

# **VERGLEICH VON SOFTWARE ZUR DIMENSIONIERUNG VON ERDWÄRMESONDEN-ANLAGEN**

DIPLOMARBEIT AM  
INSTITUT FÜR GEOPHYSIK  
DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

VORGELEGT VON  
SILVIO MARAINI

REFERENT: PD DR. THOMAS KOHL  
KOREFERENT: PROF. DR. LADISLAUS RYBACH

ZÜRICH, MÄRZ 2000

## Vorwort

An erster Stelle möchte ich Dr. Thomas Kohl für die interessante Aufgabenstellung und die Übernahme des Referates danken. In kompetenter Art und Weise hat er mich während der ganzen Diplomarbeit unterstützt.

Ein besonderer Dank gebührt Prof. Dr. Ladislaus Rybach, der mir mit vielen Anregungen und Hinweisen stets hilfreich zur Seite gestanden hat.

Dr. Walter Eugster von Polydynamics Engineering möchte ich für die fachliche Unterstützung und die nützlichen Ideen im Bereich EED danken.

Ein grosses Dankeschön richte ich an Arthur Huber, Huber Energietechnik in Zürich. Er war jederzeit bereit, meine Fragen in Bezug auf EWS fachlich kompetent zu beantworten.

Dr. Ueli Schärli, Michel Salton und Alfred Rissi danke ich, dass sie mich während der Diplomarbeit mit wertvollen Daten und Informationen beliefert haben.

Sarah Signorelli und Benno Bucher sind mir bei Computer- und Softwareproblemen immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

Ein grosses Dankeschön gebührt meinen Eltern, die mir das Studium der Erdwissenschaften ermöglicht haben.

Zürich, März 2000

Silvio Maraini

## Zusammenfassung

Hinsichtlich der Flächendichte von Erdwärmesonden steht die Schweiz weltweit an erster Stelle. Die meisten dieser Sonden werden zur Beheizung von Wohnhäusern genutzt. Um die Anlagen geschickt zu dimensionieren, stehen heutzutage einige Computerprogramme zur Verfügung, die in den letzten Jahren entwickelt wurden.

In dieser Diplomarbeit werden drei Programme zur Auslegung von Erdwärmesonden besprochen, getestet und miteinander verglichen. Es sind dies EED, EWS und FRACTure. Die Modellrechnungen werden anhand der 1200 Meter tiefen Erdwärmesonde Weissbad durchgeführt. Von dieser Sonde bestehen exakte Messprotokolle über zwei Jahre, die von der Firma Oekoplan AG erstellt wurden. Die gemessenen Austrittstemperaturen des Fluids aus der Sonde sollen mit den modellierten Temperaturen verglichen werden.

Die ersten, mit abgeschätzten Modellparametern durchgeführten Berechnungen mit EED und EWS ergeben grosse Abweichungen für beide Programme von bis zu 10°C der Fluidtemperaturen im Bezug auf die Messwerte. Sensitivitätsuntersuchungen zeigen, dass gewisse Parameter wie Wärmeleitfähigkeit des Bodens, Widerstandswerte zwischen Verrohrung und Untergrund oder Laufzeit der Wärmepumpen grossen Einfluss auf die untersuchten Austrittstemperaturen des Fluids ausüben. In einer zweiten Modellierung wird mit angepassten Parametern gerechnet. Die Messwerte können mit hohen Widerstandswerten bis auf etwa 3°C angenähert werden.

Die schlechte Anbindung der Hinterfüllung an die Verrohrung der Erdwärmesonde Weissbad wird durch eine numerische Modellierung mit dem Finite-Elemente-Programm FRACTure bestätigt. Trotz der Einbindung einer 1 mm dicken Luftschicht zwischen der Verrohrung und der Hinterfüllung sind die berechneten Temperaturen etwas höher als die Messwerte.

Der Einfluss unterschiedlicher Auslegungsgeometrien von Erdwärmesonden wird anhand eines Modelles einer 70m tiefen, fiktiven Doppel-U-Sonde untersucht. In je zwei EWS- und FRACTure-Modellen wird die Austrittstemperatur des Sondenfluids von vier quadratisch angeordneten Doppel-U-Sonden mit der Soletemperatur einer einzelnen Sonde verglichen. Die Resultate zeigen, dass die Austrittstemperaturen für die Einzelsonde im Mittel über zehn Jahre knapp 0.2°C höher ist als für die Konfiguration mit vier Sonden. Das von EWS berechnete Temperaturniveau ist etwas höher als dasjenige von FRACTure, die Kurvenverläufe sind aber beinahe identisch. Dies bestätigt auch ein Vergleich der Temperaturdifferenzen gegen die Zeit.

In allen Modellierungen liefern die beiden Programme EED und EWS etwas zu hohe Resultate. Für die erste Dimensionierung einer geplanten Erdwärmesonden-Anlage liefern sie aber brauchbare Resultate. Zudem sind die Modellierungen schnell und relativ einfach durchführbar.

Die von den beiden Programmen zur Definition der Auslegungsgeometrie verwendeten g-Funktionen haben im durchgeführten Test im Vergleich mit FRACTure gute Resultate geliefert.

Mit FRACTure können detailgetreue Modelle der jeweiligen Verhältnisse bei der Erdwärmesonde berechnet werden. Mit einigem Aufwand erhält man sehr gute Ergebnisse für das genau definierte Problem, die sich zudem graphisch ansprechend visualisieren lassen.

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Einleitung</b> .....  | <b>1</b>  |
| 1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung dieser Arbeit.....                        | 1         |
| 1.2. Energiebilanz der Erde.....  | 2         |
| 1.3. Wärmenutzung mit Erdwärmesonden.....                                       | 3         |
| 1.4. Numerik.....   | 5         |
| <b>2. Earth Energy Designer (EED)</b> .....                                     | <b>6</b>  |
| 2.1. Einleitung.....  | 6         |
| 2.2. Physikalische Grundlagen.....  | 8         |
| 2.2.1. Vereinfachungen und Annahmen.....  | 8         |
| 2.2.2. Der geothermische Gradient.....  | 8         |
| 2.2.3. Randbedingungen am Bohrloch.....   | 9         |
| 2.2.4. Der Wärmeentzugsschritt.....   | 10        |
| 2.2.5. Die dimensionslose Sprungantwort (g-Funktion).....                       | 11        |
| 2.2.6. Modellierung der Fluidtemperatur.....                                    | 12        |
| 2.3. Benutzungsschritte für EED.....  | 14        |
| 2.3.1. Allgemeine Informationen.....  | 14        |
| 2.3.2. Das „File“-Menü.....   | 15        |
| 2.3.3. Beschreibung der Eingabeparameter.....                                   | 15        |
| 2.3.4. Durchführung der Berechnungsschritte von EED.....                        | 17        |
| 2.3.5. Resultate.....   | 18        |
| <b>3. EED-Simulation der tiefen Erdwärmesonde Weissbad (AI)</b> .....           | <b>19</b> |
| 3.1. Einleitung.....  | 19        |
| 3.1.1. Die Erdwärme-Tiefensonde Weissbad.....                                   | 19        |
| 3.1.2. Aufgabenstellung.....  | 19        |
| 3.2. Modellierung 1.....  | 21        |
| 3.2.1. Eingabeparameter.....  | 21        |
| 3.2.2. Resultate.....   | 23        |
| 3.3. Sensitivitätsanalyse der Eingabeparameter.....                             | 26        |
| 3.3.1. Variation der Untergrundparameter und der Oberflächentemperatur.....     | 26        |
| 3.3.2. Änderung des Bohrlochdurchmessers und der Verrohrung.....                | 27        |
| 3.3.3. Variation des Kontaktwiderstandes.....                                   | 29        |
| 3.4. Modellierung 2.....  | 31        |
| 3.4.1. Eingabeparameter.....  | 31        |
| 3.4.2. Resultate.....   | 32        |
| <b>4. Das Erdwärmesonden-Simulationsprogramm EWS</b> .....                      | <b>33</b> |
| 4.1. Einleitung.....  | 33        |
| 4.2. Physikalische Grundlagen von EWS.....                                      | 34        |
| 4.2.1. Crank-Nicholson-Verfahren für die Simulation des Sondennahbereiches..... | 34        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2.2. Wärmekapazitäten C .....                                     | 35        |
| 4.2.3. Thermische Widerstände R und Leitfähigkeiten L .....         | 36        |
| 4.2.4. Wärmeübergang Sonde-Sole .....                               | 39        |
| 4.2.5. Modellierung der Sole .....                                  | 40        |
| 4.2.6. Theis-Lösung .....   | 43        |
| 4.3. Anpassung von EWS für die Simulation von Koaxialsonden .....   | 45        |
| 4.3.1. Anpassung zur Modellierung der Sole .....                    | 45        |
| 4.3.2. Anpassung des thermischen Widerstandes $R_1$ .....           | 46        |
| 4.3.3. Anpassung der Wärmekapazitäten C an die neue Geometrie ..... | 47        |
| 4.4. Anwendungsschritte für EWS .....                               | 48        |
| 4.4.1. Allgemeine Informationen .....                               | 48        |
| 4.4.2. Eingabe der Parameter in EWS .....                           | 48        |
| <b>5. Simulation der Erdwärmesonde Weissbad mit EWS .....</b>       | <b>51</b> |
| 5.1. Einleitung .....   | 51        |
| 5.2. EWS-Modellierung 1 .....                                       | 52        |
| 5.2.1. Eingabeparameter .....                                       | 52        |
| 5.2.2. Resultate: .....   | 53        |
| 5.3. Sensitivitätsanalysen .....                                    | 57        |
| 5.3.1. Modellierung mit Hinterfüllung .....                         | 57        |
| 5.3.2. An- und Abschalten der Wärmepumpe .....                      | 58        |
| 5.3.3. Simulation mit mehreren unterschiedlichen Erdschichten ..... | 60        |
| 5.3.4. Vergleich zwischen der Theis-Lösung und der g-Funktion ..... | 63        |
| 5.3.5. Variation des Widerstandes .....                             | 64        |
| 5.4. EWS-Modellierung 2 .....                                       | 66        |
| 5.4.1. Eingabeparameter .....                                       | 66        |
| 5.4.2. Resultate .....  | 67        |
| 5.5. Zusammenfassung der Resultate .....                            | 69        |
| <b>6. FRACTure .....</b>  | <b>70</b> |
| 6.1. Einleitung .....   | 70        |
| 6.2. Physikalische Grundlagen .....                                 | 72        |
| 6.2.1. Thermik .....  | 72        |
| 6.2.2. Hydraulik .....  | 73        |
| <b>7. Simulation der Erdwärmesonde Weissbad mit FRACTure .....</b>  | <b>74</b> |
| 7.1. Aufbau des numerischen Gitters .....                           | 74        |
| 7.1.1. Anforderungsprofil .....                                     | 74        |
| 7.1.2. Gittergenerierung .....                                      | 74        |
| 7.1.3. Wärmeübergang .....  | 79        |
| 7.2. Transiente Simulation .....                                    | 80        |
| 7.2.1. Einleitung .....   | 80        |
| 7.2.2. Zeitschritte .....   | 80        |
| 7.2.3. Kopplung von Thermik und Hydraulik .....                     | 80        |

|  |            |
|--|------------|
| 7.2.4. Die Load-Time-Funktion .....  | 81         |
| 7.2.5. An- bzw. Abschaltung der Wärmepumpe.....                                  | 81         |
| 7.3. Modellsensitivität .....  | 83         |
| 7.3.1. Einleitung .....  | 83         |
| 7.3.2. Sensitivität der horizontalen und vertikalen Ausdehnung des Gitters ..... | 83         |
| 7.3.3. Einfluss der Maschengrösse.....   | 84         |
| 7.3.4. Ideale Zeitdiskretisierung.....   | 85         |
| 7.3.5. Variation des Durchflusses .....  | 86         |
| 7.3.6. Verteilung der Abschaltzyklen auf die Simulationsdauer.....               | 86         |
| 7.3.7. Analyse des Überganges $Q=0 \Rightarrow Q \neq 0$ .....                   | 87         |
| 7.3.8. Resultate .....   | 89         |
| 7.4. FRACTure-Modellierung 1.....  | 90         |
| 7.4.1. Einleitung .....  | 90         |
| 7.4.2. Materialeigenschaften der 2D-Elemente.....                                | 90         |
| 7.4.3. Materialeigenschaften der Linienelemente.....                             | 91         |
| 7.4.4. Randbedingungen .....   | 91         |
| 7.4.5. Resultate .....   | 92         |
| 7.5. Einfluss der Kontaktzone.....   | 96         |
| 7.6. FRACTure-Modellierung 2.....  | 98         |
| 7.6.1. Eingabeparameter .....  | 98         |
| 7.6.2. Resultate .....   | 98         |
| <b>8. Modellierungen zur Auslegungsgeometrie .....</b>                           | <b>100</b> |
| 8.1. Einleitung .....  | 100        |
| 8.2. Modellrechnungen mit FRACTure .....   | 101        |
| 8.2.1. Aufbau des numerischen 3D-Gitters .....                                   | 101        |
| 8.2.2. Materialeigenschaften .....   | 105        |
| 8.2.3. Randbedingungen .....   | 106        |
| 8.2.4. Simulationszeitschritte.....  | 106        |
| 8.2.5. Resultate .....   | 107        |
| 8.3. Modellrechnungen mit EWS .....  | 112        |
| 8.3.1. Modellierung.....   | 112        |
| 8.3.2. Materialeigenschaften .....   | 112        |
| 8.3.3. Randbedingungen .....   | 113        |
| 8.3.4. Resultate .....   | 113        |
| 8.4. Vergleich der Resultate .....   | 116        |
| <b>9. Schlussfolgerungen.....</b>  | <b>118</b> |
| <b>10. Ausblick.....</b>   | <b>120</b> |
| <b>Literaturverzeichnis.....</b>   | <b>121</b> |

## Anhang

# Symbole

## Indizes:

|        |  |
|--------|--|
| DimAxi | Anzahl Rechenknoten in axialer Richtung  |
| DimRad | Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung |
| f      | Index für fluide Phase                   |
| i      | Index für axiale Ortskoordinate          |
| j      | Index für radiale Ortskonstante          |
| k      | Index für Zeitkoordinate                 |

## Lateinische Symbole:

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| A                               | Austauschfläche, [A] = m <sup>2</sup>  |
| a                               | thermische Diffusivität (m <sup>2</sup> /s)  |
| c                               | spezifische Wärmekapazität, [c] = J/kgK  |
| C                               | Wärmekapazität, [C] = J/K  |
| C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> | frei wählbare Variablen  |
| cp                              | spezifische Wärmekapazität, [cp] = J/kgK   |
| D                               | Tiefe des thermisch isolierten oberen Teiles des Bohrloches, [D] = m                           |
| D <sub>i</sub>                  | Innendurchmesser der Sondenrohre, [D <sub>i</sub> ] = m  |
| dl                              | Schichtdicke, [dl] = m   |
| f                               | Gitterfaktor   |
| g(t/t <sub>s</sub> ,...)        | Antwortfunktion, dimensionslos   |
| g                               | Erdbeschleunigung, [g] = m/s <sup>2</sup>  |
| G                               | Geothermischer Gradient, [G] = K/m   |
| H                               | Länge des Bohrloches mit Wärmeaustausch, [H] = m   |
| h                               | Wärmeübergangskoeffizient, [h] = W/m <sup>2</sup> K  |
| K                               | hydraulische Leitfähigkeit, [K] = m <sup>2</sup> /Pa·s   |
| L                               | thermische Leitfähigkeit zwischen zwei Rechenknoten, [L] = W/mK                                |
| L <sub>0</sub>                  | thermische Leitfähigkeit der Sole, [L <sub>0</sub> ] = W/K                                     |
| L <sub>1</sub>                  | thermische Leitfähigkeit zwischen Sole und Hinterfüllung, [L <sub>1</sub> ] = W/K              |
| L <sub>a</sub>                  | thermische Leitfähigkeit zwischen hinunter- und hinaufsrömender Sole, [L <sub>a</sub> ] = W/K  |
| m                               | Masse zweier Sole-Elemente der Länge dl, [m] = Kg  |
| Nu                              | Nusseltzahl, dimensionslos   |
| P                               | Druck, [P] = Pa  |
| Pr                              | Prandtlzahl, dimensionslos   |
| $\Phi$                          | Wärmefluss zwischen zwei Masseknoten, [ $\Phi$ ] = W   |
| q(t)                            | Wärmeentzugsrate, [q(t)] = W/m   |
| q <sub>geo</sub>                | Geothermischer Wärmefluss, [q <sub>geo</sub> ] = W/m <sup>2</sup>                              |
| $\phi$                          | spezifische Wärmeentzugsleistung pro Sondenlänge, [ $\phi$ ] = W/m                             |
| r                               | radiale Distanz vom Bohrlochzentrum, [r] = m   |
| R                               | thermischer Widerstand, [R] = K/W  |
| R <sub>q</sub>                  | thermischer Widerstand des Bohrloches für ein Wärmeentzugsschritt, [R <sub>q</sub> ] = (K·m)/W |
| r <sub>0</sub>                  | Innerer Radius der Sondenrohre, [r <sub>0</sub> ] = m  |
| r <sub>b</sub>                  | Bohrlochradius, [r <sub>b</sub> ] = m  |
| Re                              | Reynoldszahl, dimensionslos  |



|              |  |
|--------------|--|
| $r_z$        | radialer Massenschwerpunkt eines Rohringes, $[r_z] = m$        |
| $S$          | spezifischer Speicherkoeffizient, $[S] = 1/Pa$                 |
| $t$          | Zeit, $[t] = s$  |
| $t_s$        | Sondenzeitkonstante, $[t_s] = s$                               |
| $t'$         | dimensionslose Zeit  |
| $T$          | Temperatur, $[T] = K$  |
| $T_0$        | Oberflächentemperatur, $[T_0] = K$                             |
| $T_1, T_2$   | Randtemperaturen des Elementes, $[T_1, T_2] = K$               |
| $T_b$        | Temperatur entlang der Bohrlochwand, $[T_b] = K$               |
| $T_{down}$   | Temperatur der hinunterfliessenden Sole, $[T_{down}] = K$      |
| $T_{Earth}$  | Temperatur des Erdreiches, $[T_{Earth}] = K$                   |
| $T_{om}$     | ungestörte mittlere Temperatur, $[T_{om}] = K$                 |
| $T_{Sink}$   | Eintrittstemperatur der Sole in die Sonde, $[T_{Sink}] = K$    |
| $T_{Source}$ | Austrittstemperatur der Sole aus der Sonde, $[T_{Source}] = K$ |
| $V_f$        | Pumprate, $[V_f] = m^3/s$                                      |
| $z$          | Tiefe $[z] = m$  |

### Griechische Symbole:

|                    |   |
|--------------------|---|
| $\alpha$           | Wärmeübergangskoeffizient, $[\alpha] = W/m^2K$                          |
| $\alpha_0$         | Wärmeübergangskoeffizient im Ruhezustand, $[\alpha_0] = W/m^2K$         |
| $\beta_f$          | linearer Ausdehnungskoeffizient des Fluids, $[\beta_f] = 1/K$           |
| $\gamma$           | Eulersche Konstante = 0.5772  |
| $\Delta T$         | Temperaturabsenkung, $[\Delta T] = K$                                   |
| $\Delta t$         | Zeitschritt = 1 Woche   |
| $\Delta T_{Earth}$ | Temperaturdifferenz zwischen zwei Masseknoten, $[\Delta T_{Earth}] = K$ |
| $\Delta x$         | Länge eines Elementes in Flussrichtung, $[\Delta x] = m$                |
| $\lambda$          | Wärmeleitfähigkeit, $[\lambda] = W/mK$                                  |
| $\lambda'$         | Angepasste Wärmeleitfähigkeit, $[\lambda'] = W/mK$                      |
| $v$                | Strömungsgeschwindigkeit der Sole, $[v] = m/s$                          |
| $v_f$              | Advektionsgeschwindigkeit, $[v_f] = m/s$                                |
| $\rho$             | Dichte, $[\rho] = kg/m^3$   |
| $\rho_{trans}$     | thermische Leistung durch den Wärmeübergang, $[\rho_{trans}] = W$       |
| $\nabla T$         | Temperaturgradient, $[\nabla T] = K/m$                                  |
| $\nabla z$         | Vektor in Richtung z  |

# 1. Einleitung

## 1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung dieser Arbeit

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Analyse der Funktionsweise und der Vergleich ausgewählter Computerprogramme zur Dimensionierung und Auslegung von Erdwärmesonden. Als Testobjekt dient dabei die tiefe Erdwärmesonde Weissbad. Die drei Programme EED, EWS und FRACTure sollen anhand dieses Beispiels auf die Tauglichkeit zur Berechnung einer tiefen Erdwärmesonde getestet werden.

Der Vorteil dieses Testobjektes sind die genauen Messdaten, die von November 1996 bis November 1998 von der Firma Oekoplan aufgenommen wurden. Somit besteht die Möglichkeit, die erhaltenen Resultate mit den vorhandenen Messergebnissen zu korrelieren. Zudem kann die Leistung der Erdwärmesonde Weissbad untersucht werden. Wie frühere Untersuchungen (SALTON, 1999) bereits gezeigt haben, entspricht die Energiegewinnung der Sonde nicht den Prognosen. Diese Aussagen sollen mit den Modellrechnungen überprüft werden.

Für die Berechnung mit dem Finite-Elemente-Programm FRACTure soll ein möglichst naturgetreues Modellgitter der Erdwärmesonde Weissbad erstellt werden. Dieses Gitter wird mittels Sensitivitätsanalysen so optimiert, dass die Austrittstemperaturen der Sole optimal modelliert werden können. Für die Programme EED und EWS werden ebenfalls Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Eingabeparameter entsprechen anpassen zu können.

Zum Abschluss der Arbeit sollen zwei verschiedene Auslegungsgeometrien miteinander verglichen werden. Eine 70m tiefe, freistehende Doppel-U-Sonde wird dazu mit einer quadratischen Anordnung von 4 Doppel-U-Sonden verglichen. Dabei sollen jeweils die Austrittstemperaturen als Funktion der Zeit aufgetragen werden. Das Ziel ist die Beobachtung höherer Austrittstemperaturen für die Einzelsonde. Diese Berechnungen werden mit EWS und FRACTure durchgeführt.

## 1.2. Energiebilanz der Erde

Die für das Leben auf der Erde nutzbaren Energieströme stammen aus drei grundsätzlich verschiedenen Primärquellen. Dies sind die Sonnenstrahlung, die Erdwärme und die Gezeitenenergie. Die Energie tritt dabei in verschiedenen Erscheinungsformen wie Wärme, Wind oder Wellenbewegung auf. Mit entsprechend angepassten Techniken können die einzelnen Energieströme für den Menschen durch die Umwandlung in End- bzw. Nutzenergie verfügbar gemacht werden. Während die Gezeitenkraft eine untergeordnete Rolle bezüglich der Energiegewinnung spielt, werden Erdwärme und Solarenergie weltweit zur Bereitstellung thermischer, mechanischer oder elektrischer Energie genutzt.

Die Sonne leistet den grössten Teil des Energieeintrages auf die Erde. Aufgrund der ellipsenförmigen Bahn, auf der sich die Erde um die Sonne bewegt, schwankt die am äusseren Atmosphärenrand auftreffende Strahlung zwischen  $1330 \text{ W/m}^2$  im Juli und  $1420 \text{ W/m}^2$  im Januar. Durch verschiedenen Reflexions- und Absorptionserscheinungen sind letztlich davon nur gut 47% für die Erdoberfläche verfügbar (KALTSCHMITT ET AL., 1999).

Zusätzlich zur Sonnenenergie erreicht ein Energiestrom aus dem Erdinnern die Erdoberfläche. Er speist sich aus drei verschiedenen Quellen:

- Aus der Erdentstehung frei gewordene Gravitationsenergie
- Ursprungswärme bei der Erdentstehung
- Energiezutrag aus dem Zerfall radioaktiver Elemente

Der Zerfall natürlicher, langlebiger radioaktiver Isotope wie Uran, Thorium oder Kalium ist besonders für die kontinentale Erdkruste von grosser Wichtigkeit, da sie in den oberflächennahen Krustenbereichen angereichert sind. Die Addition der heute noch vorhandenen Wärme aus der Erdentstehung bzw. der Ursprungswärme und dem Energiezutrag aus dem Zerfall radioaktiver Elemente ergibt eine Gesamtwärme der Erde von gegenwärtig zwischen  $12$  und  $24 \cdot 10^{30} \text{ J}$ . Davon befinden sich in der äussersten Kruste bis in eine Tiefe von  $10'000 \text{ m}$  etwa  $10^{26} \text{ J}$ . Der daraus resultierende Wärmefluss zur Erdoberfläche liegt bei ungefähr  $65 \text{ mW/m}^2$ . Dadurch ergibt sich eine Strahlungsleistung der Erde von rund  $33 \cdot 10^{12} \text{ W}$ . Die Einstrahlung der Sonne liegt demgegenüber beim  $20'000$ -fachen des terrestrischen Wärmestromes.

In der Geothermie wird aber nicht der Wärmefluss im eigentlichen Sinne genutzt, sondern der von ihm bereitgestellte Wärmeinhalt. Die Erdwärmesonde entzieht dem Boden Wärme, die ständig horizontal nachfliesst. Sie kann so Energie über ein lateral sehr grosses Gebiet gewinnen.

### 1.3. Wärmenutzung mit Erdwärmesonden

Die Schweiz steht im weltweiten Vergleich hinsichtlich der Flächendichte von Erdwärmesonden (eine Anlage pro 2 km<sup>2</sup>) an erster Stelle. Die Wärmeproduktion von Sole/Wasser-Wärmepumpen betrug 1999 in der Schweiz 420 GWh (SIGNORELLI ET AL, 2000).

Eine Erdwärmesonden-Heisanlage besteht aus drei verschiedenen, voneinander getrennten Kreisläufen: dem Wärmequellenkreislauf, dem Wärmepumpenkreislauf und dem Wärmenutzungskreislauf. Sie sind in Abbildung 1 dargestellt.

Der Wärmequellenkreislauf beinhaltet die eigentliche Sonde. Sie wird in das Bohrloch eingeführt, danach wird die Hinterfüllung eingebracht. Die Hinterfüllung dient dazu, einen optimalen Kontakt zwischen dem Erdreich und der Sonde herzustellen. Es sollte ein Material verwendet werden, das einerseits eine hohe Wärmeleitfähigkeit hat und andererseits vor der Verfestigung leicht pumpbar ist. Heute wird meistens Bentonitzement oder, als Zusatz, Quarzsand verwendet. Die Erdwärmesonde selber ist ein Koaxial- oder U-Rohr aus Polyethylen. Als Wärmeträger dient meist Wasser mit einem Zusatz von 25-35 vol.% Frostschutzmittel. Dieser Wärmeträger wird durch den Wärmequellenkreislauf gepumpt, wobei er dem Erdreich Wärme entzieht. Dieser künstliche Entzug von Wärme aus dem Untergrund führt zu einer Störung des Wärmeregimes im Erdreich. Das Defizit muss durch natürlichen Wärmenachfluss (im wesentlichen aus Sonnenenergie und Erdwärme aus dem tieferen Untergrund) wieder ausgeglichen werden.

Nach Verlassen der Sonde gelangt der Wärmeträger in den Wärmepumpenkreislauf. Über einen Wärmetauscher wird die vom Wärmeträger aufgenommene Wärme an den Verdampfer abgegeben. Diese Energie wird in der Wärmepumpe durch Verdichtung auf ein für das Heizungssystem nutzbares Temperaturniveau gebracht. Dabei muss beachtet werden, dass das Verhältnis der gelieferten Heizenergie zur aufgewendeten elektrischen Energie (inkl. Pumpleistung) sinnvoll ist. Dieses Verhältnis nennt man die Jahresarbeitszahl (JAZ). Sie sollte einen Mindestwert von 3.0 erreichen.

Schlussendlich wird der heiße Wärmeträger in den Wärmenutzungskreislauf gepumpt, also in das Heizungssystem eines Gebäudes, wo er seine Wärme wieder abgibt, damit der Kreislauf wieder von neuem beginnen kann.

Es wird unterschieden zwischen der Nutzung oberflächennaher Erdwärme und geothermischer Energie aus tieferen Schichten. Eine Abgrenzung ist willkürlich und geht ursprünglich auf eine administrative Festlegung in der Schweiz zurück. Demnach wurde ein Wert von 400 m als Untergrenze der Nutzung der oberflächennahen Erdwärme festgelegt (KALTSCHMITT ET AL., 1999).

Die im oberflächennahen Bereich gespeicherte Energie kann durch eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken nutzbar gemacht werden. Dabei ist allen gemeinsam, dass die dem Erdreich entzogene Energie auf einem geringen Temperaturniveau von meist unter 20°C anfällt. Um diese Energie technisch sinnvoll zu nutzen, wird in der Regel, wie oben beschrieben, eine der Sonde nachgeschaltete Einrichtung zur Temperaturerhöhung benötigt.

Als Hilfsmittel zur Planung und Auslegung von Erdwärmesonden-Systemen werden oft numerische Simulationsprogramme eingesetzt. Drei dieser Programme werden in der Folge besprochen.

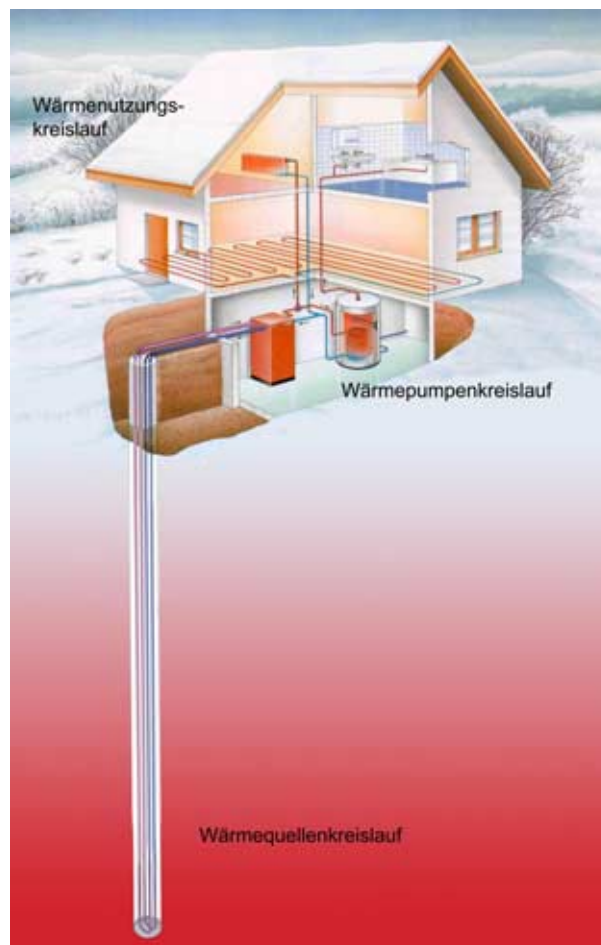


Abbildung 1: Prinzipschema einer Erdwärmesonden-Anlage (nach BAUMGARTNER, 1999).

## 1.4. Numerik

Bei der mathematischen Problemlösung physikalischer Prozesse wird unterschieden zwischen der analytischen und numerischen Lösung. Prozesse mit einfachen Rand- und Anfangsbedingungen und homogenen, isotropen Stoffeigenschaften können analytisch gelöst werden. In der Natur vorkommende komplexere praktische Probleme benötigen in der Regel eine numerische Lösung. In der Numerik wird unterschieden zwischen der Finite-Elemente-Methode (FE-Methode) und der Finite-Differenzen-Methode (FD-Methode). In dieser Arbeit kommen beide numerischen Verfahren zum Einsatz. Numerische Methoden, erzeugen diskrete Lösungen. Diese werden an ausgesuchten Punkten innerhalb des definierten Gebietes bestimmt. Um diese Punkte zu definieren, werden Gitter oder Netze erstellt. In Abhängigkeit von der numerischen Methode liegen die Berechnungspunkte in den Knoten, Seitenmittelpunkten oder Zellenmittelpunkten im Gitter.

Neben der räumlichen Diskretisierung muss bei instationärer Berechnung noch eine zeitliche Diskretisierung definiert werden. Diese beschränkt sich aber auf eine Dimension.

Das Programm EED rechnet nach dem Prinzip der dimensionslosen Antwortfunktion (g-Funktion) von ESKILSON (1987), welche in Kapitel 2.2.4 ausführlich beschrieben wird.

Sowohl mit den dimensionslosen Antwortfunktion sowie im Sondennahbereich numerisch mit der Finite-Differenzen-Methode rechnet das Erdwärmesonden-Simulationsprogramm EWS (HUBER & SCHULER, 1997). FD-Gitter bestehen aus rechteckigen oder quaderförmigen Zellen. Pro Gitterzelle wird der Mittelpunkt berechnet und zwischen den benachbarten Zellen die Differenzen gebildet. Je nach explizitem oder implizitem Ansatz wird für jeden Punkt eine Lösung berechnet oder ein Gleichungssystem gebildet. Über eine Matrixinversion wird das Gleichungssystem gelöst.

FRACTure basiert auf der Finite-Elemente-Methode (FE-Methode). FE-Gitter können Dreiecke, Vierecke, Prismen oder Tetraeder enthalten. Die Differentialgleichung wird nun diskretisiert, in Matrizenform umgeschrieben und in lokale Matrizen auf die einzelnen Elemente im Gitter reduziert. Durch Integration über die Gitterelemente werden die Lösungsvektoren bestimmt und in die globale Matrix und den globalen Lösungsvektor eingebaut.

## 2. Earth Energy Designer (EED)

### 2.1. Einleitung

EED ist ein Softwarepaket für PC mit DOS, das die Auslegung und Planung von Erdwärmesonden-Anlagen erleichtert. Das in Borland PASCAL geschriebene Programm ist sehr schnell und erlaubt somit, eine Vielzahl möglicher Anlageauslegungen in kurzer Zeit durchzurechnen.

Ende der 70er Jahre befasste sich eine Forschungsgruppe der Universität Lund in Schweden mit der Berechnung thermischer Vorgänge im Untergrund. In einem ersten umfangreichen numerischen Simulationsmodell wurden Erdwärmesonden oder Bohrlöcher als Erdreichwärmetauscher betrachtet (SANNER, 1996). Damit lässt sich die Temperaturentwicklung durch konduktiven Wärmetransport in der Umgebung des Bohrloches berechnen. Dieses Programm heisst SBM (Superposition Borehole Model), da es den Einfluss mehrerer Bohrlöcher verschiedener Anordnung überlagern kann. Die konduktive thermische Reaktion des Erdreichs lässt sich entsprechend der Geometrie der Bohrungsanordnung durch die sogenannten g-Funktionen beschreiben. Sie hängen vom Abstand der Bohrungen an der Erdoberfläche und der Bohrlochtiefe ab. Für den Fall von geneigten Bohrlöcher kommt noch der Neigungswinkel hinzu.

Darauf aufbauend war es möglich, PC-Programme zu entwickeln, welche die Berechnung der Temperaturen des Wärmeträgermediums einer erdgekoppelten Wärmepumpe erlauben, zum Beispiel TFSING und TFSTEP für stufenweisen Wärmeentzug.

Eine Kooperation der Universitäten Lund (Schweden) und Giessen (Deutschland) entwickelten ab Frühjahr 1992 eine neue Benutzeroberfläche für TFSTEP mit integrierter Datenbank für die erforderlichen Untergrund- und Materialparameter. Dieses Programm wurde 1994 unter dem Namen EED (Earth Energy Designer) vorgestellt.

Die Benutzeroberfläche von EED enthält Pull-Down-Menüs zur Eingabe der Parameter, Steuerung der Berechnung und Ausgabe. Mit der Optionstaste F4 kann der Benutzer aus den vorhandenen Datenbanken die geeigneten Parameter aussuchen. Die passende g-Funktion für die gegebene Sondenkonfiguration kann ausgewählt werden. Die Berechnung erfolgt in 12 einzelnen Wärmeentzugsschritten (jeden Monat einen Wärmeentzugsschritt). Eingegeben wird der mittlere monatliche Wärmeentzug bzw. Wärmeeintrag oder der jährliche Wärmeentzug/ Wärmeeintrag in MWh, der dann durch ein monatliches Lastprofil verteilt wird.

Das Programm errechnet bei gegebener Erdwärmesondenkonfiguration ein Temperaturprofil des Wärmeträgermediums über das Jahr. Für gegebene Minimal-/ Maximaltemperaturen errechnet es die erforderliche Erdwärmesondenlänge. Die wichtigsten Eigenschaften und Beschränkungen des Programmes sind in Tabelle 1 dargestellt. Das Output-File ist ein reines ASCII-File, und kann deshalb mit jedem Texteditor eingesehen und ausgedruckt werden. Die errechneten Temperaturdaten sind im Ausgabefile als Tabelle dargestellt, und können zur graphischen Darstellung in ein beliebiges Graphikprogramm kopiert werden.

Tabelle 1: Eigenschaften und Beschränkungen von EED

|   |   |
|---|---|
| Anzahl Bohrlochkonfigurationen  | 308   |
| Anzahl g-Funktionen   | 2465  |
| Erdwärmesonden-Typen  | Koaxialrohre, U-Rohre<br>(einfach, doppelt, dreifach) |
| mögliche Bohrlochtiefen   | 20-200 m  |
| Verhältnis Bohrtiefe B / Bohrlochabstand H                                  | $0.02 \leq (B/H) \leq 0.5$                            |
| Zeitintervall   | $-8.5 \leq \ln(t') \leq 3$                            |
| t' = dimensionslose Zeit<br>a = thermische Diffusivität (m <sup>2</sup> /s) | mit $t' = \frac{t}{t_s}$ und $t_s = \frac{H^2}{9a}$   |



## 2.2. Physikalische Grundlagen

### 2.2.1. Vereinfachungen und Annahmen

Die Temperatur an der Erdoberfläche variiert während eines Tages, eines Monats und eines Jahres relativ stark. Die Amplitude der Temperaturschwankung nimmt mit der Tiefe um  $e^{-z/d_p}$  ab (mit  $z$  = vertikale Koordinate und  $d_p$  = periodische Eindringtiefe). Die periodische Eindringtiefe  $d_p$  ist mit einigen Metern relativ klein und wird vernachlässigt. EED benützt die durchschnittliche Temperatur an der Erdoberfläche während eines Jahres als Randbedingung.

Der oberste Teil des Bohrloches bis zu einer Tiefe  $D$  wird als thermisch isoliert definiert. In der Praxis kann  $D$  als Grundwassertiefe oder als Tiefe einer Verschalung der Sonde angesehen werden. Der Wert von  $D$  ist typischerweise 4-5 m.

Der Untergrund zeigt häufig eine Stratifizierung. Da sich die thermische Leitfähigkeit  $\lambda$  für verschiedene Materialien ändert, wird sie zu einer Funktion der Tiefe:  $\lambda = \lambda'(z)$ . Die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit über die Tiefe des Wärmeentzuges ( $D < z < D+H$ ) ist:

$$\lambda = \frac{1}{H} \int_D^{D+H} \lambda'(z) dz \quad (1.1)$$

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit der Erde, [ $\lambda$ ] = W/(mK)

$D$  = Tiefe des thermisch isolierten oberen Teiles des Bohrloches, [ $D$ ] = m

$H$  = Länge des Bohrloches mit Wärmeaustausch, [ $H$ ] = m

$z$  : Tiefe [ $z$ ] = m

Nach Untersuchungen von CLAEISSON UND ESKILSON (1987) beträgt der Fehler der Differenz der Austrittstemperatur im homogenen Fall mit einem  $\lambda = 3.5$  W/(mK) verglichen mit zwei verschiedenen  $\lambda'$  von 2.5 und 4.5 W/(mK) weniger als 0.04 °C. Deshalb wird für EED-Berechnungen der Untergrund als homogen angenommen.

### 2.2.2. Der geothermische Gradient

Die durchschnittliche Temperatur an der Erdoberfläche kann, obwohl sie etwas höher ist, mit der mittleren jährlichen Lufttemperatur recht gut abgeschätzt werden. Die Temperatur in Abhängigkeit der Tiefe beträgt also:

$$T|_{t=0} = T_0 + G \cdot z \quad \text{wobei} \quad G = \left( \frac{q_{geo}}{\lambda} \right) \quad (1.2)$$

und

$$T|_{z=0} = T_0 \quad (1.3)$$

T : Temperatur im Boden, [T] = K

T<sub>0</sub> : Oberflächentemperatur, [T<sub>0</sub>] = K

G : Geothermischer Gradient, [G] = K/m

q<sub>geo</sub> : Geothermischer Wärmefluss, [q<sub>geo</sub>] = W/m<sup>2</sup>

Vereinfachend wird in EED mit der Ursprungstemperatur T<sub>om</sub> bei einer Tiefe z = (D+H)/2 gerechnet:

$$T_{om} = T_0 + G \cdot \left(\frac{D+H}{2}\right) \quad (1.4)$$

T<sub>om</sub> = ungestörte mittlere Temperatur, [T<sub>om</sub>] = K

Die Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten mit eingesetzter Untergrundtemperatur T(r,z,t) lautet:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1.5)$$

a : K/(ρc) = thermische Diffusivität

r : radiale Distanz vom Bohrlochzentrum, [r] = m

### 2.2.3. Randbedingungen am Bohrloch

Der oberste Teil des Bohrloches bis zur Tiefe D soll thermisch isoliert sein. Der Wärmefluss durch diesen kurzen Teil der Sonde wird vernachlässigt. Die Ableitung nach r wird Null:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = r_b, \quad 0 < z < D \quad (1.6)$$

r<sub>b</sub> : Bohrlochradius, [r<sub>b</sub>] = m

Für den wichtigeren Teil der Sonde (D < z < D+H) gilt für eine konstante Temperatur T<sub>b</sub>(t) entlang der Bohrlochwand:

$$T(r_b, z, t) = T_b(t) \quad D < z < D+H \quad (1.7)$$

T<sub>b</sub>: Temperatur entlang der Bohrlochwand, [T<sub>b</sub>] = K

Die Berechnungen der komplexen Temperaturverhältnisse einer Erdwärmesonde mit nur einer Temperatur entlang der Bohrlochwand mag für untiefe Sonden genügen. Ob eine solche Vereinfachung für die Simulation tiefer Erdwärmesonden wie Weissbad noch realistische Resultate liefert, soll untersucht werden. Diese Reduktion der Temperaturverhältnisse in der Erde ist der Hauptgrund, warum die Autoren dieses Programmes die mögliche berechenbare Bohrlochtiefe auf 200 m beschränken.

#### 2.2.4. Der Wärmeentzugsschritt

Der durchschnittliche Wärmeentzug pro Meter Bohrloch (W/m) wird durch  $\Phi$  gegeben:

$$\Phi = \frac{dT}{dr} \lambda \quad (1.8)$$

dT: Temperaturabsenkung, [dT] = K

Und somit erhält man für q(t):

$$q(t) = \frac{1}{H} \int_D^{D+H} 2\pi r_b \cdot \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_b} dz \quad (1.9)$$

q(t) : Wärmeentzugsrate, [q(t)] = W/m

Die Wärmeentzugsrate ist positiv während Perioden von Wärmeentzug und negativ während Wärmezuführungsperioden in den Boden.

