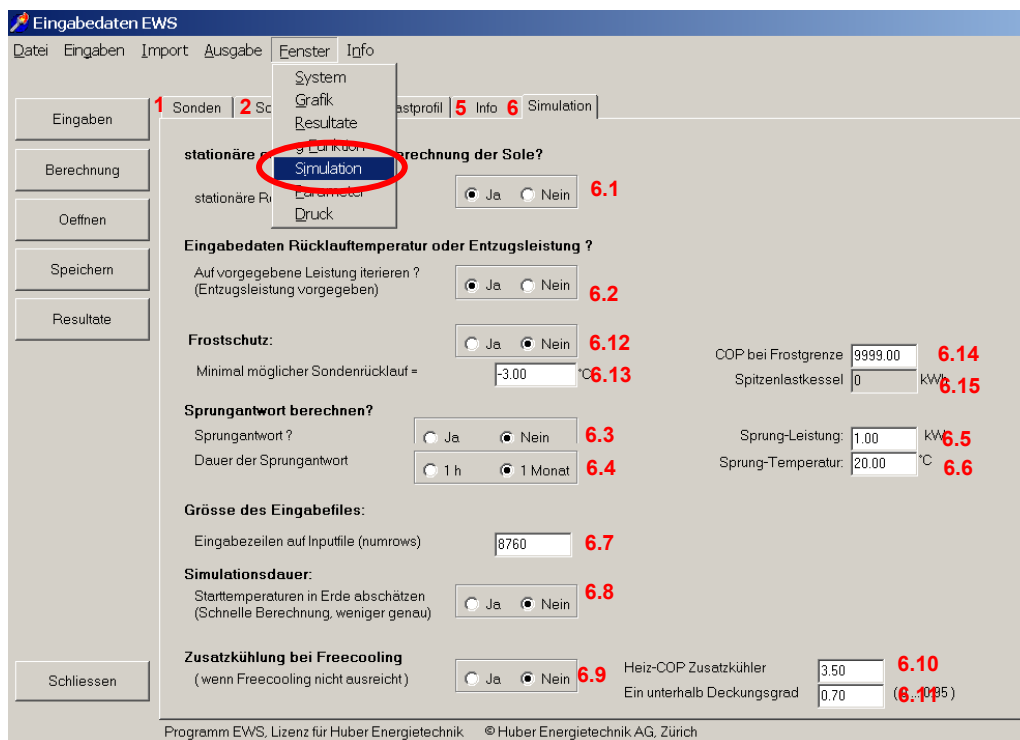
**Abb. 3.34: Taktendes Leistungsprofil, erzeugt mit dem Blatt „Lastprofil“.**



### 3.10 Blatt "Simulation"

#### 3.10.1 Einblenden des Blattes "Simulation"

Um verschiedene, spezielle Berechnungen durchführen zu können, kann das Blatt „Simulation“ eingeblendet werden. Dazu wird zunächst in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ das Blatt „Simulation“ angewählt (cf. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)



**Abb. 3.35: Einblenden des Blattes „Simulation“.**

Auf dem Blatt „Simulation“ können nun die folgenden, speziellen Berechnungen durchgeführt werden:

- Instationäre Berechnung des Sondenfluids (**Feld 6.1**). In der Default-Einstellung wird das Sondenfluid stationär berechnet (siehe ref. [5], [6] ).
- Eingabe von Entzugsleistungen, die z.B. von einer Wärmepumpe erzwungen werden oder von Sonden-Rücklaufftemperaturen (z.B. bei der Sonden-Direktkühlung). Dazu wird die entsprechende Wahl in **Feld 6.2** gemacht. In der Default-Einstellung wird die Entzugsleistung mit einer Wärmepumpe erzwungen und das Programm berechnet daraus die notwendigen Quellen- und Sonden-Rücklaufftemperaturen. Details dazu sind in Kapitel 4.1 zu finden.
- Berechnung von Sprungantworten (Response-Test, **Feld 6.3**). Details dazu sind in Kapitel 5.3.3 zu finden.
- Grösse des Eingabefiles (**Feld 6.7**). In den Default-Einstellungen wird mit 8760 Schritten von 60 Minuten gerechnet. Es ist aber auch möglich, weniger als ein Jahr nachzurechnen und ein entsprechend kleineres Eingabefile zu verarbeiten.

- Starttemperaturen abschätzen (Feld 6.8). Diese Option führt zu etwas kürzeren Rechenzeiten bei langen Simulationszeiten (>10 Jahre), die Resultate sind aber ungenauer. Diese Option sollte nur für schnelle Grobabschätzungen verwendet werden.

### 3.10.2 Eingabe von Entzugsleistungen oder Sonden-Rücklauftemperaturen

Wird in Feld 6.2 „nein“ angewählt (d.h. die Entzugsleistung wird nicht durch eine Wärmepumpe erzwungen), so wird die Rücklaufemperatur aus Feld 6.6 oder Feld 4.10 als Ausgangslage für die Berechnung genommen und das Programm berechnet daraus die möglichen Entzugsleistungen

### 3.10.3 Aktive Zusatzkühlung wenn das Sonden-Freecooling nicht ausreicht

Wird in Feld 6.9 die aktive Zusatzkühlung angewählt, so werden die Erdwärmesonden als Rückkühlung für eine Kältemaschine verwendet, sobald der Deckungsgrad nur mit der Freecooling-Option unter die Grenze von Feld 6.11 fällt. Dabei müssen die Erdsonden zusätzlich die Kompressorleistung der Kältemaschine aufnehmen, die mit dem Heiz-COP (= EER + 1) der Kältemaschine von Feld 6.10 berechnet wird.

### 3.10.4 Frostschutz (minimale Sondentemperatur) und bivalente Anlagen

Um Anlagen mit Frostschutzschaltungen und bivalente Anlagen simulieren zu können, wird Feld 6.12 auf „Ja“ gesetzt und es wird auf Feld 6.13 eine minimale Sonden-Rücklaufemperatur definiert. Unterschreitet die Sonden-Rücklaufemperatur den Wert in Feld 6.13, so schaltet die Wärmepumpe aus und es erfolgt kein Wärmeentzug aus der Sonde. Um die fehlende Wärme und den notwendigen Bedarf an Zusatzheizung berechnen zu können, muss in Feld 6.14 der COP der Wärmepumpe kurz vor dem Ausschalten angegeben werden. In Feld 6.15 wird nach dem Rechengang ausgegeben, wie gross der Heizwärmebedarf war, der nicht gedeckt werden konnte.

### 3.10.5 Response - Test

Um einen Response-Test nachzurechnen, muss in einem ersten Schritt das Blatt „Simulation“ eingeblendet werden. Dazu wird zunächst in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ das Blatt „Simulation“ angewählt (cf. Abb. 3.35)

Auf dem Blatt "Simulation" kann nun im Feld 6.3 die Sprungantwort angewählt werden. Sobald dies gemacht wurde, werden automatisch verschiedene Default-Einstellungen geändert:

- Sinnvolle Resultate von Sprung-Antwortberechnungen sind nur möglich, wenn das Sondenfluid instationär berechnet wird. Feld 6.1 wird deshalb auf „nein“ gesetzt.
- Bei Sprung-Antwortberechnungen muss mit der maximalen Anzahl Erdschichten gerechnet werden. Die Anzahl der horizontalen Schichten im Erdreich (Dimaxi, Feld 3.1) wird deshalb auf 10 gesetzt.
- Die Simulationszeitschritte für die Berechnung der Sole und des Erdreichs werden reduziert. Dazu werden der Zeitschritt-Faktor der Sole (Feld 7.5, „Sicherheit 1“) von 4 auf 40 und der Zeitschritt-Faktor der Erde (Feld 7.6, „Sicherheit 2“) von 2 auf 20 erhöht.

- Wurde die Dauer der Sprungantwort auf 1 h gesetzt (Feld 6.4), so wird der Zeitschritt der Sonde (Feld 7.4) auf 1 Minute gesetzt.
- Die Grösse des Eingabefiles in Feld 6.7 wird auf die Dauer der Sprungantwort angepasst.

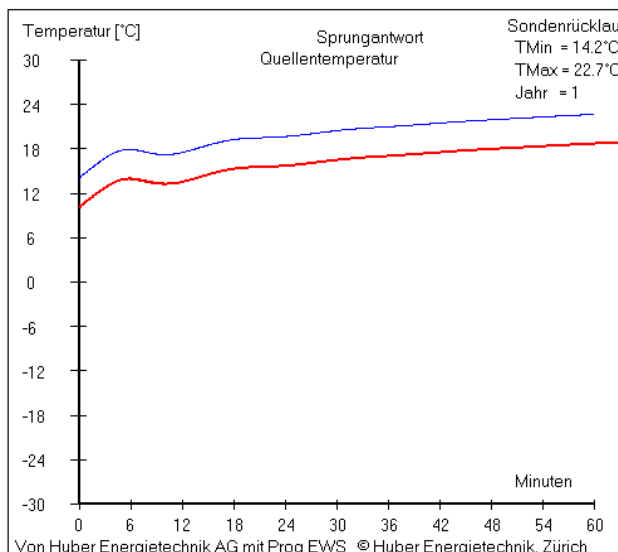
Beim klassischen Response-Test wird dem Erdreich eine konstante Wärmeleistung entzogen oder zugeführt. Diese Leistung ist im Feld 6.5 einzugeben. Dabei ist die Vorzeichen-Konvention zu beachten:

- Positives Vorzeichen: -> Wärmeentzug aus Erdreich
- Negatives Vorzeichen: -> Wärmeeintrag ins Erdreich

Die Sprung-Temperatur (Feld 6.6) wird bei dieser Art des Response-Tests nicht berücksichtigt.

Nicht vergessen werden darf, den richtigen Sondendurchsatz in Feld 2.7 einzustellen.

In Abb. 3.36 ist eine Sprungantwort einer Sonde für die ersten 60 Minuten dargestellt (40mm Doppel-U-Sonde, 150m tief, 0.7 kg/s Durchsatz mit 33% Monoethylenglykol, bei einem Wärmeeintrag von 10 kW). Deutlich sichtbar ist das erste Temperaturmaximum nach 6.5 Minuten (halbe Durchlaufzeit des Sondenfluids), das sich aus dem „Kolbeneffekt“ des Sondenfluids ergibt.



**Abb. 3.36: Beispiel einer Sprungantwort einer Sonde in der ersten Stunde.**

Es gibt noch eine 2. Variante des Response-Tests, die eher selten angewendet wird. Dabei wird eine konstante Sonden-Rücklaufftemperatur in die Erdwärmesonde gebracht und es wird die Quelltemperatur und die Sondenleistung beobachtet. Bei dieser Variante ist das Feld 6.2 („auf vorgegebene Leistung iterieren?“) auf „nein“ zu setzen und im Feld 6.6 ist die konstante Sonden-Rücklaufftemperatur einzugeben. Bei dieser Variante wird die Sprung-Leistung (Feld 6.5) vom Programm nicht beachtet.

### 3.11 Blatt "Parameter"

Um das Blatt „Parameter“ einzublenden, wird in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ das Blatt „Parameter“ ausgewählt (cf. Abb. 3.37). Auf dem Blatt „Parameter“ können das Simulations-Rechengitter und die Simulations-Zeitschritte sowie das Abbruchkriterium für die Iteration definiert werden. Zudem kann bestimmt werden, ob und wie die Resultate auf ein Ausgabe-File geschrieben werden sollen.

Üblicherweise muss der Benutzer dieses Blatt nicht ausfüllen, sondern es kann mit den Default-Werten gerechnet werden.

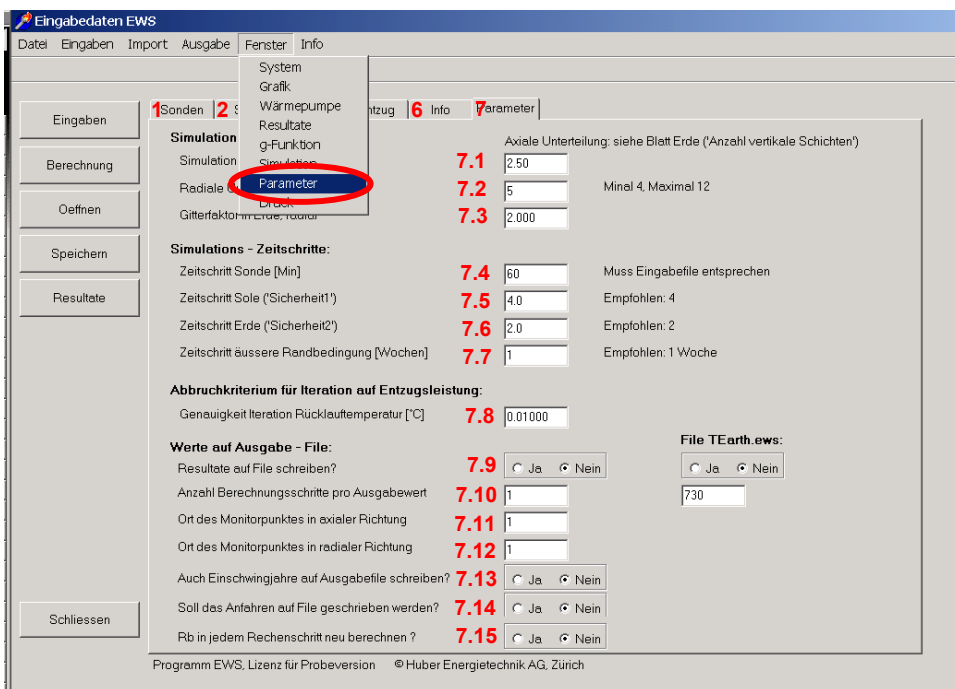


Abb. 3.37: Blatt „Parameter“.

