

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

Berechnungsmodul für **Erdwärmesonden**

ausgearbeitet durch

Arthur Huber
Othmar Schuler

Huber Energietechnik,
Ingenieur- und Planungsbüro SIA
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Simulationsmodul für Erdwärmesonden (EWS) zu erstellen. Das Modul soll später in System-Simulationsprogrammen wie TRNSYS, YUM und WPcalc eingesetzt werden können, um damit die Quelltemperatur für eine Wärmepumpe zu berechnen. Es soll das Verhalten von Doppel-U-Sonden auch über mehrere Jahre korrekt abbilden. Ausserdem soll das transiente Verhalten beim Anfahren der Sonde mit berücksichtigt werden, um so dem in der Praxis üblichen, taktenden Betrieb Rechnung tragen zu können. Die Rechenzeit zur Simulation eines Jahres darf mit heutigen Personal Computern mit Pentium-Prozessoren einige Minuten nicht übersteigen.

Das gestellte Anforderungsprofil wird mit einer dynamischen Simulation der Sole und des Erdreiches im Sonden-Nahbereich (1.5 m - 2 m) mit dem Crank-Nicholson-Verfahren gelöst. Die äusseren Temperatur-Randbedingungen werden mit einem neuen Ansatz berechnet, der auf der Trichterformel von Werner (1996) basiert. Diese Trichterformel gehört in eine Gruppe von Ansätzen, die mit der Linienquellen-Theorie von Kelvin erstmals analytisch hergeleitet wurden. 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 (Faltung).

Eine Validierung anhand von Langzeitmessungen (4½ Jahre) an einer Erdwärmesondenanlage für ein Einfamilienhaus in Elgg (Eugster, 1991) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung. Auch das Wiederauffüllen des Temperaturtrichters als Randbedingung für das Simulationsgebiet wird korrekt berechnet.

Das dynamische Verhalten des EWS-Moduls wird mit zwei Messungen in Burgdorf (Werner, Bigler et al., 1996) validiert. Eine dieser Messungen zeigt eine Sprungantwort über eine Messdauer von 5 Wochen Dauer. Bei der anderen wurde ein zyklisch taktender Betrieb einer Sonde über 2 Tage gemessen. Beide Messungen stimmen gut mit der Rechnung überein.

In einer Sensitivitätsanalyse werden die Einflüsse der Betriebszeit, der Sondenlänge, des Sondendurchmessers, der Wärmeleitfähigkeit von Erde und Hinterfüllung sowie des Solemassenstroms geprüft und mit dem Erdwärmesondenmodell des Wärmepumpen-Simulationsprogrammes WPcalc (Nani et al., 1994) verglichen. Beide Ansätze zeigen bei der Parametervariation den erwartete Einfluss auf die Quelltemperatur. Unterschiede zwischen dem EWS-Modul und dem WPcalc-Ansatz sind bei der Dynamik und der Antwort auf eine verlängerte Betriebszeit (Sommerentzug) festzustellen.

Darüber hinaus wird empfohlen, das vorliegende EWS-Modell als zusätzliche, optionale Rechenmethode in den Programmen WPcalc und ev. YUM einzubauen.

Mit den vorliegenden Modellen kann das Verhalten des Erdreichs im Sondennahbereich bis zu 5 Jahre simuliert werden. Burkhart et al. (1989) haben gezeigt, dass bei korrekt dimensionierten Anlagen danach praktisch keine Temperaturabsenkung in der Erde mehr erfolgt und sich eine längere Simulation somit erübrigt. Um Rechenzeit zu sparen und um Sondenfelder zu simulieren, empfiehlt es sich, die Anfangstemperaturen für die Simulation vorgängig mit einer Antwortfunktions - Methode (z.B. Hellström, 1991) zu berechnen. Der Einbau dieser Methode in das vorliegende EWS-Modul wäre als Weiterentwicklung prüfenswert.

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

Die vorliegende Arbeit kam aufgrund einer Anregung von Dr. Thomas Afjei, Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung zustande.

In Zusammenarbeit mit Michael Wetter, Zentralschweizerisches Technikum Luzern, wurde das im Anhang dieses Berichtes abgedruckte PASCAL - Programmmodul bereits in TRNSYS implementiert (Wetter, Huber, 1997). Es soll als Zusatzmodul für TRNSYS angeboten werden.

Die für die Validierung nötige Aufbereitung der Messresultate des Thermoprogramms Erdwärmesonden, Burgdorf, wurde von Hr. Roland Bigler, Werner + Partner AG durchgeführt. Dr. Walter Eugster, Polydynamics Engineering Zürich, stellte die Resultate seiner Messungen an der Erdwärmesondenanlage in Elgg zur Verfügung. Die Vergleichsrechnungen mit dem Programm WPcalc wurden von Hr. Thomas Baumgartner, Dübendorf erstellt. Dr. Daniel Pahud, EPFL, führte die Berechnungen mit dem Programm SBM durch. Wir danken diesen Herren für die Mitarbeit und die wertvolle Diskussion der Validierungsrechnungen.

Diese Arbeit wurde in verdankenswerter Weise von der folgenden Arbeitsgruppe begleitet:

- Dr. Thomas Afjei INFEL, Zürich
- Thomas Baumgartner Ingenieurbüro für Haustechnik, Dübendorf
- Roland Bigler Werner + Partner AG, Burgdorf
- Dr. Daniel Pahud EPFL, Lausanne
- Ernst Rohner Grundag AG, Gossau

Ausserdem danken wir den Herren Dr. Robert Hopkirk, Polydynamics Engineering Männedorf und Dr. Burkhard Sanner, Universität Giessen, für die informative Diskussion und die detaillierten Hinweise zu den Modellen und den Stoffparametern.

Im weiteren danken wir Herrn Dr. Zogg, Programmleiter UAW, für seine konstruktiven Hinweise und das Zustandekommen dieser Arbeit.

Abstract

In the last few years, a couple of programs have been developed to simulate heat pump systems, such as TRNSYS (Klein et al., 1996), YUM (Afjei, 1995) or WPcalc (Nani et al., 1994). Besides air, vertical borehole heat exchangers are the most common heat sources for residential heat pumps in Switzerland. Therefore it is necessary, that the just mentioned computer codes are able to calculate this type of heat source properly.

It is the objective of this work to develop a program module, that calculates the source temperature for ground coupled heat pumps with vertical borehole heat exchangers being adjustable to the three simulation programs mentioned before. It should be able to simulate the behavior of double-U-pipe systems, the most common type of vertical boreholes in Switzerland. Furthermore, it should be able to model the transient behavior of ground coupled heat pump systems, since most of this heat pumps are controlled by turning them on and off. And at last, it should be possible to operate the whole program on a personal computer, where the simulation of a whole year should take not more than a few minutes of computational time.

The problem can be solved with a simulation of the earth in a radius of about 2m around the borehole with the Crank-Nicholson algorithm. In vertical direction, the earth is divided into up to 8 horizontal layers. Each layer can have thermal properties of its own. The brine is simulated unsteadily to take into account the transient behavior when starting up. For the outer boundary condition, the analytical formula of Werner (1996) for constant heat extraction can be adapted for the present problem. This formula belongs to a group of analytical solutions first described by Kelvin in his line source theory. By superposing constant heat extractions, starting at different time steps, it is possible to calculate the temperature profile at the outer boundaries of the simulation area and even to predict the refilling of the temperature sink in the summer properly.

Comparisons between measurements over a period of 4 ½ years at a ground coupled heat pump system in Elgg (Eugster, 1991) and calculations with the present models show a very good correspondence, even in the last year.

The transient behavior is tested in two comparisons with measurements at a borehole test field in Burgdorf (Werner, Bigler et al., 1996). This validation shows a good correspondence, too.

Until now, the heat pump simulation program WPcalc used a very simple model for boreholes as heat source for heat pumps. Compared with the present model, the existing WPcalc model shows a similar average source temperature, as long as the borehole is dimensioned properly. What the present WPcalc model does not take into account is the heat production for tap water in the summer and the important deviation of the source temperature at periods of outside temperatures that are lower than average. Therefore the implementation of the new EWS-module into WPcalc is recommended, thus reducing the two problems mentioned above.

The present EWS-module is being implemented in TRNSYS (Wetter, Huber, 1997) and foreseen for distribution as a supplementary unit for TRNSYS.

A combination of the response factor method of Hellström and Sanner (1994) with the present EWS-module could give an improved guess for the starting temperature conditions in the ground and the influence of adjacent boreholes in a larger field. The implementation of this addition should be taken into consideration.

Inhaltsverzeichnis

1 AUSGANGSLAGE UND ZIEL DER ARBEIT	6
1.1 Zielsetzungen	6
1.2 Lösungsansatz	6
2 MODELLIERUNG EINER DOPPEL-U-SONDE	8
2.1 Simulation des Sonden-Nahbereichs	8
2.1.1 Crank-Nicholson-Ansatz für den Sonden-Nahbereich	8
2.1.2 Lösungsalgorithmus	8
2.1.3 Rechengitter	9
2.1.4 Wärmekapazitäten C	11
2.1.5 Thermische Widerstände R und Leitfähigkeit L	11
2.2 Modellierung der Sole	15
2.2.1 Instationäre Berechnung der Sole	16
2.2.2 Stationäre Berechnung der Sole	17
2.3 Wärmeübergangskoeffizient Sonde-Sole	18
2.3.1 Wärmeübergangskoeffizient α_1 beim Betrieb der Erdwärmesonde	18
2.3.2 Wärmeübergangskoeffizient α_0 beim Stillstand der Erdwärmesonde	19
2.4 Aeussere Randbedingung mit der Trichterformel	20
2.5 Druckabfall in der Erdwärmesonde	22
3 VERGLEICH MIT MESSUNGEN	23
3.1 Versuch 4 der Messung in Burgdorf	23
3.2 Versuch 6 der Messung in Burgdorf	28
3.3 Vergleich mit Messung in Elgg	30
4 SENSITIVITÄT UND VERGLEICH MIT WPCALC UND SBM	34
4.1 Referenzfall	34
4.2 Parameter-Variationen und Vergleich mit WPcalc	37
4.2.1 Variation der Betriebszeit der Erdwärmesonde	37
4.2.2 Variation der Sondenlänge	38
4.2.3 Variation der Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} der Erde	39
4.2.4 Variation der Sondendurchmesser	40
4.2.5 Variation des Solemassenstroms	41
4.2.6 Variation der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung	41
4.2.7 Schlussfolgerungen und Ausblick	42
4.3 Vergleich mit SBM	43
5 PROGRAMMBESCHRIEB	47
5.1 Flussdiagramme	47
5.1.1 Modulaufruf aus dem Hauptprogramm	47
5.1.2 Simulation des Zeitschrittes	48
5.2 Parameter im EWS-Modul	49
5.2.1 Eingabeparameter	49
5.2.2 Ausgabewerte	54
5.2.3 Parametereingabe im Hauptprogramm und Eingabefile	54
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN	56
7 SYMBOLVERZEICHNIS	57
8 LITERATURVERZEICHNIS	59
9 ANHANG	61
9.1 Pascal - Programm	61

1 Ausgangslage und Ziel der Arbeit

1.1 Zielsetzungen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Simulationsmodul für Erdwärmesonden (EWS) zu erstellen. Das Modul soll später in System-Simulationsprogrammen wie TRNSYS, YUM (Afjei, 1989) und eventuell WPCalc (Nani, 1994) eingesetzt werden können, um damit die Quelltemperatur für eine Wärmepumpe zu berechnen. Das Programmmodul soll in der Programmiersprache PASCAL erstellt werden.

Mit dem Programmmodul sollen die in der Schweiz am weitesten verbreiteten Doppel-U-Sonden über mehrere Jahre korrekt berechnet werden können.

Mit den heutigen Wärmepumpen-Modellen, wie z.B. dem Wärmepumpenmodell des Simulationsprogrammes YUM (Afjei, 1989), ist es möglich, auch das Anfahrverhalten zu simulieren. Dieses hat auf den Energiebedarf der Wärmepumpe einen nicht zu unterschätzenden Einfluss. Ein Sondenmodell für eine Systemsimulation sollte deshalb auch das transiente Verhalten beim Anfahren der Sonde mit berücksichtigen und so dem in der Praxis üblichen, taktenden Betrieb Rechnung tragen können.

1.2 Lösungsansatz

Berechnungen von Pahud (1996) zeigen, dass bei Sonden von über 100m Länge die vertikale Wärmeleitung im Sondennahbereich (<5m Abstand von der Sonde) bei einem Betrachtungshorizont von bis zu 10 Jahren kaum ins Gewicht fällt. Verzichteten wir in diesem Bereich auf die Berechnung der vertikalen Wärmeleitung, so können wir die Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten schichtweise eindimensional lösen, wodurch bei der Simulation die Rechenzeit stark reduziert werden kann. Schichtweise sind so unterschiedliche Stoffwerte möglich, so dass auch die häufig vorkommenden, unterschiedlichen Gesteinsschichten im Erdreich mitberücksichtigt werden können. Dies kann dann interessant sein, wenn bei bekanntem Untergrund die Frage beantwortet werden soll, ob es sinnvoller ist, zwei weniger tiefe Bohrungen oder eine einzige, tiefere Bohrung zu erstellen. Diese Frage lässt sich nicht allgemein beantworten, da die Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Gesteinsschichten sehr unterschiedlich sein können.

Selbstverständlich sind Aussagen, die über die Herkunft der Wärme Aufschluss geben, mit einem solchen Modell nicht zulässig. Im stationären Zustand, der sich bei einem Wärmepumpenbetrieb nach einigen Jahren immer einstellt (in gewissen Fällen zwar nach mehr als 5 Jahren und auf einem unbefriedigenden Temperaturniveau), kommt ja 100% des Wärmeflusses über vertikale Wärmeleitung von oben und von unten. Dies ändert aber nichts am Nutzen des vorgesehenen Modellansatzes, da eine nach den Grundsätzen des AWP (Merkblatt T1, 1996) richtig dimensionierte Erdwärmesonde sich bereits nach 2-5 Jahren so nahe beim stationären Zustand befindet, dass kein Unterschied zu diesem mehr messbar ist (Burkhart et al., 1989).

Für die Simulation der Erdreichtemperaturen im Sonden-Nahbereich (1.5 m - 2 m) soll das Crank-Nicholson-Verfahren angewendet werden.

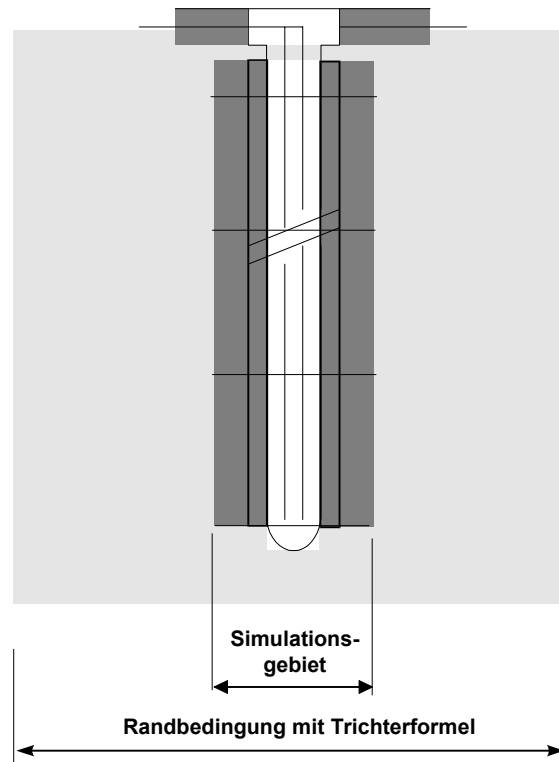


Abb 1-1: *Simulation des Erdreiches im Sonden-Nahbereich. Berechnung der Randbedingungen mit der Trichterformel von Werner (1996)*

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 einem neuen Ansatz berechnet, der auf der Trichterformel von Werner (1996) basiert. Diese Trichterformel gehört in eine Gruppe von Ansätzen, die mit der Linienquellen-Theorie von Kelvin erstmals analytischen hergeleitet wurden. 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 der Trichterformel 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 (z.B. Eskilson, 1986 oder Eugster, 1991).

Als Startwert für die Simulation muss die Temperatur in der Erde vorgegeben werden. Zur Voraussage, wie sich diese Temperatur nach mehreren Jahren Sondenbetrieb um eine Einzelsonde oder in einem Sondenfeld verhält, eignen sich Responsefaktor-Methoden (Hellström 1991). Die Kombination des vorliegenden EWS-Modells mit den g-Funktionen aus dem EED-Modell von Hellström und Sanner (1994) wären für eine künftige Weiterentwicklung deshalb prüfenswert. Mit dieser Methode würde die Rechenzeit nur unwesentlich verlängert.

2 Modellierung einer Doppel-U-Sonde

2.1 Simulation des Sonden-Nahbereichs

2.1.1 Crank-Nicholson-Ansatz für den Sonden-Nahbereich

Die eindimensionale Fouriergleichung mit der Temperatur T lautet:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{wobei } T = T(t, x) \quad \text{und} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2-1)$$

Als implizite Differenzengleichung kann sie mit dem Crank-Nicholson-Ansatz geschrieben werden als:

$$\begin{aligned} T_{k+1,j} - \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (T_{k+1,j-1} - T_{k+1,j}) - \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (T_{k+1,j+1} - T_{k+1,j}) = \\ T_{k,j} + \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (T_{k,j-1} - T_{k,j}) + \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (T_{k,j+1} - T_{k,j}) \end{aligned} \quad (2-2)$$

Der Index k beschreibt die Zeitkoordinate, und der Index j die radiale Ortskoordinate. C ist die Wärmekapazität des Rechenknotens und L die thermische Leitfähigkeit zwischen zwei Rechenknoten. Der thermische Widerstand R ist der Kehrwert der thermischen Leitfähigkeit L.

2.1.2 Lösungsalgorithmus

In Matrix-Schreibweise kann die Gleichung 2-2 am Beispiel mit 3 Masseknoten geschrieben werden als:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -dt L_1 & 2C_1 + dt L_1 + dt L_2 & -dt L_2 & 0 & 0 \\ 0 & -dt L_2 & 2C_2 + dt L_2 + dt L_3 & -dt L_3 & 0 \\ 0 & 0 & -dt L_3 & 2C_3 + dt L_3 + dt L_4 & -dt L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}_i^{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ dt L_1 & 2C_1 - dt L_1 - dt L_2 & dt L_2 & 0 & 0 \\ 0 & dt L_2 & 2C_2 - dt L_2 - dt L_3 & dt L_3 & 0 \\ 0 & 0 & dt L_3 & 2C_3 - dt L_3 - dt L_4 & dt L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}_i^k \quad (2-3)$$

Wir wollen im folgenden die obige Gleichung symbolisch darstellen als:

$$[A] \cdot \{T\}_i^{k+1} = [F] \cdot \{T\}_i^k \quad (2-4)$$

Durch Multiplikation dieser Beziehung mit A^{-1} kann die Vektorgleichung einfach gelöst werden:

$$\{T\}_i^{k+1} = [A]^{-1} \cdot [F] \cdot \{T\}_i^k = [B] \cdot \{T\}_i^k \quad (2-5)$$

mit

$$[B] = [A]^{-1} \cdot [F] \quad (2-6)$$

Die Matrix B bleibt während der ganzen Simulation unverändert. Es genügt also, B einmal auszurechnen. Da wir aber für jede Erdschicht eigene Stoffwerte zulassen, muss für jede axiale Schicht eine eigene Matrix B_i berechnet und gespeichert werden.

Um Verwechslungen mit der Soletemperatur zu vermeiden, wird nachfolgend im Simulationsgebiet der Erde die Temperatur T durch T_{Earth} ersetzt.

2.1.3 Rechengitter

Die Berechnungen werden in einem axialsymmetrischen Rechengitter gemäss Abb. 2-1 durchgeführt. In axialer Richtung wird die Erde in gleiche Teile der Länge dl aufgeteilt.

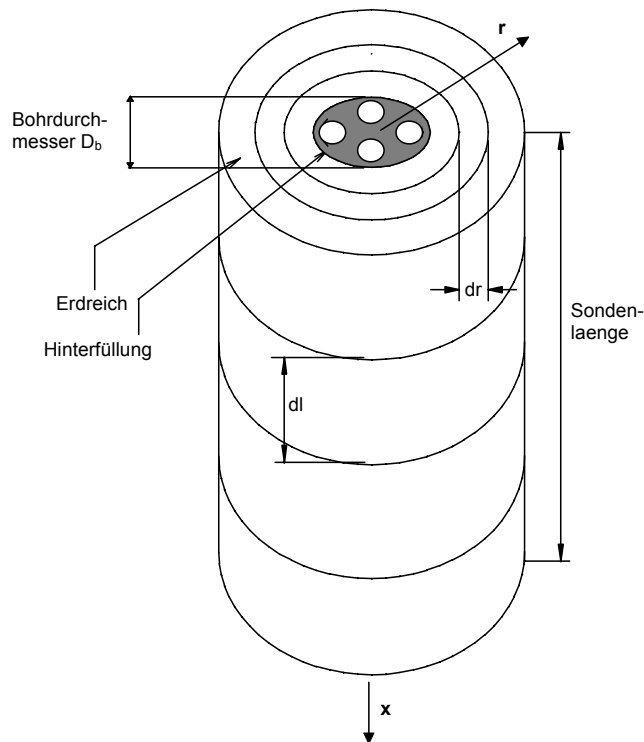


Abb 2-1: Axialsymmetrisches Rechengitter für das Simulationsgebiet

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

$$\text{Gitterfaktor } f = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}} \quad (2-7)$$

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 (d.h. $m = \text{DimRad}$):

$$r_0 = \frac{D_i}{2} = \frac{\text{Innendurchmesser der Sondenrohre}}{2}$$

$$r_1 = \frac{D_b}{2} = \frac{\text{Bohrdurchmesser}}{2}$$

$$\text{für } j \geq 2: \quad r_j = r_{j-1} + (r_m - r_1) \frac{1 - f}{1 - f^{m-1}} f^{j-2} \quad (2-8)$$

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:

$$rz_j = \sqrt{\frac{r_j^2 + r_{j-1}^2}{2}} \quad (2-9)$$

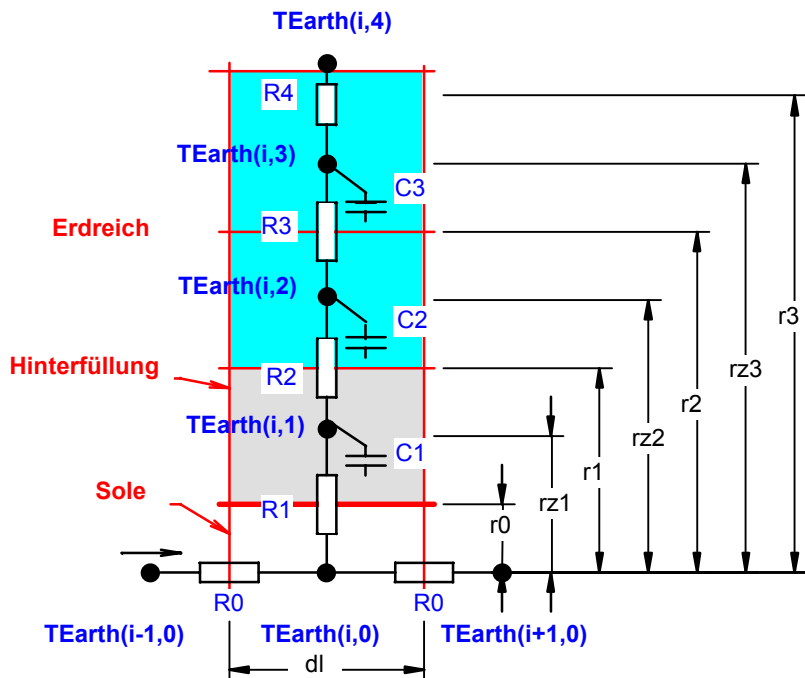


Abb 2-2: Konvention der Bezeichnungen am Element dl für 3 radiale Massenknotten ($\text{DimRad}=3$)

2.1.4 Wärmekapazitäten C

Die Wärmekapazitäten C_j sind am Beispiel mit 3 Rechenknoten (d.h. DimRad=3) wie folgt zu berechnen:

$$\begin{aligned}C_1 &= cp_{\text{Fill}} \rho_{\text{Fill}} \pi (r_1^2 - 4 r_0^2) dl \\C_2 &= cp_{\text{Erde}} \rho_{\text{Erde}} \pi (r_2^2 - r_1^2) dl \\C_3 &= cp_{\text{Erde}} \rho_{\text{Erde}} \pi (r_3^2 - r_2^2) dl\end{aligned}\tag{2-10}$$

Dabei ist dl die Schichtdicke, wenn die Erde in axialer Sondenrichtung in DimAxi gleiche Elemente unterteilt wird:

$$dl = \frac{\text{Sondenlänge}}{\text{DimAxi}}\tag{2-11}$$

Die Wand des Sondenrohres wird also vernachlässigt (d.h. als Teil der Hinterfüllung gerechnet).

2.1.5 Thermische Widerstände R und Leitfähigkeit L

Der thermische Widerstand R ist der Kehrwert der thermischen Leitfähigkeit L. Dieser ist definiert durch:

$$L = \frac{1}{R} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{\text{Earth}}}\tag{2-12}$$

Um den thermischen Widerstand an einem Zylinder in radialer Richtung zu berechnen, müssen wir zunächst die Temperaturdifferenz in Funktion des Radius bestimmen. Da der Wärmefluss \dot{Q} zwischen zwei Masseknoten konstant ist, gilt

$$\dot{q} = \frac{dT_{\text{Earth}}}{dr} \lambda = \frac{\dot{Q}}{2 \pi r dl}\tag{2-13}$$

Durch Integration zwischen dem Radius r_1 und r_2 lässt sich daraus der Temperaturabfall zwischen zwei Masseknoten berechnen:

$$\Delta T_{\text{Earth}} = \int dT_{\text{Earth}} = \int \frac{\dot{Q}}{2 \pi r dl \lambda} dr = \frac{\dot{Q}}{2 \pi dl \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}\tag{2-14}$$

Der thermische Widerstand zwischen dem Radius r_1 und r_2 beträgt somit

$$L = \frac{1}{R} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{\text{Earth}}} = \frac{2 \pi dl \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}}\tag{2-15}$$

Die thermischen Widerstände lassen sich wie in der Elektrotechnik addieren. Für Doppel-U-Erdwärmesonden berechnen sich die thermischen Widerstände am Beispiel mit 3 Rechenknoten (d.h. DimRad=3) wie folgt:

$$R_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2 \pi \alpha r_0 dl} + \frac{1}{2 \pi \lambda_{\text{Fill}} dl} \ln \frac{r_1 - rz_1}{r_0} \right) \quad (2-16)$$

$$R_2 = \frac{1}{2 \pi dl} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{Fill}}} \ln \frac{r_1}{rz_1} + \frac{1}{\lambda_{\text{Erde}}} \ln \frac{rz_2}{r_1} \right) \quad (2-17)$$

$$R_3 = \frac{1}{2 \pi dl} \frac{1}{\lambda_{\text{Erde}}} \ln \frac{rz_3}{rz_2} \quad (2-18)$$

$$R_4 = \frac{1}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}} dl} \ln \frac{r_3}{rz_3} \quad (2-19)$$

Die Widerstände R_3 und R_4 lassen sich aus der Fourier-Gleichung in Radialkoordinaten exakt herleiten. Bei den Gleichungen für R_1 und R_2 hingegen handelt es sich um einen vereinfachten Ansatz. Streng genommen ist es unmöglich, die zweidimensionale Situation einer Doppel-U-Sonde (cf. Abb 2-3) durch die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung exakt zu beschreiben. Es besteht deshalb im Programm die optionale Möglichkeit, R_1 als Parameter vorzugeben.

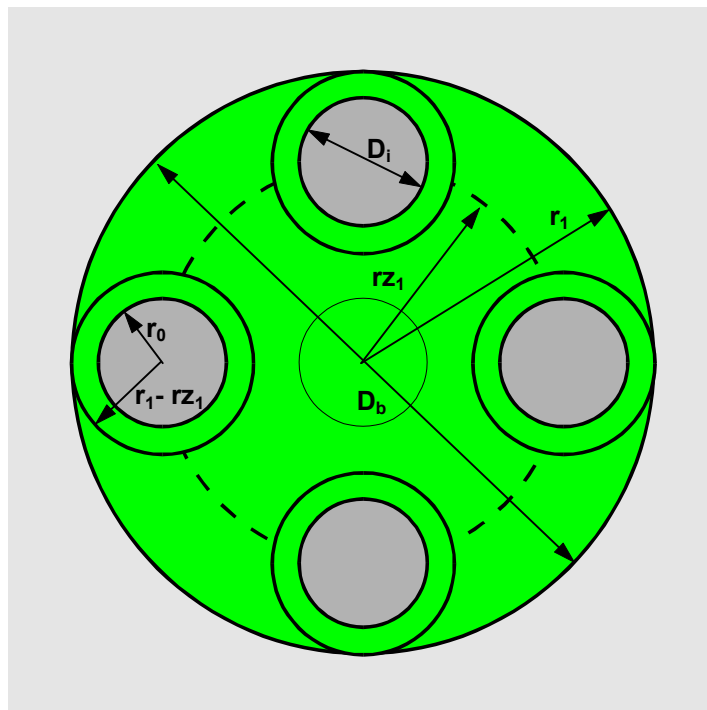


Abb 2-3: Angestrebte, möglichst periphere Lage der 4 Sondenrohre in der Bohrung

Anstelle von R_1 und R_2 wird in der Literatur (z.B. Hellström, 1991) auch etwa der „internal thermal resistance“ R_a und der „borehole thermal resistance“ R_b verwendet. R_a ist der thermische Widerstand zwischen der hinunter- und der hinaufströmenden Sole, multipliziert mit der Sondenlänge dl . Damit kann er in unserer Notation auch geschrieben werden als:

$$R_a = 4 \, dl \, R_1 \quad (2-20)$$

R_b ist definiert als:

$$R_b = \frac{dl (T_{Sole} - T_b)}{\dot{Q}} \quad (2-21)$$

wobei T_b die sogenannte „borehole temperature“, die Temperatur beim Radius r_1 ist. T_{Sole} (= $T_{Earth}(i,0)$) ist die durchschnittliche Soletemperatur der Schicht i , also der Durchschnitt zwischen der hinunter- und hinaufströmenden Sole.

Mit der Definition 2-21 lässt sich aus 2-16 die Beziehung zwischen R_1 und R_b herleiten. Diese ist:

$$R_b = R_1 \, dl + \frac{1}{2 \pi \lambda_{Fill}} \ln \frac{r_1}{rz_1} \quad (2-22)$$

Ist also R_b bekannt (z.B. durch eine zweidimensionale, numerische Berechnung mit einem Wärmeleitungsprogramm), so kann mit 2-22 auch R_1 berechnet werden. Wird im Programm anstelle von R_1 der Wert für R_b vorgegeben, so berechnet das Programm daraus automatisch mit 2-22 den Wert für R_1 .