Der Wärmeentzug q(t) (Gleichung 1.8) ist eine Funktion der Zeit. Der einfachste Fall ist eine konstante Wärmeentzugsrate  $q_1$  (W/m) beginnend bei  $t = 0$ . Dieser Wärmeentzugsschritt kann mit der Heavyside'schen Sprungfunktion He beschrieben werden:

$$q(t) = q_1 \cdot He(t) \quad \text{mit} \quad He(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

Die Bohrlochtemperatur  $T_b$  (Gleichung 1.7) kann nun folgendermassen geschrieben werden:

$$T_b(t) = T_{om} - q_1 \cdot R_q \quad \text{mit} \quad R_q = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot g(t/t_s, \dots) \quad (1.11)$$

$R_q$  : zeitabhängiger thermischer Widerstand des Bohrloches für ein Wärmeentzugsschritt, [ $R_q$ ] = (K m)/W

$g(t/t_s, \dots)$  : Antwortfunktion, dimensionslos

$q_1$ : konstante Wärmeentzugsrate, [ $q_1$ ] = W/m

$t_s$ : Sondenzeitkonstante, [ $t_s$ ] = s

### 2.2.5. Die dimensionslose Sprungantwort (g-Funktion)

Der thermische Einfluss zwischen verschiedenen Bohrlöcher hat Langzeitcharakter. Er ist im ersten Jahr vernachlässigbar, wenn der Abstand zwischen den Bohrlöcher 10 m übersteigt. Die jährlichen Variationen nehmen mit dieser Distanz stark ab. Allgemein können Bohrlöcher im Abstand  $B > H$  als voneinander unabhängig betrachtet werden, während der Einfluss für eine Distanz von  $H > B > H/2$  klein ist. Wichtig ist hingegen die jährliche Durchflussrate der Sole für die einzelnen Sonden. Die dimensionslose Antwortfunktion  $g$  beinhaltet Informationen über den thermischen Einfluss zwischen den Bohrlöchern verschiedener Anordnung.

Einzelsonden wie auch Sondenfelder weisen bei geometrischer Ähnlichkeit auch vergleichbare Temperatur-Sprungantwortfunktionen (g-Funktionen) auf.

Diese dimensionslose Antwortfunktion  $g$  auf den Wärmeentzugsschritt hängt von der dimensionslosen Zeit  $t' = t/t_s$  für Einzelsonden und Sondenfelder ab.  $t'$  und  $t_s$  sind folgendermassen definiert:

$$t' = \frac{t}{t_s} \quad (1.12)$$

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \quad (1.13)$$

$t'$  : Zeit, dimensionslos

Nach ESKILSON (1987) kann bis zum Zeitpunkt  $t = t_s$ , also  $t' = 1$ , die vertikale Wärmeleitung im Erdreich (bei einem maximalen Fehler von 7% für eine Einzelsonde) vernachlässigt werden. Ungefähr ab  $t' = 10$  ist der Gleichgewichtszustand im Erdreich beinahe wieder hergestellt. Im Gleichgewichtszustand fließt im Jahresdurchschnitt die gleiche Energiemenge, die mit der Sonde dem Erdreich entzogen wird, durch den natürlichen Wärmefluss horizontal wieder nach. Somit findet keine weitere Auskühlung mehr statt. Für eine 115 m tiefe Sonde ist dieser Gleichgewichtszustand ungefähr nach 260 Jahren erreicht.

Nun kann die dimensionslose Temperatursprungantwort  $g$  definiert werden:

$$g\left(t', \frac{r_b}{H}\right) = \frac{dT \cdot 2\pi\lambda}{\Phi} \quad (1.14)$$

Damit ist also die Temperatursprungantwort sowohl für Einzelsonden wie auch für Sondenfelder nur eine Funktion der dimensionslosen Zeit  $t'$  und von  $r_b/H$ . Für eine Einzelsonde im Bereich  $5r_b^2/a < t < t_s$  kann  $g$  bei einem maximalen Fehler von 7% (HUBER & PAHUD, 1999) angenähert werden:

$$g(t', \frac{r_b}{H}) = \ln(\frac{H}{2r_b}) + 0.5 \ln(t') \quad (1.15)$$

Für Zeiten grösser als die Sondenzeitkonstante  $t_s$  strebt die Einzelsonde einem Gleichgewichtszustand zu:

$$g(\frac{r_b}{H}) = \ln(\frac{H}{2r_b}) \quad (1.16)$$

Für die Abhängigkeit der  $g$ -Funktion vom Sondenabstand  $r_m$  gilt der folgende logarithmische Zusammenhang:

$$g(t_s, r_m/H) = g(t_s, r_b/H) - \ln(r_m/r_b) \quad (1.17)$$

Mit den verschiedenen  $g$ -Funktionen können also verschiedene Sondentypen (Koaxialsonde, U-Sonde usw.) und Sondenauslagen modelliert werden.

Berechnungen und Simulationen der thermischen Einflüsse für verschiedene Sondenauslagen mittels  $g$ -Funktionen sind in ESKILSON (1987) nachzulesen.

### 2.2.6. Modellierung der Fluidtemperatur

Vereinfachend wird hier mit einer gleichförmigen Bodentemperatur gerechnet (1.4). Die Berechnungen mit diesem vereinfachten Modell ergaben gute Übereinstimmungen verglichen mit aufwendigeren numerischen Modellen mit variablen Temperaturen (ESKILSON, 1987). Die vereinfachten Formeln können also ohne Einschränkungen verwendet werden. Die Einlass- und Auslasstemperaturen des Fluides können folgendermassen berechnet werden:

$$T_{f,in} = T_f - \frac{qH}{2c_f \rho_f V_f} \quad (1.18)$$

$$T_{f,out} = T_f + \frac{qH}{2c_f \rho_f V_f} \quad (1.19)$$

$T_f$  : durchschnittliche Fluidtemperatur,  $[T_f] = K$

$T_{f,in}$  : Einlasstemperatur des Fluids in die Sonde,  $[T_{f,in}] = K$

$T_{f,out}$  : Auslasstemperatur des Fluides aus der Sonde,  $[T_{f,out}] = K$

$V_f$  : Pumprate,  $[V_f] = m^3/s$

$c_f$  : Spezifische Wärmekapazität des Fluides,  $[c_f] = J/(Kg \cdot K)$

$\rho_f$  : Dichte des Fluides,  $[\rho_f] = kg/m^3$

Für den Fall einer einzigen Temperatur  $T_f$  des Fluides gilt die Relation aus der Gleichung (1.11), wobei die Fluidtemperatur die Temperatur des Bohrloches annimmt:

$$T_b - T_f = q \cdot R_q \quad (1.20)$$

Die Temperatur  $T_f$  des Fluids verändert sich aber mit der Zeit. Dies kann durch ein modifizierter thermischer Widerstand  $R_q'$  beschrieben werden:

$$T_b(t) - T_f(t) = q(t) \cdot R_q' \quad (1.21)$$

mit

$$R_q' = \frac{1}{2\pi\lambda} \left\{ \ln(\sqrt{4at/r_b}) - \frac{\gamma}{2} \right\} \quad (1.22)$$

$\gamma$  : Eulersche Konstante = 0.5772

Die Wärmeentzugsrate  $q(t)$  und die Temperatur  $T_b(t)$  sind Durchschnittswerte entlang des Bohrloches. Das Verhältnis  $R_q'/R_q$  hängt von der Pumprate  $V_f$  und vom thermischen Widerstand des Wärmeflusskreislaufes ab. Numerische Experimente zeigen, dass der Unterschied zwischen  $R_q$  und  $R_q'$  für normale Anwendungen kleiner als 10% ist. In diesen Fällen kann  $R_q$  anstelle von  $R_q'$  benutzt werden.

## 2.3. Benutzungsschritte für EED

### 2.3.1. Allgemeine Informationen

Nach dem Aufstarten von EED ist der Eröffnungsbildschirm zu sehen (Abb.2). Die Beispiele in dieser Arbeit wurden mit der Version 990211 durchgeführt.

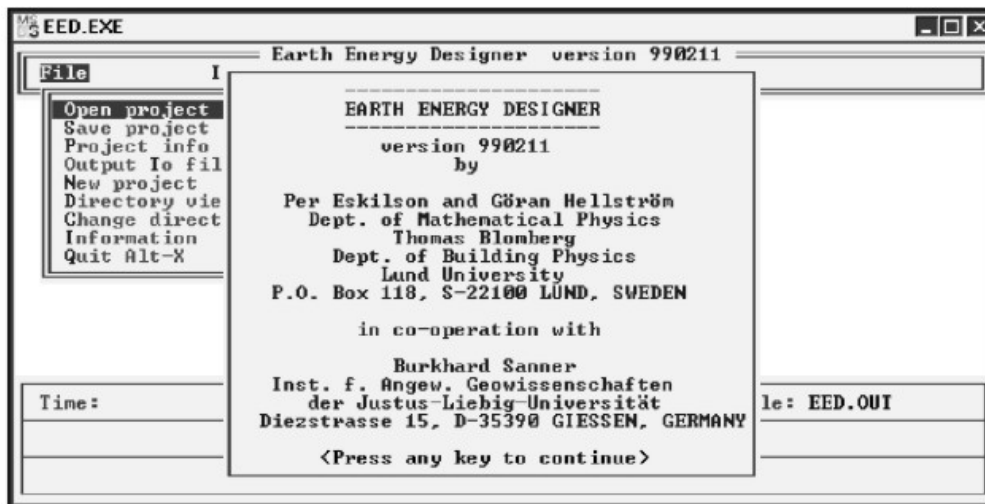


Abbildung 2: Eröffnungsbildschirm von EED.

Die Eingabeparameter werden in die verschiedenen Menü-Fenster geschrieben, wobei die Werte direkt aus einer Datenbank übernommen werden können. Die zur Verfügung stehenden Datenbanken sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Eingabedatensätze werden als „.dat“ – Files gespeichert und können für weitere Simulationen benutzt werden.

Tabelle 2: Datenbanken für EED

| GEGENSTAND        | DATEN                          | NAME         |      |
|-------------------|--------------------------------|--------------|------|
| Standort          | mittlere Oberflächentemperatur | surftemp.txt | noch |
|                   | geothermischer Wärmefluss      |              | grob |
| Gestein           | Wärmeleitfähigkeit             | cond.txt     |      |
|                   | spez. Wärmekapazität           | heatcap.txt  |      |
| Erdwärmesonden    | Material für Rohre             | pipe.txt     |      |
|                   | gängige Bohrdurchmesser        | borediam.txt |      |
| Bohrlochfüllung   | Wärmeleitfähigkeit             | fillcond.txt |      |
| Wärmeträgermedium |                                | hcdat.txt    |      |
| g-Funktionen      | mögliche Konfigurationen       | gfunc.txt    |      |

### 2.3.2. Das „File“-Menü

Das File-Menü erlaubt alle wichtigen File-Operationen wie Öffnen und Sichern eines Projektes, Erstellen eines neuen Output-Files („Output to File...“) oder eines neuen Projektes („New Project“) und der Ausstieg aus dem Programm. Mit den Menüs „Directory“ und „Change Directory“ können Ordner erstellt bzw. gewechselt werden. Daneben ist hier das Untermenü „Project Info“ zu finden, in welches die wichtigsten Daten des aktuellen Projektes eingeschrieben werden können.

### 2.3.3. Beschreibung der Eingabeparameter

Im „Input“- Menü wird „Ground Properties“ aufgerufen. Hier lassen sich die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische volumetrische Wärmekapazität, die mittlere Oberflächentemperatur und der geothermische Wärmefluss des Untergrundes festlegen. Wie oben bereits erwähnt, können jeweils typische Werte für die Gesteine oder die Regionen mit der Funktionstaste F4 aus den Datenbanken aufgerufen werden. Für das gewählte Gestein (z.B. Gabbro, Gneis, Peridotit etc.) werden jeweils die maximalen und minimalen Leitfähigkeitswerte sowie ein vorgeschlagener repräsentativer Rechenwert angezeigt. Daraus kann nun ein Wert ausgewählt werden.

Im nächsten Untermenü „Borehole and Heat Exchanger“ wird der Sondentyp bestimmt. Zur Verfügung stehen Koaxial-, Single-U-, Double-U- oder Tripple-U-Sonden. Nach Auswahl des Sondentypes wird die Bohrlochanordnung und die Sondenparameter angegeben. Zusätzlich muss in diesem Untermenü noch die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung und die volumetrische Fließrate des Fluides spezifiziert werden. Ein spezieller Punkt ist der thermische Kontaktwiderstand zwischen Sonde und Hinterfüllung („Contact res. Pipe/Filling“). Dieser Wert hängt von der Qualität der Einfüllung des Hinterfüllungsmaterials ab. Wird die Hinterfüllung von unten nach oben eingebracht, damit alle Luft entweichen kann, ist der Wert 0.0 mK/W möglich. Ansonsten wird ein Wert von 0.01 bis 0.03 mK/W eingefügt.

Im Menü „Borehole Thermal Resistance“ wird der Benutzer gefragt, ob er die Werte vom Programm berechnen lassen möchte oder ob eigene Werte eingegeben werden. Wenn die Werte von früheren Berechnungen her bekannt sind können diese eingesetzt werden, sonst ist die Berechnung durch den PC vorzuziehen. Das Programm benutzt eine analytische Lösung welche ein exaktes Ergebnis des zweidimensionalen Wärmeleitungsproblems in einer Ebene quer zur Bohrlochachse liefert. Die Lösung besteht aus einer unbegrenzten Folge von Multipolen von schnell abnehmender Stärke und Einfluss. Die Genauigkeit der Lösung hängt davon ab, wie viele Multipole der unendlichen Folge berechnet werden. Meistens liefern vier berechnete Multipole genug exakte Resultate, mehr erhöhen die Berechnungszeit unnötig. Im Untermenü



„Account for Internal Heat Transfer“ soll entschieden werden, ob es ein Wärmeaustausch zwischen den individuellen Sonden geben soll oder nicht.

Die Parameter für das Fluid werden im Menü „Heat Carrier Fluid“ eingesetzt. Zu spezifizieren ist die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität, die Dichte, die Viskosität und der Gefrierpunkt der Sole. Auch hier kann eine Flüssigkeit mit einer bestimmten Temperatur aus den Datenfiles ausgewählt werden.

Nun soll noch das Lastprofil definiert werden. Im Menü „Base Load“ kann entweder die gesamte Heizarbeit (oder Kühlung) pro Jahr (Leistung des Wärmereizgerers mal Vollaststunden) eingegeben und diese prozentual auf die Monate verteilt werden („Annual Energy & Monthly Profile“). Oder die monatliche Heizarbeit oder Kühlarbeit wird direkt in MWh für jeden Monat eingegeben („Monthly Energy Values“). Die erste Methode ist schnell und für kleinere Erdwärmesonden gedacht, während die zweite Methode das Modellieren eines spezifischen Lastprofils unabhängig von den Jahreszeiten erlaubt, zum Beispiel für das Aufheizen von Wasser im Sommer.

Das Eingabefenster vom Menü „Annual Energy & Monthly Profile“ ist in drei Kolonnen eingeteilt: „Heat“, „Cool“ und „Ground“. In die erste Kolonne „Heat“ wird die jährliche Last in MWh eingegeben. Unter „Cool“ soll der Jährliche Kühllast definiert werden. In wärmeren Regionen ist diese oft Null. Die nächste Zeile spezifiziert den SPF (seasonal performance factor), also die Jahresarbeitszahl (JAZ). Dieser SPF-Faktor ist nur einzugeben, falls die für die Berechnung benützten Energiewerte beim Austritt aus der Wärmepumpe aufgezeichnet wurden. Das Programm verringert nun die Energiewerte gemäss dem SPF-Faktor, da hier nur die Energie interessiert, die direkt aus dem Boden gewonnen wird. Die so berechneten Werte werden automatisch in die Kolonne „Ground“ geschrieben, die nicht verändert werden kann. Wenn die Energiewerte direkt nach dem Austritt des Fluides aus der Sonde aufgezeichnet wurden (ohne Einfluss der Wärmepumpe), muss ohne SPF-Faktor gerechnet werden. In diesem Falle wird  $SPF=10'000$  eingegeben. Das Programm verändert dann den Jahresenergiewert nicht, und schreibt die Daten ohne Korrektur in die „Ground“-Kolonne. Nun wird für jeden Monat den Anteil des jährlichen Energiewertes festgelegt. Die Anteile werden so bestimmt, dass die Summe aller monatlichen Anteile eins ergibt.

Das Fenster vom Menü „Monthly Energy Values“ ist genau gleich aufgebaut, ausser dass kein jährliches Lastprofil definiert wird und für die einzelnen Monate die Last in MWh eingegeben werden muss.

Das Menü „Peak Load“ enthält die Untermenüs „Peak Heat Load“ und „Peak Cool Load“. Für jeden Monat kann hier die maximale Last (maximale Leistung der Wärmepumpe) und ihre kontinuierliche Dauer definiert werden. Die „Peak Loads“ werden benutzt, um die maximal

möglichen Temperaturvariationen zu berechnen. Der Wärmeentzug (oder Wärmeeintrag) entsprechend zum Peak wird zur Basislast am Ende jeden Monats dazugerechnet, und die resultierenden Fluidtemperaturen berechnet. In Abbildung 3 ist die Basislast mit den entsprechenden Peaks dargestellt.

Der letzte Punkt im „Input“-Menü ist die Definition der Simulationsdauer der Erdwärmesonde. Ebenfalls ein wichtiger Punkt ist der Startpunkt der Simulation, der im Untermenü „First Month of Operation“ festgelegt wird. Wenn zum Beispiel der Monat November als Startpunkt eingegeben wird, beginnt das erste Jahr für das Programm erst im November. Das wahre erste volle Betriebsjahr wird also von EED als 2. Betriebsjahr bezeichnet. EED berechnet die Temperaturverläufe für die beiden ersten Jahre, das mittlere und das letzte Jahr des angegebenen Zeitraumes.

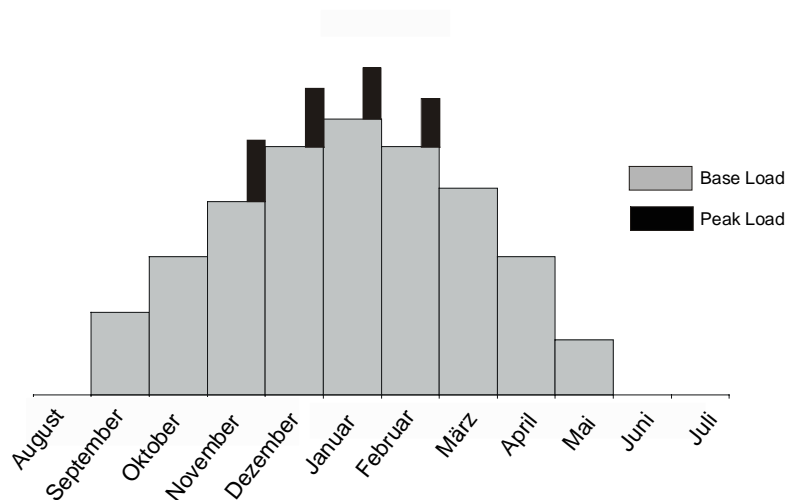


Abbildung 3: Beispiel eines Lastdiagrammes für eine Sonde mit Winterbetrieb.

### 2.3.4. Durchführung der Berechnungsschritte von EED

Die Berechnungen werden im Menü „Solve“ durchgeführt. EED bietet zwei Alternativen, nämlich die Berechnung der mittleren Fluidtemperatur („Mean Fluid Temperatures“) einer bestehenden Anlage, oder die Berechnung der benötigten Bohrlochlänge um die Fluidtemperatur innerhalb vorgegebenen Grenzen zu halten.

Bei der Berechnung der Fluidtemperatur kann die Warnung erscheinen, dass die erreichte Reynold's Zahl zu klein ist, und damit der Fluss nicht turbulent ist. Dadurch ist die Wärmeübertragung von der Rohrwand zum Fluid schlecht. Eine Reynold's Zahl von  $>2300$  ist wünschenswert. Die Berechnungen können aber auch mit kleineren Zahlen durchgeführt werden. Wenn die Fluidtemperaturen unter den Gefrierpunkt fallen, wird eine Warnmeldung angezeigt.

Für die Bestimmung der benötigten Sondenlänge werden wird diese Berechnung, ausgehend von der vom Benutzer eingegebenen Bohrlochkonfiguration und –länge automatisch so lange wiederholt, bis die gewünschten Temperaturen nicht mehr unter- bzw. überschritten werden.

### **2.3.5. Resultate**

Nach der Berechnung können die Resultate im „Output“-Menü eingesehen werden. Mit „View Design Data“ können die eingegebenen Parameter und die Resultate dargestellt, und in „Print Design Data“ ausgedruckt werden. Eine graphische Darstellung erhält man in „Plot Fluid Temperatures“ und in „Plot Min-Max Temperatures“.

Während der Anwendung hat sich allerdings gezeigt, dass das „Output“-File (\*.out) vorzugsweise mit einem Texteditor (z.B. TextPad) geöffnet wird. Das ausdrucken geht schneller, und die in Tabellen dargestellten Resultate können markiert und in ein Visualisierungsprogramm (z.B. Excel oder TECPLOT) kopiert und professionell dargestellt werden.

## 3. Simulation der Erdwärmesonde Weissbad mit EED

### 3.1. Einleitung

#### 3.1.1. Die Erdwärme-Tiefensonde Weissbad

Beim Bau des Kurhotels „Hof Weissbad“ im Jahre 1993, beabsichtigte die Hof Weissbad AG, mit einer Tiefbohrung auf 1618 m Wasser für die betriebliche Nutzung des Kurhotels zu finden. Die Bohrung verlief in Bezug auf Wasser negativ, da die durchfahrenen Gesteine der Unteren Meeresmolasse und der Unteren Süsswassermolasse hauptsächlich impermeabel sind. Im Folgenden wurde entschieden, das trockene Bohrloch bis auf 1200 m aufzufüllen und darüber ein Koaxialrohr einzubauen, um die Erdwärme mittels einer Wärmepumpe (Wasser/Wasser) für Wärmezwecke zu nutzen. Die Sonde ist in Abbildung 4 dargestellt. Die weissen Pfeile geben die Fliessrichtung des Fluides an. Die verschiedenen Bohrdurchmesser sind in Inches angegeben. An der Anlage angeschlossen sind zwei „Heliotherm“ Wärmepumpen.

Gemäss einer von Geologen erstellten Prognose sollten die Austrittstemperaturen des Fluids aus der Sonde 15°C betragen (OEKOPLAN AG, 1998). Die Messdaten der Firma Oekoplan AG im Zeitraum vom 8.11.1996 bis zum 7.11.1998 zeigen aber nur eine durchschnittliche Temperatur von 10.6°C im ersten Jahr, bzw. 10.0°C im zweiten Jahr. Die Messdaten sind im Anhang aufgeführt.

#### 3.1.2. Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Kapitels ist die Modellierung der Tiefensonde Weissbad mit Earth Energy Designer (EED), hier Modellierung 1 genannt, um die Abweichung zwischen der Prognose und den Messwerten zu erklären. Dazu sollen die errechneten Werte mit den Messwerten verglichen werden, und bei allfälligen Abweichungen die Sonde mit veränderten Parametern in einer Modellierung 2 neu simuliert werden. Die Messwerte geben die Temperatur des Fluids beim Austritt aus der Sonde an.

Die Sonde Weissbad wurde bereits von M. Salton (SALTON, 1999) mit dem Finite-Elemente-Programm FRACTure (KOHL, 1992) modelliert. Die Simulationen mit EED sollen mit denjenigen von FRACTure verglichen werden.

Da EED eigentlich nur für bis zu 200 m tiefe Sonden gemacht wurde, werden die Resultate Aufschluss darüber geben, ob die Software auch für tiefere Sonden eingesetzt werden kann.

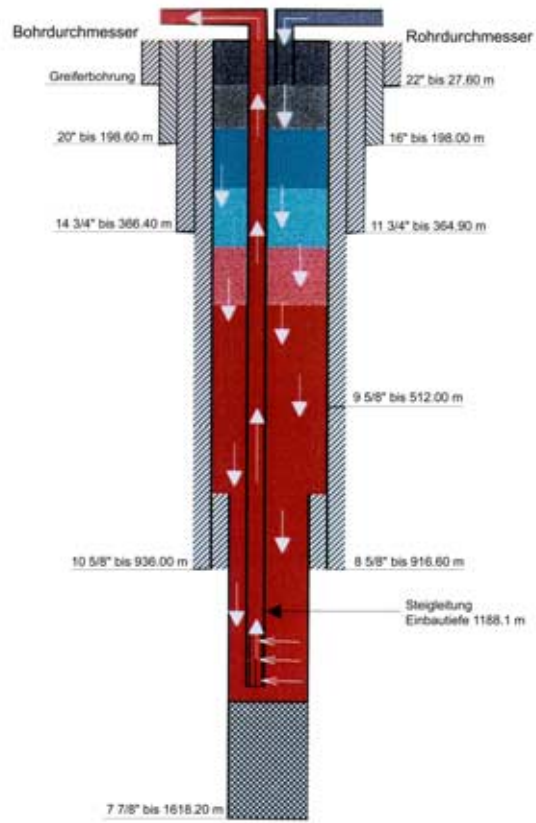


Abbildung 4: Endausbau der Tiefenerdwärmesonde Weissbad (nach OEKOPLAN AG, 1998).

## 3.2. Modellierung 1

### 3.2.1. Eingabeparameter

Bei der Modellierung 1 sollen die Grundparameter aus der Diplomarbeit von M. Salton (SALTON 1999) verwendet werden, die zur Modellierung mit dem Programm FRACTure verwendet wurden. Anschliessend werden die beiden Modelle verglichen.

Mit der Simulation soll zudem getestet werden, ob mit EED tiefe Erdwärmesonden bis 1200 m berechnet werden können, oder ob sich das Einsatzgebiet wie von den Autoren beschrieben auf 200 m Sondentiefe beschränkt. Dazu soll ein Vergleich mit dem in Kapitel 4 besprochenen Erdwärmesonden-Simulationsprogramm EWS durchgeführt werden. Das Programm EWS kann aufgrund der Simulation mehrerer Erdschichten Sonden bis 1500 m Tiefe berechnen.

Für die Untergrundparameter werden Durchschnittswerte der Region Weissbad verwendet. Diese für die Modellierung 1 benutzten „Ground“-Parameter sind in der nachfolgender Tabelle 3 dargestellt. Da der Untergrund homogen modelliert werden muss, sind Durchschnittswerte für die einzelnen Parameter einzusetzen.

Tabelle 3: Untergrundwerte für die Modellierung 1.

|                     |                                   |                                       |
|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| UNTERGRUNDPARAMETER | • Wärmeleitfähigkeit:             | 2.500 W/(mK)                          |
|                     | • Wärmekapazität:                 | $2.5 \cdot 10^6$ J/(m <sup>3</sup> K) |
|                     | • mittlere Oberflächentemperatur: | 9.00 °C                               |
|                     | • Wärmefluss:                     | $7.5 \cdot 10^{-2}$ W/m <sup>2</sup>  |

Ferner wird eine Koaxialsonde untersucht. Da in diesem Falle nur ein einzelnes Bohrloch betrachtet wird, wird die Bohrlochkonfiguration Nr. 1 (single) gewählt. Für die Werte des Bohrdurchmessers und der Verrohrung müssen wiederum Durchschnittswerte verwendet werden. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 4 aufgeführt. Für den Kontaktwiderstand äussere Verrohrung/Untergrund wurde in dieser ersten Berechnung der Wert 0.000 (m·K)/W eingesetzt. Dies bedeutet, dass ein optimaler Kontakt ohne Lufteinschlüsse erreicht wurde, was bei einer 1200 m langen Sonde wahrscheinlich nur schwer realisierbar ist.

Tabelle 4: Bohrlochparameter für die Modellierung 1.

|                   |  |                            |
|-------------------|--|----------------------------|
| BOHRLOCHPARAMETER | • Bohrlochtiefe:                                   | $1.2 \cdot 10^{+3}$ m      |
|                   | • Bohrlochdurchmesser:                             | $3.09 \cdot 10^{-1}$ m     |
|                   | • Durchmesser innere Verrohrung:                   | $7.5 \cdot 10^{-2}$ m      |
|                   | • Wanddicke innere Verrohrung:                     | $1.0 \cdot 10^{-2}$ m      |
|                   | • Wärmeleitfähigkeit innere Verrohrung:            | $4.5 \cdot 10^{+1}$ W/(mK) |
|                   | • Durchmesser äussere Verrohrung:                  | $2.45 \cdot 10^{-1}$ m     |
|                   | • Wanddicke äussere Verrohrung:                    | $1.0 \cdot 10^{-2}$ m      |
|                   | • Wärmeleitfähigkeit äussere Verrohrung:           | $4.5 \cdot 10^{+1}$ W/mK   |
|                   | • Kontaktwiderstand äussere Verrohrung/Untergrund: | 0.000 (m·K)/W              |

Der Wärmewiderstand im Bohrloch wurde durch das Programm berechnet. Der interne Wärmetransport zwischen den Fließrichtungen ist erwünscht.

Als Fluid wurde in Weissbad Wasser verwendet. Die für die Berechnung benötigten Werte konnten aus den Datenfiles von EED bezogen werden (Wasser, 10°C). Die zur Verfügung gestellten Werte sind in der Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Fluidparameter für die Berechnung 1.

|                |                               |                                       |
|----------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| FLUIDPARAMETER | • Wärmeleitfähigkeit:         | $5.72 \cdot 10^{-1}$ W/(mK)           |
|                | • Spezifische Wärmekapazität: | $4.202 \cdot 10^{+3}$ J/KgK           |
|                | • Dichte:                     | $1 \cdot 10^{+3}$ Kg/m <sup>3</sup>   |
|                | • Viskosität:                 | $1.52 \cdot 10^{-3}$ Kg/ms            |
|                | • Gefrierpunkt:               | 0.0 °C                                |
|                | • Fließrate:                  | $2.9 \cdot 10^{-3}$ m <sup>3</sup> /s |

Die verwendeten Energiewerte für die Eingabe in „Base Heat Load“ wurden aus der Tabelle der Firma Oekoplan AG herausgelesen (Anhang A) und über jeweils einen Monat gemittelt. In der Tabelle 6 sind diese Energiewerte dargestellt und zusätzlich als Vergleich die notwendige Menge Öl in Tonnen, um die entsprechende Energie zu produzieren. Es wurde die Kolonne „Wärmegewinnung“ benutzt, also die Messwerte direkt nach der Erdwärmesonde. Aus diesem Grund musste keine JAZ-Zahl benutzt werden, der eingefüllte Wert in das SPF-Feld betrug also 10'000. Es wurde kein „Base Cool Load“ und kein „Peak Load“ angegeben.

Tabelle 6: Durchschnittliche monatliche Energiewerte für die Berechnung 1 und die notwendige Menge Öl, um die gleiche Energie zu produzieren.

| MONAT        | ENERGIEWERTE           | MENGE ÖL             |
|--------------|------------------------|----------------------|
| November 96  | $2.793 \cdot 10^4$ kWh | $2.394 \cdot 10^3$ t |
| Dezember 96  | $2.948 \cdot 10^4$ kWh | $2.527 \cdot 10^3$ t |
| Januar 97    | $3.068 \cdot 10^4$ kWh | $2.630 \cdot 10^3$ t |
| Februar 97   | $2.105 \cdot 10^4$ kWh | $1.804 \cdot 10^3$ t |
| März 97      | $2.071 \cdot 10^4$ kWh | $1.775 \cdot 10^3$ t |
| April 97     | $2.564 \cdot 10^4$ kWh | $2.198 \cdot 10^3$ t |
| Mai 97       | $2.333 \cdot 10^4$ kWh | $2.000 \cdot 10^3$ t |
| Juni 97      | $1.241 \cdot 10^4$ kWh | $1.064 \cdot 10^3$ t |
| Juli 97      | $1.095 \cdot 10^4$ kWh | $9.334 \cdot 10^2$ t |
| August 97    | $1.089 \cdot 10^4$ kWh | $9.334 \cdot 10^2$ t |
| September 97 | $1.675 \cdot 10^4$ kWh | $1.436 \cdot 10^3$ t |
| Oktober 97   | $2.489 \cdot 10^4$ kWh | $2.133 \cdot 10^3$ t |

Die Simulationsperiode wurde auf drei Jahre festgelegt, der erste Monat des Betriebes ist der November.

### 3.2.2. Resultate

Das Output-File von EED wurde im Texteditorprogramm „TextPad“ geöffnet, die Resultate ins Tabellenkalkulationsprogramm „Excel“ kopiert und in einem Diagramm dargestellt. In der Abbildung 5 sind die Messwerte von Oekoplan AG vom November 1996 bis Oktober 1998 zusammen mit den Simulationen von EED im ersten und im zweiten Jahr geplottet. Die Kurven zeigen zwar einen ähnlichen Verlauf, das Modell liegt aber um 8 bis 10°C zu hoch. Zu hohe Werte konnten erwartet werden, da die Parameter im Modell ideale Bedingungen repräsentieren. Vor allem die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ist mit grosser Unsicherheit behaftet. Auswertungen der Bohrung in Weissbad haben ergeben, dass das Gestein praktisch impermeabel ist. Dadurch könnte der Wärmeleitfähigkeitswert des Gesteins mit unter dem Durchschnitt der Region liegen.



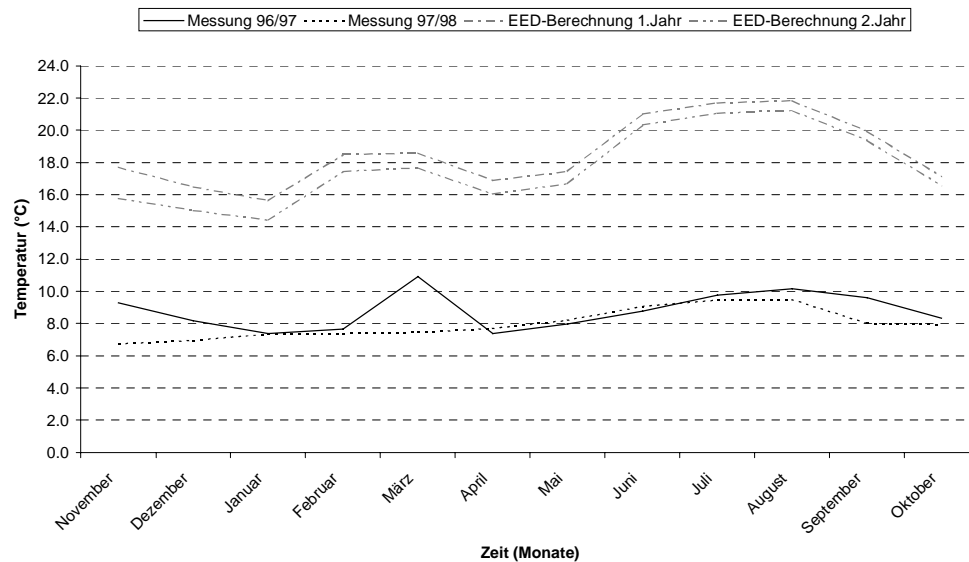


Abbildung 5: Modellierung 1 der Erdwärmesonde Weissbad.

In der Abbildung 6 sind die EED-Berechnungen mit den FRACTure-Resultaten von M. Salton verglichen (SALTON, 1999). Mit beiden Programmen wurden dieselben Untergrund- und Fluidparameter verwendet. Die Simulation mit EED liegt um 4 bis 8° C über den Werten der FRACTure-Simulation. Zudem entspricht der Kurvenverlauf der mit FRACTure berechneten Kurve sehr genau der Messkurve (Abbildung 6), während der Kurvenverlauf der EED-Berechnung nur den Trend der Messkurve widerspiegelt. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da in FRACTure mit den Einlasstemperaturen des Fluides in die Sonde gerechnet wurde um die Auslasstemperaturen aus der Sonde zu modellierten. Damit sind natürlich kleine Temperaturschwankungen des Fluides viel besser berücksichtigt, als wenn mit reinen Energiewerten gerechnet wird. Die Einlasstemperaturen des Fluides hängen vor allem von den Ruhephasen der Erdwärmesonde ab. Da das Sondensystem einen Fluidkreislauf bildet, wird das Fluid nach verlassen der Wärmepumpe in das Heizungssystem des Verbrauchers gepumpt, kühlt dort ab, und fließt danach wieder zurück in die Sonde. Wird die Sonde nun abgeschaltet, erwärmt sich das Wasser in der Wärmepumpe weiter, da noch Restwärme vorhanden ist. Dieses Wasser ist bei Eintritt in die Sonde wärmer als normal, also ist auch die Austrittstemperatur aus der Sonde um einige Grade erhöht. Dieser Effekt führt zum Peak im Monat März. Der Peak wird durch die Simulation über die Einlasstemperaturen viel exakter abgebildet als über die Energiewerte.

Zusätzlich wurden für die EED-Simulation die monatlichen Mittel der Energiewerte verwendet. In FRACTure hingegen wurden alle Messungen in die Simulation miteinbezogen, was natürlich eine bessere Anpassung an die Messwerte bringt.

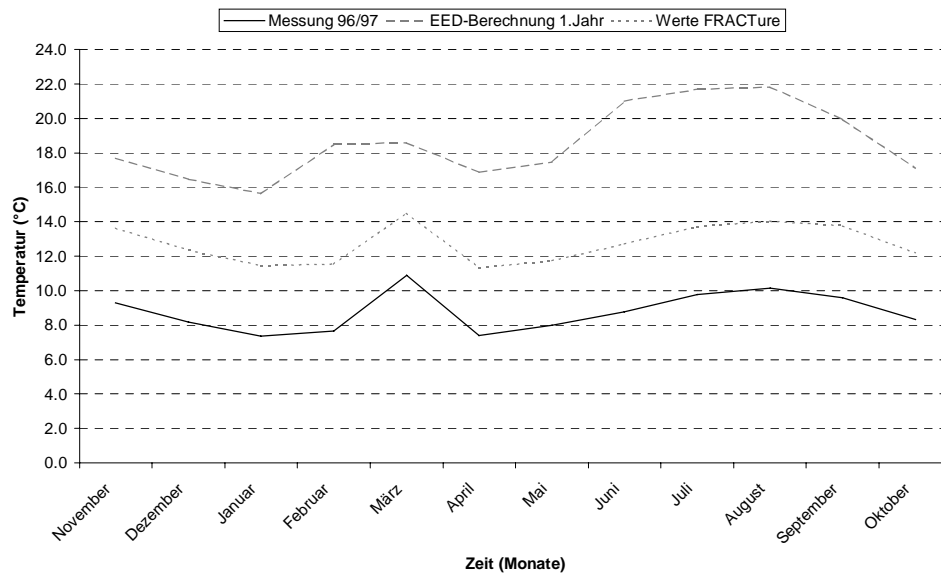


Abbildung 6: Vergleich EED-Berechnungen mit FRACTure-Berechnungen.

Um die Erdwärmesonde Weissbad mit angepassten Untergrund und Sondenparametern besser zu modellieren, wird zuerst eine Sensitivitätsanalyse der einzelnen Parameter gemacht, um deren Einfluss auf die Austrittstemperaturen zu untersuchen.

### 3.3. Sensitivitätsanalyse der Eingabeparameter

#### 3.3.1. Variation der Untergrundparameter und der Oberflächentemperatur

Zuerst werden die Bodenparameter untersucht. Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes wurde von 2.5 auf 3.0 W/(mK) gesetzt. Alle anderen Parameter wurden nicht verändert. Gemäss Gleichung 1.2 sinkt bei steigender Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der geothermische Gradient  $\alpha$ , was wiederum ein Sinken der Bodentemperatur  $T$  zur Folge hat. Abbildung 7 zeigt, dass die Temperaturen um 2, in den Sommermonaten sogar um über 2°C sanken.

Die Veränderung der Wärmekapazität des Bodens reagiert viel träger. Eine Erhöhung des Wertes von  $2.5 \cdot 10^6$  auf  $3 \cdot 10^6$  J/(m<sup>3</sup>K) erhöht die Temperatur des Fluides nur geringfügig um bis zu 0.2 °C.

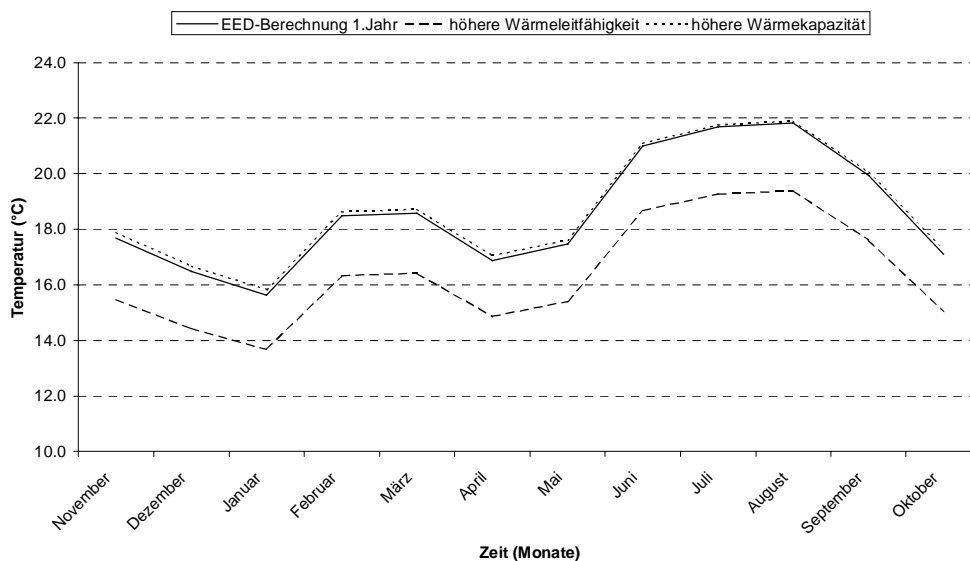


Abbildung 7: Sensitivitätsanalyse zur Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Untergrundes.

Eine Erniedrigung der Oberflächentemperatur von 1°C bringt ein Absenken der Austrittstemperaturen von 1°C, wie dies durch die Gleichungen 1.2, 1.3 und 1.4 beschrieben wird. Die Veränderung der Oberflächentemperatur ist zusammen mit der Veränderung des geothermischen Wärmeflusses in Abbildung 8 geplottet. Bei einem um 0.01 W/m<sup>2</sup> tieferen Wärmefluss sinken die Temperaturen des Fluides generell um 2.4 °C. Dies wird durch die Gleichungen 1.2 und 1.4 beschrieben.

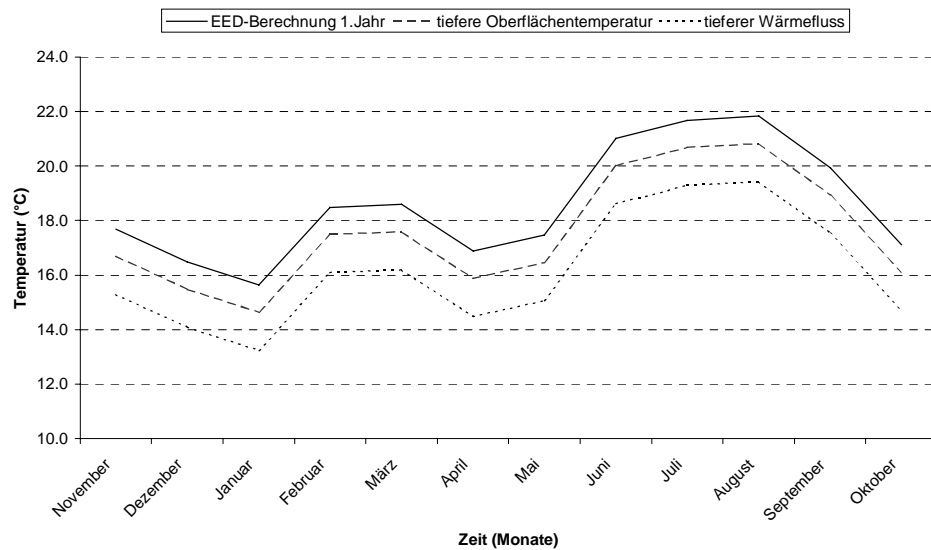


Abbildung 8: Sensitivitätsanalyse für den Einfluss der Oberflächentemperatur und des Wärmeflusses.

