

**MODELLSIMULATIONEN VON
TIEFENERDWÄRMESONDEN-ANLAGEN AN DEN
FALLBEISPIELEN WEGGIS UND MEDYAGUINO**

**Diplomarbeit
am Institut für Geophysik
der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich**

**Vorgelegt von
Renzo Brenni**

**Referent: PD Dr. Th. Kohl
Zürich, Oktober 2000**

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie am Institut für Geophysik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich durchgeführt.

Ich möchte an der ersten Stelle PD Dr. Th. Kohl für die anregende Aufgabestellung, die Übernahme des Referates und die Unterstützung während der ganzen Arbeit danken.

Dr. Walter Eugster von Polydynamics Engineering Zürich möchte ich für die Verfügungsstellung der Messdaten der Tiefenerdwärmesonde TH1 Weggis und für die fachliche Unterstützung danken.

Prof. Dr. L. Rybach danke ich für die kurzen aber sehr behilflichen Gespräche.

Für die tägliche Unterstützung während der Arbeit danke ich B. Bucher und S. Maraini. S. Maraini muss ich auch für die sprachliche Korrektur des ganzen Textes danken.

Ein grosses Dankeschön gebührt meinen Eltern, die mir während meines Studiums immer unterstützt haben.

Zürich, Oktober 2000

Renzo Brenni

Zusammenfassung

Die Simulation des Verfahrens von Tiefenerdwärmesonden mit dem Simulationsprogramm FRACTure ist das Hauptthema dieser Diplomarbeit.

Man hat sich auf zwei unterschiedliche Anlagen konzentriert: die erste Anlage ist die Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1. Diese koaxiale Sonde ist 2295 m tief und ist seit mehr als 6 Jahre in Betrieb. Die vorhandenen Messdaten (Eintritt- und Austrittstemperatur, Durchfluss, Elektrische Pumpenleistung, usw.) werden mit einer Abtastrate von einem Wert pro 10 Minuten auf einem Datalogger aufgezeichnet. Ein Teil dieses Förderrohres ist isoliert (0-1780 m Tiefe). Die zweite Anlage ist noch nicht im Betrieb und wird im Bohrloch Medyaguino in der Nähe der Stadt Yaroslavl (Russland) geplant. Diese Bohrung ist 2250 m tief. Das Innenrohr wurde noch nicht eingebaut.

Die gesamte Arbeit kann deshalb in zwei Teile strukturiert werden.

Im *ersten Teil* wurden durch die Modellierungen Austrittstemperaturen erzeugt, die mit den gemessenen Austrittstemperaturen verglichen werden. Es wurde zuerst mit gemittelten Daten von den ersten 2 Betriebsjahren gearbeitet, so dass man gute Anfangsbedingungen ohne grosse Zeitverluste für eine detailliertere Modellierung (1 Monat) erstellen konnte.

Da man nach der ersten Simulation bemerkt hat, dass die berechneten Austrittstemperaturen zu hoch waren und dass diese einen völlig unterschiedlichen Verlauf aufgewiesen haben, hat man die Werte des Durchflusses pro Monat in der Sonde und des basalen Wärmeflusses geändert. Die darauffolgenden Berechnungen haben Austrittstemperaturen erzeugt, die durchschnittlich 1.5 °C grösser waren als die gemittelten Messdaten.

Die detailliertere Modellierung über einen einzigen Monat führte jedenfalls wieder zu hohen Austrittstemperaturen und die Temperaturpeaks kurz nach der Aktivierung der Sonde waren beträchtlich höher. Um eine Erklärung dieser Peaks und um eine bessere Anpassung der Messdaten zu erreichen, wurde eine Sensitivitätsanalyse der wichtigsten Modellparameter durchgeführt. Die Resultate dieser Sensitivität haben gezeigt, dass die Form des Peaks hauptsächlich von der ang. Wärmeleitfähigkeit λ' des isolierten Teiles des Förderrohres abhängig ist. Die anderen Parameter haben überwiegend einen Einfluss auf das gesamte Niveau der Austrittstemperatur. Die schlussendliche Anpassung der Messdaten wurde mit einer 6-fach grösseren ang. Wärmeleitfähigkeit berechnet, d.h. es wurde angenommen, dass die Isolation des Förderrohres nicht so gut ist.

Bei diesem ersten Teil der Arbeit hat man insbesondere zwei Probleme festgestellt: die geringe Konsistenz des Gitters auf horizontale Ausdehnungen und die Berechnung der ang. Wärmeleitfähigkeit des Innen- und Aussenrohres.

Das erste Problem wurde bei der Zeichnung und der Überprüfung des Grundgitters für die Anlage in Russland gelöst. Das Grundgitter wurde nämlich in der x-Richtung 20 mal grösser gezeichnet (20000 m Ausdehnung).

Im *zweiten Teil* wurden Austrittstemperaturen mit unterschiedlichen Eintrittstemperaturen, Durchflüssen und ang. Wärmeleitfähigkeiten des Innenrohres erzeugt. Die erzeugten Daten sollen das Wertespektrum der möglichen Austrittstemperaturen zusammenfassen. Diese Daten können als Hilfsmittel zur Planung und zur Optimierung der Anlage dienen. Es muss aber erwähnt werden, dass die Daten für die Wärmekapazität des umgebenden Gesteins, der Hinterfüllung und der Rohre und die Wärmeleitfähigkeit des Innen- und Aussenrohres geschätzt wurden, denn man hatte keine vernünftigen Daten zur Verfügung.

Aufgabestellung und Zielsetzung dieser Arbeit

Diese Arbeit ist in zwei Hauptteile getrennt, diese stützen sich auf zwei verschiedene Bohrungen: die erste Bohrung liegt in der Schweiz und zwar in Weggis (LU) und die zweite liegt in Russland in der Nähe der Stadt Yeroslavl.

Der erste umfangreichere Teil beschäftigt sich mit den Messdaten der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 (Eigentum der Polidynamics Engineering Zürich). Diese wurden von Dr. Walter J. Eugster zur Verfügung gestellt. Die Anlage ist schon seit mehr als 6 Jahren in Betrieb.

Ziel dieses ersten Teiles der Arbeit ist die Erstellung von Daten, die gut mit den vorhandenen Messergebnissen korrelieren.

Nach der Erstellung eines möglichst naturgetreuen Modellgitters dieser Anlage und nach der Sensitivitätsanalyse dieses Modells, sollten Daten (Austrittstemperaturen aus der Erdwärmesonde) berechnet werden. Die berechneten Daten werden zuerst mit einer ziemlich groben Zeitdiskretisierung (1 Tag) erstellt. Nach der Berechnung eines Mittelwertes pro Monat werden diese mit den gemittelten Messdaten verglichen. Anschliessend wird eine detailliertere Simulation über einen einzigen Monat erstellt, diese soll eine Zeitschrittlänge besitzen, die mit der Abtastungsrate der Messdaten übereinstimmt. Zuletzt, falls die Simulationsdaten nicht mit den Messdaten übereinstimmen, werden die verschiedenen Parameter, die einen Einfluss auf die berechneten Daten haben können, überprüft, so dass am Ende dieses ersten Teiles der Arbeit einige Schlussfolgerungen gewonnen werden können, vor allem was die verschiedenen Modellparameter betrifft.

Der zweite Teil konzentriert sich auf einer Bohrung in Russland, in welche in Zukunft eine Erdwärmesonde eingebaut werden soll. Da für diese Sonde noch keine Messdaten vorhanden sind, soll das mögliche Wertespektrum der Austrittstemperaturen mit verschiedenen Parametern (vor allem Eintrittstemperatur und Durchfluss am Sondenanfang und Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres) berechnet werden. Der Endzweck wäre die Feststellung der Effekte der verschiedenen Parameter auf der Austrittstemperatur, so dass man die Planung optimieren kann.

Inhaltsverzeichnis

I. Simulation der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 mit FRACTure..1	
1. Einleitung..... 1	
1.1. Wärmenutzung mit Tiefenerdwärmesonden in der Schweiz..... 1	
1.2. Prinzip einer klassischen Erdwärmesonde-Anlage..... 2	
1.3. Einführung über die Tiefenerdwärmesonde Weggis Thermal 1..... 3	
1.3.1. Lage der Tiefenerdwärmesonde und geologischer Überblick..... 3	
1.3.2. Ausbau und Beschreibung der Erdwärmesonde..... 4	
1.3.3. Das isolierte Förderrohr..... 5	
2. Physikalische Grunlagen 6	
2.1. Hydraulik..... 6	
2.2. Thermik 7	
3. Numerische Modellierung 9	
3.1. FRACTure 9	
3.2. Weitere benützte Softwares 10	
4. Die Messdaten 11	
4.1. Datenerfassung und Datenqualität..... 11	
4.2. Bearbeitung der Messdaten 12	
5. Aufbau des numerischen Gitters 14	
5.1. Forderungen..... 14	
5.2. Gittergenerierung..... 14	
5.2.1. Die vertikale Auflösung..... 15	
5.2.2. Die horizontale Auflösung..... 15	
5.2.3. Das Grundgitter 17	
5.2.4. Die automatischen Verfeinerungen des Gitters..... 18	
5.3. Wärmeübergang 19	
6. Materialeigenschaften der 2D-Elemente..... 21	
6.1. Berechnung der Wärmeleitfähigkeit, der angepassten Wärmeleitfähigkeit und der spez. Wärmekapazität des Innen- und Aussenrohres..... 21	
7. Materialeigenschaften der Linienelemente..... 24	
8. Randbedingungen 25	
9. Transiente Simulation..... 26	
9.1. Zeitdiskretisierung..... 26	
9.2. Kopplung von Thermik und Hydraulik 27	
9.3. Load-Time-Funktion und Load-Time-Vektor 28	
9.4. An- und Abschaltung der Wärmepumpe 30	

10. Modellsensitivität	31
10.1. Stationäre Berechnungen.....	31
10.1.1. Einfluss der Maschengrösse.....	31
10.1.2. Sensitivität auf horizontale und vertikale Ausdehnungen des Gitters	31
10.2. Transiente Berechnungen	32
10.2.1. Ideale Zeitdiskretisierung.....	32
10.2.2. Analyse der An- und Abschaltungszyklen.....	32
10.3. Überprüfung der Fliessgeschwindigkeiten in den Rohren	35
10.4. Ergebnisse der Modellsensitivität.....	37
11. Modellierung 1 - Simulation der Periode Okt. 1994 - Sept. 1996 -.....	38
11.1. Erste Simulation der Periode zwischen Oktober 1994 und September 1996	38
11.1.1. Randbedingungen.....	38
11.1.2. Angegebene Werte für Eintrittstemperatur und Durchfluss	39
11.1.3. Resultate	39
11.2. Zweite Simulation der Periode zwischen Oktober 1994 und September 1996	40
11.2.1. Angegebene Werte für Eintrittstemperatur und Durchfluss	40
11.2.2. Resultate	40
11.3. Dritte Simulation der Periode zwischen Oktober 1994 und September 1996.....	41
11.4. Erstellung der Anfangsbedingungen für den Monat Mai 1996	42
12. Modellierung 2 - Simulation Mai 1996 -	44
12.1. Simulation des Monats Mai 96.....	45
12.1.1. Randbedingungen.....	45
12.1.2. Angegebene Werte für Eintrittstemperatur und Durchfluss	45
12.1.3. Resultate	46
13. Sensitivitätsanalyse - Mai 1996 -	49
13.1. Einfluss der angepassten Wärmeleitfähigkeit λ' auf die Austrittstemperaturen	49
13.1.1. Einfluss der Muffen im isolierten Förderrohr	49
13.1.2. Einfluss des isolierten Förderrohres	50
13.1.3. Einfluss des nicht isolierten Förderrohres	51
13.1.3. Einfluss des Aussenrohres.....	52
13.2. Einfluss des Fluid-Durchflusses auf die Austrittstemperaturen.....	53
13.3. Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins	54
13.4. Anpassung an Messdaten	55
13.5. Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse - Mai 96 -	56
14. Schlussfolgerungen.....	57

II. Simulation der geplanten Tiefenerdwärmesonde Medyaguino (Russland) mit FRACTure.....	60
1. Einführung über die geplante Tiefenerdwärmesonde Medyaguino.....	60
2. Gittereigenschaften	61
3. Materialeigenschaften der 2D-Elemente.....	63
4. Materialeigenschaften der 1D-Elemente.....	63
5. Randbedingungen	64
6. Modellsensitivität	65
6.1. Stationäre Berechnungen.....	65
6.1.1. Einfluss der Maschengrösse.....	65
6.1.2. Sensitivität auf horizontalen und vertikalen Ausdehnungen des Gitters.....	65
6.2. Überprüfung der Fliessgeschwindigkeit in den Rohren.....	65
6.3. Ergebnisse der Modellsensitivität.....	66
7. Transiente Simulation.....	67
7.1. Modellierung 1 - Unterschiedliche Eintrittstemperaturen in der Sonde.....	67
7.1.1. Randbedingungen.....	67
7.1.2. Resultate	67
7.2. Modellierung 2 - Unterschiedliche Durchflüsse in der Sonde -	69
7.3. Modellierung 3 - Unterschiedliche λ' des Inner Pipes -	70
8. Schlussfolgerungen.....	72
Überblick.....	73
Symbole	74
Literaturverzeichnis.....	75
Anhang	77

I. Simulation der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 mit FRACTure

1. Einleitung

1.1. Wärmenutzung mit Tiefenerdwärmesonden in der Schweiz

Die Energie aus dem Erdinnern wird als *geothermische Energie* oder *Erdwärme* bezeichnet. Die Herkunft dieser Energie kann aus drei verschiedenen Quellen zusammengefasst werden: der natürliche Zerfall der radioaktiven Elemente, die Ursprungswärme bei der Erdentwicklung und die freigelassene Gravitationsenergie.

Für den kontinentalen Bereich ist der natürliche Zerfall von radioaktiven Elementen wie Uran, Thorium und Kalium sehr bedeutend, da die Kruste bei der Erdoberfläche sehr reich an diesen Elementen ist. Diese freigelassene Energie addiert sich zur noch vorhandenen Ursprungswärme der Erdentstehung.

Die konventionellen Mittelwerte des Wärmeflusses und des Temperaturgradienten bei der Erdoberfläche betragen 0.065 W/m^2 und 0.03 K/m . Wenn man diese durchschnittlichen Werte betrachtet, kann man sich vorstellen, was für einen enormen und wirtschaftlichen Energievorrat in der Nutzung der Erdwärme liegt.

Es existieren mehrere Anlagen zur Erdwärmenutzung (FORSCHUNGSGRUPPE GEOTHERMIK UND RADIOMETRIE, 2000):

- Erdwärmesonden (Tiefen- und Untiefen-)
- Thermalbäder
- Horizontale Erdwärmekollektoren
- Wärmetauscher Geostrukturen (Energiepfähle, Energieschlitzwände)
- Tiefe Aquiferbohrungen
- Tunnelwasser
- Grundwasserbrunnen

Die Erdwärmesonden, die horizontalen Erdwärmekollektoren und die Geostrukturen (Wärmepumpentyp: Sole/Wasser) haben im Jahr 1999 423 GWh Wärme produziert.

Als Tiefenerdwärmesonden werden Anlagen bezeichnet, die mindestens 500 m Tiefe erreichen.

In der Schweiz sind bisher nur zwei Tiefenerdwärmesonden in Betrieb:

- Weissbad (AI): In diese Bohrung wird kaltes Wasser eingeführt, das sich um 4 °C im Untergrund erwärmt. Um detailliertere Auskünfte zu erhalten, kann man den Messbericht (OEKOPLAN AG, 1998) und die Diplomarbeit (MARAINI, 2000) konsultieren.
- Weggis (LU): diese Bohrung ist das Thema dieser Arbeit. Die wichtigsten Informationen über diese Anlage sind im Schlussbericht der Geoform AG zu finden (GEOFORM AG, 1994) und im Schlussbericht (EUGSTER ET AL, 1997).

Beide Anlagen sind geschlossene Systeme, d.h. das Sondenfluid zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf. Die totale Wärmeproduktion der beiden Wärmepumpen für das Jahr 1999 beträgt 0.45 GWh. Das Prinzip einer Erdwärmesonde wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

1.2. Prinzip einer klassischen Erdwärmesonden-Anlage

Eine Erdwärmesonden-Anlage besteht grundsätzlich aus drei getrennten Kreisläufen, diese sind in der Abbildung 1.1. dargestellt:

Der Wärmequellenkreislauf, der Wärmepumpenkreislauf und der Wärmenutzungskreislauf. Der Wärmequellenkreislauf besteht aus einem Rohrsystem, das mittels einer oder mehrerer Bohrungen auf die gewünschte Tiefe gebracht wird und anschliessend hinterfüllt wird. Die Hinterfüllung soll einen optimalen Kontakt zwischen der Sonde und dem umgebenden Untergrund aufbauen. Ideal wäre ein Material, das hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist und das vor der Verfestigung leicht pumpbar ist. Heute wird meistens Bentonizement, Quarzsand oder eine Mischung der beiden verwendet. Die Erdwärmesonde besteht entweder aus einem Koaxial- oder U-Rohr aus Polyethylen. Im Wärmequellenkreislauf zirkuliert meistens Wasser als Wärmeträger mit einem Zusatz von 25-35 Vol.-% Frostschutzmittel. Das Wasser wird durch den Wärmequellenkreislauf gepumpt, um aus dem umgebenden Untergrund Wärme zu entziehen. Durch diese Wärmeentnahme wird das Wärmeregime des Untergrundes gestört. Dieser Verlust wird langfristig durch den natürlichen Wärmefluss (hauptsächlich aus Erdwärme aus dem tieferen Untergrund, vor allem was die tiefsten Bereiche der Sonde betrifft, wo die Sonnenenergie keinen Einfluss mehr hat) ausgeglichen. Über einen Wärmetauscher wird die aufgenommene Wärme an den Verdampfer einer Wärmepumpe abgegeben. Man muss beachten, dass es keinen direkten Kontakt zwischen dem Arbeitsmittel (z.B. Wasser) in der Wärmepumpe und dem Wasser in der Erdwärmesonde gibt. Die entzogene Energie wird in der Wärmepumpe auf ein für das Heizungssystem nutzbares Temperaturniveau angehoben. Zuletzt wird dieses aufgewärmte Arbeitsmittel in den Wärmenutzungskreislauf eingepumpt, wo dieser die gewonnene Energie wieder abgibt.

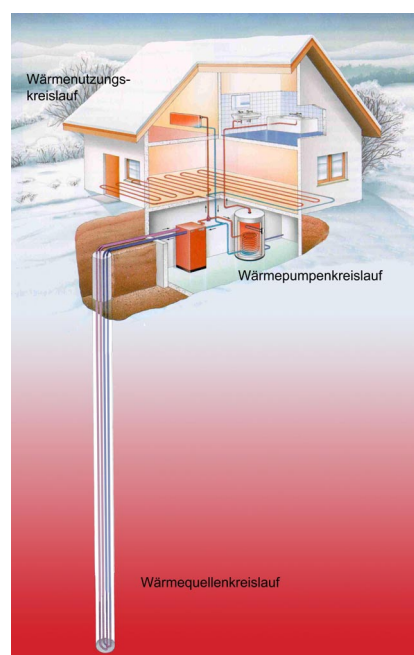


Abb.1.1. Allgemeines Schema einer Erdwärmesonde-Anlage (nach BAUMGARTNER, 1999).

1.3. Einführung über die Tiefenerdwärmesonde Weggis Thermal 1

Im Jahre 1993 wurde die 2302 m tiefe geothermische Bohrung in Weggis als geschlossene koaxiale Erdwärmesonde ausgearbeitet. Die Erdwärmesonde ist 2295 m tief.

1.3.1. Lage der Tiefenerdwärmesonde und geologischer Überblick

Die Bohrung liegt am Nordrand der subalpinen Molasse im basalen Bereich der Überschiebungsdecke des Rigi-Schutfächers (s. Abbildung 1.2.), ungefähr 2 km südöstlich der Hauptüberschiebung der alpinen Decken.

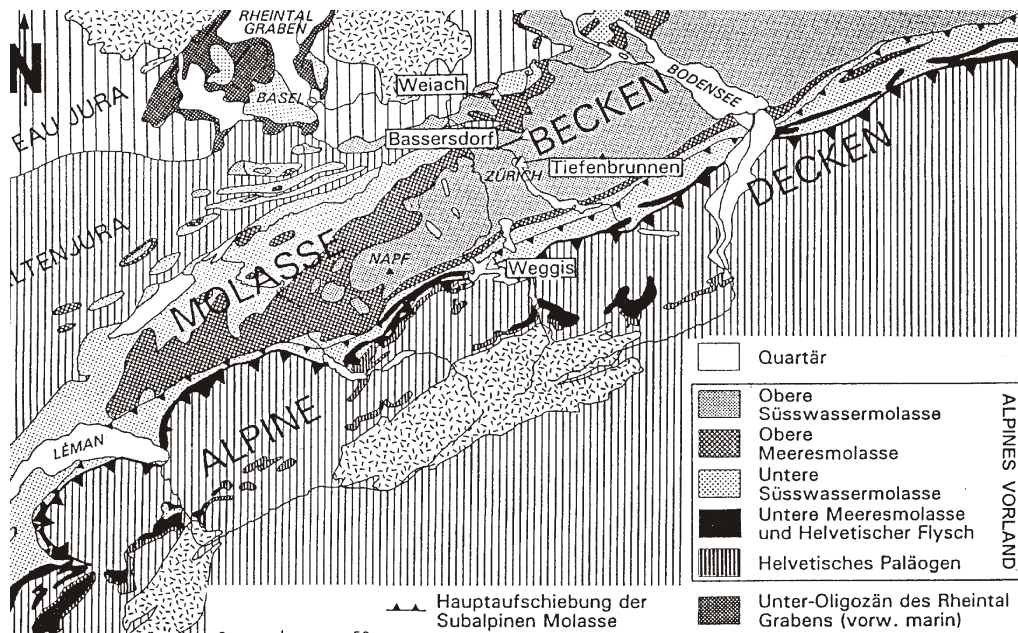


Abb.1.2. Geologische Übersichtskarte des Molassebeckens (nach KELLER, 1992).

Der Bohrstandort befindet sich im unteren Teil der Unteren Süßwassermolasse (USM), welche aus einer pelitreichen heterolithischen Abfolge besteht und dem Chattien eingereicht wird (s. Abbildung 1.3.).

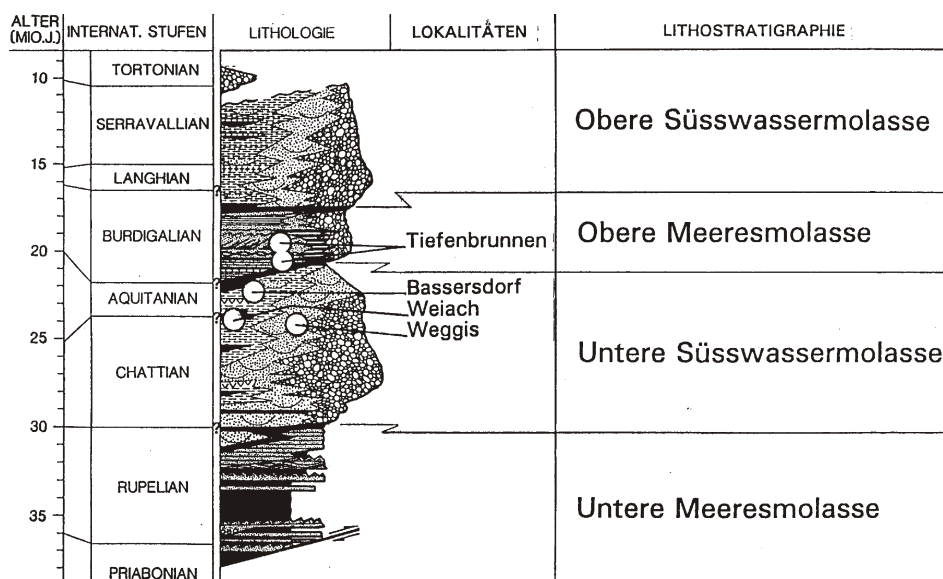


Abb.1.3. Stratigraphisches Sammelprofil mit relativer Position der beprobten Intervalle (nach KELLER 1992).

Die hydrogeologischen Eigenschaften dieser Zone zeichnen sich durch eine unbedeutende primäre Porosität. Bei dem Projekt Weggis hoffte man ursprünglich, in einer Tiefe von ca. 2000 m auf gespanntes Warmwasser zu stossen und damit mehr Energie zur Verfügung zu haben. Da der Untergrund sich als impermeabel erwies, wurde die Bohrung zu einer geschlossenen Erdwärmesonde ausgebaut. Detailliertere Beschreibungen des Projekts Weggis können im Schlussbericht der Geoform gefunden werden (GEOFORM AG, 1994).

1.3.2. Ausbau und Beschreibung der Erdwärmesonde

In der Abbildung 1.4. ist der elementare Ausbau der Erdwärmesonde Weggis TH1 dargestellt. Das Standrohr ($18\frac{5}{8}$ " ϕ) geht bis zu einer Tiefe von 18 m, die technische Zwischenverrohrung ($13\frac{3}{8}$ " ϕ) bis 75 m und die Ankerrohrtour ($9\frac{5}{8}$ " ϕ) bis 512 m. Das Förderrohr besteht im unteren Teil ab 1780 m aus einem Stand- $2\frac{3}{8}$ " ϕ -Stahlrohr, der obere Teil ist isoliert und besteht aus zwei konzentrischen Stahlrohren ($2\frac{7}{8}$ " ϕ und $1\frac{1}{2}$ " ϕ). Im Zwischenraum befindet sich Luft, diese wird durch eine Vakuumpumpe, die im Bohrlochkopf liegt, evakuiert und auf 0.2 bar Druck gesenkt, so dass der konvektive Wärmetransport zwischen Innen- und Aussenrohr reduziert wird.

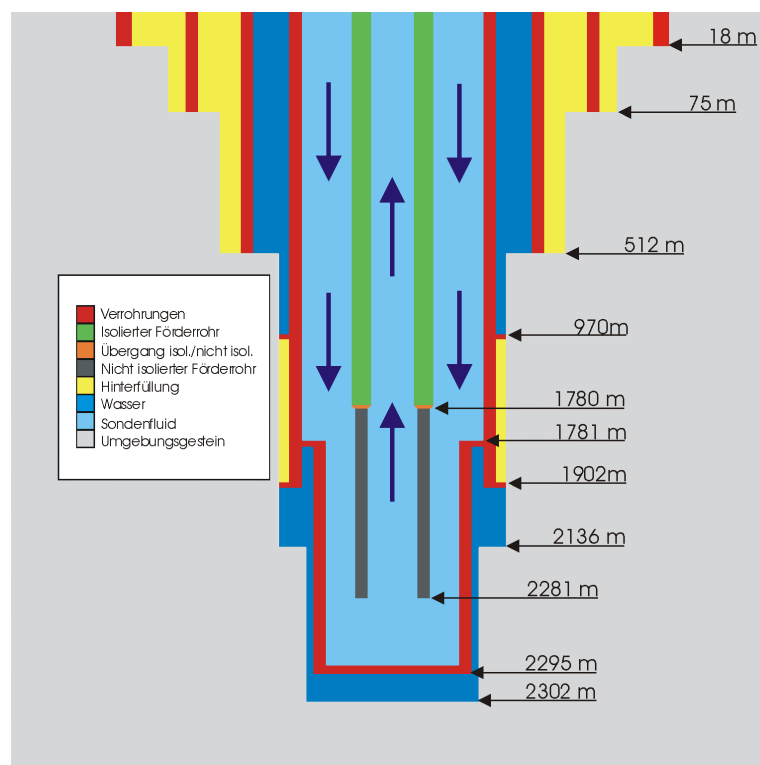


Abb.1.4. Ausbau der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1.