Wird andererseits R_a und R_b vorgegeben, so berechnet sich R_1 und R_2 daraus wie folgt:

$$R_1 = \frac{R_a}{4 \, dl} \quad (2-23)$$

und

$$R_2 = \frac{(R_b - \frac{R_a}{4})}{dl} + \frac{1}{2 \pi \, dl \, \lambda_{Erde}} \ln \frac{rz_2}{r_1} \quad (2-24)$$

Auch diese Option ist im Programm EWS möglich, vorausgesetzt dass $R_a < 4R_b$ ist.

Die Wahl des Ansatzes für die thermischen Widerstände R_1 und R_2 ist von entscheidender Bedeutung für das Resultat der Berechnungen. Der Grund dafür liegt in den Stoffwerten des Hinterfüllungsmaterials. Heute wird in der Regel mit Bentonit hinterfüllt. Die Wärmeleitfähigkeit λ_{Fill} für Bentonit liegt bei ca. 0.7 W/mK und ist somit wesentlich tiefer als die sie umgebende Gesteinsschichten, die meist im Bereich von 1.5 bis 3 W/mK liegen. Die Widerstände R_1 und R_2 bilden somit den eigentlichen Flaschenhals beim Entzug der Wärme aus dem Erdreich. Es ist deshalb interessant zu untersuchen, wie das Problem in anderen Erdsondenprogrammen gelöst wurde:

- Das Programm SBM berechnet intern R_a und R_b für Koaxialsonden, Einfach-U-Sonden und Dreirohrsonden. Für die übrigen Sondengeometrien (z.B. Doppel-U-Sonden) muss R_a und R_b vorgängig in einem separaten, zweidimensionalen Wärmeleitungsprogramm berechnet und dann dem Programm eingegeben werden.
- Das Programm EED berechnet intern R_a und R_b für Koaxialsonden, Einfach-U-Sonden, Doppel-U-Sonden und Dreirohrsonden, wobei die Parameter über die Lage der Sonden in der Bohrung vorgegeben werden können.
- Nur Koaxialsonden lassen sich mit dem Programm COSOND berechnen.
- Das Programm NUSOND berechnet alle thermischen Widerstände. Dazu ist allerdings ein Uebergang von kartesischen auf zylindrische Koordinaten im Bereich der Sondenrohre nötig.

Alle oben beschriebenen Ansätze haben ein Hauptproblem: Die Lage der Sonden in der Bohrung ist in der Regel gar nicht bekannt. Angestrebt wird eine möglichst periphere Lage der Sonden im Bohrloch. Unterstützt wird dies auch durch die Einbringung des Hinterfüllungsmaterials im Zentrum der 4 Sondenrohre einer Doppel-U-Sonde. Trotzdem kann damit die gewünschte, periphere Sondenlage nicht garantiert werden. Ausserdem sind Luft einschüsse am Sondenrohr möglich. Diese Luft einschüsse können teilweise auch erst im Betrieb durch Uebernutzung der Sonde entstehen (gefrieren und dadurch abrutschen der Hinterfüllung). Eine exakte Berechnung basiert somit immer auf Annahmen über die Lage der Sondenrohre und der Anbindung der Hinterfüllung. Ein empirischer Ansatz wie in den Gleichungen 2-16 und 2-17 vorgestellt, kann deshalb ebenso brauchbare Resultate liefern wie eine exakte, zweidimensionale Berechnung mit einem entsprechenden Wärmeleitungsprogramm. Die meisten publizierten Messresultate stützen die Annahme, dass die Sondenrohre recht peripher in der Bohrung liegen.

Im vorliegenden Programm hat der Benutzer also die Wahl zwischen den folgenden Optionen:

- Keine speziellen Eingaben: EWS verwendet die Formel 2-16 und 2-17 für R_1 und R_2
- R_1 wird vorgegeben: EWS verwendet die Eingabegrösse für R_1 und 2-17 für R_2
- R_b wird vorgegeben: EWS verwendet die Formel 2-22 für R_1 und 2-17 für R_2
- R_b und R_a werden vorgegeben: EWS verwendet die Formel 2-23 für R_1 und 2-24 für R_2

2.2 Modellierung der Sole

Für die folgenden Betrachtungen werden die beiden Sondenrohre zusammengefasst, in denen die Sole nach unten fließt und diejenigen, bei denen die Sole hinaufströmt. Dabei berechnet sich die Strömungsgeschwindigkeit v einer Doppel-U-Sonde aus dem Solemassenstrom \dot{m} mit

$$v = \frac{\dot{m}}{2 \pi r_0^2 \rho_{Sole}} \quad (2-25)$$

Analog zu den thermischen Leitfähigkeiten in der Erde, kann auch in der Sole die Leitfähigkeit L_0 definiert werden:

$$L_0 = \frac{\dot{Q}_{Ein} - \dot{Q}_{Aus}}{T_{Ein} - T_{Aus}} = cp_{Sole} \dot{m} = 2 \pi r_0^2 v \rho_{Sole} cp_{Sole} \quad (2-26)$$

Wir stellen nun die Bilanz für das Sole-Element der Länge dl (cf. 2-11) auf. Das Bilanzelement (bestehend aus den beiden zusammengefassten Sondenstücken der Doppel-U-Sonde) hat somit eine Masse m von

$$m = 2 \pi r_0^2 dl \rho_{Sole} \quad (2-27)$$

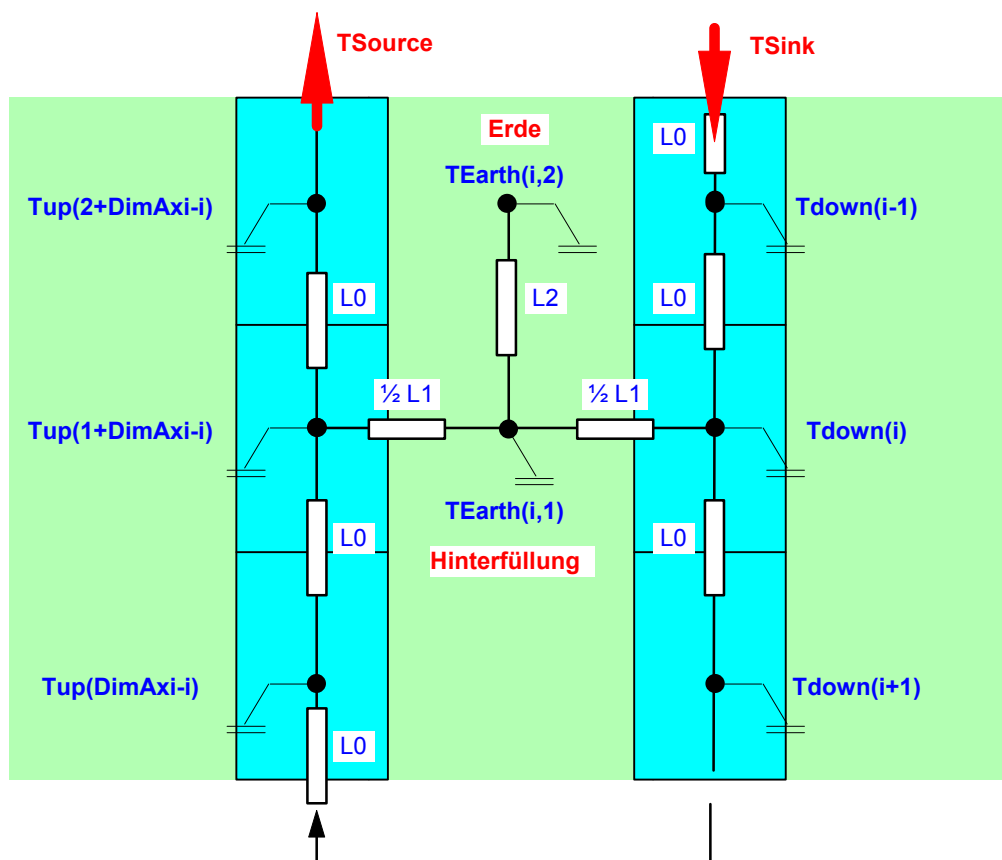


Abb 2-4: dynamische Berechnung der Sole mit explizitem Zeitschrittverfahren

2.2.1 Instationäre Berechnung der Sole

Für die Modellierung der Sole soll ein dynamischer Ansatz gewählt werden. Die Solentemperatur wird dabei mit einem expliziten Zeitschrittverfahren berechnet. Dadurch wird auch eine Erwärmung der Sole beim Stillstand der Solepumpe mitberücksichtigt

Aus der Energiebilanz für das Bilanzelement i ergibt sich so für die Soletemperatur T_{down_i} der hinunterfließenden Sole:

$$T_{down_{k+1,i}} = T_{down_{k,i}} + \left(T_{down_{k+1,i-1}} - T_{down_{k,i}} \right) \frac{L_0 dt_2}{m cp} + \left(T_{Earth_{k,i,1}} - T_{down_{k,i}} \right) \frac{L_1 dt_2}{2 m cp} \quad (2-28)$$

und der hinaufströmenden Sole mit der Soletemperatur T_{up_i} :

$$T_{up_{k+1,i}} = T_{up_{k,i}} + \left(T_{up_{k+1,i-1}} - T_{up_{k,i}} \right) \frac{L_0 dt_2}{m cp} + \left(T_{Earth_{k,1+DimAxi-i,1}} - T_{up_{k,i}} \right) \frac{L_1 dt_2}{2 m cp} \quad (2-29)$$

mit den Randbedingungen

$$T_{down_{k+1,0}} = T_{Sink} \quad (2-30)$$

$$T_{up_{k+1,0}} = T_{down_{k+1,DimAxi}} \quad (2-31)$$

$$T_{Source} = T_{up_{k+1,DimAxi}} \quad (2-32)$$

Dabei ist T_{Sink} die Eintrittstemperatur der Sole in die Sonde und T_{Source} die Austrittstemperatur. Der Index k beschreibt die Zeitkoordinate, der Index i die axiale Ortskoordinate, aufsteigend in Fließrichtung der Sole. Dieser Ansatz entspricht einer Upwind-Interpolation. Die Gleichungen (2-28) und (2-29) können nun in Fließrichtung gelöst werden.

Als Eigenheit dieses Modells ist zu bemerken, dass der gesamte Wärmefluss über den Hinterfüllungs-Knoten fließt, dass es also keinen direkten Wärmefluss von der hinunterfließenden an die hinaufströmende Sole gibt (cf. Abb 2-4:.) Diese Vereinfachung kann dank der peripheren Anordnung der Sondenrohre in der Bohrung gemacht werden, wodurch L_1 relativ klein wird, d.h. die Sole relativ stark an die Hinterfüllung gekoppelt ist.

Dank dem Superpositionsprinzip für lineare Systeme kann die neue Randbedingung $T_{Earth}(i,0)$ für die Simulation des Erdreiches nun einfach als Durchschnitt von $T_{Down}(i)$ und $T_{Up}(1+DimAxi-i)$ berechnet werden. Da aus Stabilitätsgründen die Solenberechnung einen kleineren Zeitschritt (dt_2) benötigt als die Erdreichberechnung (dt), muss diese Mittelung ebenfalls über den ganzen Rechenschritt dt des Erdreiches erfolgen. Dabei gilt:

$$substep = \frac{dt}{dt_2} = \frac{\text{Simulationszeitschritt für die Erde}}{\text{Simulationszeitschritt für die Sole}} \quad (2-33)$$

Damit gilt:

$$T_{Earth_{i,0}} = \frac{\sum_{k=1}^{substep} (T_{Down_i} + T_{Up_{1+DimAxi-i}})}{2 substep} \quad (2-34)$$

2.2.2 Stationäre Berechnung der Sole

Um die Rechenzeit zu verkürzen ist es auch möglich, die Sole stationär zu berechnen. Dazu muss der Parameter *stationaer* = *true* gesetzt werden.

Aus einer Energiebilanz für das Element *i* ergibt sich im stationären Fall für die hinunterfließende Sole

$$T_{down_i} = \frac{\left(L_0 T_{down_{i-1}} + \frac{L_1}{2} T_{Earth_{i,1}} \right)}{\left(L_0 + \frac{L_1}{2} \right)} \quad (2-35)$$

und

$$T_{up_i} = \frac{\left(L_0 T_{up_{i-1}} + \frac{L_1}{2} T_{Earth_{1+DimAx-i,1}} \right)}{\left(L_0 + \frac{L_1}{2} \right)} \quad (2-36)$$

für die hinaufströmende Sole. Gleichung 2-35 ersetzt für die stationäre Betrachtung 2-28 und 2-36 ersetzt 2-29.

Für die folgenden Vergleiche mit Messungen und mit dem Erdwärmesondenmodell des Programmes WPcalc wurde jeweils instationär gerechnet. Bei einem Zeitschritt von einer Stunde ergibt sich bei gleicher Rücklauftemperatur durch die stationäre Betrachtung eine Abweichung im Wärmeertrag von 2% gegenüber der instationären Rechnung.

Die Einsparung bei der Simulationszeit ergibt sich hauptsächlich dadurch, dass bei einer stationären Berechnung keine Subunterteilung für die Soleberechnung mehr nötig ist. Dadurch wird allerdings auch der zeitliche Diskretisierungsfehler etwas grösser, so dass die Abweichung bei einem Stundenzeitschritt auf etwa 4% steigt.

Grössere Abweichungen zwischen stationärer und instationärer Rechnung sind bei kürzeren Simulationszeitschritten und bei häufigerem Takten zu erwarten, da in diesem Fall das transiente Verhalten beim Anfahren der Erdwärmesonde und der Kolbeneffekt zum tragen kommt. Es wurde in dieser Arbeit aber keine entsprechenden Untersuchungen durchgeführt.

2.3 Wärmeübergangskoeffizient Sonde-Sole

2.3.1 Wärmeübergangskoeffizient α_1 beim Betrieb der Erdwärmesonde

Der Wärmeübergangskoeffizient α vom Fluid an die Sondenrohre ist eine Funktion der mit dem Rohrdurchmesser D_i gebildeten Reynoldszahl Re und der Prandtlzahl der Sole. Der Wärmeübergangskoeffizient wird üblicherweise dimensionslos mit der Nusseltzahl Nu für die ausgebildete Rohrströmung angegeben:

$$Nu(Re, Pr) = \frac{\alpha_1 D_i}{\lambda_{Sole}} \quad (2-37)$$

wobei

$$Re = \frac{w D_i}{v_{Sole}} \quad (2-38)$$

$$Pr = \frac{v_{Sole} \rho_{Sole} c p_{Sole}}{\lambda_{Sole}} \quad (2-39)$$

Je nach Reynoldszahl befinden wir uns im laminaren Bereich ($Re < 2 \cdot 10^3$), dem Uebergangsbereich laminar-turbulent ($2 \cdot 10^3 < Re < 10^4$) oder im turbulenten Bereich ($Re > 10^4$).

Nach Merker (1987) kann im turbulenten Bereich $10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$ und für alle Fluide mit einer Prandtlzahl von $0.5 < Pr < 2 \cdot 10^3$ die Petukhov - Formel für den Wärmeübergang im Rohr angewendet werden:

$$Nu_{turb} = \frac{\frac{\xi}{8}}{K_1 + K_2 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} Re Pr \quad (2-40)$$

mit

$$K_1 = 1 + 27.2 \left(\frac{\xi}{8} \right)$$

$$K_2 = 11.7 + 1.8 Pr^{-1/3}$$

$$\xi = \frac{1}{(1.82 \log Re - 1.64)^2}$$

Für Reynoldszahlen $Re < 2'300$ liegen wir immer im laminaren Bereich, für den Merker (1987) die folgende Nusseltzahl angibt:

$$Nu_{lam} = 4.36 \quad (2-41)$$

Zwischen dem laminaren und dem turbulenten Bereich liegt ein Uebergangsbereich ($2'300 < Re < 10'000$), für den bis heute noch keine Untersuchungen bekannt sind. Für die vorliegende Arbeit soll in diesem Bereich ein stetiger Ansatz für die Nusseltzahl gewählt werden, der analog zum turbulenten Bereich von einer exponentiellen Zunahme der Nusseltzahl mit der Reynoldszahl ausgeht.

Die Stetigkeits-Forderung ergibt uns an der Grenze vom turbulenten zum Uebergangsbereich (d.h. für $Re = 10'000$):

$$Nu_0 (Re = 10'000) = \frac{\frac{\xi_0}{8}}{1.107 + K_2 \sqrt{\frac{\xi_0}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} 10'000 Pr \quad (2-42)$$

mit

$$K_2 = 11.7 + 1.8 Pr^{-1/3}$$

$$\xi_0 = 0.031437$$

Damit haben wir im Uebergangsbereich die exponentielle Beziehung:

$$Nu = Nu_{lam} \exp \left[\ln \left(\frac{Nu_0}{Nu_{lam}} \right) \frac{\ln \left(\frac{Re}{2'300} \right)}{\ln \left(\frac{10'000}{2'300} \right)} \right] \quad (2-43)$$

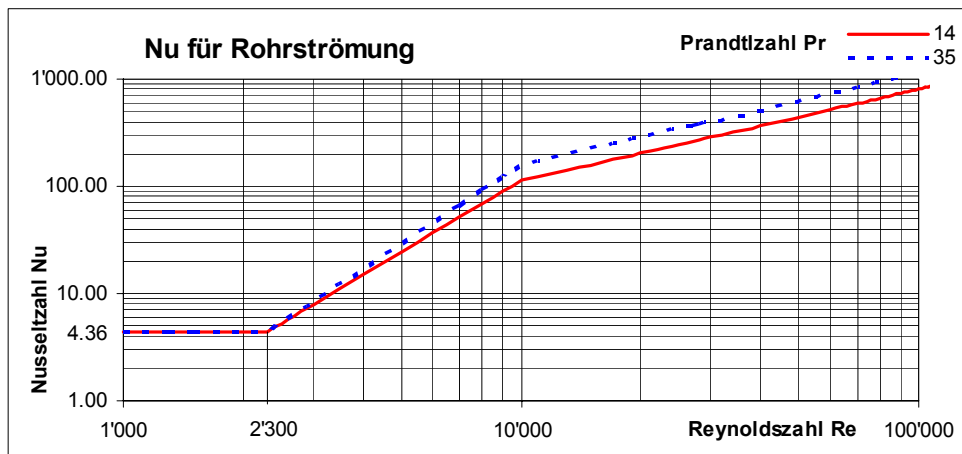


Abb 2-5: Mittlere Nusseltzahl für die Rohrströmung in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re

2.3.2 Wärmeübergangskoeffizient α_0 beim Stillstand der Erdwärmesonde

Beim Stillstand der Erdwärmesonde wird davon ausgegangen, dass in der Sole keine Konvektion stattfindet. Die Erwärmung der Sole im Stillstand erfolgt somit ausschliesslich durch Wärmeleitung. Es wird angenommen, dass die Wärmeleitung im Durchschnitt bis zum radialen Massenschwerpunkt zu erfolgen hat. Im Stillstand der Erdwärmesonde gilt somit der folgende Ansatz:

$$\alpha_0 = \frac{\lambda_{Sole}}{\frac{D_i}{2} (1 - \sqrt{0.5})} \quad (2-44)$$

2.4 Aeussere Randbedingung mit der Trichterformel

Bei konstantem Wärmeentzug oder -Eintrag kann die daraus resultierende Temperaturverteilung im Erdreich nach der Kelvin-Theorie für Linienquellen abgeschätzt werden (Sanner, 1992). Einen ganz ähnlichen Ansatz verfolgt Werner (1996), der die Temperaturverteilung im Erdreich aus einer Analogie aus der Grundwasserhydraulik ableitet. Die Temperaturabsenkung ΔT bei einer konstanten, spezifischen Entzugsleistung \dot{q} gibt er in Funktion des Radius r und der Zeit t wie folgt an:

$$\Delta T(r,t) = \frac{\dot{q}}{4 \pi \lambda} W(u) \quad (2-45)$$

mit

$$W(u) = \left[-0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \right] \quad (2-46)$$

und

$$u(r,t) = \frac{c p_{Erde} \rho_{Erde}}{4 t \lambda_{Erde}} r^2 \quad (2-47)$$

wobei \dot{q} die spezifische Wärmeentzugsleistung pro Sondenlänge ist:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{\text{Sondenlänge}} \quad (2-48)$$

Die Frage, nach welchem Element die Reihe in Formel 2-46 abzubrechen ist, kann nicht allgemein beantwortet werden. Dies hängt u.a. auch vom betrachteten Zeitpunkt t ab. Als Abbruchkriterium wurde festgelegt, das sich das Resultat beim Hinzufügen eines zusätzlichen Gliedes der Reihe um maximal 1% ändern darf.

Beim normalen Betrieb einer Erdsonde haben wir keinen konstanten Wärmeentzug. Da die Wärmeleitungsgleichung linear ist, kann aber die aus einer variablen Entzugsleistung resultierende Temperaturverteilung mit Hilfe des Superpositionsprinzips als Summe verschiedener, konstanter Entzugsleistungen berechnet werden:

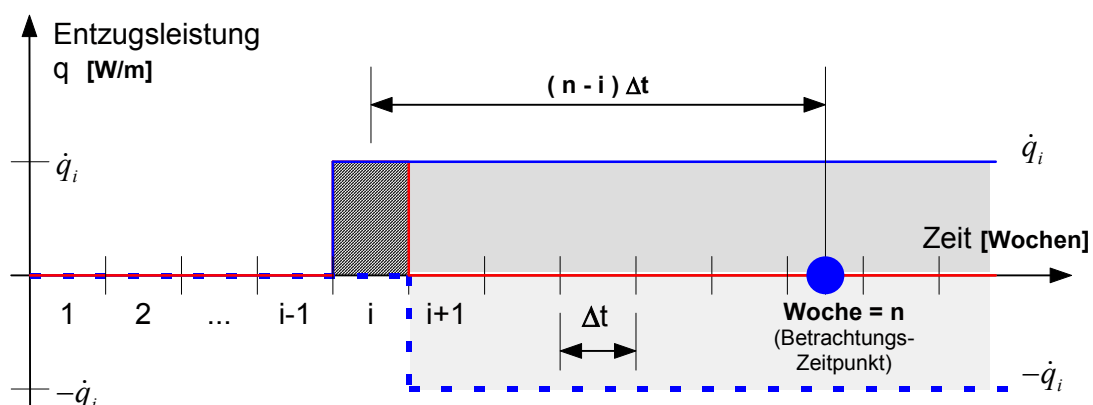


Abb 2-6: Berechnung des Temperaturtrichters aus einem Wärmeentzug q_i in der i -ten Woche durch Superposition zweier zeitlich versetzter Sprungantworten von $+q_i$ und $-q_i$

Ein Wärmeentzug von \dot{q}_i in der i-ten Woche kann beispielsweise als Superposition einer konstanten Entzugsleistung \dot{q}_i , beginnend am Anfang der i-ten Woche und einer konstanten Entzugsleistung $-\dot{q}_i$, beginnend am Ende der i-ten Woche berechnet werden. In der Betrachtungswoche n erhalten wir daraus den folgenden Temperaturtrichter:

$$\Delta T(r, t = n \Delta t) = \frac{\dot{q}_i}{4 \pi \lambda} [W(u(r, t = (n-i+1) \Delta t)) - W(u(r, t = (n-i) \Delta t))] \quad (2-49)$$

In der eben beschriebenen Weise kann ein beliebiges Entzugsprofil zusammengesetzt werden, wobei:

$$\Delta T(r, t = n \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{4 \pi \lambda} [W(u(r, t = (n-i+1) \Delta t)) - W(u(r, t = (n-i) \Delta t))] \quad (2-50)$$

mit

$$u(r, t = 0) = 0 \quad (2-51)$$

In der Gleichung 2-47 muss jedes Glied $W(u)$ zweimal berechnet werden. Wir formen diese Gleichung deshalb um in:

$$\Delta T(r, t = n \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{W(u(r, t = i \Delta t))}{4 \pi \lambda} [\dot{q}_{n-i+1} - \dot{q}_{n-i}] \quad (2-52)$$

mit

$$\dot{q}_0 = 0 \quad (2-53)$$

Die Gleichungen 2-50 und 2-52 sind identisch, Gleichung 2-52 erfordert aber nur halb soviel Rechenaufwand wie 2-50

Es hat sich gezeigt, dass es für einen typischen Wärmepumpenbetrieb genügt, die äusseren Randbedingungen nur einmal pro Woche neu zu berechnen, sofern das Simulationsgebiet grösser als 1 m ist (cf. Abb. 3.3). Entsprechend ist $\dot{Q}(i, \text{Woche})$ die durchschnittliche Entzugsleistung in der i-ten axialen Schicht in der entsprechenden Woche:

$$\dot{Q}(i, \text{Woche}) = \frac{\sum_{\text{Woche}} [T_{\text{Earth}}(i, 1) - T_{\text{Earth}}(i, 0)] L_1 dt}{7 \cdot 24 \cdot 3600s} \quad (2-54)$$

Daraus berechnet sich die spezifische Wärmeentzugsleistung \dot{q} für diese Woche mit

$$\dot{q}_{\text{Woche}} = \frac{\dot{Q}(i, \text{Woche})}{\text{Sondenlänge} / \text{DimAxi}} \quad (2-55)$$

Damit kann in jeder neuen Woche aus 2-52 und 2-55 die äussere Randbedingung für das Simulationsgebiet berechnet werden:

$$T_{\text{Earth}}(i, \text{DimRad} + 1) = T_0(i) - \Delta T(i, r = r_{\text{DimRad}}, \text{Woche}) \quad (2-56)$$

wobei $T_0(i)$ die Temperatur zum Simulationsbeginn am äusseren Rand des Simulationsgebietes in der i-ten axialen Schicht ist.

2.5 Druckabfall in der Erdwärmesonde

Der Druckabfall wird in jedem Zeitschritt neu berechnet. Es wird immer mit hydraulisch glatten Rohren gerechnet, was bei den meist eingesetzten PE-Rohren keinen all zu grossen Fehler ergibt. Für die Berechnung des Druckabfalls unterscheiden wir zwischen einem laminaren und einem turbulenten Bereich. Im laminaren Bereich ($Re < 2300$) gilt:

$$\xi = \frac{64}{Re} \quad (2-57)$$

Die Herleitung dieser Beziehung kann z.B. bei Merker (1987) nachgelesen werden.

Im turbulenten Bereich ($Re > 2300$) wird der empirische Ansatz von Petukhov (1970) verwendet, der bis $Re < 5'000'000$ gültig ist:

$$\xi = \frac{1}{(1.82 \log(Re) - 1.64)^2} \quad (2-58)$$

Daraus berechnet sich der Druckabfall mit:

$$\Delta p = \frac{\text{Sondenlänge} \xi \rho_{\text{sole}} v^2}{2 Di} \quad (2-59)$$

Zusätzlich wird bei Reynoldszahlen, die kleiner sind als 2300, die Variable „laminar“ auf TRUE gesetzt. Es ist also möglich, in jedem Zeitschritt den Strömungszustand über diese Variable abzufragen.

3 Vergleich mit Messungen

Zur Validierung der Modelle des EWS-Moduls sollen einerseits das transiente Verhalten beim Anfahren der Sonde, als auch das Langzeitverhalten über eine Periode von 5 Jahren und die Regeneration des Erdreichs im Sommer und damit die Trichterformel überprüft werden. Für das Kurzzeitverhalten wurden aus dem Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf (Werner, Bigler, Niederhauser et al., 1996) ein Dauerentzug über 6 Wochen als Sprungantwort (Kapitel 3.1, Versuch 4) und eine periodischer Wärmeentzug über 2 Tage (Kapitel 3.2, Versuch 6) ausgewählt. Für das Langzeitverhalten wurden die Messungen an einer Anlage in Elgg (Eugster, 1991) herangezogen (Kapitel 3.3).

3.1 Versuch 4 der Messung in Burgdorf

Seit 1980 wurden im Auftrag des Wasser- und Energiewirtschaftsamtes des Kantons Bern (WEA) umfangreiche Grundlagenuntersuchungen zur Nutzung von Wärme aus dem Boden und Grundwasser im Kanton Bern durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde in Burgdorf zwischen 1990 und 1995 ein Sondenfeld mit unterschiedlichen Erdwärmesonden-Typen erstellt und verschiedene Wärme-Entzugsversuche durchgeführt.

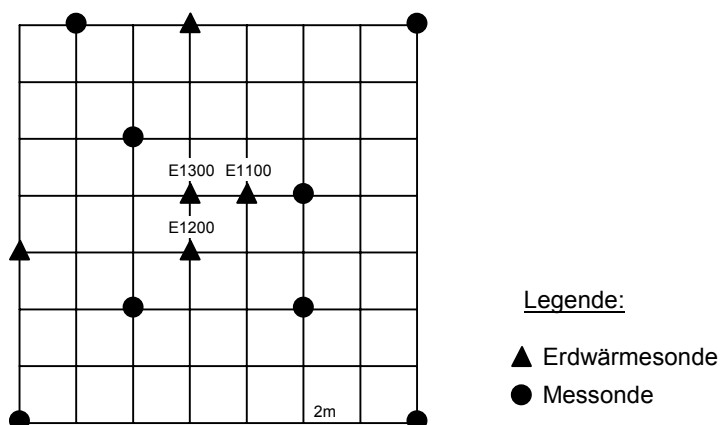


Abb 3-1: Lage der Erdwärmesonden und Messsonden im Versuchsfeld in Burgdorf

Das Versuchsfeld in Burgdorf liegt in einer Zone, die bis in eine Tiefe von 40m aus Schotter und darunter aus Molasse besteht. In der Tiefe von 35m bis 40m liegt eine grundwasserführende Schicht.

Die dem Versuch 4 vorangegangenen Versuche 1 bis 3 waren Gruppenversuche mit mehreren Sonden. Obwohl dem Versuch 4 eine Ruhephase voranging, ist dieser Versuch eindeutig von den Versuchen 1 bis 3 beeinflusst, was sich schön in den Messungen in der Erde (Abb. 3-3) zeigen lässt, die am Messbeginn relativ tiefe Temperaturen aufzeigten. Diese Beeinflussung durch die Vorversuche wurde lediglich mit einer entsprechend tieferen Anfangstemperatur des Erdreiches berücksichtigt (cf. Tabelle 3-1).

Im Versuch 4 des Thermoprogramms Erdwärmesonden wurde ein Dauerentzug über 6 Wochen an einer 100m langen Doppel-U-Sonde (Sonde Nr. E1300) mit Nenndurchmesser 4 x 32mm durchgeführt. Ueber diese Periode liegen Messresultate von der Durchflussmenge, der Rücklaufemperatur und der Quelltemperatur der Sole im Halbstundentakt vor. Ausserdem wurden die Sonden E1100 und E1200 als Referenzsonden zur Messung der Erdreich-temperaturen in 2 Metern Entfernung von der Versuchssonde benutzt. Die Messresultate

wurden speziell für den vorliegenden Vergleich von Hr. Bigler vom Ingenieur- und Studienbüro Werner und Partner AG neu aufbereitet.