Im **Feld 7.15** wird definiert, ob der thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$  in jedem Rechenschritt neu berechnet werden soll. Der Bohrlochwiderstand  $R_b$  (thermischer Widerstand zwischen Bohrloch und Sondenfluid) ist im wesentlichen eine Grösse, die die geometrischen Faktoren der Sondenrohre im Bohrloch und die Stoffwerte der Hinterfüllung und der Sondenrohre enthält. Zusätzlich ist darin aber auch der betriebsabhängige Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  vom Sondenrohr ins Fluid enthalten. Diese Grösse hängt vom aktuellen Sondendurchsatz ab. Da das Programm EWS die Möglichkeit bietet, mit variablem Sondendurchsatz zu simulieren, kann der Benutzer im Feld 7.15 wählen, ob der Wärmeübergang  $\alpha$  und damit der Bohrlochwiderstand  $R_b$  in jedem Rechenschritt neu berechnet wird, oder ob  $R_b$  für die ganze Simulation konstant gehalten wird. Wird das Feld 7.15 auf der Default-Einstellung („nein“) belassen, wird der  $R_b$ -Wert am Anfang der Simulation anhand des Auslegungsmassenstrom (Feld 2.7) berechnet und bleibt während der Simulation konstant. Die Wahl hat einen Einfluss auf die Rechengeschwindigkeit.

### 3.12 Blatt "Druck"

Um das Blatt „Druck“ einzublenden, wird in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ das Blatt „Druck“ oder in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Eingaben“ die Auswahl „Druckverlust“ angewählt (cf. Abb. 3.39). Diese Option ist nur in der Vollversion des Programms zugänglich.

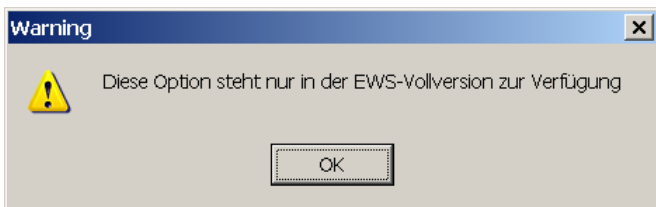
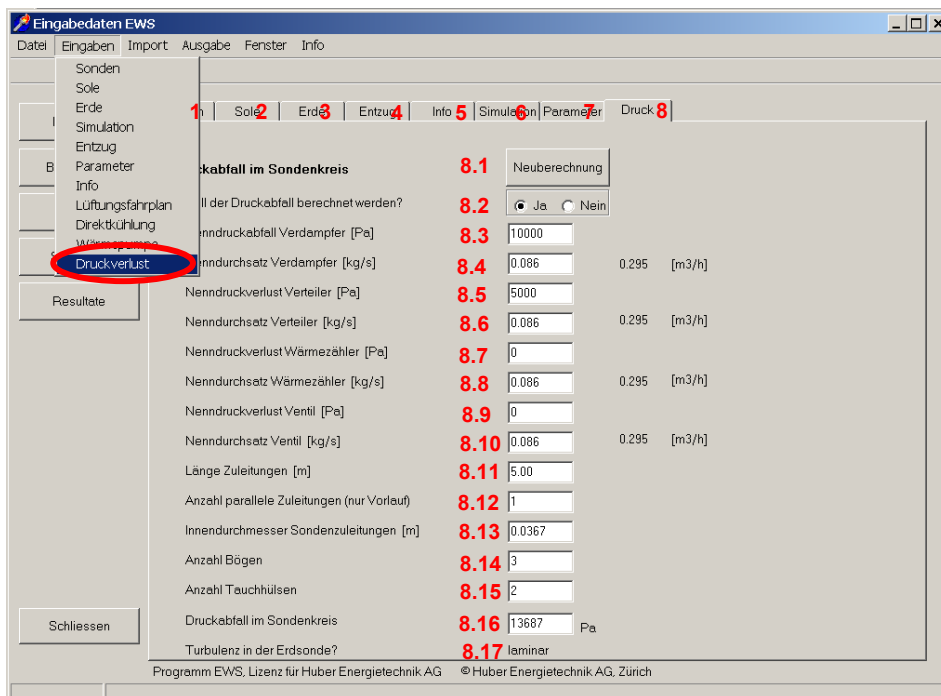


Abb. 3.38: Fehlermeldung, falls keine Vollversion des Programms Lizenziert ist.

Auf dem Blatt „Druck“ kann der Druckverlust im Sondenkreislauf berechnet werden und es wird berechnet, ob in der Sonde laminare oder turbulente Strömung herrscht. Eine ausführliche Beschreibung der Rechenmodelle ist in [15] zu finden.

Abb. 3.39: Blatt „Druck“.



- 8.1 Nach jeder Änderung von Eingaben ist der Button „Neuberechnung“ zu drücken, damit die Resultate angepasst werden.
- 8.2 Wird 8.2 auf „Ja“ gesetzt, so wird der Druckabfall in der Sonde (ohne Zuleitung) in jedem Stundenschritt neu berechnet und ins Resultatfile geschrieben. Der Wert für den Druckabfall im Resultatfile (Stundenschritte) beinhaltet also nur die Sonde, ohne Zuleitung / Verdampfer etc.
- 8.3-8.10 Angabe von Nenn-Druckabfällen von Einzelkomponenten bei Nenndurchsätzen. Der Nenndurchsatz kann für jede Komponente anders sein. Die Umrechnung auf den effektiven Druckabfall dieser Komponenten erfolgt über den Pabelansatz.

- 8.11 Länge der Sondenzuleitung (in der Regel vom Sondenkopf bis zum Sondenverteiler), für die der Druckabfall berechnet werden soll. Das Programm EWS berechnet den Gesamt-Druckabfall aus dem Druckabfall der Erdsonde plus der Summe der Einzelkomponenten im Sondenkreislauf plus 2 mal der Druckabfall der Sondenzuleitung (Sonden Vor- und Rücklauf).
- 8.12 Anzahl paralleler Sondenzuleitungen für die Druckabfallberechnung der Sondenzuleitung (vom Sondenkopf bis zum Verteiler). Werden z.B. bei einer Doppel-U-Sonde die beiden Sondenrohre einzeln auf den Verteiler geführt, so ist hier 2 einzugeben, werden die beiden Sondenrohre aber am Sondenkopf zusammengefasst, so ist 1 einzugeben. Gleich verhält es sich bei 2 Erdwärmesonden, die auf einen gemeinsamen Verteiler im Haus geführt werden. Werden bei 2 Doppel-U-Sonden die Sondenrohre einzeln auf die Verteiler geführt, so ist 4 einzugeben, werden die Sondenrohre je am Sondenkopf zusammengeführt, so ist 2 einzugeben, befindet sich der Sondenverteiler dicht bei den 2 Erdsonden und wird die Zuleitung vom Verteiler über eine grössere Strecke ins Haus geführt, so ist in diesem Fall 1 einzugeben.
- 8.13 Innendurchmesser der einzelnen Sondenzuleitung (in der Regel vom Sondenkopf bis zum Sondenverteiler). Bei einer Zuleitung DN 40 ist dies in der Regel 0.032 m, bei DN 50 ist es ca. 0.037 m.

8.14-8.15 Anzahl Tauchhülsen und Bögen im Sondenkreislauf (Total über ganzen Kreislauf angeben, Bögen in Sondenvor- und Rücklauf zusammenzählen). Der Druckabfall wird mit

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_{Sole}}{2} v^2 \tag{Gl. 3.3}$$

berechnet, wobei pro Bogen  $\zeta = 2$  und pro Tauchhülsen  $\zeta = 1$  eingesetzt wird.

8.16 Druckabfall für ganzen Sondenkreislauf. Unbedingt beachten: Nach jeder Änderung von Eingaben ist der Button „Neuberechnung“ zu drücken, damit die Resultate angepasst werden.

Der Druckverlust  $\Delta p$  der Rohrströmung in der Erdwärmesonde und der Zuleitung berechnet sich wie folgt:

$$\Delta p = \xi \frac{2H}{D_i} \frac{\rho_{Sole}}{2} v^2 \tag{Gl. 3.4}$$

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

$$\xi = \frac{64}{Re} \tag{Gl. 3.5}$$

Im turbulenten Bereich ( $Re > 2'300$ ) wird der Ansatz von Petukhov verwendet:

$$\xi = [0.790 \ln(Re) - 1.64]^{-2} \tag{Gl. 3.6}$$

Die restlichen Druckverluste werden nach dem Parabelansatz vom Nenndurchsatz auf den effektiven Sondendurchsatz umgerechnet.

8.17 Angabe über Strömungsverhältnisse in der Erdsonde (laminar oder turbulent). Der Umschlagpunkt erfolgt bei  $Re = 2'300$ .

### 3.13 Wärmepumpenkenngrößen und Zusatzheizung

In der Vollversion des Programms EWS können zusätzliche Angaben über die Wärmepumpe sowie über Zusatzheizsysteme berücksichtigt werden. Unter der Rubrik „Fenster“ wird das Blatt „Wärmepumpe“ angewählt (cf. Abb. 3.40). Daraufhin wird das Blatt „Wärmepumpe“ eingeblendet. Das Blatt „Wärmepumpe“ kann nicht mit dem Blatt „Lastprofil“ kombiniert werden.

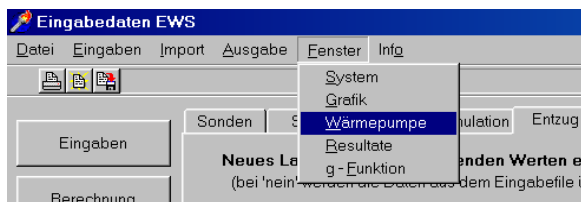


Abb. 3.40: Aufrufen der Eingabemaske für Angaben über die Wärmepumpe

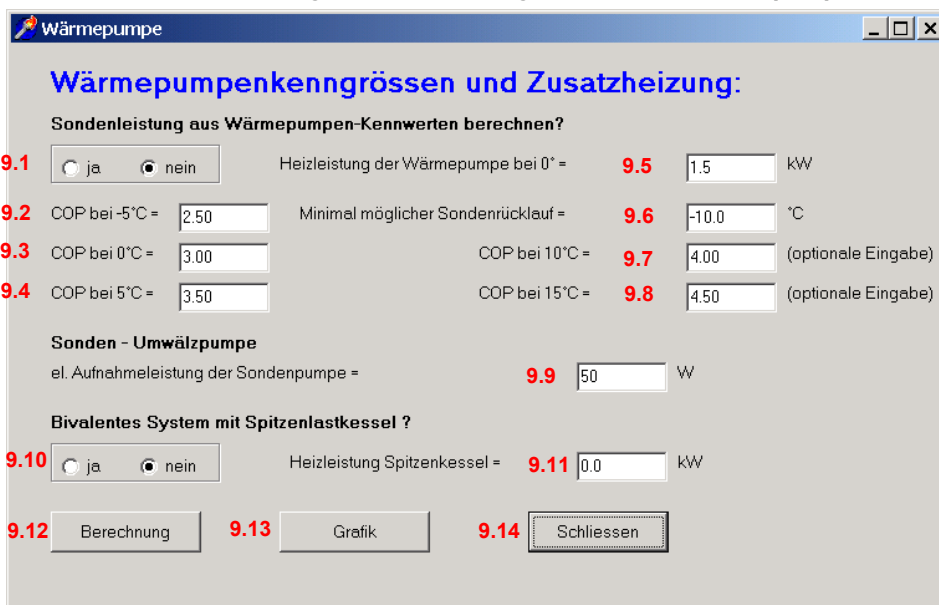


Abb. 3.41: Eingabemaske "Wärmepumpenkenngrößen und Zusatzheizung".

**9.1** Wird die Frage "Sondenleistung aus Wärmepumpen-Kennwerten berechnen" mit "ja" beantwortet, werden für die EWS-Berechnung die Angaben aus dieser Eingabemaske verwendet. Das Programm überprüft nun in einem ersten Schritt, ob die Heizleistung der Wärmepumpe in **Feld 9.5** mit dem COP bei 0°C Quelltemperatur in **Feld 9.3** und der Verdampferleistung (=Entzugsleistung Sonde) in **Feld 4.4** übereinstimmen. Ist dies nicht der Fall, so fragt das Programm nach, ob Feld 4.4 angepasst werden soll. Wird das Feld 4.4 nun nicht angepasst, so wird das Feld 9.5 für die weitere Berechnung ignoriert.