Die Quellenpumpe ist frequenzgesteuert und kann Pumpraten zwischen 48 und 105 l/min (bzw. zwischen 2.88 und 6.30 m³/h) erreichen. An der Erdwärmesondeanlage sind 2 Wärmepumpen mit je 50 kW Heizleistung zusammengeschlossen.

Die Steuerung der Heizanlage wurde 1997 neu überarbeitet. Solange die Lufttemperaturen oberhalb von 17°C sind, wird diese abgestellt. Wenn die Lufttemperaturen unterhalb dieser Grenze liegen, geht die Anlage im Betrieb.

Im nächsten Abschnitt wird das isolierte Förderrohr detailliert beschrieben, denn es hat sich im Laufe dieser Arbeit erwiesen, dass dieses einen grossen Einfluss auf die Austrittstemperatur hat.

1.3.3. Das isolierte Förderrohr

Da die Erdwärmesonde eine beträchtliche Tiefe erreicht, muss man eine Struktur finden, bei der die geförderte Wärme auf möglichst hohem Temperaturniveau an die Erdoberfläche transportiert werden kann. Aus diesem Grunde wurde das Förderrohr thermisch isoliert. Das Förderrohr (0–1780 m) besteht, wie schon im Kapitel 1.4.2. erwähnt, aus zwei konzentrischen Stahlrohren. Das doppelwandige Förderrohr wurde mit zwei ineinander passenden Stahlrohren hergestellt. Jedes Rohr besteht aus Stangen, die mit Hilfe von Muffen (jede 6 bis 9 m) zusammengeschaubt wurden. Insbesondere passen die Muffen des inneren Rohres knapp in das äussere Rohr. Die Zentrierung der beiden Rohre erfolgte in unregelmässigen Abständen durch die Muffen. Die axiale Länge der Muffen des inneren Rohres beträgt ungefähr 10 cm. Man muss dazu noch bemerken, dass der Muffen-Rohr Kontakt möglicherweise nicht perfekt ist. Trotzdem kann man a priori aber nicht behaupten, dass die Muffen keinen Einfluss auf der Austrittstemperatur haben (Kältebrücken). Der thermische Effekt der Muffen wird detaillierter im Kapitel 13 untersucht.

2. Physikalische Grundlagen

Bevor man mit einer numerischen Modellierung beginnen kann, müssen die grundlegenden physikalischen Fundamente des betreffenden Problems untersucht werden. Hier werden die Mechanismen für die thermischen und hydraulischen Transportprozesse kurz zusammengefasst.

2.1. Hydraulik

Hydraulische Prozesse sind relevant in der in der Erdwärmesonde, in der Hinterfüllung und eventuell in grundwasserführenden Formationen (Aquifere). Im ersten Teil dieser Arbeit (Weggis) werden bei den Modellierungen nur die hydraulischen Prozesse, die in der Erdwärmesonde stattfinden, berücksichtigt, denn man hat im litho-stratigraphischen Profil keine bedeutende wasserführende Formationen detektiert. Bei Medyaguino wurden hingegen zwei Aquifere modelliert.

Die Strömungsgleichung basiert auf der Darcygleichung:

$$q = -K(\nabla P) \quad (2.1)$$

mit

q: Darcygeschwindigkeit [q] = m/s

P: Druck [P] = Pa

K: hydraulische Leitfähigkeit [K] = m²Pa⁻¹s⁻¹

Die Massenerhaltungsgleichung wird durch die Änderung der Masse in einem Kontrollvolumen beschrieben:

$$-\nabla(\rho \cdot v) = \frac{\partial(\Phi \cdot \rho)}{\partial t} \quad (2.2)$$

mit

v: Strömungsgeschwindigkeit, [v] = m/s

Φ : Porosität

Aus den Gleichungen (2.1) und (2.2) kann die allg. Druckgleichung (De Marsily) für laminares Fließen einer Flüssigkeit hergestellt werden:

$$S \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla[K(\nabla P)] \quad (2.3)$$

mit

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

P: Druck, [P] = Pa

2.2. Thermik

Bei thermischen Prozessen unterscheidet man zwischen Transport in fester und flüssiger Materie, die zwei getrennte Transportsysteme bilden. Die feste Phase wird als Gesteinsmatrix, die flüssige Phase als Grundwasser in den Poren oder Klüften definiert. Der Wärmetransport erfolgt hauptsächlich in zwei verschiedenen Arten: als reine Wärmeleitung über beide Phasen und als freie oder erzwungene Wärmekonvektion über die flüssige Phase (Poren- bzw. Kluftwasser).

Die freie Konvektion erfolgt durch die Temperaturabhängigkeit der Dichte des Wassers, die erzwungene Konvektion (Advektion) hingegen ist durch Druckunterschiede getrieben.

Ist der thermische Widerstand zwischen den beiden Phasen genügend gross, so kann die Temperatur in beiden Phasen gleichgesetzt werden.

Der Wärmetransport in porösen Medien kann durch zwei unterschiedliche Gleichungen ausgedrückt werden, die mit Hilfe des Wärmeübergangskoeffizienten h gekoppelt sind.

Der Wärmeübergangskoeffizient kann folgenderweise definiert werden:

$$h = \frac{\rho_{\text{trans}}}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (2.4)$$

mit

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

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

A : Austauschfläche, $[A] = \text{m}^2$

T_i : Temperatur eines Körpers, $[T_i] = \text{K}$

Die Wärmetransportgleichung für die feste Phase lautet:

$$\underbrace{[\rho c_p]_s}_{\text{zeitliche Variation}} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \underbrace{\nabla(\lambda_s \nabla T_s)}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{h(v_f)A(T_f - T_s)}_{\text{Wärmeübergang}} + \underbrace{f_s}_{\text{Quellenterm}} \quad (2.5)$$

und für die flüssige Phase:

$$\underbrace{[\rho c_p]_f}_{\text{zeitliche Variation}} \frac{\partial T_f}{\partial t} = - \underbrace{[\rho c_p]_f v_f \nabla T_f}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\nabla(\lambda_f \nabla T_f)}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{h(v_f)A(T_s - T_f)}_{\text{Wärmeübergang}} + \underbrace{f_f}_{\text{Quellenterm}} \quad (2.6)$$

mit

ρ : Dichte, $[\rho] = \text{kg/m}^3$

c_p : spezifische Wärmekapazität, $[c] = \text{J/kgK}$

t : Zeit in Sekunden

T : Temperatur, $[T] = \text{K}$

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

v_f : Advektionsgeschwindigkeit, $[v_f] = \text{m/s}$

f : Quellenterm, $[f] = \text{W/m}^3$

Indizes: flüssige Phase (f) und feste Phase (s)

Für den Wärmetransport in porösen Medien kann angenommen werden, dass $T_f = T_s$ gilt, d.h. der Wärmeübergangsterm kann vernachlässigt werden. Demzufolge können die Gleichungen 2.5 und 2.6 in der Gleichung 2.7 zusammengefasst werden.

Die Wärmetransportgleichung, welche die Temperaturverteilung in einem gesättigten porösen Medium beschreibt, kann mit gemittelten Materialwerten als ein einziges System beschrieben werden.

$$\underbrace{\langle \rho c_p \rangle}_{\text{Zeitliche Variation}} \frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{\nabla(\langle \lambda \rangle \nabla T)}_{\text{Diffusion}} - \underbrace{[\rho c_p]_f v_f \nabla T}_{\text{Advektion}} - \underbrace{f_s}_{\text{Quellenterm}} \quad (2.7)$$

mit

$\langle \rho c_p \rangle$: gemittelte flüssig-feste spez. Wärmekapazität

$\langle h \rangle$: gemittelte flüssig-feste Wärmeleitfähigkeit

Im Fall einer Erdwärmesonde wird die Wärmetransportgleichung aber folgenderweise aussehen:

$$\underbrace{[\rho c_p]_r}_{\text{zeitliche Variation}} \frac{\partial T_r}{\partial t} = \underbrace{\nabla(\lambda_r \nabla T_r)}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{h(v_f) A (T_f - T_r)}_{\text{Wärmeübergang}} + \underbrace{f_s}_{\text{Quellenterm}} \quad (2.5.1)$$

mit

Indizes: flüssige Phase (f) und Rohr (r)

In einer Erdwärmesonde kann nämlich der Wärmeübergangsterm nicht vernachlässigt werden, denn die Annahme, dass die Temperatur des Sondenfluids und der Rohre (Innenrohr und Aussenrohr) gleich ist, ist nicht mehr gültig.

Die Berechnung des Wärmeübergang in der Gleichung 2.5.1 wird im Abschnitt 5.3. behandelt.

3. Numerische Modellierung

Wenn man mit der mathematischen Lösung physikalischer Prozesse konfrontiert ist, wird zwischen analytischen, approximativen und numerischen Lösungen unterschieden. Analytische Lösungen können bei einfachen Problemen, d.h. Problemen mit einfachen Rand- und Anfangsbedingungen und/oder mit homogenen und isotropen physikalischen Parametern (normalerweise eindimensional), gefunden werden. Es existieren immerhin physikalische Probleme, für die keine analytische Lösung gefunden werden kann. Approximative Lösungen sind dort geeignet, wo man eine schnelle Lösung für ein Problem finden will, diese sind aber nicht allgemein gültig. Die Probleme, die in der Natur vorkommen, sind meistens komplex und benötigen eine numerische Lösung. Die numerischen Methoden erzeugen diskrete Lösungen und die verbreiteten Methoden für die Lösung partieller Differentialgleichungen sind z.B. die Finite-Elemente-Methode (FE) oder die Finite-Differenzen-Methode (FD). Der grösste Unterschied zwischen den beiden Methoden liegt in dem Gitteraufbau. Der FD-Gitter besteht aus rechteckigen oder quaderförmigen Maschen, der FE-Gitter hingegen kann beliebig strukturiert werden und ist aus Dreiecken, Vierecken, Prismen und Tetraedern aufgebaut. Bei der FD-Methode wird aus einer Differentialgleichung direkt eine Differenzengleichung gebildet. Pro Gittermasche wird nur den Mittelpunkt ausgerechnet, die Differenzen werden dann zwischen den Mittelpunkten berechnet.

Das in dieser Arbeit benützte numerische Programm FRACTure basiert auf der FE-Methode. Der Ausgangspunkt für die Formulierung in Finite-Elemente ist nicht die Differentialgleichung sondern eine Integralform der Ausgangsgleichung. In der Berechnung der FE-Methode werden erst durch Integration über die einzelnen Gitterelemente die lokale Matrix und der lokale Lösungsvektor bestimmt, welche in die globale Matrix und den globale Lösungsvektor eingebaut werden. Um die Lösung des Problems zu erreichen wird abschliessend die Inverse der globalen Matrix gebildet.

3.1. FRACTure

FRACTure (Flow, Rock And Coupled Temperatur effects; KOHL, 1992) ist ein dreidimensionales Finite-Elemente-Programm, das ursprünglich zur Modellierung von „Hot Dry Rock“-Systemen entwickelt wurde. Dieses Programm kann heute auch für die Simulation verschiedenster physikalische Prozesse im Erduntergrund angewendet werden. FRACTure ist in der Lage, thermische, hydraulische und elastische Transportprozesse sowie deren Kopplung zu bearbeiten. In dieser Arbeit wurden die elastischen Prozesse nicht betrachtet.

Die Modellierung der erwähnten physikalischen Prozesse kann mittels 1D-, 2D- oder 3D-Elementen erfolgen. Diese Elemente können lineare oder quadratische Ansatzfunktionen beinhalten. Für die Herstellung des Gitters in 2D stehen Drei- und Vierecke zur Verfügung, in 3D Pyramiden, Tetraedern oder Prismen mit vier- bzw. dreieckigem Querschnitt. Diese Elemente können verschiedene Dimensionen besitzen.

Die Interaktionen zwischen thermischen und hydraulischen Prozesse werden als Kopplung dargestellt. Die in dieser Arbeit betrachteten Kopplungsmechanismen für das hydraulisch-thermische System sind der Advektionsterm und die Druckänderungen, welche durch die Temperaturabhängigkeit der Dichte und Viskosität erzeugt werden.

3.2. Weitere benützte Softwares

Die Aufstellung der Eingabedatei für die FE-Methode ist ein erhebliches Problem, denn schon für sehr einfache Modelle kann diese sehr kompliziert werden. Aus diesem Grund werden für die Maschengenerierung, die Definition der Randbedingungen und die Zuteilung der verschiedenen Materialparameter, d.h. für die Erstellung des Eingabefiles (Input.dat-File), zusätzliche Softwares benötigt.

In der Abbildung 3.1. sind die verschiedenen benutzten Programme und Files dargestellt, die für die Simulation angewendet wurden.

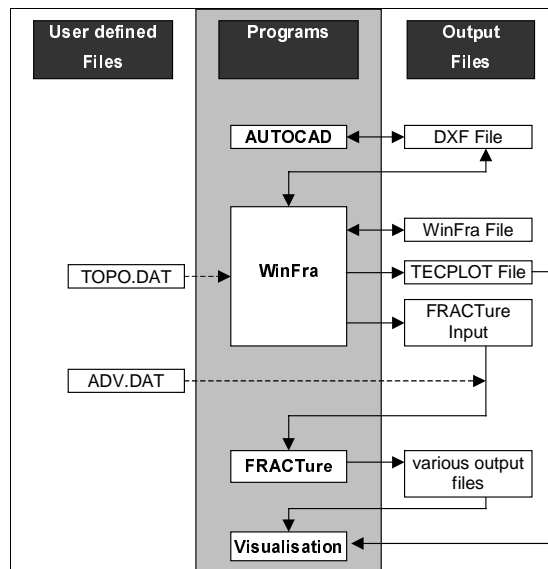


Abb.3.1. Benützte Programme und Ausgabedateien zur Erstellung und Berechnung eines Modells mit FRACTure (aus KOHL, 1999).

In der Tabelle 3.1. ist eine kurze Beschreibung der verschiedenen Programme zusammengestellt:

Tab.3.1. Weitere benützte Programme.

Programm	Kurze Beschreibung
AUTOCAD	CAD-Programm wird benutzt um 1D, 2D und 3D-Gittern zu generieren. Für die zusätzlichen Bearbeitungen wird ein DXF-File erstellt und in WinFra geöffnet.
WinFra	Ist ein interaktives, menügesteuertes Programm, das für die Gittergenerierung oder Bearbeitung des in AUTOCAD erstellten Gitters benutzt wird. In WinFra können Materialparameter an Materialien zugeteilt und Randbedingungen definiert werden. Zusätzlich kann man das Gitter mit dem Befehl „Refine“ automatisch verfeinern. Für die Berechnungen in FRACTure kann das Input.dat-File, für die graphische Darstellung der Gitter kann das tec.dat-File und zuletzt für die Wiederverwendung im AUTOCAD kann ein File in DXF-Format ausgegeben werden.
FRACTure	Das Input.dat-File ist die Eingabedatei für das Programm FRACTure (s. Abschnitt 3.1.). FRACTure kann verschiedene Ausgabefiles produzieren (hier sind die am meistens benutzten Ausgabefiles: disx.dat, advx.dat, hflx.dat und mon_node.dat)
TECPLOT	Programm wird für die graphische Darstellung der FRACTure Ausgabefiles benutzt
EXCEL	Programm wird zur Erstellung von Diagrammen und zur Durchführung von Berechnungen verwendet

4. Die Messdaten

4.1. Datenerfassung und Datenqualität

Die Messdaten der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 sind Eigentum der Poldynamics Engineering Zürich (von 10.94 bis 10.97 waren sie Eigentum des BFE) und wurden mir von Dr. Walter J. Eugster zur Verfügung gestellt. Die Messdaten gehen von Mitte Oktober 1994 (13.10.1994) bis Ende Februar 2000 (28.2.2000). Die Tabelle 4.1. enthält die in dieser Arbeit verwendeten Messwerte. Sie wurden einmal pro Minute gemessen und alle 10 Minuten gemittelt resp. summiert. Diese werden zuletzt auf einem Datalogger gespeichert.

Tab.4.1. Gemessene Werte¹ der Tiefen-Ews Weggis.

Record Pos.	Beschreibung	Einheit
1	Datum	
2	Zeit	
3	Record-Nummer	
4	Wasser-Temperatur Wärmeträger Eintritt Sonde	°C
5	Wasser-Temperatur Wärmeträger Austritt Sonde	°C
6	Elektrische Pumpenleistung	kW
7	Frequenz der Pumpe	Hz
8	Durchsatz	m ³
9	Temperaturdifferenz über Wärmetauscher	K
10	Energieverbrauch	kWh

Wenn man den Verlauf der Messdaten plottet, hat man sofort den Eindruck, dass diese einen komplizierten Verlauf besitzen (vor allem was die Eintrittstemperatur und die Austrittstemperatur betrifft). Man erwartet, dass, wenn die Pumpe angeschaltet ist, die Austrittstemperatur grösser als die Eintrittstemperatur in die Sonde sein sollte, aber für fast elf Monate (13.10.94-31.8.95) bleibt die Eintrittstemperatur für lange Zeitschritte grösser als die Austrittstemperatur. Eine Erklärung für dieses Problem ist schwierig zu finden. Möglicherweise können die Fühler der Eintrittstemperatur und der Austrittstemperatur vertauscht sein. Der Zeitabschnitt von 13.10.94 bis 31.8.95 kann folgendermassen grob eingestellt werden (s. Tabelle 4.2.):

Tab.4.2. Wichtige Perioden.

Zeitschnitt	Bemerkungen
11.12.92-09.11.93	Bohrarbeiten und Erdwärmesondeeinbau
20.11.93-13.10.94	Response-Test mit Bachwasser und Installation eines Ölkessels im Heizraum der Häuser Kreuzstr. 16 und 18.
13.10.94-24.2.95	Langzeitmessungen werden aufgenommen. Betrieb nach Schaltuhr (13.10-4.12.94) Dauerbetrieb I (4.12.94-24.1.95) Dauerbetrieb II (24.1-22-2.95)
24.2.-1.5.95	Inbetriebnahme der Wärmepumpen: Wärmepumpebetrieb I Wärmepumpebetrieb II
28.8.-30.9.95	Beginn der Heizperiode

¹ Es werden auch andere Werte gemessen, wie z.B. Energiemenge Sonde, Thermische Leistung der Sonde, usw., die aber nicht für diese Arbeit verwendet wurden.

4.2. Bearbeitung der Messdaten

Zuerst wurden Datenpakete von einem Monat aufgestellt, so dass die Daten sauber dargestellt werden konnten. Die Daten mussten von einigen Maskenwerten, die bei Fehlermeldungen erzeugt wurden, gereinigt werden. So wurde ein Diagramm pro Monat mit Eintrittstempertur-, Austrittstempertur-, Durchsatz- und elektrischem Pumpeleistungs-Verlauf erzeugt.

Wenn man den Verlauf der verschiedenen Messkurven betrachtet, begreift man sofort, dass die Erstellung von vernünftigen (vergleichbaren) Daten aus den Modellberechnungen äusserst schwierig sein könnte. Demzufolge ist die Auswahl der benutzten Daten sehr wichtig, denn, wenn man aus unvernünftigen Messdaten einige Modellparameter ausrechnen will und mit diesen eine Simulation berechnet, wird man mit grosser Wahrscheinlichkeit eine schlechte Korrelation zwischen den Messdaten und den berechneten Daten erhalten.

Aus diesem Grund sollen die Daten gereinigt werden.

Da man auf Zeitbereiche, wo die Wärmepumpe angeschaltet ist, interessiert ist, kann man folgende Einschränkung definieren:

Wenn Durchfluss grösser als ein bestimmter Wert ist, dann wird in der Modellierung betrachtet, sonst wird auf Null gesetzt (Pumpe nicht aktiv).

Das meistens gewählte Minimum für die Durchflussmenge ist $0.7 \text{ m}^3/10\text{min}$. In der Abbildung 4.1. wird ein Beispiel gezeigt. Alle Werte, die oberhalb dieses Niveaus liegen werden betrachtet, alle andere werden auf Null gesetzt.

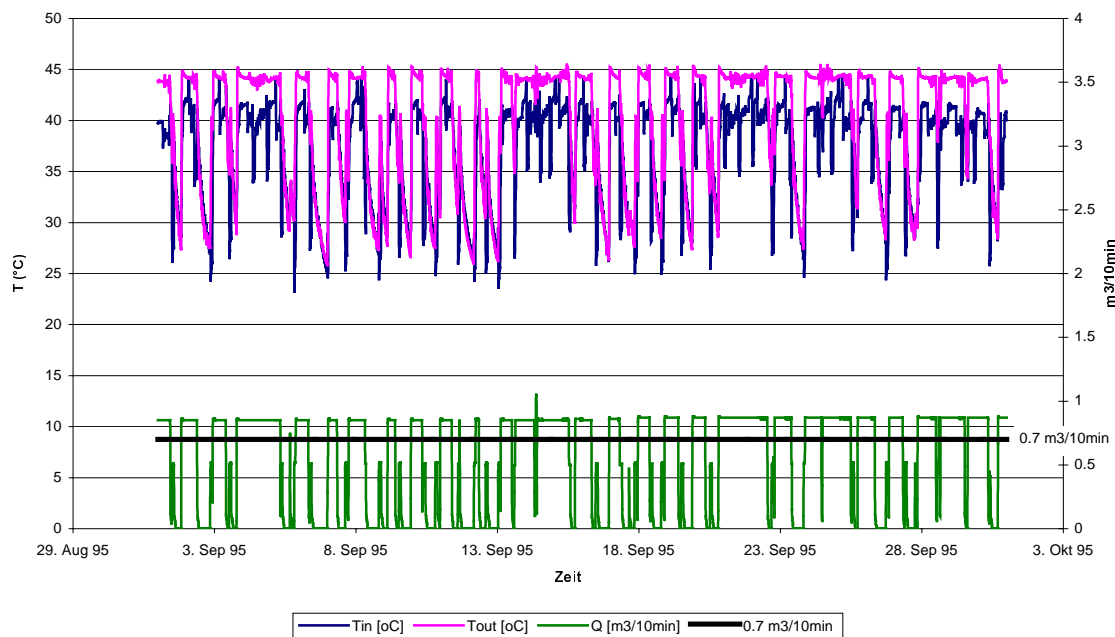


Abb.4.1. Graphische Darstellung der Messdaten für September 95.

Die Feststellung der Gültigkeitsgrenze der Daten wird für jeden einzelnen Monat separat aufgeführt, denn der Messwerteverlauf ist nicht für jeden Monat gleich.

Zuerst muss man bemerken, dass die Messdaten vor September 1995 nicht ganz zuverlässig sind, denn, wie schon erwähnt, man hat während dieser Periode viele Tests durchgeführt. Dazu muss man noch bemerken, dass der Eintrittstempertur und der Austrittstempertur nicht zu trauen sind (wie schon erwähnt, diese Messwerte sind mit grösser Wahrscheinlichkeit vertauscht).

Da das Ziel dieser Arbeit die genaue Simulation eines Monats ist, müssen gute Anfangsbedingungen für diese Simulation berechnet werden. Die Erstellung der Anfangsbedingungen wird mit einer ziemlich groben Simulation berechnet. Diese wird dann mit den Mittelwerten pro Monat der Messdaten kalibriert.

Die gemittelten Werte sind in der Tabelle 4.3. zu sehen.

Man erstellt ein Mittelwert pro Monat für Eintrittstemperatur (T_{in}), Austrittstemperatur (T_{out}), Delta T (ΔT) und Durchfluss (q).

Tab.4.3. Gemittelte Messdaten und berechnete Daten für die erste transiente Simulation.

Monat	T_{in} (Mittelwert)	T_{out} (Mittelwert)	ΔT	Durchflussmenge (m^3)	Durchfluss (m/s)
Sep 95	40.18	44.20	4.02	2402.10	0.11679
Okt 95	38.01	42.81	4.80	2186.40	0.10630
Nov 95	37.28	42.88	5.60	3821.95	0.18582
Dez 95	37.16	43.24	6.08	4463.58	0.21701
Jan 96	36.56	43.04	6.48	4480.11	0.21782
Feb 96	36.20	42.82	6.62	2737.13	0.13308
Mrz 96	36.59	42.78	6.19	4394.83	0.21367
Apr 96	36.38	42.34	5.96	3002.52	0.14598
Mai 96	37.04	42.49	5.45	2407.41	0.11704
Jun 96	37.42	42.82	5.40	1211.22	0.05889
Jul 96	37.79	42.84	5.05	1283.69	0.06241
Aug 96	38.54	43.23	4.69	1039.37	0.05053

5. Aufbau des numerischen Gitters

5.1. Forderungen

In diesem Teil der Arbeit soll ein 2-dimensionales Gitter, das möglichst genau die Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 widerspiegelt, erzeugt und berechnet werden.

Da die Länge der Tiefenerdwärmesonde und des Bohrloches in der z-Richtung grösser ist als in horizontaler Richtung, sollen zwei unterschiedliche Modellierungskriterien für die vertikale und horizontale Richtungen eingesetzt werden.

In der *horizontalen* Richtung (x-Richtung) wird die Tiefenerdwärmesonde 1:1 modelliert. Wichtig ist, dass die innere und äussere Verrohrung, die Hinterfüllung, das Sondenfluid und das Wasser, das im Bohrloch enthalten ist, modelliert werden

In der *vertikalen* Richtung (z-Richtung) wird die Tiefenerdwärmesonde 1:100 modelliert. Die z-Richtung kann entweder im Input-File oder im Programm TECPLOT mittels einer Multiplikation gedehnt werden. In vertikaler Richtung wird das Gitter bis zur Tiefe 2250 m mit 50 m Schritte aufgebaut. Bei dieser Tiefe wird die Auflösung immer grösser, denn zwischen 2280 m und 2295 m geht das Sondenfluid vom vertikalen zum horizontalen Fliessen, was eine komplizierte Temperaturverteilung bewirken könnte.

Bei 2350 m Tiefe werden wieder 50 m tiefe Maschen gezeichnet, d.h. zwischen 2250 m und 2350 m (Ende der Tiefenerdwärmesonde und der Bohrung) wird die Auflösung grösser.

Ein weiterer kritischer Punkt wird bei der Tiefe um 1780-1781 m erwartet, wo die innere Verrohrung vom Isolierten zum nicht Isolierten geht und wo man bei der äusseren Verrohrung eine Verkleinerung des Durchmessers beobachtet.

Die Strömung des Fluids in der Pumpe wird mit 1D-Elementen modelliert, diese werden in der Mitte des Innen- und Aussenrohres eingezeichnet.

5.2. Gittergenerierung

Das Gitter wird im CAD-Programm AUTOCAD als 2D-Modell erzeugt, denn die Geometrie der Tiefenerdwärmesonde ist zylindersymmetrisch um die z-Achse (s. Abb.5.1.). Unter dieser Bedingung wird viel Zeit gespart, weil man nicht ein 3-dimensionales Gitter aufbauen muss.

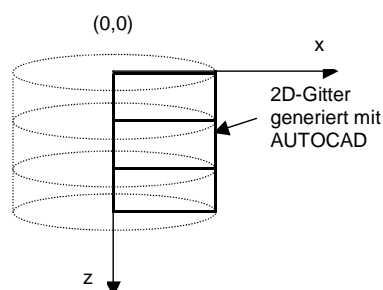


Abb.5.1. 2-dimensionales Gitter, das in AUTOCAD zu generieren ist. (nach KOHL, 1999)

Der Koordinatenursprung liegt an der Erdoberfläche in der Mitte der Sonde.