### 3.3.2. Änderung des Bohrl Lochdurchmessers und der Verrohrung

In Weissbad nimmt der Bohrl Lochdurchmesser mit der Tiefe ab. Da aber in EED nur ein konstanter Durchmesser eingesetzt werden kann, soll nun auch dessen Einfluss geprüft werden. Dazu wird der Maximal- bzw. der Minimalwert des Bohrl Lochdurchmessers für die Berechnung benutzt. Alle anderen Parameter werden gemäss Kapitel 2.2.1 eingesetzt.

In der ersten Simulation aus Abbildung 9 wird der Durchmesser auf einen Wert von 0.508m (20“) gesetzt. Dies ist der Maximalwert aus dem obersten Teil der Bohrung bis 198.6 m, der aus der Abbildung 4 herauszulesen ist. Die mittlere Temperatur des Fluids wird um 0.4 bis 1.1°C heraufgesetzt.

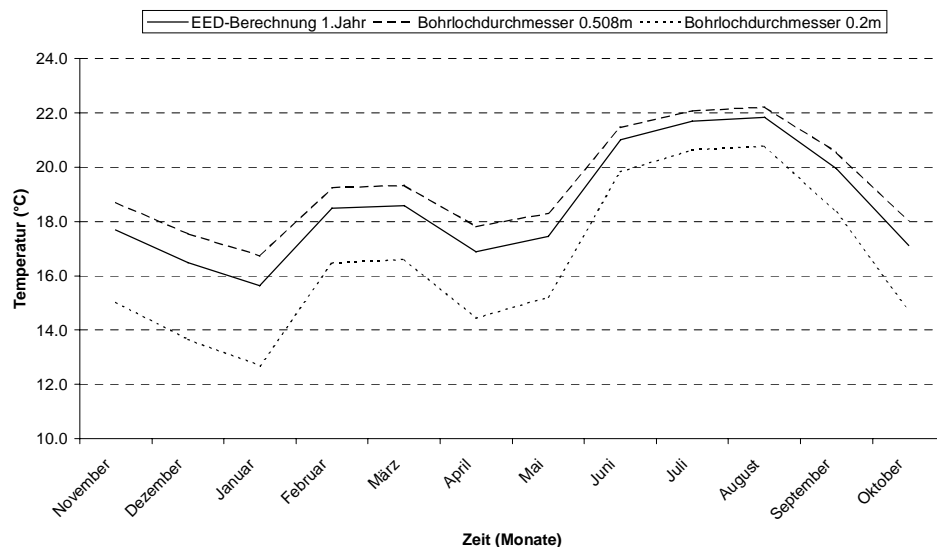


Abbildung 9: Variation des Bohrlochradius.

Der Bohrlochdurchmesser am untersten Ende der Sonde beträgt 0.2 m (7 7/8“). Der Durchmesser der äusseren Verrohrung muss natürlich kleiner oder gleich gross sein als der Durchmesser des Bohrloches. Deshalb wird hier der äussere Rohrdurchmesser von 0.245 auf 0.2 m gesetzt. Mit diesen Daten erhält man die untere Kurve in Abbildung 9, deren Temperaturen maximal 2.9 und minimal 1.1°C unter den Werten der Ausgangskurve liegen.

In Abbildung 10 wurde schliesslich der Durchmesser der äusseren Verrohrung variiert. In Weissbad beträgt dieser in einer Tiefe von 0 bis 512 m 245 mm, von 512 bis 801 m 219 mm, und von 801 bis 1200 m beträgt er 168 mm. In der Modellierung 1 wurde er auf 245 mm festgesetzt. Es zeigt sich hier, dass die Temperaturen des Fluides mit 219 mm Durchmesser um 0.4 bis 1°C abnehmen, bei einem Durchmesser von 168 mm aber um 1.6 bis 4.5°C. In einer nächsten Modellierung sollte für den äusseren Rohrdurchmesser ein Mittelwert verwendet werden, was im Allgemeinen die Fluidtemperaturen senken wird. Die Steigleitung wird hier nicht variiert, da sie in Weissbad einen konstanten Durchmesser aufweist.

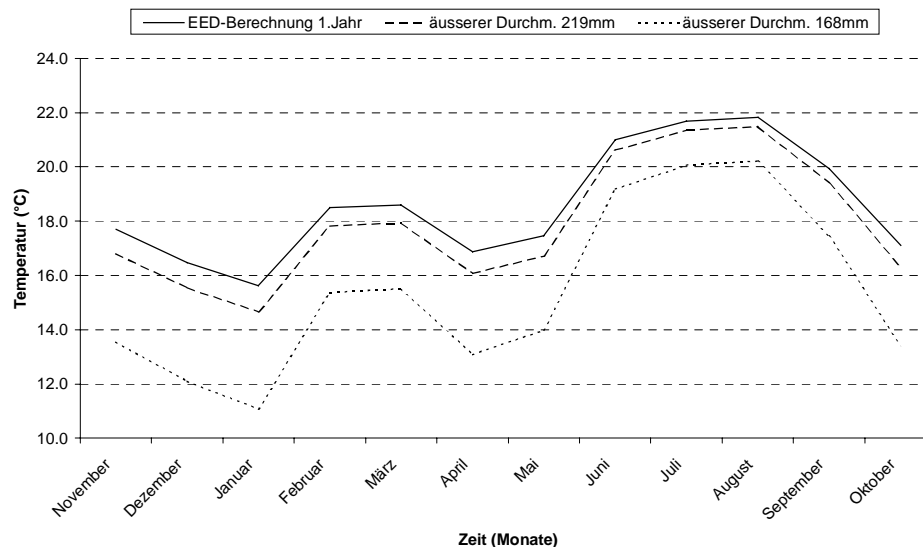


Abbildung 10: Simulation mit variierendem Rohrdurchmesser.

### 3.3.3. Variation des Kontaktwiderstandes

Als letzter Punkt wird der Einfluss der Kontaktwiderstand zwischen der äusseren Verrohrung und dem Untergrund untersucht. Wie sich in der Arbeit von M. Salton (SALTON, 1999) gezeigt hat, wurde die Erdwärmesonde Weissbad mit grosser Wahrscheinlichkeit schlecht hinterfüllt. Mögliche Werte für den Kontaktwiderstand in EED sind 0.00 bis 0.03 mK/W. Die Temperatur des Fluids nimmt bei schlechterem Kontakt zwischen Verrohrung und Untergrund ab. Die maximale Abnahme für den Wert 0.03 mK/W beträgt 1.05°C im kältesten Monat (Januar). Die errechneten Werte sind in Abbildung 11 dargestellt.

Mithilfe der Resultaten dieser Sensitivitätsanalyse soll nun eine Modellierung 2 mit angepassten Eingabeparametern durchgeführt werden.

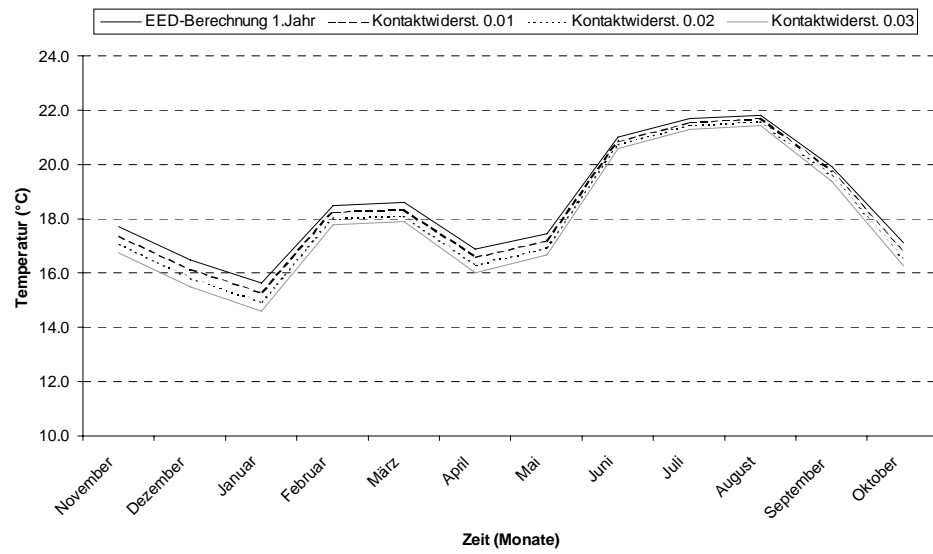


Abbildung 11: Variation des Kontaktwiderstandes zwischen Verrohrung und Untergrund.

## 3.4. Modellierung 2

### 3.4.1. Eingabeparameter

Die Eingabeparameter sollen nun gemäss der Sensitivitätsanalyse so verändert werden, dass die modellierte Kurve besser zu den gemessenen Daten passt. Die Untergrundparameter werden folgendermassen angepasst:

Die Wärmeleitfähigkeit der durchfahrenen Gesteine wird auf 3.400 W/(mK) angehoben.

Die Wärmekapazität wird nicht verändert.

Die durchschnittliche Oberflächentemperatur in St. Gallen (779 m.ü.M.) in 50 cm Tiefe beträgt 8.7 °C (DEFILA, C. & BRÄNDLI J., 1986). Da Weissbad in der näheren Umgebung von St. Gallen liegt, und etwa auf derselben Höhe über Meer (823 m.ü.M.), wurde dieser Wert übernommen.

Der Wärmefluss ist anhand der geothermischen Karte der Schweiz nur grossräumig zu schätzen. Kleinräumige Veränderungen sind daraus nicht ersichtlich, zudem fehlen Messpunkte im Raum Weissbad. Für die Modellierung 2 wird dieser Wert auf 0.058 W/m<sup>2</sup> gesetzt. Die benutzten Parameter sind in der Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Untergrundparameter für das Modell 2.

|                     |                                  |                     |                      |
|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------|
| UNTERGRUNDPARAMETER | • Wärmeleitfähigkeit             | 3.400               | W/(mK)               |
|                     | • Wärmekapazität                 | $2.5 \cdot 10^6$    | J/(m <sup>3</sup> K) |
|                     | • mittlere Oberflächentemperatur | 8.70                | °C                   |
|                     | • Wärmefluss                     | $5.8 \cdot 10^{-2}$ | W/m <sup>2</sup>     |

Die Bohrlochparameter bleiben bis auf den Durchmesser der äusseren Verrohrung und den Kontaktwiderstand Verrohrung/Untergrund unverändert. Die Daten sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Der Durchmesser der äusseren Verrohrung wird auf den Mittelwert gesetzt. Dieser beträgt 0.213 m.

Da es sich in Weissbad um eine sehr lange Sonde handelt, ist die Wahrscheinlichkeit klein, dass die Hinterfüllung einen perfekten Kontakt zwischen Verrohrung und Untergrund auf der ganzen Länge herstellen kann. Aus diesem Grund wird der Kontaktwiderstand auf den Wert 0.03 K/(W/m) angehoben.



Tabelle 8: Angepasste Bohrlochparameter für Modell 2.

|                   |   |                           |
|-------------------|---|---------------------------|
| BOHRLOCHPARAMETER | • Durchmesser äussere Verrohrung                      | $2.13 \cdot 10^{-2}$ m    |
|                   | • Kontaktwiderstand äussere Verrohrung/<br>Untergrund | $3 \cdot 10^{-2}$ (m·K)/W |

Die Eingabeparameter für das Fluid und die Energiewerte bleiben unverändert.

### 3.4.2. Resultate

Mit den angepassten Eingabeparameter konnte die mittlere Fluidtemperatur allgemein gesenkt werden. Die Resultate sind in Abbildung 12 geplottet. Der Kurvenverlauf von Oktober bis Mai konnte gut angenähert werden. Problematischer ist es in den Sommermonaten Juni bis September. Die Temperaturen der Simulation sind in dieser Zeit um bis zu 4°C zu hoch.

In der Simulation wird angenommen, dass die Erdwärmesonde durchgehend in Betrieb ist. Dies ist aber in Weissbad vor allem in den Sommermonaten nicht der Fall. Dies könnte die grosse Differenz zwischen Messwerten und den synthetischen Werten erklären.

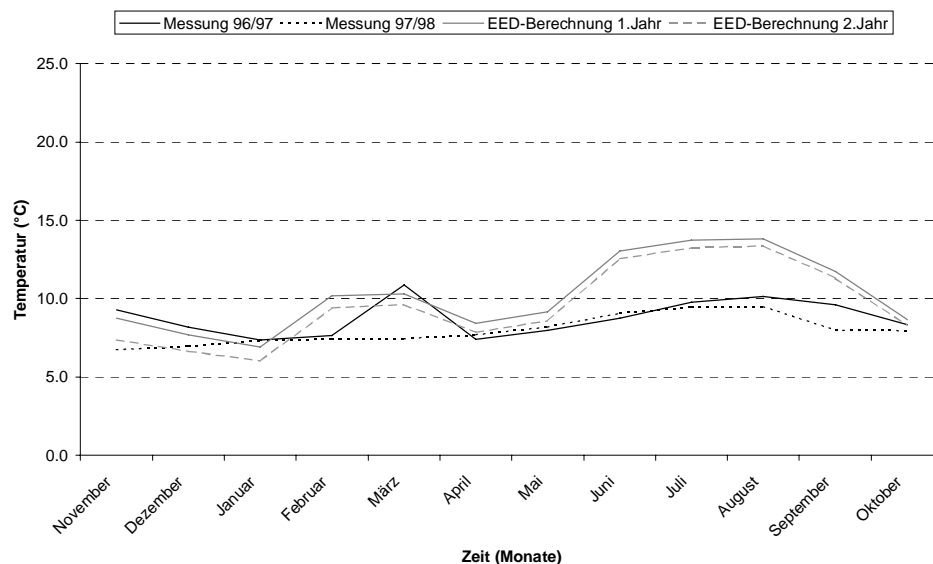


Abbildung 12: Modellierung 2 mit angepassten Eingabeparametern.

## 4. Das Erdwärmesonden-Simulationsprogramm EWS

### 4.1. Einleitung

Das Programm-Modul EWS (HUBER & SCHULER, 1997) ist ein Simulationsmodell für die dynamische Lösung der Wärmeleitungsgleichung im Sondennahbereich nach dem Crank-Nicholson-Verfahren. An den äusseren Randbedingungen wird das Entzugsprofil nach dem Superpositionsprinzip in entsprechende Temperatursprünge zerlegt, und die Antwortfunktion superponiert. Im Gegensatz zu EED (Kapitel 2) ist es dadurch möglich, mit EWS auch dynamische Effekte wie zum Beispiel Anfahreffekte einer Erdwärmesonde zu simulieren. Im Weiteren kann als Eingabegrösse entweder die Sondenrücklauftemperatur oder die Entzugsleistung gewählt werden. Mit der Rücklauftemperatur kann das Potential zur Direktkühlung berechnet werden.

Mit dem Programm-Modul können Einzelsonden (Doppel-U-Sonden und neu auch Koaxialsonde) und Sondenfelder über einen Zeitraum von 60 Jahren berechnet werden. Das Wärmeentzugsprofil kann frei gewählt werden. Es können bis zu 10 verschiedene Erdschichten mit unterschiedlichen Stoffparametern dargestellt werden. Dadurch ist das Programm in der Lage, Sonden bis zu einer Tiefe von ungefähr 1500 m zu berechnen. Das Modell eignet sich auch das transiente Verhalten der Sonde nachzubilden.

EWS ist in der Programmiersprache PASCAL geschrieben, der Programmiercode wurde veröffentlicht (HUBER & PAHUD, 1999). Zur Validierung wurden 20 Testfälle ausgewählt, die mit den Resultaten vom Programm SBM/TRNSBM (PAHUD, FROMENTIN & HADORN, 1996) verglichen wurden. Die Resultate sind in HUBER & PAHUD, 1999 veröffentlicht.

In dieser Diplomarbeit soll nun die tiefe Erdwärmesonde Weissbad mit EWS simuliert werden. Da es sich bei der Sonde Weissbad um eine koaxiale Sonde handelt, muss EWS zuerst für die Simulation von Koaxialsonden erweitert werden. Dies wird in Abschnitt 4.3 beschrieben.

## 4.2. Physikalische Grundlagen von EWS

### 4.2.1. Crank-Nicholson-Verfahren für die Simulation des Sondennahbereiches

Der Sondennahbereich im Abstand von 1 bis 3 m um die Sondenachse wird schichtweise dynamisch simuliert. Der Untergrund wird in Schichten  $dl$  unterteilt, für welche die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten gelöst wird, wobei der erste Massenknoten jeweils die Hinterfüllung ist.

Als implizite Differenzengleichung wird die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung mit dem Crank-Nicholson-Ansatz folgendermassen geschrieben:

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

$$T_{k,j} - \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (T_{k,j-1} - T_{k,j}) - \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (T_{k,j+1} - T_{k,j}) \quad (4.1)$$

C: Wärmekapazität des Rechenknotens [C] = J/kgK

L: thermische Leitfähigkeit zwischen zwei Rechenknoten, [L] = W/mK

Index k: Zeitkoordinate

Index j: radiale Ortskonstante

Diese Gleichung (4.1) kann für die Berechnung als Matrix dargestellt werden, wobei symbolisch vereinfacht werden kann (HUBER & PAHUD, 1999):

$$[A] \cdot \{T\}_i^{k+1} = [F] \cdot \{T\}_i^k \quad (4.2)$$

durch Multiplikation mit  $A^{-1}$  kann diese Vektorgleichung gelöst werden:

$$\{T\}_i^{k+1} = [A]^{-1} \cdot [F] \cdot \{T\}_i^k = [B] \cdot \{T\}_i^k \quad \text{mit} \quad [B] = [A]^{-1} \cdot [F] \quad (4.3)$$

Die Matrix B muss für die Simulation nur einmal berechnet werden. Für verschiedene Stoffwerte der Erdschichten, werden eigene Matrizen  $B_i$  berechnet und gespeichert.

Das Rechengitter für die Berechnungen ist axialsymmetrisch. Die Erde wird in axialer Richtung in gleiche Teile der Länge  $dl$  aufgeteilt. Das Gitter in radialer Richtung ist variabel. Definiert wird es durch den Gitterfaktor  $f$ :

$$f = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}} \quad (4.4)$$

f: Gitterfaktor

r: Rechenradius, [r] = m

Als innere Randbedingungen für das Crank-Nicholson-Verfahren wird die mittlere Soletemperatur der jeweiligen Schicht genommen. Die Berechnung dieser Temperatur wird im Kapitel 4.2.5 besprochen.

Die äusseren Temperatur-Randbedingungen werden entweder aus den dimensionslosen Temperatur-Sprungantwortfunktionen (g-Funktionen) (ESKILSON, 1987) oder mit einem Ansatz aus der Grundwasserhydraulik (Theis-Lösung) (THEIS 1935) berechnet. Die g-Funktionen wurden bereits im Kapitel 2.2.4 besprochen. Da sie von EWS nach derselben Theorie berechnet werden wie in EED, werden sie an dieser Stelle nicht mehr behandelt. Die Theis-Lösung wird im Kapitel 4.2.6 erklärt.

#### 4.2.2. Wärmekapazitäten C

In der Abbildung 13 sind die Konventionen der Bezeichnungen dargestellt, welche später gebraucht und erklärt werden. An diesem Beispiel mit drei Rechenknoten werden die Wärmekapazitäten C folgendermassen berechnet:

$$\begin{aligned} C_1 &= cp_{\text{Füllung}} \rho_{\text{Füllung}} \pi (r_1^2 - 4r_0^2) dl \\ C_2 &= cp_{\text{Erde}} \rho_{\text{Erde}} \pi (r_2^2 - r_1^2) dl \\ C_3 &= cp_{\text{Erde}} \rho_{\text{Erde}} \pi (r_3^2 - r_2^2) dl \end{aligned} \quad (4.5)$$

mit

$$dl = \frac{\text{Sondenlänge}}{\text{DimAxi}} \quad (4.6)$$

C: Wärmekapazität, [C] = J/K

dl: Schichtdicke, [dl] = m

cp: spezifische Wärmekapazität, [cp] = J/kgK

r: radialer Abstand von der Rohrachse, [r] = m

r<sub>0</sub>: Innerer Radius der Sondenrohre, [r<sub>0</sub>] = m

ρ: Dichte, [ρ] = kg/m<sup>3</sup>

DimAxi: Anzahl gleiche Elemente

Die Wand des Sondenrohres wird vernachlässigt, d.h. als Teil der Hinterfüllung gerechnet.

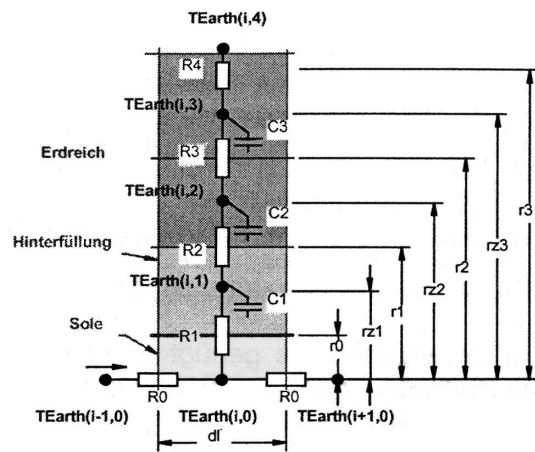


Abbildung 13: Konvention der Bezeichnungen (HUBER &amp; PAHUD, 1999).

### 4.2.3. Thermische Widerstände R und Leitfähigkeiten L

Die thermische Wärmeleitfähigkeit L ist folgendermassen definiert:

$$L = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{Earth}} \quad (4.7)$$

L: thermische Leitfähigkeit, [L] = W/K

$\dot{Q}$ : Wärmefluss zwischen zwei Masseknoten, [ $\dot{Q}$ ] = W

$\Delta T_{Earth}$ : Temperaturdifferenz zwischen zwei Masseknoten, [ $\Delta T_{Earth}$ ] = K

Somit wird der thermische Widerstand R:

$$R = \frac{\Delta T_{Earth}}{\dot{Q}} \quad (4.8)$$

R: thermischer Widerstand, [R] = K/W

Nun muss der thermische Widerstand an einem Zylinder in radialer Richtung berechnet werden, dafür muss zuerst aber die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  in Abhängigkeit des Radius bestimmt werden. Der Wärmefluss  $\dot{Q}$  zwischen zwei Masseknoten ist konstant, deshalb gilt:

$$\frac{dT_{Earth}}{dr} \lambda = \frac{\dot{Q}}{2\pi r dl} \quad (4.9)$$

wobei

$$\Delta T_{Earth} = \int 1 \cdot dT_{Earth}$$

$\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit, [ $\lambda$ ] = W/mK

$dl$ : Länge eines Rohrsegmentes, [ $dl$ ] = m

$$\frac{dT_{Earth}}{dr} : \text{Temperaturgradient zwischen zwei Masseknoten, } \left[ \frac{dT_{Earth}}{dr} \right] = \text{K}$$

Die Temperaturdifferenz zwischen zwei Masseknoten lässt sich durch Integration zwischen dem Radius  $r_1$  und  $r_2$  berechnen:

$$\Delta T_{Earth} = \int dT_{Earth} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mathcal{Q}}{2\pi r dl \lambda} \cdot dr = \frac{\mathcal{Q}}{2\pi dl \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4.10)$$

Die thermische Leitfähigkeit zwischen dem Radius  $r_1$  und  $r_2$  beträgt somit:

$$L = \frac{1}{R} = \frac{2\pi dl \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.11)$$

Nun lassen sich die thermischen Widerstände für Doppel-U-Erdwärmesonden berechnen:

$$R_1 = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2\pi \alpha r_0 dl} + \frac{1}{2\pi dl \lambda_{Fill}} \ln \frac{r_1 - rz_1}{r_0} \right) \quad (4.12)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi dl} \left( \frac{1}{\lambda_{Fill}} \ln \frac{r_1}{rz_1} + \frac{1}{\lambda_{Erde}} \ln \frac{rz_2}{r_1} \right) \quad (4.13)$$

$$R_3 = \frac{1}{2\pi dl} \frac{1}{\lambda_{Erde}} \ln \frac{rz_3}{rz_2} \quad (4.14)$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi dl} \frac{1}{\lambda_{Erde}} \ln \frac{r_3}{rz_3} \quad (4.15)$$

$\alpha$ : Wärmeübergangskoeffizient, [ $\alpha$ ] = W/m<sup>2</sup>K

$rz$ : radialer Massenschwerpunkt eines Rohringes, [ $rz$ ] = m

$R_3$  und  $R_4$  können aus der Fourier-Gleichung in Radialkoordinaten exakt hergeleitet werden. Bei  $R_1$  und  $R_2$  handelt es sich um vereinfachte Ansätze. Aus diesem Grund besteht im Programm EWS die Möglichkeit,  $R_1$  und  $R_2$  als Parameter vorzugeben. Diese Widerstände entsprechen dem „Internal Thermal Resistance“  $R_a$  und dem „Borehole Thermal Resistance“  $R_b$  aus dem EED-Outputfile. Wenn schon Berechnungen der gleichen Sonde mit EED durchgeführt wurden, können diese Widerstände für die Simulation in EWS übernommen werden.

$R_a$  ist der thermische Widerstand zwischen der hinunter- und der hinaufströmenden Sole, multipliziert mit der Sondenlänge  $dl$ :

$$R_a = 4dlR_1 \quad (4.16)$$

$R_b$  ist folgendermassen definiert:

$$R_b = \frac{dl(T_{Sole} - T_b)}{q} \quad (4.17)$$

$T_b$ : Bohrlochtemperatur beim Radius  $r_1$ , [T] = K

$R_b$  kann auch in Abhängigkeit von  $R_1$  geschrieben werden:

$$R_b = R_1 dl + \frac{1}{2\pi\lambda_{Fill}} \ln \frac{r_1}{rz_1} \quad (4.18)$$

Wenn also  $R_b$  bekannt ist, so wird durch EWS automatisch  $R_1$  berechnet:

$$R_1 = \frac{R_b}{dl} - \frac{1}{2\pi\lambda_{Fill} dl} \ln \frac{r_1}{rz_1} \quad (4.19)$$

Werden  $R_a$  und  $R_b$  vorgegeben, so berechnet EWS  $R_1$  und  $R_2$  folgendermassen:

$$R_1 = \frac{R_a}{4dl} \quad (4.20)$$

$$R_2 = \frac{\left(R_b - \frac{R_a}{4}\right)}{dl} + \frac{1}{2\pi dl \lambda_{Erde}} \ln \frac{rz_2}{r_1} \quad (4.21)$$

dabei muss  $R_a < 4R_b$  sein.

Bei  $R_b$  muss zusätzlich noch der Kontaktwiderstand zwischen dem Sondenrohr und der Hinterfüllung berücksichtigt werden. Dieser variiert stark mit Anzahl und Grösse der Lufteinschlüsse zwischen Verrohrung und Hinterfüllung. Dies wird bei EWS nicht automatisch berücksichtigt und sollte durch manuelle Erhöhung von  $R_b$  korrigiert werden.

#### 4.2.4. Wärmeübergang Sonde-Sole

Wenn zwei unabhängige thermische Regime auf engem Raum aufeinandertreffen und in thermischem Kontakt stehen, muss ein Wärmeübergang definiert werden. An der Grenze zwischen Sole und Verrohrung ist die Definition eines Wärmeüberganges sinnvoll. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  von der Sole an die Verrohrung hängt ab von der mit dem Rohrdurchmesser  $D_i$  gebildeten Reynoldszahl  $Re$  und der Prandtlzahl  $Pr$  der Sole. Üblicherweise wird die dimensionslose Nusseltzahl  $Nu$  für die ausgebildete Rohrströmung angegeben:

$$Nu(Re, Pr) = \frac{\alpha_1 D_i}{\lambda_{Sole}} \quad (4.22)$$

$Nu$ : Nusseltzahl, dimensionslos

$Re$ : Reynoldszahl, dimensionslos

$Pr$ : Prandtlzahl, dimensionslos

$\alpha$ : Wärmeübergangskoeffizient,  $[\alpha] = W/m^2K$

$D_i$ : Innendurchmesser der Sondenrohre,  $[D_i] = m$

$\lambda_{Sole}$ : Wärmeleitfähigkeit der Sole,  $[\lambda_{Sole}] = W/mK$

Bei einer Reynoldszahl  $Re < 2 \cdot 10^3$  ist die Strömung laminar, liegt  $Re$  im Übergangsbereich  $2 \cdot 10^3 < Re < 10^4$  herrscht laminar-turbulente Strömung und bei  $Re > 10^4$  liegt turbulente Strömung vor.

Im Programm EWS wird für nicht turbulente Strömung ( $Re < 10^4$ ) die Nusseltzahl  $Nu_{laminar} = 4.36$  verwendet. Im turbulenten Bereich ( $Re > 10^4$ ) wird die Petukhov-Formel für den Wärmeübergang im Rohr angewendet:

$$Nu_{turbulent} = \frac{\frac{\xi}{8}}{K_1 + K_2 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} Re \cdot Pr \quad (4.23)$$

mit



$$K_1 = 1 + 27.2 \left( \frac{\xi}{8} \right) \quad (4.24)$$

$$K_2 = 11.7 + 1.8 \cdot \text{Pr}^{-1/3} \quad (4.25)$$

$$\xi = \frac{1}{(1.82 \log \text{Re} - 1.64)^2} \quad (4.26)$$

Bei Stillstand der Sonde wird angenommen, dass in der Sole keine Konvektion sondern nur Wärmeleitung stattfindet. Unter der Annahme, dass die Wärmeleitung im Durchschnitt bis zum radialen Massenschwerpunkt erfolgt, gilt der folgende Ansatz bei Stillstand der Sonde:

$$\alpha_0 = \frac{\lambda_{\text{Sole}}}{\frac{D_i}{2} (1 - \sqrt{0.5})} \quad (4.27)$$

$\alpha_0$ : Wärmeübergangskoeffizient im Ruhezustand, [ $\alpha_0$ ] = W/m<sup>2</sup>K

#### 4.2.5. Modellierung der Sole

Die folgende instationäre und stationäre Modellierung der Sole gilt für Doppel-U-Sonden, so wie sie ursprünglich in das Programm EWS implementiert war. Im Kapitel 4.3.1 ist die Anpassung von EWS für die Modellierung der Sole für koaxiale Sonden beschrieben.

In der Abbildung 14 ist die Sonde schematisch dargestellt, unterteilt in verschiedene Elemente. Die beiden zusammengehörenden Elemente in welchen die Sole nach unten bzw. nach oben fließt werden zusammengefasst. Die Masse  $m$  der beiden Sole-Elemente mit Länge  $dl$  beträgt:

$$m = 2\pi r_0^2 dl \rho_{\text{Sole}} \quad (4.28)$$

$m$ : Masse zweier Sole-Elemente der Länge  $dl$ , [m] = Kg

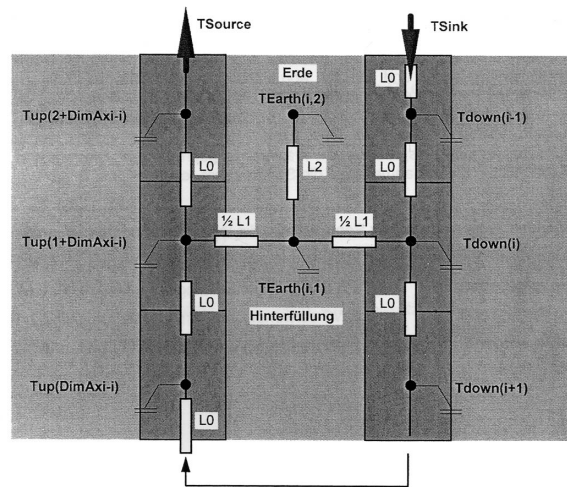


Abbildung 14: Schematische Darstellung einer Doppel-U-Sonde zur dynamischen Berechnung der Sole mit explizitem Zeitschrittverfahren (HUBER & SCHULER, 1997).

Die Strömungsgeschwindigkeit des Sondenfluids beträgt:

$$v = \frac{\dot{m}}{2\pi r_0^2 \rho_{Sole}} \quad (4.29)$$

v: Strömungsgeschwindigkeit der Sole, [v] = m/s

Die Leitfähigkeit  $L_0$  der Sole lässt sich folgendermassen berechnen:

$$L_0 = 2\pi r_0^2 v \rho_{Sole} c p_{Sole} \quad (4.30)$$

$L_0$ : thermische Leitfähigkeit der Sole, [ $L_0$ ] = W/K

$c p_{Sole}$ : spezifische Wärmekapazität der Sole, [ $c p_{Sole}$ ] = J/kgK

Nun kann die instationäre Modellierung der Sole durchgeführt werden. Dazu wird ein dynamischer Ansatz gewählt wobei die Sole mit einem expliziten Zeitschrittverfahren berechnet wird. Dadurch wird auch die Erwärmung des Fluides bei Stillstand der Pumpe mitberücksichtigt. Für ein Bilanzelement  $i$  lässt sich die Energiebilanz erstellen, woraus sich die Soletemperatur  $T_{down,i}$  der hinunterfliessenden Sole für dieses Bilanzelement bestimmen lässt:

$$T_{down_{k+1,i}} = T_{down_{k,i}} + (T_{down_{k+1,i-1}} - T_{down_{k,i}}) \frac{L_0 dt^2}{m cp} + (T_{Earth_{k,i,1}} - T_{down_{k,i}}) \frac{L_1 dt^2}{2 m cp} \quad (4.31)$$

$T_{down}$ : Temperatur der hinunterfliessenden Sole, [ $T_{down}$ ] = K

$T_{Earth}$ : Temperatur des Erdreiches, [ $T_{Earth}$ ] = K

$L_1$ : thermische Leitfähigkeit zwischen Sole und Hinterfüllung, [ $L_1$ ] = W/K

Indizes:

i: axiale Ortskoordinate

j: radiale Ortskoordinate

k: Zeitkoordinate

Die Temperatur für die hinaufströmende Sole  $Tup_i$  beträgt:

$$Tup_{k+1,i} = Tup_{k,i} + (Tup_{k+1,i-1} - Tup_{k,i}) \frac{L_0 dt}{m cp} + (TEarth_{k,1+DimAxi-i,1} - Tup_{k,i}) \frac{L_1 dt}{m cp} \quad (4.32)$$

Indizes:

DimAxi: Anzahl Rechenknoten in axialer Richtung

Aus der Abbildung 14 können die für diese Berechnungen gültigen Randbedingungen herausgelesen werden:

$$Tdown_{k+1,0} = TSink$$

$$Tup_{k+1,0} = Tdown_{k+1, DimAxi} \quad (4.33)$$

$$TSource = Tup_{k+1, DimAxi}$$

TSink: Eintrittstemperatur der Sole in die Sonde, [TSink] = K

TSource: Austrittstemperatur der Sole aus der Sonde, [TSource] = K

In diesem Modell fließt der gesamte Wärmefluss über den Hinterfüllungsknoten, es gibt also keinen direkten Wärmeaustausch zwischen der hinunter- und der hinaufströmenden Sole. Diese Vereinfachung kann natürlich nur für Doppel-U-Sonden gemacht werden dank der peripheren Anordnung der Sondenrohre, wodurch  $L_1$  klein wird. Somit ist die Sole stark an die Hinterfüllung gekoppelt. Das Modell für Koaxialsonden wird in Kapitel 4.3.1 beschrieben.

Soll Rechenzeit gespart werden, so kann die Soletemperatur auch stationär berechnet werden.

Die Temperatur für die hinunterfließende Sole ergibt dann:

$$Tdown_i = \frac{\left( L_0 \cdot Tdown_{i-1} + \frac{L_1}{2} \cdot TEarth_{i,1} \right)}{\left( L_0 + \frac{L_1}{2} \right)} \quad (4.34)$$

und für die Temperatur der hinauffließenden Sole ergibt sich:

$$Tup_i = \frac{\left( L_0 \cdot Tup_{i-1} + \frac{L_1}{2} \cdot TEarth_{1+DimAxi-i,1} \right)}{\left( L_0 + \frac{L_1}{2} \right)} \quad (4.35)$$

Die Zeiteinsparung bei stationärer Berechnung ergibt sich dadurch, dass im Gegensatz zur instationären Berechnung keine Subunterteilung für die Soleberechnung mehr nötig ist. Allerdings wird dadurch auch der Diskretisierungsfehler grösser, was Abweichungen bei Stundenzeitschritten von etwa 4% (HUBER & SCHULER, 1997) zur Folge hat. Bei kürzeren Zeitschritten und häufigeren Takten sind noch grössere Abweichungen zu erwarten, da in diesem Fall das transiente Verhalten beim Anfahren der Erdwärmesonde zum Tragen kommt.

#### 4.2.6. Theis-Lösung

Um den nicht konstanten Wärmeentzug einer Erdwärmesonde zu berechnen, soll zuerst der einfachere Fall des konstanten Wärmeentzuges gelöst werden. Aus der Grundwasserhydraulik kann der Ansatz für die Temperaturverteilung im Erdreich abgeleitet werden (THEIS, 1935):

$$\Delta T(r,t) = \frac{\phi}{4\pi\lambda} W(u) \quad (4.36)$$

mit

$$W(u) = \left[ -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \right] \quad (4.37)$$

und

$$u(r,t) = \frac{cp_{Erde} \rho_{Erde} r^2}{4t\lambda_{Erde}} \quad (4.38)$$

$\Delta T$ : Temperaturabsenkung,  $[\Delta T] = K$

$cp_{Erde}$ : spezifische Wärmekapazität der Erde,  $[cp_{Erde}] = J/kgK$

$\rho_{Erde}$ : Dichte der Erde,  $[\rho_{Erde}] = kg/m^3$

$t$ : Zeit,  $[t] = s$

$\phi$ : spezifische Wärmeentzugsleistung pro Sondenlänge,  $[\phi] = W/m$

Der nicht konstante Wärmeentzug durch das An- bzw. Abschalten der Sonde und die Regeneration des Erdreiches kann durch Superposition von beliebig vielen, zu verschiedenen Zeitpunkten beginnenden, konstanten Wärmeentzügen gelöst werden. Als Beispiel kann ein va-

riabler Wärmeentzug  $\dot{Q}_i$  in der i-ten Woche als Superposition einer konstanten Entzugsleistung  $\dot{Q}_i$  am Anfang und einer konstanten Entzugsleistung  $-\dot{Q}_i$  am Ende der i-ten Woche. In der Betrachtungswoche n ergibt sich demnach der folgende Temperaturtrichter:

$$\Delta T(r, t = n\Delta t) = \frac{\dot{Q}_i}{4\pi\lambda} [W(u(r, t = (n-i+1)\Delta t)) - W(u(r, t = (n-i)\Delta t))] \quad (4.39)$$

n: Betrachtungswoche  
 $\Delta t$ : Zeitschritt = 1 Woche

Nach der oben beschriebenen Weise kann ein beliebiges Entzugsprofil berechnet werden:

$$\Delta T(r, t = n\Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{W(u(r, t = i\Delta t))}{4\pi\lambda} [\dot{Q}_{n-i+1} - \dot{Q}_{n-i}] \quad (4.40)$$

mit

$$\dot{Q}_0 = 0 \quad (4.41)$$

Die spezifische Wärmeentzugsleistung  $\dot{Q}$  für eine beliebige Woche beträgt:

$$\dot{Q}_{Woche} = \frac{\dot{Q}(i, Woche)}{\text{Sondnlänge} / \text{DimAxi}} \quad (4.42)$$

Aus den Gleichungen 4.40 und 4.42 kann für jede Woche die äussere Randbedingung für das Simulationsgebiet berechnet werden:

$$T_{Earth}(i, \text{DimRad} + 1) = T_0(i) - \Delta T(i, r = r_{\text{DimRad}}, \text{Woche}) \quad (4.43)$$

$T_0(i)$ : Temperatur bei Simulationsbeginn am äusseren Rand des Simulationsgebietes in der i-ten axialen Schicht,  
 $[T_0(i)] = \text{K}$

Indizes:

DimRad: Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung

### 4.3. Anpassung von EWS für die Simulation von Koaxialsonden

Das Programm EWS, wie es in der Version 1.0 im Dezember 1999 bestand und im Kapitel 4.2 beschrieben ist, ist für Doppel-U-Sonden konzipiert. Da in dieser Arbeit aber mit der Erdwärmesonde Weissbad eine koaxiale Erdwärmesonde simuliert werden soll, müssen einige Anpassungen am Programm vorgenommen werden. Herr Arthur Huber hat freundlicherweise die nachfolgend hergeleiteten Formeln ins Programm EWS implementiert.

#### 4.3.1. Anpassung zur Modellierung der Sole

Bei der koaxialen Erdwärmesonde steht die Verrohrung des hinaufströmenden Fluids nicht in Kontakt mit der Hinterfüllung wie bei den Doppel-U-Sonden, sondern sie steht in direktem Kontakt zum hinunterströmenden Fluid. Die Energiebilanz eines Bilanzelementes muss also neu definiert werden. Abbildung 15 zeigt eine schematische Darstellung einer koaxialen Erdwärmesonde. Der Hinterfüllungsknoten  $TEarth(i,1)$  ist nun nicht mehr mit dem hinunter- und dem hinaufströmenden Fluid verbunden (Abbildung 14), sondern nur noch mit dem Soleknoten  $Tdown(i)$ . Dieser ist nun durch die neu definierte Leitfähigkeit  $L_a$  direkt mit dem Knoten  $Tup(1+DimAxi-i)$  der hinaufströmenden Sole verbunden. Der Wärmeübergang zwischen up und down wird also für die Koaxialsonde neu eingeführt.

Aus der Abbildung 15 lassen sich nun die Formeln für die instationäre und die stationäre Berechnung der Sole herauslesen. Für die koaxiale Sonde lauten diese folgendermassen:

Instationäre Berechnung der Sole:

$$Tdown_{k+1,i} = Tdown_{k,i} + (Tdown_{k+1,i-1} - Tdown_{k,i}) \frac{L_0 dt^2}{m cp} + (TEarth_{k,i,1} - Tdown_{k,i}) \frac{L_1 dt^2}{m cp} + (Tup_{k,i} - Tdown_{k,i}) \frac{L_a dt^2}{m cp} \quad (4.44)$$

und

$$Tup_{k+1,i} = Tup_{k,i} + (Tup_{k+1,i-1} - Tup_{k,i}) \frac{L_0 dt^2}{m cp} - (Tup_{k,i} - Tdown_{k,1+DimAxi-i}) \frac{L_a dt^2}{m cp} \quad (4.45)$$

$L_a$ : thermische Leitfähigkeit zwischen hinunter- und hinaufströmender Sole,  $[L_a] = W/K$

Der stationäre Fall lautet:

$$T_{down_i} = \frac{(L_0 \cdot T_{down_{i-1}} + L_1 \cdot T_{Earth_{i,1}} + L_a \cdot T_{up_{1+DimAxi-i}})}{(L_0 + L_1 + L_a)} \quad (4.46)$$

und

$$T_{up_i} = \frac{(L_0 \cdot T_{up_{i-1}} + L_a \cdot T_{down_{1+DimAxi-i}})}{(L_0 + L_a)} \quad (4.47)$$

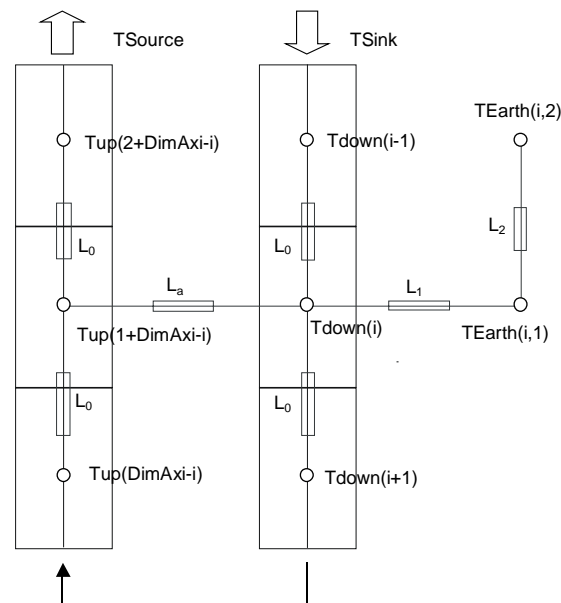


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Koaxialsonde zur Berechnung der Energiebilanz eines Bilanzelements.