Wird Feld 9.1 auf „ja“ gesetzt, so werden ausserdem die Entzugsleistungen QSource (Feld 4.4) als Verdampferleistung bei 0°C Quelltemperatur interpretiert. In jedem Rechenschritt wird die effektive Verdampferleistung dem effektiven COP angepasst, wobei das Programm EWS eine konstante Heizleistung (entsprechend der Eingabe in Feld 9.5) annimmt.

**9.2-9.4, 9.7-9.8** Hier werden die COP's bei verschiedenen Sole-Temperaturen angegeben. Zu beachten ist, dass die Eingaben in Feld 9.7 und 9.8 optional sind. Ist der Wert nicht bekannt, so können diese Felder Null gesetzt werden und das Programm extrapoliert linear.

**9.9** Hier ist die elektrische Aufnahmeleistung der Sondenumwälzpumpe einzugeben.

**9.10/9.11** Bei bivalenten Systemen mit einem Spitzenlastkessel kann hier die Heizleistung des Spitzenlastkessels eingegeben werden (Anwendung nur bei Systemsimulation).

### 3.14 Direktkühlung

In der Vollversion des Programms EWS besteht die Möglichkeit, Angaben über eine Direktkühlung einzubringen. Unter der Rubrik „Fenster“ wird das Blatt „System“ angewählt (cf. Abb. 3.42). Daraufhin wird das Blatt „Systemdefinition“ eingeblendet (cf. Abb. 3.43).

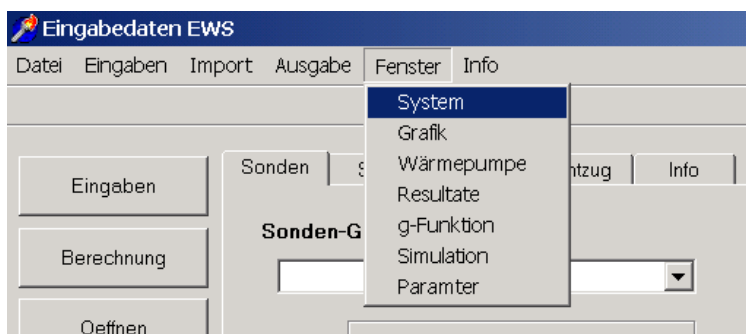


Abb. 3.42: Aufrufen der Eingabemaske für eine Direktkühlung.

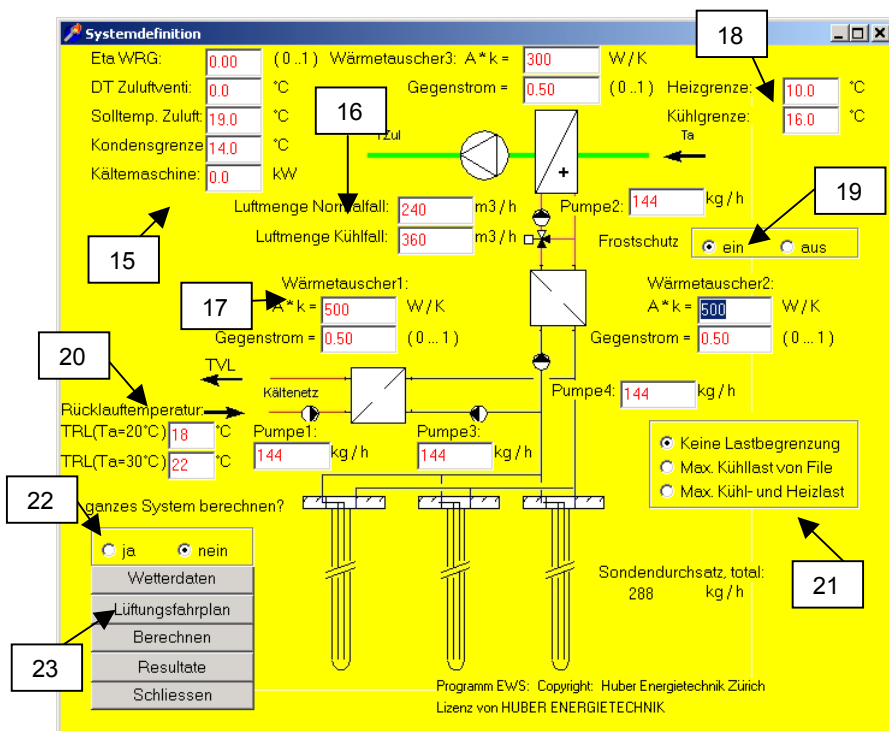
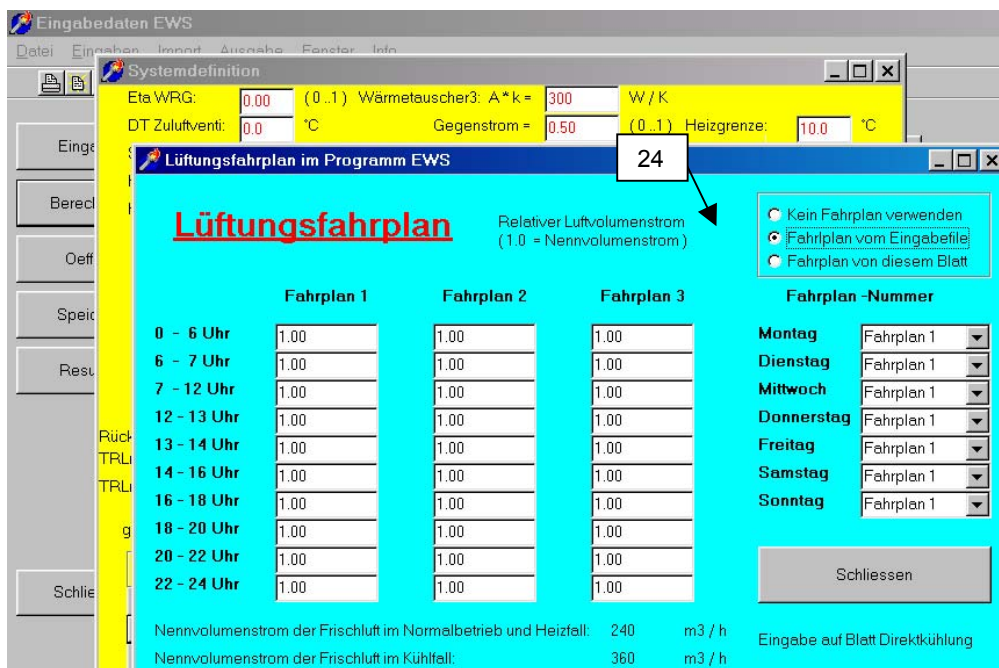


Abb. 3.43: Eingabemaske "Systemdefinition" für Direktkühlung.

15. Der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung WRG, die Temperaturen des Ventilators und der Zuluft, die Kondensationsgrenze und die Leistung der Kältemaschine werden hier eingefügt.
16. Die Luftmenge im Normalfall sowie im Kühlfall werden hier eingegeben.
17. Hier werden die Kennwerte der verschiedenen Wärmetauscher im System (3 Stück) angegeben. Zudem stehen 4 Pumpen zur Verfügung, deren Massenströme eingefügt werden können.
18. Die Heiz- und die Kühlgrenze werden eingefügt.



19. Es kann gewählt werden, ob das System über einen Frostschutz verfügt oder nicht.
20. Die Rücklauftemperaturen aus dem Kältenetz werden für Aussentemperaturen von 20 °C und 30 °C angegeben.
21. Hier kann angegeben werden, ob die Direktkühlung ohne Lastbegrenzung, ob nur die maximale Kühllast oder ob die maximalen Kühl- und Heizlasten basierend auf den Angaben auf Blatt "Entzug" berechnet werden soll. Bei Variantenberechnungen sollte diese Auswahl immer überprüft werden.
22. Wird bei Punkt 22 "Ja" ausgewählt, beruhen die Berechnungen auf den Angaben auf dieser Eingabemaske. Bei "Nein" basieren die Berechnungen auf den Angaben des Blattes "Entzug".
23. Es kann ein Lüftungsfahrplan definiert werden.



**Abb. 3.44: Eingabemaske "Lüftungsfahrplan".**

24. Das Programm generiert einen Fahrplan, wenn nichts anderes eingegeben wurde. Es kann jedoch auch auf einen Fahrplan verzichtet werden oder der Fahrplan kann selbst definiert werden.

## 4 Berechnung

### 4.1 Graphische Darstellung von Quellen- und Rücklaufftemperatur

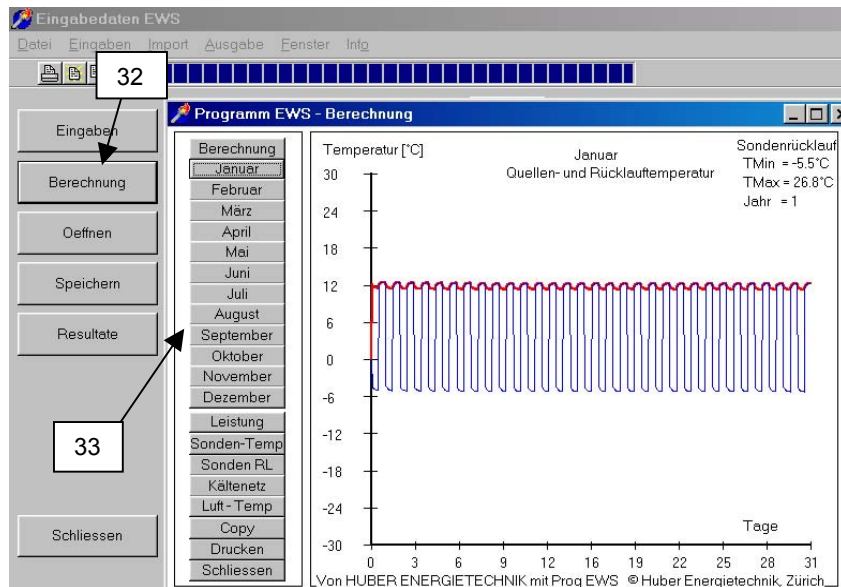


Abb. 4.1: Graphische Darstellung der Quellen- und Rücklaufftemperatur im Monat Januar.

32. Sind alle Felder vollständig ausgefüllt, wird durch Anklicken auf den Button "Berechnung" die Simulationsrechnung ausgeführt und graphisch dargestellt.

Die beiden Graphen geben die Quellen- und Rücklaufftemperaturen in den entsprechenden Monaten an. Die Angaben zur Minimal- und Maximaltemperatur TMin und TMax geben die beiden Extremwerte während des gesamten Simulationszeitraums an.

33. Die Berechnungen der einzelnen Monate können durch Anklicken des gewünschten Monats betrachtet, ausgedruckt oder kopiert (beispielsweise in ein Word-File) werden.

### 4.2 Graphische Darstellung der Entzugsleistung

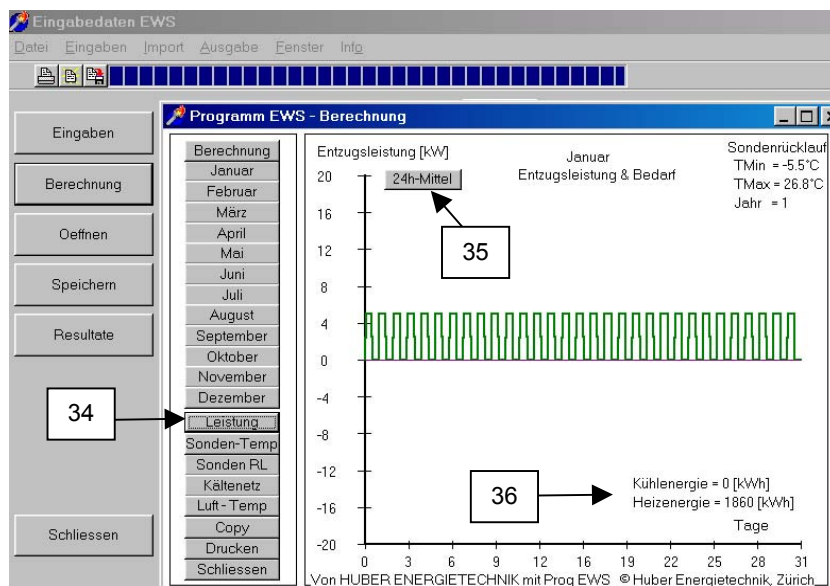


Abb. 4.2: Graphische Darstellung der Entzugsleistung.

34. Durch Anklicken des Buttons "Leistung" wird die Leistung der Erdwärmesonde in den Monaten angezeigt. Ist diese Leistung positiv, wird der Sonde Wärme entzogen, im negativen Fall wird der Sonde Wärme zugeführt.
35. Durch Anklicken des Buttons "24h-Mittel" wird die gemittelte Leistung über einen Tag angegeben.
36. In der Ansicht "Leistung" werden die Kühl- und Heizenergien des gewählten Monats gezeigt. Sämtliche Graphiken aller Monate können ausgedruckt oder beispielsweise in ein Wordfile kopiert werden. Die eingegebenen Werte können gespeichert und durch Anklicken des Buttons "Projekt laden" auf der Startseite wieder aufgerufen werden.