In der x-Richtung wurde von 0 m bis 1000 m modelliert, in der z-Richtung von 0 m bis -5000 m.

Im Bereich der Sonde sollte das Gitter sehr feinmaschig sein, vor allem in der x-Richtung, um den thermischen Gradienten zu beachten, aber dies wird immerhin durch die kleinräumige horizontale Ausdehnung der Bohrungen (die grösste Verrohrung (Standrohr) hat ein Radius von ≈ 0.25 m) auf jeden Fall sehr fein.

Mit zunehmender Distanz vom Koordinatenursprung werden die Maschen immer grösser, denn man ist hauptsächlich an den näheren Bereichen der Sonde interessiert, ebenso wird die Rechenzeit des Computers verkleinert. Zusätzlich werden noch Dreieckselemente verwendet, um mehrere Maschen zusammenzuführen, d.h. um die Maschengrösse auszubreiten (entweder in horizontaler oder in vertikaler Richtung).

5.2.1. Die vertikale Auflösung

Um eine Schätzung der benützten vertikalen Auflösung zu geben, hat man in der Tabelle 5.1. die Auflösung bei $x = 0$ angegeben, was aber nicht die Auflösung in y-Richtung im ganzen Gitter entspricht. Die Auflösung in der vertikalen, sowie auch in der horizontalen Richtung nimmt mit dem Abstand von Koordinatenmittelpunkt (0,0) immer ab.

Tab.5.1. Vertikale Auflösung bei der Mitte der Sonde ($x = 0$).

Vertikale Auflösung (bei $x = 0$ m)	
0 - 2250 m Tiefe	50 m Schritte
2250 - 2280 m Tiefe	10 m Schritte
2280 - 2285 m Tiefe	5 m Schritt
2285 - 2291 m Tiefe	3 m Schritte
2291 - 2294 m Tiefe	1 m Schritte
2294 - 2294.5 m Tiefe	0.5 m Schritt
2294.5 - 2294.74 m Tiefe	0.24 m Schritt
2294.74 - 2294.943 m Tiefe	0.203 m Schritt
2294.943 - 2294.993 m Tiefe	0.05 m Schritt
2294.993 - 2295 m	0.007 m Schritt
2295 - 2295.010 m	0.01 m Schritt
2295.010 - 2295.060 m	0.05 m Schritt
2295.060 - 2295.160 m	0.1 m Schritt
2295.160 - 2295.360 m	0.2 m Schritt
2295.360 - 2295.860 m	0.5 m Schritt
2295.860 - 2296.860 m	1 m Schritt
2296.860 - 2302 m	5.14 m Schritt
2302 - 2310 m	8 m Schritt
2310 - 2330 m	10 m Schritte
2330 - 2350 m	20 m Schritt
2350 - 5000 m	50 m Schritte

5.2.2. Die horizontale Auflösung

Bevor man mit der Zeichnung des eigentlichen Gitters begonnen hat, hat man im Programm AUTOCAD die verschiedenen Sondenteile- und Materialienränder gezeichnet. Diese werden als Hilfsmittel für die Zeichnung des eigentlichen Gitters dienen. In den Tabellen 5.3. und 5.4. sind die Dimensionen der verschiedenen Materialien in x-Richtung angegeben, diese Werte wurden für die Modellgenerierung in AUTOCAD benutzt.

Zuerst hat man die verschiedenen Radien der Bohrungen, ohne dass diese mit den Verrohrungen und Füllmaterialien aufgefüllt sind, angegeben (s. Tabelle 5.2.).

Tab.5.2. Bohrungsradien unverroht.

Bohrung	Radius (m)
Bohrung bis 18 m	0.2365
Bohrung bis 75 m	0.2223
Bohrung bis 512 m	0.1556
Bohrung bis 2136 m	0.1080
Bohrung bis 2303 m	0.0746

Danach hat man die Radien und die Wandstärken der verschiedenen Rohre festgelegt. Die benutzte Werte sind in den Tabellen 5.3. und 5.4. veranschaulicht. Der ganze Ausbau der Tiefenerdwärmesonde kann in zwei Teile abgetrennt werden: der obere Teil (Tab.5.3.) geht von 0 bis 1780 m, der untere (Tab.5.4.) von 1780 bis 2295 m.

Tab.5.3. Radien und Wandstärke der Verrohrungen im oberen Teil.

Verrohrung (erreichte Tiefe)**Oberer Teil (0-1780 m)**

	Radius (m)	Dicke (m)
Isolierter Förderrohr (0-1780 m)		0.0050
1 ½" Rohr (Innen)	0.0205	
1 ½" Rohr (Aussen)	0.0255	
Luft (0-1780 m)	0.0255 bis 0.0315	0.0060
2 7/8" (Innen)	0.0315	
2 7/8" (Aussen)	0.0365	
7" Casing (0-1902 m)		0.0090
Innen	0.0799	
Aussen	0.0889	
9 5/8" Ankerrohrtour (0-512 m)		0.0100
Innen	0.1122	
Aussen	0.1222	
13 3/8" Techn. Zwischenverrohrung (0-75 m)		0.0100
Innen	0.1599	
Aussen	0.1699	
18 5/8" Standrohr (0-18 m)		0.0100
Innen	0.2265	
Aussen	0.2365	

Tab.5.4. Radien und Wandstärke der Verrohrungen im untern Teil.

Verrohrung (erreichte Tiefe)**Unterer Teil (1780-2295 m)**

	Radius (m)	Dicke (m)
2 3/8" Förderrohr nicht isoliert (1780-2281 m)		0.0056
Innen	0.0246	
Aussen	0.0302	
5 1/2" Liner mit Abschluss (1781-2295 m)		0.0070
Innen	0.0629	
Aussen	0.0699	

Das Grundgitter wurde mit Hilfe des gezeichneten Sondenausbaus erstellt, d.h. man benützt die verschiedenen Materialgrenzen als Hilfslinien (vor allem in der x-Richtung), um die Maschen zu generieren.

Die Vergrößerung der Maschen mit der Entfernung von der Sonde kann subjektiv erfolgen.

5.2.3. Das Grundgitter

In der Abbildung 5.2. ist das 2-dimensionale Grundgitter dargestellt, das im Programm AUTOCAD erstellt wurde und in der y-Richtung um den Faktor 100 gedehnt wurde. Bei der Konstruktion des Gitters in AUTOCAD müssen die Maschen den betreffenden Materialien zugeteilt werden. Für jedes Material wird ein neues Layer gebildet. Das Layer 0 wird benutzt, um die verschiedenen Hilfslinien zu zeichnen. Die Zuteilung der Materialien kann auch im Programm WinFra korrigiert werden. In der Abbildung 5.3. ist die Zuteilung der verschiedenen Materialien in WinFra mit dem Programm TECPLOT dargestellt.

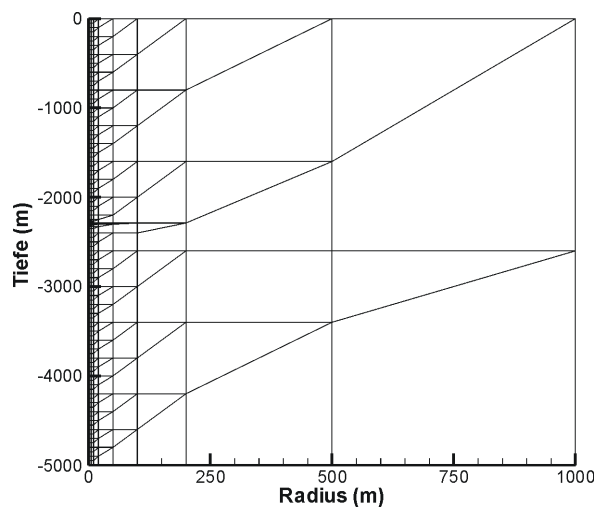


Abb.5.2. Grundgitter für die Modellierung mit FRACTure.

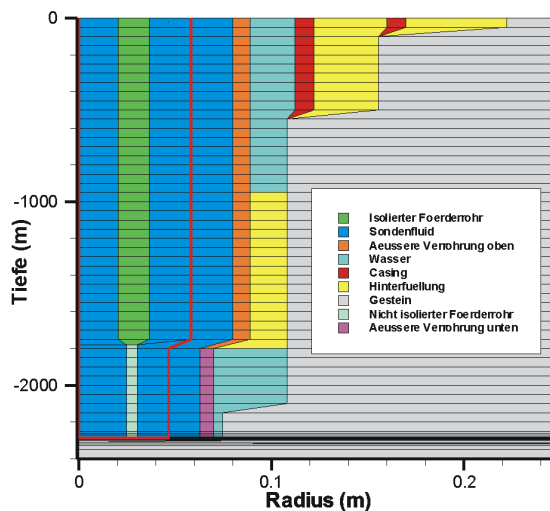


Abb.5.3. Materialparametereinordnung in WinFra.

5.2.4. Die automatischen Verfeinerungen des Gitters

In den Abbildungen 5.4. und 5.5. sind die in WinFra automatisch berechneten Verfeinerungen (erste und zweite) abgebildet. Eine Verfeinerung des Gitters bedeutet praktisch eine Vervielfachung der 2D-Maschenzahl und eine Verdoppelung der Linienelemente.

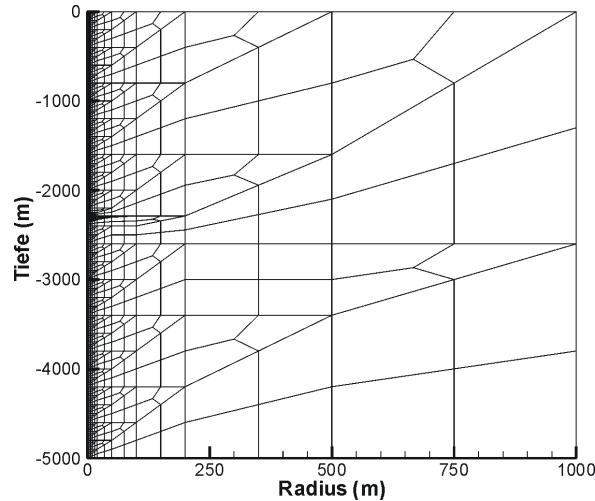


Abb.5.4. Gitter nach der 1. automatischen Verfeinerung in WinFra.

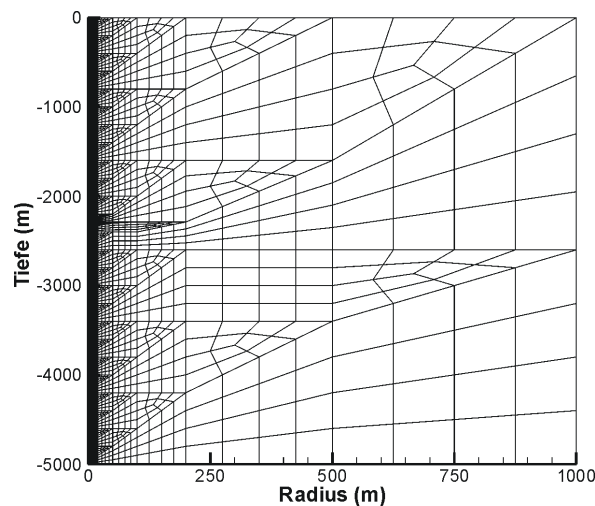


Abb.5.5. Gitter nach der 2. automatischen Verfeinerung in WinFra.

5.3. Wärmeübergang

Ein Wärmeübergang muss definiert werden, wenn zwei unabhängige thermische Regime auf einem engen Raum aufeinandertreffen, die in schwachen thermischen Kontakt stehen. In Fall einer Tiefenerdwärmesonde ist zwischen Verrohrung und Sole die Festlegung eines Wärmeüberganges sinnvoll (s. Abschnitt 2.2.). In Programm FRACTure wird der Wärmeübergang wie ein Wärmefluss behandelt. Die Grösse des Wärmeüberganges ist linear von dem Temperaturunterschied der angrenzenden Elemente abhängig.

Um den Wärmeübergang im numerischen Modell zu realisieren, sind folgende Ansätze nötig:

1. Ansatz:

Der Wärmefluss zwischen Sole und Rohr wird radial vorgegeben. Der 1D-Wärmefluss q mit Wärmeübergang zwischen 2 Elementen beträgt (in numerischem Gitter):

$$q = h(T_{S1} - T_{S2}) \quad (5.1)$$

mit

h : Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2K]

T_{S1} und T_{S2} : Temperatur [K] des ersten bzw. zweiten Elementes mit gemeinsamer Grenzfläche

Falls der Wärmefluss im ersten Element identisch ist mit demjenigen im Zweiten und im Fall der Finite-Elemente-Methode, lässt sich der Wärmefluss innerhalb eines Elementes wie folgt, definieren:

I.

$$q = \left(\frac{\Delta x}{\lambda} + \frac{1}{h} \right)^{-1} (T_1 - T_2) \quad (5.2)$$

mit

Δx : Länge eines Elementes in Flussrichtung

T_1 und T_2 : Randtemperaturen des Elementes [K]

λ : Wärmeleitfähigkeit des Elementes [W/mK]

2. Ansatz:

Statt der Einführung des Wärmeübergangskoeffizienten hat man die Möglichkeit den Wärmeübergang durch die angepasste Wärmeleitfähigkeit in den Rohrelementen zu simulieren.

Der Wärmefluss ohne Wärmeübergang lautet:

$$q = \lambda' \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (5.3)$$

mit λ' : Angepasste Wärmeleitfähigkeit des Elementes [W/mK]

Setzt man (5.2) gleich (5.3), so lässt sich die angepasste Wärmeleitfähigkeit λ' für das Element berechnen:

$$\lambda' = \frac{\Delta x \cdot h \cdot \lambda}{\Delta x \cdot h + \lambda} \quad (5.4)$$

Der gefundene Wert muss im Input.dat-File anstelle der Wärmeleitfähigkeit der Verrohrung eingesetzt werden.

Der Wärmeübergangskoeffizient h wird gemäss der Gleichung 5.5 berechnet:

$$h = \frac{\lambda_f \cdot Nu}{d} \quad (5.5)$$

mit

$Nu = 3.66$: Nusselt-Zahl (Somerton, 1992)

d : Rohrdurchmesser, $d = [m]$

λ_f : Wärmeleitfähigkeit des Fluids, $[\lambda_f] = W/mK$

6. Materialeigenschaften der 2D-Elemente

Die thermischen Materialeigenschaften für die verschiedenen 2D-Elemente sind in diesem Kapitel beschreiben. Die verschiedenen Materialparameter, die in der Tabelle 6.1. stehen, wurden aus dem Modellaufbau im PSEL-Bericht (EUGSTER ET AL, 1997) übernommen. In der Tabelle 6.1. sind die um die Sonde liegenden Materialien beschrieben (Umgebungsgestein, Hinterfüllung, usw.).

Tab.6.1. Thermische Materialeigenschaften der Eingabeparameter.

Material	Wärmeleitfähigkeit in x/z-Richtung (W/mK)	Spez. Wärmekapazität (J/m ³ K)
Sondenfluid	10/0.6	4.1745·10 ⁶
Hinterfüllung	2/2	1.6000 ·10 ⁶
Tech. Zwischenverrohrung	50/50	3.5370·10 ⁶
Gestein	2.33/2.33*	2.0800·10 ⁶
Ankerrohrtour	50/50	3.5370·10 ⁶
Wasser	0.6/0.6	4.1745·10 ⁶
Luft (0.2 bar)	2.50E-02/2.50E-02	251.25

* Dieser Wert wurde aus dem Mittelwert der Messdaten des Schlussberichtes über die Geothermische Eigenschaften der Molasse (GREBER ET ALL, 1996) berechnet.

Es muss beachtet werden, dass für die Wärmeleitfähigkeit des Sondenfluids in den 2D-Elementen (s. Tab.6.1.) zwischen x- und z-Richtung unterscheidet wird.

In der x-Richtung (horizontal) wird die Wärmeleitfähigkeit stark erhöht (auf 10 gesetzt). In der z-Richtung erfolgt der Wärmetransport nämlich hauptsächlich per Advektion und in der x-Richtung per Diffusion. Der Grund dafür ist das man einen horizontalen Temperaturgradienten in den Rohren verhindern will. Dieser Wert für die 2D-Elemente wurde aufgrund der Sensitivitätsuntersuchung von Salton (1999) eingesetzt.

Die Eigenschaften der inneren und äusseren Verrohrungen sind in der Tabelle (6.5.) beschrieben.

6.1. Berechnung der Wärmeleitfähigkeit, der angepassten Wärmeleitfähigkeit und der spez. Wärmekapazität des Innen- und Aussenrohres

Das Förderrohr besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Stahlrohren (27/8“- mit innenliegenden 11/2“-Stahlrohr). Der Zwischenraum ist durch eine Vakuumpumpe evakuiert. Diese befindet sich am Bohrlochkopf.

Tab.6.2. Thermische Materialeigenschaften des isolierten Förderrohrs.

Material	Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)	Spez. Wärmekapazität c_p (J/m ³ K)
Luft	2.50E-02	1299.465
Rohr	50	3.5370·10 ⁶

Die Wandstärken des inneren und äusseren Rohres (vom isolierten Förderrohr) sind 0.005 m und die dazwischenliegende Luftschicht ist 0.006 m dick.

Der thermische Widerstand R kann mit der Gleichung 6.1 berechnet werden:

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda} \quad (6.1)$$

mit

Δx : Länge eines Elementes in Flussrichtung

λ : Wärmeleitfähigkeit des Elementes [W/mK]

Der resultierende thermische Widerstand des isolierten Förderrohres kann mit derselben Regel (s. Gleichung 6.2), die bei der Berechnung der elektrischen Widerstände benutzt wird, berechnet werden. Die Kombination der Widerstände ist hier in Serie, dann gilt:

$$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (6.2)$$

Im Fall des isolierten Förderrohres kann der gesamte thermische Widerstand wie folgt dargestellt werden:

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{RohrInnen}} + R_{\text{Luft}} + R_{\text{RohrAussen}} \quad (6.3)$$

Wenn man R_{tot} in der Gleichung 6.1 eingibt und die entsprechenden Werte für die Dicke des inneren und äusseren Rohres und der Luft angibt, werden die verschiedenen thermischen Widerstände berechnet (s. Tabelle 6.3.).

Tab.6.3. Thermische Widerstände.

Material	Thermischer Widerstand R (m ² K/W)
Rohr Innen	0.0001
Luft	0.24
Rohr Aussen	0.0001

Wenn die Werte der Tabelle 6.3. in der Gleichung 6.3 eingesetzt werden, wird der gesamte Widerstand $R_{\text{tot}} = 0.2402 \text{ m}^2\text{K/W}$. Nimmt man diesen Wert und setzt man ihn in der Gleichung 6.1., wird die gesamte Wärmeleitfähigkeit für das isolierte Förderrohr:

$$\lambda_{\text{tot}} = \frac{0.016}{0.2402} = 6.66 \cdot 10^{-2} \text{ W/mK}$$

Wie schon im Abschnitt 5.3. erwähnt wurde, muss man für die innere (resp. äussere) Verrohrung an der Stelle der Wärmeleitfähigkeit λ die angepasste Wärmeleitfähigkeit λ' angeben.

Die angepasste Wärmeleitfähigkeit der beiden Verrohrungen wird mit der Gleichung 5.4 berechnet.

Die benützten Wärmeübergangskoeffizienten h sind in der Tabelle 6.4. dargestellt. Die Berechnung dieser Koeffizienten erfolgte mit der Gleichung 5.5.

Tab.6.4. Wärmeübergangskoeffizienten der verschiedenen Verrohrungen.

Verrohrung	h [W/m ² K]
Nicht isolierte Verrohrung	89.27
Isolierte Verrohrung	107.12
Äussere Verrohrung oben	50.60
Äussere Verrohrung unten	67.16

Die Zusammenfassung der thermischen Eigenschaften des Innen- und Aussenrohres ist in der Tabelle 6.5. dargestellt.

Tab.6.5. Thermische Materialeigenschaften der inneren und äusseren Verrohrungen.

Verrohrung	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Spez. Wärmekapazität (J/m ³ K)	Ang. Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Nicht isol. Förderrohr	50	$3.5370 \cdot 10^6$	0.5299
Isolierter Förderrohr	0.0666	$2.2107 \cdot 10^6$	0.0475
Äuss. Verrohrung oben	50	$3.5370 \cdot 10^6$	0.4513
Äuss. Verrohrung unten	50	$3.5370 \cdot 10^6$	0.4657

Da man den Wasserkreislauf mit den Linienelementen simuliert, müssen die hydraulischen Eigenschaften bei den 2D-Elementen nicht betrachtet werden (im Input.dat-File wurden die Werte bei allen Materialien für die hydraulischen Eigenschaften auf $1.0 \cdot 10^{-14}$ gesetzt).

7. Materialeigenschaften der Linienelemente

Man hat 5 verschiedene Linienelemente definiert, denn im Modell werden 5 verschiedene Fließgeschwindigkeiten erscheinen. Für die Linienelemente sind sowohl die thermischen (wie bei 2D-Elementen) als auch die hydraulischen Eigenschaften zu definieren, weil diese Elemente den Kreislauf des Fluids repräsentieren. Die Materialeigenschaften der Linienelemente sind in der Tabelle (7.1.) dargestellt.

Tab.7.1. Thermische und hydraulische Materialeigenschaften.

Linienelement	Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)	Sp. Wärmekapazität c_p (J/m ³ K)	Querschnitt (m ²)
Abwärts oben	0.6	$4.18 \cdot 10^6$	$1.59 \cdot 10^{-2}$
Abwärts unten	0.6	$4.18 \cdot 10^6$	$9.56 \cdot 10^{-3}$
Horizontal	0.6	$4.18 \cdot 10^6$	$1.54 \cdot 10^{-2}$
Aufwärts unten	0.6	$4.18 \cdot 10^6$	$1.90 \cdot 10^{-3}$
Aufwärts oben	0.6	$4.18 \cdot 10^6$	$1.32 \cdot 10^{-3}$

Das Sondenfluid wird sowohl in den 2D-Elementen als auch in den Linienelementen definiert, dies kann folgenderweise erklärt werden. Die Linienelemente werden benutzt, denn sie sind numerisch stabil und einfach zu implementieren. Die thermischen Eigenschaften der beiden Elemente entsprechen den Eigenschaften des Sondenfluids (Wasser), für die Linienelemente werden dazu auch die hydraulischen Eigenschaften definiert.

8. Randbedingungen

Die Randbedingungen des Modells wurden im Programm WinFra definiert. Diese können als 1D-Elemente und 2D-Elemente eingetragen werden.

Für dieses Modell wurden 5 verschiedene Randbedingungen festgestellt: 3 thermische und 2 hydraulische. Die thermischen Randbedingungen steuern die Oberflächentemperatur, die Eintrittstemperatur des Fluids in die Sonde und den basalen Wärmefluss, die hydraulischen Randbedingungen hingegen den Wasserdurchfluss in die Sonde und das hydraulische Potential beim Sondenaustritt.

Die Randbedingungen für die FRACTure-Berechnungen wurden in WinFra als Neumann- und Dirichlet-Randbedingungen definiert (s. Tab.8.1.)

Tab.8.1. Beschreibung der eingegebenen Randbedingungen in WinFra.

Randbedingung	Definition in WinFra
Druckpotential bei Koordinatenursprung	Hydraulik/Dirichlet
Durchfluss des Fluids bei Sondenanfang	Hydraulik/Neumann
Eintrittstemperatur des Sondenfluids	Transport/Dirichlet
Oberflächentemperatur (Boden)	Transport/Dirichlet
Wärmefluss an der Basis	Transport/Neumann

Die in der Tabelle 8.2. und 8.3. stehenden Randbedingungen wurden aus den vorliegenden Daten erstellt. Diese Randbedingungen werden im Laufe dieser Arbeit nach der Überprüfung der Formationstemperatur im Modell und für die transienten Berechnungen möglicherweise noch geändert.

Tab.8.2. Randbedingungen für die Thermik.

Randbedingungen: Thermik	
Oberflächentemperatur ² :	9.2 °C
Eintrittstemperatur ³ (T _{in}):	37.06 °C
Basaler Wärmefluss ⁴ :	0.09 W/m ²

Tab.8.3. Randbedingungen für die Hydraulik.

Randbedingungen: Hydraulik	
Durchfluss ⁵ :	9.136·10 ⁻² m/s
Hydraulisches Potential bei Koordinatenursprung (0,0):	0 m

Man muss aber bemerken, dass diese Werte (vor allem die konstante Eintrittstemperatur und der Wasserdurchfluss) nur bei der stationären Simulation einen Sinn haben.

² Aus ATLAS DER SCHWEIZ 1965.

³ Der angegebene Wert für die Eintrittstemperatur ist ein Mittelwert der Eintrittstemperaturen in die Sonde, während diese aktiv ist, von Monat Oktober 94 bis September 98.

⁴ Aus GEOTHERMISCHE KARTE DER SCHWEIZ 1994.

⁵ Der Wert für den Durchfluss ist ein punktueller Wert, er entspricht einem charakteristischen Niveau der Pumpe (0.87m³/10min).

9. Transiente Simulation

Der Sinn einer transienten Simulation ist der Verlauf als Funktion der Zeit einer Tiefenerdwärmesonde zu simulieren, so dass die Ausgangswerten (Austrittstemperatur) mit den gemessenen Austrittstemperaturen vergleichbar sind.

Die Sonde ist während eines langen Zeitschnittes nicht durchgehend in Betrieb, wird der Durchfluss für unregelmässige Zeitintervalle auf Null gesetzt. Aber nicht nur der Durchfluss variiert mit der Zeit, auch die Eintrittstemperatur soll bei dieser Simulation mit der Zeit variieren. In unserem Modell sind beide (Durchfluss und Eintrittstemperatur) als Randbedingungen dargestellt. Diese Variationen der Randbedingungen müssen im Input.dat-File mittels Texteditor durch Load-Time-Funktionen modelliert werden. Bevor man diese Load-Time-Funktionen und –Vektoren definiert, soll man den zu modellierenden Zeitschnitt in Zeitschritte beliebiger Länge unterteilen.

9.1. Zeitdiskretisierung

Da FRACTure die Berechnungen nur zu genau definierten Zeitpunkten durchführt, muss man die bestmöglichen Zeitdiskretisierung finden, um eine optimale Auflösung zu erreichen, so dass die berechneten Daten möglichst genau die wahren Werte reproduzieren. In diesem Kapitel wird aber keine Modellsensitivität durchgeführt, diese wird später behandelt (s. Kapitel 10).

Im Input.dat-File wird die Zeitdiskretisierung durch eine Abfolge von Zeitsequenzen dargestellt:

```
* ZEITSEQUENZEN
*   n  nstep  ndprt  nsprt  nhplt  dt
   1   1     0     0     1     0
   2   1     0     0     1     0
   3  63     0     0     1 10800
   4   1     0     0     1 10799
   5   1     0     0     1     1
   6  63     0     0     1 10800
   7   1     0     0     1 10799
   8   1     0     0     1     1
   9  63     0     0     1 10800
  10   1     0     0     1 10799
  11   1     0     0     1     1
  12  63     0     0     1 10800
  13   1     0     0     1 10799
  14   1     0     0     1     1
```

Abb.9.1. Zeitsequenzen für ein 2-facher Abschaltzyklus.

Jede Zeitsequenz kann beliebig lang sein und kann in viele Zeitschritte unterteilt werden (s. z.B. Abbildung 9.1.).