In der Tabelle 3-1 sind die Parameter für die EWS-Simulation zu finden. Für die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Erde und der Hinterfüllung wurden die Werte aus der Modelleichung von Burgdorf (Werner, Bigler, Niederhauser et al., 1996) übernommen:

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>	<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Rechenknoten radial	6	λ_{Erde}	2.7 W/mK
Rechenknoten axial	5	ρ_{Erde}	2000 kg/m ³
Rechenradius (Grenze des Simulationsgebietes)	2.0 m	$c_{p_{\text{Erde}}}$	1650 J/kgK
Gitterfaktor	1.7	λ_{Fill}	2.7 W/mK
Sondendurchmesser innen D_i	26 mm	ρ_{Fill}	2000 kg/m ³
Bohrdurchmesser D_b	120 mm	$c_{p_{\text{Fill}}}$	1650 J/kgK
Sondenlänge	100 m	v_{Sole}	6.46 mm ² /s
Auslegungsmassenstrom	0.6 und 0.8 kg/s	λ_{Sole}	0.449 W/mK
Mittlere Erdtemperatur (Startwert an Oberfläche)	8.4°C	ρ_{Sole}	1035 kg/m ³
Temperaturgradient	0.025°C/m	$c_{p_{\text{Sole}}}$	3860 J/kgK

Tabelle 3-1: Parameterliste für die EWS-Simulation des Versuches 4

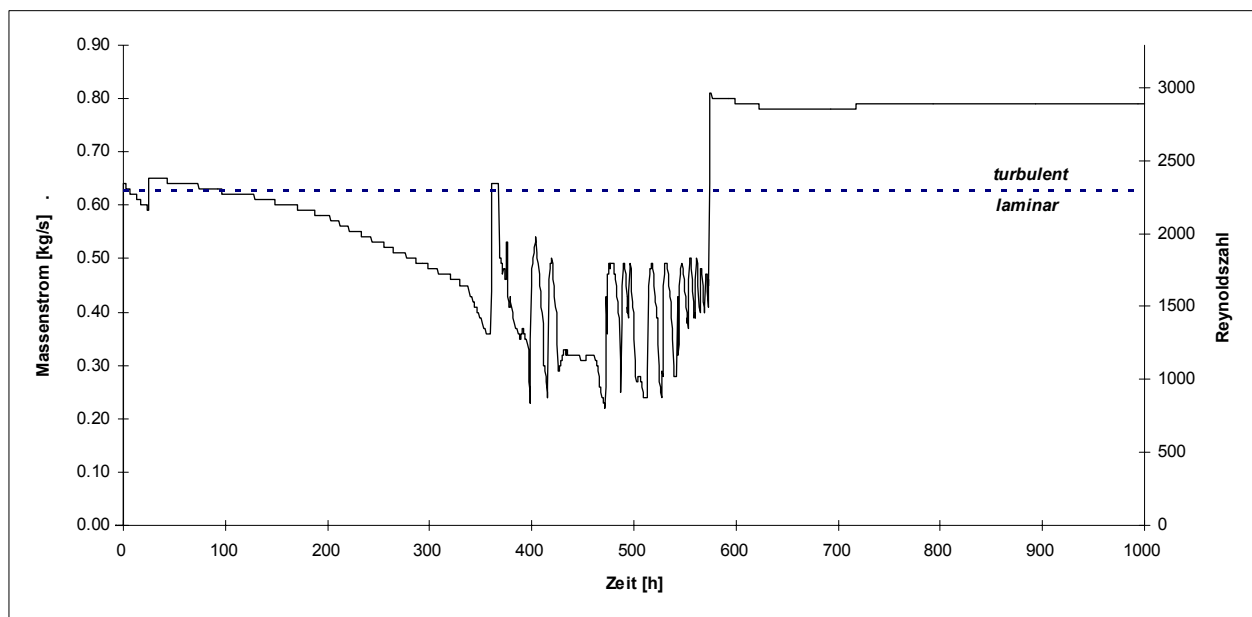


Abb 3-2: Massenstrom der Sprungantwort beim Versuch 4 der Messung in Burgdorf

Leider konnte im Versuch 4 die Durchflussmenge in der Sonde im ersten Teil des Versuchs nicht konstant gehalten werden (cf. Abb 3-2). Unterschiedliche Durchflussmengen werden in den EWS-Modellen zwar prinzipiell berücksichtigt, ausser bei der Berechnung des Wärmeübergangs α , der mit dem Auslegungs-Massenstrom berechnet und dann während der Simulation nicht mehr verändert wird. Da der erste Teil des Versuches 4 laminar und der zweite Teil turbulent ist, sind im folgenden zwei Berechnungen dargestellt: Abb. 3-4 mit laminarer Sole, Wärmeübergang α berechnet mit Massenstrom 0.6 kg/s und Abb. 3-5, bei dem der Wärmeübergang α bei einem Massenstrom von 0.8 kg/s berechnet wurde.

Anhand des Versuches 4 wurde auch festgelegt, wie häufig die äussere Randbedingung des Simulationsgebietes neu berechnet werden muss. In Abbildung 3-3 sind die gemessenen Temperaturen in den Referenzsonden E1100 und E1200 in ca. 2m Entfernung von der Versuchssonde dargestellt. Die Messungen wurden in einer Tiefe von 20m durchgeführt. Die berechnete Linie ist die mit der Trichterformel berechnete Erdreichtemperatur in der ersten axialen Schicht, ebenfalls in 2m Entfernung von der Sondenachse. Diese Darstellung zeigt anschaulich, dass bei diesem Rechenradius eine wöchentliche Neuberechnung der äusseren Randbedingung des Simulationsgebietes vollständig genügt; Vergessen wir nicht, dass wir im Normalbetrieb der Sonde wesentlich geringere Entzugsleistungen und somit eine viel kleinere Stufung haben!

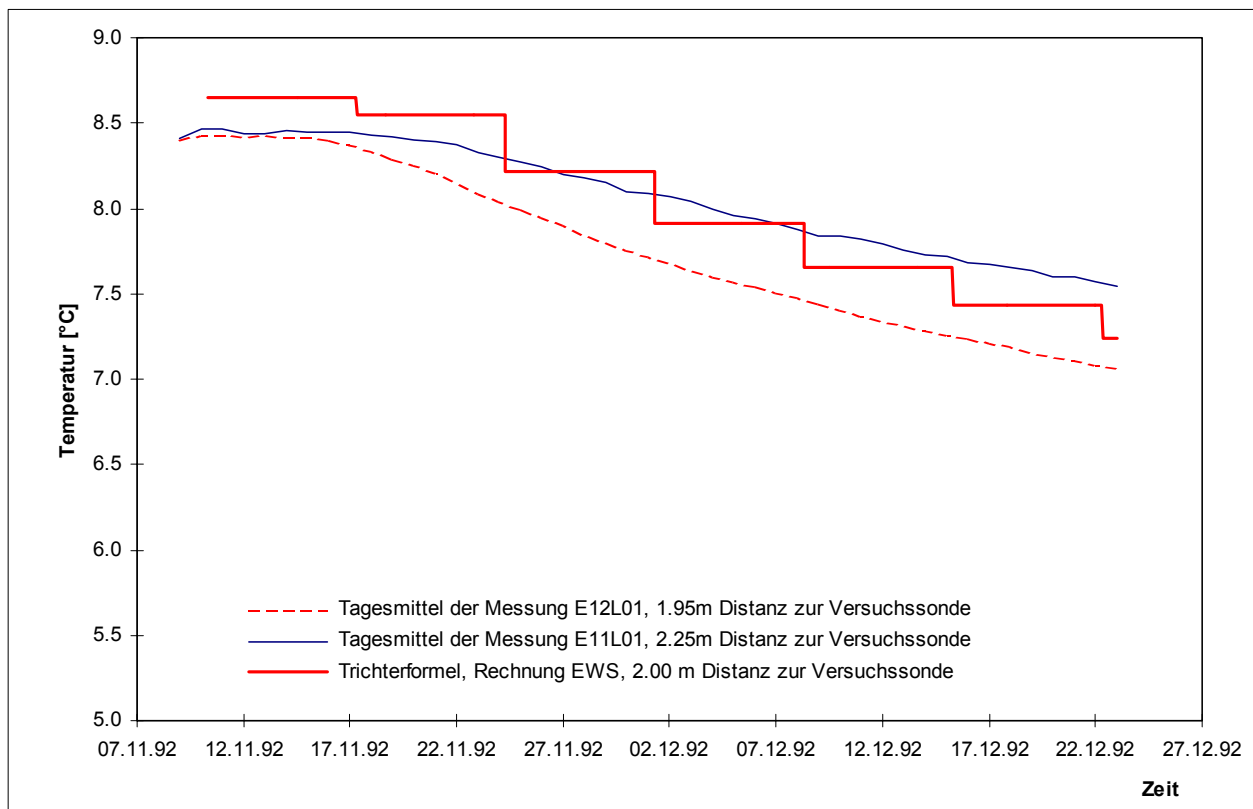


Abb 3-3: Vergleich der Bodentemperaturen in ca. 2m Abstand von Messung und Rechnung EWS

Abb. 3-3 zeigt auch noch schön 2 Effekte:

- Die beiden Messungen driften auseinander. Erklärbar ist dies durch die Unterschiedliche Distanz zur Versuchssonde:
- Die gemessenen Anfangstemperaturen in 20m Tiefe liegen wesentlich unter der zu erwartenden Temperatur im ungestörten Fall. Hier zeigen sich die Auswirkungen der früheren Wärmeentnahmeversuche des Sondenfeldes.

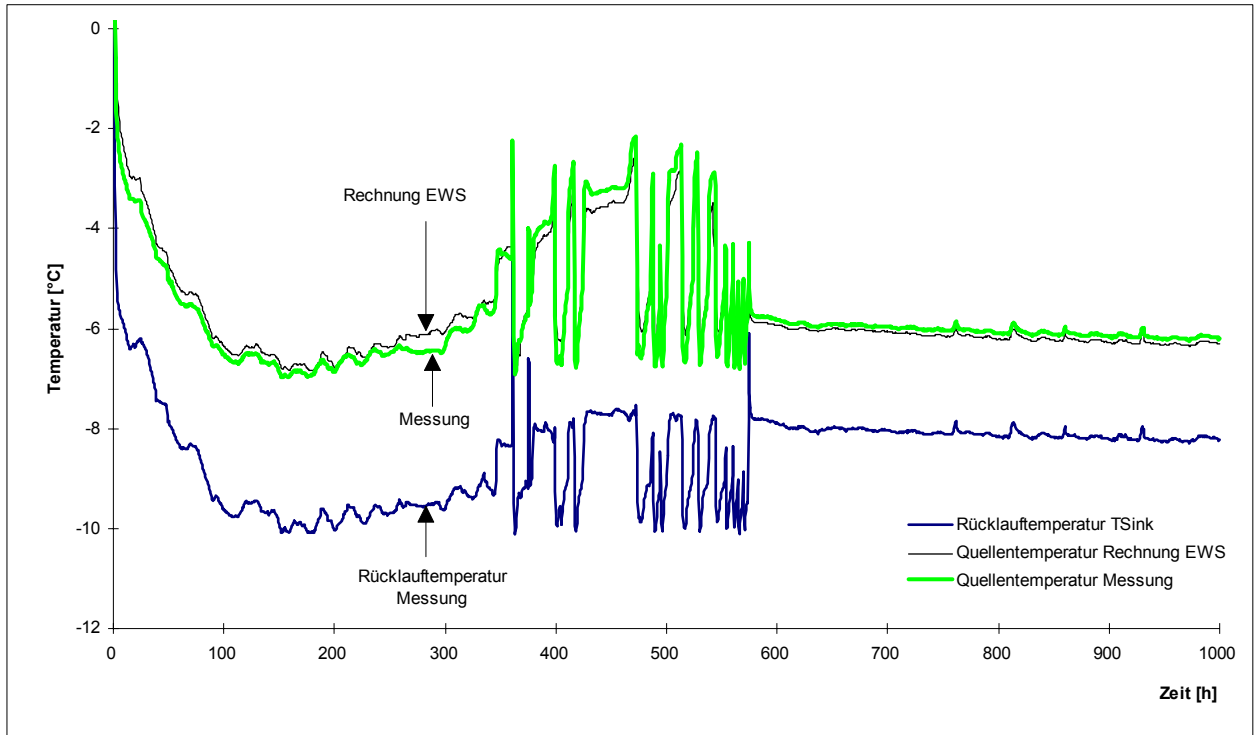


Abb 3-4: Sprungantwort: Vergleich Rechnung EWS und Messung in Burgdorf
 Wärmeübergang α berechnet mit Solemassenstrom 0.6 kg/s, $\lambda_{Fill} = \lambda_{Erde} = 2.7 \text{ W/mK}$

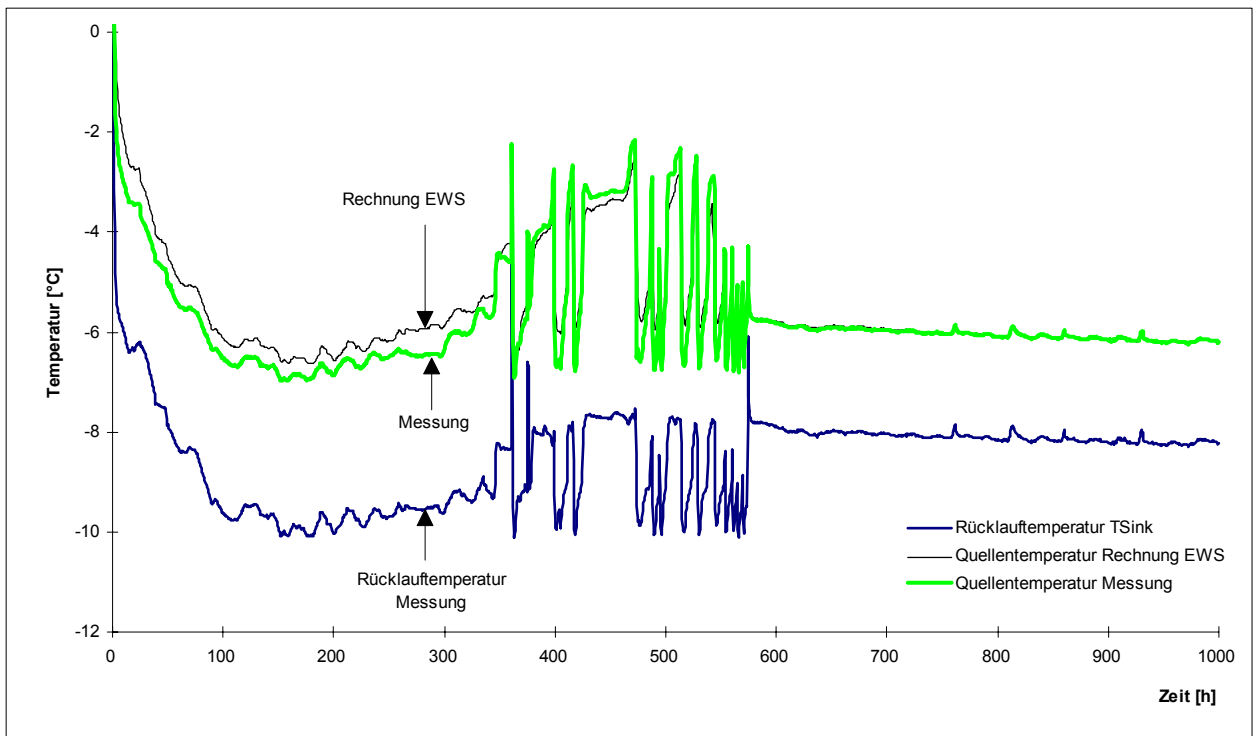


Abb 3-5: Sprungantwort: Vergleich Rechnung EWS und Messung in Burgdorf
 Wärmeübergang α berechnet mit Solemassenstrom 0.8 kg/s, $\lambda_{Fill} = \lambda_{Erde} = 2.7 \text{ W/mK}$

Die Übereinstimmung von Messung und Rechnung ist sehr gut. Zu beachten ist aber, dass die Starttemperatur angepasst werden musste, um so den Einfluss früherer Versuche einzu- beziehen und dass mit diesem Vergleich keine Aussage über die Modellierung der Sondenrohre in der Hinterfüllung möglich ist, da dort mit gleichem λ gerechnet wurde wie in der Erde.

Wird mit einer realistischen Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung von $\lambda_{\text{Fill}} = 0.9 \text{ W/mK}$ gerechnet, so muss die Wärmeleitfähigkeit der Erde λ_{Erde} von 2.7 W/mK auf 3.4 W/mK erhöht werden (cf. Abb. 3-6), um eine gleich gute Übereinstimmung zu erhalten wie in Abb. 3-5. Eine ganz ähnliche Feststellung machte auch Eugster (1991) bei seiner Modelleichung an der Anlage in Elgg. Auch er musste die „gemessenen“ λ -Werte der Erde sehr stark nach oben korrigieren, um Rechnung und Messung in Einklang zu bringen. Es fragt sich, ob dies einzig auf das zugegebenermassen vorhandene Grundwasser zurückzuführen ist, oder ob in der Erde im Zusammenhang mit der darin immer vorhandenen Feuchtigkeit im mikroskopischen Bereich nicht noch andere Wärmetransportvorgänge (z.B. thermisch induzierte Kapillarkräfte?) wichtig sind, die mit einer klassischen λ -Wert Messung im Labor nicht gemessen werden können.

Eine weitere mögliche Erklärung wäre das Gefrieren der Hinterfüllung, wodurch einerseits die Latentwärme nutzbar würde und sich andererseits die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung im gefrorenen Zustand verbessert hätte.

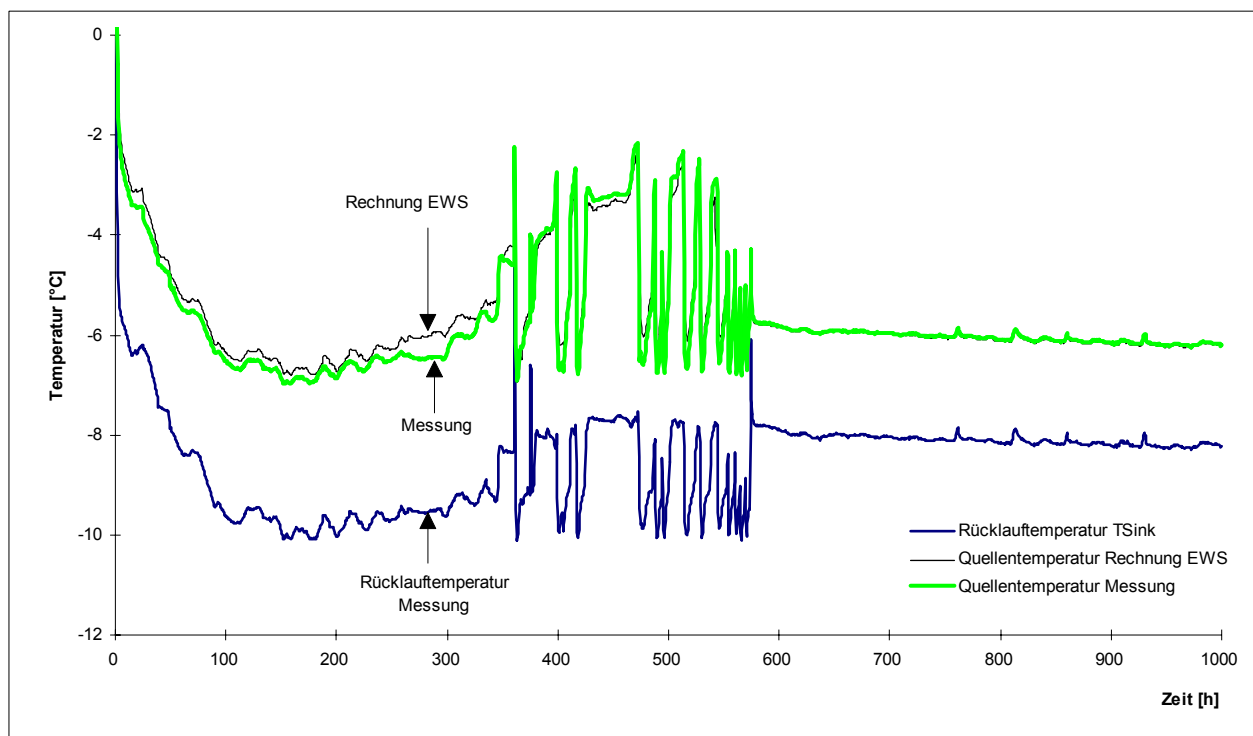


Abb 3-6: Sprungantwort: Vergleich Rechnung EWS und Messung in Burgdorf
 Wärmeübergang α berechnet mit Solemassenstrom 0.8 kg/s ,
 Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung $\lambda_{\text{Fill}} = 0.9 \text{ W/mK}$ und Erde $\lambda_{\text{Erde}} = 3.4 \text{ W/mK}$

Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung beim Versuch 4 beweist zwar nicht endgültig die Gültigkeit aller Modell im EWS-Modul. Er zeigt aber, dass das Programm SBM (damit wurde die Eichung der Messungen in Burgdorf durchgeführt) und das EWS-Modul bei gleichen Vorgaben bezüglich der Wärmeleitfähigkeit in der Hinterfüllung und Erde auch ähnliche Resultate liefern.

3.2 Versuch 6 der Messung in Burgdorf

Aussagen über das transiente Verhalten der EWS-Modelle lassen sich beim Vergleich mit dem Versuch 6 des Thermoprogramms Erdwärmesonden in Burgdorf machen. Bei diesem Versuch wurde eine zyklische Wärmeentnahme an der Sonde E1300 (cf. Kapitel 3.1) durchgeführt:

	<i>Dauer</i>	<i>Laufzeit pro Zyklus</i>	<i>Stillstand pro Zyklus</i>
1. Zyklus	2.5 h	15 Minuten	5 Minuten
2. Zyklus	10.5 h	14 Minuten	6 Minuten
3. Zyklus	6 h	13 Minuten	7 Minuten
4. Zyklus	26 h	12 Minuten	8 Minuten

Tabelle 3-2: Zyklische Wärmeentnahme im Versuch 6 der burgdorfer Messung

Als Messintervall wurde 5 Minuten gewählt, was in Anbetracht der Zyklen in Versuch 6 eher zu lang ist. Der Rechenzeitschritt beträgt ebenfalls 5 Minuten. Fällt in einem Rechenschritt das Einschalten oder Ausschalten der Umwälzpumpe in die jeweilige Zeitperiode, so wurde der Massenstrom dieses Zeitschrittes entsprechend angepasst. Bei den übrigen Parametern wurden die gleichen Werte gewählt wie beim Versuch 4:

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>	<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Rechenknoten radial	6	λ_{Erde}	2.7 W/mK
Rechenknoten axial	5	ρ_{Erde}	2000 kg/m ³
Rechenradius (Grenze des Simulationsgebietes)	2.0 m	$c_{p\text{Erde}}$	1650 J/kgK
Gitterfaktor	1.7	λ_{Fill}	2.7 W/mK
Sondendurchmesser innen D_i	26 mm	ρ_{Fill}	2000 kg/m ³
Bohrdurchmesser D_b	120 mm	$c_{p\text{Fill}}$	1650 J/kgK
Sondenlänge	100 m	v_{Sole}	6.46 mm ² /s
Auslegungsmassenstrom	0.47 kg/s	λ_{Sole}	0.449 W/mK
Mittlere Erdtemperatur (Startwert an Oberfläche)	8.4°C	ρ_{Sole}	1035 kg/m ³
Temperaturgradient	0.025°C/m	$c_{p\text{Sole}}$	3860 J/kgK

Tabelle 3-3: Parameterliste für die EWS-Simulation des Versuches 6

Als wichtigster Parameter für die korrekte Nachrechnung dieses zyklischen Versuches hat sich der Innendurchmesser D_i der Sonde entpuppt. Wird beispielsweise irrtümlich der Nenn-durchmesser (32mm) der Sonde für D_i genommen, so wird infolge der zu grossen Massenträgheit die Temperaturamplitude der Quelltemperatur T_{Source} zu klein berechnet. Bei einer stationären Berechnung der Sole fehlt andererseits die Trägheit ganz und die Temperaturamplitude wird somit überschätzt.

Die Abweichung am Anfang der Messung ist auf den gedrosselten Massenstrom in der Startphase (0.28kg/s) zurückzuführen, wodurch der Wärmeübergangskoeffizient α überschätzt wird.

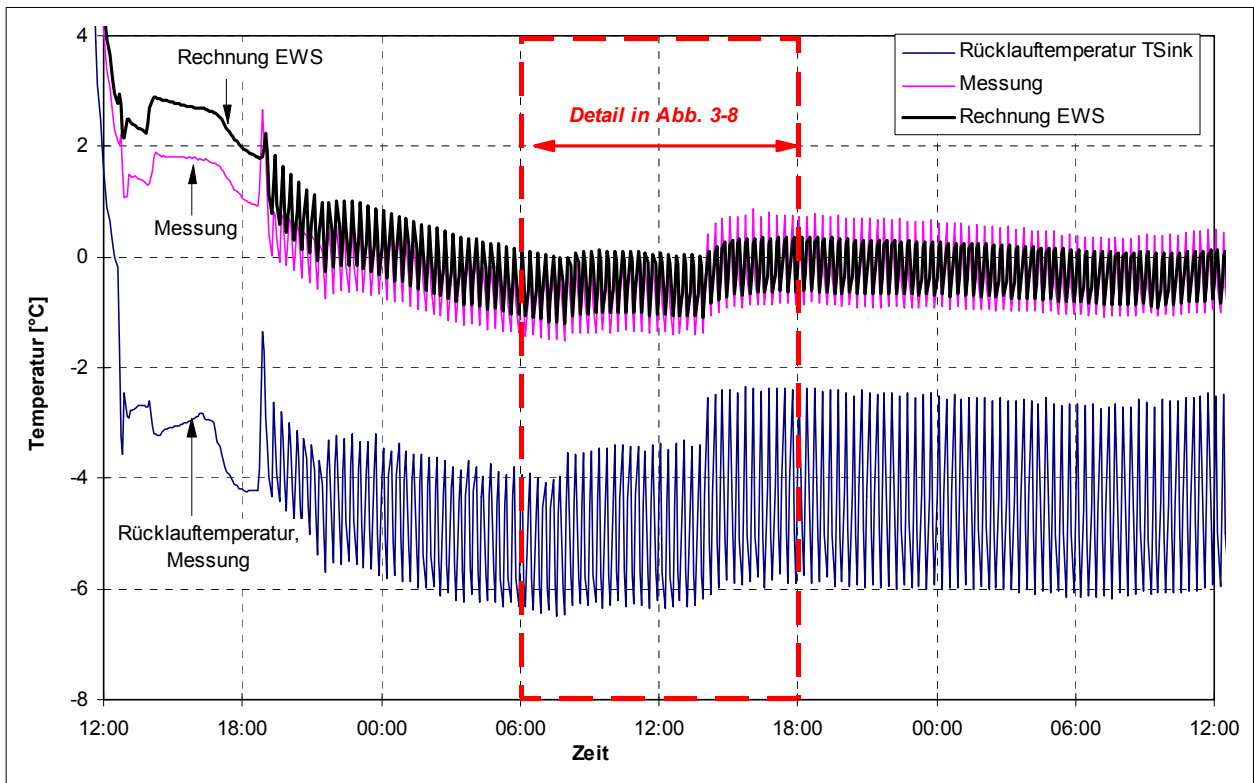


Abb 3-7: Periodischer Entzug: Vergleich Rechnung EWS und Messung Versuch 6 in Burgdorf

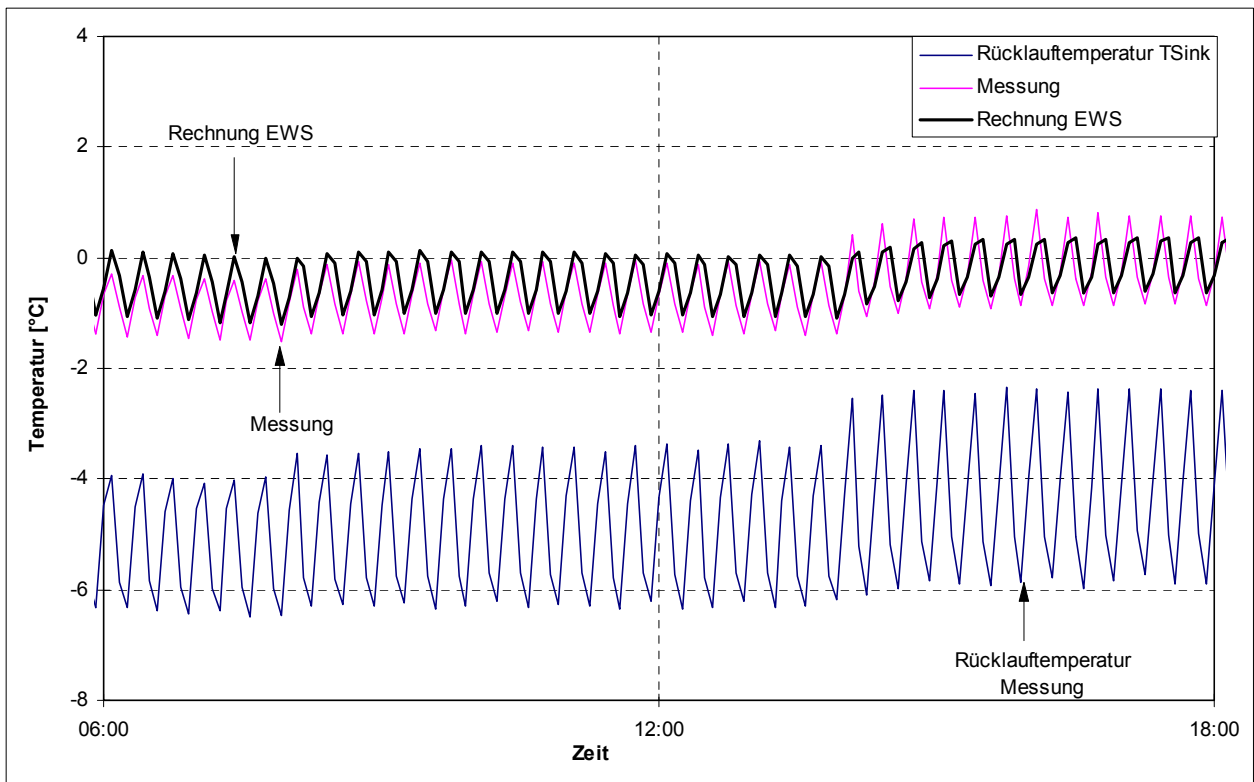


Abb 3-8: Ausschnitt aus dem Vergleich beim Versuch 6 der Messung in Burgdorf

3.3 Vergleich mit Messung in Elgg

Zur Validierung der äusseren Randbedingung (Trichterformel 2-56) muss der berechnete Verlauf der Temperatur mit Messungen über mehrere Jahre verglichen werden. Eine gut dokumentierte Messung wurde von Dr. Eugster in Elgg in den Jahren 1987 bis 1991 durchgeführt (Eugster, 1991). Dabei handelt es sich um eine koaxiale Erdwärmesonde von 103m Länge. Die Erdwärmesonde dient als Wärmequelle für eine Sole-Wasser-Wärmepumpe zur Deckung des Heizenergiebedarfs ohne Warmwasser eines Einfamilienhauses.