### 4.3 Resultatblatt

Nach der Berechnung kann anstelle der grafischen Darstellung auch eine Tabelle mit den Resultaten angezeigt werden. Im Menü „Fenster“ wird „Resultate“ angewählt. Darin zu finden ist eine Übersicht über einzelne Rechenresultat, wie z.B. den Deckungsgrad beim Freecooling.



Eingabedaten:		Resultate:	
Wärmeleitfähigkeit Erde =	2.4 W/mK	Wärmeeintrag in Erdwärmesonden =	0 kWh
Anzahl Erdwärmesonden =	1	Wärmeentzug aus Erdwärmesonden =	2416 kWh
Bohrtiefe der Erdwärmesonden =	20.0 m	Jahres-Kühlenergie des Kältenetzes (TABS) =	0 kWh
Sondenabstand =	m	Kühlbedarf des Gebäudes =	0 kWh
Sonden-Aussendurchmesser =	32 mm	Deckungsbeitrag Kühlung mit Erdsonden =	%
Entzugsleistung aus Erdwärmesonden =	1.0 kW	Minimale Sondenrücklauftemperatur =	-10.6 °C
Rückkühlleistung in Erdwärmesonden =	1.0 kW	Maximale Sondenrücklauftemperatur =	-0.8 °C
Dauerentzug Ende Februar =	4 Tage	Maximale Kühlleistung Sonden =	0.0 kW
Entzugsleistung im Dauerbetrieb =	1.0 kW	Maximale Heizleistung der Sonden =	1.0 kW
Max. benötigte Kühlleistung =	0.0 kW	mittlere Sondenbelastung Juli / August =	0.0 W/m
Max. benötigte Heizleistung =	0.0 kW	Anzahl Stunden über der Zuluft-Solltemperatur =	0 h
Zulufterwärmung im Ventilator =	0.0 °C	Kälte aus Kühlmaschine =	0 kWh
Wirkungsgrad der WRG der Zuluft =	0.00	Wärmeeintrag der Wärmerückgewinnung WRG =	0 kWh
el. Leistung der Sondenpumpe =	W	Wärmebedarf total =	2416 kWh
Wärmeleistung der Zusatzheizung =	kW	Fehlende Wärme der Wärmepumpe =	0 kWh
COP der Wärmepumpe bei -5°C =		- davon gedeckt durch Zusatzheizung =	0 kWh
COP der Wärmepumpe bei 0°C =		Strombedarf der Wärmepumpe =	0 kWh
COP der Wärmepumpe bei 5°C =		Strombedarf der Sondenpumpe =	0 kWh
COP der Wärmepumpe bei 10°C =		Mittlerer COP der Wärmepumpe =	0.00
COP der Wärmepumpe bei 15°C =		Jahresarbeitszahl JAZ der Wärmepumpe =	0.00
Jahres - Laufzeit der WP =	2416 h	Druckabfall Sonde bei Auslegungsbedingung =	610 Pa

Abb. 4.3: Blatt „Resultate“.

Zu beachten sind die folgenden Punkte:

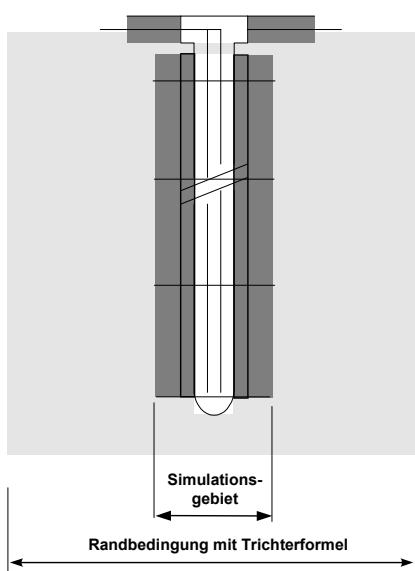
- Druckabfall wird beim Auslegungsmassenstrom, nur für die Sonde (ohne Zuleitungen und Verdampfer-Druckabfall) ausgegeben. Im Resultat-File können aber auch die Stundenwerte herausgelesen werden. Der Druckabfall des ganzen Sondenkreises und die Angabe über laminare oder turbulente Strömung in der Sonde können aus dem Blatt „Druck“ (Kapitel 3.12) herausgelesen werden.
- Wärmebedarf total: Wenn die Last mit dem Blatt „Entzug“ (Kapitel 3.8) definiert wurde, enthält dieses Feld die Summe des Wärmeentzugs der Sonde über das letzte Simulationsjahr, wurde die Last mit dem Blatt „Lastprofil“ (Kapitel 3.9) definiert, so enthält dieses Feld den Wärmebedarf des Gebäudes.
- Kühlbedarf des Gebäudes wird nur angegeben, wenn die Last mit dem Blatt „Lastprofil“ (Kapitel 3.9) definiert wurde.

## 5 ANHANG A: Modellbescrieb

Nachfolgend sind Auszüge aus den Modellen im Programm EWS wiedergegeben. Es sind allerdings nur jene Teile dargestellt, die für das Verständnis der Eingabeparameter massgebend sind. Die komplette Modell-Beschreibung ist in [5], [6] und [8] zu finden.

### 5.1 Simulationsbereich

Da bei Sonden von über 50m Länge die vertikale Wärmeleitung im Sondennahbereich (<3m Abstand von der Sonde) kaum ins Gewicht fällt, verzichten wir in diesem Bereich auf die Berechnung der vertikalen Wärmeleitung. Somit kann die Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten schichtweise eindimensional gelöst werden. Schichtweise sind so unterschiedliche Stoffwerte möglich, so dass auch die häufig vorkommenden, unterschiedlichen Gesteinsschichten im Erdreich mitberücksichtigt werden können.



Für die Simulation der Erdreichtemperaturen im Sondennahbereich (1.5 m - 3 m) soll das Crank-Nicholson-Verfahren angewendet werden.

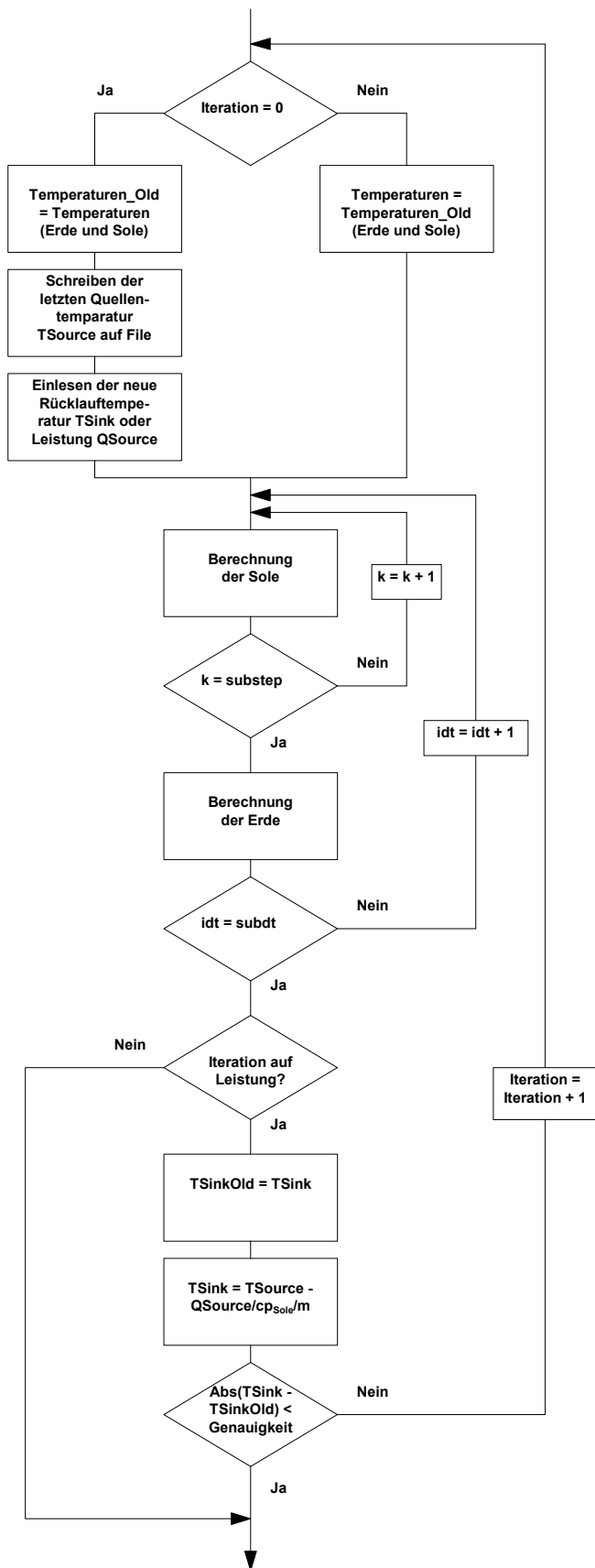
Als innere Randbedingung soll die durchschnittliche Solentemperatur der jeweiligen Schicht genommen werden. Um dem gestellten Anforderungsprofil zu genügen, soll die Sole mit einem expliziten Zeitschrittverfahren dynamisch simuliert werden. Dadurch ist es möglich, auch das Anfahrverhalten der Sonde zu berechnen.

Die äusseren Temperatur-Randbedingungen werden mit den dimensionslosen Temperatur-Sprungantworten (g-functions, 5.3.3) berechnet. Dabei kann zwischen dem Ansatz von Carslaw & Jaeger [1] und von Eskilson [3] ausgewählt werden. Das Problem des nicht konstanten Wärmeentzugs und der

Regeneration der Erde kann elegant durch Superposition von beliebig vielen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten beginnenden, konstanten Wärmeentzügen gelöst werden.

Mit dem gewählten Ansatz können intern unterschiedliche Zeitschritte verwendet werden: Die kürzesten Zeitschritte werden bei der dynamischen Berechnung der Sole benötigt, für die Crank-Nicholson-Berechnung im Simulationsgebiet kommt ein grösserer Zeitschritt zur Anwendung. Für die Berechnung der Erde ausserhalb des Simulationsgebietes mit den g-functions reicht gar ein Zeitschritt von einer Woche. Diese unterschiedlichen Zeitschritte sind auch anschaulich einleuchtend: Temperaturstörungen kommen immer von innen (von der Sonde), womit innen auch die kleinsten Zeitschritte nötig sind. Weiter aussen machen sich nur der gemittelte Wärme-Entzug oder -Eintrag bemerkbar. Auf diese Weise gelingt es, ohne einen Verlust an Genauigkeit eine Erdsonde mit wesentlich geringerem Rechenaufwand zu simulieren als mit herkömmlichen Ansätzen.

### 5.1.1 Simulation des Zeitschrittes



Bei Erdwärmesonden gibt es prinzipiell zwei Betriebsarten:

1. Abkühlung der Quelltemperatur TSource mit einer vorgegebenen Entzugsleistung QSource [kW] in einer Wärmepumpe.
2. Erwärmung oder Abkühlung der Sonde in einem Prozess auf eine vorgegebene Temperatur TSink (z.B. Einsatz der Erdwärmesonde zur Kühlung eines Gebäudes).

Im Programm EWS sind beide Möglichkeiten vorgesehen. Setzt man den Eingabeparameter *Leistung = true* (Feld 6.2 auf „ja“ setzen), so wird auf diese Entzugsleistung hin iteriert, bei *Leistung = false* (Feld 6.2 auf „nein“ setzen) erfolgt keine interne Iteration, sondern es wird bei einer vorgegebenen Rücklauftemperatur TSink die entsprechende Quelltemperatur TSource berechnet.

Die Eingabe der Rücklauftemperatur TSink ist in jedem Fall notwendig, bei *Leistung = true* (Feld 6.2 auf „ja“ gesetzt), dient sie allerdings nur als 1. Schätzwert für die Iteration.

## 5.2 Rechengitter

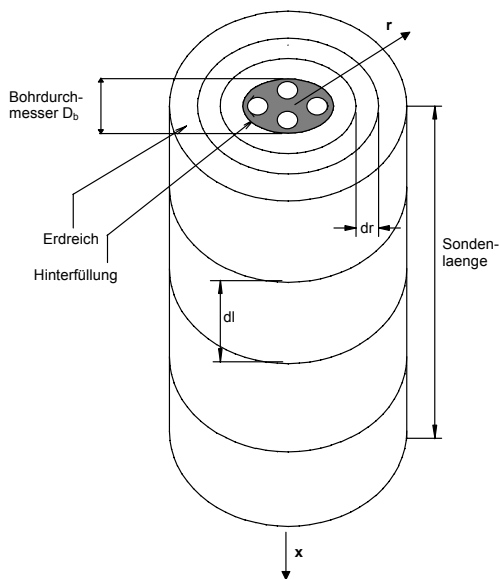


Abb. 5.1 Rechengitter der Sonde.

Die Berechnungen werden in einem axial-symmetrischen Rechengitter durchgeführt. In axialer Richtung wird die Erde in gleiche Teile der Länge dl aufgeteilt.