So hat man den Vorteil, das die thermische sowie die hydraulische Kopplung zu jedem Zeitpunkt verändert werden kann.

9.2. Kopplung von Thermik und Hydraulik

Nachdem man im Input.dat-File die Zeitdiskretisierung definiert hat, müssen für jede Zeitsequenz die thermische und die hydraulische Kopplung definiert werden. Hier existieren 3 Möglichkeiten:

Kopplung Thermik und Kopplung Hydraulik	
Keine Berechnung:	0
Transiente Berechnung mit definiertem Zeitschritt:	1
Stationäre Berechnung mit Zeitschritt 0:	-1

Die Modellberechnungen beginnen bei $t = 0$. Zuerst wird eine stationäre Berechnung mit einem Zeitschritt der Länge 0 der Thermik (-1) durchgeführt, während die Hydraulik nicht berechnet wird (0). In einem zweiten Zeitschritt (immer mit Länge 0) wird eine stationäre Berechnung der Hydraulik ohne Thermik ausgeführt. Nach diesen zwei Zeitsequenzen (immer bei $t = 0$) wird bei jeder An- bzw. Abschaltung der Sonde eine stationäre Berechnung der Hydraulik mit Zeitschrittlänge 1 Sekunde und für alle Zeitpunkte eine thermische transiente Berechnung durchgeführt (s. z.B. Abbildung 9.2.).

* KOPPLUNGSSEQUENZEN HYDRAULIK:

*	n	nthyd	niter	alpha	beta	gamma	iterj	relaxj	epsil	
	1	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	2	-1	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	Bem. Sonde an
	3	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	4	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	5	-1	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	Bem. Sonde aus
	6	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	7	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	8	-1	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	Bem. Sonde an
	9	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	10	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	11	-1	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	Bem. Sonde aus
	12	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	13	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	
	14	0	1	0	1	9.00E-01	100	8.00E-01	1.00E-06	

* KOPPLUNGSSEQUENZEN THERMIK:

*	n	nttherm	niter	alpha	beta	gamma	iterj	relaxj	epsil
	1	-1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	2	0	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	3	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	4	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	5	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	6	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	7	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	8	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	9	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	10	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	11	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	12	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	13	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06
	14	1	1	0	1	9.00E-01	10	8.00E-01	1.00E-06

Abb.9.2. Kopplungssequenzen für Hydraulik und Thermik.

9.3. Load-Time-Funktion und Load-Time-Vektor

Wie schon erwähnt können mit den Load-Time-Funktionen die Werte der festgelegten Randbedingungen variiert werden. Um bestimmte Randbedingungen verschiedene Load-Time-Funktionen zuzuteilen, müssen noch Load-Time-Vektoren definiert werden. Diese sind nummeriert und mit den entsprechenden Funktionen verknüpft. Der neue Wert N der zeitweiligen Randbedingung wird mit der Gleichung 9.1 berechnet:

$$N = C_1 \cdot M + C_2 \quad (9.1)$$

mit

N: neuer Wert der Randbedingung

M: ursprünglicher Wert der Randbedingung

C₁ und C₂: frei wählbare Variablen

Die frei wählbaren Variablen sind in Abb.9.3. und Abb.9.4. dargestellt. In diesem Beispiel wird die Eintrittstemperatur des Fluids und der Durchfluss in die Sonde immer mit demselben festgelegten Niveau variiert. Der Load-Time-Vektor 1 und die Load-Time-Funktion 1 beziehen sich auf die konstante Oberflächentemperatur (in der Figur z.B. ist die Oberflächentemperatur 9.2 °C) und der Load-Time-Vektor 2 und die Load-Time-Funktion 2 auf die variierende Eintrittstemperatur in der Sonde (s. Abbildung 9.3.), d.h. sind mit den Transport/Dirichlet Randbedingungen für die 2D-Elemente assoziiert. In diesem einfachen Beispiel wird die Eintrittstemperatur immer konstant bleiben (37.06°C) sein

* KRAFTVEKTOREN - GROESSE DER RANDBEDINGUNG; Load-Time-Vektor 1

* Knr	gen	dof1	dof2
22	0	0	9.2
507	0	0	9.2
576	0	0	9.2
691	0	0	9.2
918	0	0	9.2
929	0	0	9.2
938	0	0	9.2
953	0	0	9.2
954	0	0	9.2
959	0	0	9.2
0	0	0	0

* KRAFTVEKTOREN 2; Load-Time-Vektor 2

6	0	0	37.06
0	0	0	0

* BELASTUNGSFUNKTION NR. 1; Load-Time-Funktion 1

* Zeit	Wert1			
0	1	1	0	0
691199	1	1	0	0
691200	1	1	0	0
1382399	1	1	0	0
1382400	1	1	0	0
2073599	1	1	0	0
2073600	1	1	0	0
2764799	1	1	0	0
2764800	1	1	0	0
	C ₁	C ₁	C ₂	C ₂

Keine Variation der Oberflächentemperatur

* BELASTUNGSFUNKTION NR. 2: für Injektionstemperatur; Load-Time-Funktion 2

* Zeit	Wert1				
0	1	1	0	0	
691199	1	1	0	0	
691200	1	1	0	0	
1382399	1	1	0	0	
1382400	1	1	0	0	Keine Variation der Eintrittstemperatur
2073599	1	1	0	0	
2073600	1	1	0	0	
2764799	1	1	0	0	
2764800	1	1	0	0	
	C_1	C_1	C_2	C_2	

Abb.9.3. Load-Time-Funktionen und –Vektoren für Oberflächentemperatur und Eintrittstemperatur.

Die dritte Load-Time-Funktion ist andererseits mit dem variierenden Durchfluss in der Sonde verknüpft, d.h. mit der hydraulischen Randbedingung (Hydraulik/Neumann) für die 1D-Elemente assoziiert.

* BELASTUNGSFUNKTION NR. 3: für An- und Abschaltung der Pumpe; Load-Time-Funktion 3

* Zeit	Wert1				
0	1	1	0	0	
691199	1	1	0	0	Pumpe an
691200	0	1	0	0	
1382399	0	1	0	0	Pumpe aus
1382400	1	1	0	0	
2073599	1	1	0	0	Pumpe an
2073600	0	1	0	0	
2764799	0	1	0	0	Pumpe aus
2764800	0	1	0	0	
	C_1	C_1	C_2	C_2	

* OBERFLAECHEKRAEFTE

* Eln Seite Kraft Kraft
30 2 9.136E-2

Abb.9.4. Load-Time-Funktion für An- und Abschaltung der Pumpe und Wert der hydraulischen Randbedingung.

In diesem Beispiel ist die Pumpe für 8 Tage aktiv ($\Delta t = 0-691199$ s) mit dem festgestellten Wert und 8 Tage nicht aktiv ($\Delta t = 691200-1382399$ s), d.h. Durchfluss gleich 0. Dieser Zyklus wird zweimal durchgeführt.

Wichtig ist, dass am Kopf des Input.dat-Files (s. z.B. das Input.dat-File im Anhang A) die Anzahl der Load-Time-Funktionen und der –Vektoren angezeigt sind, sowie diese von den Zeitsequenzen.

Wenn die Einordnung der Load-Time-Funktionen nicht mit den Zeitsequenzen übereinstimmt, dann wird die Berechnung mit FRACTure falsche Werte berechnen oder gar abstürzen.

9.4. An- und Abschaltung der Wärmepumpe

Dieser Abschnitt beschreibt die Beziehung zwischen Berechnungsschritten und der An- und Abschaltungen der Wärmepumpe.

Das Vorgehen bei der Abschaltung der Pumpe bzw. deren Aktivierung kann anhand der Abbildung 9.5. gezeigt werden. Zwischen $t = 5$ und $t = 9$ Sekunden soll der Durchfluss gleich Null sein. Vor und nach diesem Intervall ist die Pumpe aktiv (Durchfluss $Q = 1.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$). Zwischen dem aktiven und dem passiven (bzw. passiven und aktiven) Intervall wird ein Zeitschritt von 1 Sekunde eingesetzt, in dem man die Hydraulik stationär berechnet. Die Berechnung der Hydraulik wird am Anfang und am Ende des Zeitschrittes berechnet, was zu einer linearen Abnahme (bzw. Zunahme) des Durchflusses führt.

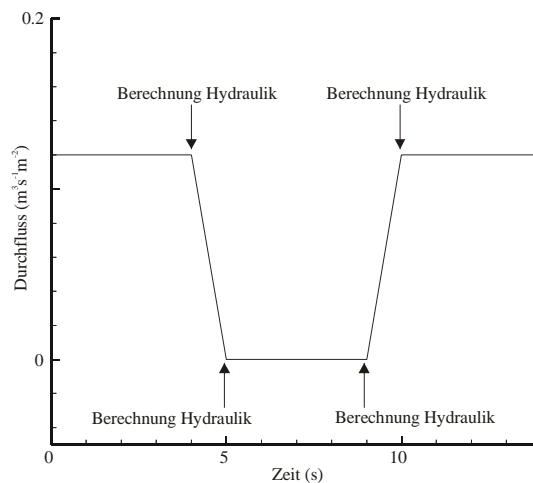


Abb.9.5. Berechnungspunkte in FRACTure bei An- und Abschaltung.

10. Modellsensitivität

Bevor man mit den eigentlichen Modellierungen beginnen kann, müssen die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Simulationsresultate untersucht werden

Die Modellsensitivität kann aber nur dann gestartet werden, wenn die Konsistenz des Gitters überprüft ist (Ungenauigkeiten im Gitteraufbau). Um dies zu kontrollieren soll man im TECPLOT-Programm eine Darstellung des Wärmeflusses in x- und z-Richtung bilden. Die Koordinaten der Knotenpunkte, um welche sich der „Energieverlust“ konzentriert, sollten in WinFra überprüft werden und wenn diese nicht richtig wären, korrigiert werden.

Nachdem man diese Kontrolle durchgeführt hat, kann die Modellsensitivitätsanalyse gestartet werden.

Zuerst sollte man die Sensitivität des Modells auf die Maschengrösse und auf die horizontalen und vertikalen Veränderungen des Gitters untersuchen. Dieser Teil der Sensitivitätsanalyse wird mit stationären Berechnungen durchgeführt.

Dazu soll man mit der transienten Simulation die ideale Zeitdiskretisierung, die An- und Abschaltzyklen und die Fliessgeschwindigkeiten in der Rohre untersuchen.

Die Randbedingungen und die Materialeigenschaften, die für diese Berechnungen benutzt wurden, sind im Kapitel 8 zusammengefasst.

10.1. Stationäre Berechnungen

10.1.1. Einfluss der Maschengrösse

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse der Maschengrösse auf die Resultate der Berechnung diskutiert. Je grösser die Verfeinerung des Gitters ist, desto genauer werden die Berechnungen des Temperaturfeldes sein. Wie schon im Unterkapitel 5.2.4. erwähnt, wird die Verfeinerung des Grundgitters im Programm WinFra automatisch durchgeführt. Es wurden zwei Verfeinerungen des Gitters erstellt.

Die Tabelle 10.1. zeigt den Vergleich der Austrittstemperaturen T_{out} .

Tab.10.1. Austrittstemperaturen in Abhängigkeit der Maschengrösse.

Gitter	T_{out} (°C)	ΔT_{out} (°C)
Grundgitter	43.03	
1. Verfeinerung	42.62	- 0.41
2. Verfeinerung	42.46	- 0.57

Die Temperaturdifferenz zwischen dem Grundgitter und den beiden Verfeinerungen ist ungefähr ein halbes Grad Celsius. Der Unterschied zwischen erster und zweiter Verfeinerung ist hingegen 0.16 °C. Aus diesem Grund sollte die 1. Verfeinerung bei den nachfolgenden Modellierungen benutzt werden.

10.1.2. Sensitivität auf horizontale und vertikale Ausdehnungen des Gitters

Die Berechnungen in diesem Paragraph wurden mit dem Grundgitter durchgeführt.

Man hat zuerst zwei weitere Gitter mit einer grösseren horizontalen Ausdehnung aufgebaut. In der Tabelle 10.2. sind die Eigenschaften diese Modelle, respektive Austrittstemperaturen dargestellt.

Die angegebenen Werte entsprechen dem Radius um das Sondenzentrum (Zylinderkoordinaten).

Tab.10.2. Modellausdehnung in x-Richtung und Austrittstemperaturen.

Modell	Ausdehnung in x-Richtung	T _{out} (°C)	ΔT _{out} (°C)
Grundgitter	1000 m	43.03	
Modell I	2000 m	45.09	2.06
Modell II	4000 m	48.11	5.08

Wie man aus den Werten der Tabelle 10.2. bemerken kann, ist das Modell auf horizontale Ausdehnungen sehr sensibel.

Die Austrittstemperaturen bleiben hingegen bei einer Verdoppelung oder einer Vervielfachung der vertikalen Ausdehnung des Gitters fast identisch.

Die Benutzung des Grundgitters ist möglich, aber um entsprechende Resultate aus den Berechnungen zu erreichen, muss man mit grösser Wahrscheinlichkeit mit dem basalen Wärmefluss spielen.

10.2. Transiente Berechnungen

10.2.1. Ideale Zeitdiskretisierung

Die Resultate einer Simulation hängen von der Grösse der verwendeten Zeitschritte ab. Je kleiner die Zeitschritte sind, desto genauer werden die Resultate, die Rechenzeiten werden aber viel länger. In der Tabelle 10.3. sind die verschiedenen benutzten Modelle und sowie deren Resultate zusammengefasst. Die Dauer der zu simulierenden Periode ist 30 Tage.

Tab.10.3. Austrittstemperaturen mit unterschiedlichen Zeitschritten.

Modell	Grösse der Zeitschritte	T _{out} (°C)	ΔT _{out} (°C)
Modell A	30 Tage	55.843	
Modell B	1 Tag	54.836	- 1.007
Modell C	12 Stunden	54.818	- 1.025
Modell D	3 Stunden	54.824	- 1.019
Modell E	1 Stunde	54.836	- 1.007
Modell F	30 Minuten	54.822	- 1.021
Modell G	10 Minuten	54.770	- 1.073

Nur ein grober Zeitschritt von 30 Tagen führt zu einem beträchtlich grossen Unterschied der Austrittstemperatur. Alle andere Zeitschritte führen zu vergleichbaren Resultaten, d.h. die Zeitschrittlänge kann verschiedenen Simulationszielen angepasst werden.

10.2.2. Analyse der An- und Abschaltungszyklen

Im Abschnitt 10.2.1. hat man eine Periode betrachtet, in der die Pumpe immer aktiv war. Ziel dieses Abschnittes ist die Untersuchung der An- bzw. Abschaltungen der Pumpe. Die gesamte Zeitperiode von 30 Tagen wurde durch drei dividiert. Nach den ersten 10 Tagen Laufzeit wird die Sonde für 10 Tage abgestellt, danach wird diese wieder für 10 Tage aktiviert.

In der Tabelle 10.4. sind die Austrittstemperaturen am Ende dieser Simulationen dargestellt.

Tab.10.4. Austrittstemperatur mit unterschiedlichen Zeitschritten und An-/Abschaltungszyklus.

Modell	$T_{\text{out}} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_{\text{out}} (^{\circ}\text{C})$
Modell B	55.736	
Modell C	55.713	- 0.023
Modell D	55.723	- 0.013
Modell E	55.749	0.013
Modell F	55.722	- 0.012
Modell G	55.703	- 0.033

Wenn man die Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen betrachtet, kann man ohne Probleme behaupten, dass alle vernachlässigbar sind und dass schon bei einer Zeitdiskretisierung von 1 Tag verträgliche Werte berechnet werden.

Was passiert, wenn die Verteilung der Abschaltzyklen auf die Simulationsdauer geändert wird? Um diese Frage zu beantworten hat man 2 weitere Modelle erzeugt. Diese sind in der Abbildung 10.1. erklärt. Diese Modelle wurden mit Zeitschritten von 12 Stunden (Modell C) diskretisiert.

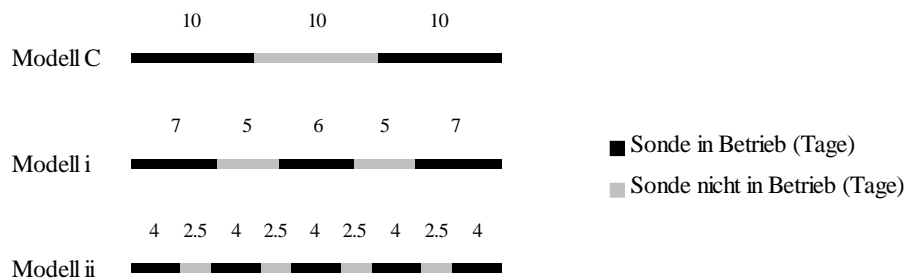


Abb.10.1. Beschreibung der An-/Abschaltungszyklen.

Die Resultate der Berechnungen sind in der Tabelle 10.5. dargestellt.

Tab.10.5. Darstellung der Resultate mit verschiedenen zeitlichen An- bzw. Abschaltungen der Sonde.

Modell	$T_{\text{out}} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_{\text{out}} (^{\circ}\text{C})$
Modell C	55.713	
Modell i	55.714	0.001
Modell ii	55.937	0.224

Die Austrittstemperatur wird mit kleineren An- bzw. Abschaltperioden höher, d.h. je kleiner die An- bzw. Abschaltungsintervalle gewählt werden, desto grösser wird die Austrittstemperatur am Ende der Simulation (bzw. jedes Ab- und Anschaltungsintervall). Die grössten Austrittstemperaturänderungen werden kurz nach der Aktivierung der Pumpe betrachtet. So hat man sich entschlossen, in diesem kritischen Bereich eine weitere Untersuchung durchzuführen. Man verfeinert die Zeitschritte nach dem Abschalten und dem Anschalten der Sonde. Die benutzten Modelle und die entsprechenden Austrittstemperaturen sind am Ende der Simulation in der Tabelle 10.6. ausgeführt.

Tab.10.6. Modellierte Zeitschritte für die letzte Anschaltungsperiode.

Modell	Zeitschritte in der letzten Anschaltungsperiode (10 Tage)	$T_{\text{out}} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_{\text{out}} (^{\circ}\text{C})$
Modell C	20x12 Stunden Zeitschritte	55.713	
Modell C1	80x3 Stunden Zeitschritte	55.707	- 0.006
Modell C2	120x1 Stunde + 40x3 Stunde	55.718	0.005
Modell C3	240x30 Minuten + 120x1 Stunde	55.753	0.040
Modell C4	720x10 Minuten + 120x1 Stunde	55.749	0.036

Die Austrittstemperaturen in der Tabelle 10.6. zeigen, dass keine spezielle Verfeinerung in den Bereichen nach der An- bzw. Abschaltung der Sonde nötig ist. Man muss aber beachten, dass bei der Simulation mit Modell C4 seltsame Austrittstemperaturen (kleiner als die Eintrittstemperatur) kurz nach der Aktivierung der Sonde erscheinen.

Wenn man aber am Zeitpunkt, wo die maximale Temperatur erscheint, interessiert ist, ist die Verfeinerung der Zeitschritte nötig (s. Abbildung 10.2). Die Genauigkeit bei der Bestimmung dieser Zeit wird mit kleineren Zeitschritten grösser sein.

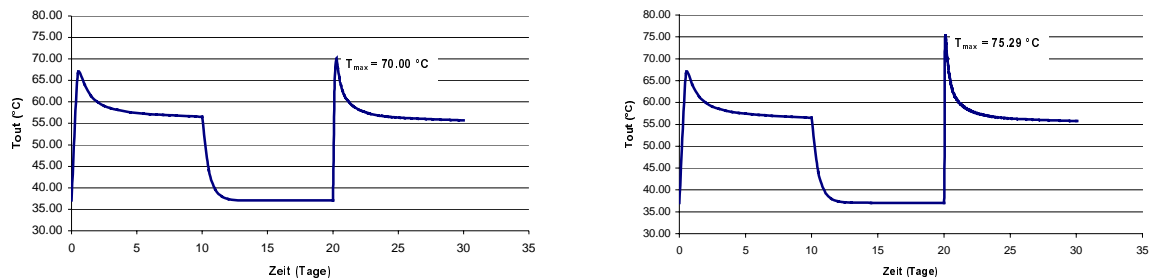


Abb.10.2. Graphische Darstellung der Austrittstemperaturen als Funktion der Zeit für die Modelle C und C3.

In der Abbildung 10.2. kann man betrachten, wie der Peak der Austrittstemperatur mit zunehmender Auflösung geprägter und höher (von 70.00 °C zu 75.29 °C) wird.

Die Auflösung des Peaks ist natürlich auch eine Funktion der Fließgeschwindigkeit des Sondenfluids und der Isolation des Innenrohrs.

In dieser letzten Untersuchung will man zeigen, wie sich die Austrittstemperatur in der Zeit mit mehreren Ab- und Anschaltungszyklen verhält. Diese Simulation wurde mit Zeitschritten, die gleich wie im Modell C3 aufgestellt wurden, durchgeführt.

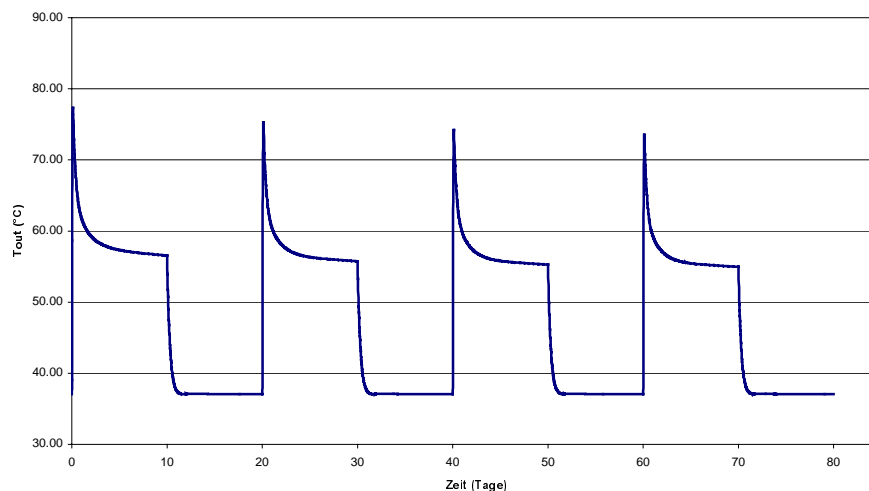


Abb.10.3. 4-facher An- und Abschaltungszyklus.

Wie man aus der Abbildung 10.3. beobachten kann, werden die maximalen Austrittstemperaturen mit der Zeit immer kleiner. Diese Erscheinung ist auf die Auskühlung des Umgebungsgesteins zurückzuführen. Diese Abkühlung ist nicht linear.

10.3. Überprüfung der Fließgeschwindigkeiten in den Rohren

In diesem letzten Abschnitt der Modellsensitivität werden die Fließgeschwindigkeiten in den Rohren untersucht, sodass man am Ende bessere Kenntnisse des Geschwindigkeitsspektrums besitzt. Zuerst hat man die Fließgeschwindigkeiten berechnet, die theoretisch mit verschiedenen Durchflussmengen auftreten. Diese Berechnungen sind in der Tabelle 10.7. dargestellt. Es soll beachtet werden, dass der horizontale Rohrteil bei 2295 m nicht betrachtet wird, denn dieser Teil ist vernachlässigbar klein im Vergleich mit der Länge des Innen- und Aussenrohres. Die Pumpraten beim Sondenanfang liegen zwischen 0.8 und 1.75 l/s. In der Tabelle 10.7. ist dieses Bereich schattiert.

Tab.10.7. Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Durchflussmenge (l/s).

Durchflussmenge (l/s)	Fließgeschwindigkeiten (m/s)			
	Aussenrohr		Innenrohr	
	0-1780 m	1780-2295 m	2295-1780 m	1780-0 m
0.4	0.0252	0.0418	0.2104	0.3030
0.6	0.0378	0.0627	0.3156	0.4545
0.8	0.0504	0.0836	0.4208	0.6059
1	0.0630	0.1046	0.5260	0.7574
1.2	0.0756	0.1255	0.6312	0.9089
1.4	0.0882	0.1464	0.7364	1.0604
1.6	0.1008	0.1673	0.8416	1.2119
1.75	0.1103	0.1830	0.9205	1.3255
2.0	0.1260	0.2091	1.0520	1.5149
2.2	0.1386	0.2300	1.1572	1.6663
2.4	0.1512	0.2509	1.2624	1.8178
2.6	0.1638	0.2718	1.3676	1.9693
2.8	0.1764	0.2928	1.4728	2.1208
3.0	0.1890	0.3137	1.5780	2.2723

Dazu wurden auch die Fließzeiten in den verschiedenen Rohrteilen und die gesamte Umlaufzeit berechnet. Diese sind in der Tabelle 10.8. aufgeführt.

Tab.10.8. Fließzeiten in der Sonde.

Durchflussmenge (l/s)	Fließzeiten (s)						
	Aussenrohr		Innenrohr		Summe (s)	Summe (min)	Summe (h)
	0-1780 m	1780-2295 m	2295-1780 m	1780-0 m			
0.4	70624	12314	2448	5875	91261	1521.0	25.4
0.6	47083	8209	1632	3917	60841	1014.0	16.9
0.8	35312	6157	1224	2938	45630	760.5	12.7
1	28250	4926	979	2350	36504	608.4	10.1
1.2	23541	4105	816	1958	30420	507.0	8.5
1.4	20178	3518	699	1679	26075	434.6	7.2
1.6	17656	3078	612	1469	22815	380.3	6.3
1.75	16143	2815	559	1343	20860	347.7	5.8
2.0	14125	2463	490	1175	18252	304.2	5.1
2.2	12841	2239	445	1068	16593	276.5	4.6
2.4	11771	2052	408	979	15210	253.5	4.2
2.6	10865	1894	377	904	14040	234.0	3.9
2.8	10089	1759	350	839	13037	217.3	3.6
3.0	9417	1642	326	783	12168	202.8	3.4

Diese Umlaufzeiten sind sehr nützlich, wenn man die Verzögerung des Peaks auf die Anschaltung kontrollieren will. Die maximale Austrittstemperatur wird nicht gleichzeitig mit der Sondenaktivierung erfolgen, sondern erst nach einer gewissen Zeit. Das wärmste Wasser befinden sich nämlich in der Tiefe, beim Bohrlochkopf, und braucht eine gewisse Zeit, um die Erdoberfläche zu erreichen. Diese Zeit ist von der Fließeisrate im Innenrohr und ebenso auch von der Durchflussmenge abhängig.

In der Tabelle 10.7. sind aber nur die theoretischen Geschwindigkeiten angegeben, d.h. man hat noch nicht überprüft, ob diese auch im Modell stimmen. Um dies zu kontrollieren, hat man bei der Berechnung des 4-fachen An- und Abschaltzyklus (s. Abschnitt 10.2.) das advx.dat-File bei der Aktivierung der Sonde ausgelassen (x steht für den x-te Zeitschritt). In diesem File sind die Fließeisgeschwindigkeiten in vertikaler und in horizontaler Richtung pro Element dargestellt. Die vertikalen Fließeisgeschwindigkeiten sind in der Abbildung 10.4. dargestellt.