Für unsere Validierung wurden die im halbstundentakt vorliegenden Messdaten von Dr. W. Eugster neu aufbereitet, so dass der Wärmeentzug und die Laufzeit der Sondenpumpe als Eingabe für die Simulation mit dem EWS-Modul benutzt werden konnten. Der Wärmeentzug war also eine Eingangsgrösse. Verglichen werden kann somit die Entwicklung des Temperaturtrichters bei *identischem* Wärmeentzug.

Da der Wärmeentzug vorgegeben ist, spielt die Art der Sonde eine untergeordnete Rolle, solange nur die Erdreichtemperaturen in der Nähe der äusseren Randbedingung und nicht die Quelltemperaturen verglichen werden.

Die Differenz zwischen der Wärmemessung der Halbstundendaten und dem Wärmehähler im Quellenkreislauf stammt wahrscheinlich aus der unterschiedlichen Viskosität von Wasser und Sole. Der Wärmehähler war ursprünglich auf Wasser geeicht. (Der unterschiedliche cp-Wert von Wasser und Sole ist hingegen in dieser Messung berücksichtigt.) Für die EWS-Simulation wurde der Wärmeentzug aus den Halbstunden-Messungen verwendet.

Betriebsjahr	Wärmeentzug, mit Wärmehähler gemessen [kWh]	Wärmeentzug aus Halbstunden-Messung [kWh]	Laufzeit der Wärmepumpe [h]
1: 1987 / 88	11'938	14'804	1'992
2: 1988 / 89	11'323	12'005	1'938
3: 1989 / 90	11'667	11'454	1'903
4: 1990 / 91	10'374	11'481	1'625

Tabelle 3-4: Betriebsdaten der Erdwärmesondenanlage in Elgg

In der Tabelle 3-5 sind die Parameter für die EWS-Simulation zu finden. Bei den Stoffwerten für die Sole, Hinterfüllung und Erde wurden weitestgehend die geeichten Daten von Eugster (1991) übernommen. Darin mitberücksichtigt ist eine grundwasserführende Nagelfluhschicht. Der Gitterfaktor ist so gewählt, dass sich der Messpunkt, der sich in 1m Distanz von der Achse der Erdwärmesonde entfernt befindet, im Massenschwerpunkt des 5. radialen Rechenvolumens befindet. Der thermische Widerstand R1 und der Sondendurchmesser versuchen dem Umstand Rechnung zu tragen, dass mit einem Modell für Doppel-U-Sonden eine Koaxialsonde nachgerechnet wird. Entscheidend sind diese Werte jedoch nicht, da auf eine vorgegebene Entzugsleistung iteriert wird und die Erdtemperatur in 1m Abstand verglichen werden.

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>	<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Rechenknoten radial	6	λ_{Erde}	3.2 W/mK
Rechenknoten axial	5	ρ_{Erde}	2700 kg/m ³
Rechenradius (Grenze des Simulationsgebietes)	2 m	$c\rho_{\text{Erde}}$	900 J/kgK
Gitterfaktor	1.561	λ_{Fill}	0.9 W/mK
R1	0.0055 K/W	ρ_{Fill}	2000 kg/m ³
Sondendurchmesser innen D_i	50 mm	$c\rho_{\text{Fill}}$	850 J/kgK
Bohrdurchmesser D_b	120 mm	ν_{Sole}	4.4 mm ² /s
Sondenlänge	103 m	λ_{Sole}	0.49 W/mK
Auslegungsmassenstrom	0.82 kg/s	ρ_{Sole}	1053 kg/m ³
Mittlere Erdtemperatur (Startwert an Oberfläche)	8.6 °C	$c\rho_{\text{Sole}}$	3870 J/kgK
Temperaturgradient	0.026 °C/m		

Tabelle 3-5 *Parameterliste für die EWS-Simulation der Erdwärmesonden-Anlage in Elgg*

In der Abbildung 3-9 ist das Resultat der EWS-Simulation abgebildet und mit der Messung verglichen. Zusätzlich ist zum Vergleich dazu die Simulation der gleichen Anlage von Eugster (1991) mit dem Programm COSOND abgebildet.

Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Resultate. Sowohl das Programm EWS, als auch das Programm COSOND lassen den Temperaturtrichter im Sommer etwas weniger schnell auffüllen als dies die Messung zeigt. Zurückzuführen ist dies auf die grundwasserführende Nagelfluhschicht. Die Abweichungen im Herbst 1987 werden von Eugster auf die Auskühlung des Erdreiches während der unüblich langen Bohrdauer der Erdwärmesonden durch das Kühlwasser der Bohrung zurückgeführt.

Der vorliegende Vergleich zeigt, dass sich die verwendete Trichterformel auch über eine Periode von 5 Jahren sehr gut als äussere Randbedingung für eine Simulation der Erde im Nahbereich (2m) um die Erdwärmesonde eignet.

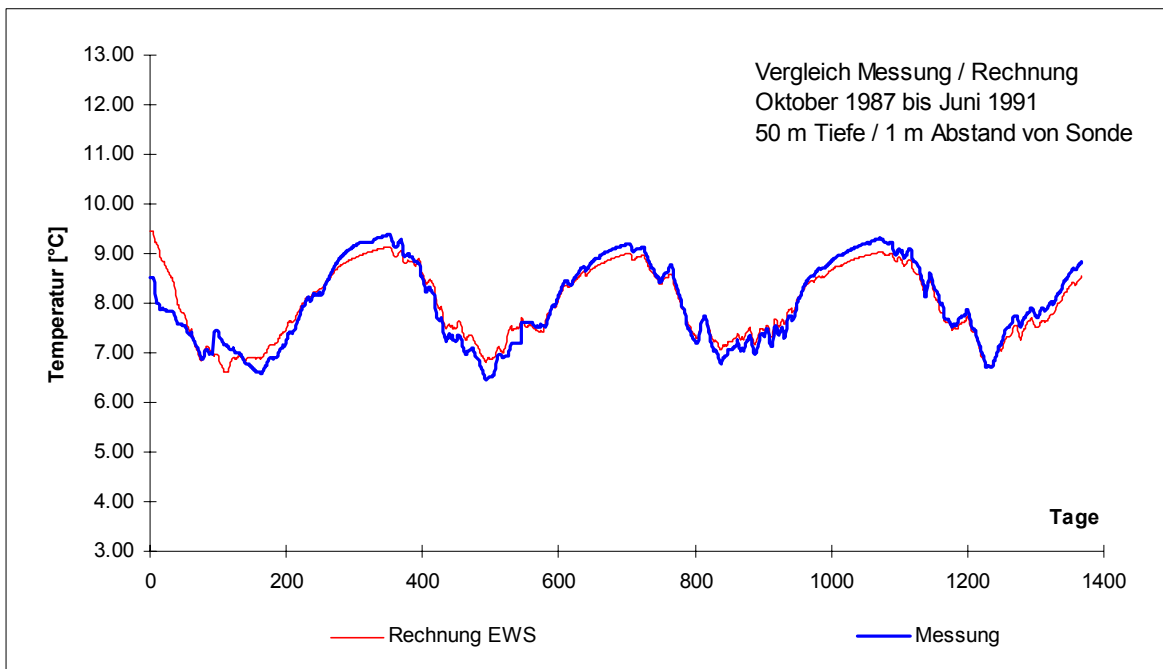


Abb 3-9: Vergleich Messung und Rechnung EWS an Erdsondenanlage in Elgg, Erde in 50m Tiefe

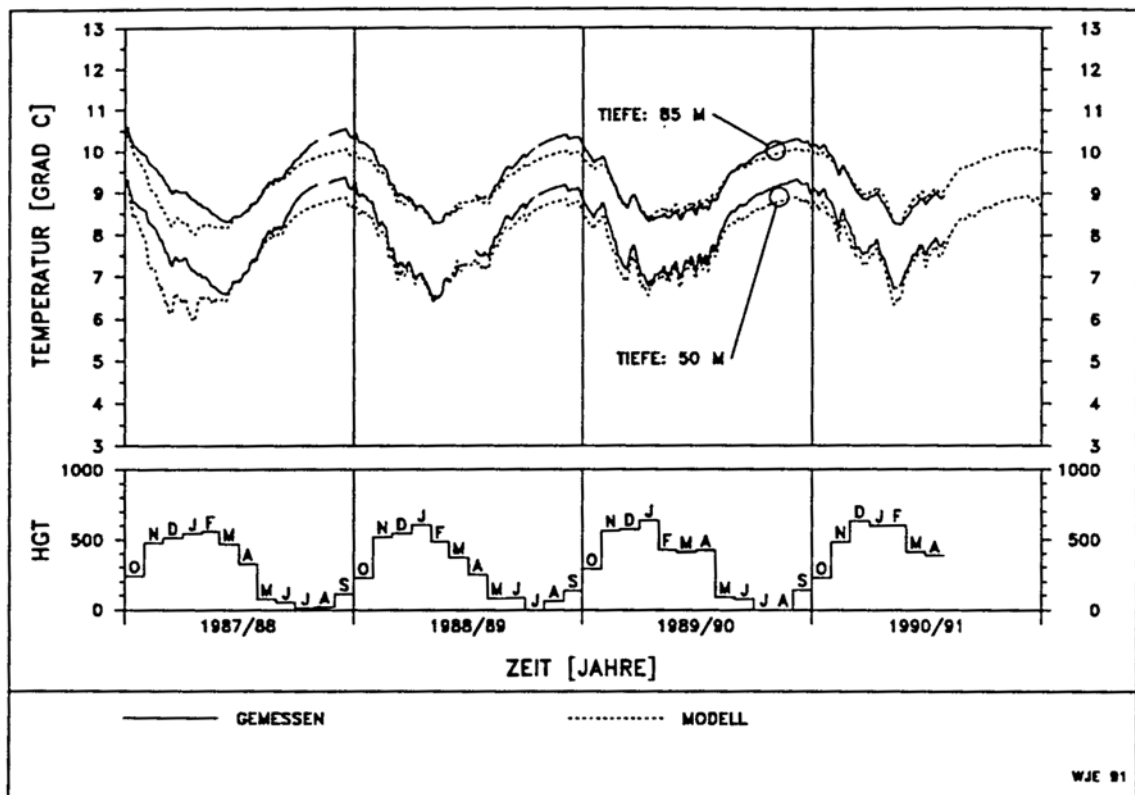


Abb 3-10: Vergleich Messung und Rechnung COSOND an Erdsondenanlage in Elgg (Eugster, 1991)

Der Vergleich von Rechnung und Messung in 10m Tiefe zeigt etwas grössere Abweichungen. Dies musste allerdings auch erwartet werden, da sich in dieser Tiefe die Erwärmung der Erdoberfläche im Jahreszeitenverlauf noch bemerkbar macht, ein Effekt, der in den hier verwendeten Modellen nicht abgebildet ist. Deutlich sichtbar ist dies auch darin, dass in dieser Tiefe die Sommertemperaturen in der Messperiode von Jahr zu Jahr zunehmen, in der Rechnung hingegen leicht abnehmen.

Immerhin kann auch hier festgestellt werden, dass die Abweichungen im Winter wesentlich unter 1°C liegt.

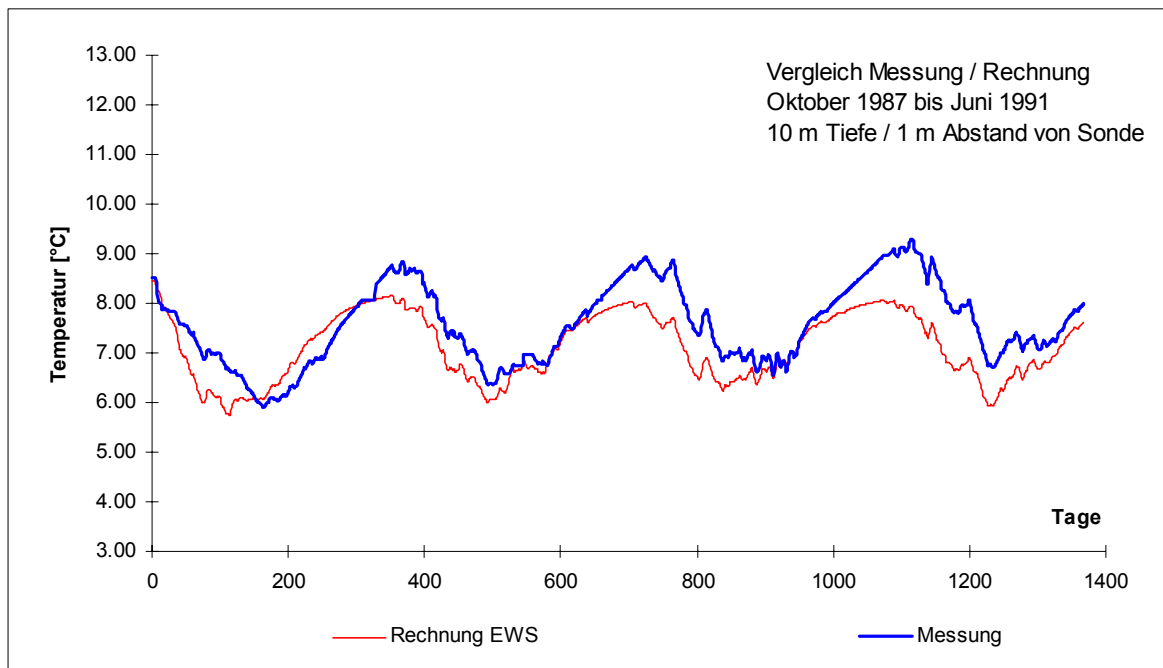


Abb 3-11: Vergleich Messung und Rechnung EWS an Erdsondenanlage in Elgg, Erde in 10m Tiefe

Auch bei diesem Vergleich muss wiederum festgestellt werden, dass für eine gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung die Erdreichtemperatur im ungestörten Fall und der Temperaturgradient in die Tiefe von entscheidender Bedeutung sind. Falsche Annahmen in diesen Grössen ergeben einen Offset, der auch über die Jahre hinweg nicht kleiner wird.

4 Sensitivität und Vergleich mit WPcalc und SBM

Im folgenden soll die Sensitivität des EWS-Moduls auf die folgenden Parameter geprüft und mit dem Erdsondenmodell des Wärmepumpen-Simulationsprogrammes WPcalc (Nani et al., 1994) verglichen werden:

- Betriebszeit der Erdwärmesonde
- Sondenlänge
- Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} des Erdreichs
- Wärmeleitfähigkeit λ_{Fill} der Hinterfüllung
- Sondendurchmesser
- Massenstrom der Sonde

Ausserdem soll in diesem Kapitel das EWS-Modul mit der TRNSYS-Version des SBM-Simulationsprogramms (Pahud et al., 1996) verglichen werden.

4.1 Referenzfall

Als Basis wurde das für die Validierung des Programmes WPcalc verwendete Einfamilienhaus in Möhlin verwendet (Zweifel et al. 1996). Dieses Gebäude hat einen Wärmeleistungsbedarf von 9 kW bei einer Auslegungstemperatur von -11°C .

Zur Deckung dieses Wärmebedarfs wurde eine im Wärmepumpen-Testzentrum Töss geprüfte Wärmepumpe eingesetzt, die bei 0°C Soletemperatur und 50°C Vorlauftemperatur eine Wärmeleistung von 9.3 kW liefert.

Das Programm WPcalc schlägt dafür eine 120 m Lange Erdwärmesonde vor. Mit den verwendeten Wetterdaten von Basel (EMPA-DRY-Daten) berechnet WPcalc damit einen durchschnittlichen COP von 2.89 und eine Jahresarbeitszahl von 2.65 bei einer Laufzeit von 1691 h pro Jahr. Die Erdwärmesonde liefert dabei 10'633 kWh. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Kälteleistung von 6.29kW, was einer spezifischen Entzugsleistung von 52 W/m entspricht. Dies liegt im Bereich der Empfehlung der AWP-Richtlinie T1 (AWP, 1996), die eine Belastung von 50-55 W/m vorsieht.

Im Referenzfall wurde das Warmwasser nicht mit der Wärmepumpe erzeugt. Was beim Einbezug von Warmwasser geschieht, soll im Fall 2 der Parameterstudie untersucht werden. Für diesen Fall ist die AWP-Richtlinie T1 nicht mehr anwendbar, da diese nur bis 1800 h/a Betriebszeit der Sonde quantitative Aussagen macht.

Beim Boden wurde Mergel mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Erde}} = 1.8 \text{ W/mK}$ angenommen. Die mit WPcalc berechnete, stündliche Entzugsleistung wurde als Eingabe für das EWS-Modul verwendet und daraus dann durch eine Iteration die entsprechenden Rücklauf- und Quellentemperaturen berechnet.

In der Tabelle 4-1 sind die Parameter für die EWS-Simulation zu finden:

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>	<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Rechenknoten radial	6	λ_{Erde}	1.8 W/mK
Rechenknoten axial	5	ρ_{Erde}	2600 kg/m ³
Rechenradius (Grenze des Simulationsgebietes)	1.5 m	c_{pErde}	800 J/kgK
Gitterfaktor	2.0	λ_{Fill}	0.7 W/mK
Sondendurchmesser innen D_i	26 mm	ρ_{Fill}	2600 kg/m ³
Bohrdurchmesser D_b	120 mm	c_{pFill}	1000 J/kgK
Sondenlänge	120 m	v_{Sole}	4.4 mm ² /s
Auslegungsmassenstrom	0.6 kg/s	λ_{Sole}	0.49 W/mK
Mittlere Erdtemperatur (Startwert an Oberfläche)	10°C	ρ_{Sole}	1053 kg/m ³
Temperaturgradient	0.035°C/m	c_{pSole}	3870 J/kgK

Tabelle 4-1: Parameterliste für die EWS-Simulation

In den folgenden Abbildungen ist bei den EWS-Berechnungen jeweils das 2. Simulationsjahr dargestellt (nach einem Jahr Einschwingen des Bodens bei gleichem Entzugsprofil). Die Abbildungen 4-1 und 4-2 zeigen die stündlichen Werte der Quelltemperatur für den Referenzfall in den Monaten Januar und April, wobei nur die Stunden aufgetragen sind, in denen die Wärmepumpe tatsächlich gelaufen ist. Bei den relativ hohen Streuwerte ist die Wärmepumpe allerdings nur wenige Minuten effektiv gelaufen. Abgebildet ist somit in diesen Punkten die Anlaufphase (Kolbeneffekt nach Stillstand der Sonde).

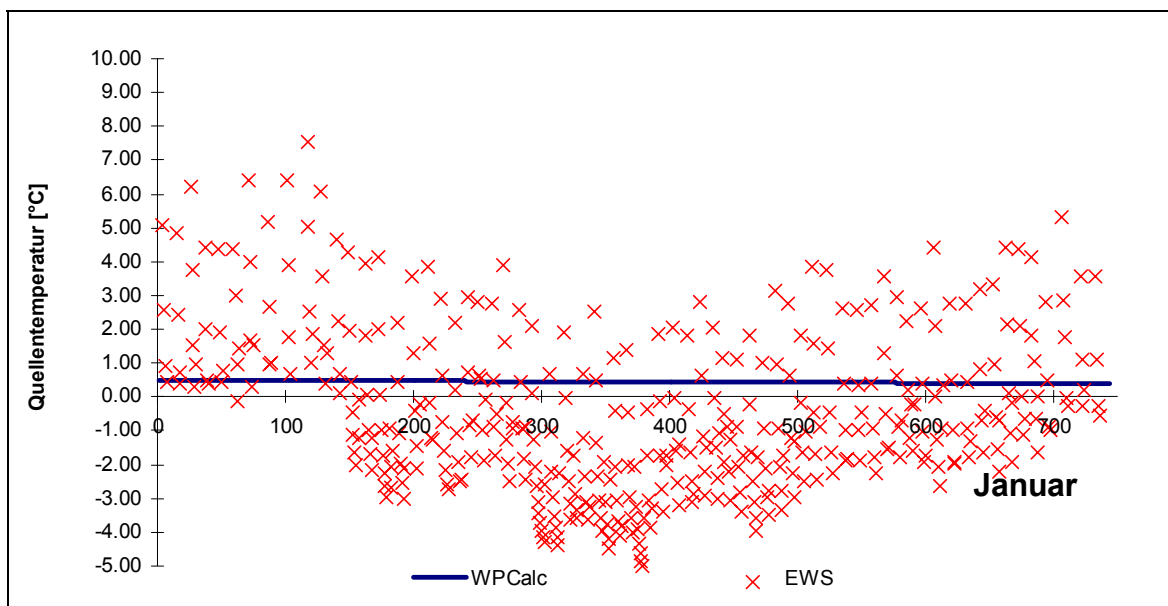


Abb 4-1: Quelltemperatur im Referenzfall, 120 m Sonde ohne Warmwasser, Vergleich Januar

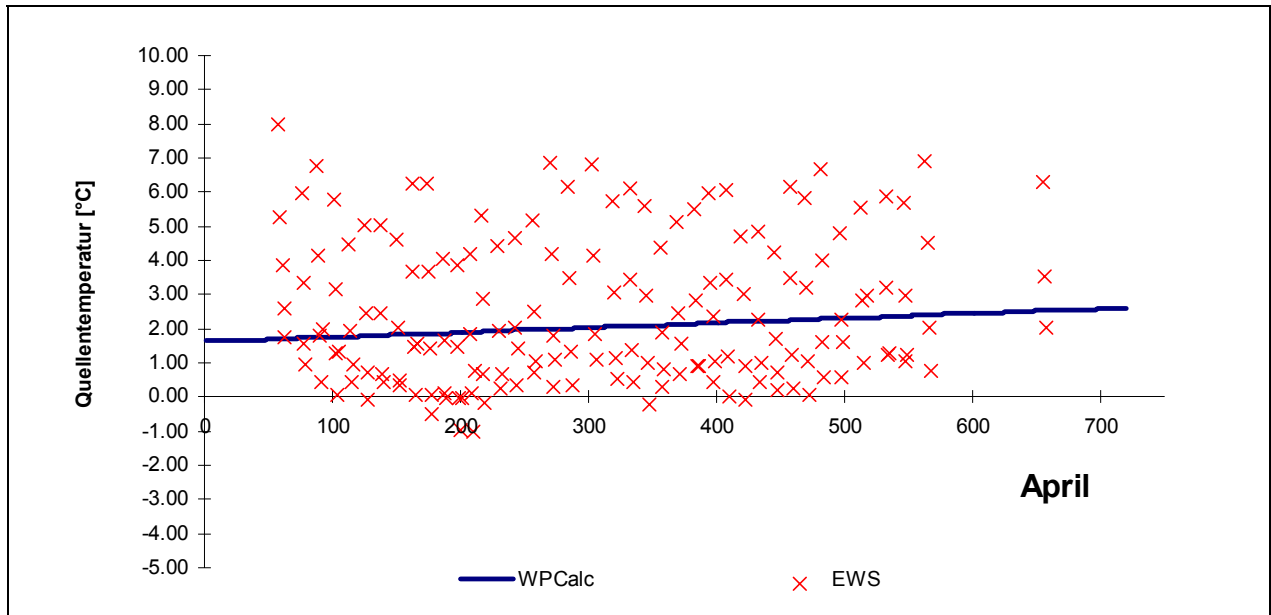


Abb 4-2: Quellentemperatur im Referenzfall, 120 m Sonde ohne Warmwasser, Vergleich April

Gut sichtbar ist, dass WPCalc pro Tag mit konstanten Quellentemperaturen rechnet.

In der Abbildung 4-3 ist das ganze Referenzjahr abgebildet, wobei hier die Tagesmittelwerte dargestellt sind. Bei der Mittelung wurden die Quellentemperaturen mit der Entzugsenergie gewichtet, so dass die hohen Temperaturen in der kurzen Anlaufphase (Kolbeneffekt) nicht überproportional gewichtet sind. Im Sommer ist die Wärmepumpe weder bei WPCalc noch beim EWS-Modul gelaufen. Das Programm WPCalc gibt im Sommer trotzdem eine Quellentemperatur vor. Dies ist nur möglich, weil diese nicht iterativ berechnet wird. Dies bedeutet, dass keine Korrektur stattfindet, wenn z.B. Sperrzeiten für die Wärmepumpe die Zusatzheizung anfahren lassen oder der COP sich in der Hochladephase des Speichers verschlechtert.

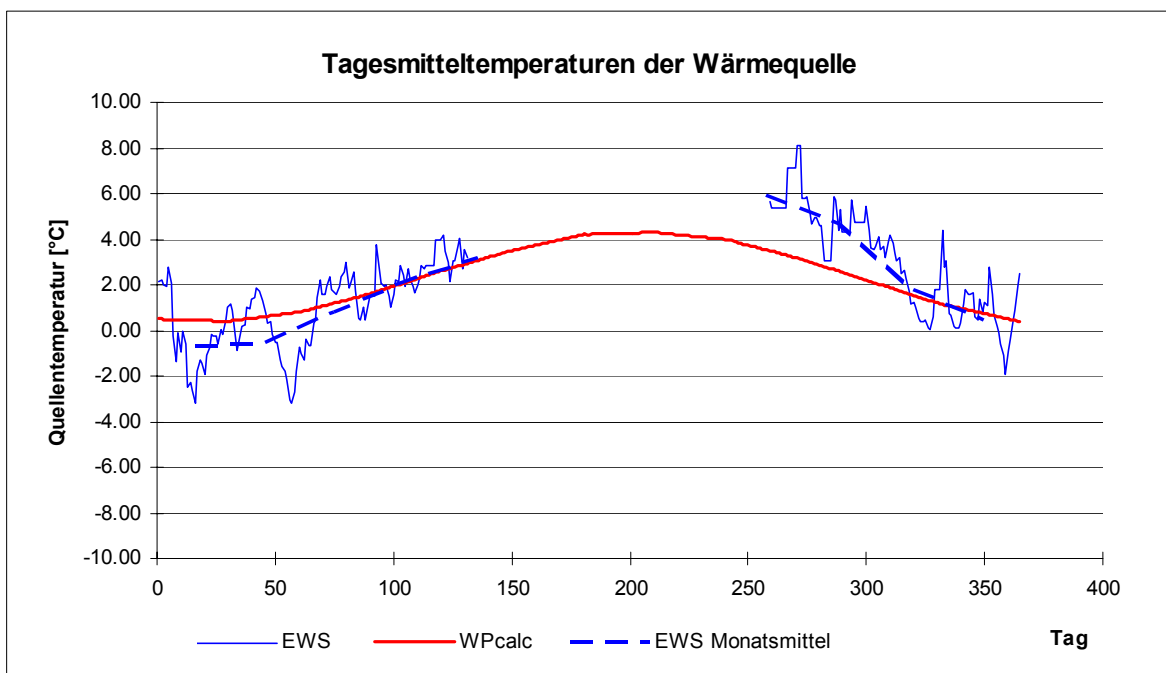


Abb 4-3: Tagesmittelwert der Quellentemperatur im Referenzfall der Sensitivitätsanalyse: 120 m Sonde ohne Warmwasser, Vergleich EWS und WPCalc

Der Vergleich der beiden Berechnungen für den Referenzfall zeigt, dass im Winter die Monats-Mittelwerte der Quelltemperatur des EWS-Moduls (gestrichelte Linie) nur unwesentlich von der Quelltemperatur der WPcalc-Berechnung abweicht. Die Abweichung im September und Oktober von ca. 2°C darf nicht überbewertet werden, da die Laufzeit der Wärmepumpe in diesen Monaten wesentlich kleiner ist als im Winter. Bei der Mittelung wurden die Temperaturen wiederum mit der Entzugsenergie gewichtet.

4.2 Parameter-Variationen und Vergleich mit WPcalc

Ausgehend vom Referenzfall aus Kapitel 4.2 wurde die folgende Parameter-Variation durchgeführt:

Variante	Betriebszeit EWS [h]	Betriebszeit WPcalc [h]	Entzugsenergie EWS [kWh]	Entzugsenergie WPcalc [kWh]	Sondenlänge [m]	λ_{Erde} [W/mK]	λ_{Fill} [W/mK]	D_i Sonde [mm]	D_b Bohrung [mm]	Massenstrom [kg/s]
1	1'691	1'691	10'633	10'633	120	1.8	0.7	26	120	0.6
2	2'639	2'639	13'378	13'378	120	1.8	0.7	26	120	0.6
3	1'691	2'043	10'633	10'190	90	1.8	0.7	26	120	0.6
4	1'691	1'572	10'633	10'855	150	1.8	0.7	26	120	0.6
5	1'691	1'880	10'633	10'382	120	0.9	0.7	26	120	0.6
6	1'691	1'586	10'633	10'816	120	3.6	0.7	26	120	0.6
7	1'691	1'691	10'633	10'633	120	1.8	0.7	26	120	0.3
8	1'691	1'691	10'633	10'633	120	1.8	0.7	26	120	1.2
9	1'691	1'691	10'633	10'633	120	1.8	0.7	20.4	120	0.6
10	1'691	1'691	10'633	10'633	120	1.8	0.7	32.6	135	0.6
11	1'691	1'691	10'633	10'633	120	1.8	0.5	26	120	0.6
12	1'691	1'691	10'633	10'633	120	1.8	0.9	26	120	0.6

Tabelle 4-2: Parameterliste der Sensitivitätsanalyse

4.2.1 Variation der Betriebszeit der Erdwärmesonde

Um die Betriebszeit der Erdwärmesonde zu erhöhen wurde beim Fall 2 zusätzlich das Warmwasser mit der Wärmepumpe erzeugt. Dies erhöht die Betriebszeit von 1'691h auf 2'639h pro Jahr, bei einem Wärmeentzug aus der Sonde von 13'378 kWh. Die übrigen Randbedingungen wurden unverändert gelassen. Wiederum wurde dieses, mit dem Programm WPcalc berechnete Profil der Wärmeentnahme aus der Erde als stündliche Eingabegrösse für die EWS-Berechnung genommen, so dass dieser Wert auch bei diesem Vergleich für beide Programme gleich war.