### 4.3.2. Anpassung des thermischen Widerstandes $R_1$

Der innere Radius  $r_0$  des Sondenrohres der hinunterströmenden Sole ist bei einer koaxialen Erdwärmesonde einiges grösser als bei einer Doppel-U-Sonde. Damit ist die Kontaktfläche der Verrohrung mit dem Untergrund grösser und es kann mehr Wärmeenergie transportiert werden. Diesem Umstand wird in Formel 4.7 Rechnung getragen, in welcher der Radius des Sondenrohres enthalten ist. Die Widerstände lassen sich mit den Formeln 4.12, 4.13, 4.14 und 4.15 berechnen. Die Formel 4.12 gilt für den Widerstand  $R_1$  zwischen Sondenrohr und Hinterfüllung. Der Durchmesser des Sondenrohres ist hier mit einbezogen. Da nun aber nicht mehr vier wie bei Doppel-U-Sonden, sondern nur noch ein Sondenrohr im Bohrloch eingebracht ist, muss der Faktor  $\frac{1}{4}$  vor der Formel weggelassen werden. Die Formel 4.12 wird für Koaxialsonden also folgendermassen angepasst:

$$R_1 = \left( \frac{1}{2\pi\alpha r_0 dl} + \frac{1}{2\pi dl \lambda_{Fill}} \ln \frac{r_1 - rz_1}{r_0} \right) \quad (4.48)$$

Die Widerstände  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$  bleiben unverändert.

### 4.3.3. Anpassung der Wärmekapazitäten C an die neue Geometrie

In der Formel 4.5 sind die Wärmekapazitäten zur Berechnung der Doppel-U-Sonden aufgeführt. Die erste der drei Gleichungen muss nun für Koaxialsonden angepasst werden. Wie oben schon erläutert ist nur ein Sondenrohr in direktem Kontakt zur Hinterfüllung. deshalb muss hier der Faktor 4 gestrichen werden. die Formeln für die Wärmekapazitäten C lauten also neu für die Koaxialsonden:

$$\begin{aligned} C_1 &= cp_{Füllung} \rho_{Füllung} \pi (r_1^2 - r_0^2) dl \\ C_2 &= cp_{Erde} \rho_{Erde} \pi (r_2^2 - r_1^2) dl \\ C_3 &= cp_{Erde} \rho_{Erde} \pi (r_3^2 - r_2^2) dl \end{aligned} \quad (4.49)$$

Damit sind nun alle Anpassungen für Koaxialsonden durchgeführt.



## 4.4. Anwendungsschritte für EWS

### 4.4.1. Allgemeine Informationen

In dieser Arbeit wird mit der Programmversion 1.1 vom Februar 2000 gearbeitet. In dieser Version kann zwischen der Berechnung einer Doppel-U-Sonde oder einer Koaxialsonde gewählt werden.

Die Eingabe der Parameter gestaltet sich sehr einfach, deshalb wird im nächsten Kapitel nur kurz auf die wichtigsten Punkte eingegangen. Parameter, welche schon im Kapitel 2.3 für das Programm EED verwendet wurden, werden an dieser Stelle nicht mehr besprochen.

### 4.4.2. Eingabe der Parameter in EWS

Die Parameter können nach dem Starten von EWS entweder neu eingegeben werden, oder das Programm kann ein schon bestehendes Inputfile einlesen.

Die Modellparameter werden in die sieben verschiedenen Untermenüs „Sonden“, „Sole“, „Erde“, „Simulation“, „Entzug“, „Parameter“ und „Info“ eingegeben.

Im Untermenü „Sonden“ kann die Geometrie der Sonden festgelegt werden. Hier werden Parameter wie die Anzahl der Sonden, Sondenabstand, Sondenlänge und –typ (Koaxial- oder Doppel-U-Sonde) festgelegt. Der Bohrlochdurchmesser und die Durchmesser der Verrohrungen sind ebenfalls einzugeben, sowie die Wahl der Randbedingung. Wenn nicht die Randbedingungen mit g-Funktionen gewählt werden, rechnet das Programm mit dem Ansatz der Trichterformel von Theis (Kapitel 4.2.6). Hier hat der Benutzer die Möglichkeit, eine eventuell gewählte g-Funktion graphisch darstellen zu lassen. In der Abbildung 16 ist die Temperatursprungantwort einer Einzelsonde aufgezeichnet.

Im Untermenü „Sole“ werden physikalischen Parameter des Fluids und der Hinterfüllung eingegeben. Als spezielle Punkte sollen hier der interne thermische Widerstand  $R_a$  und der thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$  erwähnt werden. Der Benutzer hat die Wahl zwischen vier Optionen, das Programm rechnet dann mit den in Tabelle 9 angegebenen Formeln die fehlenden Parameter.

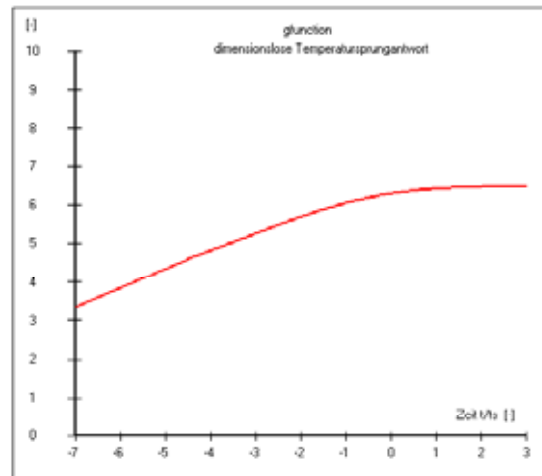


Abbildung 16: Graphische Darstellung der g-Funktion für eine Einzelsonde (aus dem Programm EWS).

Tabelle 9: Eingabeoptionen für die verschiedenen Widerstandswerte in EWS.

|                                 |                               |  |
|---------------------------------|-------------------------------|--|
| EINGABE DES WIDERSTANDES IN EWS | • keine speziellen Eingaben:  | Formel 4.48 für $R_1$ ; 4.13 für $R_2$ |
|                                 | • vorgegeben: $R_1$           | Formel 4.13 für $R_2$                  |
|                                 | • vorgegeben: $R_b$           | Formel 4.19 für $R_1$ ; 4.13 für $R_2$ |
|                                 | • vorgegeben: $R_b$ und $R_a$ | Formel 4.20 für $R_1$ ; 4.21 für $R_2$ |

Die Parameter für die Temperaturen im ungestörten Erdreich werden im Untermenü „Erde“ eingegeben. Wird anstelle von „homogenem Erdreich“ der Punkt „inhomogenes Erdreich“ aktiviert, so stehen dem Benutzer 10 horizontale Erdschichten mit verschiedenen Parametern zur Eingabe zur Verfügung. Dies ist ein grosser Vorteil von EWS gegenüber EED. Wird bei EED eine maximale Berechnungstiefe von 150 m angegeben, so liegt sie bei EWS bei etwa 1500 m. Werden allerdings nicht die genauen Bodenparameter der 10 Schichten eingegeben, kann dieser Vorteil nicht ausgenutzt werden.

Das Untermenü „Simulation“ erlaubt die Wahl der stationären oder instationären Berechnung sowie der Simulationsdauer. Soll eine Entzugsleistung vorgegeben werden, muss in diesem Menü der entsprechende Punkt aktiviert werden.

Im Untermenü „Entzug“ kann nun die tägliche Sondenlaufzeit pro Monat vorgegeben werden sowie eine Entzugsleistung im Heiz- und Kühlbetrieb.

Eingaben zur Steuerung der Berechnung werden im Untermenü „Parameter“ vorgenommen. Hier wird der Simulations-Rechenradius, die Radiale Unterteilung, der Gitterfaktor und der Zeitschrittfaktor definiert.

Im letzten Untermenü „Info“ können zusätzliche Informationen über die Berechnung eingegeben werden. Diese Eingaben werden in die Kopfzeile des Ausgabefiles geschrieben. Zusätzlich kann in diesem Menü der Ort des Monitorpunktes definiert werden.

Wenn alle Untermenüs korrekt ausgefüllt wurden, kann die Berechnung gestartet werden. Das Programm berechnet die Quellen- und Rücklauftemperatur für jeden Monat. Anschliessend können die beiden Temperaturen für jeden Monat graphisch dargestellt, ausgedruckt, oder in die Zwischenablage des PC kopiert werden. Zur definitiven Präsentation der Daten sollte aber ein Ausgabefile erstellt werden, von welchem die Daten in ein Graphikprogramm (z.B. Excel) kopiert und dargestellt werden können.

## 5. Simulation der Erdwärmesonde Weissbad mit EWS

### 5.1. Einleitung

In einer ersten Modellierung (EWS-Modellierung 1) soll die tiefe Erdwärmesonde Weissbad (Kapitel 2.1) mit EWS simuliert und mit den Messwerten von OEKOPLAN AG (1998) verglichen werden. Die Ergebnisse sollen zusätzlich mit den Messwerten der EED-Modellierung 1 aus Kapitel 3.2 verglichen werden. Um realistische Vergleichswerte zu erhalten, werden dieselben Eingabeparameter für beide Simulationen benutzt.

In einer weiteren Simulation, EWS-Modellierung 2 genannt, werden die Eingabeparameter verändert, um die Kurve möglichst genau den Messwerten anzupassen.

## 5.2. EWS-Modellierung 1

### 5.2.1. Eingabeparameter

Die Sondenparameter sind in Tabelle 10 dargestellt. Als Randbedingung wird das Modell von Theis (THEIS, 1935) gewählt.

Tabelle 10: Sondenparameter für EWS-Modellierung 1.

|                 |                                     |                        |
|-----------------|-------------------------------------|------------------------|
| SONDENPARAMETER | • Sondenlänge:                      | $1.2 \cdot 10^3$ m     |
|                 | • Bohrdurchmesser:                  | $3.09 \cdot 10^{-1}$ m |
|                 | • Sondeninnendurchmesser:           | $2.35 \cdot 10^{-1}$ m |
|                 | • Innenrohrdurchmesser:             | $6.5 \cdot 10^{-2}$ m  |
|                 | • Randbedingungen mit g-Funktionen: | nein                   |

Um EWS mit EED vergleichen zu können, wird zunächst nur mit einer von zehn möglichen Untergrundschichten gerechnet. Da EED für Koaxialsonden keine Eingaben für die Hinterfüllung erlaubt, werden in der EWS-Modellierung 1 für die Hinterfüllungsparameter dieselben Werte benutzt wie für den Untergrund. Sie sind in der Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Untergrund- und Hinterfüllungsparameter.

|                         |                                |                                    |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| UNTERGRUND- UND         | • Wärmeleitfähigkeit:          | 2.500 W/(mK)                       |
| HINTERFÜLLUNGSPARAMETER | • spez. Wärmekapazität:        | $9.62 \cdot 10^{-2}$ J/(kgK)       |
|                         | • Dichte:                      | $2.6 \cdot 10^3$ Kg/m <sup>3</sup> |
|                         | • Temperaturgradient im Boden: | $2.8 \cdot 10^{-2}$ °C/m           |

Die Soleparameter aus Tabelle 12 werden von der EED-Simulation übernommen.

Tabelle 12: Soleparameter für die EWS-Modellierung 1. Als Sole wurde Wasser verwendet.

|               |                               |                                       |
|---------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| SOLEPARAMETER | • Wärmeleitfähigkeit:         | $5.7 \cdot 10^{-1}$ W/(mK)            |
|               | • Spezifische Wärmekapazität: | $4.202 \cdot 10^3$ J/KgK              |
|               | • Dichte:                     | $1 \cdot 10^3$ Kg/m <sup>3</sup>      |
|               | • Viskosität:                 | $1.5 \cdot 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s |
|               | • Auslegungsmassenstrom:      | 2.9 Kg/s                              |

In der ersten Modellierung werden die Entzugsenergien pro Monat vorgegeben. Die Sonde soll also wie in der EED-Modellierung ohne Unterbruch betrieben werden. Die Entzugsenergiwerte sind in Tabelle 13 aufgelistet. In der selben Tabelle wurden zum Vergleich die Menge Öl in Tonnen aufgeführt, welche zum Erreichen dieser Energiwerte aufzuwenden wäre.

Tabelle 13: Entzugsenergieen pro Monat und als Vergleich die nötige Menge Öl, welche die gleiche Menge Energie liefert.

| MONAT        | ENERGIEWERTE           | MENGE ÖL             |
|--------------|------------------------|----------------------|
| November 96  | $2.793 \cdot 10^4$ kWh | $2.394 \cdot 10^3$ t |
| Dezember 96  | $2.948 \cdot 10^4$ kWh | $2.527 \cdot 10^3$ t |
| Januar 97    | $3.068 \cdot 10^4$ kWh | $2.630 \cdot 10^3$ t |
| Februar 97   | $2.105 \cdot 10^4$ kWh | $1.804 \cdot 10^3$ t |
| März 97      | $2.071 \cdot 10^4$ kWh | $1.775 \cdot 10^3$ t |
| April 97     | $2.564 \cdot 10^4$ kWh | $2.198 \cdot 10^3$ t |
| Mai 97       | $2.333 \cdot 10^4$ kWh | $2.000 \cdot 10^3$ t |
| Juni 97      | $1.241 \cdot 10^4$ kWh | $1.064 \cdot 10^3$ t |
| Juli 97      | $1.095 \cdot 10^4$ kWh | $9.334 \cdot 10^2$ t |
| August 97    | $1.089 \cdot 10^4$ kWh | $9.334 \cdot 10^2$ t |
| September 97 | $1.675 \cdot 10^4$ kWh | $1.436 \cdot 10^3$ t |
| Oktober 97   | $2.489 \cdot 10^4$ kWh | $2.133 \cdot 10^3$ t |

Die Simulationslänge ist drei Jahre, Simulationsbeginn ist wiederum im Monat November.

### 5.2.2. Resultate:

Die EWS-Modellierung 1 wurde für den Zeitraum November 1996 bis Oktober 1997 berechnet. In der Abbildung 17 ist das Resultat der Modellierung im Vergleich mit den gemessenen Temperaturen der Erdwärmesonde Weissbad aufgetragen. Geplottet ist das Mittel von Einlass- und Austrittstemperaturen. Wie die EED-Modellierung 1 hat auch EWS sehr hohe Temperaturen berechnet. Die Abweichungen betragen ungefähr 8 °C im Winter und knapp 11 °C in den Sommermonaten. In der Tabelle 14 sind die minimalen und die maximalen Temperaturunterschiede zwischen den Messresultaten und der EWS-Modellierung 1 dargestellt. Hier zeigt sich, dass vor allem in den Sommermonaten grosse Abweichungen zwischen dem Modell und den Messresultaten bestehen. Der Grund dürfte darin liegen, dass das Modell mit zu hohen Wärmeflüssen von der Erdoberfläche rechnet. In den Sommermonaten ist dieser Wärmefluss höher,

deshalb vergrößert sich der Fehler. Vielleicht lässt sich dieser Fehler mit einer tieferen Oberflächentemperatur vermindern. Dies wird im nächsten Kapitel getestet.

Zusätzlich wurde mit einer Idealen Anbindung der Sonde an die Hinterfüllung bzw. das Erdreich gerechnet. Wie sich in den vorangegangenen Simulationen gezeigt hat, ist das ein kritischer Punkt der Sonde Weissbad.

Tabelle 14: Minimale und maximale Temperaturunterschiede beim Vergleich zwischen den Messresultaten und der Modellierung mit EWS.

|                         |  |           |
|-------------------------|--|-----------|
| RESULTATE ZUM VERGLEICH | • Maximale Abweichung von EWS im August:   | +10.64 °C |
| MESSUNG / EWS:          | • Minimale Abweichung von EWS im November: | +7.32 °C  |

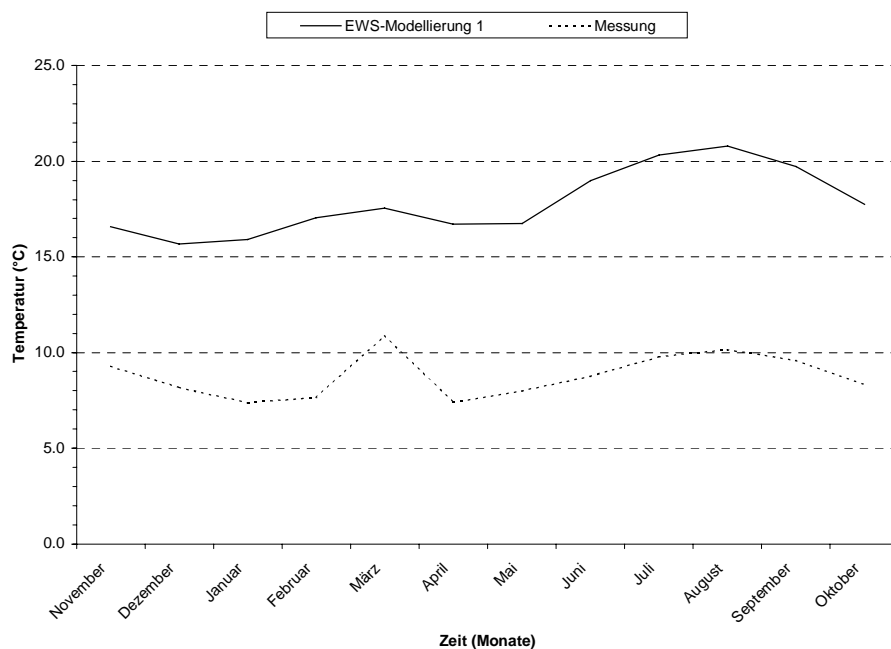


Abbildung 17: EWS-Modellierung 1 im Vergleich mit den gemessenen Temperaturen.

In der Abbildung 18 wird die EWS-Modellierung 1 mit der EED-Modellierung 1 verglichen. Das EWS-Modell liegt maximal 2°C unter der EED-Berechnung, wie aus den Resultaten der Tabelle 15 entnommen werden kann. Zudem reproduziert die EWS-Kurve den Verlauf der Messkurve besser. Die Annahme, die Erde sei bis zu einer Tiefe von 1200 m homogen, bewirkt wahrscheinlich einen sehr grossen Fehler. Nicht nur die Untergrundparameter sind davon betroffen, sondern auch die interne Berechnung der Widerstände durch EWS. In jeder Schicht wird eine eigene Fluidtemperatur  $T_f$ , eine Bohrlochtemperatur  $T_b$  und ein eigener spezifischer Wärmeeintrag  $\dot{q}$  berechnet. Prinzipiell können daher mit EWS zehn mal tiefere Erdwärmesonden be-

rechnet werden als mit EED. Dieser Vorteil wurde in der Modellierung nicht ausgenutzt. Der Effekt soll in der Sensitivitätsanalyse modelliert werden.

Tabelle 15: Minimale und maximale Temperaturunterschiede zwischen dem EED- und EWS-Modell.

|                         |   |
|-------------------------|---|
| RESULTATE ZUM VERGLEICH | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale Abweichung von EWS im Juni: -2.01 °C</li> <li>• Minimale Abweichung von EWS im April: -0.17 °C</li> </ul> |
| EED / EWS:              |   |

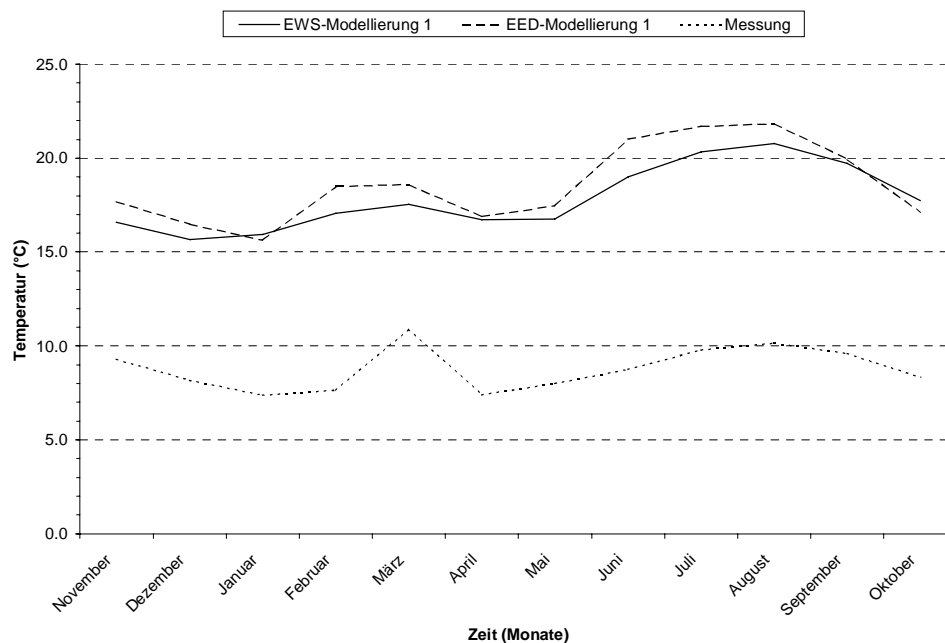


Abbildung 18: Vergleich zwischen EED-Modellierung 1, EWS-Modellierung 1 und den gemessenen Austrittstemperaturen.

In der Abbildung 19 wird die EWS-Modellierung mit dem FRACTure-Modell von M.Salton (SALTON, 1999) verglichen. Wie schon in Kapitel 3.2.2. beschrieben, ist die FRACTure-Simulation durch das Einbeziehen der Einlasstemperaturen natürlich genauer als Simulationen, welche von Energiewerten ausgehen. Die EWS-Berechnung liegt im August knapp 7°C über der FRACTure-Berechnung. Dennoch zeigen die beiden Kurven einen ähnlichen Verlauf. In der Tabelle 16 sind die minimalen und maximalen Temperaturunterschiede zwischen der FRACTure-Modellierung von SALTON (1999) und der EWS-Modellierung 1 dargestellt.



Tabelle 16: Minimale und Maximale Temperaturunterschiede beim Vergleich FRACTure (Salton) und EWS.

|                         |  |          |
|-------------------------|--|----------|
| RESULTATE ZUM VERGLEICH | • Maximale Abweichung von EWS im August:   | +6.75 °C |
| FRACTure / EWS:         | • Minimale Abweichung von EWS im November: | +2.98 °C |

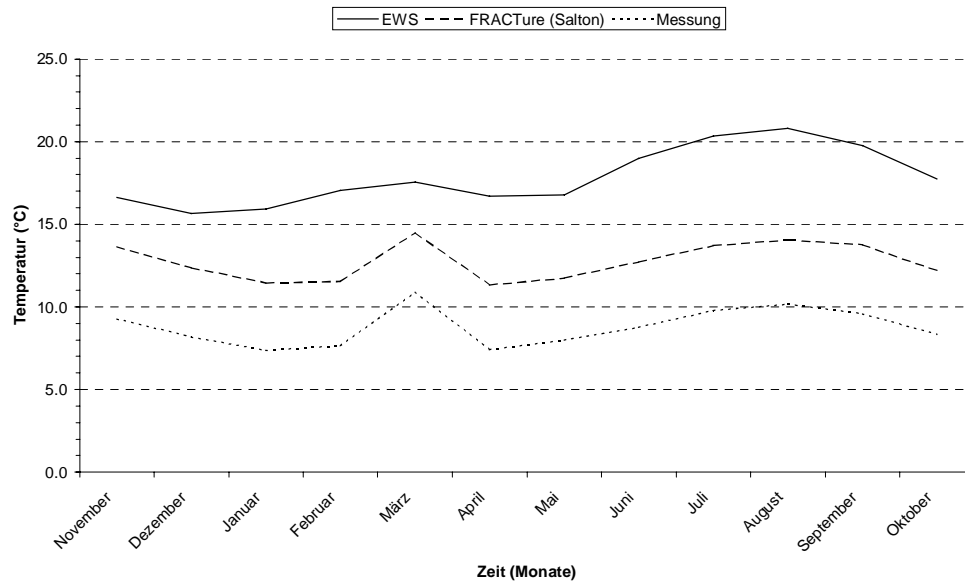


Abbildung 19: Vergleich zwischen der EWS- und der FRACTure-Simulation. Die Berechnungen wurden für das Jahr 1997/1998 gemacht.

### 5.3. Sensitivitätsanalysen

In diesem Kapitel soll der Einfluss derjenigen Parameter getestet werden, für die in Kapitel 3.3 noch keine Sensitivitätstests durchgeführt wurden. Zusätzlich wird der Einfluss der An- bzw. Abschaltvorgängen, sowie unterschiedlicher Randbedingungen (Trichterformel von Theis, g-Funktionen) untersucht.

#### 5.3.1. Modellierung mit Hinterfüllung

Bei der EWS-Modellierung 1 wurde auf eine Hinterfüllung verzichtet, um mit EED vergleichbare Resultate zu erhalten. Nun sollen mögliche Hinterfüllungswerte ins Modell miteinbezogen werden. In der Tabelle 17 sind die Parameter für zwei mögliche Hinterfüllungsmaterialien aufgeführt.

Tabelle 17: Benutzte Hinterfüllungsparameter für die Sensitivitätsanalyse.

|                  |   |
|------------------|---|
| HINTERFÜLLUNG 1: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeleitfähigkeit: 1.0 W/(mK)</li> <li>• spez. Wärmekapazität: <math>3.04 \cdot 10^{+3}</math> J/(kgK)</li> <li>• Dichte: <math>1.18 \cdot 10^{+3}</math> Kg/m<sup>3</sup></li> </ul> |
| HINTERFÜLLUNG 2: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeleitfähigkeit: 2.0 W/(mK)</li> <li>• spez. Wärmekapazität: <math>1.28 \cdot 10^{+3}</math> J/(kgK)</li> <li>• Dichte: <math>1.5 \cdot 10^{+3}</math> Kg/m<sup>3</sup></li> </ul>  |

Die Abbildung 20 illustriert die Ergebnisse der Analyse mit zwei verschiedenen Hinterfüllungsmaterialien im Vergleich mit der modellierten Kurve ohne Hinterfüllung (resp. Gestein als Hinterfüllung). Während die Parameter der Hinterfüllung 2 fast keinen Einfluss auf die Resultate haben, sinken die Fluidtemperaturen mit den Werten der Hinterfüllung 1 um bis zu 0.6 °C, wie in Tabelle 18 ersichtlich ist. Die Hinterfüllung hat also bei EWS einen sehr geringen Einfluss auf die Fluidtemperaturen

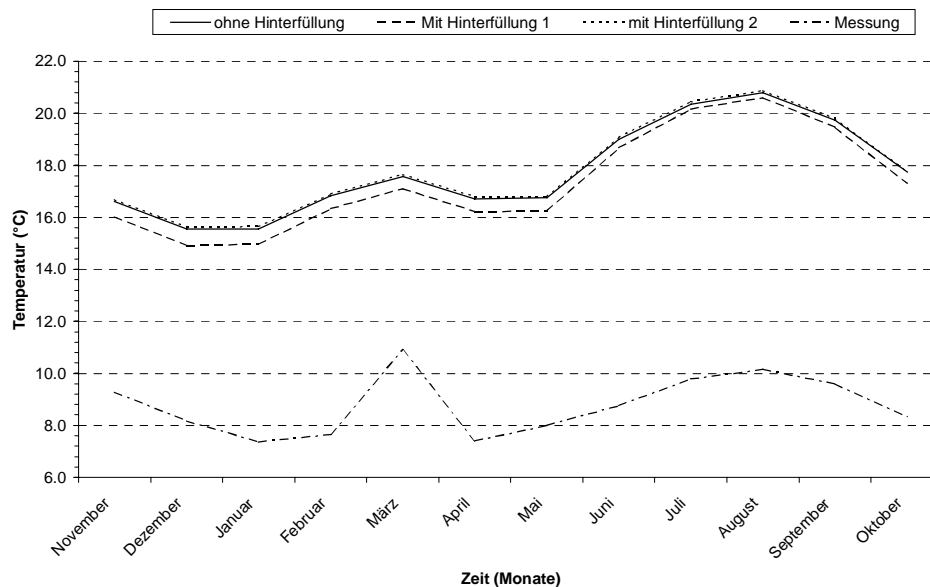


Abbildung 20: Sensitivitätstest mit verschiedenen Hinterfüllungsmaterialien.

Tabelle 18: Minimale und maximale Abweichungen der Simulation ohne resp. mit Hinterfüllung 1.

|                 |  |
|-----------------|--|
| HINTERFÜLLUNG 1 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale Abweichung im Dezember: <math>-0.64\text{ °C}</math></li> <li>• Minimale Abweichung im Juli: <math>-0.18\text{ °C}</math></li> </ul> |
|-----------------|--|

### 5.3.2. An- und Abschalten der Wärmepumpe

In EWS kann für jeden Monat die tägliche Sondenlaufzeit definiert werden. Ausserhalb der Laufzeit wird der Sondendurchsatz auf Null gesetzt. Zudem besteht die Möglichkeit, im Februar ein mehrtägigen Dauerentzug zu simulieren, da in diesem Monat in der Regel die tiefsten Quellentemperaturen auftreten.

Die Abbildung 21 zeigt Abschaltzyklen während des Monats Februar und März. Ende Februar wurde ein 5 tägiger Dauerentzug simuliert, während dem die Austrittstemperatur auf den tiefsten Wert sinkt.

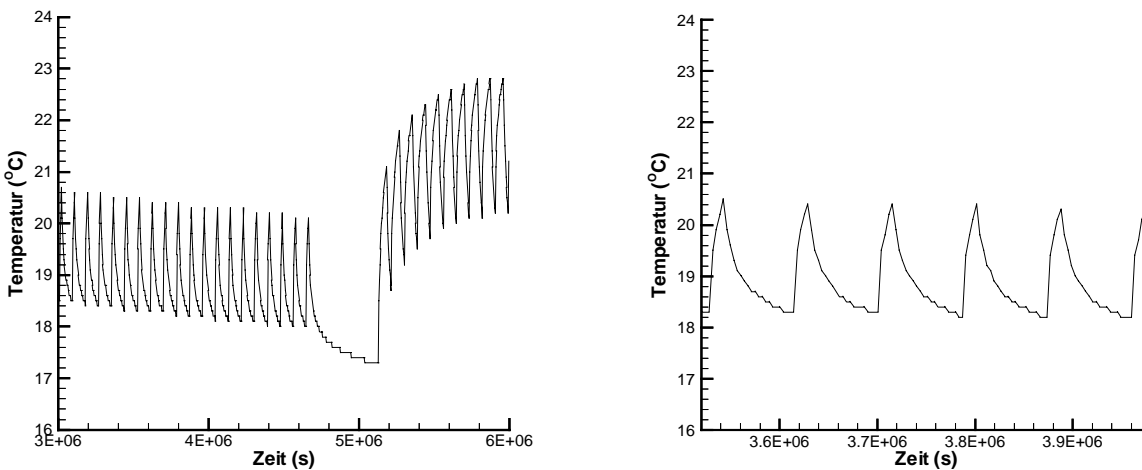


Abbildung 21: In der linken Graphik sind die Austrittstemperaturen des Sondenfluids bei 20 Stunden Laufzeit pro Tag von Ende Februar bis Anfang März dargestellt. Ende Februar war die Sonde während 5 Tagen im Dauerbetrieb. Rechts sind 5 Laufzeitzyklen zu je 20 Stunden Laufzeit aufgezeichnet.

Die tiefe Erdwärmesonde Weissbad ist natürlich nicht durchgehend in Betrieb. Aus den Messprotokollen von Oekoplan AG kann die Laufzeit der Sonde herausgelesen werden. In einer nächsten Modellierung soll nun der Einfluss dieser Laufzeitzyklen eruiert werden.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt. Die Simulation mit durchgehendem Betrieb ergibt gemäss Tabelle 19 um bis zu 4.5°C höhere Sondenfluidtemperaturen als der zyklische Betrieb. Es entspricht den Erwartungen, dass durchlaufende Sonden im Allgemeinen bei gleicher Entzugsenergie höhere Temperaturen aufweisen, da die Entzugsleistung (Entzugsenergie pro Zeit) kleiner wird.

Tabelle 19: Maximale und minimale Abweichungen zwischen durchgehendem und zyklischem Betrieb der Erdwärmepumpe.

|   |  |
|---|--|
| VERGLEICH DURCHGEHENDER /<br>ZYKLISCHER BETRIEB | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale Abweichung im August: +4.52 °C</li> <li>• Minimale Abweichung im Dezember: +0.99 °C</li> </ul> |
|---|--|

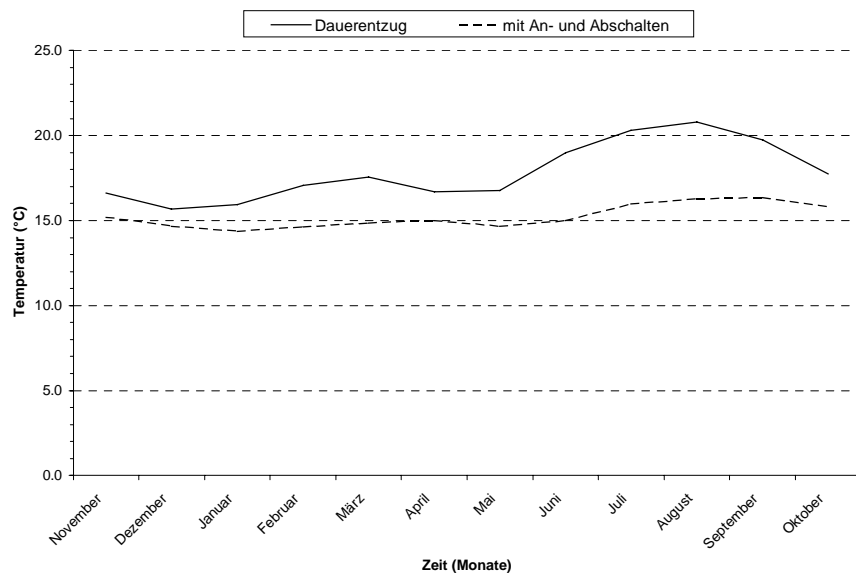


Abbildung 22: EWS-Modellierung 1 (Dauerbetrieb) im Vergleich mit den Resultaten vom zyklischen Betrieb der Erdwärmesonde.

### 5.3.3. Simulation mit mehreren unterschiedlichen Erdschichten

Gemäss Tabelle 20 wurden im Bohrloch Weissbad einige geophysikalische Untersuchungen durchgeführt (HOLUB, P & RÜEGG, F., 1996). Es ist sehr schwierig, aus diesen Daten die benötigten Parameter (Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Wärmekapazität  $c_p$  und Dichte  $\rho$ ) in Erfahrung zu bringen.

Tabelle 20: Durchgeführte geophysikalische Untersuchungen in der Bohrung Weissbad (HOLUB, P & RÜEGG, F., 1996):

|                         |  |
|-------------------------|--|
| BOHRLOCH-LOGS WEISSBAD: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4-Arm Kaliber</li> <li>• Gamma-Ray</li> <li>• Neutron-Neutron</li> <li>• Widerstand (FEL)</li> <li>• Sonic</li> <li>• Temperatur</li> </ul> |
|-------------------------|--|

Die gemittelten Daten des Sonic-Logs für jede der zehn Gesteinsschichten sind in Tabelle 21 dargestellt. Daraus wurden die Parameter mit Hilfe früherer Messungen im Schweizer Molassebecken (LEU ET AL., 1999) grob geschätzt. Da die Spannweite möglicher Parameter ziemlich gross ist, wurden zwei Modelle erstellt, welche die mögliche obere bzw. untere Grenze des Spielraumes markieren.

Das Schichtmodell 1 aus Tabelle 21 markiert die obere Grenze für die Leitfähigkeits- bzw. Dichtewerte und die untere Grenze für die Wärmekapazitätswerte der Gesteinsschichten. Gemäss Tabelle 22 ergibt sich als maximale Abweichung eine Temperaturdifferenz von gut einem Grad zur modellierten Kurve mit einer Gesteinsschicht.

Tabelle 21: Messergebnisse des Sonic-Logs in Weissbad (HOLUB, P & RÜEGG, F., 1996) und angenommene Untergrundparameter für Schichtmodell 1.

| SCHICHTMODELL 1 | TIEFE (m) | SONIC-LOG (m/s) | $\lambda$ (W/mK) | $c_p$ (J/KgK) | $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------|-----------|-----------------|------------------|---------------|-----------------------------|
|                 | 0-120     | 3000            | 2.5              | 890           | 2600                        |
|                 | 120-240   | 3800            | 2.4              | 900           | 2500                        |
|                 | 240-360   | 4300            | 2.7              | 1000          | 2550                        |
|                 | 360-480   | 4200            | 2.7              | 1000          | 2550                        |
|                 | 480-600   | 4000            | 2.6              | 900           | 2500                        |
|                 | 600-720   | 4800            | 2.9              | 1200          | 2550                        |
|                 | 720-840   | 4300            | 2.7              | 1000          | 2550                        |
|                 | 840-960   | 4000            | 2.6              | 900           | 2500                        |
|                 | 960-1080  | 4000            | 2.6              | 900           | 2500                        |
|                 | 1080-1200 | 4800            | 2.9              | 1200          | 2550                        |

Tabelle 22: Maximale und minimale Abweichungen des Schichtmodelles 1 zur Modellkurve mit einer Gesteinsschicht.

|                 |  |
|-----------------|--|
| SCHICHTMODELL 1 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale Abweichung im Januar: +1.02 °C</li> <li>• Minimale Abweichung im August/September: +0.52 °C</li> </ul> |
|-----------------|--|

Schliesslich wurde ein zweites Schichtmodell erstellt, bei dem tiefere Leitfähigkeits- und Dichtewerte und höhere Wärmekapazitätswerte verwendet wurden. Die Parameter für das Schichtmodell 2 sind in Tabelle 23 dargestellt. Nach Tabelle 24 beträgt maximale Temperaturdifferenz im Januar 0.7°C.

Die Resultate sind in Abbildung 23 graphisch dargestellt. Der Fehler bei der Benutzung von nur einer Gesteinsschicht, wie dies zum Beispiel in EED der Fall ist, liegt bei höchstens einem Grad, wie dieser Versuch zeigt. Er ist also kleiner als anfänglich angenommen.

Tabelle 23: Messergebnisse des Sonic-Logs in Weissbad und angenommene Untergrundparameter für Schichtmodell 2.

| SCHICHTMODELL 2 | TIEFE (m) | $\lambda$ (W/mK) | $c_p$ (J/KgK) | $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------|-----------|------------------|---------------|-----------------------------|
|                 | 0-120     | 2.5              | 800           | 2500                        |
|                 | 120-240   | 2.3              | 890           | 2400                        |
|                 | 240-360   | 2.5              | 1000          | 2450                        |
|                 | 360-480   | 2.5              | 1000          | 2450                        |
|                 | 480-600   | 2.6              | 900           | 2400                        |
|                 | 600-720   | 2.7              | 1100          | 2500                        |
|                 | 720-840   | 2.5              | 1000          | 2450                        |
|                 | 840-960   | 2.4              | 900           | 2400                        |
|                 | 960-1080  | 2.4              | 900           | 2400                        |
|                 | 1080-1200 | 2.7              | 1150          | 2500                        |

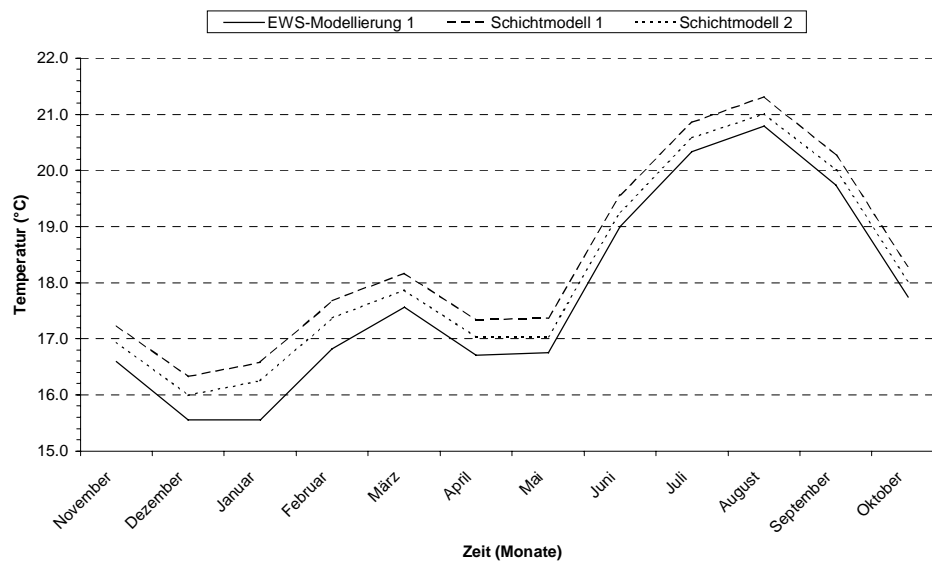


Abbildung 23: Vergleich zwischen den Schichtmodellen 1 und 2 und dem ursprünglichen Modell mit einer Gesteinsschicht.

Tabelle 24: Maximale und minimale Abweichungen des Schichtmodelles 2 zur Modellkurve mit einer Gesteinsschicht.

|                 |  |
|-----------------|--|
| SCHICHTMODELL 2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale Abweichung im Januar: +0.69 °C</li> <li>• Minimale Abweichung im August: +0.22 °C</li> </ul> |
|-----------------|--|

### 5.3.4. Vergleich zwischen der Theis-Lösung und der g-Funktion

Die EWS-Modellierung 1 wurde mit der Theis-Lösung durchgeführt. Zum Vergleich soll nun das Modell mit denselben Parametern mit der g-Funktion für eine Einzelsonde (Abbildung 17) gerechnet werden.

Die Abweichungen zwischen den Modellen mit den verschiedenen Ansätzen bewegen sich von 0 bis 0.6 °C. (Tabelle 25) Vor allem im Dezember und Januar liegt die Modellierung mit dem Ansatz von Theis deutlich tiefer. Für eine weitere Modellierung wird aus diesem Grunde der Ansatz von Theis bevorzugt.

Abbildung 24 verdeutlicht, dass die Kurven ausser von November bis Februar fast identisch verlaufen.