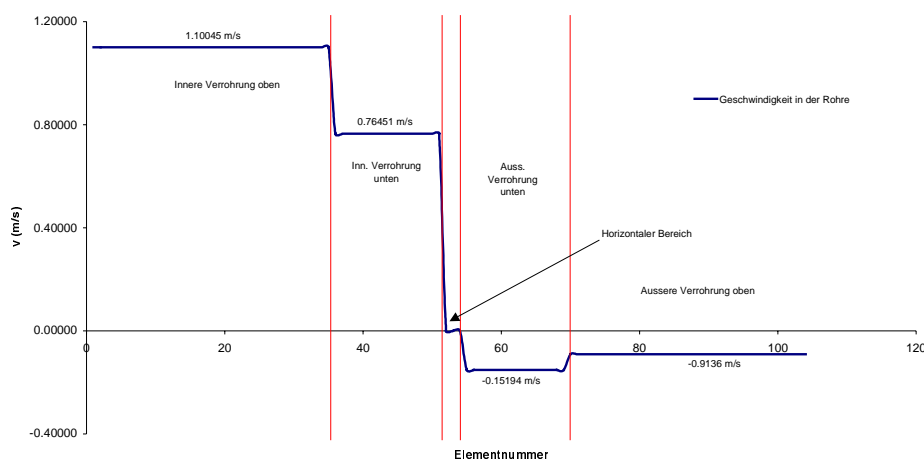


Abb.10.4. Fließeisgeschwindigkeiten in der Sonde (z-Richtung) berechnet mit FRACTure (adv.file).

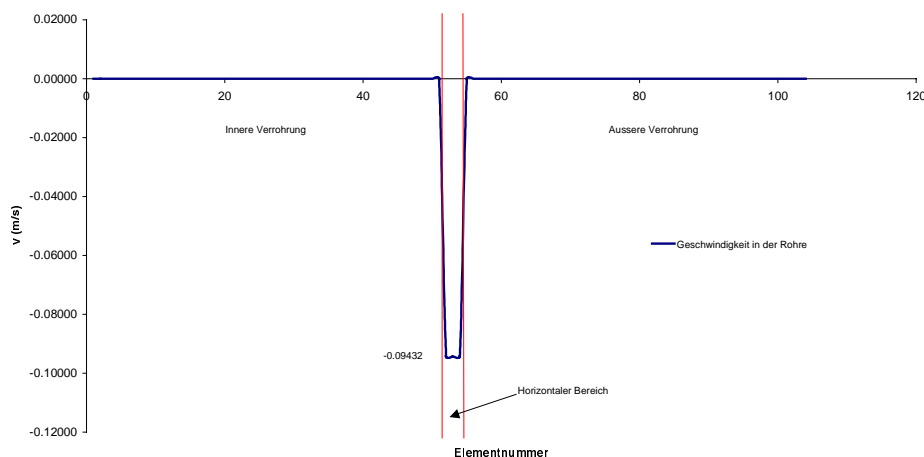


Abb.10.5. Fließeisgeschwindigkeiten in der Sonde (x-Richtung) berechnet mit FRACTure (adv.file).

Die negativen Fließeisgeschwindigkeiten treten auf, weil man sich in der entgegengesetzten Richtung der z-Achse bewegt. Die horizontalen Geschwindigkeiten sind in der Abbildung 10.5. dargestellt.

Wenn man die Fließgeschwindigkeiten des Modells mit den theoretischen Berechnungen vergleicht (s. Tabelle 10.9.), kann man ohne weiteres sehen, dass diese fast identisch sind.

Tab.10.9. Vergleich der Fließgeschwindigkeiten.

	Q (l/s)	Fließgeschwindigkeit Aussenrohr (m/s) (0-1780 m)	Fließgeschwindigkeit Aussenrohr (m/s) (1780-2295 m)	Fließgeschwindigkeit Innenrohr (m/s) (2295-1780 m)	Fließgeschwindigkeit Innenrohr (m/s) (1780-0 m)
Modell	0.00145	0.09136	0.15194	0.76451	1.10045
Theorie	0.00145	0.09136	0.15161	0.76269	1.09827

10.4. Ergebnisse der Modellsensitivität

Um entsprechende Resultate zu erreichen, sollte man mit dem 1. Verfeinerungsgitter arbeiten. Die Anwendung des Grundgitters ist auch möglich, vor allem wenn man die Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Parameter durchführt. Die Abschlussberechnungen (vor allem, was die Berechnungen für Mai 96 betrifft) sollten aber mit dem 1. Verfeinerungsgitter durchgeführt werden.

Die Modellsensitivität hat gezeigt, dass um genügend genaue Resultate zu erreichen, die zeitliche Auflösung zwischen 24 Stunden und 10 Minuten Zeitschritte liegen sollte.

11. Modellierung 1 - Simulation der Periode Okt. 1994 – Sept. 1996 -

In diesem Kapitel werden die ersten drei Simulationen und der Endpunkt dieser Simulationen, d.h. die Erstellung von guten Anfangsbedingungen für die genauere Simulation eines Monats (s. Unterkapitel 11.4.), vorgestellt. Die Simulationsergebnisse sind eine Darstellung der Austrittstemperatur mit der Zeit. In diesem Kapitel wurden alle Berechnungen mit dem Grundgitter durchgeführt.

11.1. Erste Simulation der Periode zwischen Oktober 1994 und September 1996

Das Ziel dieser Simulation ist eine grobe Berechnung der Austrittstemperaturen des Sondenfluids bei der Eingabe der Eintrittstemperatur als Funktion der Zeit. Da man an einem Vergleich der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Daten interessiert ist, soll man zu einem Kompromiss kommen.

Einerseits wäre die Modellierung von jeder An- bzw. Abschaltung der Pumpe über 2 Jahre sinnlos, andererseits kann man aber nicht einfach eine gemittelte Eintrittstemperatur und einen gemittelten Durchfluss eingeben und mit diesen Werten rechnen.

Es wurden folgende Faktoren betrachtet:

1. Die gesamte Periode (ungefähr 2 Jahre) wurde in Monate aufgeteilt.
2. Die Durchflussmenge pro Monat muss mit der gemessenen Durchflussmenge übereinstimmen.
3. Da man nur am Temperaturverlauf während der Pumpenaktivität interessiert ist, und da man im Input.dat-File nur die Eintrittstemperatur bei Pumpenaktivität angibt, hat man eine gemittelte Eintrittstemperatur pro Monat während dieser Aktivitätsperioden berechnet.
4. Man hat folgende Annahme gemacht: Die Pumpe ist pro Monat die Hälfte der Zeit aktiv und die andere abgeschaltet. Was nicht ganz der Aktivitätszeit der Pumpe entspricht, im Sommer wird die Pumpe weniger und im Winter mehr aktiv sein.
5. Aus dieser Annahme wurden die Durchflüsse berechnet, d.h. man hat die Durchflussmenge durch die angenommene Zeit (halber Monat) geteilt.
6. Der gewählte Zeitschritt bei den Zeitsequenzen ist 1 Tag.

11.1.1. Randbedingungen

Wie im Kapitel 8 beschrieben, können für jede Simulation im Programm WinFra Randbedingungen angegeben werden. Die Randbedingungen für die Modellierung 1 sind hier unter vorgestellt:

Randbedingungen für die Thermik:

Oberflächentemperatur:	9.2 °C
Eintrittstemperatur (T_{in}):	30.00 °C
Basaler Wärmefluss:	0.09 W/m ²

Randbedingungen für die Hydraulik:

Durchfluss:	1 m/s
Hydraulisches Potential bei Koordinatenursprung (0,0):	0 m

Für die Eintrittstemperatur (T_{in}) und für den Durchfluss wurden zwei Standardwerte im Input.dat-File (s. Anhang A) angegeben. Diese Werte können durch Load-Time-Funktionen entsprechend geändert werden.

11.1.2. Angegebene Werte für Eintrittstemperatur und Durchfluss

In der Tabelle 11.1. sind die im Input.dat-File angegebenen Werte für die Eintrittstemperatur in die Sonde und den Durchfluss am Sondenanfang dargestellt.

Tab.11.1. Eingabedaten für erste Simulation der Periode zwischen Okt. 94 und Sept. 96.

Monat	T_{in}	Durchfluss Q	Monat	T_{in}	Durchfluss Q	Monat	T_{in}	Durchfluss Q
Okt 94	38.93	0.10422	Jun 95	39.85	0.08439	Feb 96	36.20	0.21213
Nov 94	38.21	0.08005	Jul 95	41.05	0.04758	Mrz 96	36.59	0.20678
Dez 94	40.38	0.16262	Aug 95	37.02	0.04986	Apr 96	36.38	0.14598
Jan 95	42.38	0.17880	Sep 95	40.18	0.11679	Mai 96	37.04	0.11327
Feb 95	40.62	0.16728	Okt 95	38.01	0.10287	Jun 96	37.42	0.05889
Mrz 95	39.52	0.17606	Nov 95	37.28	0.18582	Jul 96	37.79	0.06040
Apr 95	39.14	0.19604	Dez 95	37.16	0.21001	Aug 96	38.54	0.04890
Mai 95	38.75	0.10689	Jan 96	36.56	0.21079	Sep 96	35.53	0.12005

Man muss dazu noch bemerken, dass die Materialparameter der 2D-Elemente und der Linienelemente die gleichen sind, die man in Kapitel 6 und 7 behandelt hat.

11.1.3. Resultate

Die Resultate dieser Simulation sind in der Abbildung 11.1. dargestellt. Diese wurde aus dem mon_node.dat-File hergestellt. In diesem File werden die beim Input-File angegebenen Monitorknoten berechneten Daten abgedruckt. Aus den berechneten Austrittstemperaturen während der Pumpenaktivität wird ein Mittelwert pro Monat gebildet. In der Abbildung 11.1. sind diese durch die Dreiecke dargestellt.

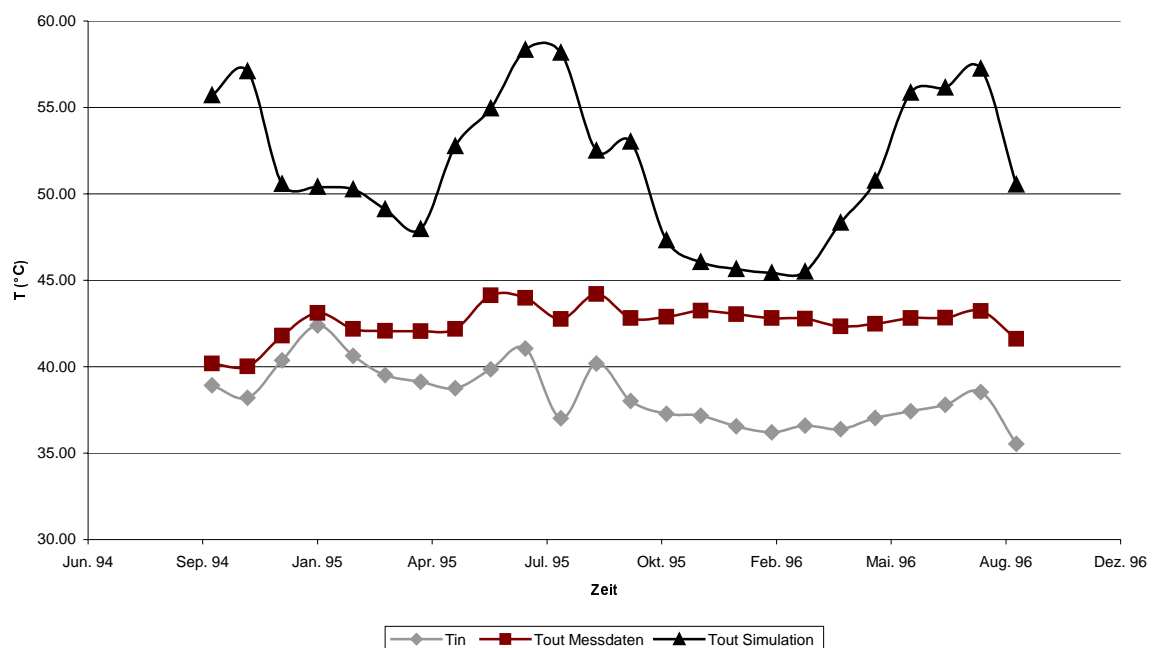


Abb.11.1. Vergleich zwischen gemittelten Messdaten und Simulationsdaten Okt. 94 - Sept. 96 (Pumpe 50% der Zeit angeschaltet).

Wenn man die Abbildung 11.1 betrachtet, kann man sofort behaupten, dass mit diesen Modellannahmen eine Reproduktion der gemittelten Messdaten unmöglich ist. Das Austrittstemperaturniveau der Simulation liegt immer über demjenigen der Messungen. So hat man versucht, diese Simulation zu verbessern. Dies ist im Unterkapitel 11.2. beschrieben.

11.2. Zweite Simulation der Periode zwischen Oktober 1994 und September 1996

Der Sinn dieser Simulation ist die Verbesserung der berechneten Daten, sodass sie einen besseren Fit mit den Messdaten besitzen, d.h. die Materialeigenschaften des Gitters bleiben die gleichen, die in den Kapiteln 6 und 7 beschrieben sind.

Wie aus der Abbildung 11.1. sichtbar ist, sind die berechneten Austrittstemperaturen in der Periode Mai-September viel grösser als in der Periode Oktober-April. Das ist sicher auf eine unterschiedliche Aktivität der Pumpe zurückzuführen. In der Sommerperiode hat die Pumpe eine kleinere Einsatzzeit als in Winter. Man kann sofort verstehen, dass die Annahme (50% der Zeit ist die Pumpe aktiv), die in der ersten Simulation getroffen wurde, zu falschen Durchflüssen und demzufolge zu falschen Austrittstemperaturen geführt hat.

In dieser zweiten Simulation möchte man die Werte der Durchflüsse und die Dauer der An- und Abschaltungszeiten verbessern.

Die Randbedingungen bei dieser Simulation bleiben die gleichen wie bei der ersten Simulation (s. Unterkapitel 11.1.1.).

11.2.1. Angegebene Werte für Eintrittstemperatur und Durchfluss

In der Tabelle 11.2. sind die Angaben für die Eintrittstemperatur und für den Durchfluss dargestellt, die im Input.dat-File angegeben wurden. Diese Werte werden im Input.dat-File (s. Anhang A) an der Stelle der Durchflüsse für die Simulation im Abschnitt 11.1. eingetragen.

Tab.11.2. Eingabedaten für erste Simulation der Periode zwischen Okt. 94 und Sept. 96.

Monat	T _{in}	Durchfluss Q	Monat	T _{in}	Durchfluss Q
Okt 94	38.93	0.06975	Okt 95	38.01	0.09908
Nov 94	38.21	0.05412	Nov 95	37.28	0.09687
Dez 94	40.38	0.08615	Dez 95	37.16	0.10811
Jan 95	42.38	0.10166	Jan 96	36.56	0.10883
Feb 95	40.62	0.08938	Feb 96	36.20	0.10916
Mrz 95	39.52	0.09308	Mrz 96	36.59	0.10657
Apr 95	39.14	0.10087	Apr 96	36.38	0.10004
Mai 95	38.75	0.08857	Mai 96	37.04	0.09674
Jun 95	39.85	0.11327	Jun 96	37.42	0.13802
Jul 95	41.05	0.12078	Jul 96	37.79	0.14157
Aug 95	37.02	0.12341	Aug 96	38.54	0.18206
Sep 95	40.18	0.10225	Sep 96	35.53	0.08726

11.2.2. Resultate

Wenn man mit den Angaben, die in der Tabelle 11.2. stehen, die Berechnungen mit dem Programm FRACTure startet, werden die Austrittstemperaturen einen Verlauf haben, der in der Abbildung 11.2. dargestellt ist.

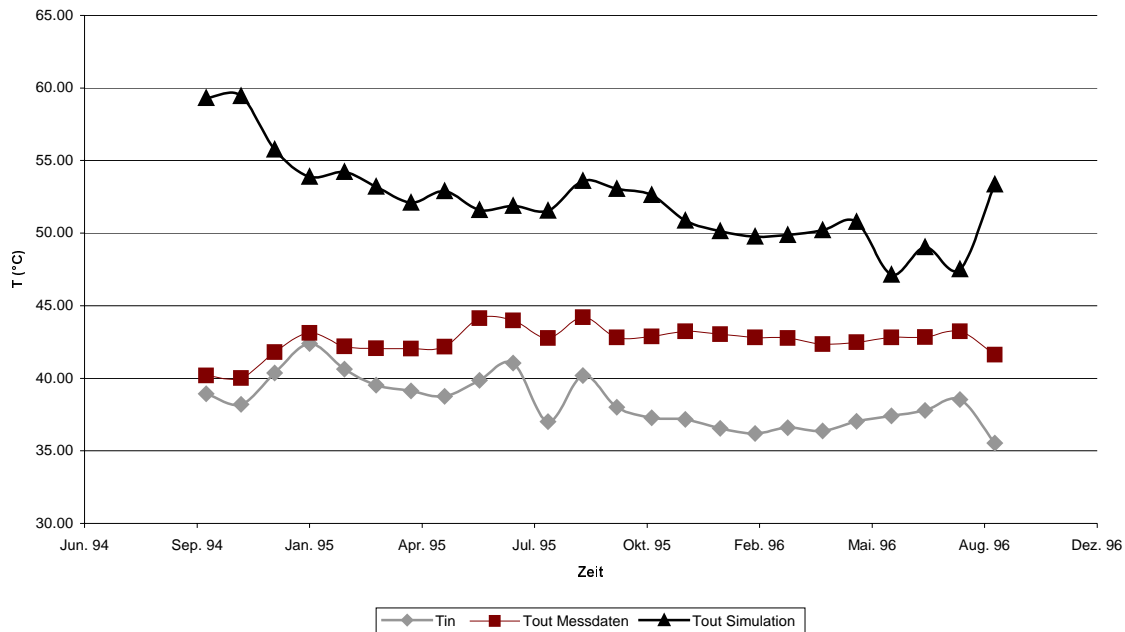


Abb.11.2. Vergleich zwischen gemittelten Messdaten und Simulationsdaten Okt. 94 - Sept. 96 mit angepassten Durchflüssen.

Die Austrittstemperaturen, wenn man die ersten 5 Monate ausschliesst (in diesen ersten Monaten waren die Wärmepumpen noch nicht in Betrieb und es wurden Tests durchgeführt), zeigen in dieser Simulation keine grossen Unterschiede zwischen Sommer- und Winterperiode, was auf eine Anpassung der An- bzw. Abschaltungsperioden zurückzuführen ist.

Die Werte bleiben trotzdem ungefähr 8 °C höher als gemessen (Mittelwert gemessener Werte 42.9 °C und berechneter Werte 51.1 °C). Dieser Temperaturunterschied kann nicht mit Einsatzzeiten der Pumpen erklärt werden.

Für diesen Unterschied kommen verschiedene Parameter in Frage, wie die thermischen Widerstände der Rohre, der basale Wärmefluss, die thermischen Materialeigenschaften des Umgebungsgesteins, usw.

11.3. Dritte Simulation der Periode zwischen Oktober 1994 und September 1996

Der Wärmefluss ist der Parameter, der schlechter abgeschätzt wurde, denn dieser wurde aus einer 1:500000 geothermischen Karte der Schweiz abgelesen. Diese Karte basiert auf punktuellen Messungen des Wärmeflusses über die ganze Schweiz, was zu grossen Fehlern des Wärmeflusses in einem bestimmten Ort führen kann.

In der Tabelle 11.3. sind die Resultate der Berechnungen des Wärmeflusses aus den Formationstemperaturen des Schlussberichtes der Geoform (GEOFORM AG, 1994). Die berechnete Formationstemperatur ist 73 °C ± 1 °C. Für diese Berechnungen wurde angenommen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins 2.33 W/mK ist (s. Tabelle 6.1.). Diese Berechnungen zeigen, dass der in der Simulation 1 und 2 gewählte Wärmefluss (0.09 W/m²) zu hoch war. Mit diesem Wärmefluss wurde im Modell bei 2133 m Tiefe eine Formationstemperatur von mehr als 92 °C erreicht, was viel höher als die berechnete Formationstemperatur im Schlussbericht der Geoform AG ist.

Tab.11.3. Wärmeflüsse berechnet aus der Formationstemperatur.

Formationstemperatur (°C)	Temperaturgradient (K/m)	Wärmefluss (W/m ²)
72	0.0294	0.0686
73	0.0299	0.0697
74	0.0304	0.0708

Wenn man die Berechnungen mit einem Wärmefluss gleich 0.070 W/m² in FRACTure startet, werden die Resultate, wie in der Abbildung 11.3. aussehen.

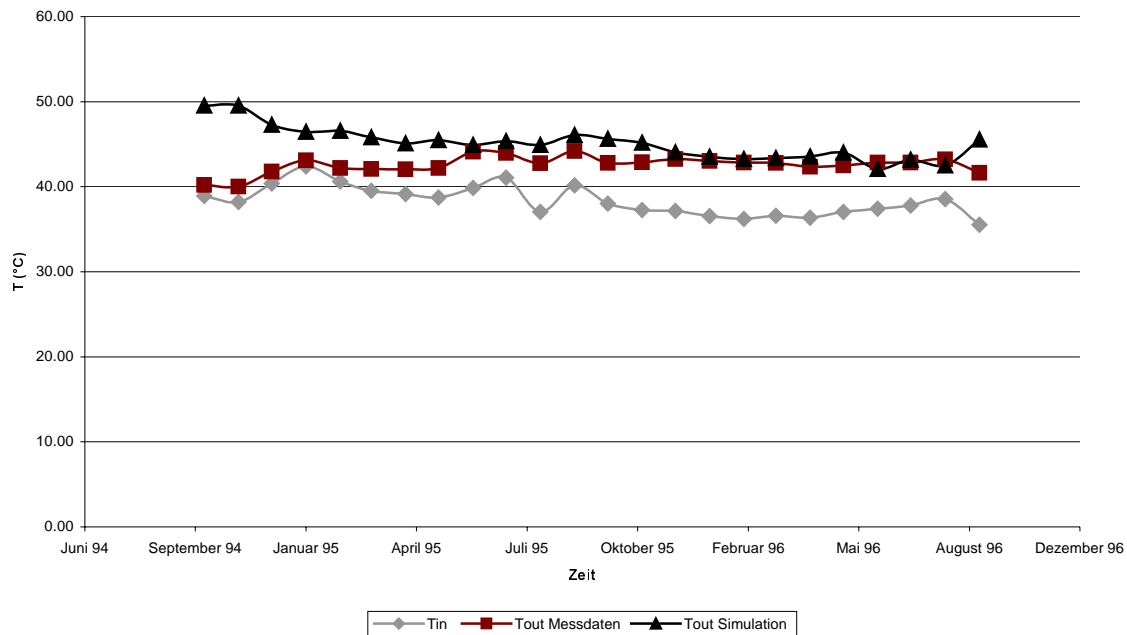


Abb.11.3. Vergleich zwischen gemittelten Messdaten und Simulationsdaten Okt. 94 - Sept. 96 mit 0.070 W/m² Wärmefluss.

Die berechneten Austrittstemperaturen in der Abbildung 11.3. besitzen einen vergleichbaren Verlauf mit den Mittelwerten der Messdaten. Vor allem nach Februar 1995 liegt das mittlere ΔT bei ungefähr 1.5 °C (44.39 - 42.86 = 1.53 °C), was viel kleiner im Vergleich mit dem ΔT der 1 und 2 Simulation ist.

Trotzdem können die Resultate dieser Simulation verbessert werden. Diese Verbesserung wird durch die Sensitivitätsanalyse erreicht, die aber nur für die Simulation des Monats Mai 96 (s. Kapitel 13) durchgeführt wurde, denn in dieser Simulation versucht man detaillierter zu arbeiten, vor allem was die An- bzw. Abschaltungen der Pumpe betrifft.

Die Berechnungen in diesem Abschnitt wurden benutzt, um gute Anfangsbedingungen für die Simulation des Monats Mai 96 zu erschaffen.

11.4. Erstellung der Anfangsbedingungen für den Monat Mai 1996

Diese letzte Simulation geht von Oktober 1994 zur April 1995. In April wird die Simulation gestoppt. Im Input.dat-File wird bei den letzten Zeitsequenzen das disx.dat-File (wo x der letzte Zeitschritt darstellt) ausgelassen, das als restart_d.dat-File für die nächste Simulation dienen wird. Im restart_d.dat-File werden die Anfangsbedingungen gespeichert. Dieses File

kann bei Beginn einer Simulation aufgerufen werden, in dem man im Input.dat-File bei der Ausführungskontrollmaske bei „ireadr“ anstatt 0 ein 1 eintippt (s. z.B. Anhang A). Die im Input.dat-File angegebenen Randbedingungen sind in der Tabelle 11.4. dargestellt.

Tab.11.4. Randbedingungen der Simulation.

Thermik	
Oberflächentemperatur	9.2 °C
Eintrittstemperatur (T_{in})	30.00 °C
Basaler Wärmefluss	0.070 W/m ²
Hydraulik	
Durchfluss	1 m/s
Hydraulisches Potential bei Koordinatenursprung (0,0)	0 m

Das erstellte Input.dat-File ist das gleiche, das in der dritten Simulation der Modellierung1 benutzt wurde. Der einzige Unterschied ist die Anzahl Zeitsequenzen (bzw. Kopplungssequenzen) und Load-Time-Funktionen, d.h. die Resultate werden gleich sein, wie in der Abbildung 11.3. dargestellt, das aber nur bis Ende April 1996, wo diese Simulation endet.

Wenn man die Anfangbedingungen für den Monat Mai berechnet hat, kann man mit der Modellierung dieses Monats anfangen. Diese wird im Kapitel 12 aufgeführt.

12. Modellierung 2 – Simulation Mai 1996

Das Ziel dieses Kapitels ist die Berechnung von Austrittstemperaturen, die vergleichbar mit den Messdaten (s. Abbildung 12.1.) sind. Wie schon bei der Modellierung 1 ist man vor allem an den Austrittstemperaturen interessiert, während die Sonde aktiv ist. Zuerst muss man noch erwähnen, dass die Wahl des zu simulierenden Monats nicht leicht war, denn man suchte einen Monat mit vielen An- bzw. Abschaltungen und dazu sollten während der Aktivitätsperioden die Austrittstemperaturen ein entsprechendes ΔT aufweisen. Es wurden 2 Monate gewählt, die mit diesen Eigenschaften gut übereinstimmen: Mai 96 und September 96. Für die Modellierung wurde der Monat Mai gewählt. In der Abbildung 12.1. sind die gemessenen Messdaten (Durchfluss, Eintritt- und Austrittstemperatur) dargestellt.

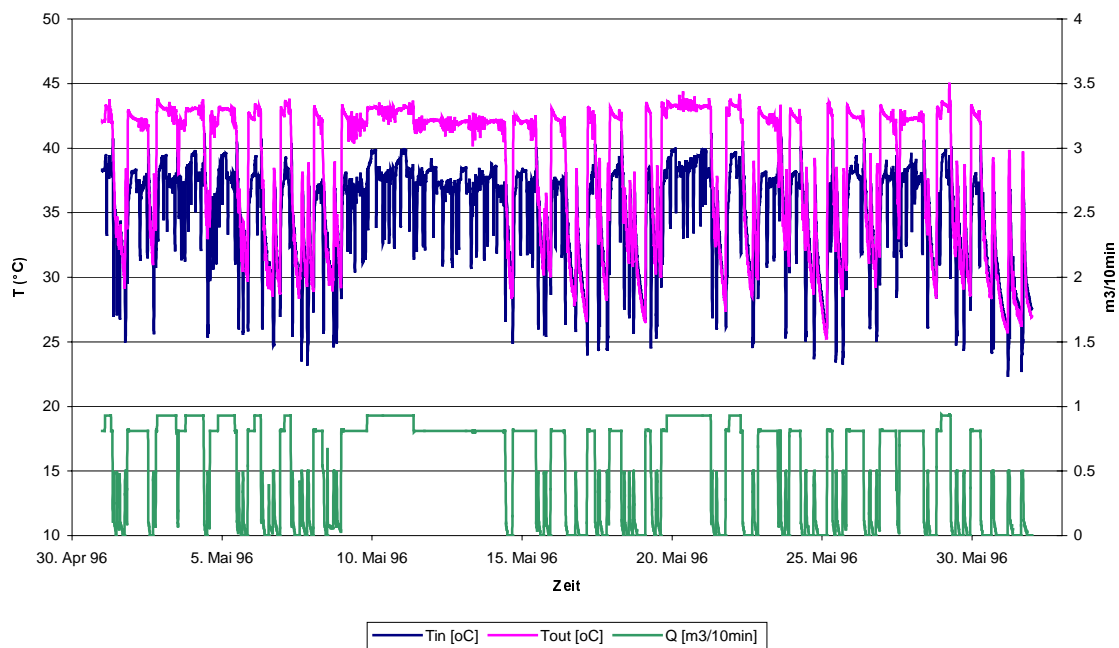


Abb.12.1. Darstellung des gemessenen Durchflusses, der Austritt- und Eintrittstemperaturen.