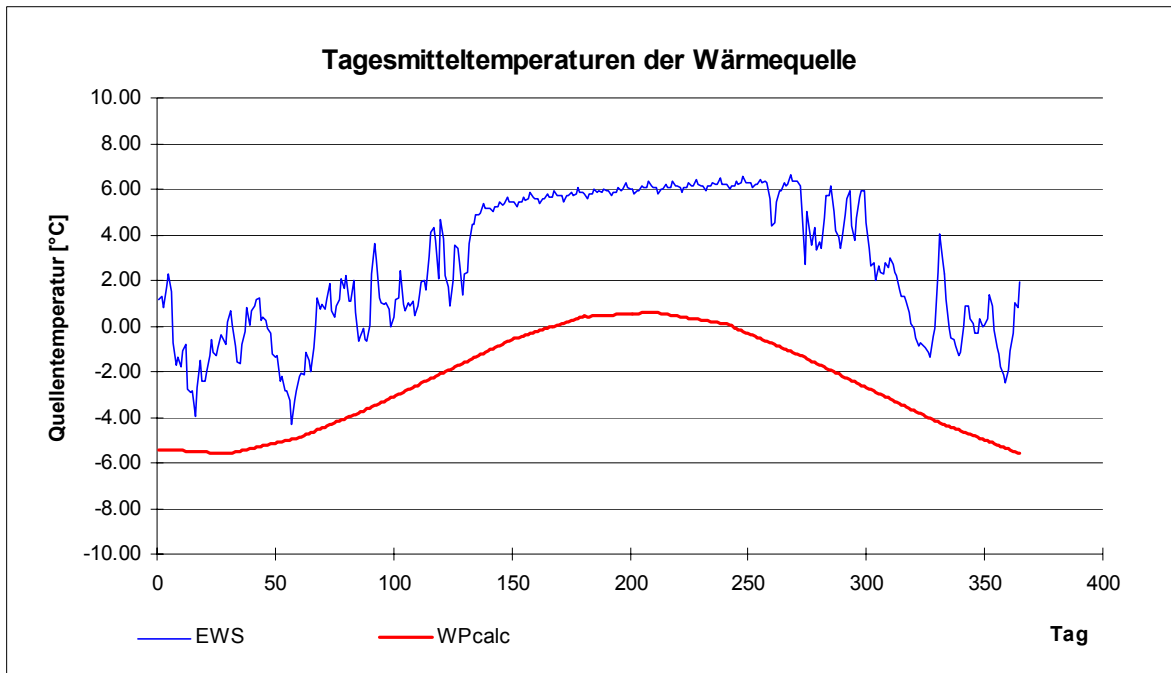


Abb 4-4: Quellentemperatur bei Warmwasserproduktion im Sommer mit WP

Der Vergleich zeigt nun eine starke Abweichung der Quellentemperaturen. Während EWS nur eine geringfügiges Absinken der Quellentemperatur voraussagt, erniedrigt sich diese beim Programm WPcalc sehr stark (4-6°C).

Welche Voraussage näher bei der Realität liegt, lässt sich damit nicht bestimmen. Auch die AWP-Richtlinie T1 (AWP, 1996) macht bei einer so langen Betriebszeit keine Empfehlungen über die nötige Sondenlänge. Das Erdsondenmodell des Programmes WPcalc macht allerdings keine Unterscheidung, ob die Entzugsenergie nur im Winter oder teilweise auch im Sommer anfällt. Es ist deshalb eher fraglich, ob mit dem WPcalc-Sondenmodell auch Erdsonden-Wärmepumpenanlagen mit Warmwasserproduktion berechnet werden können. Das Modell wurde eindeutig nicht darauf ausgelegt. Dank dem Kältemittel Propan wird aber immer häufiger auch das Brauchwasser mit der Wärmepumpe erwärmt. Ein Wärmepumpen-Simulationsprogramm sollte diesen Fall in Zukunft somit auch berechnen können.

4.2.2 Variation der Sondenlänge

Die Sondenlänge wurde um 25% vergrößert und verkleinert.

Wie erwartet sinkt bei der Verkürzung der Sondenlänge auf 90 m die Quellentemperatur massiv ab. WPcalc sagt eine etwas grössere Absenkung voraus. Beim EWS-Modul vergrößern sich andererseits die Extrema. Die etwas tiefere WPcalc-Quellentemperaturen lassen sich teilweise durch die Verschlechterung der Arbeitszahl erklären, wodurch die Entzugsenergie leicht abnimmt.

Beim EWS-Modul ist die Wärmepumpe nicht mitberücksichtigt. Die Entzugsenergie wurde wie beim Referenzfall belassen.

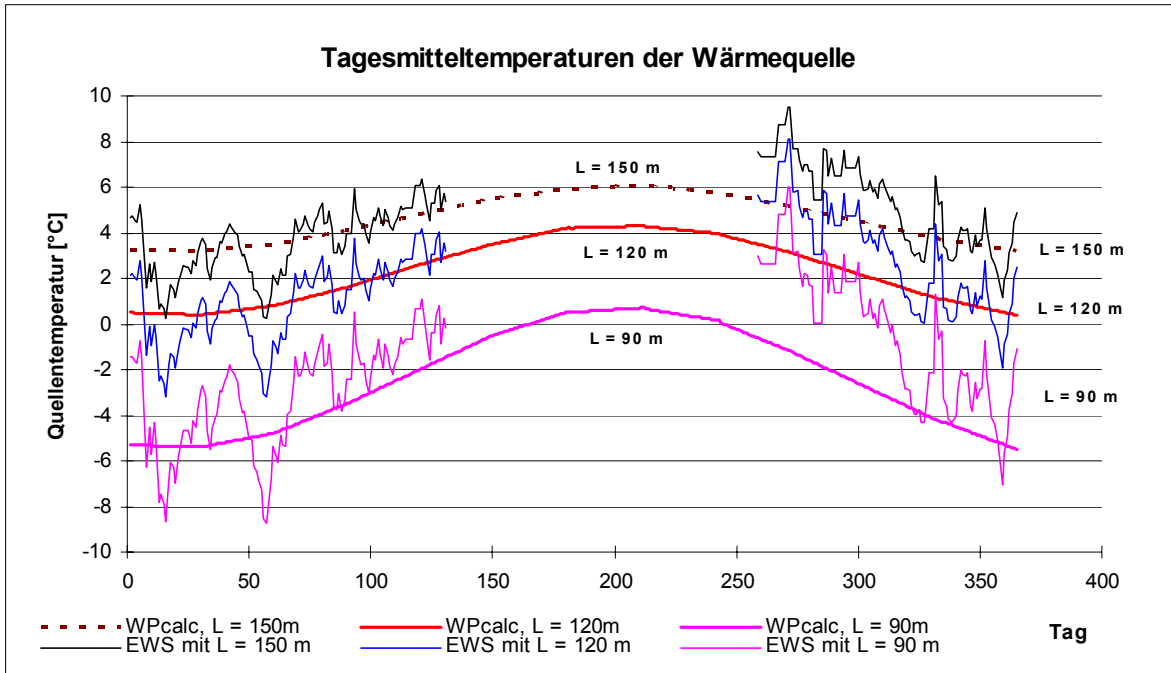


Abb 4-5: Variation der Sondenlänge bei konstantem Entzug

4.2.3 Variation der Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} der Erde

Die Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} wurde im Bereich von 0.9 - 3.6 W/mK variiert. Beide Programme verhalten sich wie erwartet:

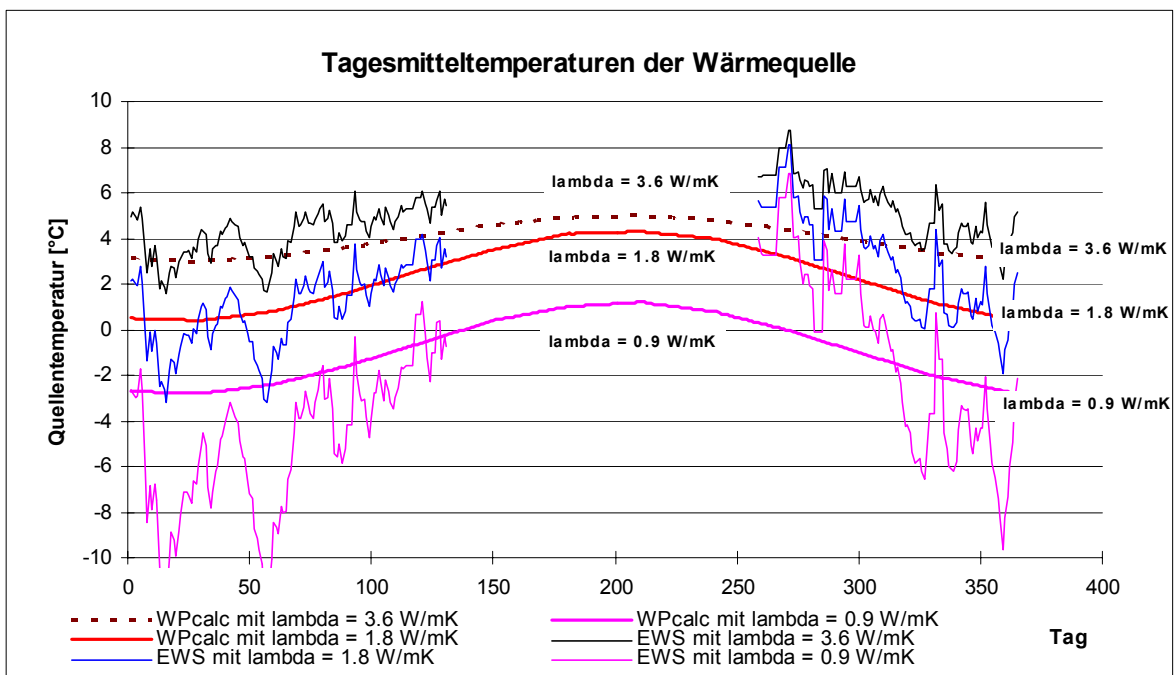


Abb 4-6: Variation der Wärmeleitfähigkeit λ des Erdreiches

Die durchschnittlichen Quellentemperaturen beider Programme sind sehr ähnlich. Bei kleinen Wärmeleitfähigkeiten steigen die Extrema aber sehr stark an. Es könnte somit der Fall eintreten, dass mit einer Durchschnittsberechnung die Wärmepumpe noch problemlos arbeiten kann, dies aber in Realität wegen der tieferen Spitzen gar nicht mehr möglich ist. Es sei daran erinnert, dass die Wärmepumpe die Quellentemperatur ja noch abkühlen muss.

4.2.4 Variation der Sondendurchmesser

Die Sondendurchmesser sind im WPcalc-Modell keine veränderbaren Parameter, es ist somit in Abbildung 4-7 nur eine Kurve für dieses Programm aufgezeichnet. Aber auch das EWS-Modul berechnet bei einer Variation der Sondendurchmesser nur geringfügige Änderungen. Grund dafür ist die periphere Lage der Sonden in der Bohrung gemäss Gleichung 2-16.

Gleichzeitig mit den Sondendurchmessern wurden auch die Bohrdurchmesser auf die in der Schweiz für Doppel-U-Sonden üblichen Dimensionen angepasst. Die drei Varianten sind:

Nenngrösse	Innendurchmesser Sondenrohr D_i	Radius innen des Sondenrohres r_0	Bohrdurchmesser D_b	Radius Bohrung r_1
25 mm	20.4 mm	10.2 mm	115 - 120 mm*	57.5 - 60 mm*
32 mm	26.0 mm	13.0 mm	115 - 120 mm*	57.5 - 60 mm*
40 mm	32.6 mm	16.3 mm	135 mm	67.5 mm

* je nach Gesteinstyp. Für die Berechnung wurde der Bohrdurchmesser auf 120 mm gesetzt.

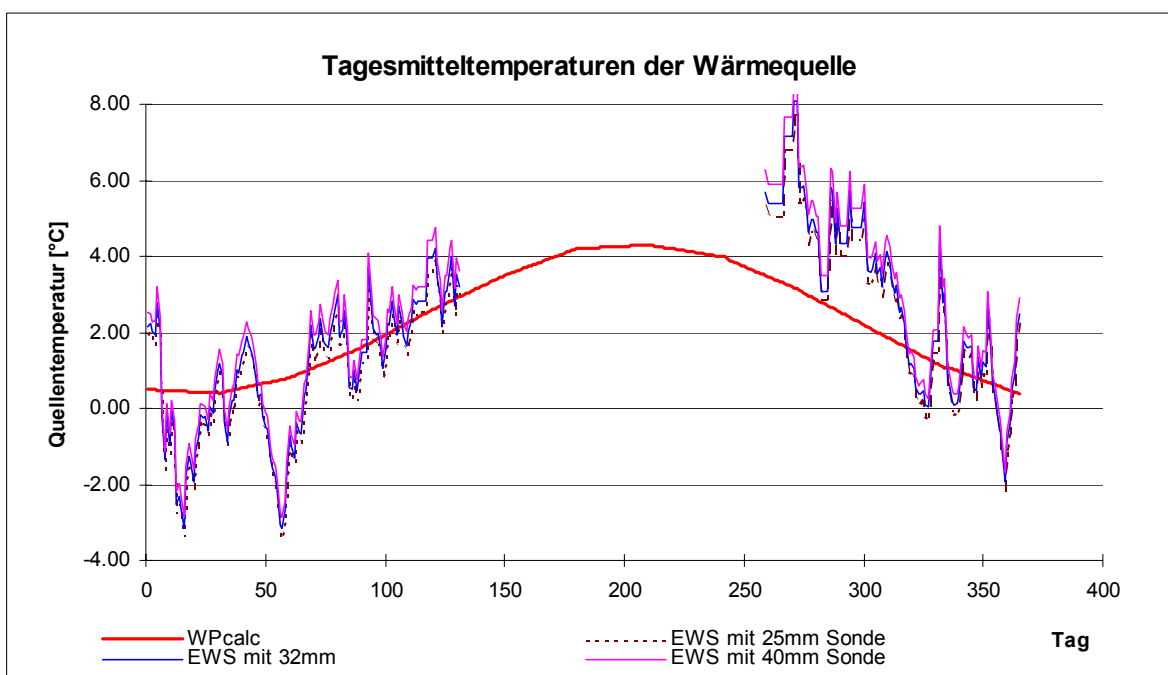


Abb 4-7: Variation der Sondendurchmesser

4.2.5 Variation des Solemassenstroms

Der Solemassenstrom ist im Programm WPcalc kein veränderbarer Parameter. Auch beim EWS-Modul ändert eine Verdoppelung oder Halbierung des Soledurchsatzes kaum etwas an der Quelltemperatur.

Der Solemassenstrom hat seinen Haupteinfluss beim Druckabfall und bei der Abkühlung der Sole im Verdampfer der Wärmepumpe.

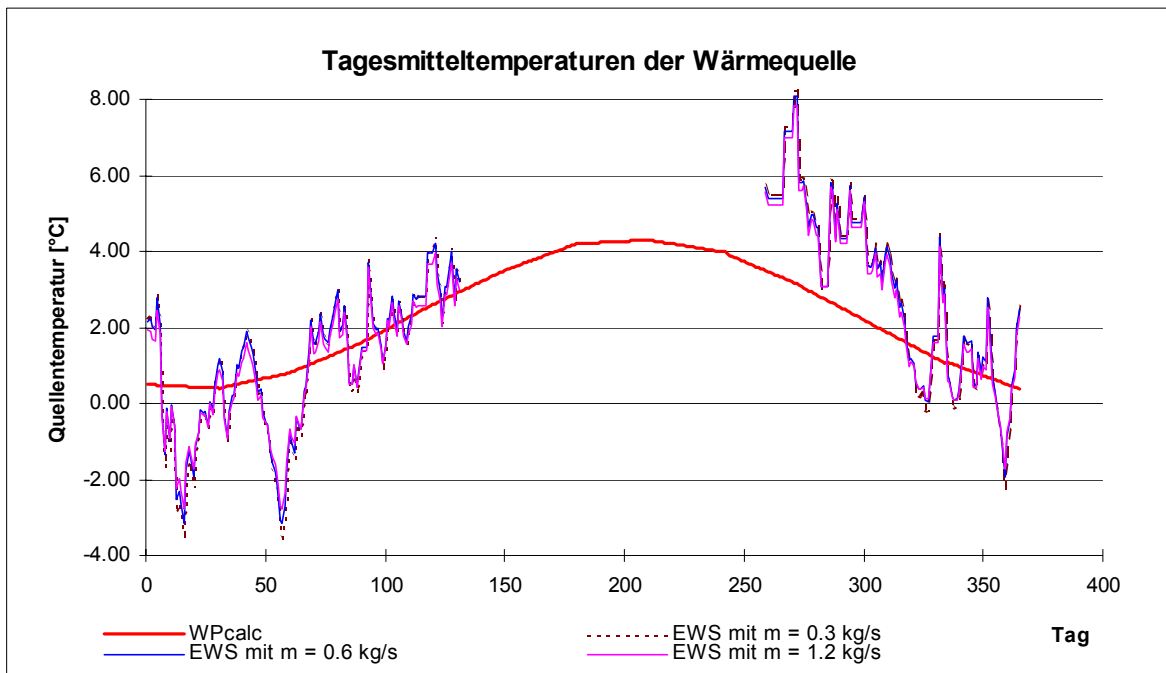


Abb 4-8: Variation des Solemassenstroms

4.2.6 Variation der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung

In der Literatur (z.B. Sanner, 1992) wird der übliche Variationsbereich für die Wärmeleitfähigkeit λ_{Fill} der Hinterfüllung auf 0.5 bis 0.9 W/mK angegeben. Für diese Werte wurde auch die folgende Parametervariation angesetzt.

Beim Programm WPcalc ist die Wärmeleitfähigkeit λ_{Fill} kein Eingabeparameter, es ist deshalb in Abbildung 4-9 für dieses Programm nur eine Kurve eingezeichnet.

Die Resultate zeigen beim EWS-Modul einen eher geringen Einfluss dieses Parameters auf die Quelltemperatur. Zu beachten ist aber auch hier wiederum, dass die Sondenrohre sehr peripher in der Bohrung angenommen sind. Werden die Rohre mehr ins Zentrum der Bohrung gesetzt, so vergrößert sich damit auch der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung auf die Quelltemperatur.

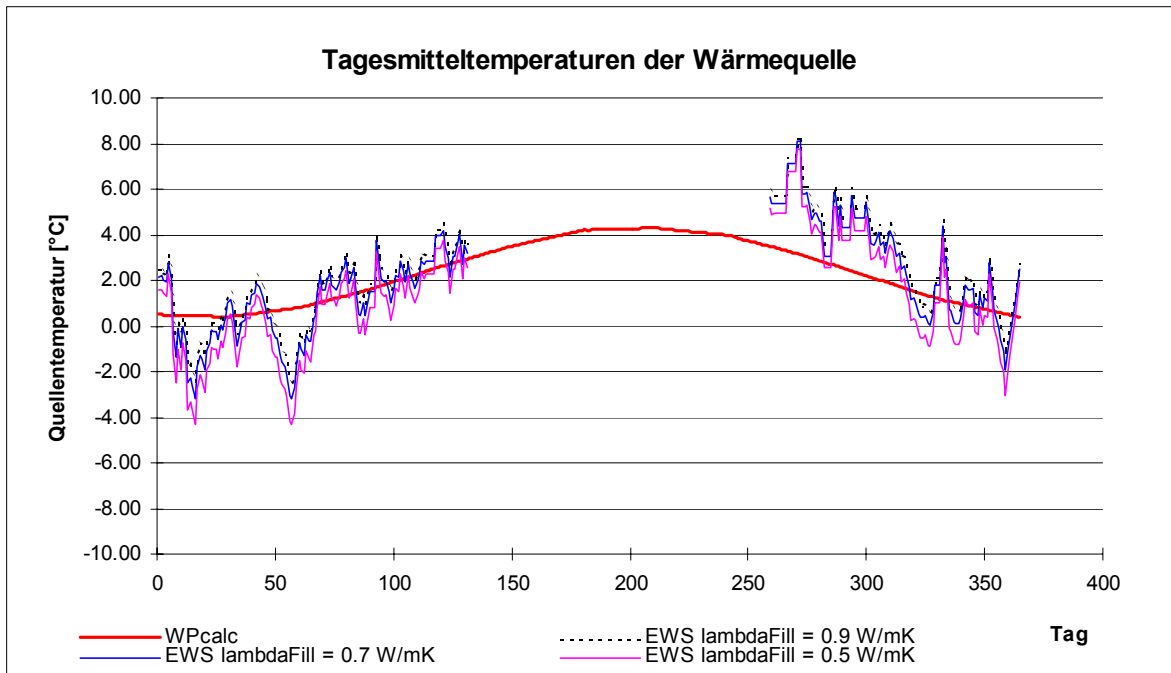


Abb 4-9: Variation der Wärmeleitfähigkeit λ der Hinterfüllung

4.2.7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Paramtervariation zeigte in allen Punkten den erwarteten Einfluss auf die Quellentemperatur.

Die Durchschnitts-Quellentemperaturen aus der EWS-Berechnung und der WPcalc-Berechnung unterscheiden sich in den meisten Fällen nur wenig. Eine Ausnahme macht die Verlängerung der jährlichen Betriebszeit der Sonde, bei der WPcalc eine wesentlich tiefere Quellentemperatur voraussagt.

Keine Rechnung trägt das Programm WPcalc den Schwankungen bei Perioden mit stärkerem Entzug. Gerade bei knapp dimensionierten Sonden sind diese Schwankungen beträchtlich. Dies führt in diesem Fall dazu, dass der COP zu hoch berechnet wird.

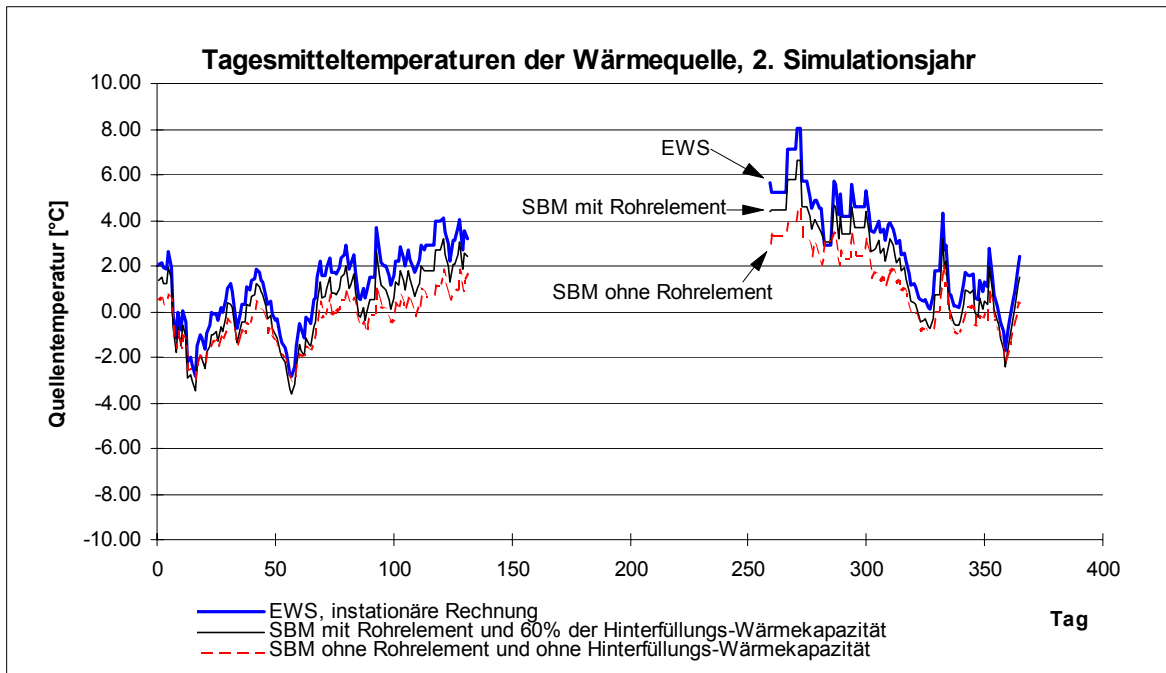
Das EWS-Modul könnte im Programm WPcalc als Ergänzung zum Bestehenden Modell eingebaut werden. Die Rechenzeit für einen Jahresrun würde sich bei den heutigen Rechnern dadurch allerdings um einige Minuten verlängern. Eine Vereinfachung (mit entsprechender Rechenzeitreduktion) wäre durch eine stationäre Soleberechnung und einen vereinfachten Ansatz für die Einschwingphase des Erdreiches denkbar.

4.3 Vergleich mit SBM

Das Programm SBM wurde von Eskilson (1986) an der Universität Lund entwickelt, um mit dem Superpositionsprinzip das Langzeitverhalten von Sondenfelder berechnen zu können. Es löst die Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten 2-dimensional. Durch diesen Einbezug der vertikalen Wärmeleitung ist es mit dem Programm SBM möglich, Fragen über die Herkunft der Wärme zu beantworten und Berechnungen über mehrere Jahrzehnte Simulationsdauer korrekt durchzuführen. Dies ist mit allen Ansätzen, die auf der Linienquellentheorie von Kelvin basieren nicht möglich, da die vertikale Wärmeleitung darin vernachlässigt ist. Der Einbezug der vertikalen Wärmeleitung beim SBM wird aber mit einer grösseren Rechenzeit erkauft, die speziell bei Gesamtsystemsimulationen mit kleinen Rechenzeitschritten massiv wird (das Programm SBM wurde auch nicht dafür entwickelt und optimiert). Zudem wird beim SBM das für das Langzeitverhalten von Sondenfeldern unwesentliche transiente Verhalten der Erdsonden vernachlässigt und die Sole stationär gerechnet. Je kürzer der Simulationszeitschritt, um so wesentlicher wird aber das transiente Verhalten. Als Grössenmassstab kann hier die Ausstosszeit der Sole in der Sonde genommen werden, die je nach Typ in der Grössenordnung von 3 - 10 Minuten liegt!

Das Einzelprogramm SBM wurde von Pahud an der ETH Lausanne (Pahud, Fromentin, Hadorn, 1996) unter dem Namen TRNSBM für das System simulationsprogramm TRNSYS angepasst. Damit ist es möglich, Sondenfelder im Verhalten eines Gesamtsystems zu berechnen. Durch das Vorschalten des TRNSYS-Moduls „Rohrelement“ mit einer Massenträgheit, die der Sole in der Sonde entspricht, kann auch das Trägheitsverhalten angenähert werden.

Im folgenden Vergleich wurde der in Kapitel 4.1 beschriebene Referenzfall sowohl mit dem EWS-Modul, als auch mit TRNSBM nachgerechnet, wobei einmal das Rohrelement mit einbezogen und einmal darauf verzichtet wurde. Es wurden für beide Programme die gleichen thermischen Widerstände R_1 und R_2 (bzw. R_a und R_b) verwendet. Verglichen wird wiederum das zweite Simulationsjahr (mit gleichem Entzugsprofil wie das erste Jahr). Wir vergleichen die Quelltemperatur bei identischer Entzugsleistung.



**Abb 4-10: Vergleich EWS und SBM (mit und ohne Rohrelement und Hinterfüllungswärmekapazität)
Tagesmittel-Quellentemperaturen (gewichtet mit Wärmeentzug) im 2. Simulationsjahr**

Vergleicht man die Tagesmittelwerte (die mit der Entzugsleistung gewichtet sind) in Abbildung 4-10, so ist generell eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen. An Tagen mit grosser Laufzeit sind die Quellentemperaturen praktisch identisch. An Tagen mit geringerer Laufzeit der Sonde kommen die unterschiedlichen transienten Ansätze zum tragen, wobei beim Einbezug des Rohrelementes die Abweichung maximal 1°C, ohne Verwendung des Rohrelementes maximal 2°C wird. Zu beachten ist in unserem Referenzfall, dass das Lastprofil für ein Einfamilienhaus mit grossem, thermischen Speicher erstellt wurde (Zweifel et al., 1996), wir also nur ein geringes takten der Wärmepumpe haben. Ausserdem ist der Zeitschritt von einer Stunde recht gross. Bei höheren Taktraten ist ein grösserer Einfluss des transienten Verhaltens zu erwarten.

Ein Blick mit der Lupe in eine Woche im Januar (Abbildung 4-11) und im April (Abbildung 4-12) zeigt ein ganz ähnliches Verhalten. Die Unterschiede beim Stillstand der Sonde sind auf die unterschiedlichen abgebildeten Temperaturen zurückzuführen: Beim EWS-Modul ist die Quellentemperatur immer gleich der Temperatur im letzten, hinaufströmenden Soleelement. Beim Stillstand wird die Sonde abgestellt und die weitere Wärmeaufnahme erfolgt konduktiv mit reduziertem Wärmeübergang (Formel 2-44). Bei der SBM-Simulation hingegen wurde die Sonde nie abgestellt, damit überhaupt eine Quellentemperatur gezeigt werden kann und die transienten Effekte mit dem Rohrelement besser modelliert werden können. Damit gleicht sich die „Quellentemperatur“ im Stillstand nicht wie beim EWS der Erdtemperatur der obersten Schicht an, sondern sie strebt dem Mittelwert der Erdtemperatur über die ganze Sondentiefe zu. Energetisch hat dieser Unterschied praktisch keine Relevanz, da wir bei Stillstand der Sonde ja auch keinen Wärmeentzug haben. Auch beim EWS ist die durchschnittliche Soletemperatur nach längerem Stillstand gleich der mittleren Erdtemperatur über die ganze Tiefe der Sonde, nur wird das nicht in der „Quellentemperatur“ sichtbar.

Generell kann weiter festgestellt werden, dass offensichtlich nach 2 Jahren noch kein Einfluss auf das Resultat durch die Vernachlässigung der vertikalen Wärmeleitung ersichtlich ist.

Vergleicht man die Rechenzeit für die Simulation von 2 Jahren im Stundenschritt, so erhält man bei vorgegebener Wärmeentzugsleistung:

- EWS: 6 Minuten Rechenzeit auf Pentium 200 MHz - Prozessor
- SBM: 10 Minuten Rechenzeit auf DEC Alpha Station 333 MHz - Prozessor

Bei kleineren Simulationszeitschritten vergrößert sich die Differenz in der Rechenzeit zwischen den beiden Ansätzen, da das EWS-Modul bei unserem Referenzfall intern mit 6-Minuten-Zeitschritten rechnet. Eine bedeutende Reduktion der Rechenzeit ist zudem beim EWS-Modul möglich, wenn bei kleinen Simulationszeitschritten (z.B. 3 Min) auf die Iteration der Entzugsleistung verzichtet wird und statt dessen bei der Eintrittstemperatur in den Verdampfer der Wärmepumpe mit der Quellentemperatur des letzten Simulationszeitschrittes gerechnet wird. Der daraus resultierende Fehler dürfte relativ klein sein, da die Sole in unserem nicht unrealistischen Beispiel 7 Minuten braucht, um die Sonde zu durchströmen und die Wärmekapazität der Sole und der Hinterfüllung dämpfend auf den zeitlichen Diskretisierungsfehler wirkt. Bei einer realistischen Wärmepumpensimulation dürfte der Simulationszeitschritt sowieso nicht grösser als 5 Minuten sein, entsprechend kurze Laufzeiten der Wärmepumpen werden in der Praxis immer wieder beobachtet. Will man mit der Systemsimulation gar noch Anfahreffekte der Wärmepumpe zeitlich auflösen, so muss der Simulationszeitschritt sogar noch wesentlich kleiner gewählt werden.