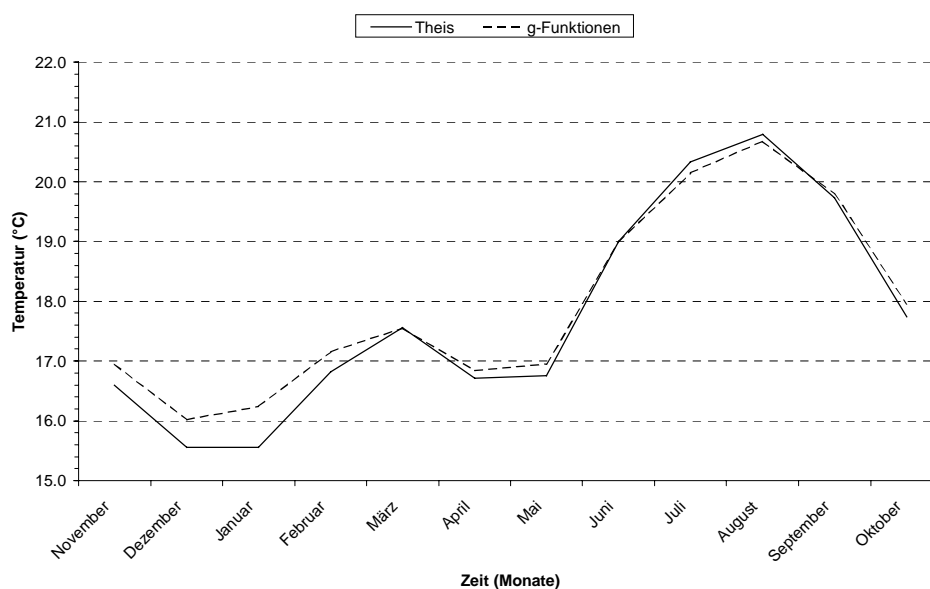


Abbildung 24: Vergleich zwischen der Modellierung mit dem Ansatz von Theis und der g-Funktion für eine Einzelsonde.

Tabelle 25: Maximale bzw. minimale Abweichung der Modellierung mit der g-Funktion im Vergleich zur Modellierung mit dem Ansatz von Theis.

|                  |  |
|------------------|--|
| THEIS/G-FUNKTION | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale Abweichung im Januar: +0.68°C</li> <li>• Minimale Abweichung im März/Juni: - 0.01°C</li> </ul> |
|------------------|--|



### 5.3.5. Variation des Widerstandes

Nach Kapitel 4.4.2 kann EWS die Widerstände intern berechnen, wenn die Parameter für  $R_a$  und  $R_b$  Null gesetzt werden. Dies wurde für das EWS-Modell 1 so durchgeführt. Das Programm berechnete ein  $R_a = 5.4 \cdot 10^{-2}$  Km/W und ein  $R_b = 2.2 \cdot 10^{-2}$  Km/W.

Bei einer gut hinterfüllten Sonde sollten sich  $R_a$  und  $R_b$  nicht stark unterscheiden. Beim  $R_b$ -Wert muss zusätzlich der Kontaktwiderstand zwischen Sondenrohr und Hinterfüllung berücksichtigt werden. Wie sich in der EED-Simulation gezeigt hat, befinden sich bei der Erdwärmesonde Weissbad wahrscheinlich Lufteinschlüsse zwischen Sondenverrohrung und Hinterfüllung. Aus diesem Grund muss der  $R_b$ -Wert angepasst werden. Der Wert „Effective Borehole Thermal Resistance“ aus dem Programm EED ist vergleichbar, wenn auch nicht ganz identisch mit dem  $R_b$ -Wert von EWS. Der Unterschied liegt in der Bezugstemperatur des Fluids und in der Bohrlochtemperatur. In EWS sind diese Temperaturen für jede Tiefe angepasst, in EED hingegen werden sie über die gesamte Tiefe gemittelt.

In der folgenden Simulation werden vier verschiedene Modelle gerechnet, und mit der internen Berechnung der Widerstände von EWS verglichen. Die Modelle sind in Tabelle 26 aufgelistet.

Tabelle 26: Widerstandswerte der gerechneten Modelle.

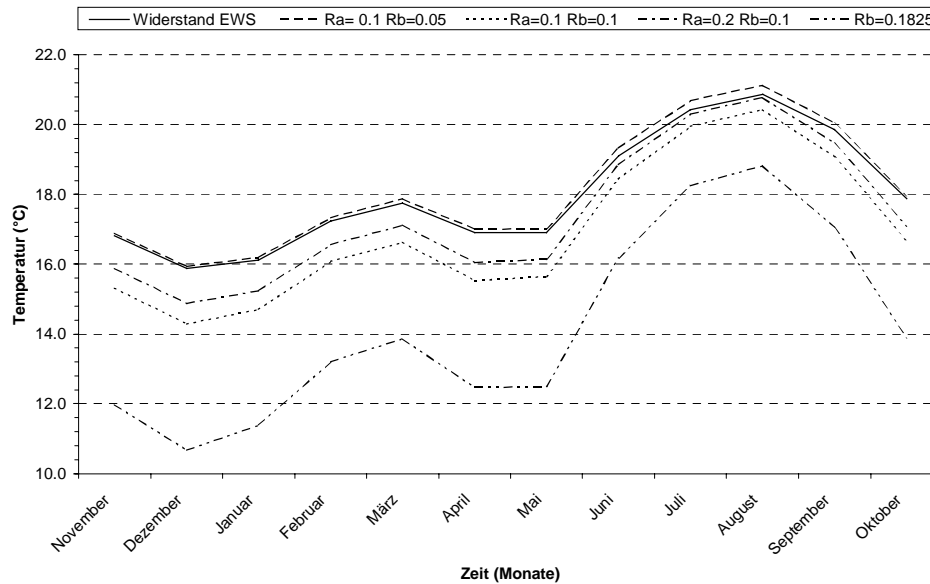
|                             |  |
|-----------------------------|--|
| BENUTZTE WIDERSTÄNDE (Km/W) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• EWS-intern: <math>R_a = 5.4 \cdot 10^{-2}</math> <math>R_b = 2.2 \cdot 10^{-2}</math></li> <li>• 1.Modell: <math>R_a = 1 \cdot 10^{-1}</math> <math>R_b = 5 \cdot 10^{-2}</math></li> <li>• 2.Modell: <math>R_a = 1 \cdot 10^{-1}</math> <math>R_b = 1 \cdot 10^{-1}</math></li> <li>• 3.Modell: <math>R_a = 2 \cdot 10^{-1}</math> <math>R_b = 1 \cdot 10^{-1}</math></li> <li>• 4.Modell: <math>R_b = 1.83 \cdot 10^{-1}</math> EWS-intern: <math>R_a = 5.4 \cdot 10^{-2}</math></li> </ul> |
|-----------------------------|--|

Eine Erhöhung von  $R_b$  bringt natürlich eine Verringerung der Fluidtemperatur. Eine sehr starke Abkühlung des Fluides von bis zu 5.2 °C im Dezember (Tabelle 27) ergibt sich mit dem von EED berechneten Widerstandswert  $R_b = 1.83 \cdot 10^{-1}$  Km/W. Wie sich bei der EED-Modellierung gezeigt hat, liegt dieser Wert mit grosser Wahrscheinlichkeit am nächsten beim realen Wert von Weissbad.

In Abbildung 25 sind die Kurven mit verschiedenen Widerstandswerten graphisch dargestellt, und mit der EWS-Modellierung 1 (interne Berechnung vom Widerstand) in Relation gesetzt.

Tabelle 27: Vergleich zwischen der Internen Widerstandsberechnung von EWS und den Resultaten von Modell 4.

|                      |  |
|----------------------|--|
| VERGLEICH WIDERSTAND | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale Abweichung im Dezember: +5.21 °C</li> <li>• Minimale Abweichung im August: +2.04 °C</li> </ul> |
|----------------------|--|

Abbildung 25: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen Widerständen  $R_a$  und  $R_b$ .

## 5.4. EWS-Modellierung 2

### 5.4.1. Eingabeparameter

Für die EWS-Modellierung 2 sollen die Parameter aus der Modellierung 1 gemäss der Sensitivitätsanalyse von Kapitel 5.3 so angepasst werden, dass die Modellkurve besser mit der Messkurve übereinstimmt. Dabei soll aber beachtet werden, dass realistische Parameter verwendet werden.

Die benutzten Eingabewerte für die Gesteinsschichten sind in Tabelle 28 zusammengestellt.

Tabelle 28: Parameter für die zehn Erdschichten.

| ERDSCHICHTEN | TIEFE (m) | $\lambda$ (W/mK) | $c_p$ (J/KgK) | $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|-----------|------------------|---------------|-----------------------------|
|              | 0-120     | 2.4              | 800           | 2700                        |
|              | 120-240   | 2.2              | 850           | 2600                        |
|              | 240-360   | 2.4              | 900           | 2650                        |
|              | 360-480   | 2.4              | 900           | 2650                        |
|              | 480-600   | 2.5              | 850           | 2600                        |
|              | 600-720   | 2.6              | 1000          | 2700                        |
|              | 720-840   | 2.4              | 900           | 2650                        |
|              | 840-960   | 2.3              | 850           | 2600                        |
|              | 960-1080  | 2.3              | 850           | 2600                        |
|              | 1080-1200 | 2.6              | 1000          | 2600                        |

Unverändert für die EWS-Modellierung 2 übernommen wurden die Eingabeparameter für die Sonde und die Sole aus Tabelle 10 und 12, sowie die Energiewerte aus Tabelle 13 (Kapitel 5.2.1). Die Parameter für die Hinterfüllung wurden gemäss Tabelle 29 verändert.

Tabelle 29: Hinterfüllungsparameter für die EWS-Modellierung 2

| HINTERFÜLLUNGSPARAMETER |  |
|-------------------------|--|
| • Wärmeleitfähigkeit:   | $5 \cdot 10^{-1}$ W/(mK)               |
| • spez. Wärmekapazität: | $3 \cdot 10^{+3}$ J/(kgK)              |
| • Dichte:               | $1.18 \cdot 10^{+3}$ Kg/m <sup>3</sup> |

Die Temperatur an der Erdoberfläche wurde wie in der EED-Simulation auf  $8.7^{\circ}\text{C}$  gesenkt. Der interne Widerstand  $R_b$  wird auf den Wert  $1.83 \cdot 10^{-1}$  gesetzt. Alle anderen Parameter werden beim Wert aus der EWS-Modellierung 1 von Kapitel 5.2 belassen.

### 5.4.2. Resultate

Das Temperaturniveau der EWS-Modellierung 2 konnte im Vergleich zu EWS-Modellierung 1 um bis zu  $8^{\circ}\text{C}$  gesenkt werden. Die Modellierung 2 ist zusammen mit den Messwerten in Abbildung 26 dargestellt.

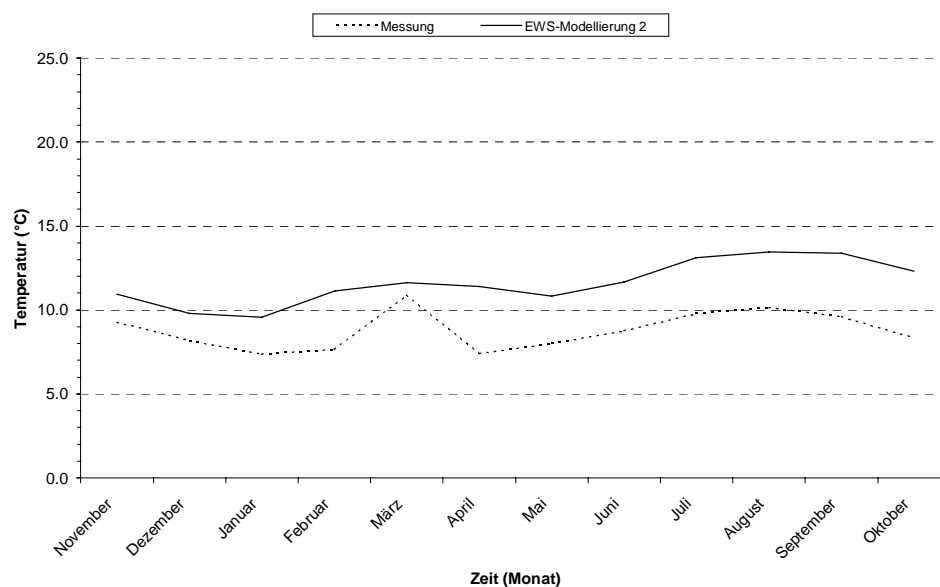


Abbildung 26: Graphische Darstellung der EWS-Modellierung 2 und den Messwerten von Oekoplan AG.

Das Temperaturniveau der Messwerte konnte aber nicht ganz erreicht werden. Gemäss Tabelle 30 besteht die grösste Abweichung im April und im Oktober mit  $4^{\circ}\text{C}$ . Eine mögliche Erklärung für die immer noch grossen Differenzen zwischen Modell und Messung wäre, dass die Sonde vielleicht noch etwas schlechter an die Hinterfüllung angebunden ist als angenommen.

Weitere sehr grosse Unsicherheitsfaktoren sind die Parameter der Erde. Es gibt keine Leitfähigkeits-, Widerstands- und Dichtemessungen des Untergrundes in Weissbad. Die Bohrung liegt im Bereich der Weissbad- und der Speeraufschubung. Das Gestein ist stark verfault und die Untere Meeresmolasse liegt in Weissbad an der Erdoberfläche. Durch diese komplizierte Geologie ist es sehr schwierig ohne Messungen die Parameter auch nur zu schätzen.

Tabelle 30: Differenzen zwischen EWS-Modell 2 und den Messwerten.

|                        |  |
|------------------------|--|
| VERGLEICH MODELL 2 UND | <ul style="list-style-type: none"><li>• Maximale Abweichung im April/Oktober: +4.00 °C</li><li>• Minimale Abweichung im August: +0.74 °C</li></ul> |
| MESSUNG                |  |

## 5.5. Zusammenfassung der Resultate

Die Berechnungen wurden mit einer modifizierten, für Koaxialsonden angepassten Programmversion von EWS durchgeführt. In einer ersten Simulation wurden dieselben Eingabeparameter benutzt wie für die EED-Simulation, um ein Vergleich zwischen den beiden Programmen zu ziehen. Beide Programme errechneten um 8 bis 10°C zu hohe Temperaturen im Vergleich mit den Messwerten von Oekoplan. Die von den zwei Programmen errechneten Temperaturen unterscheiden sich um maximal 2°C im ersten Betriebsjahr. Die Kurve der EWS-Berechnung zeigt allgemein über das ganze Jahr eine bessere Übereinstimmung im Temperaturverlauf mit den gemessenen Werten.

Die Prognose, mit der Modellierung von 10 Erdschichten eine bessere Anpassung der EWS-Werte an die Messkurve zu erreichen, hat sich gemäss Kapitel 5.3.3 nicht bestätigt. Die beiden untersuchten Schichtmodelle ergaben mittlere Temperaturdifferenzen von etwa +0.8 resp. +0.4 °C. Der Fehler, der mit einer homogen modellierten Erdschicht entsteht, ist also im Vergleich zu den grossen Differenzen der Berechnungen zu den Messwerten klein.

Eine sehr grosse Sensitivität auf die Austrittstemperatur des Fluids haben die Widerstandswerte  $R_a$  und  $R_b$ . Die Sonde Weissbad ist aller Wahrscheinlichkeit nach schlecht hinterfüllt. Mit einem von EED berechneten Widerstandswert  $R_b$  von 0.18 Km/W sinken die Austrittstemperaturen gemäss EWS-Berechnung um bis zu 5°C. Da die Qualität der Anbindung der Hinterfüllung an die Verrohrung im Feld nicht untersucht werden kann, ist es schwierig, passende Widerstandswerte zu finden.

Mit den aus den Sensitivitätsanalysen gewonnenen Erkenntnissen wurde eine zweite Modellierung mit angepassten Parametern durchgeführt. Das Temperaturniveau konnte im Vergleich zur Modellierung 1 um bis zu 8°C gesenkt werden. Das Niveau der Messkurve konnte allerdings nur bis auf durchschnittlich etwa 3°C angenähert werden.

Eine mögliche Erklärung für den Temperaturunterschied ist die komplizierte Geologie im Raum Weissbad, die eine Abschätzung der Untergrundverhältnisse ohne genaue Untersuchung der Bohrkerne fast verunmöglicht. Eine zweite Möglichkeit wäre die Anbindung der Hinterfüllung an die Verrohrung, die aus den vorhandenen Daten der Sonde Weissbad nicht abschätzbar ist.

## 6. FRACTure

### 6.1. Einleitung

FRACTure (*Flow, Rock And Coupled Temperature effects*) (KOHL, 1992) ist ein dreidimensionales Finite-Elemente-Programm um hydraulische und elastische Prozesse, Transportprozesse sowie deren Kopplung im Untergrund zu modellieren. Ursprünglich wurde es für die Simulation des Langzeitverhaltens von „Hot Dry Rock“-Systemen entwickelt, im heutigen Stadium kann es zur Simulation verschiedenster Vorgänge aus den Erdwissenschaften benutzt werden.

Jeder der erwähnten physikalischen Prozesse kann unter Einbezug von 1D-, 2D- oder 3D-Elementen, welche lineare oder quadratische Ansatzfunktionen beinhalten können, simuliert werden. In 2D stehen Drei- und Vierecke zur Verfügung, in 3D Pyramiden, Tetraeder oder Prismen. Zur Generierung eines numerischen Gitters erlaubt FRACTure die Kombination von Elementen mit verschiedenen Dimensionen.

Für die Maschengenerierung und das Erstellen einer Eingabedatei für FRACTure wird zusätzliche Software benötigt. In Abbildung 27 sind die benutzten Programme und Eingabefiles, welche für die Simulationen verwendet wurden, dargestellt. Mit folgenden Programmen wurde gearbeitet:

- AUTOCAD: CAD-Programm zur Generierung von 1D, 2D und 3D-Gittern. Für die weitere Verarbeitung der Daten wird ein DXF-File ausgegeben.
- WinFra: Interaktives, menügesteuertes Programm Generierung oder zur Weiterverarbeitung des in AUTOCAD erstellten Maschengitters. In WinFra werden zudem die verschiedenen Materialienparameter definiert und den Materialien zugewiesen. Ausserdem werden hier die Randbedingungen gesetzt, und die Transformation vom 2D- zum 3D-Gitter durchgeführt. Mit dem Befehl „Refine“ kann das Maschennetz automatisch verfeinert werden. Für die weitere Verarbeitung wird ein Eingabefile im FRACTure-Format (input.dat) ausgegeben. Das erstellte Gitter kann aber auch als TECPLOT-File zur graphischen Darstellung, oder als DXF-File zur Wiederverwendung in AUTOCAD ausgegeben werden.
- FRACTure: Für die Durchführung der Berechnung benötigt FRACTure die Datei „input.dat“. Die Ausgabedateien variieren nach Art der Berechnung.
- TECPLOT: Visualisierungsprogramm zur Darstellung der FRACTure-Ausgabedateien.

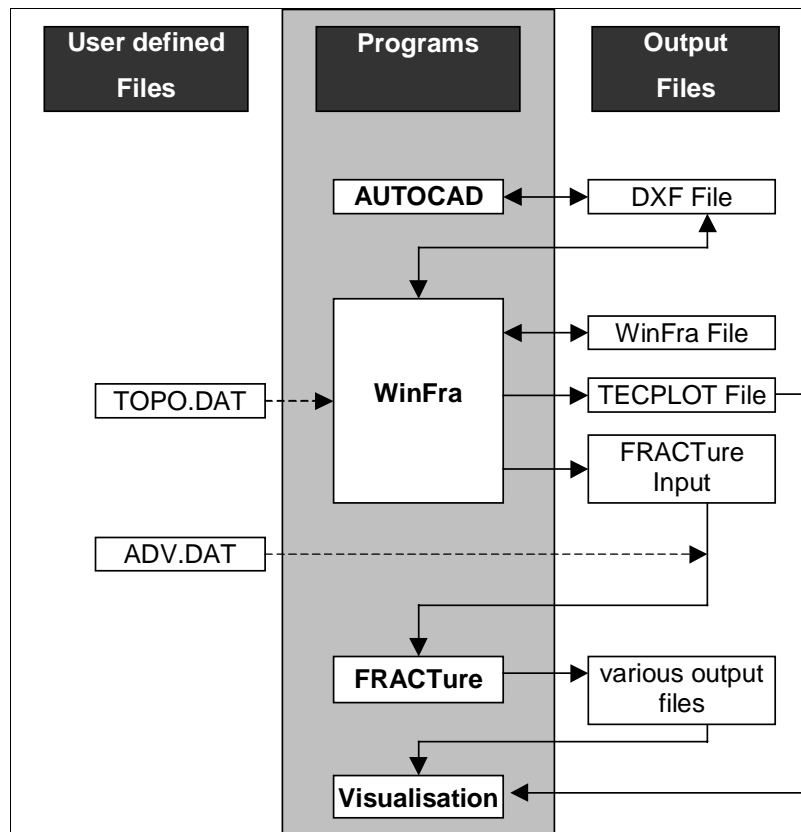


Abbildung 27: Programme und Ausgabedateien zur Erstellung und Berechnung eines FE-Modelles mittels FRACTure (nach KOHL, 1992).



## 6.2. Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel soll eine kurze Übersicht über die wichtigsten thermischen und hydraulischen Transportphänomene, welche für die Modellierungen relevant sind, gegeben werden.

### 6.2.1. Thermik

Im Erduntergrund bilden feste und fluide Phase zwei verschiedene Systeme. Die feste Phase wird als Gesteinsmatrix, die flüssige Phase als Grundwasser in Poren oder Klüften definiert. Die Wärmeenergie wird hauptsächlich auf zwei verschiedene Arten transportiert: als reine Wärmeleitung über beide Phasen und als freie oder erzwungene Wärmekonvektion über das Poren- bzw. Kluftwasser. Die freie Konvektion basiert auf der Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser. Erwärmtes Wasser kann wegen niedrigerer Dichte aus der Tiefe aufsteigen und Konvektionszyklen in Gang setzen. Die erzwungene Konvektion (Advektion) wird durch Druckunterschiede angetrieben.

Der Wärmetransport für die feste und flüssige Phase wird durch zwei unterschiedliche Gleichungen ausgedrückt, die untereinander mithilfe des Wärmeübergangskoeffizienten kommunizieren. Dieser kann folgendermassen definiert werden:

$$h = \frac{\rho_{trans}}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (6.1)$$

h: Wärmeübergangskoeffizient, [h] = W/m<sup>2</sup>K

$\rho_{trans}$ : thermische Leistung durch den Wärmeübergang, [ $\rho_{trans}$ ] = W

A: Austauschfläche, [A] = m<sup>2</sup>

T<sub>i</sub>: Temperatur eines Körpers, [T<sub>i</sub>] = K

Für die fluide Phase kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$\underbrace{\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t}}_{\text{zeitliche Variation}} = \underbrace{-\rho_f c_f v_f \nabla T_f}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\nabla(\lambda_f \nabla T_f)}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{h(v_f) \cdot A \cdot (T_s - T_f)}_{\text{Wärmeübergang}} + \underbrace{f_f}_{\text{Quellen}} \quad (6.2)$$

und für die feste Phase gilt:

$$\underbrace{\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t}}_{\text{zeitliche Variation}} = \underbrace{\nabla(\lambda_s \nabla T_s)}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{h(v_f) \cdot A \cdot (T_f - T_s)}_{\text{Wärmeübergang}} + \underbrace{f_s}_{\text{Quellen}} \quad (6.3)$$

$\rho$ : Dichte, [ $\rho$ ] = Kg/m<sup>3</sup>

c: spezifische Wärmekapazität, [c] = J/kgK  
 T: Temperatur der entsprechenden Phase, [T] = K  
 t: Zeit, [t] = s  
 $\lambda_s$ : Wärmeleitfähigkeit der festen Phase, [ $\lambda_s$ ] = W/mK  
 $v_f$ : Advektionsgeschwindigkeit, [ $v_f$ ] = m/s  
 $\nabla T$ : Temperaturgradient, [ $\nabla T$ ] = K/m  
 f: Quellen in der entsprechenden Phase, [f] = W/m<sup>3</sup>

Indizes:

f: fluide Phase

s: feste Phase

### 6.2.2. Hydraulik

Hydraulische Prozesse finden in der Erdwärmesonde und in der Hinterfüllung statt. Für die Modellierungen in dieser Arbeit werden nur die hydraulischen Prozesse in der Erdwärmesonde selber berücksichtigt. Aus der Massenerhaltungsgleichung und der Darcy-Gleichung kann die allgemeine Druckgleichung für die Fluidzirkulation in der Sonde beschrieben werden:

$$S \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla [K(\nabla P + \rho_0 g \nabla z - \rho_0 g \nabla z \beta_f \Delta T)] \quad (6.4)$$

S: spezifischer Speicherkoeffizient, [S] = 1/Pa

P: Druck, [P] = Pa

K: hydraulische Leitfähigkeit, [K] = m<sup>2</sup>/Pa·s

g: Erdbeschleunigung, [g] = m/s<sup>2</sup>

$\nabla z$ : Vektor in Richtung z

$\beta_f$ : linearer Ausdehnungskoeffizient des Fluids, [ $\beta_f$ ] = 1/K

$\Delta T$ : Temperaturdifferenz zur ungestörten Anfangsbedingung, [ $\Delta T$ ] = K

Diese lineare Beziehung gilt nur, wenn die Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  kleiner als 10 °C sind.

Für die Hinterfüllung gilt grundsätzlich dasselbe Gesetz, jedoch wird anstelle vom Druck das hydraulische Potential gesetzt.

## 7. Simulation der Erdwärmesonde Weissbad mit FRACTure

### 7.1. Aufbau des numerischen Gitters

#### 7.1.1. Anforderungsprofil

In dieser Arbeit soll ein 2D-Gitter der tiefen Erdwärmesonde Weissbad erstellt und berechnet werden. Das Gitter soll die Erdwärmesonde möglichst genau widerspiegeln. Dazu soll in horizontaler Richtung (x-Richtung) die Steigleitung, die innere Verrohrung, die Sinkleitung und ihre Verrohrung, eine Kontaktzone sowie die Hinterfüllung modelliert werden. Die Kontaktzone zwischen Verrohrung und Hinterfüllung soll den schlechten Kontakt dieser beiden Materialien charakterisieren. Die Strömung des Fluids wird mit 1D-Elementen modelliert. Zwischen -200 und -400 m verringert sich die Ausdehnung der Hinterfüllung, zwischen -550 und -650 m verengt sich die Sinkleitung und nochmals die Hinterfüllung. Die Modellierung der Umgebung der Sonde in x-Richtung soll ausreichend sein um Störungen im Wärmekreislauf zu verhindern.

In vertikaler Richtung (y-Richtung) muss vor allem der Bereich um -1200 m beachtet werden, da an dieser Stelle das Fluid vom vertikalen zum horizontalen Fließen übergeht, und somit eine komplizierte Temperaturverteilung resultiert, welche fein aufgelöst werden soll. Dieses horizontale Fließen des Fluids soll wiederum durch eine Verrohrung eingefasst werden. Danach wird Hinterfüllung bis -1600 m, anschliessend Gestein modelliert.

#### 7.1.2. Gittergenerierung

Das Gitter wird im CAD-Programm AUTOCAD als 2D-Modellierung in Zylinderkoordinaten erstellt und um die y-Achse rotiert. Dies setzt voraus, dass die Sonde selber und das umgebende Gestein um die Tiefenachse rotationssymmetrisch sind. Abbildung 28 zeigt den zu erstellenden Bereich der später rotiert wird, um ein 3D-Modell der Sonde zu erhalten. Der Koordinatenursprung liegt an der Erdoberfläche im Zentrum der Sonde. In x-Richtung wurde bis 1000 m, in y-Richtung bis -3000 m modelliert.

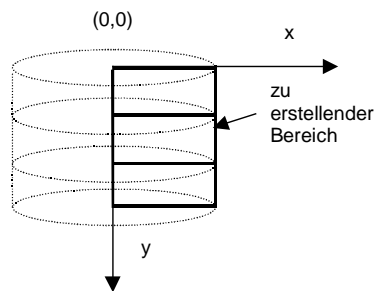


Abbildung 28: Zu erstellender Bereich des Gitters, der später um die y-Achse rotiert wird. (nach KOHL, 1999)

Im Bereich der Sonde muss das Gitter sehr feinmaschig sein, um den grossen thermischen Gradienten zu berücksichtigen. Allerdings wird das Gitter durch die kleinräumige Geometrie in der Sonde automatisch sehr fein. Die Maschen des Umgebungsgesteins werden mit zunehmender Distanz immer grösser. Zusätzlich werden noch Dreieckselemente generiert, um mehrere Maschen zusammenzuführen. So müssen im groben Teil des Gitters weniger Maschen gezeichnet werden. Zudem verkürzt sich die Rechenzeit des Computers, da weniger Gitterpunkte berechnet werden müssen.

In Tabelle 31 sind die modellierten Dimensionen der verschiedenen Materialien in x-Richtung dargestellt. In einer Tiefe von -1200.5 m wird eine untere Verrohrung mit einer Dicke von  $1.4 \cdot 10^{-2}$  m von  $x = 0$  bis zur äusseren Verrohrung eingefügt.

Die Vertikale Auflösung ist in Tabelle 32 dargestellt. Im Bereich der unteren Verrohrung sind die Maschen zwangsläufig kleiner.

Tabelle 31: Auflösung des Maschengitters in x-Richtung mit der modellierten Dicke des jeweiligen Materials. Da das Modell Zylindersymmetrisch ist entsprechen die Werte den Radien.

| TIEFE (m)  | FLUID UP (m)         | VERROHRUNG INNEN (m) | FLUID DOWN (m)       | VERROHRUNG AUSSEN (m) | KONTAKT-ZONE (m)    | HINTERFÜLLUNG (m)     | GESTEIN (m) |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-------------|
| 0 - 200    | $3.05 \cdot 10^{-2}$ | $7.0 \cdot 10^{-3}$  | $9.18 \cdot 10^{-2}$ | $7.0 \cdot 10^{-3}$   | $1.0 \cdot 10^{-3}$ | $1.127 \cdot 10^{-1}$ | 999.75      |
| 400 - 500  | $3.05 \cdot 10^{-2}$ | $7.0 \cdot 10^{-3}$  | $9.18 \cdot 10^{-2}$ | $7.0 \cdot 10^{-3}$   | $1.0 \cdot 10^{-3}$ | $5.27 \cdot 10^{-2}$  | 999.95      |
| 650 - 1200 | $3.05 \cdot 10^{-2}$ | $7.0 \cdot 10^{-3}$  | $7.91 \cdot 10^{-2}$ | $7.0 \cdot 10^{-3}$   | $1.0 \cdot 10^{-3}$ | $2.5 \cdot 10^{-2}$   | 999.98      |

Tabelle 32: Vertikale Auflösung im Bereich der Sonde.

| VERTIKALE AUFLÖSUNG |  |
|---------------------|--|
|                     | • 0 - 1100 m Tiefe: 50 m - Schritte        |
|                     | • 1100 m - 1190 m Tiefe: 5 m - Schritte    |
|                     | • 1190 m - 1196 m Tiefe: 1 m - Schritte    |
|                     | • 1196 m - 1199 m Tiefe: 0.5 m - Schritte  |
|                     | • 1199 m - 1204 m Tiefe: 0.25 m - Schritte |
|                     | • 1204 m - 1220 m Tiefe: 2 m - Schritte    |
|                     | • 1220 m - 1300 m Tiefe: 5 m - Schritte    |
|                     | • 1300 m - 3000 m Tiefe: 50 m - Schritte   |

Beim Zeichnen der einzelnen Rechtecke muss darauf geachtet werden, dass die Eckpunkte benachbarter Elemente miteinander übereinstimmen. Die Dreieckselemente werden als Rechtecke mit dem 3. und 4. Eckpunkt auf derselben Stelle gezeichnet.

In FRACTure besteht die Möglichkeit, die Dimensionen des Gitters in x oder y-Richtung mit einem beliebigen Faktor zu dehnen. Da die zu modellierenden Dimensionen in x-Richtung viel kleiner sind (bis auf den Bereich um -1200 m), soll in y-Richtung im Massstab 1:10 modelliert werden. In FRACTure wird dann in y-Richtung um den Faktor 10 gestreckt. Dies erleichtert die Modellierung wesentlich.

Die Abbildung 28 zeigt auf der linken Seite das Grundgitter nach dem Erstellen in AUTOCAD und nach der Dehnung in y-Richtung um den Faktor 10. Nach dem Einlesen ins Programm WinFra können die Maschen automatisch verfeinert werden. Die Abbildung 29 rechts zeigt das selbe Modell in 2. Verfeinerung. Eine Verfeinerung bedeutet eine Vervierfachung der Elementzahl, also hat sich nach der 2. Verfeinerung die Maschenanzahl um den Faktor 16 erhöht. Die Lösung des Problems wird mit jeder Verfeinerung exakter. Da aber die Rechenzeit des Modells damit steigt, soll eine nur so stark wie unbedingt nötig verfeinert werden. Eine Sensitivitätsanalyse mit verschiedener Maschengröße wird in Kapitel 7.3.3 durchgeführt.

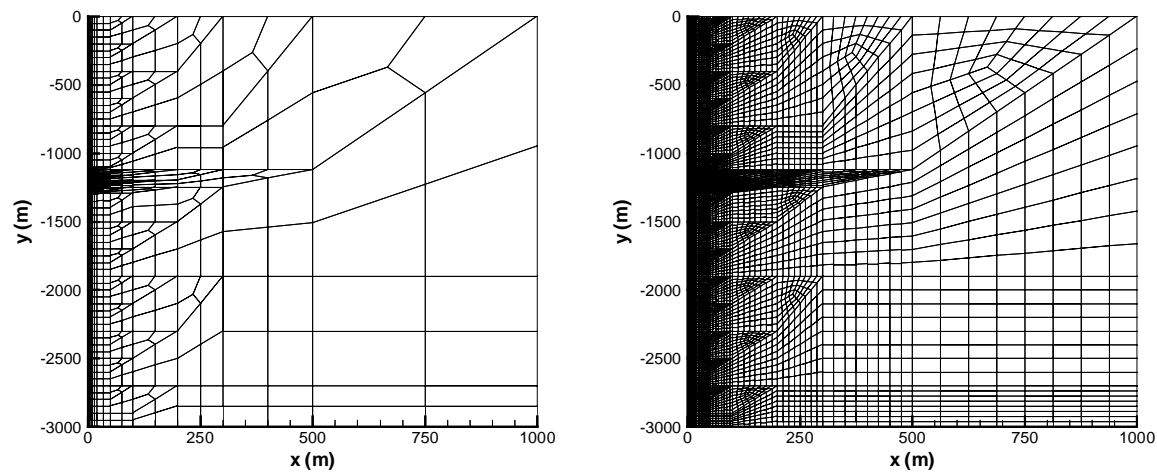


Abbildung 29: In der Abbildung links ist das Grundgitter für die FRACTure-Modellierung 1 dargestellt. Die rechte Graphik zeigt das Gitter nach der 2. Verfeinerung.

Die wichtigen Ausschnitte des Modells sind in Abbildung 30 dargestellt. Die Graphik links zeigt einen achsennahen Ausschnitt mit der eigentlichen Sonde. Die Verengung des äusseren Rohres zwischen -500 und -600 m ist genauso wie das Ausdünnen der Hinterfüllung im Bereich zwischen -200 und -650 m zu erkennen. In der rechten Graphik ist der Abschnitt um -1200 m mit der horizontalen Verrohrung vergrössert dargestellt.

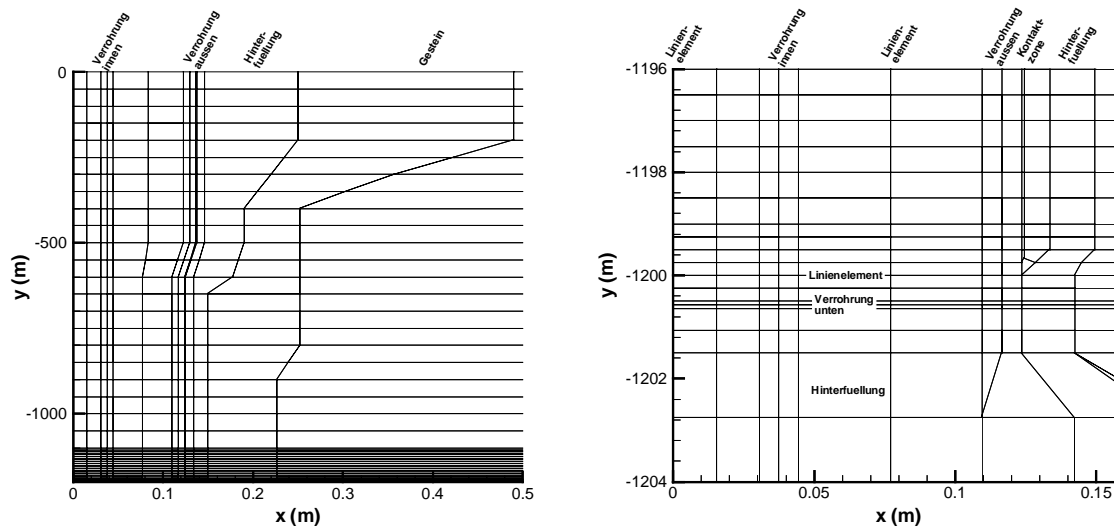


Abbildung 30: Die Graphik links zeigt den achsennahen Ausschnitt des Modells bis 0.5 m in x-Richtung und bis 1200 m Tiefe. Rechts ist eine Vergrößerung der relevanten Zone um 1200 m Tiefe dargestellt.

Bei der Konstruktion des Gitters in AUTOCAD müssen die Maschen den betreffenden Materialien zugeteilt werden. Dazu werden die einzelnen Elemente verschiedenen Layers zuge-

ordnet. Im Programm WinFra werden dann die Layers als Materialien dargestellt, für welche verschiedene Parameter definiert werden können. Layer 0 ist für Hilfslinien reserviert und kann für die Weiterverarbeitung nicht benutzt werden. Natürlich können im Programm WinFra Maschen angewählt und spezifischen Materialien zugewiesen werden. Abbildung 31 zeigt die Zuteilung der einzelnen Maschen zu den verschiedenen Materialien in WinFra, vor der Berechnung mit FRACTure.

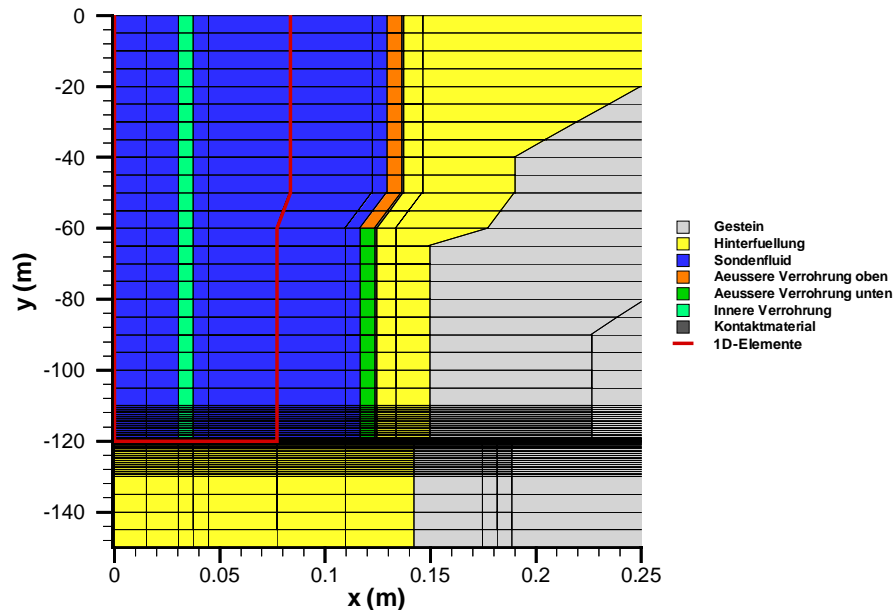


Abbildung 31: Zuteilung der verschiedenen Materialparameter in WinFra.

In FRACTure können in der Hydraulik, Thermik und Elastik Elemente verschiedener Dimensionen kombiniert werden, indem verschiedene Elementgruppen gebildet werden. Für die Zirkulation des Fluids wird eine zweite thermische Elementgruppe mit 1D-Elementen gebildet, welche im Zentrum der Sondenrohre verlaufen. Diese Linienelemente werden analog zu den 2D-Elementen verschiedenen Materialgruppen zugeteilt. Wie die Verrohrungen werden auch die Linienelemente in vier verschiedene Abschnitte aufgeteilt, da in den einzelnen Abschnitten unterschiedliche Rohrdurchmesser, und somit andere Fließgeschwindigkeiten herrschen. Beim hinabströmenden Fluid sind zwei unterschiedliche Materialien zu verwenden, sowie je eines für den horizontalen Fluss (von  $0 < x < 0.0771$  m,  $y = -120$  m) und den Aufstieg.

Schlussendlich werden in WinFra die Randbedingungen für die Hydraulik und die Thermik definiert. Sie werden sie als 1D oder 2D-Elemente gesetzt. Es wird unterschieden zwischen Neumann und Dirichlet Randbedingungen, die ihrerseits einem Prozess (Transport oder Hydraulik) zugeordnet werden. Ein Wärmefluss als Beispiel wird mit einer Neumann-Randbedingung defi-

niert, während eine konstante Temperatur an einem bestimmten Punkt als Dirichlet-Randbedingung eingegeben werden muss.

### 7.1.3. Wärmeübergang

Im Kapitel 4.2.4 ist die Notwendigkeit eines Wärmeüberganges bereits erläutert. Im Falle der Finite-Elemente-Methode wird er aber nicht zwischen zwei Elementen sondern innerhalb eines Elementes definiert:

$$Q = \left( \frac{\Delta x}{\lambda} + \frac{1}{h} \right)^{-1} (T_1 - T_2) \quad (7.1)$$

$\Delta x$ : Länge eines Elementes in Flussrichtung,  $[\Delta x] = \text{m}$

$\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit des Elementes,  $[\lambda] = \text{W/mK}$

$T_1, T_2$ : Randtemperaturen des Elementes,  $[T_1, T_2] = \text{K}$

$h$ : Wärmeübergangskoeffizient,  $[h] = \text{W/m}^2\text{K}$

Der Wärmefluss ohne Wärmeübergang lautet:

$$Q = \lambda' \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \quad (7.2)$$

$\lambda'$ : Angepasste Wärmeleitfähigkeit des Elementes,  $[\lambda'] = \text{W/mK}$

Durch Gleichsetzen ergibt sich aus den Gleichungen 7.1 und 7.2 die angepasste Wärmeleitfähigkeit  $\lambda'$  für das Element:

$$\lambda' = \frac{\Delta x \cdot h \cdot \lambda}{\Delta x \cdot h + \lambda} \quad (7.3)$$

Diese angepasste Wärmeleitfähigkeit muss nun anstelle der realen Wärmeleitfähigkeit für die Verrohrung eingesetzt werden.



## 7.2. Transiente Simulation

### 7.2.1. Einleitung

Neben stationären Berechnungen des Systems, soll die Erdwärmesonde Weissbad vor allem transient, also als Funktion der Zeit berechnet werden. Die Sonde ist nicht durchgehend in Betrieb. Der Durchfluss wird für unregelmässige Zeitabstände auf Null gesetzt. Zusätzlich soll die Eintrittstemperatur in der ersten Simulation, sowie die entzogene Energiewärme in der zweiten Simulation mit der Zeit variieren. Diese Variation der Randbedingungen wird mit Load-Time-Funktionen modelliert.