In dieser Simulation versucht man ziemlich genau zu arbeiten, vor allem was die An- bzw. Abschaltungen betrifft. Es wurden folgende Faktoren betrachtet:

1. Die Durchflussmenge pro Monat muss mit der gemessenen Durchflussmenge übereinstimmen.
2. Der gewählte Zeitschritt bei den Zeitsequenzen ist 10 Minuten.
3. Als Modellierungskriterium für die An- bzw. Abschaltungen hat man folgendes definiert: da man in den Messdaten selber den Durchfluss pro 10 Minuten zur Verfügung hat, hat man definiert, dass, wenn der Durchfluss kleiner als $0.7 \text{ m}^3/10 \text{ min}$ ist, dieser auf Null gesetzt wird (Sonde nicht aktiv).
4. In der Anschaltungsperiode wird ein gemittelter Durchfluss berechnet und im Input.dat-File eingetragen, d.h. Erhöhungen oder Abminderungen des Durchflusses während der Aktivitätsperioden werden nicht simuliert.
5. Demgemäss wurden 24 Aktivitätsperioden und 24 Inaktivitätsperioden unterschiedlicher Länge modelliert.
6. Die Materialeigenschaften der 1D- und 2D-Elemente sind die gleichen wie in den Kapiteln 6 und 7 beschrieben.
7. Die Berechnungen wurden mit dem Grundgitter durchgeführt.

12.1. Simulation des Monats Mai 96

In dieser ersten Simulation werden die Modellparameter benutzt, die bei der Erstellung der Anfangsbedingungen (Abschnitt 11.4.) benutzt wurden.

12.1.1. Randbedingungen

Die im Input.dat-File angegebenen Randbedingungen widerspiegeln diejenigen, die in der Modellierung 1 (Abschnitt 11.1.1) benutzt wurden, nur der Wärmefluss wurde korrigiert.

Randbedingungen für die Thermik:

Oberflächentemperatur:	9.2 °C
Eintrittstemperatur (T_{in}):	30.00 °C
Basaler Wärmefluss:	0.070 W/m ²

Randbedingungen für die Hydraulik:

Durchfluss:	1 m/s
Hydraulisches Potential bei Koordinatenursprung (0,0):	0 m

Für die Eintrittstemperatur (T_{in}) und für den Durchfluss wurden zwei Standardwerte in Input.dat-File angegeben. Diese Werte wurden durch Load-Time-Funktionen entsprechend geändert.

12.1.2. Angegebene Werte für Eintrittstemperatur und Durchfluss

Da die Sonde nicht mit zwei konstanten Niveaus (0 und ein fixer Wert) arbeitet, muss man im Input.dat-File für jede Anschaltungsperiode den Durchfluss und die Eintrittstemperatur bestimmen. Diese sind in der Tabelle 12.1. dargestellt, zusammen mit der Dauer der Perioden.

Tab.12.1. Modellierte Perioden mit respektiven Eintrittstemperatur- und Durchflusswerten.

Zeitschnitt (s)	T_{in}	q (m/s)	Zeitschnitt (s)	T_{in}	q (m/s)	Zeitschnitt (s)	T_{in}	q (m/s)
30000	38.23	0.09221	472200	36.93	0.08866	55800	36.35	0.08516
39600	32.32	0.00000	20400	32.14	0.00000	30000	35.27	0.00000
59400	36.53	0.08512	67200	36.23	0.08507	32400	36.62	0.08506
21600	34.34	0.00000	40200	32.80	0.00000	75000	31.12	0.00000
61800	37.28	0.09634	41400	36.10	0.08502	15000	34.25	0.08561
3000	39.09	0.00000	61200	30.86	0.00000	38400	32.55	0.00000
73200	37.25	0.09396	21600	36.16	0.08530	50400	36.98	0.08516
17400	35.03	0.00000	40800	32.25	0.00000	44400	33.24	0.00000
76800	36.70	0.09303	34800	37.26	0.08519	46800	36.86	0.08521
31200	33.01	0.00000	65400	32.17	0.00000	9000	34.04	0.00000
37800	36.63	0.09115	15000	36.25	0.08544	70200	37.09	0.08506
49800	31.40	0.00000	25800	32.21	0.00000	35400	33.10	0.00000
31200	36.29	0.09241	143400	38.01	0.09624	40800	36.77	0.09345
58800	31.57	0.00000	40800	32.18	0.00000	54600	32.36	0.00000
25800	35.87	0.08526	48600	36.69	0.09371	28800	35.73	0.08526
49200	31.49	0.00000	42600	32.64	0.00000	144600	29.79	0.00000

12.1.3. Resultate

Wenn man die Berechnungen des Input-Files (s. Anhang B) mit FRACTure startet, nachdem man das restart_d.dat-File eingelesen hat, werden die berechneten Daten wie in der Abbildung 12.2. aussehen. Diese Abbildung wurde aus dem mon_node.dat-File erstellt.

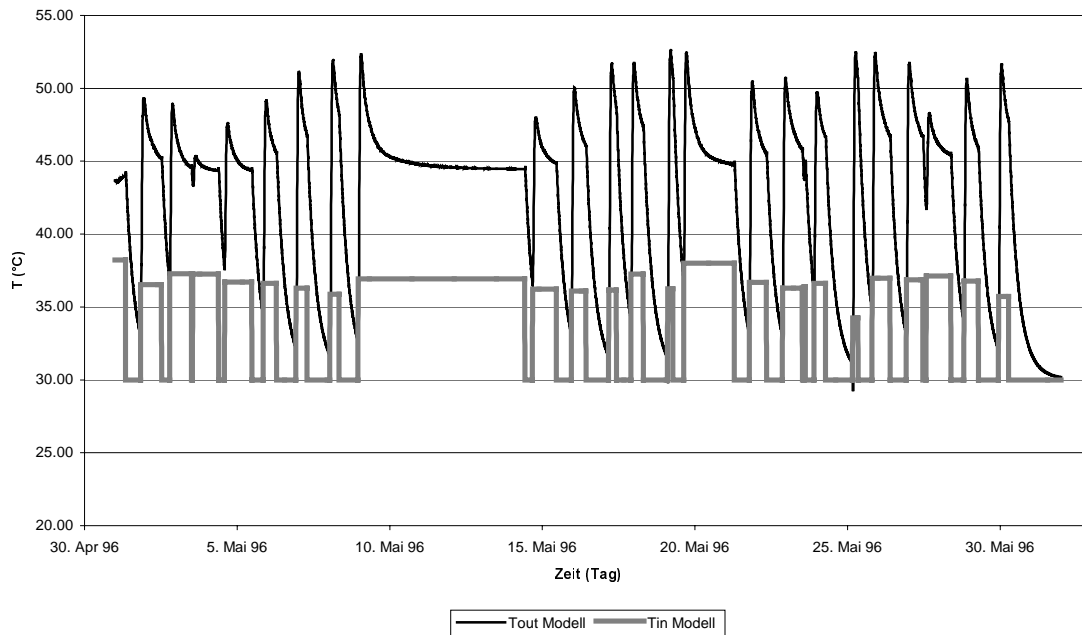


Abb.12.2. Resultate der ersten Simulation.

Wenn man die berechneten Daten alleine betrachtet, kann man bemerken, dass diese einen charakteristischen Verlauf besitzen. D.h. kurz nach der Anschaltung der Sonde werden die maximalen Austrittstemperaturen beobachtet und während der Anschaltung senken sich diese mit einem nicht linearen Verlauf bis zu einem ziemlich konstanten Niveau (44 °C).

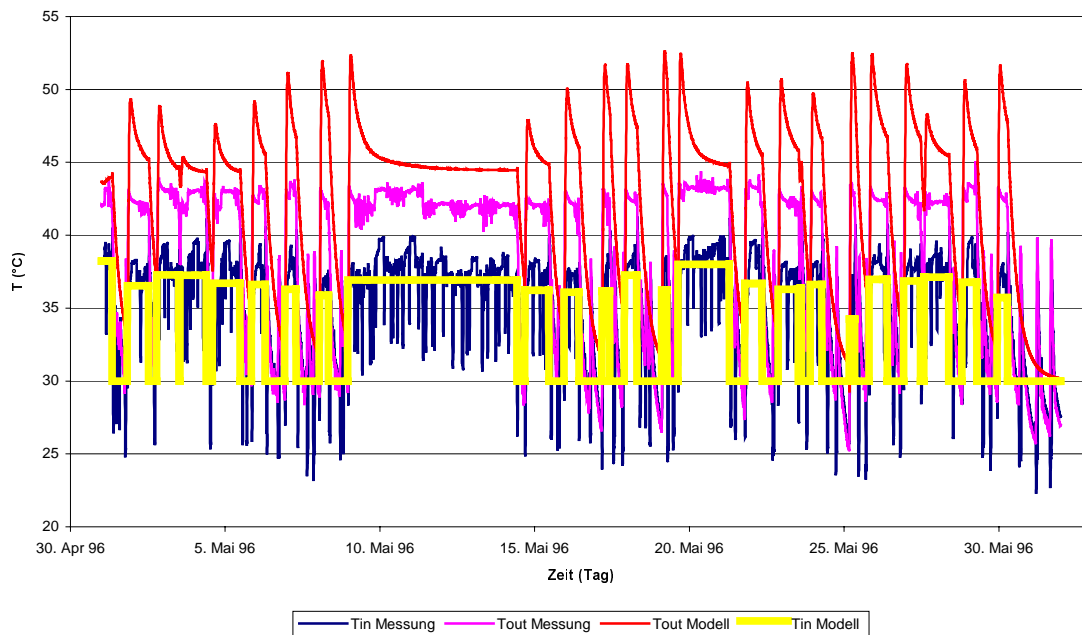


Abb.12.3. Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen mit den Messdaten.

Wenn man aber die Abbildung 12.3. beobachtet, merkt man sofort, dass die berechneten Werte höher sind als die gemessenen. Dazu soll auch bemerkt werden, dass bei den berechneten Austrittstemperaturen die Peaks viel ausgeprägter sind als bei der gemessenen. Die gemessenen Austrittstemperaturen scheinen gedämpft zu sein.

Dazu wird in den Abbildungen 12.4. und 12.5. für zwei charakteristischen Zeitpunkte das Temperaturfeld im Untergrund dargestellt. Die beiden Abbildungen wurden aus einem disx.dat-File im TECPLOT-Programm hergestellt. Die Abbildung 12.4. veranschaulicht eine punktuelle Darstellung des Temperaturfeldes in der Sonde und in der Umgebung der Sonde während einer Aktivitätsperiode (Eintrittstemperatur 36.53 °C und Austrittstemperatur 44.18 °C). Die Abbildung 12.5. hingegen zeigt eine punktuelle Darstellung während einer Abschaltperiode. Beide Abbildungen wurden aus den berechneten disx.dat-Files der transienten Simulation Mai 96 hergestellt.

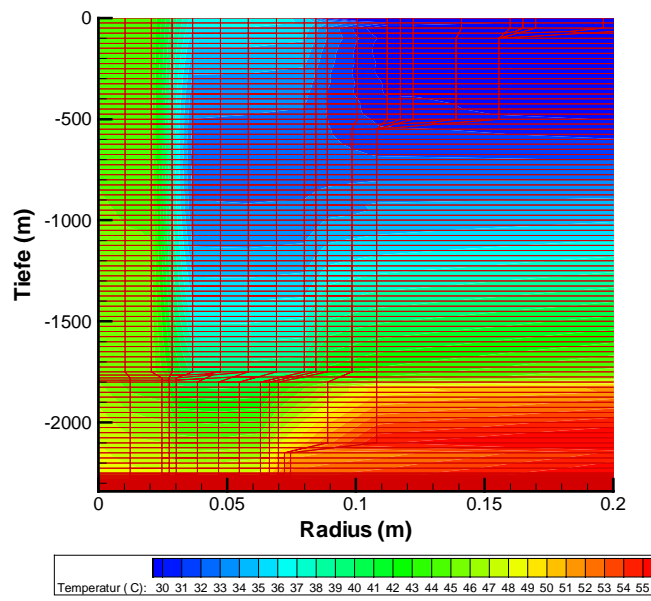


Abb.12.4. Graphische Darstellung des Temperaturfeldes während einer Anschaltperiode.

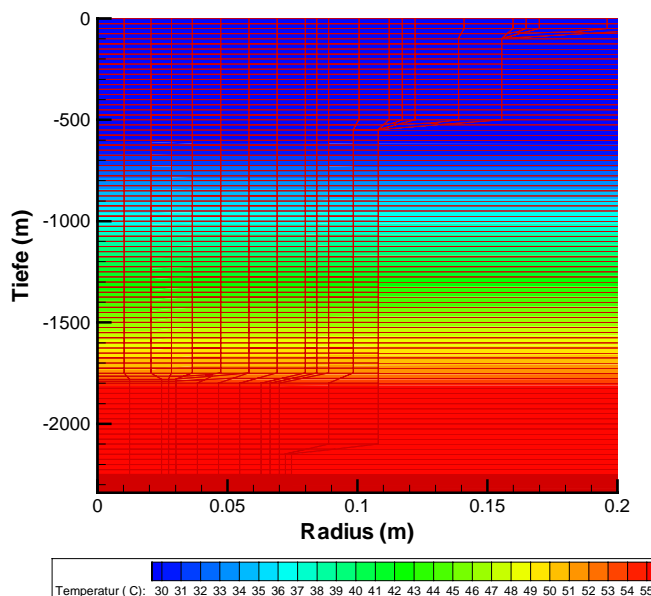


Abb.12.4. Graphische Darstellung des Temperaturfeldes während einer Abschaltperiode.

Die Abbildungen 12.4. und 12.5. erklären sehr deutlich, was im Untergrund passiert, wenn die Sonde aktiviert bzw. abgestellt wird. Diese sind aber graphische Darstellungen, die bei einem fixierten Zeitpunkt berechnet wurden, d.h. sie widerspiegeln nicht, was bei der gesamten transienten Berechnung erfolgt, wie z.B. die zunehmende Abkühlung des

umgebenden Gesteins bei einer Anschaltperiode und die nachfolgende Erwärmung nach der Abschaltung der Sonde.

Bisher hat man angenommen, dass die verschiedenen Parameter exakt waren. In den folgenden Abschnitten werden einige wichtige Materialparameter und Faktoren, die bei der ersten Simulation des Monats Mai 96 benutzt wurden, geprüft und wenn möglich verbessert. Das Ziel der kommenden Berechnungen wäre:

1. Die Erklärung der „Dämpfung“ der Austrittstemperaturen, d.h. welche Parameter können mit der Dämpfung der Austrittstemperaturpeaks verknüpft werden.
2. Das Erreichen des gemessenen Austrittstemperaturniveaus bei langer Aktivität der Sonde.

Man prüft zuerst die Parameter, die möglicherweise einen Einfluss auf die Peaks haben.

13. Sensitivitätsanalyse – Mai 96

Ziel dieses Kapitels ist zu verstehen, welche Einflüsse einige wichtige Parameter auf die Simulationsresultate besitzen. Man hat sich vor allem auf Parameter konzentriert, die bei der Feststellung eine gewisse Ungenauigkeit aufweisen könnten, wie z.B. die angepasste Wärmeleitfähigkeit λ' der Rohre und die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins. Die Berechnungen wurden mit dem Grundgitter durchgeführt. Am Ende dieses Kapitel sollte man eine Anpassung der Simulationsresultate auf die Messdaten durchführen, so dass man einen guten Fit erreichen kann. Dazu sollte man verstanden haben, welche Parameter den grössten Einfluss auf die Austrittstemperaturen hat.

Für die Berechnung der letzten Anpassung sollte man das erste Verfeinerungsgitter benutzen, was zu besseren Resultate führen sollte.

13.1. Einfluss der angepassten Wärmeleitfähigkeit λ' auf die Austrittstemperaturen

In diesem Abschnitt möchte man untersuchen, welche Einflüsse die angepasste Wärmeleitfähigkeit λ' des Innen- und Aussenrohres auf die Simulation haben. Zuerst wurde das Innerrohr untersucht, weil man im Bericht (POLYDYNAMICS, 1994) und im Schlussbericht (POLYDYNAMICS, 1997) der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 gelesen hat, dass im isolierten Förderrohr (s. Abschnitt 1.4.3.) durch den Kontakt zwischen Muffen und äusseren Rohr Kältebrücken entstehen können. Die Quantifizierung dieser Störung ist nicht einfach.

13.1.1. Einfluss der Muffen im isolierten Förderrohr

Wie schon im Abschnitt 1.4.3. erwähnt, wurde das isolierte Förderrohr aus zwei ineinander passenden Stahlrohren konstruiert. Diese sind mit Rohrlängen aufgebaut, die durch Muffen (zwischen 6 bis 9 m Abstand) verbunden werden. Insbesondere passen die Muffen des inneren Rohres knapp innerhalb des äusseren Rohres. Man hat angenommen, dass der Kontakt zwischen Muffe und äusserem Rohr zwar nicht perfekt ist, aber trotzdem relativ gut.

In der Tabelle 13.1. sind 4 mögliche Annahmen dargestellt. Für alle Fälle hat man einen regelmässigen Abstand zwischen den Muffen von 6 m angenommen, was der schlimmste Fall wäre. Die Berechnungen des gesamten thermischen Widerstandes des Innenrohres wurden mit der Gleichung 6.3. berechnet. Die Kombination der Widerstände ist in Serie.

Im Fall des isolierten Förderrohres kann der gesamte thermische Widerstand R_{tot} wie folgt dargestellt werden:

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{RohnInnen}} + R_{\text{Luft}} + R_{\text{RohrAussen}} \quad (6.3)$$

In der Gleichung 13.1 wird die Berechnung des Muffeneffektes für den Fall „Kontakt Muffe-Aussenrohr = 10%“ vorgeführt.

$$R_{\text{tot}} = d_i/\lambda_i + d_z \cdot (0.1/\lambda_m + 0.9/\lambda_1) + d_a/\lambda_a \quad (13.1)$$

mit

d_i : Wandstärke des inneren Rohres, [d_i] = m

d_a : Wandstärke des äusseren Rohres, [d_a] = m

d_z : Mächtigkeit des Zwischenraumes, $[d_z] = \text{m}$

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

Indizes: inneres Rohr (i), äusseres Rohr (a), Muffe (m) und Luft (l)

Wenn man die entsprechenden Werte in der Gleichung 13.1 einsetzt folgt:

$$R_{\text{tot}} = 0.005/50 + 0.006 \cdot (0.1/50 + 0.9/0.025) + 0.005/50 = 0.2162 \text{ (m}^2\text{K/W)}$$

Der resultierende Wert entspricht den thermischen Widerstand in der x-Richtung. Ein solcher Wert gilt nur, wenn die Muffen über die ganze Länge des Rohres vorhanden wären. Die Muffen wurden aber nur jede 6 m eingebaut, d.h. der mit der Gleichung 13.1 berechnete Wert gilt nur für die Bereiche, wo die Muffen eingebaut wurden, für den Rest des Rohres gilt den Widerstand, der im Abschnitt 6.1. berechnet wurde.

Tab.13.1. Berechnete Ang. Wärmeleitfähigkeiten für isoliertes Förderrohr.

Kontakt Muffe-Aussenrohr = 10%

R_{tot} in x-Richtung ($\text{m}^2\text{K/W}$)	0.2162
Totale Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	0.0740
Ang. Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	0.0709
Endwert für die Ang. Wärmeleitfähigkeit	0.0478

Kontakt Muffe-Aussenrohr = 50%

R_{tot} in x-Richtung ($\text{m}^2\text{K/W}$)	0.1203
Totale Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	0.1330
Ang. Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	0.1235
Endwert für die Ang. Wärmeleitfähigkeit	0.0485

Kontakt Muffe-Aussenrohr = 100%

R_{tot} in x-Richtung ($\text{m}^2\text{K/W}$)	0.00032
Totale Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	50.0000
Ang. Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	1.6571
Endwert für die Ang. Wärmeleitfähigkeit	0.0684

Abstand Muffe-Aussenrohr = 0.5 mm

R_{tot} in x-Richtung ($\text{m}^2\text{K/W}$)	0.0203
Totale Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	0.7878
Ang. Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	0.5397
Endwert für die Ang. Wärmeleitfähigkeit	0.0539

Die Unterschiede der Simulationsergebnisse werden trotz dieser Annahmen nicht relevant sein. Der maximale Austrittstemperaturunterschied (Peaks) wird $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ sein, was nicht so relevant ist.

13.1.2. Einfluss des isolierten Förderrohres

Wie man im Abschnitt 13.1.1. beobachtet hat, ist der Einfluss der Muffen auf die Austrittstemperaturen zu klein, um die „Dämpfung“ der Peaks zu erklären. Ziel dieses Abschnittes ist die Erläuterung, ob man mit den Materialparametern des isolierten Förderrohres diese Dämpfung erreicht.

Man hat vor allem mit dem Wert der angepassten Wärmeleitfähigkeit des Rohres gespielt. Die für die Simulationen gebrauchten Werte sind in der Tabelle 13.2. eingetragen.

Tab.13.2. Benutzte angepasste Wärmeleitfähigkeiten für die Simulation.

Erhöhung	Ang. Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
	0.0475
5x	0.2375
7x	0.3325
10x	0.4750

In der Abbildung 13.1. kann man die Resultate dieser Sensitivitätsanalyse anschauen.

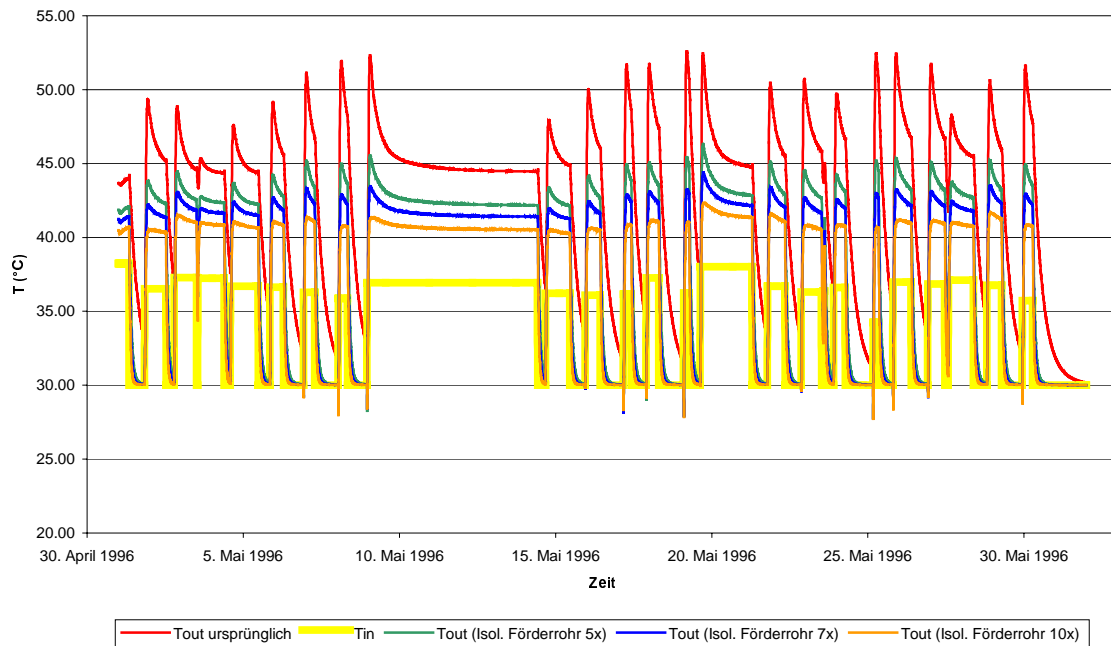


Abb.13.1. Darstellung des Effekts der Erhöhung von der ang. Wärmeleitfähigkeit des isolierten Förderrohres (5-, 7- und 10-fache Erhöhung) auf den Austrittstemperaturen.

Wenn man eine Simulation mit grösserer Leitfähigkeit des isolierten Förderrohres (d.h. mit schlechterer Isolation) startet, werden die Peaks gedämpft und die Austrittstemperaturen werden kleiner. Bei grösseren λ' werden die Peaks immer stärker gedämpft (s. Abbildung 13.1.).

13.1.3. Einfluss des nicht isolierten Förderrohres

Wie man aus der Abbildung 13.2. beobachten kann, hat die ang. Wärmeleitfähigkeit des nicht isolierten Förderrohres einen kleineren Einfluss auf die Austrittstemperaturen als die des isolierten Förderrohres. Mit einer Erhöhung der ang. Wärmeleitfähigkeit um Faktor 5 werden die Peaks weniger gedämpft als beim isolierten Förderrohr. Wenn man zusätzlich die ang. Wärmeleitfähigkeit erhöht (z.B. 10 mal grösser), bleibt die Austrittstemperatur fast identisch wie bei der 5-fachen Erhöhung, d.h. man kann diesen Parameter vergrössern wie man will, die Austrittstemperaturen bleiben fast konstant. Die angepasste Wärmeleitfähigkeit des nicht isolierten Förderrohres kann deshalb die Dämpfung der Peaks nicht erklären. In der Abbildung 13.2. ist der Vergleich zwischen der Simulation mit einer 10-fachen grösseren ang. Wärmeleitfähigkeit und dem ursprünglichen Wert dargestellt. Dieser Ereignis beweist aber ebenfalls, dass die Tiefe des isolierten Förderrohres, das eingebaut wurde, um einen Wärmeverlust zu verhindern, gut eingeschätzt wurde.

Der wichtigste Parameter des Förderrohres ist ganz klar die angepasste Wärmeleitfähigkeit des isolierten Teiles. Diese hat einen grösseren Einfluss auf die Austrittstemperaturen und vor allem auf die Temperaturpeaks, was auch sehr verständlich ist, denn wenn dieses Rohr nicht gut isoliert ist, wird man grosse Wärmeverluste registrieren. Dazu muss man noch erwähnen, dass die ang. Wärmeleitfähigkeit des isolierten Rohres der unsicherste Parameter ist. Die Unsicherheiten können in zwei Teilen zusammengefasst werden: die Unsicherheiten wegen des Rohraufbaus (ist es wirklich so isoliert, wie man behauptet?) und Unsicherheiten wegen der Berechnungen (ist die ang. Wärmeleitfähigkeit ein vernünftiger Wert?).