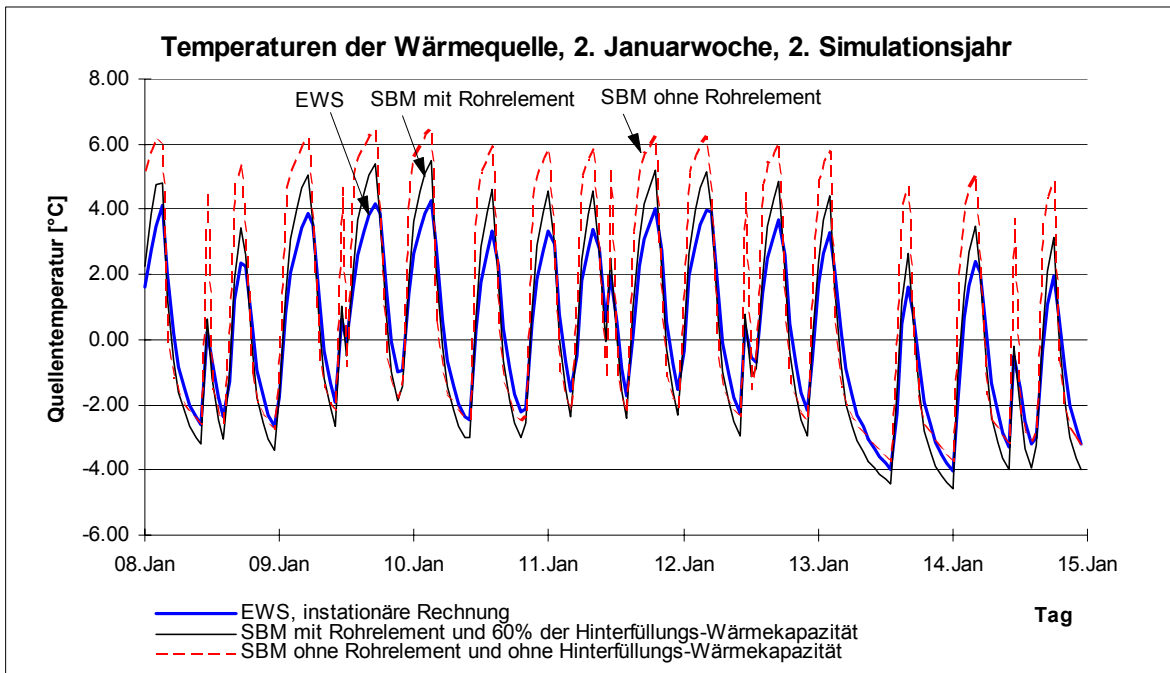


Abb 4-11: Vergleich EWS und SBM, Quelltemperatur 2. Januarwoche des 2. Simulationsjahres

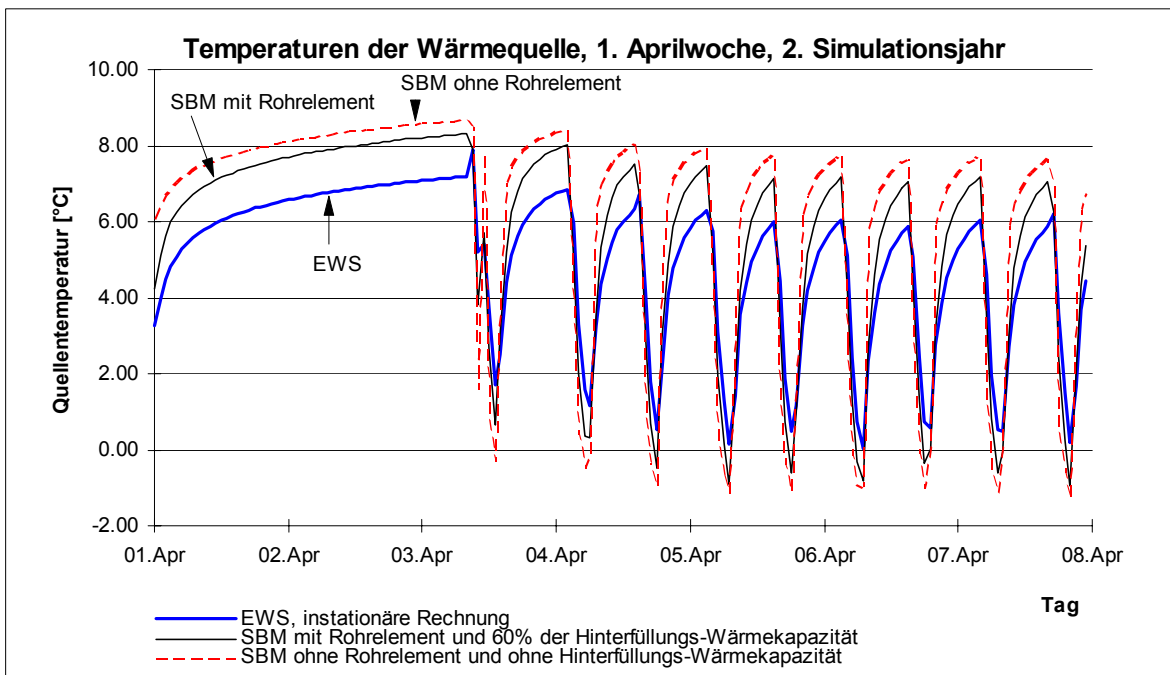
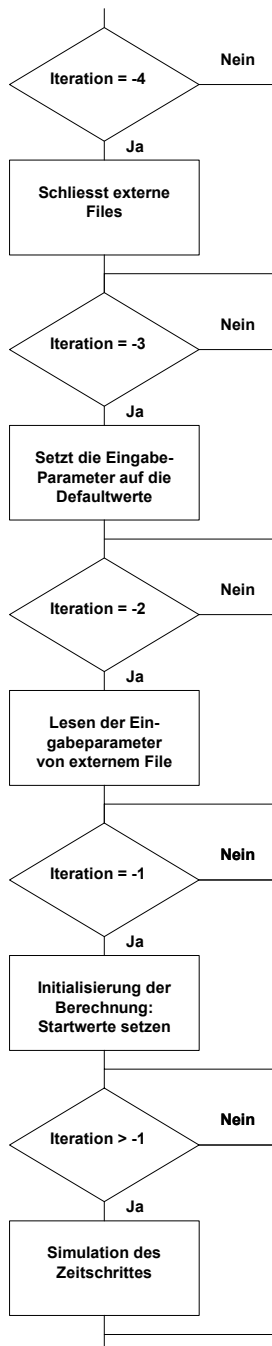


Abb 4-12: Vergleich EWS und SBM, Quelltemperatur 1. Aprilwoche des 2. Simulationsjahres

5 Programmbeschreibung

5.1 Flussdiagramme

5.1.1 Modulaufruf aus dem Hauptprogramm



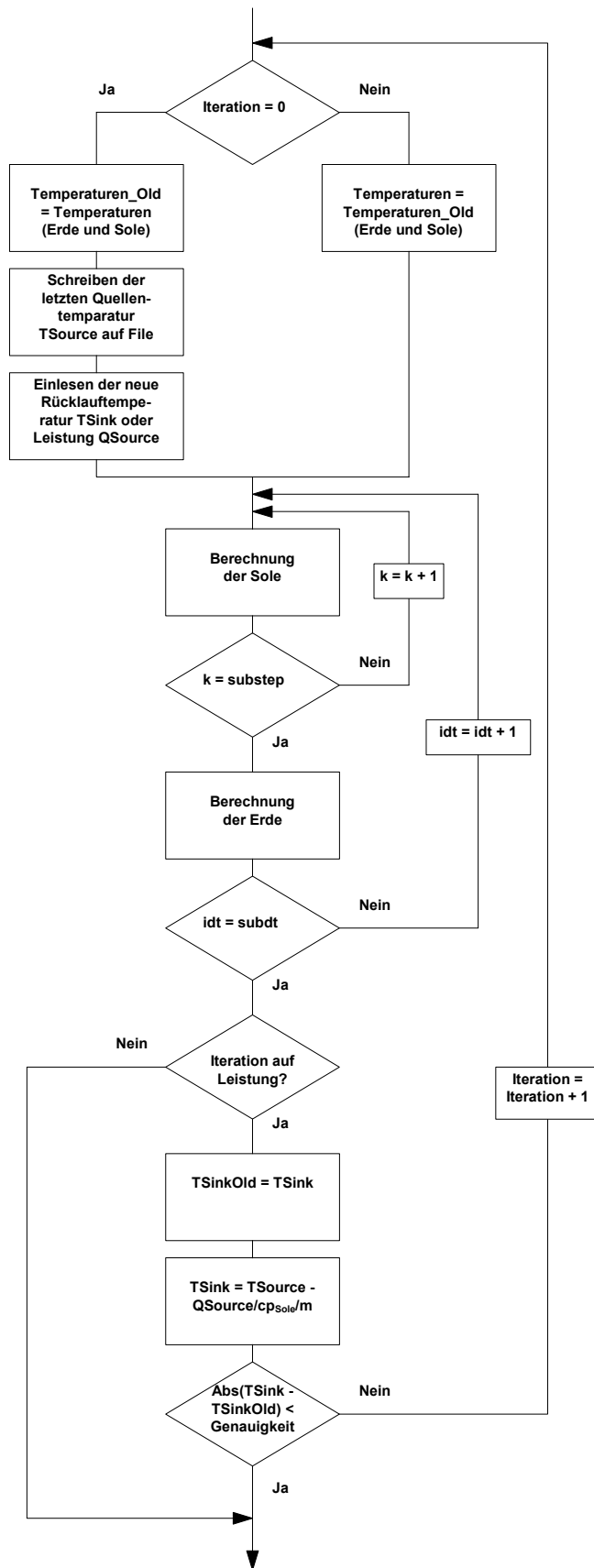
Das Erdsondenmodul EWS wird mit dem Befehl
`Erdsonde (Iteration)`

aufgerufen, wobei der Parameter *Iteration* angibt, ob wir uns in der Initialisierungsphase oder in der Simulationsphase des Programmes befinden. Dabei kann *Iteration* die folgenden Werte annehmen:

- *Iteration* = -4: Schliesst externe Eingabe- und Ausgabefiles
- *Iteration* = -3: Setzt alle Programmparameter auf einen Vorschlagswert (Defaultwert)
- *Iteration* = -2: Liest die wichtigsten Programmparameter aus einem externen Eingabefile
- *Iteration* = -1: Initialisiert die Simulation (Berechnung der Matrizen B, Formel 2-6) und setzt die Anfangswerte für die Simulation
- *Iteration* = 0: Berechnet den nächsten Zeitschritt. Erstmaliger Aufruf des Sondenmoduls während einer Iteration des Hauptprogrammes für den aktuellen Zeitschritt.
- *Iteration* > 0: Das Hauptprogramm befindet sich in einer Iterationsschleife. Startwert für die Temperaturberechnung ist der letzte Iterationsschritt des vorherigen Zeitschrittes.

Der Parameter *Iteration* entspricht im TRNSYS-Modul dem Parameter *Info(7)*. Zur besseren Lesbarkeit sind im EWS-Modul die Konstanten *CloseFile* = -4, *Default* = -3, *OpenFile* = -2 und *Initial* = -1 definiert. Ein Modulaufruf kann somit auch lauten: `Erdsonde(Default)`, `Erdsonde(OpenFile)`, `Erdsonde(Initial)` oder `Erdsonde(CloseFile)`.

5.1.2 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 vorliegenden EWS-Modul sind beide Möglichkeiten vorgesehen. Setzt man den Eingabeparameter *Leistung = true*, so wird auf diese Entzugsleistung hin iteriert, bei *Leistung = false* erfolgt keine interne Iteration, sondern es wird bei einer vorgegebenen Rücklaufftemperatur TSink die entsprechende Quelltemperatur TSource berechnet. Selbstverständlich ist es auch möglich, *Leistung = false* zu setzen und die Iteration auf eine Entzugsleistung extern im Hauptprogramm zu realisieren. In diesem Fall muss die Iterationsvariable im ersten Iterationsaufruf im Hauptprogramm auf *Iteration = 0* gesetzt und bei jedem weiteren Iterationsaufruf um eins hinaufgezählt werden (*Iteration = Iteration + 1*).

Die Eingabe der Rücklaufftemperatur TSink ist in jedem Fall notwendig, bei *Leistung = true* dient sie allerdings nur als 1. Schätzwert für die Iteration.

Im TRNSYS-Modul ist die Interne Iteration nicht vorgesehen, diese hat dort somit immer extern im Hauptprogramm zu erfolgen.

5.2 Parameter im EWS-Modul

5.2.1 Eingabeparameter

In der folgenden Parameterliste ist Iteration ein Wertparameter, alles andere sind Variablen-Parameter. Vektor ist ein array[0..DimAxi] mit Real-Werten. Die Parameter müssen im Hauptprogramm nicht mehr deklariert werden.

Iteration	integer [-]	Modul-Steuervariable, beschrieben in Kapitel 5.1
DimAxi	integer [-]	Anzahl Rechenknoten in axialer Richtung Typischer Wert: 5
DimRad	integer [-]	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung Typischer Wert: 6
Zeitschritt	integer [Min]	Zeitschritt für Erdwärmesonde aus Hauptprogramm Typischer Wert: 3 - 60 Minuten
subdt	integer [-]	Anzahl interner Unterteilungen für den Simulationszeitschritt des Erdreiches für die Crank-Nicholson-Berechnung, wobei $dt = \text{Zeitschritt} * 60 / \text{subdt}$ [s]. Ein Vorschlag für subdt wird bei der Initialisierung gemacht.
substep_run	integer [-]	Anzahl interner Unterteilungen für den Simulationszeitschritt der Sole, wenn die Solepumpe läuft. Der Solezeitschritt dt2 berechnet sich daraus mit $dt2 = dt / \text{substep_run}$ [s]. Ein Vorschlag für substep_run wird bei der Initialisierung gemacht.
substep_stop	integer [-]	Anzahl interner Unterteilungen für den Simulationszeitschritt der Sole, wenn die Solepumpe steht. Der Solezeitschritt dt2 berechnet sich daraus mit $dt2 = dt / \text{substep_stop}$ [s]. Ein Vorschlag für substep_stop wird bei der Initialisierung gemacht.
RepRandbed	integer [Wochen]	Häufigkeit der Neuberechnung der äusseren Randbedingung mit der Trichterformel. Für die üblichen Fälle hat sich <i>RepRandbed</i> = 1 bewährt.
MonitorAxi	integer [-]	Ort des Monitorpunktes in axialer Richtung. Die Erdtemperatur des Monitorpunktes kann in das Ausgabefile hinausgeschrieben werden.
MonitorRad	integer [-]	Ort des Monitorpunktes in radialer Richtung.
numrows	longint [-]	Anzahl der Zeitschritte auf dem Eingabefile.

rhoFill	real	[kg/m ³]	Dichte der Hinterfüllung Typischer Wert: 1'200 kg/m ³
cpFill	real	[J/kgK]	spezifische Wärmekapazität der Hinterfüllung Typischer Wert: 1'600 J/kgK
lambdaFill	real	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung Typischer Wert: 0.7 W/mK
rhoSole	real	[kg/m ³]	Dichte der Sole Typischer Wert: 1'050 kg/m ³ Wasser: 1'000 kg/m ³
cpSole	real	[J/kgK]	spezifische Wärmekapazität der Sole Typischer Wert: 3'800 J/kgK Wasser: 4'210 J/kgK
lambdaSole	real	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit der Sole Typischer Wert: 0.5 W/mK Wasser bei 5°C: 0.57 W/mK
nueSole	real	[m ² /s]	kinematische Viskosität der Sole Typischer Wert: 4 - 6 10 ⁻⁶ m ² /s Wasser: 1.8 10 ⁻⁶ m ² /s
cpErde	Vektor	[J/kgK]	Spezifische Wärmekapazität der Erde der jeweiligen axialen Schicht (von oben nach unten). Es kann für jede axiale Schicht, entsprechend der jeweiligen Gesteinsart, ein anderer Wert, eingegeben werden. Typischer Wert: 800 - 1'000 J/kgK
rhoErde	Vektor	[kg/m ³]	Dichte der Erde der jeweiligen axialen Schicht (von oben nach unten). Es kann für jede axiale Schicht, entsprechend der jeweiligen Gesteinsart, ein anderer Wert, eingegeben werden. Typischer Wert: 2'500 - 3'000 kg/m ³
lambdaErde	Vektor	[W/mK]	Spezifische Wärmekapazität der Erde der jeweiligen axialen Schicht (von oben nach unten). Es kann für jede axiale Schicht, entsprechend der jeweiligen Gesteinsart, ein anderer Wert, eingegeben werden. Typischer Wert: 1.5 - 3 W/mK
R1	real	[K/W]	Thermischer Widerstand zwischen Sole und erstem axiale Rechenknoten. Wird $R1=0$ gesetzt, so verwendet das Programm Formel 2-16 für R_1 .
Ra	real	[Km/W]	„internal thermal resistance“: Widerstand zwischen hinauf- und hinunterströmender Sole, multipliziert mit Sondenlänge dl. Wird $Ra=0$ gesetzt, so verwendet das Programm Formel 2-17 für R_2 .
Rb	real	[Km/W]	„thermal borehole resistance“: Thermischer Widerstand zwischen Sole und Bohrradius r_1 , multipliziert mit Sondenlänge dl. Wird $Rb=0$ gesetzt, so verwendet das Programm Formel 2-16 für R_1 .

Sondenlaenge	real	[m]	Länge der Sondenbohrung Typischer Wert: 50 - 200 m
Sondendurchmesser	real	[m]	Innendurchmesser D_i der Sonde Typische Werte: 0.0204 / 0.026 / 0.0326 m
Dicke_Sondenrohr	real	[m]	Dicke der Sondenwand. Wird in der aktuelle Version des Programmes nicht verwendet.
Bohrdurchmesser	real	[m]	Durchmesser der Bohrung Typischer Wert: 0.115 - 0.135 m
Auslegungsmassenstrom	real	[kg/s]	Massenstrom der Sole bei Betrieb der Sondenpumpe. Wird für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α verwendet. Typischer Wert: 0.4 - 1.0 kg/s
Massenstrom	real	[kg/s]	Momentaner Solemassenstrom, muss in jedem Zeitschritt neu vorgegeben werden. Beim Stillstand der Sonde muss <i>Massenstrom=0</i> gesetzt werden.
Bodentemp	real	[°C]	Mittlere jährliche Bodentemperatur in der Nähe der Erdoberfläche. Dieser Wert wird für die Bestimmung der Anfangstemperaturen des Erdreiches verwendet. In der Regel ist im ungestörten Fall Bodentemp \approx Jahersdurchschnitts-Lufttemperatur +0.8°C bis +3°C (schneereiche Gegend). Verzichtet man auf das Einschwingen der Erdtemperatur über mehrere Jahre, so kann die entsprechende Auskühlung durch eine Reduktion von Bodentemp berücksichtigt werden. Bei richtig dimensionierten Einzelsonden ist diese Reduktion 0.5 - 1.0°C (Burkhardt et al., 1989), bei zu klein dimensionierten Sonden und Sondenfeldern kann die entsprechend Reduktion wesentlich grösser werden. Für Sondenfelder kann der Wert für Bodentemp zum Beispiel mit dem Antwortfunktions-Programm EED (Hellström und Sanner, 1994) vorausberechnet werden. Typische Werte, Einschwingen wird berechnet: Mittelland: Jahresmittel-Lufttemperatur + 0.8°C Alpen: Jahresmittel-Lufttemperatur + 2°C Typische Werte nach mehreren Jahren Entzug: Mittelland: Jahresmittel-Lufttemperatur Alpen: Jahresmittel-Lufttemperatur + 1°C
Tgrad	real	[°C/m]	Axialer Temperaturgradient in der ungestörten Erde. Typischer Wert: 0.025 - 0.035 °C/m

Rechenradius	real	[m]	Äusserer Rand des Simulationsgebietes und Ort, wo mit der Trichterformel die Temperaturrandbedingung berechnet wird. Typischer Wert: 1.5 - 2 m.
Gitterfaktor	real	[-]	Faktor zur Bestimmung der Rechenvolumen. Gleichung 2-7. Typischer Wert: 0.7 - 2.0
Sicherheit1	real	[-]	Numerischer Sicherheitsfaktor zur Berechnung des internen Zeitschrittes dt2 für die Soleberechnung. Je grösser Sicherheit1 ist, um so kleiner wird der Simulationszeitschritt dt2. Empfohlener Wert: 4.0
Sicherheit2	real	[-]	Numerischer Sicherheitsfaktor zur Berechnung der internen Zeitschritte dt für die Berechnung der Erdtemperaturen. Je grösser Sicherheit2 ist, um so kleiner wird der Simulationszeitschritt dt. Empfohlener Wert: 2.0.
DeltaT	real	[°C]	Temperaturdifferenz zwischen momentaner Rücklauftemperatur <i>TSink</i> und Quellentemperatur <i>Tsource</i> des letzten Zeitschrittes. Mögliche Methode zur Berechnung der Rücklauftemperatur <i>TSink</i> . Wird diese Methode nicht angewandt, um <i>TSink</i> zu berechnen, so ist <i>DeltaT = 0</i> zu setzen. Methode wird nur bei kleinem Zeitschritt empfohlen, da sonst der Fehler zu gross wird.
TSink	real	[°C]	Rücklauftemperatur der Sole. Ist nur dann eine Eingabegrösse, wenn <i>DeltaT = 0</i> gesetzt ist. Ist <i>Leistung = true</i> gesetzt, d.h. wird intern auf eine vorgegebene Leistung iteriert, so ist die Eingabegrösse <i>TSink</i> der Startwert für die Iteration. In diesem Fall wird der Wert im Laufe der Iteration laufend angepasst.
QSource	real	[kW]	Momentane Entzugsleistung. Beim Einsatz einer Wärmepumpe gleich momentaner Verdampferleistung. Wird nur benötigt, falls <i>Leistung = true</i> gesetzt ist, d.h. wird intern auf eine vorgegebene Leistung iteriert.
Genauigkeit	real	[°C]	Abbruchkriterium (Genauigkeit von <i>TSink</i>) für die Iteration der Entzugsleistung. Wird nur benötigt, falls <i>Leistung = true</i> gesetzt ist, d.h. wird intern auf eine vorgegebene Leistung iteriert. Typischer Wert: 0.2 °C

stationaer	boolean	Bei <i>stationaer = true</i> wird die Sole stationär, bei <i>stationaer = false</i> wird sie instationär berechnet. Die Berechnungen in diesem Bericht sind instationär berechnet.
Debug	boolean	Parameter zur Ueberwachung von Werten auf dem Bildschirm. In der vorliegenden Version nicht mehr verwendet.
readFile	boolean	Bei <i>readFile = true</i> werden die wichtigsten Eingabeparameter (inklusive momentaner Massenstrom, Rücklauftemperatur <i>TSink</i> und die momentane Entzugsleistung <i>QSource</i>) von einem externen Textfile eingelesen.
writeFile	boolean	Bei <i>writeFile = true</i> werden die Ausgabewerte für jeden Zeitschritt (Rücklauftemperatur <i>TSink</i> , Quelltemperatur <i>TSource</i> und Monitortemperatur <i>TMonitor</i>) auf ein externes Textfile geschrieben.
einschwingen	boolean	Solange <i>einschwingen = true</i> ist, werden keine Resultate auf das Ausgabefile geschrieben. Ist die Simulation am Ende des Eingabefiles angelangt so wird bei <i>einschwingen = true</i> das Eingabefile geschlossen und dann wieder für einen neuen Durchgang geöffnet. Die Variable Jahr wird bei diesem Vorgang um eins erhöht. Aus Speicherplatzgründen muss in der vorliegenden Version spätestens nach 7 Jahren <i>einschwingen = false</i> gesetzt werden.
Leistungsinput	boolean	Bei <i>Leistungsinput = true</i> wird die momentane Entzugsleistung <i>QSource</i> aus einem externen Eingabefile gelesen.
Leistung	boolean	Soll intern auf die Leistung <i>QSource</i> iteriert werden so ist <i>Leistung = true</i> zu setzen.
IFileName	string	Name des Eingabefiles.
OFileName	string	Name des Ausgabefiles.
Sprache	string	Wird in der aktuellen Version nicht verwendet.

5.2.2 Ausgabewerte

Jahr	integer	[-]	Falls <i>einschwingen</i> = <i>true</i> gesetzt ist, so gibt Jahr an, in welchem Zyklus des Einschwingens sich die Simulation befindet. Kann als Kriterium benützt werden, um <i>einschwingen</i> = <i>false</i> zu setzen und damit das Einschwingen abubrechen und zur eigentlichen Simulation überzugehen.
TSource	real	[°C]	Quellentemperatur, Durchschnitt des jeweiligen Zeitschrittes.
TSink	real	[°C]	Rücklaufemperatur am Ende des jeweiligen Zeitschrittes. Ist nur dann ein Ausgabewert, wenn intern im EWS-Modul auf eine vorgegebene Leistung iteriert wird, d.h. <i>Leistung</i> = <i>true</i> gesetzt ist.
TMonitor	real	[°C]	Temperatur im Monitorpunkt des Erdreiches.
p	real	[Pa]	Druckabfall in der Erdwärmesonde. Wird in jedem Zeitschritt neu berechnet.
laminar	boolean		Gibt an, ob die Reynoldszahl $Re < 2300$ und die Strömung in der Sonde somit wahrscheinlich laminar ist. Wird in jedem Zeitschritt neu berechnet.

5.2.3 Parametereingabe im Hauptprogramm und Eingabefile

Nachfolgend ist ein Beispiel für den Aufruf des EWS-Moduls aus einem Hauptprogramm zu finden. Dabei wird 1 Jahr lang, vorgängig zur eigentlichen Simulation, mit dem vorgegebenen Entzugsprofil eingeschwingen. Änderungen zu den Vorschlagswerten (Defaultwerten) müssen nach dem Aufruf `Erdsonden(Default)` eingegeben werden, da sie ansonsten überschrieben würden. In diesem Beispiel wird intern auf eine vorgegebene Leistung iteriert. Der Wert für die Entzugsleistung wird stündlich aus dem Eingabefile 'Eingabe.TXT' ausgelesen.

```
Program EWSTEST;

  uses ews;

begin
  Erdsonde(Default);                (* Setzen der Defaultwerte          *)
  IfileName := 'Eingabe.TXT';
  OfileName := 'Ausgabe.TXT';
  Leistungsinput := true;
  Leistung:=true;
  Erdsonde(OpenFile);              (* Oeffnen der Ein- und Ausgabefiles *)
  Erdsonde(Initial);               (* Berechnung der Matrizen B        *)
  For simstep := 1 to numrows do begin
    if Jahr<2 then Einschwingen:=true else Einschwingen:= false;
    Iteration := 0;
    Erdsonde(Iteration);
  end;
  Erdsonde(Closefile);              (* Schliessen der Eingabe- und
  Ausgabefiles*)
end.
```


Das dazugehörige Eingabefile 'Eingabe.TXT' hat die folgende Form, wobei hier nur die ersten 8 Stunden des Simulationsjahres mit 8760 Stunden abgebildet sind. Als Trennzeichen sind Tabulatoren eingesetzt:

```

Eingabe.TXT

8760          -          numrows
60           min        Zeitschritt
0            °C         Delta T

Erdwaermesonde
0.026        m          Sondendurchmesser
90           m          Laenge

Hinterfuellung
0.12         m          Bohrdurchmesser
0.7          W/mK       lambda
2600         kg/m3      Dichte
1000         J/kgK      cp

Fluid
0.49         W/mK       lambda
1053         kg/m3      Dichte
3870         J/kgK      cp
0.0000044   m2/s       Kin. Viskositaet
0.6          kg/s       Massenstrom

Boden
1.8          W/mK       lambda (Mergel)
2600         kg/m3      Dichte
800          J/kgK      cp

Bodentemperaturen
10           °C         Jahresmittel
0.035        °C/m       Gradient

Stunde       Massenstrom   TSink        QQuelle
1            0          0.497        0
2            0          0.497        0
3            0          0.497        0
4            0.6        -1.830304    5.404
5            0.6        -2.147272    6.14
6            0.6        -2.147272    6.14
7            0.6        -1.582242    4.828
8            0          0.497        0
.....

```

Das Ausgabefile sieht prinzipiell gleich aus, es werden zusätzlich aber in den Stundenwerten hinten noch die Quelltemperatur, die Monitortemperatur, der Druckabfall in der Sonde und der Strömungszustand (laminar = true, turbulent = false) ausgegeben. Ein Ausgabefile kann somit für eine spätere Berechnung wieder als Eingabefile verwendet werden.

Die Möglichkeit, Eingabe- und Ausgabefiles zu erstellen, ist speziell für Validierungen und Ueberprüfungen wichtig, wird voraussichtlich aber in der späteren Systemsimulationen kaum mehr eingesetzt werden.

6 Schlussfolgerungen

Mit dem vorliegenden Ansatz können Erdwärmesonden (Doppel-U-Sonden) über einen Zeitraum von bis zu 5 Jahren korrekt berechnet werden. Das Wärme-Entzugsprofil kann dabei frei gewählt werden. Es können bis zu 8 verschiedene, vertikale Erdschichten mit unterschiedlichen Stoffparametern dargestellt werden. Das Modell ist geeignet, auch das transiente Verhalten der Sonde nachzubilden. Der Zeitschritt für die Simulation ist im Bereich zwischen 1 und 60 Minuten wählbar. Die für die Simulation eines Jahres benötigte Rechenzeit auf einem PC (Pentium Prozessor) liegt dabei im Bereich von 30 Sekunden bis 3 Minuten. Möglich wird diese kurze Rechenzeit durch eine Kombination des Crank-Nicholson-Simulationsverfahrens im Sondennahbereich mit der analytischen Lösung für konstante Linienquellen mit dem Ansatz von Werner (1996) (=„Trichterformel“). Damit diese Trichterformel auch bei variablem Wärmeentzug als Simulations-Randbedingung eingesetzt werden kann, wird in der vorliegenden Arbeit eine Superposition von verschiedenen, konstanten Wärme-Entzügen mit gestaffeltem Entzugsbeginn vorgeschlagen. Damit kann auch die Regeneration der Erdwärmesonde im Sommer korrekt abgebildet werden.

Sowohl das Wiederauffüllen des Temperaturtrichters im Sommer, wie auch das transiente Verhalten wurden anhand von Messungen validiert. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ist besser als 1°C, vorausgesetzt es gelingt, die richtigen Starttemperaturen des Erdreiches am Simulationsbeginn vorauszusagen. Für die Validierungsrechnung konnten dafür Messwerte eingesetzt werden, womit diese Fehlerquelle ausgeschaltet wird. Bei Sondennetzen eignet sich die Antwortfunktions-Methode von Hellström (1991), um die Starttemperaturen nach mehreren Jahren Entzug vorauszusagen.

Als weitere, entscheidende Grössen konnten die thermischen Widerstände in der Bohrung identifiziert werden. Im vorliegenden Modell sind dafür zwei Lösungen möglich: Ein empirischer Ansatz und die Möglichkeit, diese Widerstände als Eingabegrössen vorzugeben. Wird die zweite Lösung gewählt, so müssen diese Widerstände vorgängig mit einem separaten Ansatz (z.B. mit einem 2-dimensionalen Wärmeleitungsprogramm) vorausberechnet werden.

Mit dem EWS-Modell wird nur die Wärmeleitung behandelt. Liegt eine dünne Grundwasserschicht vor, so können die Stoffparameter entsprechend angepasst werden. Diese Methode ist aber nur empfehlenswert, wenn die Erdsonde nicht aktiv regeneriert wird.