Das Rechengitter in radialer Richtung ist variabel. Es wird durch den Gitterfaktor f definiert:

$$\text{Gitterfaktor } f = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}} \tag{Gl. 5.1}$$

Bei Vorgabe des Simulationsgebietes mit dem grössten Rechenradius  $r_m$  kann das Gitter wie folgt berechnet werden, wobei m die Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung darstellt:

$$r_0 = \frac{D_i}{2} \tag{Gl. 5.2}$$

$$r_1 = \frac{D_b}{2} = \frac{\text{Bohrdurchmesser}}{2} \tag{Gl. 5.3}$$

$$\text{für } j \geq 2: \quad r_j = r_{j-1} + (r_m - r_1) \frac{1-f}{1-f^{m-1}} f^{j-2} \tag{Gl. 5.4}$$

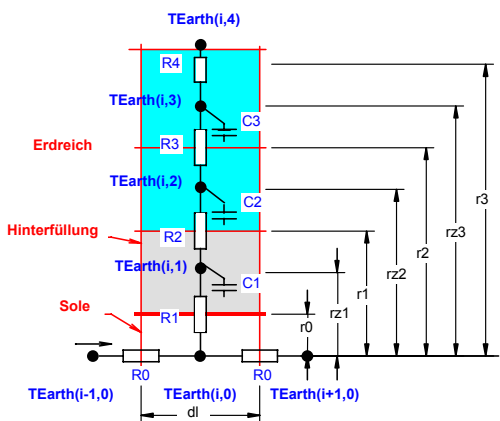


Abb. 5.2 Rechengitter der Sonde.

Ein Gitterfaktor von 2 verdoppelt jeweils die Radius-Differenz zwischen zwei Rechenvolumen.

Der für die Bestimmung der thermischen Widerstände wichtige „Massenschwerpunkt“ kann wie folgt berechnet werden:

$$\text{Def: } r_{zj} = \sqrt{\frac{(r_j^2 + r_{j-1}^2)}{2}} \tag{Gl. 5.5}$$

### 5.3 Wärmeleitungsgleichung und Sprungantwort g

#### 5.3.1 Wärmeleitungsgleichung

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass der dominante Wärmetransportmechanismus im Erdreich die Wärmeleitung ist, der konvektive Wärmetransport durch Wasserbewegungen im Erdreich also vernachlässigt werden kann. Das Problem der Wärmeleitung im Erdreich um eine Erdwärmesonde ist axialsymmetrisch. In Axialkoordinaten kann die Wärmeleitungsgleichung um eine Erdwärmesonde in radialer Richtung geschrieben werden als

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T_{\text{Earth}}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{\text{Earth}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_{\text{Earth}}}{\partial r} \tag{Gl. 5.6}$$

wobei die Temperaturleitfähigkeit a definiert ist durch

$$\text{Def: } a = \frac{\lambda}{c p_{\text{Earth}} \cdot \rho_{\text{Earth}}} \tag{Gl. 5.7}$$

Die Wärmeleitungsgleichung ist linear, so dass sowohl Einzelsonden, als auch Sondenfelder bei geometrischer Ähnlichkeit ähnliche Temperatur-Sprungantworten aufweisen. Diese Ähnlichkeit bezieht sich auf alle Temperaturen im Erdreich für alle Radien r um die Erdwärmesonden und für alle Zeiten t.

Bei einem Wärmeentzug aus einer Erdwärmesonde entsteht so im Erdreich eine Temperaturabsenkung  $\Delta T_{\text{Earth}}$  gegenüber der unbeeinflussten Erdreichtemperatur (=Temperaturtrichter), die sich mit fortlaufendem Entzug radial ausweitet. Diese Temperaturabsenkung  $\Delta T_{\text{Earth}}$  kann mit der spezifischen Entzugsleistung  $\dot{q}$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{Earth}}$  dimensionsbefreit werden:

$$\text{Def: } g(r, t) = \frac{\Delta T_{\text{Earth}}(r, t) 2\pi \lambda_{\text{Earth}}}{\dot{q}} \tag{Gl. 5.8}$$

#### 5.3.2 Der radiale Temperatur-Trichter

Im stationären Fall ist der radiale Wärmefluss  $\dot{q}$  im Sonden-Nahbereich konstant und es gilt

$$\frac{\dot{q}}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{\partial T_{\text{Earth}}}{\partial r} \cdot \lambda_{\text{Earth}} = \frac{\partial g}{\partial r} \cdot \frac{\dot{q}}{2 \cdot \pi} \tag{Gl. 5.9}$$

Durch Integration von r bis  $r_1$  wird daraus

$$g(r) = g(r_1) - \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \tag{Gl. 5.10}$$

Diese Beziehung erlaubt es, mit einer einzigen Sprungantwort g das Temperaturverhalten im ganzen Sonden-Nahbereich abzuschätzen und bei bekannter Sprungantwort g an der Stelle  $r_1$  auf die Sprungantwort g an der Stelle r zu schliessen. Zu beachten ist dabei allerdings, dass für kleine Zeitschritte t die Annahme eines stationären Falles zu grösseren Abweichungen führt.

### 5.3.3 Dimensionslose Temperatursprungantwort g

Carslaw & Jaeger [1] haben die Wärmeleitungsgleichung für eine unendliche Linienquelle analytisch gelöst und haben für g die folgenden Beziehung gefunden:

$$g = \frac{1}{2} \cdot \left[ -\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4 \cdot t \cdot a}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\left(\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)^n}{n \cdot n!} \right] \cong \frac{1}{2} \cdot \left[ \ln\left(\frac{4 \cdot t \cdot a}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad \text{Gl. 5.11}$$

wobei  $\gamma=0.5772..$  die Eulerkonstant ist.

Werner, A.; Bigler, R.; Niederhauser, A. et. al. [14] sind durch eine Analogie, abgeleitet aus der Brunnengleichung, auf die identische Lösung gekommen. Im Programm-Modul EWS ist Gl. 5.11 eingebaut und diese kann wahlweise, als Alternative zur g-Funktion von Eskilson, als äussere Randbedingung für das Simulationsgebiet ausgewählt werden.

Da bei einer unendlichen Linienquelle aus Gründen der Symmetrie das Nachströmen von Wärme weder von oben noch von unten möglich ist, führt der Ansatz von Carslaw und Jaeger zu einer stetigen Vergrösserung des Temperaturtrichters, ein Gleichgewichtszustand ist mit diesem Ansatz nicht möglich. Da aber untiefe Erdwärmesonden primär die im Sommer von der Erdoberfläche ins Erdreich gespeicherte Wärme nutzen, wurde an der Universität Lund ein Ansatz für Erdwärmesonden mit der endlichen Sondenlänge H entwickelt.

Nach Claesson und Eskilson [2] besitzen Erdwärmesonden eine Zeitkonstante  $t_s$ , mit der das zeitliche Verhalten des Erdreichs um die Erdwärmesonden dimensionsbefreit werden kann:

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \quad \text{Gl. 5.12}$$

Die dimensionslose Zahl  $E_s$  von Eskilson

$$E_s = \frac{t}{t_s} = \frac{9a}{H^2} t \quad \text{Gl. 5.13}$$

kann somit als dimensionslose Zeit für Sondenfelder und Einzelsonden betrachtet werden. Die Herleitung der Eskilsonzahl  $E_s$  aus der Wärmeleitungsgleichung Gl. 5.6 ist z.B. bei Loose (2007) zu finden.

Die Kenntnis der Zeitkonstanten ist vor allem bei nicht ausgeglichener jährlicher Entzugsbilanz wesentlich. Bis zum Zeitpunkt  $E_s = 0.1$  muss mit einer merklichen Abkühlung bzw. Erwärmung des Erdreiches gerechnet werden. Danach erfolgt nur noch eine sehr geringe Temperaturänderung im Erdreich. Der Gleichgewichtszustand zwischen Wärmeentzug und nachhaltigem Nachfliessen der Wärme ist dann ab ca.  $E_s = 10$  erreicht.

Die dimensionslose Temperatursprungantwort g ("g-function") ist nach Eskilson (1987) sowohl für Einzelsonden als auch für Sondenfelder einzig eine Funktion der dimensionslosen Zeit  $E_s$  und des dimensionslosen Sondenabstandes  $r_b/H$ . Man geht dabei von einem konstanten, spezifischen Wärmeentzug pro Sondenlänge  $\dot{q}$  aus.



Für eine Einzelsonde im Bereich  $5 r_1^2/a < t < t_s$  kann die Funktion  $g$  bei einem maximalen Fehler von 7 % angenähert werden mit

$$g(t, r_1) = \ln\left(\frac{H}{2r_1}\right) + 0.5 \ln(Es) \tag{Gl. 5.14}$$

Für Zeiten grösser als  $t_s$  strebt die Einzelsonde dem folgenden Gleichgewichtszustand zu:

$$g(r_1) = \ln\left(\frac{H}{2 \cdot r_1}\right) \tag{Gl. 5.15}$$

In Abb. 5.3 sind als Beispiel die dimensionslosen Temperatur-Sprungantworten  $g$  von zwei Erdwärmesonden im Abstand  $B$  eingezeichnet. Im Vergleich dazu ist gestrichelt die  $g$ -function einer Einzelsonde dargestellt. Weitere Temperatur-Sprungantworten für verschiedene Erdwärmesondenfelder sind in Abb. 5.4 zu finden.

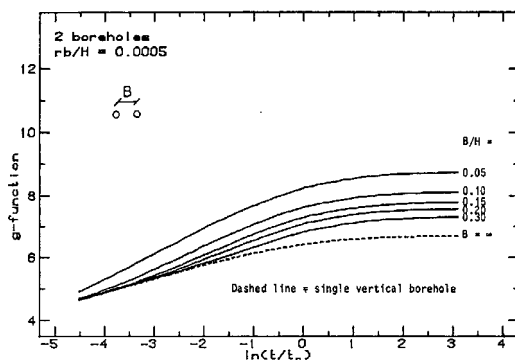


Abb. 5.3 Dimensionslose Sprungantwort  $g$  für 2 Erdwärmesonden mit Abstand  $B$  nach [3].

### 5.3.4 Vergleich der Modelle

In Abb. 5.4 werden die Ansätze von Carslaw & Jaeger für eine unendlich tiefe Erdwärmesonde mit dem Ansatz von Eskilson für je eine 10m, 100m und 500m tiefe Erdwärmesonde verglichen. Bis zum Erreichen der Zeitkonstante  $t_s$  ist zwischen den Modellen keine Abweichung festzustellen.

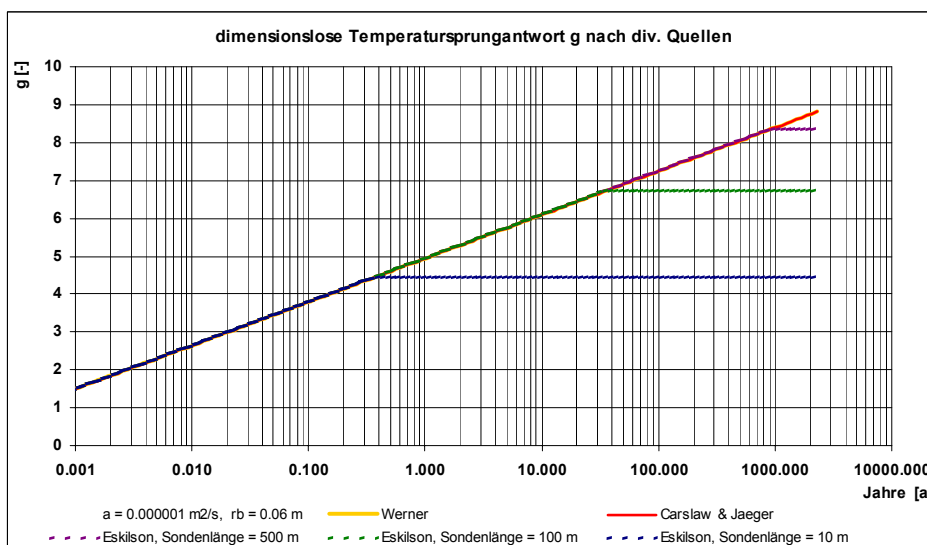


Abb. 5.4 Dimensionslose Sprungantwort  $g$  nach Carslaw & Jaeger [1] und Eskilson [3].