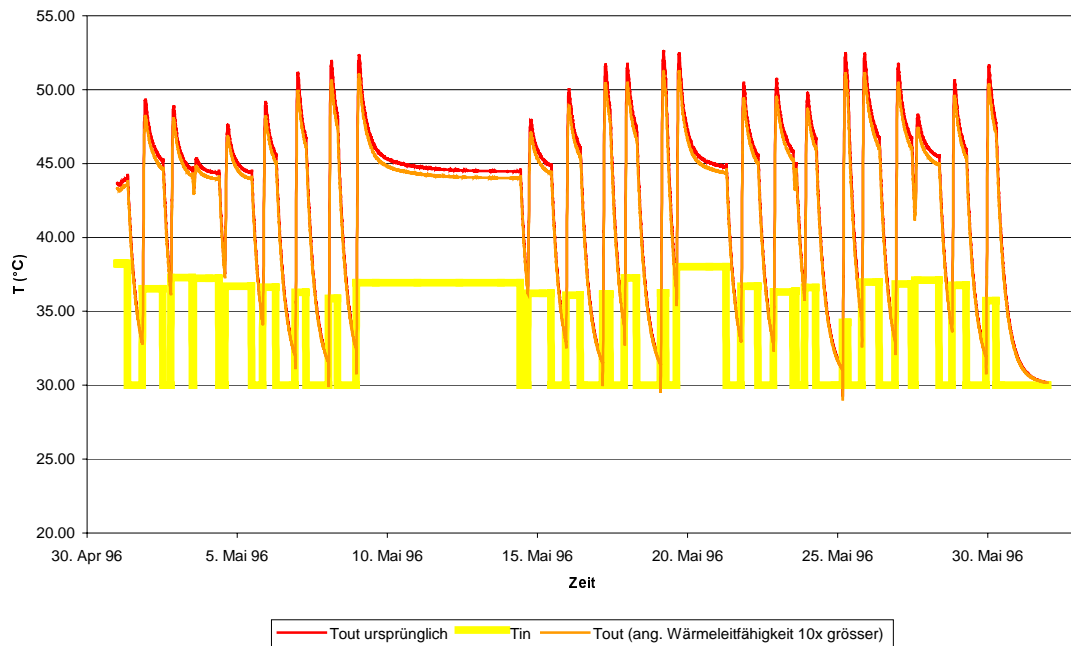


Abb.13.2. Darstellung des Effekts der Erhöhung von der ang. Wärmeleitfähigkeit des nicht isolierten Förderrohres (10-fache Vergrösserung) auf die Austrittstemperaturen.

13.1.4. Einfluss des Aussenrohres

In diesem Abschnitt sind die Simulationsergebnisse mit verschiedenen angepassten Wärmeleitfähigkeiten der äusseren Verrohrung beschrieben.

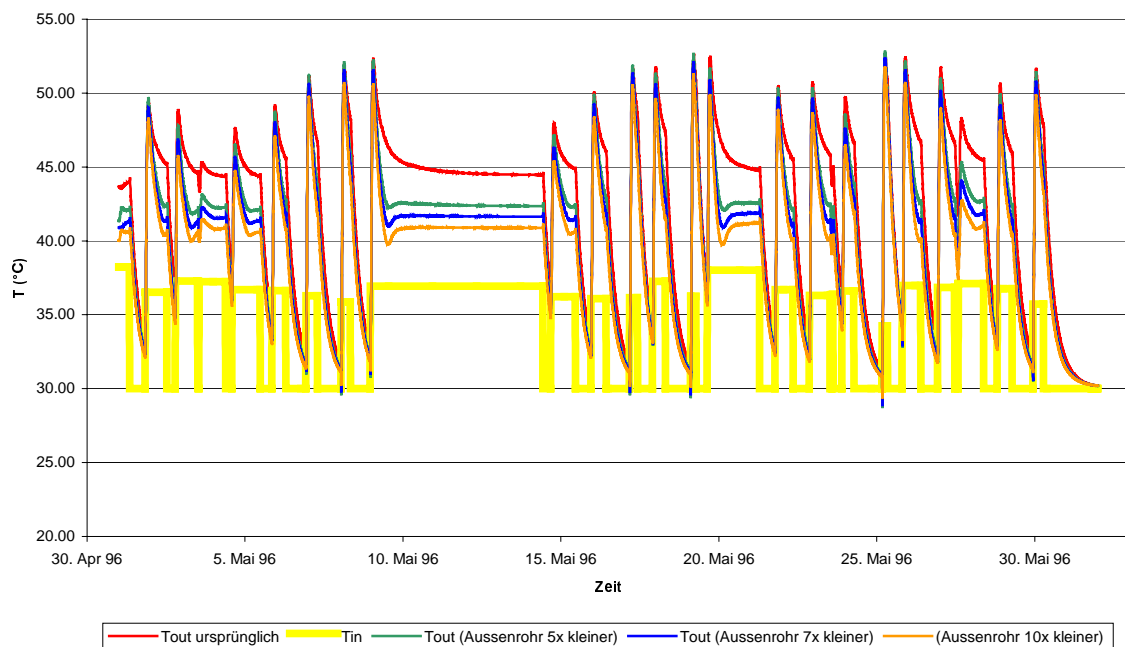


Abb.13.3. Darstellung des Effekts der Erhöhung von der ang. Wärmeleitfähigkeit der äusseren Verrohrung (5-, 7- und 10-fache Abnahme) auf die Austrittstemperaturen.

Die ang. Wärmeleitfähigkeit dieses Rohres, wie man in der Abbildung 13.3. beobachten kann, hat einen grossen Einfluss auf das Austrittstemperaturniveau und jedoch einen kleineren auf die Austrittstemperatur-peaks. Dies ist ganz verständlich, denn eine

Verschlechterung der thermischen Leitfähigkeit der äusseren Verrohrung führt zu einer kleineren Erwärmung des Fluids während der Zirkulation im äusseren Teil der Sonde, hat aber keinen Einfluss auf den inneren Teil der Sonde.

13.2. Einfluss des Fluid-Durchflusses auf die Austrittstemperaturen

Man hat diese Sensitivitätsanalyse durchgeführt, selbst wenn es schon klar war, dass der Durchfluss sowohl in den Messdaten als auch in der Simulation stimmt. Das Ziel war nur die Beschreibung des Effekts auf die Simulation einer Durchflussabminderung oder -zunahme. Dieser Effekt ist in der Abbildung 13.4. graphisch dargestellt.

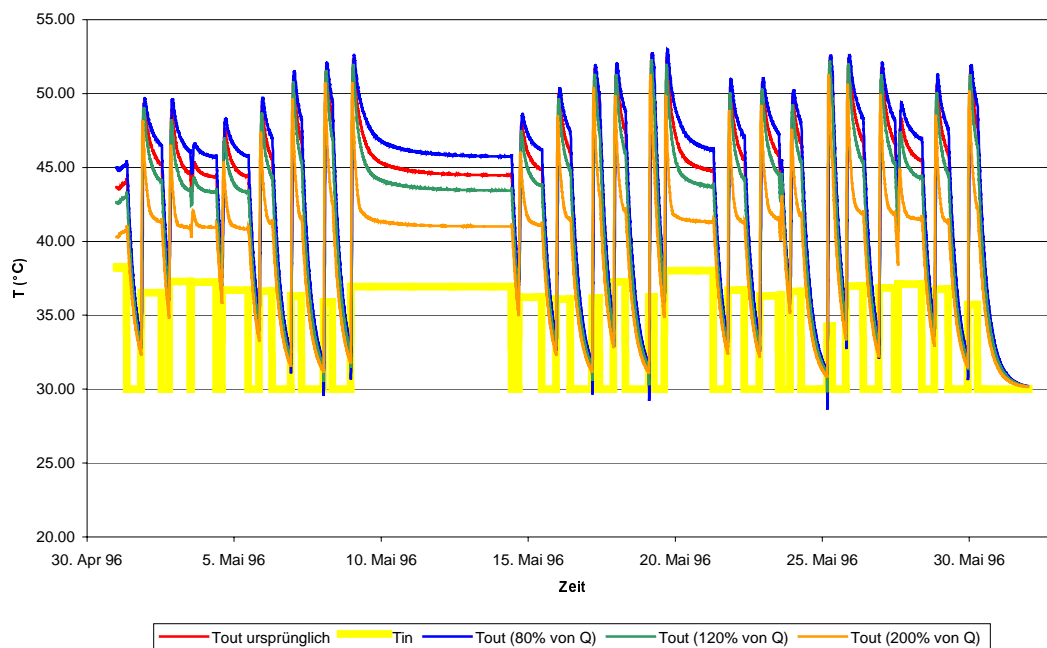


Abb.13.4. Graphische Darstellung des Effekts einer Durchflussverkleinerung und -vergrößerung.

Eine Zunahme der Fließgeschwindigkeit in den Rohren hat eine Abnahme der Austrittstemperaturen zur Folge, was auch sehr verständlich ist, denn das Fluid hat weniger Zeit, um Wärme aufzunehmen.

Die Austrittstemperaturmaxima sollten aber bei einer Zunahme der Fließgeschwindigkeit früher erscheinen, dieses Merkmal kann in der Abbildung 13.5. beobachtet werden. In der Abbildung ist ein Ausschnitt der Simulation Mai 96 dargestellt.

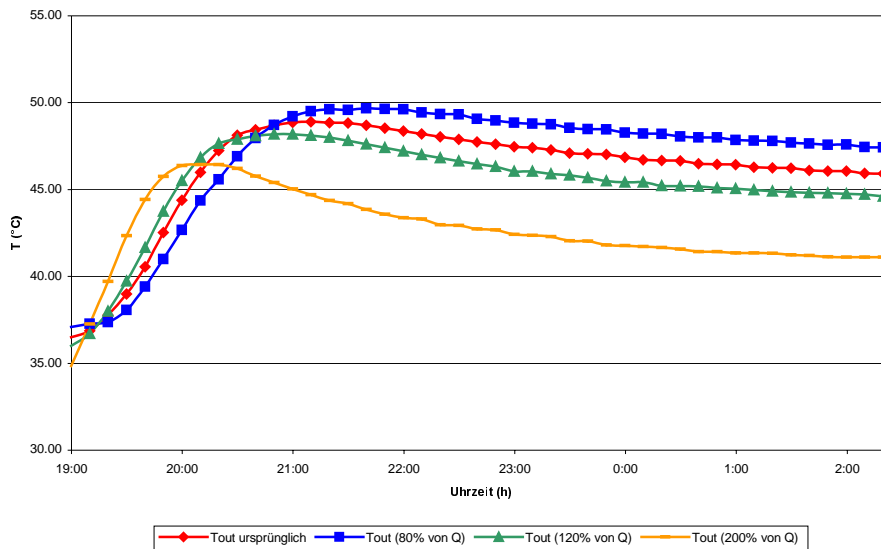


Abb.13.5. Abhängigkeit der maximalen Austrittstemperatur von den Fließgeschwindigkeiten in den Rohren.

Bei einer verdoppelten Fließgeschwindigkeit wird der Peak früher erscheinen, aber die maximale erreichte Austrittstemperatur wird kleiner sein.

13.3. Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins

Die gewählten thermischen Parameter, vor allem die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins, können einen grossen Einfluss auf die Simulation besitzen. In unseren Simulationen wurde angenommen, dass das umgebende Gestein einen konstanten Wert über das ganze Modell besitzt. Dieser Mittelwert wurde aus den Messdaten des Schlussberichtes über die geothermischen Eigenschaften der Molasse (GREBER ET AL, 1996) berechnet. Die Wärmeleitfähigkeiten wurden wegen fehlendem Kern-Material nur an Cuttings gemessen. Diese Werte sind nur dann sicher, wenn sie über grosse Tiefenintervalle gemittelt werden.

Tab.13.3. Gemittelte Wärmeleitfähigkeiten des umgebenden Gesteins.

WLF (Mittelwert) (W/mK)	WLF (Mittelwert gewichtet) (W/mK)
2.326	2.360

In unseren bisherigen Simulationen wurden eine Wärmeleitfähigkeit von 2.33 W/mK angenommen, was der Mittelwert der an Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten entspricht (die Mächtigkeiten der verschiedenen Schichten wird aber nicht berücksichtigt). Wenn man aber diese Mächtigkeiten berücksichtigt, wird die mittlere Wärmeleitfähigkeit 2.36 W/mK sein. Die graphischen Darstellungen der mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten berechneten Simulationen sind in Abbildung 13.6. dargestellt.

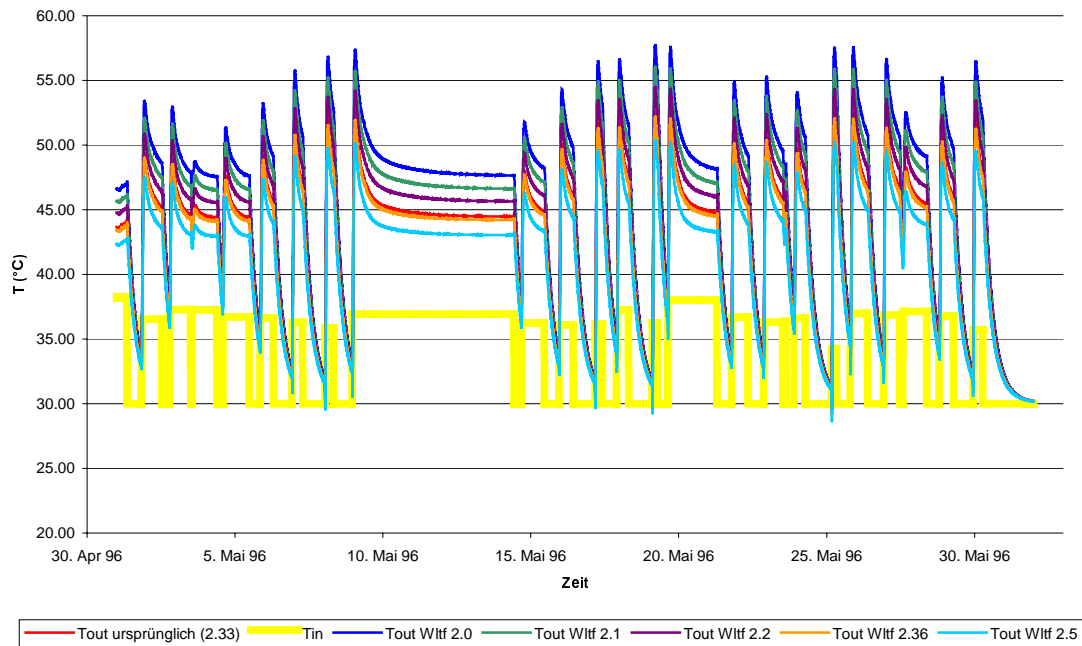


Abb.13.6. Einfluss der Wärmeleitfähigkeit (Wluf) des umgebenden Gesteins auf die Austrittstemperaturen.

Aus der Abbildung 13.6. kann man erkennen, dass je höher die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins ist, desto kleiner die Austrittstemperaturen sein werden. Dazu kann man auch erwähnen, dass die Unterschiede zwischen Simulation mit Wärmeleitfähigkeit 2.33 und 2.36 W/mK nicht so relevant sind, aber dieser letzte Wert für eine Anpassung an den Messdaten jedoch besser ist.

13.4. Anpassung an Messdaten

Um eine Anpassung an die Messdaten zu erreichen, soll man feststellen, welche Bereiche der Simulation zu einer Anpassung geeignet sind.

Der Durchfluss soll in der (Aktivitäts-)Periode der Sonde möglichst konstant sein, denn man hat für jede Anschaltungsperiode einen mittleren Durchfluss berechnet und im Input.dat-File eingetragen.

Dazu sollte man die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse betrachten, vor allem was die ang. Wärmeleitfähigkeit des isolierten Förderrohrs betrifft, denn diese ist der einzige Parameter, der einen bedeutenden Einfluss auf die Peaks der Austrittstemperatur aufweist.

Um eine gute Übersicht über die Simulationsdaten zu geben, werden alle wichtige Angaben (Randbedingungen, Parametern,...), die während der Arbeit geändert wurden, vorgestellt.

Randbedingungen für die Thermik:

Oberflächentemperatur:	9.2 °C
Eintrittstemperatur (T_{in}):	30.00 °C
Basaler Wärmefluss:	0.07 W/m ²

Randbedingungen für die Hydraulik:

Durchfluss:	1 m/s
Hydraulisches Potential bei Koordinatenursprung (0,0):	0 m

Für die Eintrittstemperatur (T_{in}) und für den Durchfluss wurden zwei Standardwerte im Input.dat-File angegeben. Diese Werte können durch Load-Time-Funktionen entsprechend geändert werden.

Was die thermischen und hydraulischen Materialparameter betrifft, wurde nur folgendes geändert:

- die angepasste Wärmeleitfähigkeit des isolierten Förderrohres ist 6 Mal grösser als der ursprüngliche Wert ($0.0475 \text{ W/mK} \rightarrow 0.285 \text{ W/mK}$)
- die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins ist 2.36 W/mK und nicht wie ursprünglich 2.33 W/mK .

Die Resultate dieser Anpassung sind in der Abbildung 13.7. dargestellt.

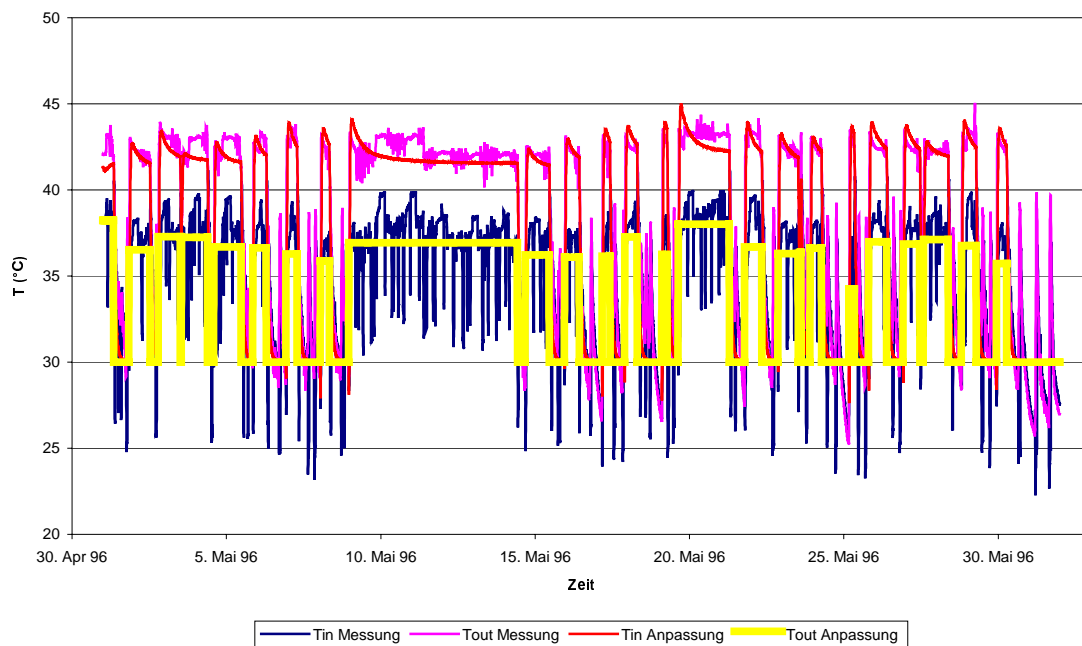


Abb.13.7. Anpassung der Simulationsdaten an den Messdaten.

Die Perioden, in denen die gemessenen Austrittstemperaturen grösser sind, stimmen mit Durchflussänderungen während der Pumpenaktivität in der Sonde überein. Diese wurden nicht simuliert, denn man hat für jede Aktivitätsperiode einen gemittelten Durchfluss berechnet. Um einen besseren Fit zu erreichen, sollte man diese Durchflusszunahmen modellieren.

13.5. Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse

Das Ziel dieses Kapitel war die Herstellung von Simulationsdaten (Austrittstemperaturen), die einen vergleichbaren Verlauf mit den Messdaten aufweisen. Dies wurde vor allem mit einer (6-fachen) Verschlechterung der Isolation des Förderrohres erreicht. Die Änderung der anderen Parametern führte zu keinen guten Resultaten.

Ausser die ang. Wärmeleitfähigkeit des isolierten Förderrohres haben die Modellparametern einen kleinen Einfluss auf der Dämpfung der Austrittstemperaturpeaks, aber alle beeinflussen das gesamte Temperaturniveau.

14. Schlussfolgerungen

Beim ersten Teil dieser Arbeit hat man zuerst versucht, die gemittelten Werte (1 Wert pro Monat) der Simulation und der Messdaten über 2 Jahre zu vergleichen. Am Ende dieser Modellierung wurden entsprechende Anfangsbedingungen für eine detailliertere Modellierung erstellt. Bei der ersten Simulation der Modellierung 1 wurden aber zu hohe Austrittstemperaturen im Vergleich zu den vorhandenen Messwerten erzeugt. Man war mit diesen Berechnungen nicht zufrieden und aus diesem Grund hat man an mögliche Verbesserungen gedacht. Es wurde zuerst eine bessere Berechnung der Durchflüsse durchgeführt, so dass man im Input.dat-File für jeden Monat die genaue Durchflussrate angeben könnte, dies führte aber zu keinen grosse Verbesserungen der simulierten Daten. Die simulierten Austrittstemperaturen waren immer um 8 °C grösser. Bevor man mit der dritten Simulation der Modellierung 1 startete, wurde die Formationstemperatur bei 2133 m (tiefster Wert bei den Bohrloch-Messdaten) kontrolliert. Es wurde festgestellt, dass diese im Modell fast 20 °C zu hoch war. Es folgte eine Anpassung des basalen Wärmeflusses auf 0.07 W/m². Die simulierten Daten waren dann noch ungefähr 1.5 °C grösser.

Danach hat man die detailliertere Modellierung gestartet. Die erste Simulation der Modellierung 2 führte wieder zu höheren Werten als den gemessenen Austrittstemperaturen. Die berechneten Daten haben ausserdem höhere Temperaturpeaks kurz nach der Sondenaktivierung. Um diese Peaks zu untersuchen wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Aus dieser wurde festgestellt, dass die Prägung dieser Peaks vor allem von der angepassten Wärmeleitfähigkeit λ' des isolierten Teiles des Förderrohrs abhängig ist. Die thermischen Materialeigenschaften des nicht isolierten Teiles des Förderrohres haben keinen fühlbaren Einfluss auf die Austrittstemperaturen. Die λ' des Aussenrohres und die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins hingegen haben einen Einfluss auf das gesamte Niveau der Austrittstemperaturen, aber nicht auf die Temperaturpeaks.

Mit einer 6-fachen Vergrösserung der angepassten Wärmeleitfähigkeit des isolierten Förderrohres wurde eine befriedigende Korrelation zwischen Simulationsdaten und Messdaten erreicht. Dies bedeutet, dass die Isolation des Förderrohr möglicherweise nicht so gut wie erwartet ist. Man muss dazu noch erwähnen, dass es versucht wurde, den Einfluss der Muffen im isolierten Förderrohr zu simulieren. Es zeigte sich jedoch, dass die Muffen fast keinen Einfluss auf die Austrittstemperaturen haben. Die Quantifizierung der Muffeneinfluss bleibt auch nach diesen Berechnungen noch schwierig.

Als Hinweis für die nächsten Untersuchungen sollte die Wärmestrahlung noch erwähnt werden. Die Wärmestrahlung könnte nämlich bei den dortigen tiefen λ (wie z.B. im Fall der Luft) eine wichtige Rolle spielen.

Um eine bessere Korrelation mit den Messdaten zu erreichen, sollte man noch zusätzlich mehrere Durchfluss-Niveaus feststellen (im Fall des Monats Mai 96 wären z.B. drei: 0, 0.7 und 0.9 m/s). Bei der Modellierung 2 wurde für jede Aktivitätsperiode der Sonde anstelle dieser fixen Niveaus ein Mittelwert des Durchflusses erstellt. Mit einer solchen Modellierung kann eine Durchflusserhöhung während der Aktivitätsperiode nicht simuliert werden.

Was noch sinnvoll wäre, wäre die Unterteilung des umgebenden Gesteins in Schichten (mit Mächtigkeiten grösser als 100 m) mit unterschiedlichen Materialeigenschaften, so dass am Ende z.B. 10 verschiedenen Schichten modelliert werden, die eine bessere Temperaturverteilung im Untergrund wiedergeben können. Die Berechnung eines Mittelwertes der Gesteinseigenschaften über die ganze Modelltiefe kann nämlich die Temperaturverteilung im Untergrund nur approximativ widerspiegeln.

Nach der Durchführung der verschiedenen Simulationen und der Analyse der Resultate hat man festgestellt, dass der Wärmefluss und die ang. Wärmeleitfähigkeit des isolierten Förderrohres, die am Anfang angenommen wurden, nicht ganz korrekt waren. Bei der Formulierung dieser Schlussfolgerungen muss man die nachfolgenden Punkte berücksichtigen:

- Die Verkleinerung des basalen Wärmeflusses kann möglicherweise als Effekt der zu kleinen horizontalen Ausdehnung des Gitters erklärt werden. Das Gitter sollte 10 bis 20 mal grösser sein um wirklich stabil zu sein.
- Die Berechnung des Wärmeüberganges und folglich der angepassten Wärmeleitfähigkeit des Innen- und Aussenrohr, d.h. wo zwei unabhängige thermische Regime (Rohr-Fluid) auf engem Raum aufeinandertreffen, sollte weiter untersucht werden.

II. Simulation der geplanten Tiefenerdwärmesonde Medyaguino (Russland) mit FRACTure

In diesem zweiten Teil der Arbeit werden nicht mehr alle Schritte vorgestellt und erklärt. Es werden vor allem die grundsätzliche Punkte dieser Simulation erwähnt. Wenn Unklarheiten bei der Durchführung entstehen, sollte man die entsprechenden Abschnitte des ersten Teiles der Arbeit (s. I. Simulation der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 mit FRACTure) durchlesen.

1. Einführung über die geplante Tiefenerdwärmesonde Medyaguino

Die Bohrung Medyaguino liegt in der Nähe der Stadt Yaroslavl und ist 2250 m tief. In der Abbildung II.1.1. ist der elementare Ausbau der geplanten Erdwärmesondenanlage dargestellt. Das Standrohr „Surface Casing“ (Innendurchmesser 486 mm und Aussendurchmesser 508 mm) geht bis zu einer Tiefe von 20 m, das Casing 1 „Conductor“ (Innendurchmesser 320 mm und Aussendurchmesser 340 mm) bis 537 m. Das Aussenrohr „Production Casing“ (Innendurchmesser 225 mm und Aussendurchmesser 245 mm) geht bis zu einer Tiefe von 2075 m. Bei 1990 wird ein „Casing Liner“ (Innendurchmesser 140 mm und Aussendurchmesser 168 mm) in diesem Aussenrohr eingebaut, dieses geht bis zur Endtiefe der Bohrung (2250 m). In der Modellierung wurde angenommen, dass das Innenrohr „Inner Pipe“ (Innendurchmesser 81 mm und Aussendurchmesser 90 mm) bis 2230 m Tiefe geht.