Der Vergleich mit dem Erdwärmesonden-Modell des Wärmepumpen-Simulationsprogrammes WPcalc zeigt im Monatsschnitt ähnliche Resultate, solange im Sommer kein Wärmeentzug zur Warmwasserproduktion stattfindet. Relativ grosse Abweichungen sind aber in den stündlichen Werten der Quelltemperaturen zu beobachten (teilweise grösser als 10°C). Der Benutzer eines solchen Simulationswerkzeuges wiegt sich somit in einer falschen Sicherheit was die technische Machbarkeit seiner Lösung anbelangt. Es wird deshalb empfohlen, das EWS-Modul in WPcalc als optionale Rechenmethode zu implementieren.

Ein Vergleich mit dem TRNSBM-Modell von Pahud (1996) zeigt, dass über eine Periode von 2 Jahren keine nennenswerte Abweichung zwischen diesen beiden Modellen vorliegt. Mit TRNSBM können Sondennetze direkt berechnet werden. Das Erdreich muss aber homogen berechnet werden und das transiente Verhalten der Sonde kann mit einem Trick nur angenähert werden. Die Rechenzeit von TRNSBM ist um einiges länger als beim EWS-Modul. Beide Ansätze haben in ihrem spezifischen Anwendungsgebiet nebeneinander eine Existenzberechtigung.

Auch das vorliegende EWS-Modell liegt in einer Implementierung in TRNSYS vor (Wetter, Huber, 1997).

7 Symbolverzeichnis

Lateinisches Alphabet

a	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit ($\lambda/\rho c_p$)
c _p	J/kgK	spezifische Wärmekapazität
C	J/K	Wärmekapazität
D _b	m	Bohrdurchmesser
D _i	m	Durchmesser der Sondenrohre (Innen-Mass)
dl	m	Länge eines Rohr-Segmentes (axial)
dt	s	interner Simulationszeitschritt der Erde
dt2	s	interner Simulationszeitschritt der Sole
f		Gitterfaktor, in radialer Richtung
i	Woche	Zeitpunkt des Wärmeentzugs der Grösse \dot{q} (Durchschnitt der Woche i)
L	W/K	thermische Leitfähigkeit, 1/R
L ₀	W/K	thermische Leitfähigkeit der fließenden Sole (axial), $2 \pi r_o^2 v \rho_{Sole} c_{pSole}$
L ₁	W/K	thermische Leitfähigkeit zwischen Sole (alle 4 Sondenrohre) und Hinterfüllung
m	-	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung
m	kg	Masse zweier Sole-Elemente der Länge dl
\dot{m}	kg/s	Solenmassenstrom (Durchsatz durch Pumpe)
n	Woche	Betrachtungszeitpunkt bei Trichterformel
\dot{q}	W/m	spezifische Wärmeentzugsleistung, \dot{Q}/dl
r	m	radialer Abstand von der Rohrachse
r _o	m	Innen-Radius der Sondenrohre
r ₁	m	Radius der Bohrung
r _m	m	Radius des Simulationsgebietes (Ort der äusseren Randbedingung)
rz	m	radialer Massenschwerpunkt eines Rohr-Rings
R	K/W	thermischer Widerstand, 1/L
R _a	Km/W	internal thermal resistance
R _b	Km/W	borehole thermal resistance
substep	-	Sub-Unterteilung für Soleberechnung (substep = dt / dt2)
t	s	Zeit
T	°C	Temperatur
T _b	°C	borehole temperature, Temperatur am Bohr-Radius
T _{Earth}	°C	Temperatur des Erdreiches
T _{Down}	°C	Temperatur der nach unten strömenden Sole
T _{Up}	°C	Temperatur der nach oben strömenden Sole
T _{Source}	°C	Quellentemperatur, Temperatur der aus der Sonde austretenden Sole
T _{Sink}	°C	Rücklauftemperatur der Sole, Verdampfer-Austrittstemperatur der Sole
v	m/s	Strömungsgeschwindigkeit der Sole

Griechisches Alphabet

α	W/m^2K	Wärmeübergangskoeffizient
α_0	W/m^2K	Wärmeübergangskoeffizient Sole-Rohr bei Stillstand der Sonde
α_1	W/m^2K	Wärmeübergangskoeffizient Sole-Rohr bei Betrieb der Sonde
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
π	-	Pi, 3.1415..
ρ	kg/m^3	Dichte
ξ	-	Druckverlustkoeffizient

Indizes

DimAxi	Anzahl Rechenknoten in axialer Richtung
DimRad	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung (inklusive Hinterfüllungsknoten)
i	Ortskoordinate, axial
j	Ortskoordinate, radial
k	Zeitkoordinate
lam	laminar
turb	turbulent
Erde	Erde
Fill	Hinterfüllung
Sole	Sole, generell Wärmeträger-Fluid
t	Zeit
Woche	Betrachtungswoche bei Trichterformel

Kennzahlen

Nu	$\alpha D / \lambda$	Nusseltzahl, gebildet mit dem Rohrdurchmesser und λ Fluid
Pr	ν / a	Prandtlzahl
Re	$D v / \nu$	Reynoldszahl, gebildet mit dem Rohrdurchmesser

8 Literaturverzeichnis

- Afjei, Thomas (1989): YUM. A Yearly Utilization Model for Calculating the Seasonal Performance Factor of Electric Driven Heat Pump Heating Systems. Technical Form. Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich.
- Afjei, Th.; Wittwer, D. (1995): Yearly Utilization Model YUM WP/Holz. Benutzerhandbuch mit Beispielen. Ein Simulationsprogramm zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs und Nutzungsgrads bivalenter Wärmepumpen-Heizsysteme mit Holzkessel. INFEL und BEW.
- AWP (1996): Merkblatt T1. Technische Information der TK über Wärmepumpenheizungsanlagen. Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen A.W.P. Zürich
- Baumgartner, Thomas; Gabathuler, Hans; Szokody, Gyula (1993): Wärmepumpen. Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpen-Anlagen. RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen. EDMZ 724.356d.
- Bigler, R.; Lüthi, F. (1996): Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf. Messdaten des Versuchs 4, Sonde E1300 und Messdaten des Versuchs 6, Sonde E1300. Werner + Partner AG, Ingenieur- und Studienbüro, Burgdorf.
- Burkhart, R.; Hopkirk, R.; Eugster W.; Rybach L. (1989): Erdwärmesonden-Heizanlagen: Durch Messungen und Berechnungen bestimmte Auslegungsgrößen. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern. Studie Nr. 46.
- Eskilson, P. (1986): Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- Eskilson, P. (1987): Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- Eugster, Walter (1991): Erdwärmesonden - Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. Diss. ETH Nr. 9524.
- Grigull U.; Sander H.: Wärmeleitung. Springer Verlag.
- Hellström, Göran (1991): Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory. a Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Hellström, Göran; Sanner, Burkhard (1994): PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden. Erdgekoppelte Wärmepumpen. IZW-Bericht 1/94. Karlsruhe: Fachinformationszentrum.
- Huber, Arthur; Müller, Christoph; Berchtold Oliver; Eggenberger, H. (1996): Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern. Phase 1, Kosten-Nutzen-Analyse. Bundesamt für Energiewirtschaft, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung.
- Klein, S.A. et al. (1996): TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. Madison, USA.
- Knoblich, Klaus; Sanner, Burkhard; Klugescheid, Matthias (1993): Erdgekoppelte Wärmepumpen. Energetische, hydrologische und geologische Untersuchungen zum Entzug von Wärme aus dem Erdreich an der Forschungsanlage Schöffengrund-Schwalbach und anderen Standorten. Giessener Geologische Schriften Nr. 49. Lenz-Verlag, Giessen.
- Pahud, D.; Fromentin, A.; Hadorn J. (1996): The Superposition Borehole Model for TRNSYS (TRNSBM). User Manual for the November 1996 Version. Internal Report. LASEN - DGC - EPFL, Switzerland.

-
- Merker, Günter (1987): Konvektive Wärmeübertragung. Springer-Verlag.
- Nani, Marco; Stalder, Martin; Schweizer, Andreas; Baumgartner, Thomas (1994): WPcalc. Rechenprogramm zur Auslegung von WP-Anlagen. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.
- Rütti, Roland; Remund, Stefan (1996): Validierung von Luft-Erdregister-Modellen. Diplomarbeit am Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich.
- Sanner, Burkhard (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. in: IZW-Berichte 2/92. Karlsruhe: Fachinformationszentrum.
- SIA (1996): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. SIA Dok D0136.
- Werner, Alfred; Bigler, Roland; Niederhauser, Arthur 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).
- Wetter, Michael; Huber Arthur (1997): TRNSYS Type: Vertical Borehole Heat Exchanger, EWS Model. Zentralschweizerisches Technikum ZTL, Luzern.
- Zweifel, G. et al. (1996): Validierung der Computerprogramme YUM/Holz, WP-Calc und WKK-Calc. Bundesamt für Energiewirtschaft, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung.

9 Anhang

9.1 Pascal - Programm

```
(*****  
(* *)  
(*          U N I T      E W S          *)  
(* *)  
(*****  
(* *)  
(*   Programm zur Simulation einer Erdwaermesonde, *)  
(*   Version 2.4, 17. September 1997 *)  
(* *)  
(*   Erstellt von  Arthur Huber / Othmar Schuler *)  
(*                   Huber Energietechnik *)  
(*                   Ingenieur- und Planungsbuero SIA *)  
(*                   Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zuerich *)  
(*                   Tel: 01-422 79 78, Fax: 01-422 79 53 *)  
(* *)  
(*   Erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes *)  
(*   "Berechnungsmodul fuer Erdwaermesonden" im Auftrag des *)  
(*   Bundesamtes fuer Energiewirtschaft BEW, CH-3000 Bern *)  
(* *)  
(*   (C) Bundesamt fuer Energiewirtschaft, Bern *)  
(* *)  
(*****  
  
unit EWS;  
  
{SN+}  
  
interface  
  
const  DimRadMax      = 8;  
        DimAxiMax     = 8;  
        MaxJahre      = 8;  
        Default       = -3;  
        OpenFile      = -2;  
        Initial       = -1;  
        CloseFile     = -4;  
        tab           = chr(9);  
        Def_Sicherheit1 = 4;      (* Zeitschritt Sole, Empfohlen: 4 *)  
        Def_Sicherheit2 = 2;      (* Zeitschritt Erde, Empfohlen: 2 *)  
        Def_DimRad     = 6;      (* Radiale Unterteilung, Empf: 6 *)  
        Def_DimAxi    = 5;      (* Axiale Unterteilung, Empf: 5 *)  
        Def_Debug      = true;   (* Zwischenwerte auf Bildschirm *)  
        Def_cpSole     = 3800;   (* Wasser: 4200 J/kgK *)  
                                   (* 33%Etylenglykol: 3800 J/kgK *)  
        Def_cpFill    = 1600;   (* J/kgK *)  
        Def_cpErde    = 1000;   (* J/kgK *)  
        Def_rhoSole   = 1050;   (* kg/m3 *)  
        Def_rhoFill   = 1200;   (* kg/m3 *)  
        Def_rhoErde   = 2600;   (* kg/m3 *)  
        Def_lambdaSole = 0.449; (* W/mK *)  
        Def_lambdaFill = 0.7;   (* W/mK *)  
        Def_lambdaErde = 2.0;   (* W/mK *)  
        Def_nueSole   = 0.000006; (* Wasser: 0.00000175 m2/s *)  
                                   (* 33%Ethylenglykol:ca0.000006 m2/s*)  
        Def_RepRandbed = 1;     (* Anzahl Wochen *)  
        Def_Rechenradius = 1.5; (* m *)  
        Def_Gitterfaktor = 2.0; (* Gitter in Erde, radial *)  
        Def_Sondenlaenge = 100; (* m *)  
        Def_Sondendurchmesser= 0.026; (* m *)  
        Def_Dicke_Sondenrohr = 0.000; (* m *)  
        Def_Bohrdurchmesser = 0.115; (* m *)  
        Def_R1         = 0.0;   (* K/W, therm. Widerstand R1 *)  
        Def_Ra         = 0.0;   (* Km/W, thermal pipe resistance Ra*)  
        Def_Rb         = 0.0;   (* Km/W, borhole thermal resistance*)  
        Def_Massenstrom = 0.8;  (* kg/s *)  
        Def_TGrad      = 0.03;  (* K/m, Temperaturgradient axial *)  
        Def_Jahresmitteltemp = 9.0; (* °C , Mittel Lufttemperatur *)
```

```

Def_Bodenerwaermung = 0.0;      (* °C, Boden waermer als Luft *)
Def_DeltaT          = 0.0;      (* °C, Abkühlung in der Wärmepumpe*)
Def_TSource         = 0.0;      (* °C, Quelltemperatur *)
Def_Zeitschritt     = 60;       (* Min *)
Def_Simulationsdauer = 8760;    (* h, totale Simulationszeit *)
Def_IFileName       = 'Eingabe.txt'; (* Name des Eingabe-Files *)
Def_OFileName       = 'Ausgabe.txt'; (* Name des Ausgabe-Files *)
Def_readFile        = true;
Def_writeFile       = true;
Def_MonitorAxi      = 1;
Def_MonitorRad      = 1;
Def_Einschwingen    = false;
Def_Leistungsinput  = false;    (* Entzugsleistung aus Inputfile *)
Def_Leistung        = false;    (* Rechnen mit Entzugsleistung *)
Def_stationaer      = false;    (* Stationaere Berechnung der Sole *)
Def_Genauigkeit     = 0.2;     (* °C, Iteration Leistungsberech. *)
Def_Sprache         = 'D';
Def_Jahr            = 1;        (* Beginn der Simulation *)

type Vektor = array[0..DimAxiMax] of real;
MatrixQ = array[1..DimAxiMax,0..53*MaxJahre] of real;
Matrix = array[0..DimAxiMax, 0..DimRadMax+1] of real;
KVektor = array[0..DimAxiMax, 0..DimRadMax+1] of real;
KMatrix = array[1..DimAxiMax, 0..DimRadMax+1, 0..DimRadMax+1] of real;
line100 = array[1..40] of string[100];

var Sondenlaenge, Sondendurchmesser, Dicke_Sondenrohr,
Bohrdurchmesser, Massenstrom, cpSole, cpFill, rhoSole,
rhoFill, lambdaSole, lambdaFill, nueSole, dl, TGrad, Rl, Ra, Rb,
Rechenradius, DeltaT, TSource, TSink, mcpSole, Llrn, Llstop,
Gitterfaktor, Auslegungsmassenstrom, Jahresmitteltemp,
Bodenerwaermung, Bodentemp, Sicherheit1, Sicherheit2,
Rechengebiet, p, TSourceOld, TSinkOld, cpErd, rhoErd,
lambdaErd, TMonitor, QSource, Genauigkeit : real;
Zeitschritt, subdt, substep_run, substep_stop, Reprandbed,
Simulationsdauer, iteration, DimRad, DimAxi, simstepn,
MonitorAxi, MonitorRad, Jahr : integer;
simstep, numrows, filestep : longint;
TEarth, TEarthOld : Matrix;
T0, TUp, TUpold, TDown, TDownold, cpErde, rhoErde,
lambdaErde, Llast, Q0, Q0old : Vektor;
B1, B2 : kMatrix;
Debug, laminar, readfile, writefile, einschwingen,
Leistungsinput, Leistung, stationaer : boolean;
Q : MatrixQ;
IFileName, OFileName, Sprache : string;
ifile, ofile : text;
line : line100;

Procedure Erdsonde( iteration : integer);

Procedure EWSmodul( iteration : integer;
var DimAxi, DimRad, Zeitschritt, : integer;
subdt, substep_run, substep_stop, Reprandbed,
MonitorAxi, MonitorRad, Jahr : integer;
var numrows : longint;
var rhoFill, cpFill, lambdaFill, rhoSole, cpSole,
lambdaSole, nueSole, Rl, Ra, Rb, Sondenlaenge,
Sondendurchmesser, Dicke_Sondenrohr,
Bohrdurchmesser, Auslegungsmassenstrom,
Massenstrom, Bodentemp, Tgrad, mcpSole, Llrn,
Llstop, dl, Rechenradius,
Rechengebiet, Gitterfaktor, Sicherheit1,
Sicherheit2, DeltaT, TSourceOld, TSource,
TSink, TMonitor, p, QSource, Genauigkeit : real;
var B1, B2 : kMatrix;
var TEarth, TEarthold : Matrix;
var T0, TUp, TUpold, TDown, TDownold,
Llast, cpErde, rhoErde, lambdaErde : Vektor;
var Q : MatrixQ;
var Debug, readfile, writefile, laminar,
Einschwingen, Leistungsinput, Leistung,
stationaer : boolean;
var IFileName, OFileName, Sprache : string );

implementation

(*-- Procedure Default -----*)

```



```

Procedure DefaultWert (var cpSole, cpFill, rhoSole, rhoFill, lambdaSole,
                      lambdaFill, nueSole, Rechenradius,
                      Gitterfaktor, Sondenlaenge,
                      Sondendurchmesser, Dicke_Sondenrohr,
                      Bohrdurchmesser, Massenstrom, TGrad,
                      Jahresmitteltemp, Bodenerwaermung,
                      DeltaT, Auslegungsmassenstrom,
                      TSource, Sicherheit1, Sicherheit2,
                      R1, Ra, Rb, Genauigkeit           : real;
                      var cpErde, rhoErde, lambdaErde    : Vektor;
                      var RepRandbed, Zeitschritt, Simulationsdauer,
                      DimAxi, DimRad, MonitorAxi, MonitorRad, Jahr: integer;
                      var numrows                        : longint;
                      var Debug, readFile, writeFile,
                      Einschwingen, Leistungsinput, Leistung,
                      stationaer                        : boolean;
                      var IFileName, OFileName, Sprache  : string);

var i      : integer;
    sim    : longint;
begin
  Debug           := Def_Debug;
  DimRad          := Def_DimRad;
  DimAxi          := Def_DimAxi;
  cpSole          := Def_cpSole;
  cpFill          := Def_cpFill;
  rhoSole         := Def_rhoSole;
  rhoFill         := Def_rhoFill;
  lambdaSole      := Def_lambdaSole;
  lambdaFill      := Def_lambdaFill;
  nueSole         := Def_nueSole;
  for i:=1 to DimAxi do begin
    cpErde[i]     := Def_cpErde;
    rhoErde[i]    := Def_rhoErde;
    lambdaErde[i] := Def_lambdaErde;
  end;
  cpErd          := Def_cpErde;
  rhoErd         := Def_rhoErde;
  lambdaErd      := Def_lambdaErde;
  RepRandbed     := Def_RepRandbed;
  Rechenradius   := Def_Rechenradius;
  Gitterfaktor   := Def_Gitterfaktor;
  Sondenlaenge   := Def_Sondenlaenge;
  Sondendurchmesser := Def_Sondendurchmesser;
  Dicke_Sondenrohr := Def_Dicke_Sondenrohr;
  Bohrdurchmesser := Def_Bohrdurchmesser;
  R1              := Def_R1;
  Ra              := Def_Ra;
  Rb              := Def_Rb;
  Massenstrom     := Def_Massenstrom;
  Auslegungsmassenstrom:= Def_Massenstrom;
  TGrad           := Def_TGrad;
  Zeitschritt     := Def_Zeitschritt;
  Simulationsdauer := Def_Simulationsdauer;
  Jahresmitteltemp := Def_Jahresmitteltemp;
  Bodenerwaermung := Def_Bodenerwaermung;
  DeltaT          := Def_DeltaT;
  TSource         := Def_TSource;
  Sicherheit1     := Def_Sicherheit1;
  Sicherheit2     := Def_Sicherheit2;
  IFileName        := Def_IFileName;
  OFileName        := Def_OFileName;
  readFile        := Def_readFile;
  writeFile        := Def_writeFile;
  MonitorAxi      := Def_MonitorAxi;
  MonitorRad      := Def_MonitorRad;
  sim             := Simulationsdauer;
  numrows         := sim * 60 div Zeitschritt;
  Einschwingen    := Def_Einschwingen;
  Leistungsinput  := Def_Leistungsinput;
  Leistung         := Def_Leistung;
  stationaer      := Def_stationaer;
  Genauigkeit     := Def_Genauigkeit;
  Sprache         := Def_Sprache;
  Jahr           := Def_Jahr;
  i              := 1;
  line[i]        := 'Ausgabefile für EWS-Programm';      i:=i+1;
  line[i]        := '';                                  i:=i+1;
  line[i]        := tab + 'numrows';                     i:=i+1;

```

```

line[i] := 'Min'+ tab + 'Zeitschritt';           i:=i+1;
line[i] := '';                                   i:=i+1;
line[i] := 'Erdwärmesonde';                     i:=i+1;
line[i] := 'm' + tab + 'Sondendurchmesser (innen)'; i:=i+1;
line[i] := 'm' + tab + 'Sondenlänge';           i:=i+1;
line[i] := '';                                   i:=i+1;
line[i] := 'Hinterfüllung';                     i:=i+1;
line[i] := 'm' + tab + 'Bohrdurchmesser';        i:=i+1;
line[i] := 'W/mK' + tab + 'lambda';             i:=i+1;
line[i] := 'kg/m3' + tab + 'Dichte';            i:=i+1;
line[i] := 'J/kgK' + tab + 'cp';                i:=i+1;
line[i] := '';                                   i:=i+1;
line[i] := 'Fluid';                             i:=i+1;
line[i] := 'W/mK' + tab + 'lambda';             i:=i+1;
line[i] := 'kg/m3' + tab + 'Dichte';            i:=i+1;
line[i] := 'J/kgK' + tab + 'cp';                i:=i+1;
line[i] := 'm2/s' + tab + 'kinem. Viskosität';  i:=i+1;
line[i] := 'kg/s' + tab + 'Massenstrom';        i:=i+1;
line[i] := '';                                   i:=i+1;
line[i] := 'Boden';                             i:=i+1;
line[i] := 'W/mK' + tab + 'lambda';             i:=i+1;
line[i] := 'kg/m3' + tab + 'Dichte';            i:=i+1;
line[i] := 'J/kgK' + tab + 'cp';                i:=i+1;
line[i] := '';                                   i:=i+1;
line[i] := 'Bodentemperaturen';                i:=i+1;
line[i] := '°C' + tab + 'Jahresmittel';         i:=i+1;
line[i] := '°C/m' + tab + 'Gradient';           i:=i+1;
line[i] := '';                                   i:=i+1;
line[i] := 'Step' + tab + 'M [kg/s]' + tab + 'TSink' + tab + 'Q [kW]' +
tab + 'TSource' + tab + 'p [Pa]' + tab + 'laminar?';
end;
(*-- Procedure Default -----*)

(*--Input und Output-Files -----*)
procedure OpenInputFile (      Inputfilename : string;
var Zeitschritt: integer; var numrows : longint);
var i,j : integer;
begin
j:=1;
assign(ifile,Inputfilename);
reset(ifile);
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,numrows,line[j]);   j:=j+1;
readln(ifile,Zeitschritt,line[j]); j:=j+1;
readln(ifile,DeltaT,line[j]);    j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,Sondendurchmesser,line[j]); j:=j+1;
readln(ifile,Sondenlaenge,line[j]); j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,Bohrdurchmesser,line[j]); j:=j+1;
readln(ifile,lambdaFill,line[j]); j:=j+1;
readln(ifile,rhoFill,line[j]);    j:=j+1;
readln(ifile,cpFill,line[j]);     j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,lambdaSole,line[j]); j:=j+1;
readln(ifile,rhoSole,line[j]);    j:=j+1;
readln(ifile,cpSole,line[j]);     j:=j+1;
readln(ifile,nueSole,line[j]);    j:=j+1;
readln(ifile,Auslegungsmassenstrom,line[j]); j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,lambdaErd,line[j]);  j:=j+1;
readln(ifile,rhoErd,line[j]);     j:=j+1;
readln(ifile,cpErd,line[j]);      j:=j+1;
For i:=1 to DimAxi do begin
cpErde[i] := cpErd; (* J/kgK *)
rhoErde[i] := rhoErd; (* kg/m3 *)
lambdaErde[i] := lambdaErd; (* W/mK *)
end;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,Bodentemp,line[j]);  j:=j+1;
readln(ifile,TGrad,line[j]);     j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;
readln(ifile,line[j]);           j:=j+1;

```

```

end;

procedure OpenOutputFile (      Outputfilename : string;
                             var Zeitschritt: integer; var numRows : longint);
var i,j : integer;
begin
  j := 2;
  assign(ofile,Outputfilename);
  rewrite(ofile);
  writeln(ofile,'Ausgabefile des EWS-Programms');
  writeln(ofile,line[j]);           j:=j+1;
  writeln(ofile,numrows,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,Zeitschritt,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,DeltaT,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,Sondendurchmesser,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,Sondenlaenge,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,Bohrdurchmesser,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,lambdaFill,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,rhoFill,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,cpFill,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,lambdaSole,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,rhoSole,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,cpSole,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,nueSole,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,Auslegungsmassenstrom,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,lambdaErd,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,rhoErd,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,cpErd,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,Bodentemp,tab,line[j]); j:=j+1;
  writeln(ofile,TGrad,tab,line[j]);   j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);             j:=j+1;
  writeln(ofile,line[j]);
end;

Procedure ReadStep (var filestep: longint; var Massenstrom,TSink,QSource: real);
begin
  if Leistungsinput then readln(ifile,filestep,Massenstrom,TSink,QSource)
  else readln(ifile,filestep,Massenstrom,TSink);
end;

Procedure WriteStep (var filestep: longint; var Massenstrom,TSink,QSource,
                    TSource,TMonitor,p: real; laminar : boolean );
const tab = chr(9);
var i,j: integer;
begin
  write(ofile,filestep,tab,Massenstrom,tab,TSink,tab,QSource,tab,TSource,
        tab,TMonitor,tab,p,tab,laminar);
  writeln(ofile);
end;
(*--Input und Output-Files -----*)

(*-- Procedure InitEWS -----*)
procedure InitEWS ( var rhoFill,cpFill,lambdaFill,rhoSole,
                  cpSole,lambdaSole,nueSole,
                  Sondenlaenge,Sondendurchmesser,
                  Dicke_Sondenrohr,Bohrdurchmesser,
                  Rl,Ra,Rb,Massenstrom,Bodentemp,
                  Tgrad,Rechenradius,Gitterfaktor      : real;
                  var Zeitschritt,subdt,substep_run,
                  substep_stop,Jahr                    : integer;
                  var B1,B2                            : KMatrix;
                  var TEarth                          : Matrix;
                  var T0,TUp,TUpold,TDown,TDownold,Llast : Vektor;
                  var cpErde,RhoErde,lambdaErde        : Vektor;
                  var Q                                  : MatrixQ;
                  var mcpSole,L1run,L1stop,d1,TSource   : real;
                  var Debug                             : boolean;
                  DimAxi,DimRad                        : integer );

```

```

var
  i, j, k                                     : integer;
  h1, h2, h3, h4, h5, alpha,
  Di, Faktor, L, dt, Rechengebiet, LmMin, L0  : real;
  R2                                           : Vektor;
  r, rz                                       : array[0..DimRadMax+1] of real;
  L1, L2, C                                   : Matrix;
  A1, A2, Ainv1, Ainv2, F1, F2              : KMatrix;

```

```

Procedure invertieren (var A,Ainv : kMatrix; DimAxi,DimRad : integer);
{ Diese Procedure invertiert die n x n Matrix A nach der Diagonalen-Methode,
  ***** Ainv = 1/A und n = DimRad+1 ***** }

```

```

var
  pivot      : real;
  g,i,j,k    : integer;
begin
  for k:=1 to DimAxi do begin
    for i:=0 to DimRad+1 do for j:=0 to DimRad+1 do Ainv[k,i,j]:=A[k,i,j];
    for g:=0 to DimRad+1 do begin
      pivot:=Ainv[k,g,g];
      for j:=0 to DimRad+1 do Ainv[k,g,j]:=Ainv[k,g,j] * (-1) / pivot;
      for i:=0 to DimRad+1 do begin
        for j:=0 to DimRad+1 do
          if (i <> g) and (j <> g) then
            Ainv[k,i,j]:=Ainv[k,g,j] * Ainv[k,i,g] + Ainv[k,i,j];
            Ainv[k,i,g]:=Ainv[k,i,g] / pivot;
          end;
          Ainv[k,g,g]:=1 / pivot ;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

Procedure multiMatrix (var Ainv,F,B : kmatrix; DimAxi,DimRad : integer );
{ ***** B = Ainv x F ***** }
var i,j,k,l : integer;
begin
  for l:=1 to DimAxi do begin
    for k:=0 to DimRad+1 do begin
      for i:=0 to DimRad+1 do begin
        B[l,k,i] := 0;
        for j:= 0 to DimRad+1 do B[l,k,i]:=B[l,k,i]+Ainv[l,k,j]*F[l,j,i];
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

Function hoch (a, b: real): real;          (* a^b : real *)
begin
  hoch := exp(b * ln(abs(a)));
end;

```

```

Function alpha0 ( lambdaSole,Sondendurchmesser : real ): real;
(* Waermeuebergang, wenn Pumpe steht *)
begin
  alpha0 := lambdaSole/(Sondendurchmesser/2*(1-sqrt(0.5)));
end;

```

```

Function alpha1 (NueSole,rhoSole,cpSole,lambdaSole,Massenstrom,
  Sondendurchmesser,Dicke_Sondenrohr : real) : real;
(* Function alpha1: Waermeuebergang Sole-Hinterfuellung, wenn Pumpe laeuft *)
var x,Geschw,Re,Pr,Nu_turbulent,Nu_laminar,
  Nu0,Nu,Di,St,Xi0,Xi,K1,K2,K10,St0 : real;
begin
  Di := Sondendurchmesser - 2 * Dicke_Sondenrohr;
  Geschw := 2*Massenstrom/rhoSole/sqr(Di)/Pi;
  Re := Geschw * Di / nueSole;          (* Reynoldszahl *)
  Pr := NueSole * rhoSole * cpSole / lambdaSole; (* Prandtlzahl *)
  (* Xi = Druckverlustkoeffizient nach Petukhov (1970) *)
  Xi := 1 / sqr(1.82*ln(Re)/ln(10) - 1.64);
  (* Stantonzahl nach Petukhov (1970), gultig fuer turbulenten Bereich *)
  K1 := 1 + 27.2 * Xi / 8;
  K2 := 11.7 + 1.8 / hoch(Pr,1/3);
  St := Xi/8 / ( K1 + K2 * sqrt(Xi/8) * (hoch(Pr,2/3)-1)); (* Stantonzahl *)
  (* Stantonzahl nach Petukhov an der Grenze turbulent-Uebergangszone *)
  Xi0:= 0.031437;
  K10:= 1.106886;
  ST0:= Xi0/8 / ( K10+ K2 * sqrt(Xi0/8) * (hoch(Pr,2/3)-1));
  Nu0:= St0*10000*Pr; (* Nusseltzahl beim Uebergang turbulent-Uebergangszone *)