### 5.4 Die Berechnung der g-functions mit dem Superpositionsprinzip

Die einzelnen Sonden eines Sondenfeldes werden meist von einem Sondenverteiler mit der gleichen Rücklaufftemperatur im Sondenfluid bedient. Dies bedeutet, dass alle Erdwärmesonden parallel an die Last angehängt sind. In diesem Fall kann die g-function eines Sondenfeldes angenähert aus der Überlagerung (Superposition) von verschiedenen Einzelsonden berechnet werden. Da im Programm EWS die g-functions lediglich als äussere Randbedingungen für das Simulationsgebiet benutzt werden und im Regelfall nur einmal pro Woche neu berechnet werden, brauchen wir uns über den Fehler bei kürzeren Zeitschritten (instationäre Effekte) keine Gedanken zu machen. Mit genügender Genauigkeit kann deshalb die stationäre Gleichung Gl. 5.10 verwendet werden, um den Einfluss des Sondenfeldes auf eine beliebige Sonde x im Sondenfeld abzuschätzen. Anstelle von  $r_1$  wird der Sondenabstand  $A_{xy}$  zwischen der Sonde x und y eingesetzt:

$$g_x(r) = g(r_1) - \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + \sum_{y=1}^{y=n/x < y} \left( g(r_1) - \ln\left(\frac{A_{xy}}{r_1}\right) \right) \tag{Gl. 5.16}$$

Bei parallelem Sondenbetrieb kann dann die g-function des ganzen Sondenfeldes als Durchschnittswert der n Einzelsonden berechnet werden mit

$$g(r) = g(r_1) - \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + \frac{1}{n} \cdot \sum_{x=1}^{x=n} \left[ \sum_{y=1}^{y=n/x < y} \left( g(r_1) - \ln\left(\frac{A_{xy}}{r_1}\right) \right) \right] \tag{Gl. 5.17}$$

### 5.5 Die Bohrlochtemperatur $T_b$ und die Fluidtemperatur $T_f$

Um die Temperatur im Erdreich zu erhalten, kann nun die Temperatur-Sprungantwort  $\Delta T$  von der ungestörten Anfangstemperatur  $T_m$  abgezählt werden (Superpositionsprinzip). Die Temperatur am Bohrlochrand  $T_{Earth}(r_1)$  (=Bohrlochtemperatur  $T_b$ ) kann aus g und  $T_m$  berechnet werden mit

$$T_b(z) = T_m(z) - R_g \cdot \dot{q} = T_m(z) - \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{Earth}} g(t, r_1) \tag{Gl. 5.18}$$

$T_m$  ist die mittlere Erdtemperatur im ungestörten Zustand in der Tiefe z. Sie berechnet sich aus der durchschnittlichen Jahres-Erdoberflächentemperatur  $T_{mo}$  und dem Temperaturgradienten  $\Delta T_{Grad}$ .

Die durchschnittliche Jahres-Erdoberflächentemperatur  $T_{mo}$  ist gleich der durchschnittlichen Lufttemperatur plus einer mittleren Bodenerwärmung die typisch zwischen 0.8 bis 2°C liegt, der Temperaturgradient  $\Delta T_{Grad}$  schwankt in der Schweiz typischerweise zwischen 0.025 bis 0.045 K/m.

Die über die Bohrtiefe gemittelte Bohrlochtemperatur  $\overline{T_b}$  ist definiert als

$$\text{Def } \overline{T_b} = \frac{1}{H} \cdot \int_0^H T_b(z) \cdot dz \tag{Gl. 5.19}$$

Für den Fall eines konstanten Wärmeentzugs pro Bohrlänge  $\dot{q}$  kann die über die Tiefe im Bohrloch gemittelte Bohrlochtemperatur  $\overline{T_b}$  berechnet werden mit

$$\overline{T_b} = \overline{T_m} - R_g \cdot \dot{q} = \overline{T_m} - \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{Earth}} g(t, r_1) \tag{Gl. 5.20}$$

wobei

$$\overline{T_m} = T_{mo} - \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} \tag{Gl. 5.21}$$

### 5.5.1 Die Fluidtemperatur $T_f$

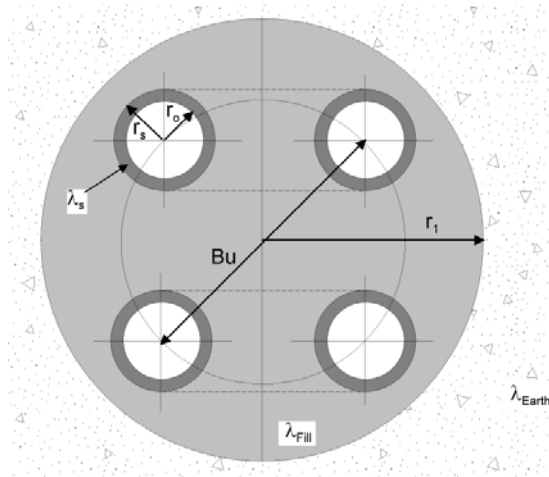
Die mittlere Fluidtemperatur  $T_f$  ist definiert als der arithmetische Mittelwert des nach unten und des nach oben strömenden Sondenfluids

$$\text{Def: } T_f(z) = \frac{T_{\text{up}}(z) + T_{\text{down}}(z)}{2} \quad \text{Gl. 5.22}$$

Die Fluidtemperatur  $T_f$  ist also eine Funktion der Tiefe  $z$  im Bohrloch. Die mittlere Fluidtemperatur  $\overline{T}_f$  ist definiert als

$$\text{Def: } \overline{T}_f = \frac{1}{2} \cdot (T_{\text{Quelle}} + T_{\text{Rücklauf}}) \quad \text{Gl. 5.23}$$

### 5.6 Thermische Widerstände $R_a$ und $R_b$ in der Doppel-U-Sonde



Eine idealisierte Doppel-U-Sonde mit dem Bohrradius  $r_1$  und mit den 4 Sondenrohren (mit Innenradius  $r_o$  und Aussenradius  $r_s$ ) ist auf nebenstehendem Bild zu sehen. In je 2 Sondenrohren fließt das Sondenfluid nach unten und nach oben. Die Hinterfüllung besitzt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{Fill}}$ , die Sondenrohre  $\lambda_s$  und das umgebende Erdreich  $\lambda_{\text{Earth}}$ . Die genaue Lage der 4 Sondenrohre in der Bohrung kann definiert werden mit der Exzentrizität  $b$

$$b = \frac{Bu}{2 \cdot r_1} \quad \text{Gl. 5.24}$$

**Abb. 5.5** Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde.

Die Exzentrizität  $b$  ist mit dem Rohrabstand  $Bu$  („shank spacing“) gemäss Abb. 5.5 definiert. Die geometrisch maximal mögliche Exzentrizität  $b_{\text{Max}}$  beträgt:

$$b_{\text{Max}} = \frac{2 \cdot r_1 - 2 \cdot r_s}{2 \cdot r_1} = 1 - \frac{r_s}{r_1} \quad \text{Gl. 5.25}$$

Die geometrisch minimale Exzentrizität  $b_{\text{Min}}$  (bei einem nicht zentrierten Füllrohr) beträgt:

$$b_{\text{Min}} = \frac{r_s}{r_1} \quad \text{Gl. 5.26}$$

Als reine Stoffgrösse wird der Konduktivitätsparameter  $\sigma$  definiert mit

$$\sigma = \frac{\lambda_{\text{Fill}} - \lambda_{\text{Earth}}}{\lambda_{\text{Fill}} + \lambda_{\text{Earth}}} \quad \text{Gl. 5.27}$$

Der interne thermische Bohrlochwiderstand  $R_a$  [Km/W] ist eine charakteristische Grösse für die längenbezogenen, thermischen „Verluste“  $\Delta q_i$  [W/m] des heraufströmenden Fluids an das nach unten strömende Fluid und ist unabhängig von der Tiefe im Bohrloch:

$$\text{Def: } R_a = \frac{T_{\text{up}}(z) - T_{\text{down}}(z)}{\Delta q_i(z)} \quad \text{Gl. 5.28}$$

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

$$\text{Def: } R_b = \frac{T_b(z) - T_f(z)}{\dot{q}} \tag{Gl. 5.29}$$

Der Bohrlochwiderstand  $R_b$  ist unabhängig von der Tiefe im Bohrloch und setzt sich zusammen aus dem Bohrloch-Hinterfüllungswiderstand  $R_c$  und dem Wärmeübergangswiderstand  $R_\alpha$  von der Hinterfüllung ans Sondenfluid:

$$R_b = R_\alpha + R_c \tag{Gl. 5.30}$$

Bei Doppel-U-Sonden kann der Wärmeübergangswiderstand  $R_\alpha$  berechnet werden mit

$$R_\alpha = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot r_o} \tag{Gl. 5.31}$$

### 5.6.1 Internen Bohrlochwiderstandes $R_a$ nach Hellström [4]

Nach Hellström [4] (1991, S. 147, Formel 9.149) kann der interne Bohrlochwiderstand  $R_a$  für Doppel-U-Sonden mit symmetrischer Sondenrohr-Anordnung berechnet werden mit

$$R_a = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\text{Fill}}} \left[ \ln\left(\frac{\sqrt{2} \cdot b \cdot r_1}{r_o}\right) - \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot b \cdot r_1}{r_o}\right) - \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \ln\left(\frac{1-b^4}{1+b^4}\right) \right] + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \alpha} + R_s \tag{Gl. 5.32}$$

wobei  $R_s$  der thermischer Widerstand der Sondenrohr-Wand ist, der berechnet wird mit

$$R_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right) \tag{Gl. 5.33}$$

### 5.6.2 Bohrlochwiderstandes $R_b$ nach Hellström [4]

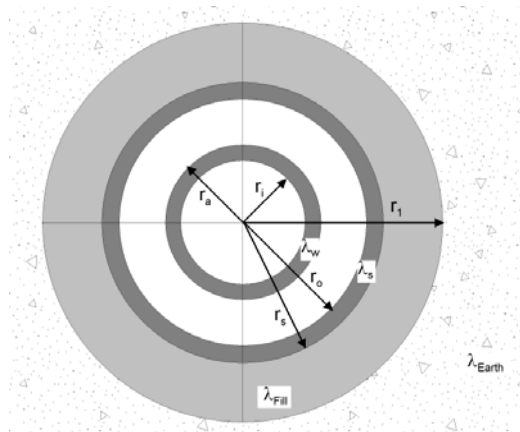
Für eine Doppel-U-Sonde kann nach Hellström [4] (S. 89, Formel 8.69) der Bohrlochwiderstand  $R_b$  berechnet werden mit

$$R_b = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Fill}}} \cdot \left[ \beta + \ln\left(\frac{r_1}{r_o}\right) + \ln\left(\frac{r_1}{Bu}\right) + \sigma \cdot \ln\left(\frac{r_1^4}{r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}}\right) - \frac{\frac{r_o^2}{Bu^2} \left[ 1 - \sigma \cdot \frac{\frac{1}{4} Bu^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}\right)} \right]^2}{\left\{ \frac{1+\beta}{1-\beta} + \frac{r_o^2}{Bu^2} \left[ 1 + \sigma \cdot \frac{Bu^4 \cdot r_1^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}\right)^2} \right] \right\}} \right] \tag{Gl. 5.34}$$

und

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Fill}} \cdot [R_\alpha + R_w] = \lambda_{\text{Fill}} \cdot \left[ \frac{1}{r_o \cdot \alpha} + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right) \right] \tag{Gl. 5.35}$$

### 5.7 Thermische Widerstände Ra / Rb an der Koaxialsonde



#### Bezeichnungen an der Koaxialsonde

Eine idealisierte Koaxialsonde ist in Abb. 5.6 dargestellt. Grau dargestellt ist die Bohrung mit dem Bohrradius  $r_1$ .

Die Hinterfüllung besitzt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{Fill}$ , das innere Sondenrohr  $\lambda_w$ , das äussere Sondenrohr  $\lambda_s$  und das Erdreich  $\lambda_{Earth}$ .

$r_i$  und  $r_a$  sind die inneren und äusseren Radien des inneren Sondenrohres,  $r_o$  und  $r_s$  die inneren und äusseren Radien des äusseren Sondenrohres.

Abb. 5.6 Bezeichnungen an der Koaxialsonde.