Die folgenden Anpassungen müssen alle im Input-File mittels Texteditor vorgenommen werden. WinFra unterstützt die Generierung eines transienten Input-Files in der aktuellen Version noch nicht.

### 7.2.2. Zeitschritte

FRACTure führt im transienten Berechnungsmodus nur Berechnungen zu genau definierten Zeitpunkten durch. Diese Zeitpunkte werden durch einen Zeitschritt beliebiger Länge, sowie einen Faktor definiert, der mit dem jeweiligen Zeitschritt multipliziert wird. Dies bringt den Vorteil, dass die Länge der Zeitschritte, die thermische sowie die hydraulische Kopplung zu jedem Zeitpunkt verändert werden kann.

### 7.2.3. Kopplung von Thermik und Hydraulik

Die Kopplung für Thermik und Hydraulik muss im Input-File für jede Zeitsequenz definiert werden. Dabei wird unterschieden zwischen drei Möglichkeiten, die in Tabelle 33 dargestellt sind.

Tabelle 33: Eingabemöglichkeiten für Thermik und Hydraulik im FRACTure Input-File.

|                       |   |    |
|-----------------------|---|----|
| THERMIK UND HYDRAULIK | • keine Berechnung:                           | 0  |
|                       | • transiente Berechnung mit def. Zeitschritt: | 1  |
|                       | • stationär Berechnung mit Zeitschritt 0:     | -1 |

Die nachfolgenden Berechnungen funktionieren nach dem folgenden Muster: zuerst wird der Anfangszustand durch eine stationäre Berechnung der Thermik durchgeführt ( $\Delta t=0$ ). Die Hydraulik wird nicht berechnet. In einem weiteren Zeitschritt der Länge Null wird eine stationäre

hydraulische Lösung ohne Thermik berechnet. Zu allen folgenden Zeitpunkten wird nur die Thermik transient berechnet.

#### 7.2.4. Die Load-Time-Funktion

Die Load-Time-Funktion wird zur Modellierung zeitabhängiger Randbedingungen benutzt. Um bestimmten Randbedingungen verschiedene Load-Time-Funktionen zuzuweisen, werden Load-Time-Vektoren definiert. Die Load-Time-Funktionen sind numeriert, wobei sich jede auf den Load-Time-Vektor mit der selben Nummer bezieht. Der neue Wert  $W$  der jeweiligen Randbedingung wird gemäss folgender Formel berechnet:

$$W = C_1 \cdot V + C_2 \quad (7.4)$$

$W$ : neuer Wert der Randbedingung

$V$ : ursprünglicher Wert der Randbedingung

$C_1, C_2$ : frei wählbare Variablen

Im Kopf des Input-Files muss die Anzahl der Load-Time-Funktionen und –Vektoren angegeben werden.

Unbedingt beachtet werden muss die Abstimmung der Load-Time-Funktionen auf die Zeitschritte. FRACTure führt nur Berechnungen zu vorher definierten Zeitpunkten durch. Fällt eine Load-Time-Funktion zwischen zwei aufeinanderfolgende Zeitschritte, so wird die Funktion nicht berechnet.

#### 7.2.5. An- bzw. Abschaltung der Wärmepumpe

Die transiente Modellierung mit Load-Time-Funktionen bietet auch die Möglichkeit der Variation des Durchflusses. Beim Abschalten der Wärmepumpe wird der Durchfluss  $Q$  auf Null gesetzt. Das Vorgehen sei anhand der Abbildung 32 erläutert: der Durchfluss soll zwischen  $t = 4$  und  $t = 7$  Sekunden Null sein. Vorher und Nachher beträgt er  $8.46 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Nun wird Beschreibung in Kapitel 7.2.3 begonnen und nach 3 Sekunden Laufzeit ein Zeitschritt von einer Sekunde eingeführt, wobei die Hydraulik stationär (-1) berechnet wird. Dadurch wird die Hydraulik am Anfang und am Ende dieses Zeitschrittes berechnet, was zu einer linearen Abnahme des Durchflusses zwischen 3 und 4 Sekunden führt. Das gleiche Vorgehen nach 7 Sekunden Laufzeit simuliert das Anfahren der Sonde zwischen 7 und 8 Sekunden.

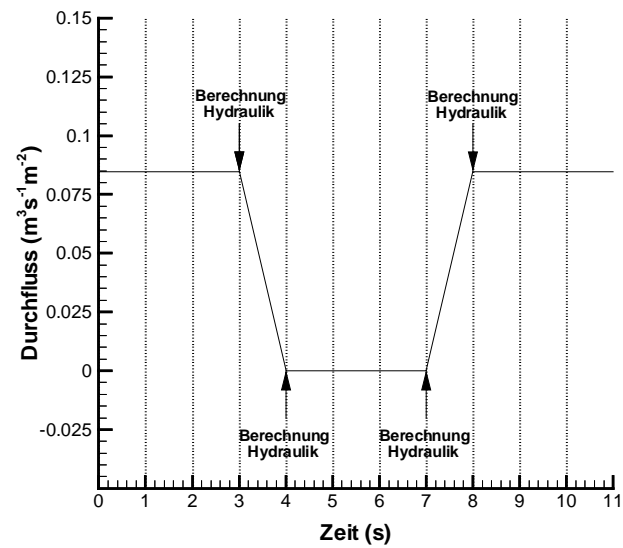


Abbildung 32: Berechnungspunkte für die Variation des Durchflusses in FRACTure.

## 7.3. Modellsensitivität

### 7.3.1. Einleitung

Für eine korrekte Berechnung der nachfolgenden Modellierungen ist die Abklärung einiger wichtiger Einflussfaktoren auf das erstellte Modell unumgänglich.

In stationären Berechnungen soll die Sensitivität horizontaler und vertikaler Veränderungen des Modelles sowie der Einfluss der Maschengrösse des Gitters untersucht werden. Zudem soll im transienten Fall der Einfluss der Zeitdiskretisierung berechnet werden. In der zukünftigen Simulation werden die An- und Abschaltzyklen der Sonde modelliert. Deshalb soll die Sensitivität der Länge der Abschaltzyklen sowie deren Verteilung im gegebenen Zeitraum untersucht werden.

### 7.3.2. Sensitivität der horizontalen und vertikalen Ausdehnung des Gitters

Die Analyse der Temperaturschwankungen der Sole beim Sondenaustritt werden mit dem Grundgitter ohne Verfeinerung durchgeführt. Gemäss Tabelle 34 werden zusätzlich zu diesem Gitter zwei Modelle mit grösserer Ausdehnung in x-Richtung erstellt. Durch die Verwendung von Zylinderkoordinaten entspricht diese Ausdehnung dem Radius um das Sondenzentrum.

Tabelle 34: Benutzte Modelle für die Berechnung der horizontalen Sensitivität.

|                          |   |
|--------------------------|---|
| AUSDEHNUNG IN X-RICHTUNG | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundgitter: 1000 m</li> <li>• Modell A: 1500 m</li> <li>• Modell B: 2500 m</li> </ul> |
|--------------------------|---|

Für jedes Gitter wird eine stationäre Berechnung mit denselben Materialparametern durchgeführt. Schlussendlich werden die Austrittstemperaturen des Fluides aus der Sonde miteinander verglichen. Der Austrittspunkt der Sole entspricht im Modell dem Punkt 0/0. Die Resultate sind in Tabelle 35 zusammengestellt, wobei gilt:

$$\Delta T_{\text{up}} = T_{\text{up,Grundgitter}} - T_{\text{up,Modell } i} \quad (7.4)$$

Tabelle 35: Zusammenstellung der Austrittstemperaturen des Fluides.

| GITTER       | AUSTRITTSTEMPERATUR $T_{UP}$ (°C) | $\Delta T_{UP}$ (°C)  |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Grundgitter: | 9.56                              |                       |
| Modell A:    | 9.68                              | $-1.11 \cdot 10^{-1}$ |
| Modell B:    | 9.73                              | $-1.64 \cdot 10^{-1}$ |

Durch die stationäre Berechnung handelt es sich bei den Temperaturdifferenzen  $\Delta T_{UP}$  um den maximal möglichen Unterschied zum Grundgitter. Bei transienter Berechnung werden die Temperaturdifferenzen noch kleiner. Wegen der vernachlässigbaren maximalen Differenz von  $-1.1 \cdot 10^{-1}$  °C und da der Zeitaufwand für die Berechnung vom Modell A grösser ist als für das Grundgitter, wird in der Folge mit dem Grundmodell weitergearbeitet.

Die Sensitivität der Modellausdehnung in vertikaler Richtung wurde mit den Modellen aus Tabelle 36 getestet. Die Austrittstemperatur der Sole von 9.56°C veränderte sich aber nicht, vermutlich durch die Definition eines Wärmeflusses an der Basis des Gitters, der das Temperaturfeld über grosse Teile des Gitters konstant hält.

Tabelle 36: Benutzte Modelle für die Berechnung der vertikalen Sensitivität.

| AUSDEHNUNG IN Y-RICHTUNG |                        |
|--------------------------|------------------------|
|                          | • Grundgitter: -3000 m |
|                          | • Modell C: -5000 m    |
|                          | • Modell D: -8000 m    |

### 7.3.3. Einfluss der Maschengrösse

Je kleiner die einzelnen Maschen sind, desto genauer wird schlussendlich die Berechnung des Temperaturfeldes. Das Grundgitter wird in WinFra zwei mal verfeinert und stationär mit FRACTure berechnet. Tabelle 37 zeigt den Vergleich der Austrittstemperaturen  $T_{UP}$ .

Tabelle 37: Austrittstemperaturen bei Variation der Maschengrösse.

| GITTER           | AUSTRITTSTEMPERATUR $T_{UP}$ (°C) | $\Delta T_{UP}$ (°C) |
|------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Grundgitter:     | 9.56                              |                      |
| 1. Verfeinerung: | 9.52                              | $4.54 \cdot 10^{-2}$ |
| 2. Verfeinerung: | 9.51                              | $5.54 \cdot 10^{-2}$ |

Die Temperaturdifferenz ist mit  $-4.5 \cdot 10^{-2}$  °C zwischen dem Grundgitter und der 1. Verfeinerung sehr gering. Aufgrund dieses Resultates wird auf eine Verfeinerung des Gitters verzichtet.

### 7.3.4. Ideale Zeitdiskretisierung

Die bisherigen Berechnungen wurden im stationären Zustand berechnet. Da aber das Temperaturfeld in Abhängigkeit der Zeit modelliert werden soll, muss transient gerechnet werden.

Wie beim Einfluss der Maschengrösse hängt die Lösung auch von der Grösse der verwendeten Zeitschritte ab. Kleine Zeitschritte bringen eine grosse zeitliche Auflösung und somit genauere Resultate, aber auch viel längere Rechenzeiten. Zu grosse Schritte hingegen ergeben bei kurzer Rechenzeit zu ungenaue Resultate. Das Ziel dieses Kapitels ist die Ermittlung der idealen Grösse der Zeitschritte.

Es werden die Austrittstemperaturen  $T_{up}$  der Sole nach 20 Tagen durchgehender Sondenlaufzeit verglichen. Die Definition der Zeitschrittgrösse ist in Tabelle 38 dargestellt. Modell E wurde mit einem einzigen Zeitschritt berechnet, während bei Modell I jede Stunde eine Berechnung durchgeführt wurde.

Tabelle 38: Definition der Zeitschritte für die einzelnen Modelle.

| GRÖSSE DER ZEITSCHRITTE |                        |
|-------------------------|------------------------|
|                         | • Modell E: 20 Tage    |
|                         | • Modell F: 12 Stunden |
|                         | • Modell G: 6 Stunden  |
|                         | • Modell H: 3 Stunden  |
|                         | • Modell I: 1 Stunde   |

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 39 dargestellt, wobei gilt:

$$\Delta T_{up} = T_{up, \text{Modell E}} - T_{up, \text{Modell i}} \quad (7.5)$$

Eine Verfeinerung unter 3-Stunden-Zeitschritte bringt sogar auf drei Nachkommastellen keine Verbesserung der Genauigkeit mehr.

Tabelle 39: Austrittstemperaturen des Fluids bei 20 Tagen Sondenbetrieb mit verschiedenen Zeitschritten.

| GITTER    | AUSTRITTSTEMPERATUR $T_{UP}$ (°C) | $\Delta T_{UP}$ (°C) |
|-----------|-----------------------------------|----------------------|
| Modell E: | 13.222                            |                      |
| Modell F: | 11.973                            | 1.249                |
| Modell G: | 11.970                            | 1.252                |
| Modell H: | 11.972                            | 1.250                |
| Modell I: | 11.972                            | 1.250                |

### 7.3.5. Variation des Durchflusses

Eine ähnliche Simulation wie in Kapitel 7.2.4 soll nun aber mit Variation des Durchflusses durchgeführt werden. Die Grösse der Zeitschritte entspricht wiederum der Tabelle 38. Nach 7 Tagen Laufzeit wird die Sonde für 6 Tage am Stück abgestellt, danach wird der Durchfluss für die restlichen 7 Tage wieder aktiviert. In der Tabelle 40 sind die Resultate dieser Berechnungen dargestellt.

Tabelle 40: Austrittstemperaturen des Fluids für Berechnungen mit unterschiedlichen Zeitschritten und Variation des Durchflusses.

| GITTER    | AUSTRITTSTEMPERATUR $T_{UP}$ (°C) | $\Delta T_{UP}$ (°C) |
|-----------|-----------------------------------|----------------------|
| Modell F: | 12.226                            |                      |
| Modell G: | 12.219                            | $7 \cdot 10^{-3}$    |
| Modell H: | 12.216                            | $1 \cdot 10^{-2}$    |
| Modell I: | 12.218                            | $8 \cdot 10^{-3}$    |

Die minimalen Temperaturschwankungen von höchstens  $3 \cdot 10^{-3}$  °C zwischen den Modellen G, H und I sind absolut zu vernachlässigen. Es zeigt sich wiederum, dass 3-Stunden-Zeitschritte eine genügend grosse zeitliche Auflösung ergeben.

### 7.3.6. Verteilung der Abschaltzyklen auf die Simulationsdauer

Zusätzlich soll nun die Auswirkung der Verteilung der Abschaltzyklen auf die Simulationsdauer untersucht werden. Über ein Zeitraum von 20 Tagen wird der Durchfluss für insgesamt 6 Tage auf Null gesetzt. Es wird mit 3-Stunden-Zeitschritten gerechnet, wobei mit einem, zwei und vier Abschaltzyklen gerechnet wird. Die genaue Aufteilung ist in Abbildung 33 dargestellt.

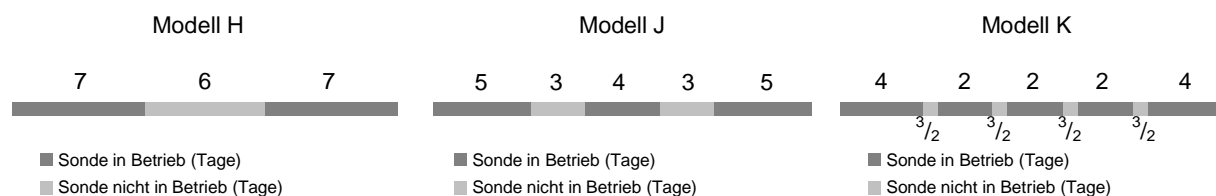


Abbildung 33: Darstellung der Laufzeitzyklen des jeweiligen Modells.

Tabelle 41: Resultate für die Austrittstemperaturen  $T_{up}$  bei der Variation der Länge und Verteilung der Abschaltzyklen auf die Simulationsdauer.

| GITTER    | AUSTRITTSTEMPERATUR $T_{up}$ (°C) | $\Delta T_{up}$ (°C) |
|-----------|-----------------------------------|----------------------|
| Modell H: | 12.216                            |                      |
| Modell J: | 12.216                            | 0                    |
| Modell K: | 12.184                            | $3.2 \cdot 10^{-2}$  |

Dabei gilt:

$$\Delta T_{up} = T_{up, \text{Modell H}} - T_{up, \text{Modell i}} \quad (7.6)$$

Tabelle 41 zeigt die Resultate dieser Simulation. Während zwischen Modell H und Modell J keine Temperaturdifferenz besteht, ist der Unterschied zwischen den Modellen H und K mit  $3.2 \cdot 10^{-2}$  °C vernachlässigbar klein.

Aus den Messdaten von OEKOPLAN AG (1998) kann die Verteilung der Abschaltzyklen nicht hergeleitet werden. Wie dieser Versuch aber gezeigt hat, spielt die zeitliche Verteilung einer vorgegebenen Abschaltdauer keine grosse Rolle, und kann deshalb angenommen werden.

### 7.3.7. Analyse des Überganges $Q=0 \Leftrightarrow Q \neq 0$

Kurz vor und kurz nach dem Abschalt- bzw. Anschaltvorgang sind die Temperaturänderungen im System am grössten. Mit einer zeitlichen Verfeinerung in diesem Bereich soll dieser Zeitabschnitt genauer analysiert werden.

Es wird mit einem An- bzw. Abschaltzyklus gerechnet. Ausserhalb der speziellen Verfeinerung wird mit 3-Stunden-Zeitschritten gerechnet. Die Verfeinerungsstufen der einzelnen Modelle sind in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 42: Modellerte Zeitschritte für die Verfeinerung des Anfahrens der Sonde.

| VERFEINERUNG |   |
|--------------|---|
|              | • Modell L: 48·10800 Sekunden                 |
|              | • Modell M: 100·10 Sekunden + 98·100 Sekunden |
|              | • Modell N: 1000·1 Sekunde + 980·10 Sekunden  |

Die Resultate dieser Auswertung sind in Tabelle 44 dargestellt. Die Austrittstemperaturen sind für alle Modelle dieselben, die entsprechenden Bereiche müssen also für die Modellierung nicht speziell verfeinert werden.



Tabelle 43: Resultate für die Austrittstemperaturen des Fluids mit Modellen verschiedener zeitlicher Verfeinerung im Bereich des An- resp. Herunterfahrens der Sonde.

| GITTER    | AUSTRITTSTEMPERATUR $T_{UP}$ (°C) | $\Delta T_{UP}$ (°C) |
|-----------|-----------------------------------|----------------------|
| Modell L: | 12.216                            |                      |
| Modell M: | 12.216                            | 0                    |
| Modell N: | 12.216                            | 0                    |

Interessant ist aber der graphische Vergleich der geplotteten Austrittstemperaturen als Funktion der Zeit. Das während der Abschaltperiode in der Sonde stehende Wasser konnte sich stark erwärmen und verursacht kurz nach dem Anfahren beim Sondenaustritt eine kurzzeitiges Extrema. Durch die kürzeren Zeitschritte vom Modell N konnte dieses Maximum feiner aufgelöst werden. Während beim Modell L in einem Zeitschritt das Maximum von 27.2 °C erreicht wurde, klettert die Austrittstemperatur vom Modell N in 284 Schritten auf ein Maximum von 31.9 °C. 284 Sekunden nach dem Anschalten der Wärmepumpe ist also das Temperaturmaximum erreicht.

Die Auflösung dieses Peaks ist natürlich auch eine Funktion der Fließgeschwindigkeit. In diesen Modellen wurde ein Durchfluss von  $8.46 \cdot 10^{-2}$  m/s modelliert. Während das Fluid bei 10800 Sekundenschritten 913 m weit wandert, sind es bei 100 Sekundenschritten 8.46 m und bei 10 Sekundenschritten nur noch 84 cm. Je langsamer das Fluid wandert, um so grösser ist die Auflösung des Peaks. Bei grosser Fließgeschwindigkeit ergibt sich nur eine Durchschnittstemperatur.

Die Graphiken für Modell L und Modell N sind in Abbildung 34 dargestellt.

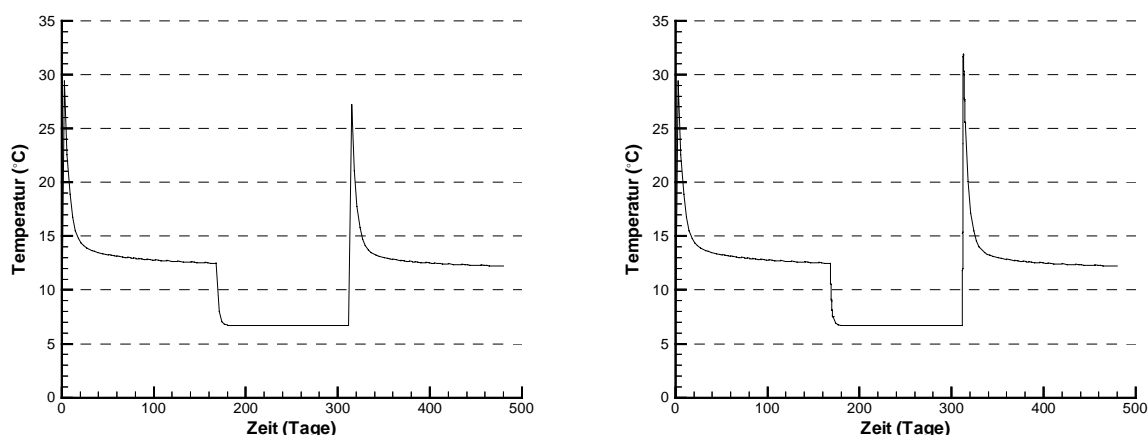


Abbildung 34: Graphische Darstellung der Austrittstemperaturen als Funktion der Zeit für Modell L (links) und Modell N.

Zusätzlich soll ein 4-facher Abschaltzyklus in den oben beschriebenen Zonen verfeinert werden, um die genaue Entwicklung der Extrema zu verfolgen. Die Abbildung 35 zeigt diesen Zyklus mit einer partiellen Verfeinerung von 108·100-Sekunden-Zeitschritten. Mit fortschreitender Zeit ist eine deutliche Abnahme der maximalen Temperaturpeaks zu erkennen, was auf die Auskühlung des Umgebungsgesteins der Sonde zurückzuführen ist.

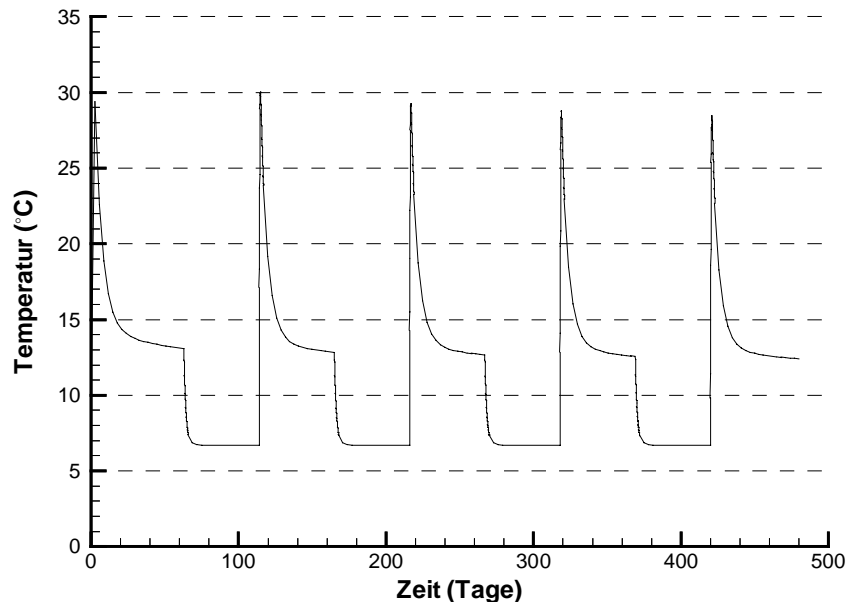


Abbildung 35: 4-facher Abschaltzyklus mit Verfeinerung beim Anfahren der Sonde.

Im Anhang B ist ein Auszug des Input-Files für ein 4-facher Abschaltzyklus ohne zusätzliche Verfeinerung abgedruckt.

### 7.3.8. Resultate

Die Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass eine zeitliche Auflösung mit einer Zeitschrittlänge von 3 Stunden genügend genaue Resultate liefert. Während einer Messperiode wird nur eine Abschaltung der Wärmepumpe modelliert, da eine zeitliche Verteilung gemäss Kapitel 7.3.6 nicht sinnvoll ist. Zudem sind die genauen Laufzeiten der Sonde nicht aus den Daten von Oekoplan AG ersichtlich.

## 7.4. FRACTure-Modellierung 1

### 7.4.1. Einleitung

Das Ziel der FRACTure-Modellierung 1 ist die korrekte Berechnung der Austrittstemperaturen des Fluids bei Vorgabe der Eintrittstemperaturen als Funktion der Zeit. Dabei sollen die An- und Abschaltzyklen gemäss dem Messbericht der OEKOPLAN AG (1998) möglichst genau eingehalten werden.

In einer weiteren FRACTure-Modellierung sollen die Eingabeparameter soweit angepasst werden, dass die Fluidtemperaturen beim Sondenaustritt mit den Messungen der OEKOPLAN AG eine gute Übereinstimmung erreichen.

### 7.4.2. Materialeigenschaften der 2D-Elemente

Die thermischen Materialeigenschaften für die Untergrund- und die Sondenparameter sind in den Tabellen 44 und 45 dargestellt. Bei der Sondenfüllung handelt es sich um ein Material, welches Anstelle des Wasser eingesetzt wird. Die Zirkulation wird aber in den Linienelementen aktiviert. Es wird zwischen der horizontalen und der vertikalen Sondenfüllung unterschieden. Die Wärmeleitfähigkeit in Fließrichtung der Sole ist geringer als senkrecht dazu.

Tabelle 44: Thermische Materialeigenschaften der Eingabeparameter.

|                             | WÄRMELEITFÄHIGKEIT IN<br>X/Y-RICHTUNG<br>(W/mK) | SPEZIFISCHE<br>WÄRMEKAPAZITÄT<br>(J/m <sup>3</sup> K) |
|-----------------------------|---|---|
| GESTEIN                     | 2.5   | $2.50 \cdot 10^6$                                     |
| HINTERFÜLLUNG               | 3.0   | $2.00 \cdot 10^6$                                     |
| SONDENFÜLLUNG<br>VERTIKAL   | 10 / 0.6  | $4.19 \cdot 10^6$                                     |
| SONDENFÜLLUNG<br>HORIZONTAL | 0.6 / 10  | $4.19 \cdot 10^6$                                     |
| KONTAKTMATERIAL             | 0.15  | $4.20 \cdot 10^6$                                     |

In Tabelle 45 sind die thermischen Materialeigenschaften der unterschiedlichen Verrohrungen aufgetragen. Die angepasste Wärmeleitfähigkeit wurde gemäss Kapitel 7.1.3 berechnet.

Tabelle 45: Thermische Materialeigenschaften der Verrohrungen.

|                                 | ANGEPASSTE<br>WÄRMELEITFÄHIGKEIT<br>(W/mK) | SPEZIFISCHE<br>WÄRMEKAPAZITÄT<br>(J/m <sup>3</sup> K) |
|---------------------------------|--|---|
| ÄUSSERE VERROHRUNG<br>OBEN      | $6.2 \cdot 10^{-2}$                        | $3.50 \cdot 10^6$                                     |
| ÄUSSERE VERROHRUNG<br>UNTEN     | $7.0 \cdot 10^{-2}$                        | $3.50 \cdot 10^6$                                     |
| HORIZONTALE VERROHRUNG<br>UNTEN | $7.0 \cdot 10^{-2}$                        | $3.50 \cdot 10^6$                                     |
| INNERE VERROHRUNG               | $2.5 \cdot 10^{-1}$                        | $3.50 \cdot 10^6$                                     |

Hydraulische Materialeigenschaften sind bei den verwendeten 2D-Elementen nicht relevant. Bei allen Materialien wurden sie auf den Wert  $1.0 \cdot 10^{-14}$  gesetzt.

#### 7.4.3. Materialeigenschaften der Linienelemente

Für die Linienelemente sind sowohl die thermischen wie auch die hydraulischen Eigenschaften von Bedeutung, da diese Elemente die Zirkulation des Fluids verkörpern. In der Tabelle 46 sind die Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 46: Thermische und hydraulische Materialeigenschaften der Linienelemente.

|                                | WÄRMELEIT-<br>FÄHIGKEIT $\lambda$<br>$x/\gamma$ (W/mK) | HYDRAULISCHE<br>LEITFÄHIGKEIT<br>(m/s) | SPEZIFISCHE<br>WÄRMEKAPAZITÄT<br>$c_p$ (J/m <sup>3</sup> K) | QUERSCHNITTS-<br>FLÄCHE<br>(m <sup>2</sup> ) | FLIESSGE-<br>SCHWINDIGKEIT<br>(m/s) |
|--------------------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|
| LINIENELEMENT<br>ABWÄRTS OBEN  | $1 \cdot 10^{10} / 0.6$                                | $3.6 \cdot 10^{-2}$                    | $4.19 \cdot 10^6$   | $3.45 \cdot 10^{-2}$                         | $8.5 \cdot 10^{-2}$                 |
| LINIENELEMENT<br>ABWÄRTS UNTEN | $1 \cdot 10^{10} / 0.6$                                | $6.0 \cdot 10^{-2}$                    | $4.19 \cdot 10^6$   | $1.31 \cdot 10^{-2}$                         | $2.2 \cdot 10^{-1}$                 |
| LINIENELEMENT<br>HORIZONTAL    | $0.6 / 1 \cdot 10^{10}$                                | $1.0 \cdot 10^{-1}$                    | $4.19 \cdot 10^6$   | $3.49 \cdot 10^{-2}$                         | $8.4 \cdot 10^{-2}$                 |
| LINIENELEMENT<br>AUFWÄRTS      | $1 \cdot 10^{10} / 0.6$                                | $1.2 \cdot 10^{-1}$                    | $4.19 \cdot 10^6$   | $3.0 \cdot 10^{-3}$                          | $9.7 \cdot 10^{-1}$                 |

#### 7.4.4. Randbedingungen

Wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben, können im Programm WinFra Randbedingungen als 1D oder 2D-Elemente definiert werden.

Für die Thermik wurden die Randbedingungen aus Tabelle 47 gewählt. Die Fluid Eintrittstemperatur von 6.7°C entspricht der gemessenen Durchschnittstemperatur. Diese Randbedingung

wurde für die Sensitivitätsanalyse benutzt, und wird für den Fall der Variation der Eintrittstemperatur (FRACTure-Modellierung 1) natürlich durch zeitabhängige Temperaturen ersetzt.

Tabelle 47: Randbedingungen für die Thermik.

|         |                              |                                   |
|---------|------------------------------|-----------------------------------|
| THERMIK | • Wärmefluss:                | $7.5 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2$ |
|         | • Oberflächentemperatur:     | 9 °C                              |
|         | • Eintrittstemperatur Fluid: | 6.7 °C                            |

Die Randbedingungen für die Hydraulik betreffen nur die Linienelemente. Der Volumenstrom beim Sondeneinlass beträgt gemäss Oekoplan AG  $10.5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dies ergibt, proportional umgerechnet zur Querschnittsfläche von  $3.45 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ , einen Durchfluss von  $8.46 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ . Die Simulation der Wärmepumpe wird vorgenommen, indem beim Fluidaustritt (Punkt 0/0) das Hydraulische Potential auf Null gesetzt wird.

Tabelle 48: Randbedingungen für die Hydraulik.

|           |                                    |                                  |
|-----------|------------------------------------|----------------------------------|
| HYDRAULIK | • Durchfluss:                      | $8.46 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ |
|           | • Hydraulisches Potential bei 0/0: | 0 m                              |

Die Randbedingungen für die FRACTure-Modellierung 1 wurden in WinFra gemäss der Tabelle 49 definiert.

Tabelle 49: Randbedingungen für die FRACTure-Modellierung.

|                  |                                   |                     |
|------------------|-----------------------------------|---------------------|
| RAND-BEDINGUNGEN | • Modellbasis für Wärmefluss:     | Transport/Neumann   |
|                  | • Oberfläche für Bodentemperatur: | Transport/Dirichlet |
|                  | • Fluid in für Temperatur Fluid:  | Transport/Dirichlet |
|                  | • Fluid in für Durchfluss Fluid:  | Hydraulik/Neumann   |
|                  | • Fluid up für Druckpotential:    | Hydraulik/Dirichlet |

### 7.4.5. Resultate

Bevor die zeitabhängigen Eintrittstemperaturen in das Input-File eingefügt werden, soll das Modell stationär mit einer konstanten Eintrittstemperatur von  $6.7^\circ\text{C}$  berechnet werden. Dies wird gemacht, um die Funktionstüchtigkeit des Modelles zu überprüfen. Das resultierende dis1.dat-File ist in Abbildung 36 graphisch dargestellt. Das Fliesen der Sole und die gleichzeitige Er-

wärmung kommen sehr schön zum Ausdruck. Das Temperaturniveau ist natürlich bei der stationären Berechnung einiges tiefer als bei transienter Berechnung.

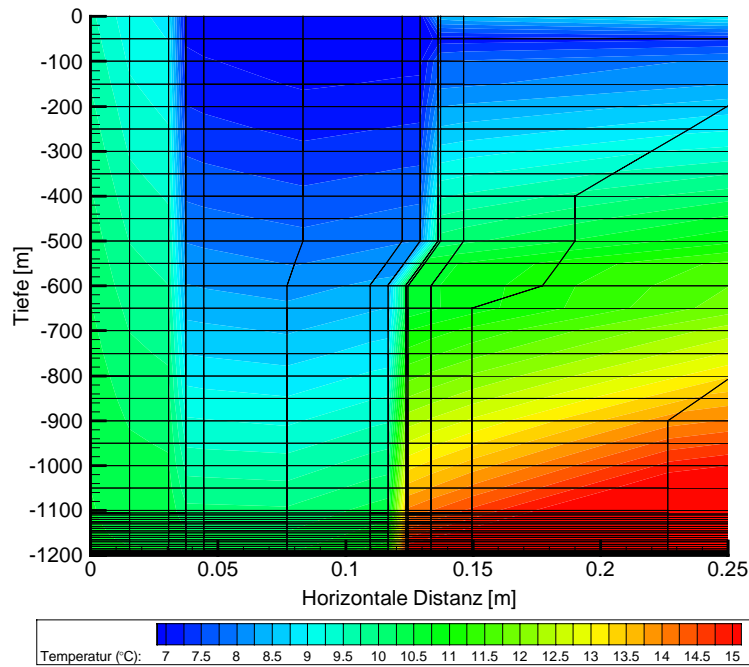


Abbildung 36: Temperaturverhältnisse für die stationäre Simulation der Erdwärmesonde Weissbad.

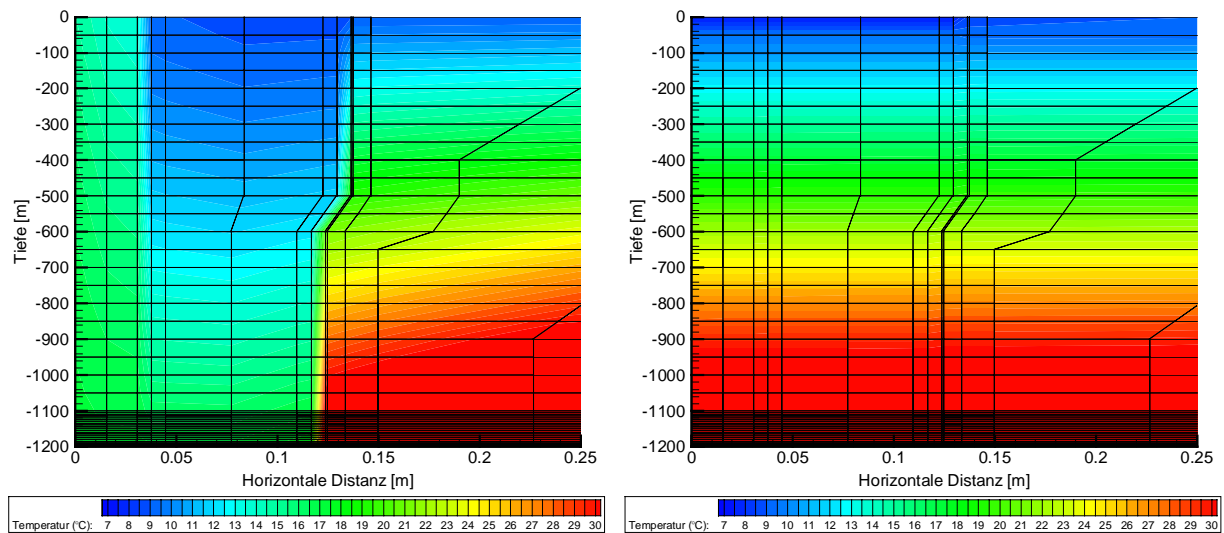


Abbildung 37: Die Graphik links zeigt die transiente Berechnung der Sonde mit variablen Eintrittstemperaturen nach 39 Stunden Laufzeit. Rechts ist das Temperaturfeld während einer Abschaltperiode, kurz vor dem erneuten Anfahren der Sonde dargestellt.

Abbildung 37 zeigt die Temperaturfelder bei transienter Berechnung mit zeitabhängiger Eintrittstemperatur gemäss Oekoplan AG. Die linke Graphik zeigt die Temperaturverhältnisse nach 39 Stunden durchgehender Laufzeit. Das Temperaturfeld hat sich ähnlich wie im stationären Fall entwickelt, aber das Temperaturniveau ist höher. In der Graphik sind die Verhältnisse nach dem Stillstand der Sonde zu sehen. Die Temperatur Isolinien haben sich horizontal ausgebildet, also parallel zum definierten Wärmefluss und zur Oberflächentemperatur. Die Temperaturverhältnisse auf der rechten Seite der Sonde ändern sich in den beiden Abbildungen kaum.

In Abbildung 38 sind die Austrittstemperaturen des Fluids gegen die Zeit aufgetragen. Das Modell liegt im Durchschnitt etwa  $1^{\circ}\text{C}$  über den Messwerten. Gemäss Tabelle 50 beträgt die maximale Temperaturdifferenz  $1.7^{\circ}\text{C}$ . Die geringste Differenz beträgt  $0.65^{\circ}\text{C}$ , die durchschnittliche Abweichung  $1.3^{\circ}\text{C}$ .

Die Temperaturunterschiede zu der Messung von Oekoplan AG sind sehr klein im Vergleich zu den EED und EWS-Modellen. Allerdings wird bei dieser Simulation die Eintrittstemperatur als Funktion der Zeit vorgegeben, was ein entscheidender Vorteil aber nicht unbedingt praxisnah ist. Bei der Planung einer Erdwärmesonde sind solch genaue Daten, wie sie Oekoplan AG liefert, natürlich nicht vorhanden.

In einer weiteren Simulation sollen die Parameter angepasst werden, damit eine noch bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Daten zu erreicht werden kann.

Tabelle 50: Vergleich der FRACTure-Modellierung 1 mit der Messung von Oekoplan AG.

|                          |   |
|--------------------------|---|
| MODELLIERUNG 1 - MESSUNG | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="699 1150 1300 1184">• Maximale Abweichung: <math>+1.73^{\circ}\text{C}</math></li> <li data-bbox="699 1199 1300 1232">• Minimale Abweichung: <math>+0.65^{\circ}\text{C}</math></li> <li data-bbox="699 1247 1300 1281">• Durchschnittliche Abweichung: <math>+1.28^{\circ}\text{C}</math></li> </ul> |
|--------------------------|---|

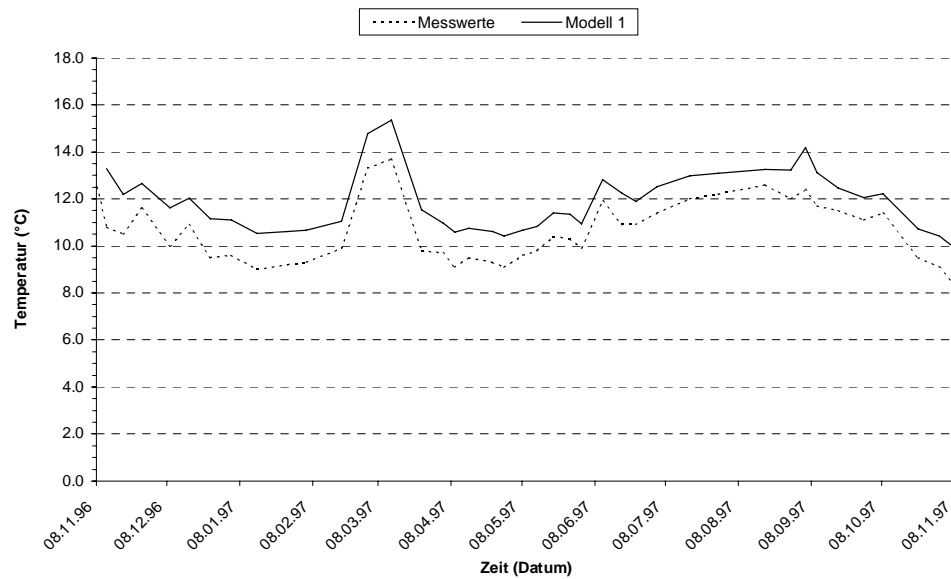


Abbildung 38: Vergleich der Austrittstemperaturen der FRACTure-Modellierung 1 und den Messwerten von Oekoplan AG.



## 7.5. Einfluss der Kontaktzone

Die Kontaktzone soll eine Luftschicht zwischen der Verrohrung und der Hinterfüllung darstellen. Ihre Ausdehnung über die ganze Länge der Sonde beträgt in diesem Modell 1 mm. Um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit dieser Zone abzuklären, soll die Modellierung 1 (Leitfähigkeit Kontaktzone: 1.5 W/mK) zusätzlich mit 4 verschiedenen Leitfähigkeitswerten für die Kontaktzone berechnet werden. Die Leitfähigkeit von  $2.7 \cdot 10^{-2}$  W/mK entspricht dem Wert von Luft.

In der Tabelle 51 sind die benutzten Wärmeleitfähigkeitswerte zusammen mit den durchschnittlichen Austrittstemperaturen dargestellt. Diese sinkt natürlich mit abnehmender Leitfähigkeit.

Tabelle 51: Durchschnittliche Austrittstemperaturen pro Jahr in Abhängigkeit zur Wärmeleitfähigkeit der Kontaktzone.

| WÄRMELEITFÄHIGKEIT<br>KONTAKTZONE<br>(W/mK) | DURCHSCHNITTLICHE<br>AUSTRITTSTEMPERATUR<br>(°C) |
|---|--|
| $2.0 \cdot 10^{-1}$                         | 11.88  |
| $1.5 \cdot 10^{-1}$                         | 11.85  |
| $1.0 \cdot 10^{-1}$                         | 11.80  |
| $5.0 \cdot 10^{-2}$                         | 11.63  |
| $2.7 \cdot 10^{-2}$                         | 11.37  |

Um ein Vergleich zwischen Modellierung 1 und den Modellen mit anderen Wärmeleitfähigkeiten der Kontaktzone zu erstellen, ist die Temperaturdifferenz als Funktion der Wärmeleitfähigkeitswerte zur Modellierung 1 in Abbildung 39 graphisch dargestellt. Bei abnehmender Wärmeleitfähigkeit reagiert das Modell immer empfindlicher auf kleine Änderungen. Bei der Wahl des Wertes für Luft beträgt die Abnahme der durchschnittlichen Temperatur knapp ein halbes Grad.