```

```

Nu_turbulent := St * Re * Pr;          (* Nusseltzahl turbulente Zone *)
Nu_laminar   := 4.36;                 (* Nusseltzahl laminare Zone *)
if Re >= 10000 then Nu := Nu_turbulent; (* turbulent *)
if Re <= 2300 then Nu := Nu_laminar    (* laminar *)
else if Re < 10000 then Nu := Nu_laminar (* Uebergangszone laminar/turbulent *)
  * exp(ln(Nu0/Nu_laminar) / ln(10000/2300) * ln(Re/2300));
x := Nu * lambdaSole / Di;
alpha := x;
end;

Procedure Anfangstemp(  TMittel, TGrad, dl          : real;
                       var TEarth                : Matrix;
                       var T0, TUp, TUpold, TDown, TDownold : Vektor;
                       var TSource                : real;
                       DimAxi, DimRad            : integer);
(* Procedure Anfangstemp: Ungestoerte Erde *)
var i, j : integer;
begin
  for i := 1 to DimAxi do begin
    for j := 0 to DimRad + 1 do
      TEarth[i, j] := TMittel + (i*dl-dl/2)*TGrad;
      T0[i] := TEarth[i, DimRad+1];
      TUp[DimAxi-i+1] := TEarth[i, 0];
      TUpold[DimAxi-i+1] := TEarth[i, 0];
      TDown[i] := TEarth[i, 0];
      TDownold[i] := TEarth[i, 0];
    end;
  end;

Procedure AnfangsQ(var Q: MatrixQ);
var i, j : integer;
begin
  for i:=1 to DimAxi do begin
    for j:=0 to 52 do Q[i, j] := 0;
    Q0[i] := 0;
    Q0old[i] := 0;
  end;
end;

Procedure DefMatrixA (var L, C : Matrix; var dt : real; var A : kMatrix;
                     DimAxi, DimRad : integer);
var i, j, k : integer;
begin
  for i:=1 to DimAxi do begin
    for j:=0 to DimRad+1 do for k:=0 to DimRad+1 do A[i, j, k]:=0;
    A[i, 0, 0] := 1; A[i, DimRad+1, DimRad+1] := 1;
    for j:=1 to DimRad do begin
      A[i, j, j] := 2 * C[i, j] + dt * ( L[i, j] + L[i, j+1] );
      A[i, j, j-1] := -dt * L[i, j];
      A[i, j, j+1] := -dt * L[i, j+1];
    end;
  end;
end;

Procedure DefMatrixF ( var L, C : Matrix; var dt : real; var F : kMatrix;
                     DimAxi, DimRad : integer);
var i, j, k : integer;
begin
  for i:=1 to DimAxi do begin
    for j:=0 to DimRad+1 do for k:=0 to DimRad+1 do F[i, j, k]:=0;
    F[i, 0, 0] := 1; F[i, DimRad+1, DimRad+1] := 1;
    for j:=1 to DimRad do begin
      F[i, j, j] := 2 * C[i, j] - dt * ( L[i, j] + L[i, j+1] );
      F[i, j, j-1] := dt * L[i, j];
      F[i, j, j+1] := dt * L[i, j+1];
    end;
  end;
end;

Function Optimaler_Zeitfaktor (L, C : Matrix) : integer;
var i, Optfak : integer;
    Mindx, Mindt, Mindt2 : real;
begin
  Mindt := 3600;
  for i:=1 to DimAxi do begin
    Mindt2 := C[i, 1] / L[i, 2] / Sicherheit2;
    if Mindt2 < Mindt then Mindt := Mindt2;
    Mindt2 := C[i, 2] / L[i, 2] / Sicherheit2;
  end;
end;

```

```

if Mindt2<Mindt then Mindt := Mindt2;
if not stationaer then Mindt2 := C[i,1] / L[i,1] / Sicherheit2
else Mindt2 := C[i,1] / L[i,1] / Sicherheit2 * 1.0;
if Mindt2<Mindt then Mindt := Mindt2;
end;
Optfak := trunc(round(Zeitschritt*60/Mindt));
if Optfak=0 then Optfak := 1;
Optimaler_Zeitfaktor := Optfak;
end;

begin (* InitEWS *)
Rechengebiet := Rechenradius - Bohrdurchmesser / 2;
dl := Sondenlaenge/DimAxi; (* m *)
mcpSole := 2*cpSole*rhoSole*Pi*dl*sqr(Sondendurchmesser/2); (* kJ/K *)
r[0] := Sondendurchmesser / 2;
r[1] := Bohrdurchmesser / 2;
Faktor:= Rechengebiet*(1-Gitterfaktor) / (1-hoch(Gitterfaktor,DimRad-1));
for i := 2 to DimRad do r[i] := r[i-1] + Faktor * hoch(Gitterfaktor, i-2);
for i := 1 to DimRad do rz[i] := sqrt((sqr(r[i])+sqr(r[i-1]))/2);
alpha := alphas(NueSole, rhoSole, cpSole, lambdaSole, Massenstrom,
Sondendurchmesser, Dicke_Sondenrohr);
L0 := cpSole * Massenstrom;

(* Widerstaende im Bohrloch *)
if (( Ra > 0 ) and ( Rb > 0 )) then begin
R1 := Ra/4/dl;
for i:= 1 to DimAxi do
R2[i] := (Rb - Ra/4)/dl + 1/2/Pi/dl*ln(rz[2]/r[1])/lambdaErde[i];
Llrun := 1 / R1;
Llstop:= 1 / (R1 - 1/8/Pi/alpha/r[0]/dl
+ 1/8/Pi/alpha0(lambdaSole, Sondendurchmesser)/r[0]/dl);
end else if Rb > 0 then begin
R1 := Rb/dl - 1/2/Pi/dl*ln(r[1]/rz[1])/lambdaFill;
for i:=1 to DimAxi do
R2[i] := 1/2/Pi/dl*(ln(r[1]/rz[1])/lambdaFill+ln(rz[2]/r[1])/lambdaErde[i]);
Llrun := 1 / R1;
Llstop:= 1 / (R1 - 1/8/Pi/alpha/r[0]/dl
+ 1/8/Pi/alpha0(lambdaSole, Sondendurchmesser)/r[0]/dl);
Ra := R1 * 4 * dl;
end else if R1 > 0 then begin
for i:=1 to DimAxi do
R2[i] := 1/2/Pi/dl*(ln(r[1]/rz[1])/lambdaFill+ln(rz[2]/r[1])/lambdaErde[i]);
Llrun := 1 / R1;
Llstop:= 1 / (R1 - 1/8/Pi/alpha/r[0]/dl
+ 1/8/Pi/alpha0(lambdaSole, Sondendurchmesser)/r[0]/dl);
Ra := R1 * 4 * dl;
Rb := R1*dl + 1/2/Pi*ln(r[1]/rz[1])/lambdaFill;
end else begin
R1 := 1/8/Pi/dl * (1/alpha/r[0] + ln((r[1]-rz[1])/r[0])/lambdaFill);
for i:=1 to DimAxi do
R2[i] := 1/2/Pi/dl*(ln(r[1]/rz[1])/lambdaFill+ln(rz[2]/r[1])/lambdaErde[i]);
Llrun := 1 / R1;
Llstop:= 8/(1/Pi/alpha0(lambdaSole, Sondendurchmesser)/r[0]/dl
+ ln((r[1]-rz[1])/r[0])/Pi/lambdaFill/dl);
Ra := R1 * 4 * dl;
Rb := R1*dl + 1/2/Pi*ln(r[1]/rz[1])/lambdaFill;
end;

(* Pumpe laeuft *)
for i := 1 to DimAxi do begin
L1[i,1] := Llrun;
L1[i,2] := 1 / R2[i];
for j := 3 to DimRad do L1[i,j] := 1/(ln(rz[j]/rz[j-1])/2/Pi/lambdaErde[i]/dl);
L1[i,DimRad+1] := 1 / (1/2/Pi/dl/lambdaErde[i]*ln(r[DimRad]/rz[DimRad]));
Llast[i] := L1[i,DimRad+1];
end;

(* Pumpe laeuft nicht *)
for i := 1 to DimAxi do begin
L2[i,1] := Llstop;
for j := 2 to DimRad+1 do L2[i,j] := L1[i,j];
end;

(* Waermekapazitaeten *)
for i:=1 to DimAxi do begin
C[i,1] := cpFill * rhoFill * Pi * (sqr(r[1]) - 4*sqr(r[0])) * dl;
for j:=2 to DimRad do C[i,j]:=cpErde[i]*rhoErde[i]*Pi*(sqr(r[j])-sqr(r[j-1]))*dl;
end;

```

```

(* Bestimmen der optimalen Zeitschrittlänge *)
subdt := Optimaler_Zeitfaktor(L1,C);
dt := Zeitschritt * 60 / subdt; (* s *)

(* Definition der Matrizen, wobei A * Tneu = F * Talt *)
DefMatrixA(L1,C,dt,A1,DimAxi,DimRad); (* Pumpe laeuft *)
DefMatrixF(L1,C,dt,F1,DimAxi,DimRad);
invertieren(A1,Ainv1,DimAxi,DimRad);
Multimatrix(Ainv1,F1,B1,DimAxi,DimRad);

DefMatrixA(L2,C,dt,A2,DimAxi,DimRad); (* Pumpe laeuft nicht *)
DefMatrixF(L2,C,dt,F2,DimAxi,DimRad);
invertieren(A2,Ainv2,DimAxi,DimRad);
Multimatrix(Ainv2,F2,B2,DimAxi,DimRad);

Anfangstemp(Bodentemp,TGrad,dl,TEarth,T0,TUp,TUpold,TDown,TDownOld,
TSource,DimAxi,DimRad);
AnfangsQ(Q);

(* Berechnung der Anzahl substeps *)
LmMin := mcpSole / L0;
if (mcpSole/L1run) < LmMin then LmMin := (mcpSole/L1run);
if stationaer then begin
  substep_run := 1;
  substep_stop:= 1;
end else begin
  substep_run := trunc(Sicherheit1*dt/LmMin)+1;
  substep_stop:= trunc(Sicherheit1*dt/mcpSole*L1stop)+1;
end;
end;
(*-- Procedure InitEWS -----*)

(*-- Procedure EWSmodul -----*)
Procedure EWSmodul( iteration : integer;
var DimAxi,DimRad,Zeitschritt,
subdt,substep_run,substep_stop,RepRandbed,
MonitorAxi,MonitorRad,Jahr : integer;
var numrows : longint;
var rhoFill,cpFill,lambdaFill,rhoSole,cpSole,
lambdaSole,nueSole,Rl,Ra,Rb,Sondenlaenge,
Sondendurchmesser,Dicke_Sondenrohr,
Bohrdurchmesser,Auslegungsmassenstrom,
Massenstrom,Bodentemp,Tgrad,mcpSole,L1run,
L1stop,dl,Rechenradius,
Rechengebiet,Gitterfaktor,Sicherheit1,
Sicherheit2,DeltaT,TSourceOld,TSource,
TSink,TMonitor,p,QSource,Genauigkeit : real;
var B1,B2 : KMatrix;
var TEarth,TEarthold : Matrix;
var T0,TUp,TUpOld,TDown,TDownOld,
Llast,cpErde,rhoErde,lambdaErde : Vektor;
var Q : MatrixQ;
var Debug,readFile,writeFile,laminar,
Einschwingen,Leistungsinput,Leistung,
stationaer : boolean;
var IFileName,OFileName,Sprache : string );

var
Gefriergrenze,L0,Summe_TSource,TRT: real;
i,j,k,Woche,idt : integer;
Tneu,Tadneu : Matrix;
QWand : Vektor;
Pumpelauft : boolean;

Procedure multiplizieren (var M : kmatrix; var w,y : Matrix;
k,DimRad : integer);
{ ***** y = M x w ***** }
var i,j : integer;
begin
y[k,0] := w[k,0]; y[k,DimRad+1] := w[k,DimRad+1];
for i:=1 to DimRad do begin
y[k,i] := 0;
for j:=0 to DimRad+1 do y[k,i]:=y[k,i] + M[k,i,j] * w[k,j];
end;
end;
end;

```

```

Function Fakultaet(x:integer):comp;
var i,y : longint;
begin
  y:=1;
  for i:=1 to x do y:=y*i;
  Fakultaet:=y;
end;

Function hoch (a: real; b: longint): extended;          (* a^b : real *)
begin
  if a>0 then hoch:=exp(b * ln(a))
  else if odd(b) then hoch:=-exp(b * ln(-a))
  else hoch:=exp(b * ln(-a));
end;

Function Druckabfall(NueSole,RhoSole,Massenstrom,Sondendurchmesser,
                    Dicke_Sondenrohr:real; var Debug,laminar:boolean) : real;
var Di, wi, Re, Xi, nue : real;
begin
  Di := Sondendurchmesser - 2 * Dicke_Sondenrohr;
  wi := Massenstrom / 2 / Pi / sqr(Di/2) / RhoSole;
  Re := wi * Di / nueSole;
  laminar := false;
  if Re>0 then begin
    if Re < 2300 then begin
      Xi := 64 / Re;
      laminar := true;
    end {else if Re < 1000 then Xi := 0.316 / sqrt(sqrt(Re)) (* Bose, 1985*)}
      else Xi := 1 / sqr(1.82*ln(Re)/ln(10) - 1.64); (* Petukhov, 1970 *)
  end else xi:=0;
  Druckabfall := Sondenlaenge * Xi / Di * RhoSole * sqr(wi) / 2;
end;

Procedure RandAussen (var TRT
                    k,Woche,Zeitschritt          : real;
                    simstep                      : integer;
                    RepRandbed                  : longint;
                    Q                            : integer;
                    cpErd,rhoErd,lambdaErd,
                    Rechenradius,Sondenlaenge  : real;
                    DimAxi                      : integer);
{ Diese Procedure berechnet die Randbedingung nach der Trichterformel
von Werner ***** }
var u,u0,W,W_alt,STrt,STrt0 : extended;
    i                        : integer;
    j                        : integer;
begin
  u0:=sqr(Rechenradius)*cpErd*rhoErd/(4*lambdaErd);
  STrt0:=4*Pi*lambdaErd*Sondenlaenge/DimAxi;
  STrt:= 0;
  for i:= 1 to Woche do begin
    u:=u0/(i*604800*RepRandbed);
    if u > 1 then STrt := 0
    else begin
      W:=-0.5772-ln(u);
      j:=1;
      W_alt:=W-hoch(-1,j)*hoch(u,j)/(j*Fakultaet(j));
      W:=W_alt;
      repeat
        W_alt:=W;
        j:=j+1;
        W:=W-hoch(-1,j)*hoch(u,j)/(j*Fakultaet(j));
      until abs(1-W/W_alt) < 0.01;
      STrt := STrt+(-Q[k,Woche-i+1]+Q[k,Woche-i])/STrt0*W;
    end;
  end;
  Trt := STrt;
end;

Function TBRINE(var T
                TDown,Tup
                TSink,L0,L
                Zeitschritt,subdt,substep
                var QWand
                mcpSole
                DimAxi
                stationaer
                : Matrix;
                : Vektor;
                : real;
                : integer;
                : Vektor;
                : real;
                : integer;
                : boolean ) :real;

```



```

var i,k
      : integer;
TOut,dt2,Lm0,Lm1,LmMin : real;
L0mcpdt,L1mcpdt,Nichtad : real;
Td,Tu,SummeT
      : Vektor;
begin
  dt2 := Zeitschritt*60/subdt/substep; (* [s] *)
  TDown[0]:= TSink;
  TOut := 0;
  L0mcpdt := L0 / mcpSole * dt2;
  L1mcpdt := L / 2 / mcpsole * dt2;
  for i:=1 to DimAxi do SummeT[i] := 0;
  for k := 1 to Substep do begin
    for i := 1 to DimAxi do begin
      Td[i] := (T[i,1] - TDown[i]) * L1mcpdt;
      if stationaer then TDown[i]:=(L/2*T[i,1] + L0*TDown[i-1])/(L/2+L0)
      else TDown[i] := TDown[i] + (TDown[i-1] - TDown[i]) * L0mcpdt + Td[i];
    end;
    TUp[0] := TDown[DimAxi];
    for i := 1 to DimAxi do begin
      Tu[i] := (T[1+DimAxi-i,1] - TUp[i]) * L1mcpdt;
      if stationaer then TUp[i]:=(L/2*T[1+DimAxi-i,1] + L0*TUp[i-1])/(L/2+L0)
      else TUp[i] := TUp[i] + (TUp[i-1] - TUp[i]) * L0mcpdt + Tu[i];
    end;
    for i:= 1 to DimAxi do SummeT[i] := SummeT[i] + Td[i] + Tu[1+DimAxi-i];
    TOut := TOut + TUp[DimAxi];
  end;
  for i:=1 to DimAxi do QWand[i] := SummeT[i] * mcpSole;
  TOut := TOut / Substep;
  TBRINE := TOut;
end; (* Function TBRINE *)

Procedure calculateEWS (var iteration : integer);
var i,j,idt : integer;
begin
  if Iteration=0 then begin
    for i:=1 to DimAxi do begin
      for j:=1 to DimRad do TEarthOld[i,j] := TEarth[i,j];
      TupOld[i] := Tup[i];
      TDownOld[i] := TDown[i];
      Q0Old[i] := Q0[i];
    end
  end else begin
    for i:=1 to DimAxi do begin
      for j:=1 to DimRad do TEarth[i,j] := TEarthOld[i,j];
      Tup[i] := TupOld[i];
      TDown[i] := TDownOld[i];
      Q0[i] := Q0Old[i];
    end;
  end;
end;

if iteration=0 then begin
  if not readfile then filestep:=simstep-1;
  if simstep>1 then if not einschwingen then
    if writefile then WriteStep(filestep,Massenstrom,TSink,QSource,TSource,
      TEarth[MonitorAxi,MonitorRad],p,laminar);
  if readfile then ReadStep(filestep,Massenstrom,TSink,QSource);
  if DeltaT<>0 then TSink := TSourceOld - DeltaT;
end;

if iteration >-1 then begin
  Summe_TSource := 0;
  Woche := (simstep+numrows*(Jahr-1)-1) div (10080 div Zeitschritt * RepRandbed) + 1;
  simstepn:= (simstep+numrows*(Jahr-1)) mod (10080 div Zeitschritt * RepRandbed);
  if simstepn = 0 then simstepn := 10080 div RepRandbed div Zeitschritt;
  Rechengebiet := Rechenradius - Bohrdurchmesser / 2;
  L0 := cpSole * Massenstrom;
  if Massenstrom>0.00001 then Pumpelauft := true else Pumpelauft := false;
  for idt := 1 to subdt do begin
(* calculate brine Temperature *)
    if Pumpelauft then begin
      TSource := TBRINE(TEarth,TDown,TUp,TSink,L0,L1run,Zeitschritt,subdt,
        substep_run,QWand,mcpSole,DimAxi,stationaer);
      for i:= 1 to DimAxi do TEarth[i,0]:=TEarth[i,1]
        - QWand[i]/L1run/Zeitschritt/60*Subdt;
    end else begin
      TSource := TBRINE(TEarth,TDown,TUp,0,0,L1stop,Zeitschritt,subdt,
        substep_stop,QWand,mcpSole,Dimaxi,stationaer);
    end;
  end;
end;

```

```

        for i:= 1 to DimAxi do TEarth[i,0]:=TEarth[i,1]
                                - QWand[i]/Llstop/Zeitschritt/60*Subdt;
    end;
    for i:=1 to DimAxi do begin
    (* calculate temperature at outer boudary condition at each RepRandBed *)
    Q0[i] := (Q0[i] * ((simstepn-1)*subdt + (idt-1))
            + QWand[i]*subdt/Zeitschritt/60)/((simstepn-1)*subdt+idt);
    if iteration=0 then begin
    if idt=subdt then begin
    if ((simstep+numrows*(Jahr-1))*Zeitschritt) mod (60*24*7*RepRandbed) = 0 then begin
    Q[i,Woche] := Q0[i];
    RandAussen(TRT,i,Woche,Zeitschritt,(simstep+numrows*(Jahr-1)),RepRandbed,Q,
    cpErde[i],rhoErde[i],lambdaErde[i],Rechenradius,Sondenlaenge,DimAxi);
    TEarth[i,DimRad+1] := T0[i] + TRT;
    end;
    end;
    end;
    (* calculate earth temperature *)
    if Pumpelauf then multiplizieren(B1,TEarth,Tneu,i,DimRad)
    else multiplizieren(B2,TEarth,Tneu,i,DimRad);
    for j:=1 to DimRad do TEarth[i,j] := Tneu[i,j];
    end;
    Summe_TSource := Summe_TSource + TSource;
    end;
    TSource := Summe_TSource / subdt;          (* avarage source temperature *)
    TSourceOld := TSource;
    TMonitor := TEarth[MonitorAxi,MonitorRad];
    end;
end; (* Procedure calculateEWS *)

begin (* Procedure EWSmodul *)

    if iteration=-4 then begin
    if not readfile then filestep:=numrows;
    if writefile then if not einschwingen then
    WriteStep(filestep,Massenstrom,TSink,QSource,TSource,
    TEarth[MonitorAxi,MonitorRad],p,laminar);
    if readfile then close(ifile);
    if writefile then close(ofile);
    end;

    if iteration=-3 then
    DefaultWert(cpSole,cpFill,rhoSole,rhoFill,lambdaSole,lambdaFill,nueSole,
    Rechenradius,Gitterfaktor,Sondenlaenge,Sondendurchmesser,
    Dicke_Sondenrohr,Bohrdurchmesser,Massenstrom,TGrad,
    Jahresmitteltemp,Bodenerwaermung,DeltaT,Auslegungsmassenstrom,
    TSource,Sicherheit1,Sicherheit2,Rl,Ra,Rb,Genauigkeit,
    cpErde,rhoErde,lambdaErde,RepRandbed,Zeitschritt,Simulationsdauer,
    DimAxi,DimRad,MonitorAxi,MonitorRad,Jahr,numrows,Debug,readfile,
    writefile,Einschwingen,Leistungsinput,Leistung,stationaer,
    IFileName,OFileName,Sprache);

    if iteration=-2 then begin
    if readfile then OpenInputFile(IFileName,Zeitschritt,numrows);
    if writefile then OpenOutputFile(OFileName,Zeitschritt,numrows);
    end;

    if iteration=-1 then begin
    Bodentemp := Jahresmitteltemp + Bodenerwaermung;
    InitEWS(rhoFill,cpFill,lambdaFill,rhoSole,cpSole,lambdaSole,NueSole,
    Sondenlaenge,Sondendurchmesser,Dicke_Sondenrohr,Bohrdurchmesser,
    Rl,Ra,Rb,Auslegungsmassenstrom,Bodentemp,Tgrad,Rechenradius,
    Gitterfaktor,Zeitschritt,subdt,substep_run,substep_stop,Jahr,
    B1,B2,TEarth,T0,TUp,TUpold,TDown,TDownold,Llast,cpErde,rhoErde,
    lambdaErde,Q,mcpSole,Llrun,Llstop,dl,TSource,Debug,DimAxi,DimRad);
    for i:=1 to DimAxi do begin
    for j:=1 to DimRad do TEarthOld[i,j] := TEarth[i,j];
    Tup[i] := TupOld[i];
    TDown[i] := TDownOld[i];
    end;
    end;

    if iteration > -1 then begin
    if Leistung then iteration:=0;
    calculateEWS(iteration);
    if Leistung then begin
    if Massenstrom>0 then repeat begin
    Iteration := Iteration + 1;

```

```

        calculateEWS(Iteration);
        TSinkOld := TSink;
        TSink := TSource - QSource * 1000 / cpSole / Massenstrom;
        if Abs(TSink)>100 then begin TSink:=-1; TSinkOld:=1; end;
    end until Abs(TSink-TSinkOld)<Genauigkeit;
    if Massenstrom < 0.00001 then begin
        TSink := TEarth[1,1];
        TSource := TSink;
    end;
end;
if Einschwingen and (simstep=numrows) then begin
    simstep := 0;
    Jahr := Jahr + 1;
    if not readfile then filestep:=numrows;
    if readfile then close(ifile);
    if writefile then close(ofile);
    if readfile then OpenInputFile (IFilename,Zeitschritt,numrows);
    if writefile then OpenOutputFile (OFilename,Zeitschritt,numrows);
end;
end;
p := Druckabfall (NueSole,RhoSole,Massenstrom,Sondendurchmesser,
                Dicke_Sondenrohr,Debug,laminar);      (* [Pascal] *)
end;
(*-- Procedure EWSmodul -----*)
(*-- Procedure Erdsonde -----*)
Procedure Erdsonde( iteration : integer);
begin
    EWSmodul (iteration,DimAxi,DimRad,Zeitschritt,subdt,substep_run,substep_stop,
            RepRandbed,MonitorAxi,MonitorRad,Jahr,numrows,rhoFill,cpFill,
            lambdaFill,rhoSole,cpSole,lambdaSole,nueSole,R1,Ra,Rb,Sondenlaenge,
            Sondendurchmesser,Dicke_Sondenrohr,Bohrdurchmesser,
            Auslegungsmassenstrom,Massenstrom,Bodentemp,Tgrad,mcpSole,
            Llrn,Llstop,d1,Rechenradius,Rechengebiet,Gitterfaktor,Sicherheit1,
            Sicherheit2,DeltaT,TSourceOld,TSource,TSink,TMonitor,p,QSource,
            Genauigkeit,B1,B2,TEarth,TEarthold,T0,TUp,TUpOld,TDown,TDownOld,
            Llast,cpErde,rhoErde,lambdaErde,Q,Debug,readfile,writefile,laminar,
            Einschwingen,Leistungsinput,Leistung,stationaer,IFilename,OFilename,
            Sprache);
end;
(*-- Procedure Eredsonde -----*)
end. { der Unit EWS }

```

9.2 Vergleich von EWS, EED, SBM, NUSOND, COSOND, TRADIKON

	EWS	EED	SBM	NUSOND	COSOND	TRADIKON-3D
Methode	Simulation mit Crank-Nicholson im Sonden-Nahbereich, Randbedingung nach Kelvin-Theorie für Linienquellen mit Formel von Werner	Antwortfunktionen ("g - function"), vorausberechnet mit SBM und in Bibliothek gespeichert	2-dimensionale Simulation des Erdreiches. 3-dimensionale Sondenfelder durch Superposition der 2-dimensionalen Resultate	3-dimensionale Simulation des Erdreiches mit "multi-level nested grids"	2-dimensionale Simulation des Erdreiches	3-dimensionale Simulation des Erdreiches
Einsatzgebiet	System-Simulations-Modul, inhomogenes Erdreich doppel-U-Sonden	Dimensionierungswerkzeug, Einzelsonden, Sondenfelder	berechnen von Antwortfunktionen, wissenschaftliches Programm, Sondenfelder, System-simulationen (TRNSYS)	wissenschaftliches Programm, Einzelsonden, Sondenfelder	Dimensionierungswerkzeug, Einzelsonden, koaxial	wissenschaftliches Programm, Sondenfelder, Erdreich mit Grundwasser
Wärmetransport	konduktiv	konduktiv	konduktiv	konduktiv	konduktiv	konduktiv und konvektiv
Erdreich	mehrere Schichten axial, je mit eigenen Stoffwerten	homogen	homogen	inhomogene und anisotrope Berechnung möglich, instationär simuliert	inhomogene und anisotrope Berechnung möglich	inhomogene Berechnung möglich
Hinterfüllung	1 Rechenknoten, instationär simuliert	stationär berechnet (ohne Dynamik, nur Widerstand)	stationär berechnet (ohne Dynamik, nur Widerstand)	instationär simuliert	instationär simuliert	instationär simuliert
Sondenfluid	explizit, instationär berechnet	stationär berechnet (ohne Dynamik)	stationär berechnet (ohne Dynamik)	explizit, instationär berechnet	explizit, instationär berechnet	Sole ist standardmässig nicht eingebaut. Innere Randbedingung ist Energie-Entzug
turbulenter Umschlag in Sole	stetiger Uebergang laminar / turbulent	sprunghafter Umschlag	sprunghafter Umschlag	sprunghafter Umschlag	sprunghafter Umschlag	-
Ansatz für Sondenfelder	Reduzierte Temperatur der Erde als Startbedingung	Bibliothek mit Antwortfunktionen für Sondenfelder	berechnet mit Superpositionsprinzip	3-dimensional berechnet	nicht vorgesehen	3-dimensional berechnet
Gefrieren	nicht berechnet	nicht berechnet	nicht berechnet	nicht berechnet	nicht berechnet	berechnet
maximale Sondenlänge	nicht begrenzt	<= 150m	nicht begrenzt	nicht begrenzt	nicht begrenzt	nicht begrenzt
Randeffekte am Sondenfuss	nicht berücksichtigt	berücksichtigt	berücksichtigt	berücksichtigt	berücksichtigt	berücksichtigt
Simulationszeitschritt	beliebig, rechnet intern mit Zeitschritten < 6 Min	keine Simulation, sondern Antwortfunktionen. Daher "Zeitschritt" > 3-4 Stunden	beliebig, Einschränkungen durch örtliche Diskretisation und Rechenzeit	beliebig und variabel, Einschränkungen durch örtliche Diskretisation. Intern adaptiver Rechenzeitschritt	beliebig und variabel, Intern adaptiver Rechenzeitschritt.	beliebig, Einschränkungen durch örtliche Diskretisation und Rechenzeit
Rechenzeit für Jahresrun: * - Zeitschritt 1h - Zeitschritt 3 Min	ca. 50 Sekunden ca. 100 Sekunden	(Min. Zeitschritt: 3-4 h, sehr kurze Rechenzeiten <5s) -	ca. 50 Sekunden ca. 15 Minuten	ca. 30 Minuten ca. 60 Minuten	ca. 2 Minuten ca. 4 Minuten	ca. 2 Stunden nicht üblich
Validierung	Kurzzeitverhalten und Langzeitverhalten von Einzelsonden	Langzeitverhalten und Sondenfelder	Langzeitverhalten und Sondenfelder, Saisonspeicher	Kurz- und Langzeitverhalten, Sondenfelder	Kurz- und Langzeitverhalten	mit diversen Feldmessungen für Sonden und Aquifere
Bemerkungen	Antwortfunktionen (TF-STEP) als Startbedingung bei Sondenfeldern prüfenswert. Liegt bereits als TRNSYS-Modul vor	Sonden-Ueberdimensionierung wird nicht berücksichtigt. korrekte, analytische Lösungen	liegt bereits als TRNSYS-Modul vor (Dr. Pahud, EPFL)	nicht vereinfachbar für TRNSYS-Modul. Rechenkoordinatensystem um Sonde: zylinderkoordinaten, Erdreich: karthisch	vereinfachbar, als TRNSYS-Modul implementierbar	kann Grundwasser mitberücksichtigen, grosse Rechenzeit
Programm-Hersteller	Arthur Huber, Othmar Schuler Huber Energietechnik; Michael Wetter, ZTL (TRNSYS-Version) im Auftrag des BEW	Per Eskilson, Görhan Hellström Universität Lund; Burhard Sanner Universität Giessen	Per Eskilson, Görhan Hellström Universität Lund Daniel Pahud, EPFL (TRNSYS-Version)	Robert Hopkirk, Walter Eugster Polydynamics Engineering	Robert Hopkirk, Walter Eugster Polydynamics Engineering	Universität Giessen

* 133 MHz Pentium