#### 5.7.1 Modellierung des internen Bohrlochwiderstandes Ra

Auch für Koaxialsonden gilt die Definition für den internen Bohrlochwiderstand  $R_a$  nach Gl. 5.28. Der thermische Widerstand  $R_a$  ist somit die Summe aus dem Wärmeübergangswiderstand vom hinaufströmende Fluid ans Innenrohr, dem thermischen Widerstand des Innenrohres und dem Wärmeübergangswiderstand vom Innenrohr ans hinabströmenden Fluid:

$$R_a = \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \alpha_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_w} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_a \cdot \alpha_a} \right] \tag{Gl. 5.36}$$

#### 5.7.2 Modellierung des Bohrlochwiderstandes Rb

Bei der Koaxialsonde ist  $R_b$  definiert als der thermische Widerstand des äusseren Sondenfluids (in der Regel das hinabströmende Fluid) bis an die Wand des Bohrlochs (beim Radius  $r_1$ ):

$$R_b = \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \alpha_o} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Fill}} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_s}\right) \right] \tag{Gl. 5.37}$$

## 5.8 Analytische Erdsondengleichung

### 5.8.1 Konzept der thermischen Widerstände

Das Konzept der thermischen Widerstände geht von einem quasi-stationären Zustand aus und postuliert einen linearen Zusammenhang zwischen Temperaturgradient und spez. Wärmeentzug:

$$T_{Nutzer} - T_{Wärmequelle} \equiv \sum R \cdot \dot{q} \tag{Gl. 5.38}$$

Für Erdwärmesonden können die thermischen Widerstände wie folgt aufgeteilt werden:

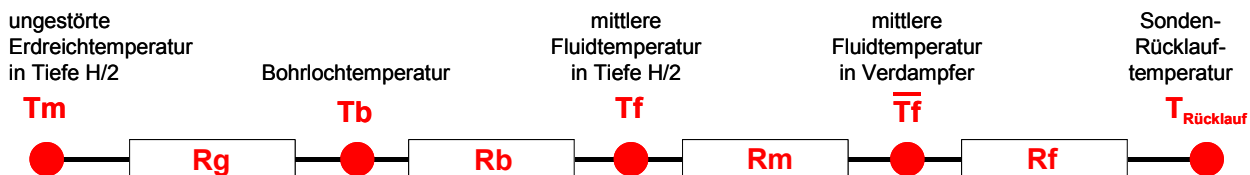
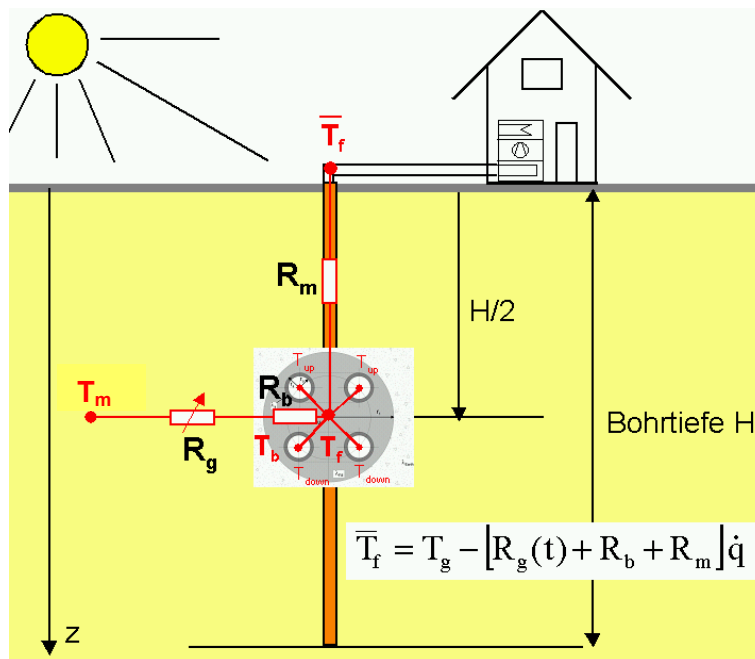


Abb. 5.7: Thermische Widerstände in einer Erdwärmesonde

### 5.8.2 thermische Verbraucherwiderstand R<sub>f</sub>

Die Bilanz über dem Wärmebezügler oder Verdampfer kann wie folgt aufgestellt werden:

$$(T_{Quelle} - T_{Rücklauf}) \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole} = \dot{Q}_{Verdampfer} = \dot{Q}_{Sonde} = H \cdot \dot{q} \tag{Gl. 5.39}$$

Mit Gl. 5.23 kann daraus der **thermische Verbraucherwiderstand R<sub>f</sub>** wie folgt definiert werden:

$$T_{Quelle} = \bar{T}_f + \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \dot{q} \equiv \bar{T}_f + R_f \cdot \dot{q} \tag{Gl. 5.40}$$

$$T_{Rücklauf} = \bar{T}_f - \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \dot{q} \equiv \bar{T}_f - R_f \cdot \dot{q} \tag{Gl. 5.41}$$

### 5.8.3 Thermischer Transportwiderstand $R_m$

Im Wärmeentzugsfall liegt die höchste, mittlere Fluid-Temperatur  $T_f$  im Sondenfuss. Beim Transport nach oben verliert das Sondenfluid durch Wärmeabgabe an das hinunterfliessende Fluid und unter Umständen auch oben ans Erdreich wieder ein Teil dieses Temperaturniveaus. Unter der Annahme einer konstanten, spezifischen Entzugsleistung  $\dot{q}$  über die ganze Sondenlänge (für die meisten Sondenbetriebe eine durchaus brauchbare Annahme) erhält man für die Fluidtemperatur in der Sonde die folgende Beziehung (Herleitung in [8]):

$$T_{up}(z) = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[ \frac{g(t, H)}{2\pi \lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2 - z \cdot H + \frac{z^2}{2}}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} - \frac{H - z}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \tag{Gl. 5.42}$$

$$T_{down}(z) = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[ \frac{g(t, H)}{2\pi \lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2 - z \cdot H + \frac{z^2}{2}}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} + \frac{H - z}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \tag{Gl. 5.43}$$

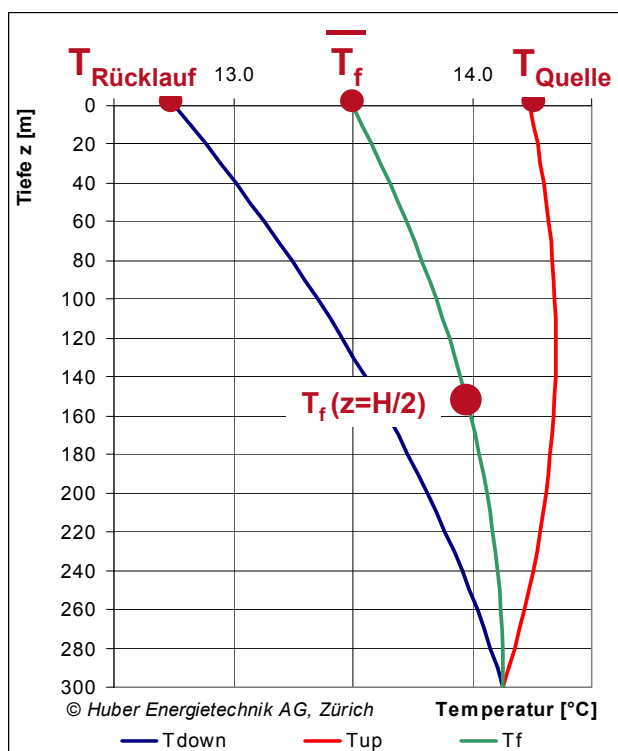


Abb. 5.8: Temperaturverlauf im Sondenfluid nach [8]

Damit kann der **thermische Transportwiderstand  $R_m$**  definiert werden als

$$T_f\left(z = \frac{H}{2}\right) - \bar{T}_f \equiv R_m \cdot \dot{q} = \left( \frac{1}{3 \cdot R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} \right) \cdot \dot{q} \tag{Gl. 5.44}$$

### 5.8.4 Wärmewiderstand des Bodens $R_g$

Der Wärmewiderstand des Bodens  $R_g$  ergibt sich aus der Temperaturdifferenz der Bohrlochoberfläche  $T_b$  und dem ungestörten Temperaturniveau in der gleichen Tiefe. Mit der Definition der g-functions (Gl. 5.8) ergibt sich die Definitionsgleichung für  $R_g$ :

$$T_m - T_b = \Delta T(r = r_b, t) = \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda} \cdot g(r_b, t) = R_g \cdot \dot{q} \tag{Gl. 5.45}$$

Speziell am Wärmewiderstand  $R_g$  ist, dass  $R_g$  eine Funktion der Zeit ist und sich bei konstantem Entzug ständig vergrößert (cf. Kapitel 5.3).

### 5.8.5 Analytische Erdwärmesondengleichung

Die analytische Erdwärmesondengleichung erhält man nun durch den Zusammenzug der verschiedenen, addierbaren Widerstände an der Erdwärmesonde:

$$T_{Quelle} = T_m - (R_g + R_b + R_m - R_f) \cdot \dot{q} \tag{Gl. 5.46}$$

$$T_{Rücklauf} = T_m - (R_g + R_b + R_m + R_f) \cdot \dot{q} \tag{Gl. 5.47}$$

Ersetzt man nun  $T_m$  durch Gl. 5.21,  $R_g$  durch Gl. 5.45,  $R_m$  durch Gl. 5.44 und  $R_f$  durch Gl. 5.40, so erhält man die analytische Erdwärmesondengleichung

$$T_{Quelle} = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[ \frac{g(t, r_1)}{2\pi \lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} - \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \tag{Gl. 5.48}$$

und

$$T_{Rücklauf} = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[ \frac{g(t, r_1)}{2\pi \lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} + \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \tag{Gl. 5.49}$$

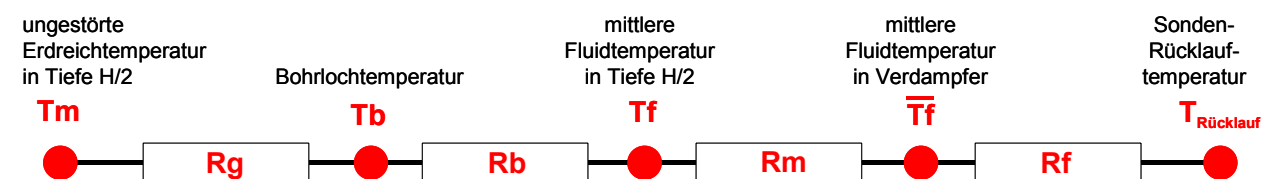


Abb. 5.9: Thermische Widerstände in einer Erdwärmesonde

Für Größenordnungsabschätzung und Plausibilisierung von Rechenergebnissen eignet sich die Erdwärmesondengleichung sehr gut.



## 6 ANHANG B: Eingabe eigener g-functions

### 6.1 Beispiel 1: Eingabe einer g-function mittels den Funktionswerten

Die von Eskilson [3] publizierte g-function von 9 Sonden in quadratischer Anordnung (cf. Abb. 6.1) für  $B/H = 0.10$  soll als eigene g-function eingegeben werden. Die Sondenlänge  $H$  sei 100 m.

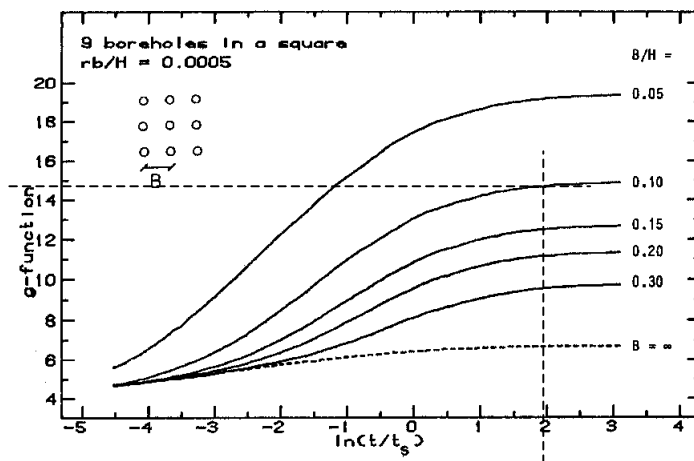


Abb. 6.1: Beispiel einer publizierten g-function (aus [3]) und Auslesen des Funktionswertes an der Stützstelle  $\ln(t/ts) = 2$ .

Im Feld 1.11 wird der letzte Auswahlpunkt „eigene Eingabe“ ausgewählt, dann bei den Feldern 1.10 und 1.13 „ja“ angewählt. Die Funktionswerte der g-function an den Stützstellen  $\ln(t/ts) = -4, -2, 0, +2, +3$  werden grafisch ausgelesen. Es ergibt sich:  $g[\ln(t/ts)=-4] = 5.09$ ,  $g[\ln(t/ts)=-2] = 7.00$ ,  $g[\ln(t/ts)=0] = 10.86$ ,  $g[\ln(t/ts)=+2] = 14.68$ ,  $g[\ln(t/ts)=+3] = 14.91$ . Diese Funktionswerte werden eingetragen in die Felder 1.15 bis 1.19. Der Sondenabstand in Feld 1.20 wird so angepasst, dass das  $B/H$ -Verhältnis in Feld 1.21 gleich 0.10 wird; d. h. Feld 1.20 muss 10 m betragen (bei einer vorgegebenen Sondenlänge  $H$  von 100 m).