Im Unterschied zu diesen Untersuchungen modellierte M. Salton (Salton, 1999) für dieselbe Sonde eine 1 cm dicke Kontaktzone in einer Tiefe von -800 und -1200 m. Die Temperaturdifferenz der Modellierungen mit Leitfähigkeiten der Kontaktzone von 0.15 resp. 0.1 W/mK betragen in seinem Modell  $-0.4^{\circ}\text{C}$ . In dieser Arbeit ist die Differenz mit  $-0.05^{\circ}\text{C}$  einiges geringer. Dies verdeutlicht, dass die Modellierung einer Kontaktzone mit richtigen Dimensionen sehr wichtig für korrekte Fluid Austrittstemperaturen ist.

In der Realität sind grössere Zonen mit Lufteinschlüssen vermutlich über den ganzen Tiefenbereich der Sonde verteilt. Durch Unkenntnis der Grösse und Verteilung dieser Zonen lässt sich dieser Einfluss in einem Modell aber besser mit einem konstantem Luftraum von einem Milli-

meter simulieren. Deshalb soll für die Kontaktzone in einer weiteren Modellierung der Wert von Luft übernommen werden.

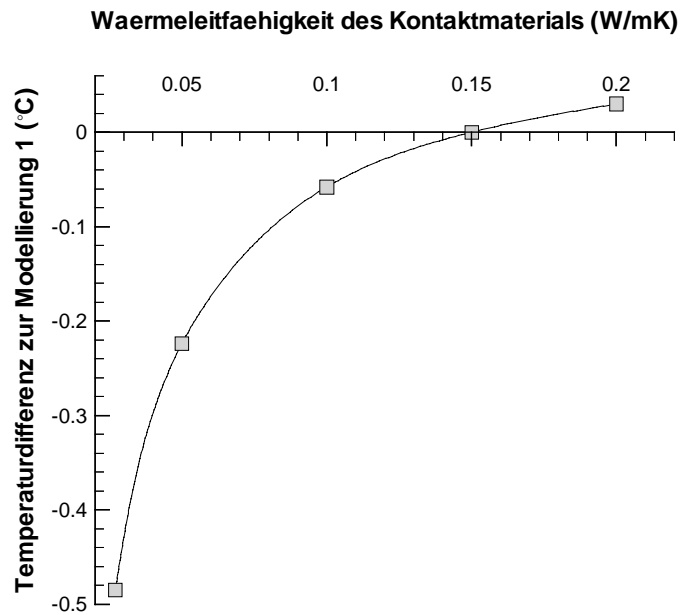


Abbildung 39: Vergleich der Austrittstemperaturen der Sole zur Modellierung 1 bei Variation der Wärmeleitfähigkeit des Kontaktmaterials.

## 7.6. FRACTure-Modellierung 2

### 7.6.1. Eingabeparameter

Für eine weitere Modellierung mit FRACTure sollen die Eingabeparameter so angepasst werden, dass die Differenz zu den Messwerten verringert wird. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Untergrundgesteins wird auf 2.0 W/mK verringert. Wie im Kapitel 7.5 besprochen, wird die Wärmeleitfähigkeit der Kontaktzone an den Wert von Luft angepasst. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die Wärmekapazität  $c_p$  der Hinterfüllung wird gemäss Kapitel 5.3.1 an die Hinterfüllung 1 aus der EWS-Simulation angepasst. Die Oberflächentemperatur und der Wärmefluss werden auf 8.7°C bzw.  $6.5 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2$  gesetzt. Die veränderten Parameter sind in Tabelle 52 dargestellt. Alle anderen Eingabewerte werden nicht verändert.

Tabelle 52: Veränderte Parameter für die FRACTure-Modellierung 2.

|                                 |                            |                                      |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| PARAMETER FÜR<br>MODELLIERUNG 2 | • $\lambda$ Gestein:       | 2.0 W/mK                             |
|                                 | • $\lambda$ Kontaktzone:   | $2.7 \cdot 10^{-2}$ W/mK             |
|                                 | • $\lambda$ Hinterfüllung: | 1.0 W/mK                             |
|                                 | • $c_p$ Hinterfüllung:     | $3.59 \cdot 10^6$ J/m <sup>3</sup> K |
|                                 | • Oberflächentemperatur:   | 8.7 °C                               |
|                                 | • Wärmefluss:              | $6.5 \cdot 10^{-2}$ W/m <sup>2</sup> |

### 7.6.2. Resultate

Die Ergebnisse mit den angepassten Parametern zeigen einen deutlich besseren Fit mit den Messwerten von Oekoplan AG. In der Tabelle 53 ist die maximale, die minimale und die durchschnittliche Abweichung zwischen der Modellierung 2 und den beobachteten Werten dargestellt. Die maximale und die durchschnittliche Abweichung konnten bezüglich der Modellierung 1 um 0.8°C auf knapp 1°C bzw. 0.5°C gesenkt werden.

Abbildung 40 zeigt den graphischen Vergleich zwischen der Messung 2 und den Messwerten. Mit realistischen Eingabeparametern konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Kurven erreicht werden.

Tabelle 53: Vergleich der FRACTure-Modellierung 2 mit der Messung von Oekoplan AG.

|                          |                                 |          |
|--------------------------|---------------------------------|----------|
| MODELLIERUNG 2 - MESSUNG | • Maximale Abweichung:          | +0.96 °C |
|                          | • Minimale Abweichung:          | -0.03 °C |
|                          | • Durchschnittliche Abweichung: | +0.47 °C |

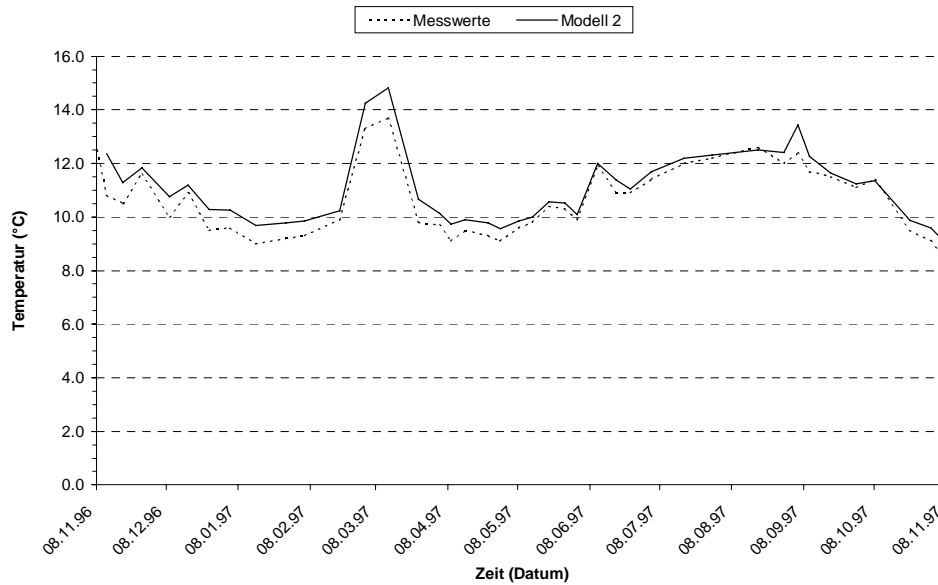


Abbildung 40: Vergleich der Austrittstemperaturen aus FRACTure-Modellierung 2 mit den Messwerten.

## 8. Modellierungen zur Auslegungsgeometrie

### 8.1. Einleitung

Die drei Erdwärmesonden-Simulationsprogramme EED, EWS und FRACTure wurden bis zu diesem Punkt der Arbeit anhand der tiefen Erdwärmesonde Weissbad getestet. Ein Vergleich folgt in Kapitel 9. Auf eine Variation der Auslegungsgeometrie wurde bisher verzichtet. In diesem Kapitel sollen nun Anhand einer theoretischen Sondenanordnung die durch EWS und FRACTure berechneten Austrittstemperaturen miteinander verglichen werden.

Für diesen Versuch werden vier im Quadrat angeordnete Doppel-U-Sonden von 70 m Tiefe modelliert. Die Anordnung ist in Abbildung 41 dargestellt.

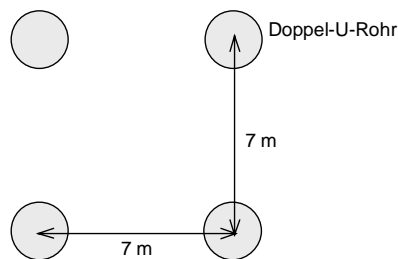


Abbildung 41: Auslegungsgeometrie an der Erdoberfläche

Dabei wird im Fall von EWS mit der dimensionslosen Sprungantwort ( $g$ -Funktion, Kapitel 2.2.5) für die betreffende Auslegungsgeometrie gerechnet. Als Vergleich soll zusätzlich das Temperaturprofil für eine einzelne Doppel-U-Sonde berechnet werden.

Für die Berechnung mit FRACTure wird ein 3-D-Modell generiert. Im ersten Fall wird nur eine Sonde modelliert, welche dann durch die spezielle Gittersymmetrie gespiegelt wird. In einer weiteren Modellierung wird dieselbe Sonde als Einzelsonde gerechnet und mit den anderen Ergebnissen verglichen. Die Resultate sollen Aufschluss über den Einfluss mehrerer Sonden auf kleinem Gebiet geben.

Die Eintrittstemperatur des Fluids (Wasser) soll konstant auf 5°C gehalten werden, die Simulationszeitdauer beträgt 3 bzw. 10 Jahre.

## 8.2. Modellrechnungen mit FRACTure

### 8.2.1. Aufbau des numerischen 3D-Gitters

Die Konstruktion des Gitters verläuft grösstenteils Analog zur 2D-Modellierung, die in Kapitel 7.1.2 beschrieben wurde. Deshalb wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Beschreibung verzichtet, und nur die 3D-spezifischen Änderungen besprochen.

Bei einem 3D-Modell handelt es sich um einzelne, horizontale 2D-Schnitte in verschiedenen Tiefenlagen, die vertikal zu einem 3D-Modell verbunden werden. Zuerst wird deshalb in Autocad oder in WinFra die xy-Ebene an der Erdoberfläche ( $z=0$ ) konstruiert. Dieses 2D-Gitter konnte aus SALTON, 1999 übernommen werden. Abbildung 42 zeigt das Modell im Bereich der Sondenrohre, in der für die Berechnungen benutzten Verfeinerung.

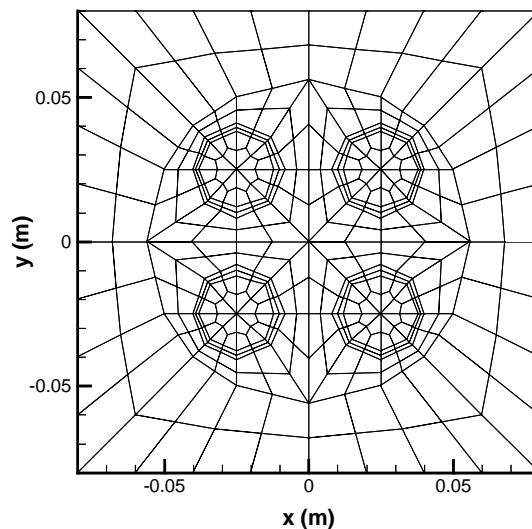


Abbildung 42: 2D-Gitter für eine Doppel-U-Sonde im Bereich der Sondenrohre. Die beiden unteren Rohre markieren den Eintritt des Fluids, die oberen beiden den Austritt.

Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Zentrum der Bohrung. Tabelle 54 zeigt die horizontalen Abmessungen im Bereich der Sonden.

Tabelle 54: Horizontale Abmessungen der Sondenrohre.

|             |                           |                        |
|-------------|---------------------------|------------------------|
| HORIZONTALE | • Bohrlochdurchmesser:    | $1.12 \cdot 10^{-1}$ m |
| AUSDEHNUNG  | • Rohrdurchmesser aussen: | $3.2 \cdot 10^{-2}$ m  |
|             | • Rohrdurchmesser innen:  | $2.6 \cdot 10^{-2}$ m  |

Die Zuteilung der Materialparameter erfolgt in WinFra gemäss Abbildung 43. Dies gilt bis in eine Tiefe von -69.9 m.

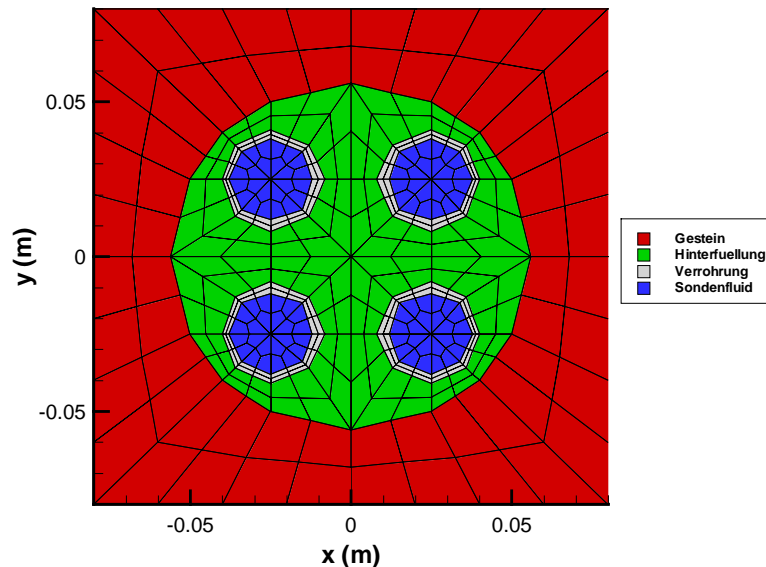


Abbildung 43: Zuteilung der verschiedenen Materialparameter im Bereich der Sondenrohre, für eine Tiefe  $z$  von 0 bis 69.9 m.

Von -69.9 bis -70.1 m wird analog zu Weissbad (Kapitel 7.1.3) zwischen den jeweiligen Sondenrohren eine horizontal gut leitende Schicht eingebaut. Ab -70.1 m bis zur maximal modellierten Tiefe von -500 m wird alles als Gestein definiert. Die Linienelemente müssen auf jeder  $xy$ -Ebene zwischen 0 und -70 m als Punkte im Zentrum der Sondenrohre gezeichnet werden. Diese Punkte werden automatisch im 3D-Fall zwischen den einzelnen Schichten zu vertikalen Linien verbunden. In 70 m Tiefe muss eine Schicht der Dicke 0 m generiert werden, auf welcher nur die beiden verbindenden, horizontalen Linienelemente eingezeichnet werden. Alle anderen Elemente, mit Ausnahme der Randbedingungen, werden gelöscht.

Abbildung 44 zeigt eine dreidimensionale Darstellung der sondennahe Zone von -69.9 bis -70.1 m Tiefe. Die 0 m dicke Schicht in -70 m Tiefe ist rot dargestellt. Die als grüne Linien abgebildeten Linienelemente stellen den Fluss des Fluides dar. Der gelbe Körper verdeutlicht die Definition der horizontal leitenden Schicht in dieser Tiefenzone, der die vertikal gut leitende blaue Schicht (Sondenfluid) entlang der horizontalen Linienelemente ablöst. Zur deutlicheren Darstellung sind in dieser Figur die Hinterfüllung und die Verrohrung nur als Maschengitter dargestellt. Das Umgebungsgestein ist nicht sichtbar.

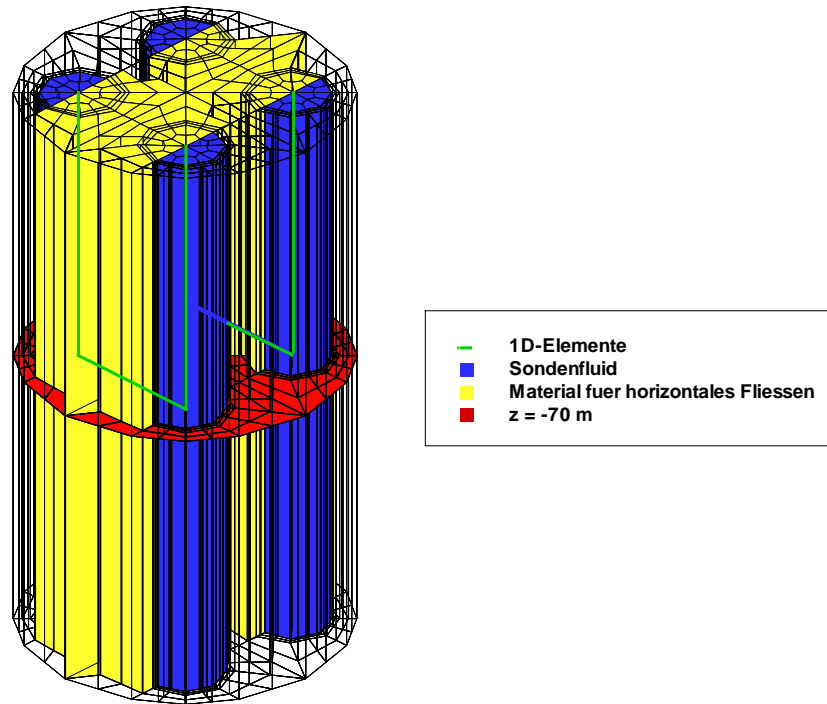


Abbildung 44: Darstellung der dreidimensional modellierten Sonde für den Tiefenbereich von -69.9 bis -70.1 m. Das Umgebungsgestein ist nicht dargestellt, die Hinterfüllung und die Sondenrohre sind nur als Gitter eingezeichnet. Die rote Ebene markiert die Tiefe von -70 m.

Neben der horizontalen Auflösung ist im 3D-Fall natürlich auch die vertikale Diskretisierung relevant. In WinFra wird die Höhe der obersten Schicht (Erdoberfläche) und die vertikale Ausdehnung angegeben. In diesem Fall wird die oberste Schicht auf der Höhe 0 und die unterste Schicht in -500 m Tiefe angesetzt. Für die 70 m tiefe Sonde dürfte somit vertikal von unten keine Störungen zu erwarten sein.

Tabelle 55 zeigt die vertikale Diskretisierung der Modelle. Wie im Modell Weissbad wird im Bereich des Sondenendes höher aufgelöst, um den grösseren Temperaturgradienten gerecht zu werden. Wie oben schon erwähnt, wird bis in eine Tiefe von -500 m modelliert.

Tabelle 55: Vertikale Auflösung der verwendeten Modelle.

|                              |                          |                 |
|------------------------------|--------------------------|-----------------|
| VERTIKALE<br>DISKRETISIERUNG | 0 bis -50 m Tiefe:       | 10 m -Schritte  |
|                              | -50 bis -60 m Tiefe:     | 5 m -Schritte   |
|                              | -60 bis -68 m Tiefe:     | 2 m -Schritte   |
|                              | -68 bis -69 m Tiefe:     | 0.5 m -Schritte |
|                              | -69 bis -69.8 m Tiefe:   | 0.2 m -Schritte |
|                              | -69.8 bis -70.2 m Tiefe: | 0.1 m -Schritte |



|                        |                 |
|------------------------|-----------------|
| -70.2 bis -71 m Tiefe: | 0.2 m -Schritte |
| -71 bis -72 m Tiefe:   | 0.5 m -Schritte |
| -72 bis -80 m Tiefe:   | 2 m -Schritte   |
| -80 bis -90 m Tiefe:   | 5 m -Schritte   |
| -90 bis -150 m Tiefe:  | 10 m -Schritte  |
| -150 bis -300 m Tiefe: | 50 m -Schritte  |
| -300 bis -500 m Tiefe: | 100 m -Schritte |

Wie in der Einführung bereits beschrieben, soll je ein Gitter für eine einzelne, freistehende Doppel-U-Sonde und vier im Quadrat angeordnete Doppel-U-Sonden gezeichnet werden. Der Kern des Gitters, der die eigentliche Sonde verkörpert und in Abbildung 42 dargestellt ist, ist für beide Modelle derselbe, die Modellierung der Umgebung ist allerdings unterschiedlich.

Das Gitter für vier Doppel-U-Sonden ist in Abbildung 45 links dargestellt. Der Kern der einzelnen Doppel-U-Sonde befindet sich in der rechten oberen Ecke der xy-Ebene. Bei der Berechnung in FRACTure wird nun das ganze Gitter an den äussersten Linien gespiegelt. Damit wird die einzelne Doppel-U-Sonde in drei weitere Sonden überführt, womit nun vier Doppel-U-Sonden im Zentrum eines grossen Gitters sitzen. Der Abstand der Sonde im konstruierten Gitter zu den Spiegellinien wurde mit 3.5 m so gewählt, dass die vier Sonden nun je einen Abstand von 7 m aufweisen (Abbildung 41).

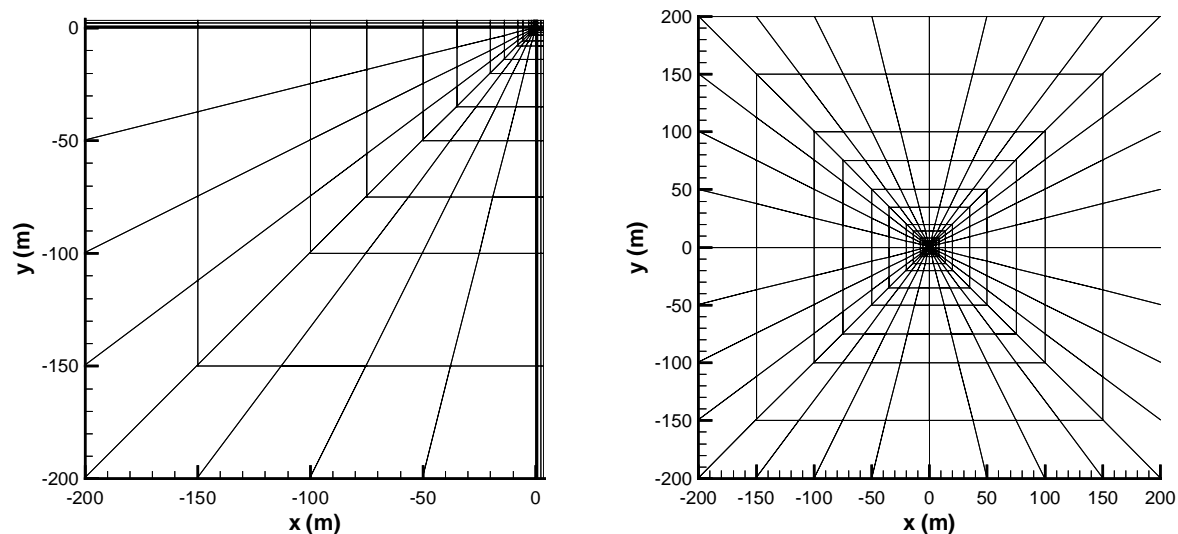


Abbildung 45: Die Modellierung für vier Doppel-U-Sonden in der xy-Ebene ist in der Darstellung links gezeigt. Das Gitter wird am Rand gespiegelt wobei die restlichen drei Sonden generiert werden. Rechts ist das Gitter für die Einzelsonde abgebildet.

Für das Modell einer einzelnen, freistehenden Doppel-U-Sonde wurde der Kern im Zentrum des Gitters gezeichnet. Dies ist in der Abbildung 45 rechts dargestellt. Auch hier wird in FRACTure automatisch gespiegelt, was aber wegen dem grossen Abstand des Kerns zum Gitterrand keinen Einfluss auf den Wärmeverlauf im Zentrum hat, da sich das nächste Sondenzentrum 400 m weit weg befindet.

Die Randbedingungen werden im 3D und im 2D-Fall identisch generiert. Es muss aber beachtet werden, dass nun neben der Ausdehnung in x und y-Richtung auch die Definition der z-Komponente nötig ist.

Auch in diesem Modell wird ein Wärmeübergang eingeführt. Wiederum wird für die Verrohrung eine angepasste Wärmeleitfähigkeit eingesetzt. Das Prinzip ist identisch mit dem bereits in Kapitel 7.1.3 beschriebenen.

### 8.2.2. Materialeigenschaften

Für das Modell der Einzelsonde sowie für die modellierten 4 Doppel-U-Sonden werden dieselben Materialeigenschaften gewählt. Die Parameter für die 3D-Elemente sind in der Tabelle 56 dargestellt.

Tabelle 56: Thermische Materialeigenschaften der Eingabeparameter.

|                           | WÄRMELEITFÄHIGKEIT IN<br>X/Y/Z –RICHTUNG<br>(W/mK) | ANGEPASSTE<br>WÄRMELEITFÄHIGKEIT<br>(W/mK) | SPEZIFISCHE<br>WÄRMEKAPAZITÄT<br>(J/m <sup>3</sup> K) |
|---------------------------|--|--|---|
| GESTEIN                   | 2.5  | -  | $2.20 \cdot 10^6$                                     |
| HINTERFÜLLUNG             | 0.84   | -  | $4.19 \cdot 10^6$                                     |
| SONDENFLUID<br>VERTIKAL   | 10 / 10 / 0.49                                     | -  | $3.80 \cdot 10^6$                                     |
| SONDENFLUID<br>HORIZONTAL | 10 / 0.49 / 10                                     | -  | $3.80 \cdot 10^6$                                     |
| VERROHRUNG                | -  | 0.14                                       | $1.67 \cdot 10^6$                                     |

Für die Linienelemente, also für das Zirkulierende Fluid, gelten die thermischen und hydraulischen Materialeigenschaften aus Tabelle 57.

Tabelle 57: Thermische und hydraulische Materialeigenschaften für die Linienelemente.

|                             | WÄRMELEIT-<br>FÄHIGKEIT $\lambda$<br>x/y/z (W/mK) | HYDRAULISCHE<br>LEITFÄHIGKEIT<br>(m/s) | SPEZIFISCHE<br>WÄRMEKAPAZITÄT<br>$c_p$ (J/m <sup>3</sup> K) | QUERSCHNITTS-<br>FLÄCHE<br>(m <sup>2</sup> ) | FLIESSGE-<br>SCHWINDIGKEIT<br>(m/s) |
|-----------------------------|---|--|---|--|-------------------------------------|
| LINIENELEMENT<br>VERTIKAL   | $10^{10}/10^{10}/0.49$                            | $5.34 \cdot 10^{-1}$                   | $3.8 \cdot 10^6$  | $5.31 \cdot 10^{-4}$                         | $2.67 \cdot 10^{-1}$                |
| LINIENELEMENT<br>HORIZONTAL | $10^{10}/0.49/10^{10}$                            | $5.34 \cdot 10^{-1}$                   | $3.8 \cdot 10^6$  | $5.31 \cdot 10^{-4}$                         | $2.67 \cdot 10^{-1}$                |

### 8.2.3. Randbedingungen

Die Randbedingungen werden als 1D und als 2D-Elemente gemäss der Tabelle 49 im Kapitel 7.4.4 definiert. Ihre Werte für die Thermik und die Hydraulik sind in den Tabellen 58 und 59 angegeben. Die Randbedingungen für die Hydraulik betreffen nur die Linienelemente.

Tabelle 58: Randbedingungen für die Thermik.

|         |   |
|---------|---|
| THERMIK | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wärmefluss: <math>9.0 \cdot 10^{-2}</math> W/m<sup>2</sup></li> <li>Oberflächentemperatur: 10 °C</li> <li>Eintrittstemperatur Fluid: 5 °C</li> </ul> |
|---------|---|

Tabelle 59: Hydraulische Randbedingungen für die Linienelemente.

|           |  |
|-----------|--|
| HYDRAULIK | <ul style="list-style-type: none"> <li>Durchfluss: <math>2.67 \cdot 10^{-1}</math> m<sup>3</sup>/sm<sup>2</sup></li> <li>Hydraulisches Potential bei 0/0: 0 m</li> </ul> |
|-----------|--|

Um keine Temperaturstörungen im Einlassbereich der Sonde zu produzieren, wird die Oberflächentemperatur nur bis auf 3 m Entfernung zum Sondenzentrum als Randbedingung fixiert.

Die Randbedingung für den Wärmefluss ist auf einer Höhe von  $z = -500$  m an der Modellbasis gezeichnet, für alle anderen Randbedingungen gilt  $z = 0$ .

### 8.2.4. Simulationszeitschritte

Für die beiden Modelle sollen je zwei Berechnungen durchgeführt werden, eine dreijährige Simulation und eine Langzeitberechnung für 10 Jahre. Für die dreijährige Berechnung werden 157 Zeitschritte der Länge  $6.048 \cdot 10^5$  Sekunden (7 Tage) generiert. Für die zehnjährige Simulation müssen wegen der viel höheren Rechenleistung grössere Zeitschritte definiert werden. Es sind dies 120 Zeitschritte mit einer Länge von  $2.628 \cdot 10^6$  Sekunden, was 730

Stunden, und somit einem durchschnittlichen Monat entspricht. Die Wärmepumpen sind durchgehend in Betrieb.

### 8.2.5. Resultate

Die Abbildung 46 links zeigt das Zentrum der Sonde an der Erdoberfläche mit dem entsprechenden Temperaturprofil nach einem Jahr durchgehender Laufzeit. Die beiden Sonden hinten links markieren den Einlass des Fluids mit konstanten 5°C. Die Sonden im Vordergrund beim Solenauslass zeigen Temperaturen von 5.7°C. Auf der rechten Seite ist ein 2D-Schnitt bei  $x=0.025$  durch den untersten Teil der Sonde gelegt. Dies entspricht in der linken Darstellung einem Schnitt entlang der Linie vom Soleeinlass links zum Solenauslass vorne. Die linke blaue Linie verdeutlicht das hinunterströmende Fluid, das bei  $z = -70\text{m}$  über das horizontale Linienelement 0.05 m weiter rechts wieder nach oben fließt.

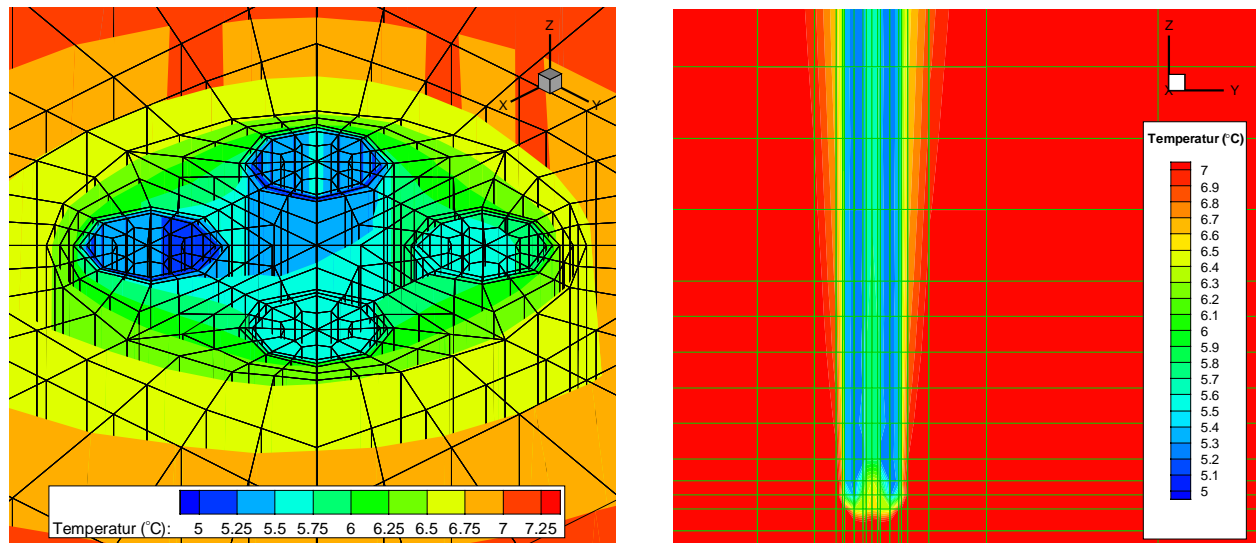


Abbildung 46: Beide Darstellungen zeigen die Temperaturverteilung nach einem Jahr durchgehender Laufzeit, berechnet mit FRACTure. Links ist die Doppel-U-Konfiguration an der Erdoberfläche ( $z=0$ ) gezeigt. Auf der rechten Seite ist ein vertikaler Schnitt bei  $x=0.025$  m (entlang der Linie vom Soleeinlass links zum Solenauslass vorne im linken Bild) im Bereich des Sondenendes dargestellt.

Die Abbildung 47 zeigt Flächen gleicher Temperatur für den obersten Abschnitt der Sonde. Die Isotherme für 11°C ist grün, die 10.2°C-Fläche blau und, die 9.5°C Isotherme ist rot dargestellt. Dabei sind die Temperaturtrichter zu sehen, die beim Entzug der Wärme aus dem Erdreich durch die Sonde entstehen. Da die Energie immer entlang der Normalen dieser Isothermen fließt, zeigt diese Darstellung, dass Erdwärmesonden dem Boden in lateraler Richtung seine Energie entziehen.

In der Abbildung 48 sind die Isothermen für die untersten Meter der Erdwärmesonde dargestellt. Die Fläche für 10°C ist rot eingefärbt, die 9°C Isotherme ist blau dargestellt. Die Flächen gleiten entlang der Sonde in die Tiefe und schliessen sich darunter.

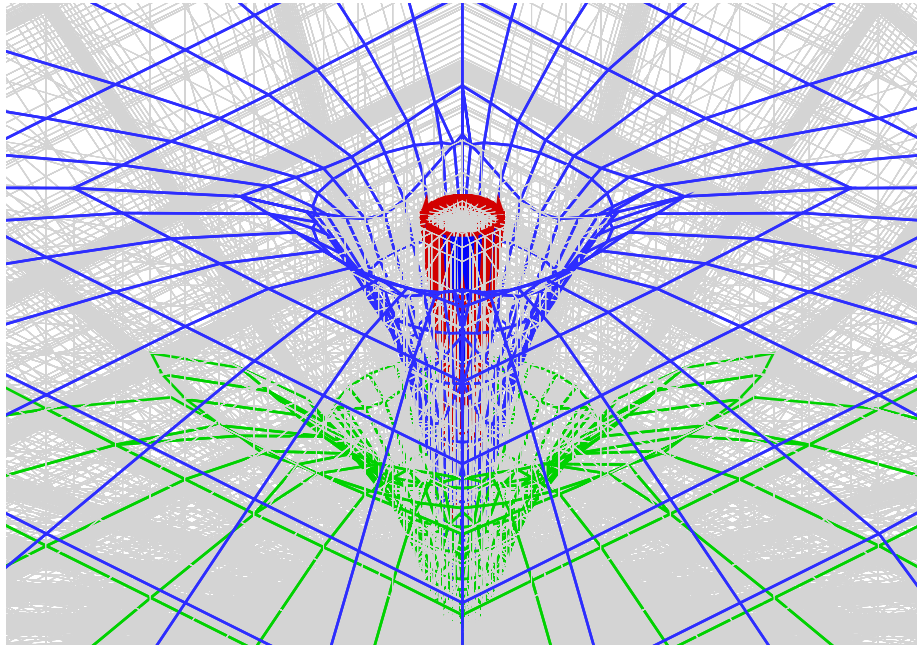


Abbildung 47: Isothermen an der Erdoberfläche um das Sondenzentrum bis in etwa 40 m Tiefe. Die Fläche für 11°C ist grün, diejenige für 10.2°C blau, und die Fläche für 9.5°C ist rot dargestellt.

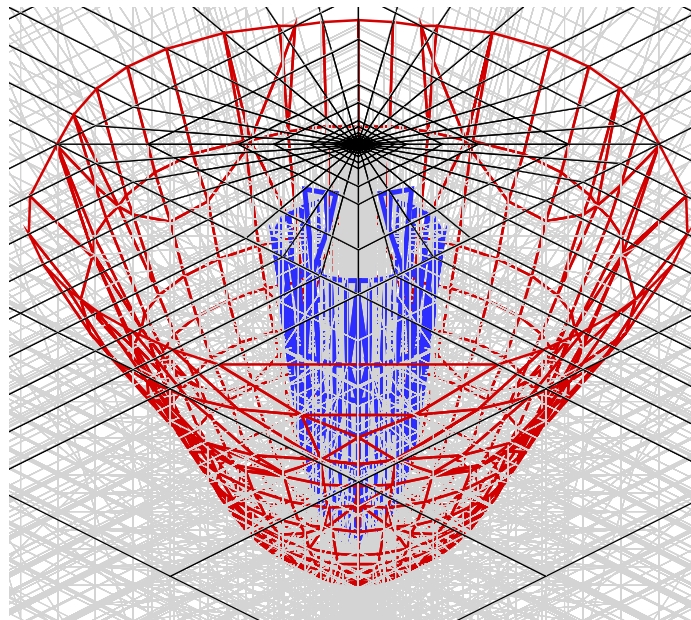


Abbildung 48: Isothermen für den untersten Teil der Sonde von -68 m bis -72 m. Die Fläche für 10°C ist rot, diejenige für 9°C ist blau dargestellt.

Die Resultate der dreijährigen Simulation sind in Abbildung 49 dargestellt. Während im ersten Monat der Temperaturverlauf für beide Kurven noch identisch ist, sinkt das Temperaturniveau der Sole im Fall von vier Sonden ab Februar des ersten Jahres markant stärker ab als für den Fall einer einzelnen, freistehenden Doppel-U-Sonde. Die Erdwärmesonde entzieht dem Boden Wärme über ein laterales grosses Gebiet. Dieses Einzugsgebiet der Sonde wird natürlich durch die Präsenz der drei weiteren Sonden erheblich gestört, die dem Boden ihrerseits Energie entziehen. Die Darstellungen in Abbildung 49 und 50 zeigen also den Einfluss der zusätzlichen Sonden auf die beobachtete Austrittstemperatur des Fluids. Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kurven beträgt nach drei Jahren  $0.2^{\circ}\text{C}$ .

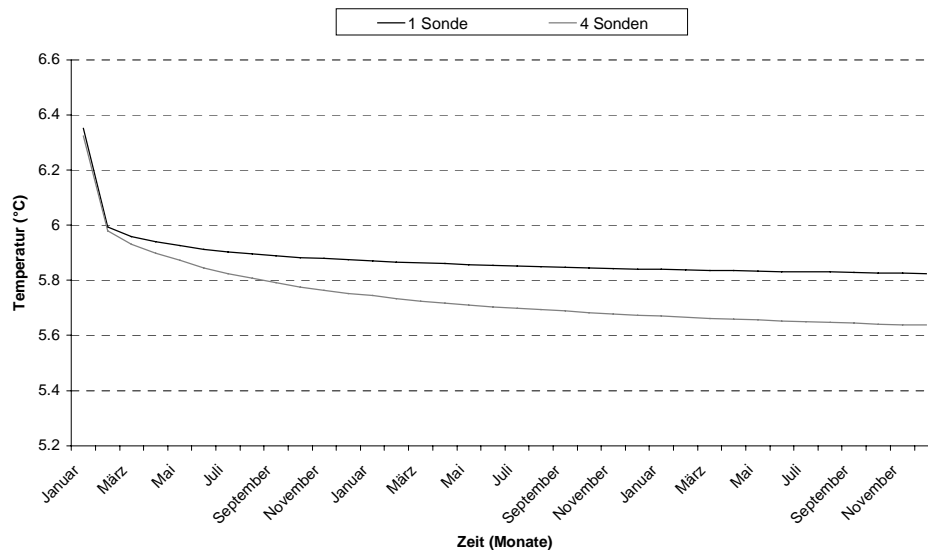


Abbildung 49: Vergleich zwischen den Austrittstemperaturen des Fluids für eine Einzelsonde und für vier Doppel-U-Sonden. Die Berechnung wurde mit FRACTure für drei Jahre mit Zeitschritten der Länge 7 Tage durchgeführt.

Eine noch etwas höhere Temperaturdifferenz ist nach in Abbildung 50 nach 10 Jahren Simulationszeit zu erkennen. Der Kurvenverlauf ist zu Beginn der Simulation etwas kantig, da aufgrund langer Rechenzeiten grosse Zeitschritte von einem Monat gewählt wurden. Gemäss Tabelle 60 liegt die durchschnittliche Austrittstemperatur der Sole nach 10 Jahren für die Einzelsonde um  $0.18^{\circ}\text{C}$  höher als für 4 Sonden. Dies scheint ein kleiner Unterschied zu sein, er muss aber in Relation mit der Temperaturdifferenz zwischen Sondeneinlass und Sondenauslass gesetzt werden. Diese beträgt für die Einzelsonde  $0.83^{\circ}\text{C}$ . Der Verlust der Wärmeengewinnung beträgt also, wenn nur eine Sonde betrachtet wird, rund 22%. Werden allerdings alle 4 Sonden der quadratischen Konfiguration betrachtet, kann die Energiegewinnung im Vergleich zu einer Einzelsonde um das Dreifache erhöht werden.

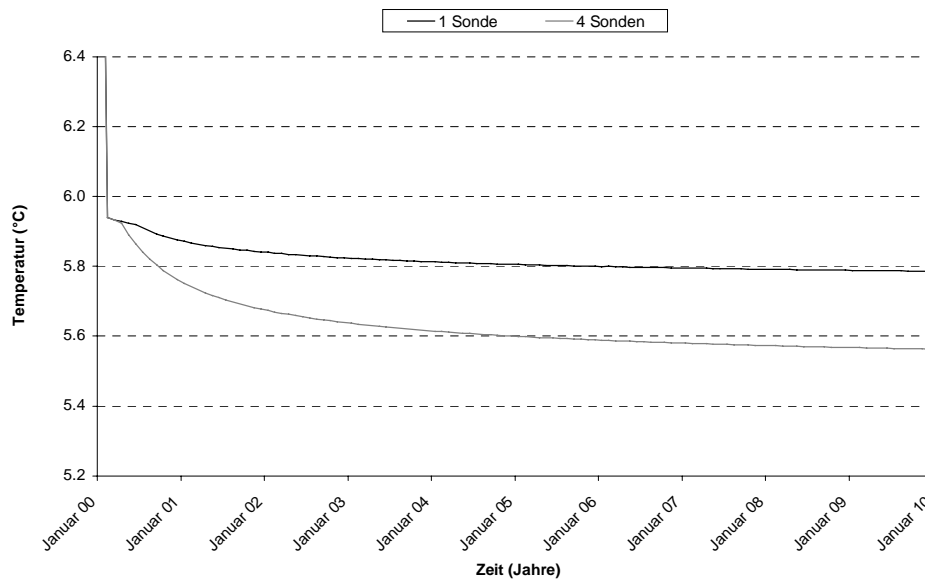


Abbildung 50: Vergleich der Austrittstemperaturen für eine Einzelsonde und für vier Doppel-U-Sonde. Die Berechnungen wurden mit FRACTure für 10 Jahre mit Zeitschritten der Länge eines Monats durchgeführt.

Tabelle 60: Durchschnittliche Austrittstemperaturen über 10 Jahre für eine freistehende Doppel-U-Sonde und 4 Doppel-U-Sonden im Abstand von je 7m, berechnet mit FRACTure.

|                     |                    |         |
|---------------------|--------------------|---------|
| AUSTRITTSTEMPERATUR | 1 Doppel-U-Sonde:  | 5.83 °C |
|                     | 4 Doppel-U-Sonden: | 5.65 °C |

In Abbildung 52 ist die Temperaturdifferenz zwischen der Austrittstemperatur der Sole für die Einzelsonde und die 4 im Quadrat angeordnete Sonden als Funktion der Zeit dargestellt. Ganz zu Beginn der Simulation besteht noch keine Differenz, danach steigt sie aber sehr schnell an, um nach etwa 2 Jahren abzuflachen. In den letzten beiden Simulationsjahren bleibt die Temperaturdifferenz auf ungefähr 0.22°C beständig.