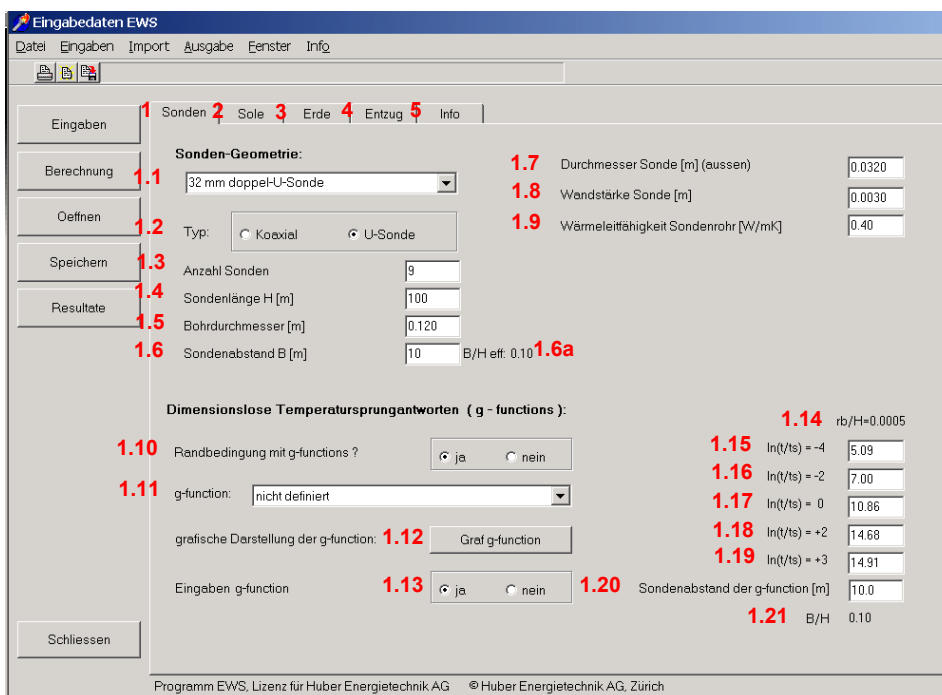
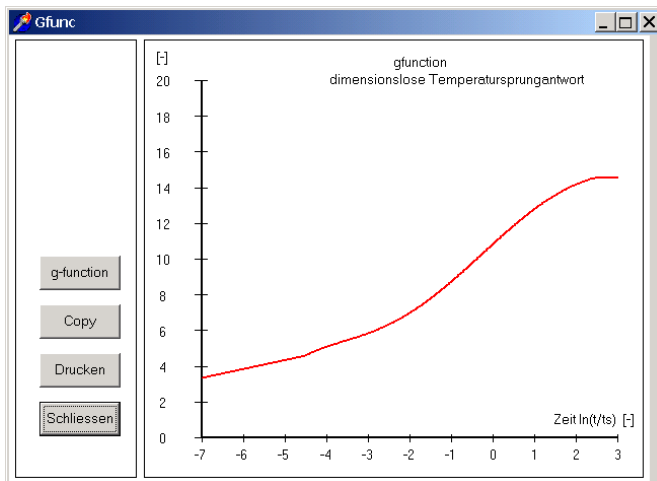


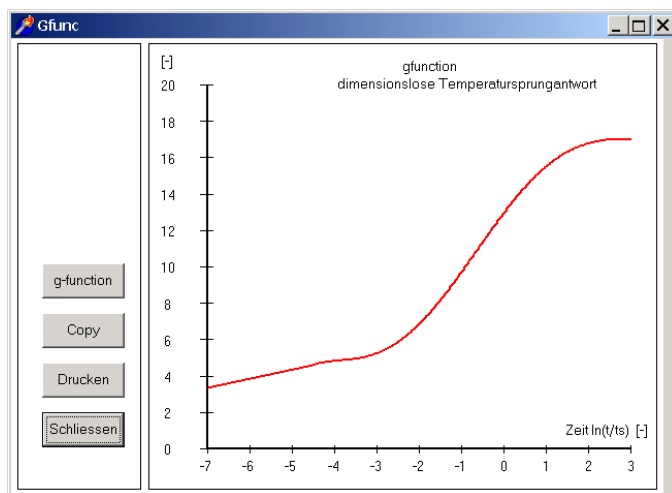
Abb. 6.2: Blatt „Sonden“, Beispiel einer selber eingegebenen g-function für 3 x 3 Sonden in quadratischer Anordnung für  $B/H = 0.10$ .

Die eingegebene g-function bzw. die vom Programm verwendete Spline-Interpolation kann visuell und quantitativ überprüft werden durch Anwählen des Feldes 1.12. Falls das Verhältnis  $B/H_{eff}$  (Feld 1.6a) ungleich dem  $B/H$ -Verhältnis der g-function (Feld 1.21) ist, so ist es nötig, vorübergehend das Verhältnis  $B/H_{eff}$  (Feld 1.6a) anzupassen auf das  $B/H$ -Verhältnis der g-function (Feld 1.21), d.h. der effektive Sondenabstand  $B$  (Feld 1.6) muss angepasst werden auf den Wert aus Feld 1.20. (Ansonsten würde durch Anwählen von Feld 1.12 diejenige g-function dargestellt, welche auf das effektive Verhältnis  $B/H_{eff}$  extrapoliert ist.) Die grafische Darstellung der eingegebenen g-function ist zu sehen in Abb. 6.3.



**Abb. 6.3:** Darstellung der selber eingegebenen g-function aus Abb. 6.2.

Falls nun das effektive Verhältnis  $B/H_{eff}$  (Feld 1.6a) von 0.10 abweicht, so wird für die EWS-Berechnung vom Programm eine automatisch extrapolierte g-function verwendet. Diese extrapolierte g-function kann durch Anwählen von Feld 1.12 angezeigt werden. Wenn also im obigen Beispiel der effektive Sondenabstand  $B$  8 m beträgt, wird dieser Wert in Feld 1.6 eingegeben. Das effektive Verhältnis  $B/H_{eff}$  ist somit 0.08. Die extrapolierte g-function (erzeugt mittels Feld 1.12) ist in Abb. 6.4 dargestellt.



**Abb. 6.4:** Darstellung der g-function aus Abb. 6.2 extrapoliert auf  $B/H_{eff} = 0.08$ .

## 7 Symbolverzeichnis

### 7.1 Lateinische Symbole

$a$	Temperaturleitfähigkeit	[m <sup>2</sup> /s]
$b$	Exzentrizität bei Doppel – U – Sonden	[-]
$B$	Sondenabstand verschiedener Erdwärmesonden	[m]
$Bu$	Rohrabstand des hinaufströmenden zum hinunterströmenden Fluid (shank spacing)	[m]
$cp_{Sole}$	spez. Wärmekapazität des Sondenfluids	[J/(kgK)]
$D_i$	Innendurchmesser der Sondenrohre	[m]
$Dim_{Ax}$	Anzahl Rechenknoten in axialer Richtung	[-]
$Dim_{Rad}$	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung	[-]
$Es$	dimensionslose Zeit von Eskilson	[-]
$f$	Gitterfaktor für das Rechengitter in radialer Richtung	[-]
$g$	dimensionslose Temperatursprungantwort der Erde nach Eskilson	[-]
$H$	Erdwärmesondenlänge, Bohrtiefe	[m]
$\dot{m}$	Massenstrom, Sondendurchsatz	[kg/s]
$m$	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung (=DimRad)	[-]
$Nu$	Nusseltzahl	[-]
$Pr$	Prandtlzahl	[-]
$\Delta p$	Druckabfall	[Pa]
$\dot{q}$	Spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde pro Länge	[W/m]
$\dot{q}_{geo}$	natürlicher, geothermischer Wärmefluss aus dem Erdinnern	[W/m <sup>2</sup> ]
$\Delta q_i$	Wärmeverlust vom hinaufströmenden ans hinunterströmende Fluid	[W/m]
$\dot{Q}$	Leistung	[W]
$Re$	Reynoldszahl	[-]
$r_0$	Innenradius des Sondenrohres	[m]
$r_s$	Aussenradius des Sondenrohrs	[m]
$r_i$	Innenradius des inneren Koaxialrohrs	[m]
$r_a$	Aussenradius des inneren Koaxialrohrs	[m]
$r_1$	Bohrradius	[m]
$r_b$	radialer Abstand von der Sondenachse (Variable)	[m]
$R_\alpha$	Wärmeübergangswiderstand (vom Fluid zum Sondenrohr)	[Km/W]
$R_a$	interner Sondenwiderstand (von hinauf- zu hinabströmendem Fluid)	[Km/W]
$R_b$	thermischer Bohrlochwiderstand (von Fluid - bis Bohrradius) in Tiefe z	[Km/W]
$R_c$	thermischer Sondenwiderstand (von Sondenrohr- bis Bohrradius)	[Km/W]
$R_f$	thermischer Verbraucherwiderstand, $(T_{Quelle} - \overline{T_f}) / \dot{q}$	[Km/W]
$R_m$	thermischer Transportwiderstand zwischen der Tiefe H/2 und der Oberfläche	[Km/W]
$\Delta T_{Grad}$	Temperaturgradient im unbeeinflussten Erdreich	[K/m]
$T_b$	Bohrlochtemperatur in Tiefe z (auf dem Radius $r_1$ )	[°C]
$\overline{T_b}$	über die Bohrtiefe gemittelte Bohrlochtemperatur (auf dem Radius $r_1$ )	[°C]
$\overline{T_f}$	mittlere Fluidtemperatur in der Tiefe z	[°C]
$\overline{T_f}$	mittlere Fluidtemperatur, $\frac{1}{2} (T_{Quelle} + T_{Rücklauf})$	[°C]
$T_{down}$	Temperatur des hinunterströmenden Fluids in der Tiefe z	[°C]
$\overline{T}_{Luft}$	langjährige Mitteltemperatur der Aussenluft	[°C]
$T_m$	ungestörte Erdreichmitteltemperatur (in der Tiefe z)	[°C]
$T_{mo}$	Jahresmitteltemperatur der Erdoberfläche	[°C]
$T_{Quelle}$	Quellentemperatur (Temperatur des ausströmenden Sondenfluids)	[°C]
$T_{Rücklauf}$	Rücklauftemperatur (Temperatur des einströmenden Sondenfluids)	[°C]
$T_{up}$	Temperatur des hinaufströmenden Fluids in der Tiefe z	[°C]
$t_s$	Sondenzeitkonstante	[s]

v	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
w	Wandstärke des Innenrohrs bei Koaxialsonden ( $r_a - r_i$ )	[m]
z	Tiefe im Erdreich, von der Erdoberfläche an gerechnet	[m]

## 7.2 Griechische Symbole

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient des Sondenfluids an die Sonde	[W/(m <sup>3</sup> K)]
$\beta$	dimensionsloser thermischer Widerstand Sondenrohr bis Fluid	[-]
$\xi$	dimensionsloser Druckverlustkoeffizient (Rohrreibungszahl, oft auch $\lambda$ )	[-]
$\gamma$	Eulerkonstante, 0.5772..	[-]
$\nu$	kinematische Viskosität der Sondenfüllung	[m <sup>2</sup> /s]
$\lambda_{\text{Earth}}$	Wärmeleitfähigkeit der Erde	[W/(mK)]
$\lambda_{\text{Fill}}$	Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung	[W/(mK)]
$\lambda_{\text{isol}}$	Wärmeleitfähigkeit des isolierten Sondenrohrs	[W/(mK)]
$\lambda_{\text{s}}$	Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre	[W/(mK)]
$\lambda_{\text{w}}$	Wärmeleitfähigkeit des Innenrohrs bei Koaxialsonden	[W/(mK)]
$\sigma$	Konduktivitätsparameter der Hinterfüllung	[-]

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C. (1959): **Conduction of heat in solids**. 2<sup>nd</sup> ed., Oxford Univers. Press, London.
- [2] Claesson, J.; Eskilson, P. (1987): **Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies**. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.
- [3] Eskilson, P. (1987): **Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes**. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden. ISBN 91-7900-298-6
- [4] Hellström, G. (1991): **Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory**. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden. ISBN 91-628-0290-9
- [5] Huber, A.; Schuler, O. (1997): **Berechnungsmodul für Erdwärmesonden**. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung. Bundesamt für Energie, Bern.
- [6] Huber, A.; Pahud, D. (1999b): **Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder**. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [7] Huber, A. (1999): **Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen**. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [8] Huber, A. (2005): **Erdwärmesonden für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation**. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [9] Huber, A. (2006): **Rechenmethode WPesti: Modellbeschrieb**. Verein MINERGIE (<http://www.minergie.ch>), AWEL (<http://www.energie.zh.ch>), FWS (<http://www.fws.ch>). Zürich, 31. Mai 2006.
- [10] Huber, A. (2006): **Planung von gekoppelten Kälte- und Wärme-Erzeugungsanlagen mit Erdwärmesonden**. Weiterbildungskurs 235, Hochschule für Technik+Architektur, Luzern
- [11] Leu, W.; Keller, G.; Mégel, Th.; Schärli, U.; Rybach, L. (1999): **Programm SwEWS-99. Berechnungsprogramm für geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (0-500m)**. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, Bern.
- [12] Leu, W.; Keller, G.; Matter, A.; Schärli, U.; Rybach, L. (1999): **Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500m)**. Bundesamt für Energie, Bern.
- [13] Merker, G. (1987): **Konvektive Wärmeübertragung**. Springer-Verlag.
- [14] Werner, A.; Bigler, R.; Niederhauser, A. et. al. (1996): **Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf**. Schlussbericht. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kt. Bern (WEA).
- [15] Huber, A.; Ochs, M. (2007): **Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen Mit der Software „EWSDruck“ Vers. 2.0**. Bundesamt für Energie, Bern.
- [16] Schärli, U.; Rohner, E.; Signorelli, S.; Wagner, R. (2007): **Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde“) mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kanton ZH und der umliegenden Kantone**. Bundesamt für Energie, Bern.
- [17] Loose, P. (2007): **Erdwärmennutzung. Versorgungstechnische Planung und Berechnung**. 2. Auflage. C.F. Müller-Verlag. ISBN 978-3-7880-7811-9.
- [18] **Norm SIA 384/6 (2010): Erdwärmesonden**. SIA Zürich.