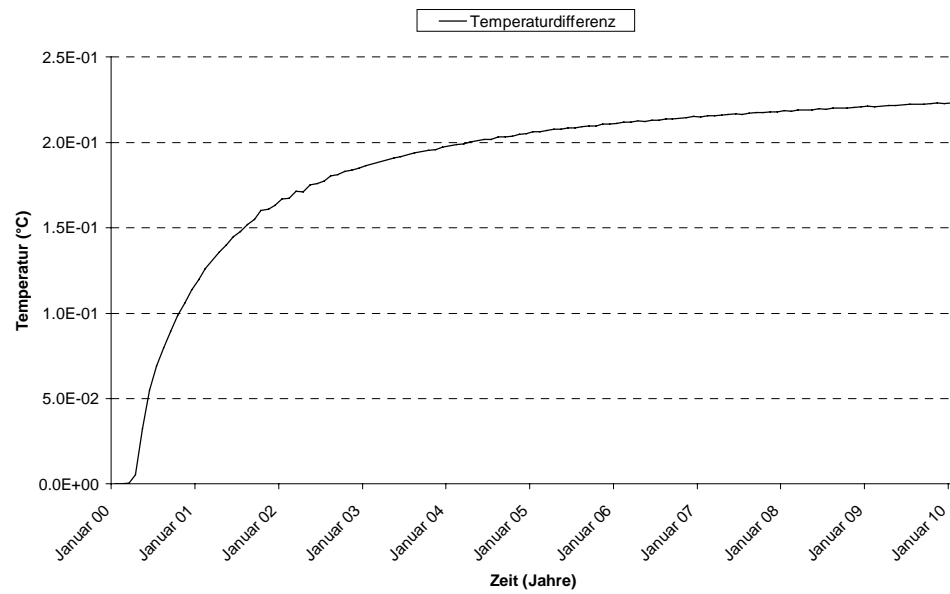


Abbildung 51: Temperaturdifferenz zwischen der Austrittstemperatur der Sole für die Einzelsonde und 4 im Quadrat angeordnete Sonden als Funktion der Zeit.



## 8.3. Modellrechnungen mit EWS

### 8.3.1. Modellierung

Für die Modellierung dieses Problems ist eine konstante Eintrittstemperatur in die Sonde und ein konstanter Durchfluss nötig. Um eine solche Berechnung mit EWS durchzuführen, muss das Eingabefile in einem Texteditor bearbeitet werden. Als Eingabefile kann in EWS ein altes Ausgabefile verwendet werden. Auf den ersten beiden Seiten sind die Eingabebefehle für das Programm anzupassen. Zusätzlich müssen aber auch die Resultate der letzten Berechnung, welche auch auf diesem File aufgeführt sind, verändert werden. So müssen beispielsweise die Kolonnen mit den Eintrittstemperaturen und dem Durchfluss konstant auf 5°C bzw. 0.15 Kg/s gesetzt werden. Dieses modifizierte File wird nun in EWS eingelesen und ohne Veränderung durchgerechnet.

EWS rechnet mit Simulationszeitschritten von 60 Minuten. Dies wurde für alle EWS-Modellierungen übernommen.

### 8.3.2. Materialeigenschaften

Die Sondendimensionen und die identischen Materialparameter wurden unverändert von der FRACTure-Simulation übernommen. Da aber EWS teilweise mit anderen Parametern und Einheiten rechnet als FRACTure, sind diese zusätzlichen Werte in der Tabelle 61 zusammengestellt. Die intern durch EWS berechneten Widerstandswerte sind in Tabelle 62 aufgeführt. Sie wurden nicht verändert.

Tabelle 61: Eingabeparameter für die EWS-Simulation.

|                      |                                       |  |
|----------------------|---------------------------------------|--|
| EINGABEPARAMETER EWS | • Dichte Sole:                        | $9.8 \cdot 10^{+2}$ Kg/m <sup>3</sup>  |
|                      | • spez. Wärmekapazität Sole:          | $3.9 \cdot 10^{+3}$ J/(kgK)            |
|                      | • Dichte Untergrund:                  | $2.2 \cdot 10^{+3}$ Kg/m <sup>3</sup>  |
|                      | • spez. Wärmekapazität Untergrund:    | $1.0 \cdot 10^{+3}$ J/(kgK)            |
|                      | • Dichte Hinterfüllung:               | $1.25 \cdot 10^{+3}$ Kg/m <sup>3</sup> |
|                      | • spez. Wärmekapazität Hinterfüllung: | $3.0 \cdot 10^{+3}$ J/(kgK)            |
|                      | • Temperaturgradient im Boden:        | $3.0 \cdot 10^{-2}$ °C/m               |

Tabelle 62: Intern durch EWS berechnete Widerstandswerte.

| WIDERSTÄNDE (Km/W) |                                   |
|--------------------|-----------------------------------|
|                    | • $R_1$ : $5.4 \cdot 10^{-2}$ K/W |
|                    | • $R_a$ : $1 \cdot 10^{-1}$ Km/W  |
|                    | • $R_b$ : $1 \cdot 10^{-1}$ Km/W  |

### 8.3.3. Randbedingungen

Um die spezielle Konfiguration der vier Doppel-U-Erdwärmesonden zu berechnen, musste eine passende g-Funktion ausgewählt werden. Für die quadratische Auslegung ist dies die Konfiguration „2x2 Sonden, B/H = 0.1“. B gibt den Abstand der Sonden untereinander an, also 7m in diesem Modell, und H ist die Tiefe der Sonden (70m).

Für die einzelne Sonde wird die Konfiguration „Einzelsonde“ gewählt.

### 8.3.4. Resultate

Abbildung 52 zeigt die Austrittstemperatur für die beiden Sondenkonfigurationen für die ersten drei Jahre. Der Verlauf der Temperaturen ist sehr ähnlich wie bei der FRACTure-Berechnung. In den ersten drei Monaten ist noch keine Temperaturdifferenz erkennbar, danach fällt das Temperaturniveau der 4-Sonden-Konfiguration aber gegenüber der Einzelsonde deutlich ab.

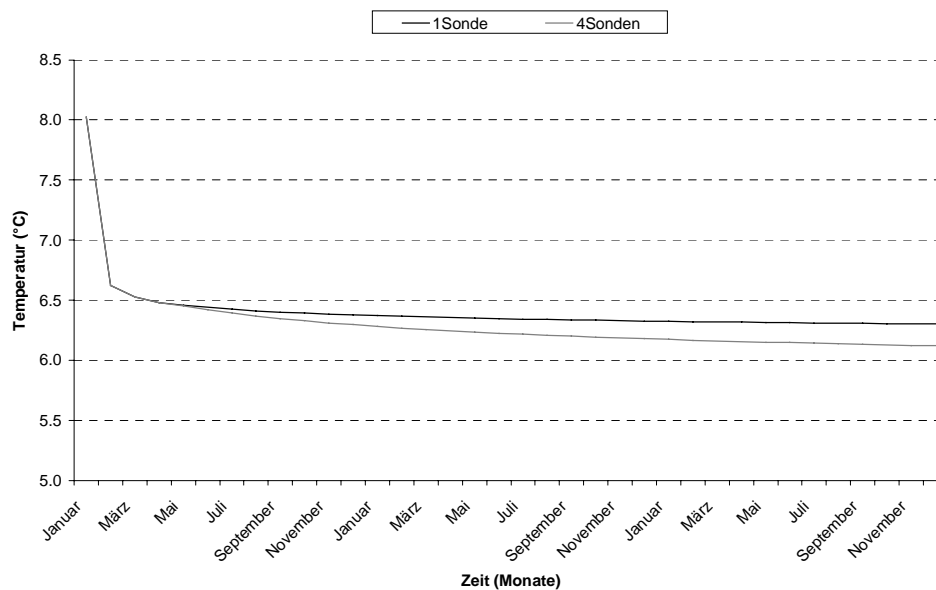


Abbildung 52: Vergleich der Austrittstemperatur für die Einzelsonde und die 4-Sonden-Konfiguration. Die Simulationsdauer beträgt drei Jahre. Die Berechnungen wurden mit EWS durchgeführt.

In Abbildung 53 ist die Simulation über 10 Jahre dargestellt. Die Temperaturdifferenz beträgt am Ende der Simulationszeit ungefähr  $0.25^{\circ}\text{C}$ . Gemäss Tabelle 63 beträgt die durchschnittliche Differenz der Austrittstemperatur über die ersten 10 Jahre knapp  $0.2^{\circ}\text{C}$ .

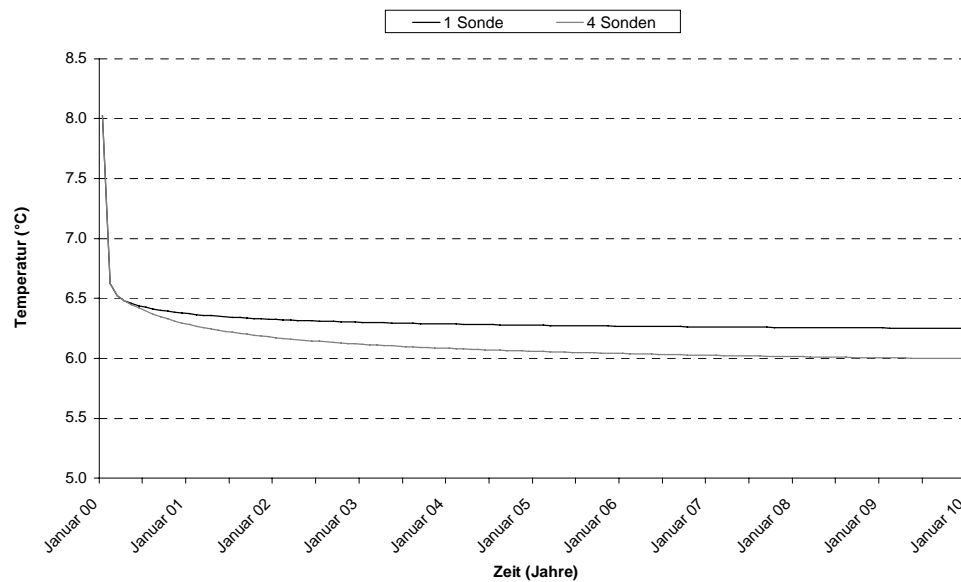


Abbildung 53: Vergleich der Austrittstemperaturen des Fluids mit einer zehnjährige Simulation.

Tabelle 63: Durchschnittliche Austrittstemperaturen über 10 Jahre für eine freistehende Doppel-U-Sonde und 4 Doppel-U-Sonden im Abstand von je 7m, berechnet mit EWS.

|                     |                    |         |
|---------------------|--------------------|---------|
| AUSTRITTSTEMPERATUR | 1 Doppel-U-Sonde:  | 6.31 °C |
|                     | 4 Doppel-U-Sonden: | 6.12 °C |

Abbildung 54 zeigt wiederum einen Vergleich Temperaturdifferenz zwischen der Austrittstemperatur der Sole für die Einzelsonde und 4 im Quadrat angeordnete Sonden als Funktion der Zeit. Der Einfluss der benachbarten Sonden schwindet mit der Zeit, so dass die Kurve nach 10 Jahren fast horizontal verläuft.

Im nächsten Kapitel sollen die Resultate der FRACTure-Simulation mit den EWS-Ergebnissen verglichen werden.

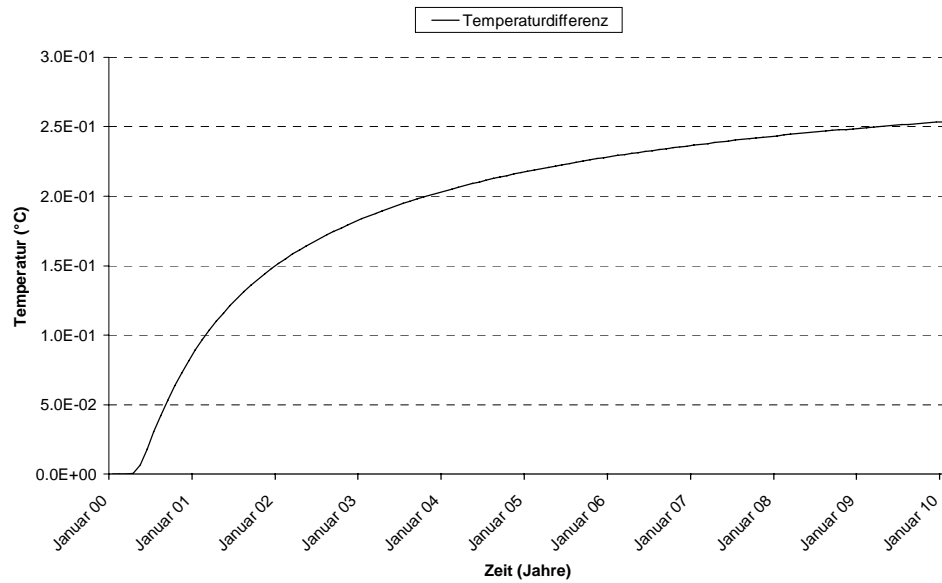


Abbildung 54: Temperaturdifferenz zwischen der Austrittstemperatur der Sole für die Einzelsonde und 4 im Quadrat angeordnete Sonden als Funktion der Zeit, berechnet mit EWS.

## 8.4. Vergleich der Resultate

Abbildung 55 zeigt einen Vergleich der im letzten Kapitel vorgestellten Ergebnisse der FRACTure- und der EWS-Simulation. Die Resultate zeigen vom Kurvenverlauf her eine gute Übereinstimmung. Der etwas kantige Bereich zu Simulationsbeginn mit FRACTure ist auf die grösseren Zeitschritte zurückzuführen. Das allgemeine Temperaturniveau der EWS Resultate ist aber um etwa  $0.5^{\circ}\text{C}$  höher als bei den FRACTure Resultaten.

Eine mögliche Erklärung wären die unterschiedlichen Eingabeparameter. In FRACTure muss beispielsweise der Wärmefluss definiert werden, während EWS mit dem Temperaturgradienten rechnet. Zudem rechnet EWS im Gegensatz zu FRACTure mit Widerstandswerten, was wiederum zu Abweichungen führen kann.

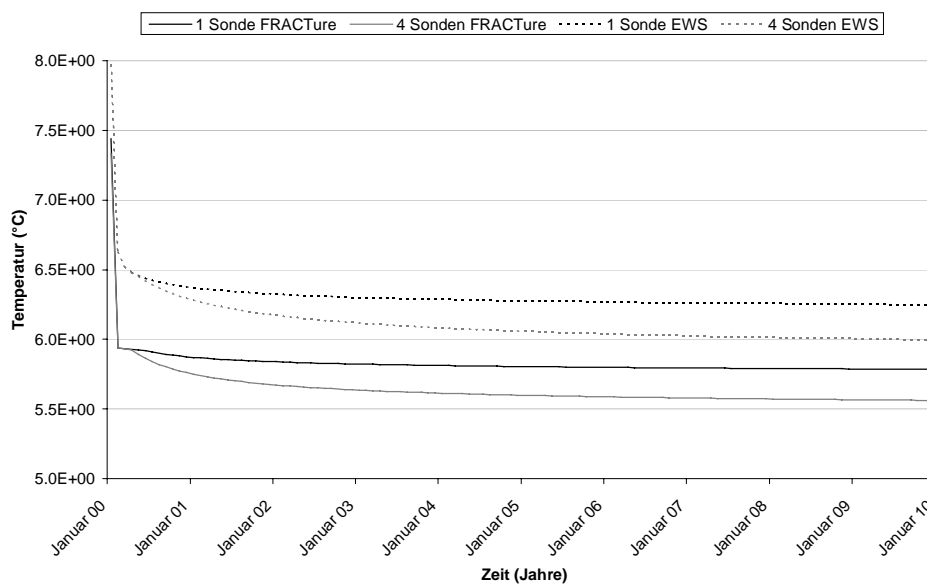


Abbildung 55: Vergleich der Resultate der FRACTure- und der EWS-Berechnung für 10 Jahre Simulationszeit.

Abbildung 56 zeigt den Vergleich der Temperaturdifferenzen der Konfigurationen für FRACTure und EWS. Auffallend ist, dass der Temperaturabfall für die 4-Sonden-Konfiguration bei der FRACTure-Modellierung in den ersten drei Jahren grösser ist als für die EWS-Modellierung. Nach den ersten drei Jahren schwächt sich dieser Temperaturabfall bei FRACTure aber stärker ab als bei EED. Somit ist nach 10 Jahren die Bilanz wieder ausgeglichen. Der Unterschied zwischen den mittleren Temperaturdifferenzen über 10 Jahre beträgt für die beiden Programme nur  $0.01^{\circ}\text{C}$ .

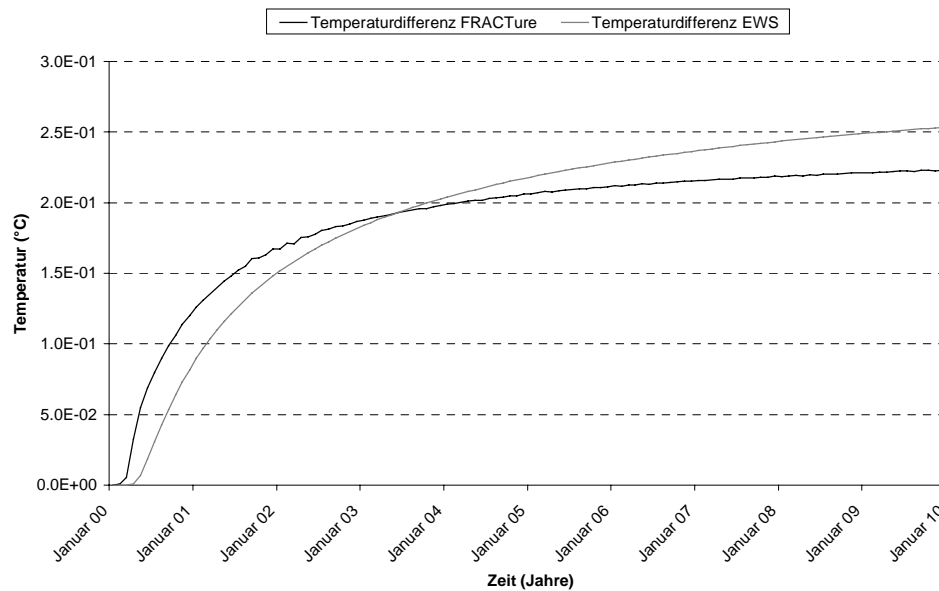


Abbildung 56: Darstellung der Temperaturdifferenzen zwischen den Konfigurationen von FRACTure und EWS.

Vergleicht man die Kurvenverläufe und die durchschnittlichen Austrittstemperaturen nach 10 Jahren, so findet man eine sehr gute Korrelation zwischen den Ergebnissen der beiden Programme. Die von ESKILSON (1987) hergeleitete g-Funktion liefert also im Vergleich mit der Berechnung von FRACTure, welche die genaue Geometrie der Situation berücksichtigt, durchaus gute Resultate.

Die Rechenzeit ist für die FRACTure-Berechnung viel höher als für die EWS-Berechnung. EWS rechnet mit 60 Minuten Zeitschritten, und benötigt für die Berechnung der zehnjährigen Simulation etwa drei Minuten. Um mit FRACTure in einer akzeptablen Zeit Resultate zu erhalten, mussten die Zeitschritte massiv vergrößert werden. Für 120 Berechnungen (über 10 Jahre jeden Monat eine Berechnung) benötigte FRACTure ungefähr 10 Minuten.

## 9. Schlussfolgerungen

Mit den drei Erdwärmesonden-Simulationsprogrammen EED, EWS und FRACTure wurde versucht, die tiefe Erdwärmesonde Weissbad zu Modellieren. Die durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass die korrekte Modellierung einer Erdwärmesonde keine leichte Aufgabe ist.

Das Programm EED wurde für Erdwärmesonden bis 200 m Tiefe ausgelegt. Der Grund für die Limitierung auf diesen Maximalwert liegt vor allem darin, dass nur eine homogene Untergrundschicht modelliert werden kann. Der Vergleich mit einem weiteren Modell der Sonde Weissbad, berechnet mit EWS, zeigte, dass nur sehr kleine Differenzen der Austrittstemperaturen zwischen einem inhomogen, zehnschichtig und einem homogen, einschichtig modellierten Untergrund mit guten Durchschnittswerten bestehen. Um wirklich relevante Unterschiede zu erhalten, muss die Geologie des Untersuchungsgebietes mit allen geophysikalischen Parametern genau bekannt sein, was bei Voruntersuchungen zur Sondenauslegung, und zu diesem Zweck wurden die beiden Programme gemacht, selten der Fall ist.

Alle Modellierungen zeigten bei einer ersten Simulation für Weissbad zu hohe Fluidtemperaturen im Vergleich zu den Messwerten von Oekoplan. Der Grund könnten einerseits die Untergrundparameter, die durch fehlende geophysikalische Untersuchungen der Bohrkerne und der komplizierten Geologie im Raum Weissbad nur abgeschätzt werden konnten. Andererseits ist die Sonde Weissbad aller Wahrscheinlichkeit nach schlecht hinterfüllt. Zwischen der Verrohrung und der Hinterfüllung sind offenbar Lufteinschlüsse vorhanden, deren genaue Lage und Dimension nicht bekannt ist. Die Modellierungen, für welche solche Lufteinschlüsse einbezogen wurden, zeigten eine deutlich bessere Annäherung an die Messresultate.

Die durch das FE-Programm FRACTure errechneten Fluidtemperaturen liefern den besten Fit zur Messkurve. Dies ist aber nicht weiter verwunderlich, da für jeden Berechnungsschritt die korrekte, gemessene Eingangstemperatur des Fluids in die Sonde vorgegeben wurde. Mit der Modellierung einer 1 mm dicken Luftschicht zwischen Verrohrung und Hinterfüllung konnten die berechneten Austrittstemperaturen mit den gemessenen sehr gut korreliert werden.

Die Berechnungen zur Variation der Sondengeometrie wurde mit EWS und FRACTure durchgeführt. Wiederum zeigen die EWS-Resultate um einiges höhere Austrittstemperaturen als diejenigen von FRACTure. Die Kurvenverläufe sind aber beinahe identisch, was auch ein Vergleich der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen gegen die Zeit bestätigt. Die verwendete g-Funktion, welche auch in EED implementiert ist, liefert also korrekte Resultate. Allerdings können mit den g-Funktionen nicht beliebige, sondern nur bereits festgelegte Geometrien simuliert und berechnet werden, was die Flexibilität der Programme einschränkt.

Abschliessend kann gesagt werden, dass die beiden Programme EED und EWS allgemein etwas zu hohe Resultate liefern. Für die erste Dimensionierung einer geplanten Erdwärmesonden-Anlage liefern sie aber ohne grosse Rechenzeit brauchbare Resultate, wenn mit den tiefst möglichen Eingabeparametern gerechnet wird.

FRACTure erlaubt die Berechnung eines detailgetreuen Modelles der Verhältnisse. Das Erstellen eines FE-Gitters und das Anpassen des Input-Files ist allerdings zeitaufwendig und kompliziert. Nimmt man diesen Mehraufwand in Kauf, erhält man als Resultat bessere Ergebnisse für ein genau definiertes Problem, die sich zudem mit geeigneten Programmen graphisch ansprechend darstellen lassen.



## 10. Ausblick

Die Modelle, welche in dieser Arbeit berechnet wurden, stellen die heutigen Verhältnisse der tiefen Erdwärmesonde Weissbad dar. Mit zusätzlichen Sensitivitätsuntersuchungen, beispielsweise einer Variation des Durchflusses, könnte die Möglichkeit einer Optimierung der Anlage getestet werden, um sie besser zu nutzen.

Um genauere Informationen über den Untergrund zu erhalten, sollten die geophysikalischen Parameter der Bohrkerne bestimmt werden. Nur so ist es möglich, die Berechnungen der Programme zu überprüfen, und somit eine Aussage über ihre Funktionstüchtigkeit und Verwendbarkeit für tiefe Erdwärmesonden zu machen. Sind die Verhältnisse in der Natur nicht genau bekannt, wird die Begründung allfälliger Differenzen zwischen berechneten und beobachteten Werten Spekulation bleiben.

Die Berechnungen von unterschiedlichen Auslegungsgeometrien konnte in dieser Arbeit nur an einem Beispiel durchgeführt werden. Interessant wären weitere Vergleiche zwischen den Resultaten der Berechnungen mittels verschiedener g-Funktionen und exakt modellierten Geometrien in FRACTure.

Die Benutzerfreundlichkeit der Programme EED und EWS hat sich im Laufe dieser Arbeit verbessert. So sind inzwischen von beiden Programmen Windows-Versionen vorhanden, die dem Anwender die Arbeit wesentlich erleichtern. Trotzdem sind einige Probleme bei der Anwendung aufgetaucht, die es für eine kommerzielle Nutzung der Programme zu beheben gilt.

FRACTure eignet sich sehr gut für die Modellierung von Erdwärmesonden beliebiger Tiefe. Der einzige Nachteil ist die aufwendige Erstellung eines Gitters als Ausgangsbasis der Berechnungen. Das Programm WinFra, welches laufend verbessert wird, erleichtert allerdings die Modellierung in grossem Masse. Eine Möglichkeit zur automatischen Generierung von Zeitabfolgen für Kraft-Zeit-Funktionen sollte allerdings ins Auge gefasst werden.

In dieser Arbeit wurde versucht, zwischen dem Fluidaustritt und seinem Wiedereintritt in die Sonde ein Energieentzug zu modellieren. Während diesen Versuchen hat sich aber herausgestellt, dass solche Berechnungen mit der aktuellen Version des Programmes nicht durchführbar sind. Die Möglichkeit einer Berechnung der effektiven Belastung ist für viele Anwendungen von grosser Bedeutung, und würde einen besseren Vergleich zwischen den untersuchten Programmen erlauben.

## Literaturverzeichnis

- BAUMGARTNER, W. (1999): Neue Wärmepumpenstatistik: 53'000 elektrische Wärmepumpen in Betrieb. Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, Nr. 24/99, S. 9-12.
- DEFILA, C. & BRÄNDLI J. (1989): Bodentemperaturen und Verdunstung, 1951-1985. Klimatologie der Schweiz, Heft 28 P. Herausgeber: Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich.
- ESKILSON, P. (1987): Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Departement of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- HELLSTRÖM, G. & SANNER, B. (1994): PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden. IZW-Bericht 1/94, S.341-350, Karlsruhe.
- HOLUB, P & RÜEGG, F. (1996): Geothermische Tiefbohrung Weissbad 93/1. Bericht über geophysikalische Bohrlochmessungen, Nr. 93012. Geotest AG, Zollikofen.
- HUBER, A. & PAHUD, D. (1999): Erweiterung des Programms EWS für Sondenfelder. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- HUBER, A. & SCHULER, O. (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9658907/1, 1997.
- KALTSCHMITT, M., HUENGES, E. & WOLFF, H. (1999): Energie aus Erdwärme. Geologie, Technik und Energiewirtschaft. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1999.
- KOHL, TH. (1992): Modellsimulation gekoppelter Vorgänge beim Wärmeentzug aus heissem Tiefengestein. Diss. ETHZ Nr. 9802.

- KOHL, TH. (1999): FRACTure (V.3.1) Finite Element Program with WinFra (V. 0.51) Mesh Generator. Internes Manual ETHZ.
- LEU, W., KELLER, B., MATTER, A., SCHÄRLI, U. & RYBACH, L. (1999): Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich bis 500 m). Datenbank für Wärmeleitfähigkeit, Gesteinsdichte und Porosität. Programm Geothermie. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, April 1999.
- OEKOPLAN AG (1998): Messbericht Erdwärme-Tiefensonde, 1. Jahresbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern.
- SALTON, M. (1999): Untersuchungen zum Verhalten von Erdwärmesonden. Diplomarbeit an der Abteilung für Erdwissenschaften der ETH Zürich, Oktober 1999.
- SANNER, B., KLUGESCHIED, M., KNOBLICH, K. & GONKA, TH. (1996): Saisonale Kältespeicherung im Erdreich. Giessener Geologische Schriften, Nr. 59, S.93-102, Giessen.
- SIGNORELLI, S., SALTON, M. & RYBACH, L. (2000): Geothermie-Statistik Schweiz 1990-1999. Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie. DIS Projekt-Nr.: 24'843, DIS Vertrags-Nr.: 74'986.
- THEIS, C.V. (1935) The Relation between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well using Groundwater Storage, Trans. Am. Geophys. Union, 16.

# Anhang

## **Anhang A**

Messprotokoll von Oekoplan AG für die Erdwärmesonde Weissbad.



## Anhang B

Auszug aus dem Input-File für ein 4-facher Abschaltzyklus ohne zusätzliche Verfeinerung während dem Anfahren der Wärmepumpe.









```

0
ein Eingabe File das von WinFra 0.58f erstellt wurde
* AUSFUEHRUNGSKONTROLLE
*   iexec   iacode   idebug   irank   ireadr   iprtin   iprtut
iprtec
  1         0         0         0         0         0         0
  1
* ALLGEMEINE DIMENSIONIERUNG
*   numseq   ndhist   nsd     numnp   ngdof   nlvect   nltftn
nptslf
  27         1         3     3052     2       2       3
  17
* LOESUNGALGORITHMUS
*   ipcg     isym     ifact   itmax   tol
  1         1       25     3400   1.0E-12
* KOPPLUNGSKONTROLLE, SYSTEMITERATIONEN
*   numegh   numegt   numege   iterh   epsh   itert   epst
itere      epse
  2         2         0         0     1.0E-02     0     1.0E-02
  0         0
* ZEITSEQUENZEN
*   n       nstep   ndprt   nsprt   nhplt   dt
  1         1       0       0       1       0
  2         1       1       1       1       0
  3         20      0       0       1     10800
  4         1       0       0       1     10799
  5         1       0       0       1       1
  6         16      0       0       1     10800
  7         1       0       0       1     10799
  8         1       0       0       1       1
  9         16      0       0       1     10800
 10        1       0       0       1     10799
 11        1       0       0       1       1
 12        16      0       0       1     10800
 13        1       0       0       1     10799
 14        1       0       0       1       1
 15        16      0       0       1     10800
 16        1       0       0       1     10799
 17        1       0       0       1       1
 18        16      0       0       1     10800
 19        1       0       0       1     10799
 20        1       0       0       1       1
 21        16      0       0       1     10800
 22        1       0       0       1     10799
 23        1       0       0       1       1
 24        16      0       0       1     10800
 25        1       0       0       1     10799
 26        1       0       0       1       1
 27        20      20      20      1     10800
* KOPPLUNGSSEQUENZEN HYDRAULIK:
*   n       nthyd   niter   alpha   beta   gamma   iterj
relaxj    epsil
  1         0       1       0       1       0.9     100
  0.8     1.0E-06
  2        -1       1       0       1       0.9     100
  0.8     1.0E-06
  3         0       1       0       1       0.9     100
  0.8     1.0E-06
  4         0       1       0       1       0.9     100
  0.8     1.0E-06
  .
  .
  27        0       1       0       1       0.9     100
  0.8     1.0E-06
* KOPPLUNGSSEQUENZEN THERMIK:
*   n       nttherm  niter   alpha   beta   gamma   iterj
relaxj    epsil
  1        -1       1       0       1       0.9     10
  0.8     1.0E-06
  2         0       1       0       1       0.9     10
  0.8     1.0E-06
  3         1       1       0       1       0.9     10

```

```

0.8 1.0E-06
4 1 1 0 1 0.9 10
0.8 1.0E-06
.
.
27 1 1 0 1 0.9 10
0.8 1.0E-06
* MONITORKNOTEN
* Knr dof Spez.
2825 2 1
* KNOTENKOORDINATEN
* Knr. gen x1-Koord x2-Koord x3-Koord 1.0000 10.0000
1 0 666.6667 -37.3333 0.0000
0.0000
2 0 500.0000 -56.0000 0.0000
3 0 500.0000 -112.0000 0.0000
4 0 500.0000 0.0000 0.0000
.
.
3052 0 1000.0000 0.0000 0.0000
0 0 0 0 0
* RANDBEDINGUNGEN
* Knr Knr Ink dof1 dof2 ...
4 4 1 0 1
2771 2771 1 0 1
2808 2808 1 0 1
2809 2809 1 0 1
2825 2825 1 1 0
2831 2831 1 0 1
.
.
3052 3052 1 0 1
0 0 0 0 0
* KRAFTVEKTOREN - GROESSE DER RANDBEDINGUNG
* Knr gen dof1 dof2 ...
4 0 0 9
2771 0 0 9
2808 0 0 9
.
.
3052 0 0 9
0 0 0 0
* KRAFTVEKTOREN "2
* Knr gen dof1 dof2 ...
2831 0 0 6.7E+00
0 0 0 0
* BELASTUNGSFUNKTION NR. 1: Konstant gilt für Kraftvekt.1 & für W.FlussRB
* Zeit Wert1
0 1 1 0 0
226799 1 1 0 0
226800 1 1 0 0
410399 1 1 0 0
410400 1 1 0 0
593999 1 1 0 0
594000 1 1 0 0
777599 1 1 0 0
777600 1 1 0 0
961199 1 1 0 0
961200 1 1 0 0
1144799 1 1 0 0
1144800 1 1 0 0
1328399 1 1 0 0
1328400 1 1 0 0
1511999 1 1 0 0
1512000 1 1 0 0
* BELASTUNGSFUNKTION NR. 2: gilt für Injektionstemperatur
* Zeit Wert1
0 1 1 0 0
226799 1 1 0 0

```

|   |           |           |           |          |         |         |
|---|-----------|-----------|-----------|----------|---------|---------|
| 226800  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 410399  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 410400  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 593999  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 594000  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 777599  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 777600  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 961199  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 961200  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1144799   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1144800   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1328399   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1328400   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1511999   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1512000   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| * BELASTUNGSFUNKTION NR. 3: gilt für An- Abschalten |           |           |           |          |         |         |
| * Zeit  | Wert1     |           |           |          |         |         |
| 0   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 226799  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 226800  | 0         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 410399  | 0         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 410400  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 593999  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 594000  | 0         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 777599  | 0         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 777600  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 961199  | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 961200  | 0         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1144799   | 0         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1144800   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1328399   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1328400   | 0         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1511999   | 0         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| 1512000   | 1         | 1         | 0         | 0        |         |         |
| * ANFANGSBEDINGUNGEN DER PRIMAERVARIABLEN           |           |           |           |          |         |         |
| 0   |           |           |           |          |         |         |
| * ANFANGSBEDINGUNGEN DER ERSTEN ZEITABLEITUNGEN     |           |           |           |          |         |         |
| 0   |           |           |           |          |         |         |
| * HYDRO-THERM. ELEMENTGRUPPE NR. 1                  |           |           |           |          |         |         |
| * ELEMENTKONTROLLE                                  |           |           |           |          |         |         |
| * ntype   | numel     | numat     | iopt      | istprt   | nicode  | imass   |
| impexp  | nen       |           |           |          |         |         |
| 42  | 2956      | 10        | 2         | 0        | 0       | 0       |
| 0   | 4         |           |           |          |         |         |
| * nsurf1  | ntran1    | nbody1    | nsout1    | lfsur1   | lfbod1  | ibuoy   |
| ilinh   |           |           |           |          |         |         |
| 0   | 0         | 0         | 0         | 1        | 1       | 0       |
| 0   |           |           |           |          |         |         |
| * nsurf2  | ntran2    | nbody2    | nsout2    | lfsur2   | lfbod2  | iadv    |
| nthema  | ilint     |           |           |          |         |         |
| 32  | 0         | 0         | 0         | 1        | 1       | 0       |
| 0   | 0         |           |           |          |         |         |
| * HYDRO - THERMISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN          |           |           |           |          |         |         |
| * Mat   | hydLtfx1  | hydLtfx2  | hydLtfx3  | Sp.koef. | Poros.  | Dicke   |
| * xy-Winkel   | xz-Winkel | yz-Winkel | mol.Konz. |          |         |         |
| * Mat   | th.Ltfx1  | th.Ltfx2  | th.Ltfx3  | rhocpf   | rhocpm  | Disp.x1 |
| Disp.x2   | Dicke     |           |           |          |         |         |
| * xy-Winkel   | xz-Winkel | yz-Winkel | Absorpt   |          |         |         |
| * Gestein   |           |           |           |          |         |         |
| 1   | 1.0E-14   | 1.0E-14   | 1.0E-14   | 0        | 0       | 0       |
|   | 0         | 0         | 0         | 0        |         |         |
| 1   | 2.5       | 2.5       | 2.5       | 2500000  | 2500000 | 0       |
| 0   | 0         |           |           |          |         |         |
|   | 0         | 0         | 0         | 0        |         |         |
| * Sondenfluid                                       |           |           |           |          |         |         |
| 4   | 1.0E-14   | 1.0E-14   | 1.0E-14   | 0        | 0       | 0       |
|   | 0         | 0         | 0         | 0        |         |         |
| 4   | 10        | 0.6       | 0.6       | 4190000  | 4190000 | 0       |
| 0   | 0         |           |           |          |         |         |
|   | 0         | 0         | 0         | 0        |         |         |
| * Verrohrung_Innen                                  |           |           |           |          |         |         |
| 6   | 1.0E-14   | 1.0E-14   | 1.0E-14   | 0        | 0       | 1       |
|   | 0         | 0         | 0         | 0        |         |         |

|  |          |          |          |         |         |   |
|--|----------|----------|----------|---------|---------|---|
| 6  | 2.5E-01  | 2.5E-01  | 2.5E-01  | 3500000 | 3500000 | 0 |
| 0  | 1        |          |          |         |         |   |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| * Hinterfuellung   |          |          |          |         |         |   |
| 3  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 0       | 0       | 1 |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| 3  | 3.000000 | 3.000000 | 3.000000 | 2000000 | 2000000 | 0 |
| 0  | 1        |          |          |         |         |   |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| * Kontaktmaterial  |          |          |          |         |         |   |
| 7  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 0       | 0       | 1 |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| 7  | 0.15     | 0.15     | 0.15     | 4200000 | 3500000 | 0 |
| 0  | 1        |          |          |         |         |   |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| * Nahgestein   |          |          |          |         |         |   |
| 2  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 0       | 0       | 0 |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| 2  | 2.5      | 2.5      | 2.5      | 2500000 | 2500000 | 0 |
| 0  | 0        |          |          |         |         |   |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| * Sondenfluidhorizontal                                  |          |          |          |         |         |   |
| 9  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 0       | 0       | 1 |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| 9  | 6.0E-01  | 10       | 6.0E-01  | 4200000 | 4190000 | 0 |
| 0  | 1        |          |          |         |         |   |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| * Verrohrung_unten                                       |          |          |          |         |         |   |
| 10   | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 0       | 0       | 1 |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| 10   | 7E-02    | 7E-02    | 7E-02    | 3500000 | 3500000 | 0 |
| 0  | 1        |          |          |         |         |   |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| * Verrohrung_aussen unten                                |          |          |          |         |         |   |
| 8  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 1.0E-14  | 0       | 0       | 1 |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| 8  | 7E-02    | 7E-02    | 7E-02    | 3500000 | 3500000 | 0 |
| 0  | 1        |          |          |         |         |   |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| * Verrohrung_aussen oben                                 |          |          |          |         |         |   |
| 5  | 1.0E-16  | 1.0E-16  | 1.0E-16  | 0       | 0       | 1 |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| 5  | 6.2E-02  | 6.2E-02  | 6.2E-02  | 3500000 | 3500000 | 0 |
| 0  | 1        |          |          |         |         |   |
|  | 0        | 0        | 0        | 0       |         |   |
| * GRAVITATION  |          |          |          |         |         |   |
| 0  | 1        | 0        |          |         |         |   |
| * KNOTEN-ELEMENT-ZUORDNUNG                               |          |          |          |         |         |   |
| * El-nr Mat ien ...                                      |          |          |          |         |         |   |
| 1  | 1        | 2766     | 1        | 2       | 3       | 0 |
| 2  | 1        | 2        | 1        | 3051    | 4       | 0 |
| 3  | 1        | 881      | 2515     | 5       | 6       | 0 |
| 4  | 1        | 408      | 645      | 7       | 8       | 0 |
| .  |          |          |          |         |         |   |
| .  |          |          |          |         |         |   |
| 2956   | 2        | 2116     | 2104     | 1702    | 1701    | 0 |
| 0  | 0        | 0        | 0        | 0       | 0       | 0 |
| * OBERFLAECHEKRAEFTE                                     |          |          |          |         |         |   |
| * Eln Seite Kraft Kraft ...                              |          |          |          |         |         |   |
| 5  | 4        | 7.5E-02  | 7.5E-02  |         |         |   |
| 792  | 3        | 7.5E-02  | 7.5E-02  |         |         |   |
| 47   | 3        | 7.5E-02  | 7.5E-02  |         |         |   |
| 311  | 4        | 7.5E-02  | 7.5E-02  |         |         |   |
| .  |          |          |          |         |         |   |
| .  |          |          |          |         |         |   |
| 2953   | 3        | 7.5E-02  | 7.5E-02  |         |         |   |
| * MONITORELEMENTE  |          |          |          |         |         |   |
| * Eln Intp Komp.   |          |          |          |         |         |   |
| ***** WINFRA ERSTELLT NOCH KEINE MONITORELEMENTE ! ***** |          |          |          |         |         |   |
| * HYDRO-THERM. ELEMENTGRUPPE NR. 2                       |          |          |          |         |         |   |
| * ELEMENTKONTROLLE                                       |          |          |          |         |         |   |

```

*      ntype      numel      numat      iopt      istprt      nicode      imass
impexp      41      117      4      2      0      0      0
      0      2
*      nsurf1      ntran1      nbody1      nsout1      lfsur1      lfbod1      ibuoy
ilinh      1      0      0      0      3      2      0
      0
*      nsurf2      ntran2      nbody2      nsout2      lfsur2      lfbod2      iadv
nthema      ilint
      0      0      0      0      1      1      11
      0      0
* HYDRO - THERMISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN
*      Mat      hydLtfx1      hydLtfx2      hydLtfx3      Sp.koef.      Poros.      Dicke
*      xy-Winkel      xz-Winkel      yz-Winkel      mol.Konz.
*      Mat      th.Ltfx1      th.Ltfx2      th.Ltfx3      rhocpf      rhocpm      Disp.x1
Disp.x2      Dicke
*      xy-Winkel      xz-Winkel      yz-Winkel      Absorpt
* 1D_abwaerts oben
      1      3.6E-02      3.6E-02      3.6E-02      0      0      3.49E-02
      0      0      0      0      0
      1      1E+10      0.6      0.6      4190000      4190000      0
      0      0
* 1D_Horizontal
      4      0.036      0.1      0.1      0      0      0.0349
      0      0      0
      4      0.6      1E+10      0.6      4190000      4190000      0
      0      0
* 1D_abwaerts unten
      3      6.0E-02      6.0E-02      6.0E-02      0      0      0.0131
      0      0      0
      3      1E+10      0.6      0.6      4190000      4190000      0
      0      0
* 1D_aufwaerts
      2      1.2E-01      1.2E-01      1.2E-01      0      0      0.0030
      0      0      0
      2      1E+10      0.6      0.6      4190000      4190000      0
      0      1
      0      0
* GRAVITATION
      0      1      0
* KNOTEN-ELEMENT-ZUORDNUNG
*      El-nr      Mat      ien      ...
      1      1      2802      2803      0
      2      1      2780      95      0
      3      2      2789      105      0
      4      3      2549      126      0
      .
      .
      117      2      2822      3001      0
      0      0      0      0
* OBERFLAECHEKRAEFTE
*      Eln      Seite      Kraft      Kraft      ...
      102      1      8.46E-02
* MONITORELEMENTE
*      Eln      Intp      Komp.
***** WINFRA ERSTELLT NOCH KEINE MONITORELEMENTE ! *****
+end

```