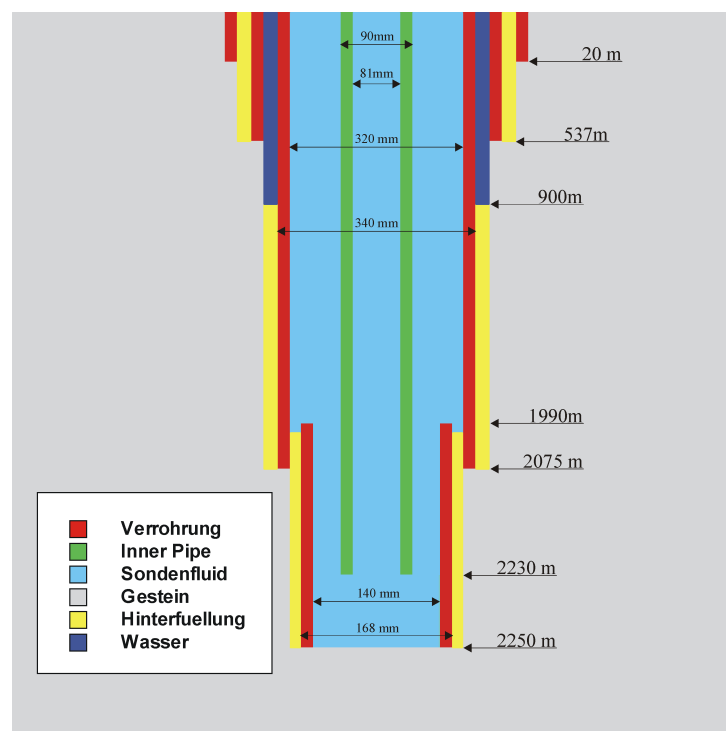


Abb.II.1.1. Ausbau der geplanten Anlage.

Zwischen 1460 m und 1581 m und zwischen 2067 m und 2194 m befinden sich 2 Aquifere.

2. Gittereigenschaften

In der Abbildung II.2.1. ist das Grundgitter dargestellt. Da die Sonde zylindersymmetrisch um die z-Achse ist (der Koordinatenursprung liegt an der Erdoberfläche in der Mitte der Sonde), wurde im AUTOCAD nur ein 2D-Modell aufgebaut. Dieses Modell kann automatisch bei der Berechnung im Programm FRACTure um die z-Achse rotiert werden. Die Dimensionen des Gitters wurde nach der Erfahrung bei der Modellierung der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1, vor allem in der x-Richtung vergrößert, denn man hat bemerkt, dass das Gitter sehr empfindlich auf horizontale Ausdehnungen ist. In der x-Richtung wurde von 0 m bis 20000 m modelliert, in der z-Richtung von 0 m bis -5000 m.

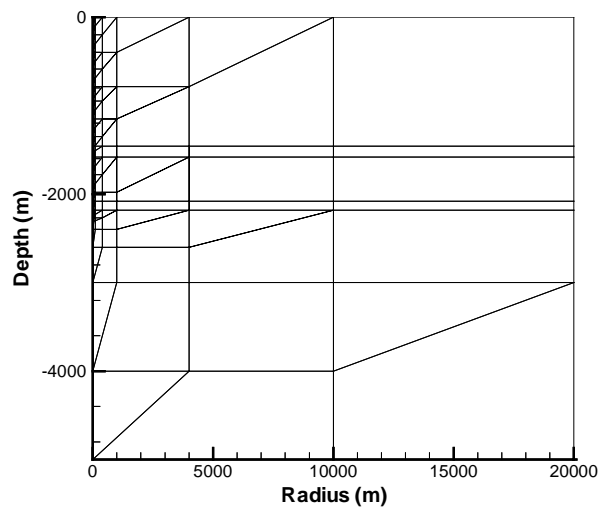


Abb.II.2.1. Graphische Darstellung des Grundgitters.

Die Materialzuteilung der Maschen im Grundgitter ist in der Abbildung II.2.2. dargestellt. Man muss aber bemerken, dass in dieser Abbildung wurden die beiden Aquifere als ein einziges Material mit gleichen Eigenschaften dargestellt. Bei der Modellierung wurden diese als zwei getrennte Materialien betrachtet.

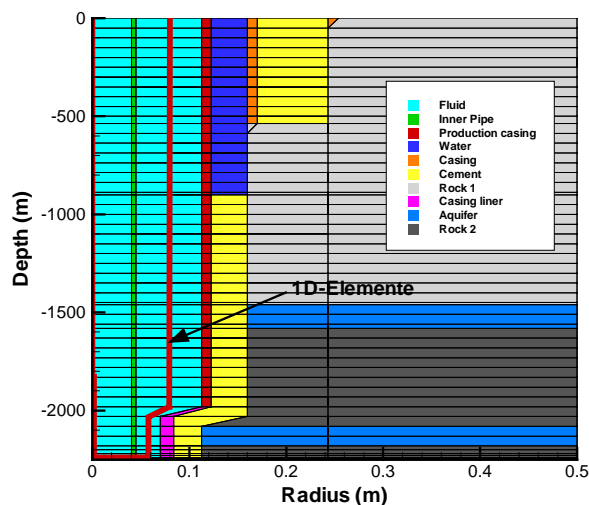


Abb.II.2.2. Zuteilung der Materialien in WinFra.

In den Abbildungen II.2.3. und II.2.4. sind die erste und zweite Verfeinerung des Grundgitters abgebildet. Diese wurden automatisch im Programm WinFra hergestellt.

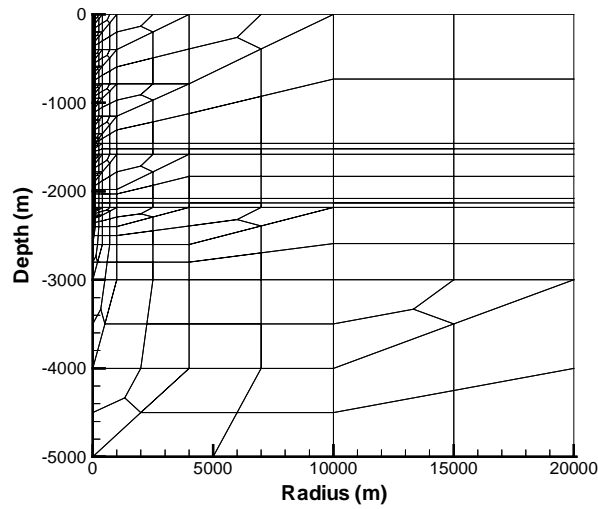


Abb.II.2.3. Graphische Darstellung der 1. automatischen Verfeinerung in WinFra.

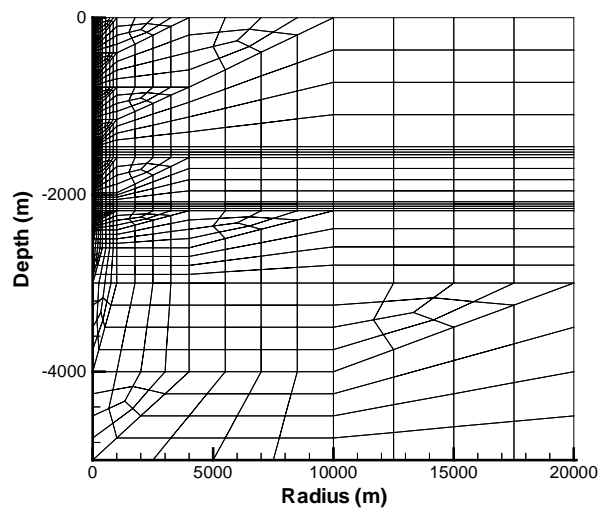


Abb.II.2.4. Graphische Darstellung der 2. automatischen Verfeinerung in WinFra.

Diese Modelle wurden erstellt, um bei der transienten Berechnung eine bessere Darstellung der Temperaturverteilung im Untergrund abbilden zu können.

3. Materialeigenschaften der 2D-Elemente

In der Tabelle II.3.1. und II.3.2. sind die Materialeigenschaften der 2D-Elemente aufgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Cements und der verschiedenen Verrohrungen sowie die Wärmekapazitäten des umgebenden Gestein und der Aquiferen wurden geschätzt, denn man hatte keine vernünftigen Daten für diese Materialien zur Verfügung. Die aus den vorhandenen Daten berechneten spezifischen Wärmekapazitäten konnten nicht gebraucht werden

Tab.II.3.1. Thermische Materialeigenschaften der Eingabeparametern.

Material	Wärmeleitfähigkeit in x/z-Richtung (W/mK)	Spez. Wärmekapazität (J/m ³ K)	Hydr. Leitfähigkeit m ³ /Pa·s
Sondenfluid	10/0.6	4.1745·10 ⁶	
Cement	2/2	1.6000 ·10 ⁶	
Surface casing	50/50	3.5370·10 ⁶	
Conductor	50/50	3.5370·10 ⁶	
Rock 1	2.14/2.14	1.6800·10 ⁶	
Rock 2	2.16/2.16	1.8600·10 ⁶	
Wasser	0.6/0.6	4.1745·10 ⁶	
Aquifer 1	4.56/4.56	1.6000·10 ⁶	6.44·10 ⁻⁸
Aquifer 2	4.56/4.56	1.7600·10 ⁶	3.34·10 ⁻⁸

In der Tabelle II.3.2. sind die Eigenschaften des Innen- und Aussenrohres angegeben, die ang. Wärmeleitfähigkeiten wurden wie bei der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 berechnet (s. beim Teil I der Arbeit, der Abschnitt 5.3. und der Kapitel 6)

Tab.II.3.2. Thermische Materialeigenschaften der inneren und äusseren Verrohrungen.

Verrohrung	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Spez. Wärmekapazität (J/m ³ K)	Ang. Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Inner Pipe (nicht isoliert)	50	3.5370·10 ⁶	0.1217
Production Casing	50	3.5370·10 ⁶	0.0974
Casing liner	50	3.5370·10 ⁶	0.2186

4. Materialeigenschaften der 1D-Elemente

Man hat 4 verschiedene Linienelemente definiert, denn die Fließgeschwindigkeiten in der Sonde kann in vier Teile aufgliedert werden. Die Materialeigenschaften der Linienelemente sind in der Tabelle (II.4.1.) dargestellt.

Tab.II.4.1. Thermische und hydraulische Materialeigenschaften.

Linienelement	Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)	Sp. Wärmekapazität c_p (J/m ³ K)	Querschnitt (m ²)
Aussenrohr oben	0.6	4.18·10 ⁶	3.340·10 ⁻²
Aussenrohr unten	0.6	4.18·10 ⁶	9.032·10 ⁻³
Horizontal	0.6	4.18·10 ⁶	3.142·10 ⁻²
Innenrohr	0.6	4.18·10 ⁶	5.153·10 ⁻³

5. Randbedingungen

Für dieses Modell wurden 5 verschiedene Randbedingungen im Programm WinFra definiert: 3 thermische und 2 hydraulische. Die thermischen Randbedingungen steuern die Oberflächentemperatur, die Eintrittstemperatur des Fluids in der Sonde und den basalen Wärmefluss. Die hydraulischen Randbedingungen steuern hingegen den Wasserdurchfluss in der Sonde und das hydraulische Potential beim Sondenaustritt.

Tab.II.5.1. Randbedingungen für die Thermik.

Randbedingungen: Thermik	
Oberflächentemperatur:	10 °C
Eintrittstemperatur (T_{in}):	20 °C
Basaler Wärmefluss:	0.035 W/m ²

Tab.II.5.2. Randbedingungen für die Hydraulik.

Randbedingungen: Hydraulik	
Durchfluss:	$8.32 \cdot 10^{-2}$ m/s
Hydraulisches Potential bei Koordinatenursprung (0,0):	0 m

Diese Randbedingungen werden im Kapitel 7 noch überprüft.

6. Modellsensitivität

In diesem Kapitel sollten die wichtigsten Einflussfaktoren untersucht werden, die einen Einfluss auf die Simulation besitzen. Die Modellsensitivität wurde nur für die Maschengrösse und für Änderungen in der vertikalen und horizontalen Richtungen des Gitters durchgeführt. Dazu wurden auch die Fliessgeschwindigkeiten in den Rohren nachgerechnet. Der transiente Teil der Modellsensitivität wurde wegen Zeitmangel nicht durchgeführt.

6.1. Stationäre Berechnungen

6.1.1. Einfluss der Maschengrösse

Tab.II.6.1. Austrittstemperaturen in Abhängigkeit der Maschengrösse.

Gitter	T _{out} (°C)	ΔT _{out} (°C)
Grundgitter	22.22	
1. Verfeinerung	22.13	- 0.09
2. Verfeinerung	22.12	- 0.10

6.1.2. Sensitivität auf horizontale und vertikale Ausdehnungen des Gitters

Tab.II.6.2. Modellausdehnung in der x-Richtung und die entsprechende Austrittstemperaturen.

Modell	Ausdehnung in x-Richtung	T _{out} (°C)	ΔT _{out} (°C)
Grundgitter	20000 m	22.22	
Modell I	30000 m	22.22	0
Modell II	40000 m	22.22	0

Tab.II.6.3. Modellausdehnung in der z-Richtung und die entsprechende Austrittstemperaturen.

Modell	Ausdehnung in x-Richtung	T _{out} (°C)	ΔT _{out} (°C)
Grundgitter	20000 m	22.22	
Modell I	30000 m	22.22	$2.55 \cdot 10^{-3}$
Modell II	40000 m	22.22	$3.44 \cdot 10^{-3}$

6.2. Überprüfung der Fliessgeschwindigkeit in den Rohren

In diesem Abschnitt werden die Fliessgeschwindigkeiten in den Rohren überprüft. In der Tabelle II.6.4. sind die theoretischen Fliessgeschwindigkeiten eingetragen.

Tab.II.6.4. Fliessgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Durchflussmenge (m³/h).

Durchflussmenge (m ³ /h)	Durchflussmenge (m ³ /s)	Fliessgeschwindigkeiten (m/s)		
		Production Casing (0-1990 m)	Liner Casing (1990-2250 m)	Inner Pipe (2250-0 m)
10	0.0028	0.0832	0.3075	0.5391
15	0.0042	0.1248	0.4613	0.8086
20	0.0056	0.1663	0.6151	1.0781
25	0.0069	0.2079	0.7689	1.3477
30	0.0083	0.2495	0.9226	1.6172
35	0.0097	0.2911	1.0764	1.8867
40	0.0111	0.3327	1.2302	2.1562
45	0.0125	0.3743	1.3840	2.4258
50	0.0139	0.4158	1.5377	2.6953

In der Tabelle II.6.5. sind die berechneten Fließzeiten dargestellt, so dass man eine Kenntnis der gesamten Umlaufzeiten haben kann.

Tab.II.6.5. Fließzeiten in der Sonde.

Durchflussmenge (m ³ /h)	Fließzeiten (s)					
	Production Casing (0-1990 m)	Liner Casing (1990-2250 m)	Inner Pipe (2250-0 m)	Summe (s)	Summe (min)	Summe (h)
10	23927	780	4137	28844	480.7	8.0
15	15951	520	2758	19230	320.5	5.3
20	11964	390	2068	14422	240.4	4.0
25	9571	312	1655	11538	192.3	3.2
30	7976	260	1379	9615	160.2	2.7
35	6836	223	1182	8241	137.4	2.3
40	5982	195	1034	7211	120.2	2.0
45	5317	173	919	6410	106.8	1.8
50	4785	156	827	5769	96.1	1.6

Um diese Fließgeschwindigkeiten zu überprüfen, hat man ein adv.dat-File, das für eine transiente Simulation mit einer Durchflussmenge von 10 m³/h berechnet wurde, betrachtet. Der Vergleich zwischen den im Modell berechneten und theoretisch berechneten Fließgeschwindigkeiten ist in der Tabelle II.6.6. zu sehen.

Tab.II.6.6. Vergleich der Fließgeschwindigkeiten.

	Q (m ³ /h)	Fließgeschwindigkeit Production Casing (m/s) (0-1990 m)	Fließgeschwindigkeit Liner Casing (m/s) (1990-2250 m)	Fließgeschwindigkeit Inner Pipe (m/s) (2250-0 m)
Modell	10	0.0832	0.3075	0.5391
Theorie	10	0.0832	0.3077	0.5396

Wenn man die Daten in der Tabelle II.6.6. betrachtet, wird sofort deutlich, dass die Fließgeschwindigkeiten in den verschiedenen Verrohrungen übereinstimmen.

6.3. Ergebnisse der Modellsensitivität

Wenn man die stationären Berechnungen betrachtet kann man feststellen, dass die Unterschiede bei der berechneten Austrittstemperatur zwischen Grundgitter und den Verfeinerungen (erste und zweite) nicht relevant ist. Auch die Unterschiede zwischen ausgedehnten (in der x- und z-Richtung) Gittern und Grundgitter sind bedeutungslos, in der x-Richtung bleiben die Austrittstemperaturen sogar konstant. Demgemäss wird für die nachfolgenden Modellierungen das Grundgitter benutzt.

7. Transiente Simulation

Bevor man mit der transienten Simulation beginnt, soll man überprüfen, ob der berechnete Temperaturverlauf in der Bohrung beim ungestörten Zustand (Sonde nicht aktiv), mit den gemessenen Temperaturen übereinstimmt.

Wenn man eine Simulation mit den im Kapitel 5 dargestellten Randbedingungen startet, werden in der Bohrung zu kleine Temperaturen erzeugt.

Mit den vorhandenen gemessenen Temperaturen werden die Parameter kalibriert. Es wurde nur den basalen Wärmefluss geändert. Die Temperaturunterschieden zwischen Simulation und Messungen können zum Teil auch mit Unsicherheit des Wärmekapazitätswertes des umgebenden Gesteins erklärt werden. Welcher Einfluss aber diese Unsicherheit haben kann, ist unberechenbar.

Der neue Wert für den basalen Wärmefluss wird um 0.046 W/m^2 geschätzt.

7.1. Modellierung 1 - Unterschiedliche Eintrittstemperaturen in der Sonde -

Ziel dieser Simulation ist die Berechnung der Austrittstemperaturen mit verschiedenen Eintrittstemperaturen.

Es wurden folgende Punkte betrachtet:

1. Die Simulation dauert ungefähr 2 Jahre (Für die Zeitsequenzen und die Load-time-Funktionen hat man die gleiche, die im Anhang A stehen, angewendet).
2. Die Pumpe ist entweder aktiv mit Durchfluss 0.0832 m/s (was $10 \text{ m}^3/\text{h}$ Durchflussmenge entspricht) oder sie ist abgestellt (Durchfluss 0 m/s).
3. Die Eintrittstemperatur in der Sonde während der Aktivitätsperioden bleibt immer konstant.
4. Die gewählte Zeitdiskretisierung ist ein Tag.
5. Die Resultate wurden mit dem Grundgitter berechnet.

7.1.1. Randbedingungen

Wie im Kapitel 8 beschrieben, können für jede Simulation im Programm WinFra unterschiedliche Randbedingungen angegeben werden.

Randbedingungen für die Thermik:

Oberflächentemperatur:	$10 \text{ }^\circ\text{C}$
Eintrittstemperatur (T_{in}):	$5.00 \text{ }^\circ\text{C}$
Basaler Wärmefluss:	0.046 W/m^2

Randbedingungen für die Hydraulik:

Durchfluss:	0.0832 m/s
Hydraulisches Potential bei Koordinatenursprung (0,0):	0 m

Für die Eintrittstemperatur (T_{in}) in die Sonde und für den Durchfluss wurden zwei Standardwerte angegeben.

7.1.2. Resultate

Die Resultate dieser Simulation sind in der Abbildung II.7.1. dargestellt.

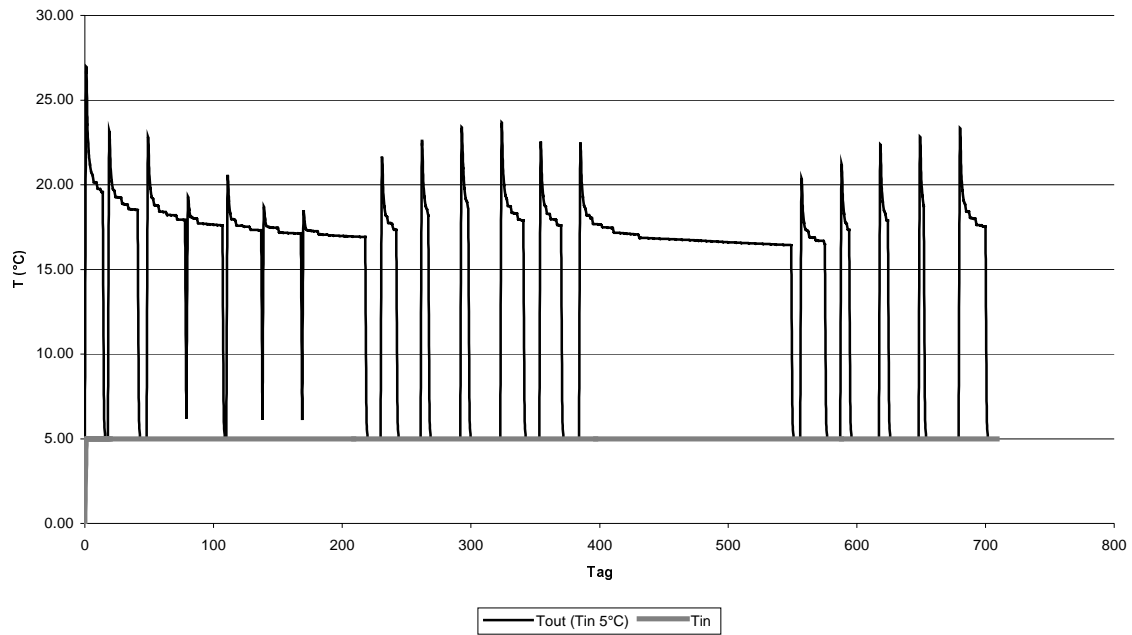


Abb.II.7.1. Simulation mit Eintrittstemperatur 5 °C.

Um eine bessere Übersicht der möglichen Resultate zu erhalten, werden in der Abbildung II.7.2. weitere Simulationen dargestellt mit anderen konstanten Eintrittstemperaturen (10°C, 20°C und 30°C). Die anderen Randbedingungen und Modellparameter sind identisch wie bei der Simulation mit Eintrittstemperatur 5°C.

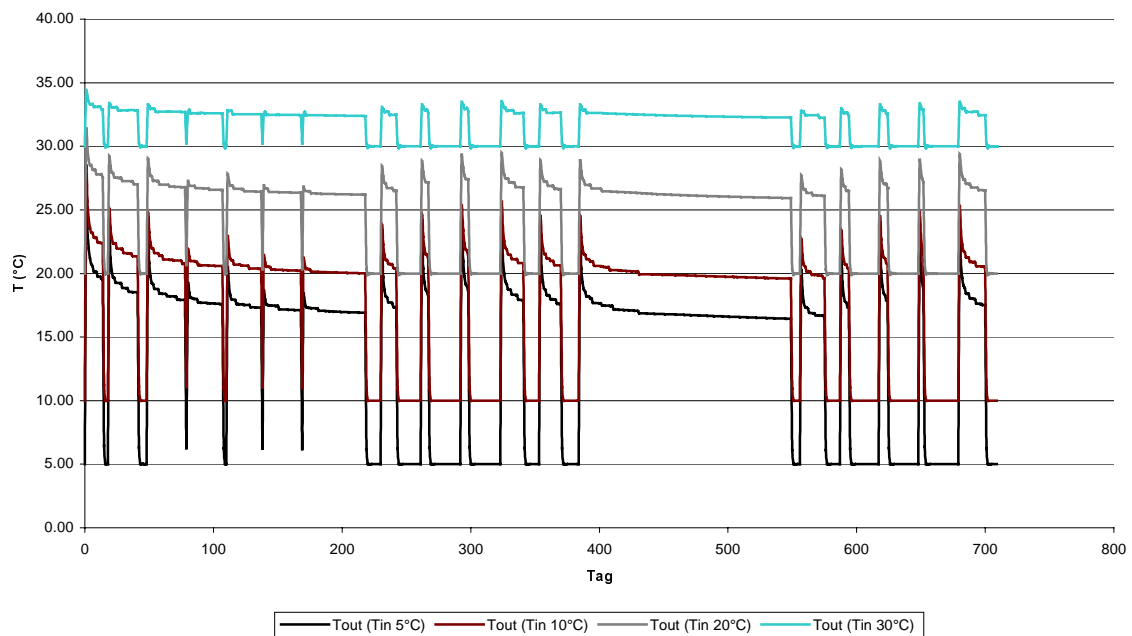


Abb.II.7.2. Graphische Darstellung der Simulation mit verschiedenen Eintrittstemperaturen.

7.2. Modellierung 2 - Unterschiedliche Durchflüsse in der Sonde -

Bei dieser zweiten Modellierung will man den Einfluss des Durchflusses in der Sonde auf die Austrittstemperaturen untersuchen. Es wurden zwei verschiedenen Modellierungen durchgeführt. Für die erste hat man als Eintrittstemperatur einen Wert von 5 °C angenommen und für die zweite 10 °C. Für jede Modellierung wurden 3 Simulationen mit unterschiedlichen Durchfluss berechnet. Die anderen Randbedingungen (s. Kapitel 5) und die Materialparameter (s. Kapiteln 3 und 4) sind identisch wie bei der 1. Modellierung. Die benutzten Durchflüsse sind in der Tabelle II.7.1. erfasst.

Tab.II.7.1. Benutzte Durchflüsse bei der Modellierung 2.

Durchflussmenge (m ³ /h)	Durchfluss (m/s)
10	0.0832
30	0.2495
50	0.4158

Die Ergebnisse mit Eintrittstemperatur 5 °C sind in der Abbildung II.7.3. dargestellt.

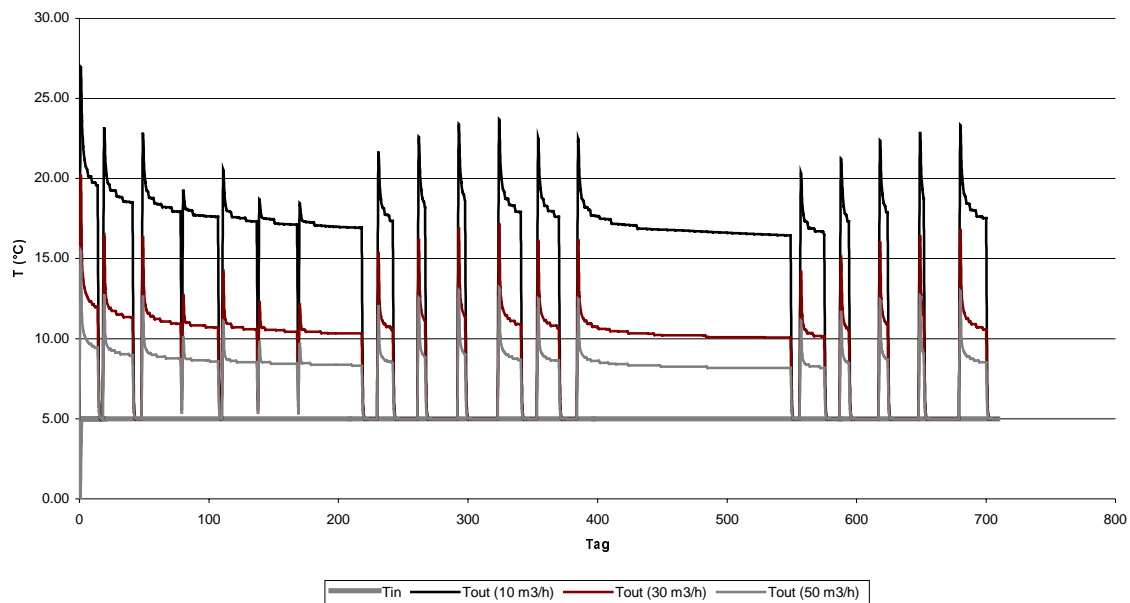


Abb.II.7.3. Darstellung der Simulationen mit verschiedenen Durchflüssen und 5 °C Eintrittstemperatur.

In der Abbildung II.7.4. sind andererseits die Resultate der Simulationen mit Eintrittstemperatur 10 °C dargestellt.

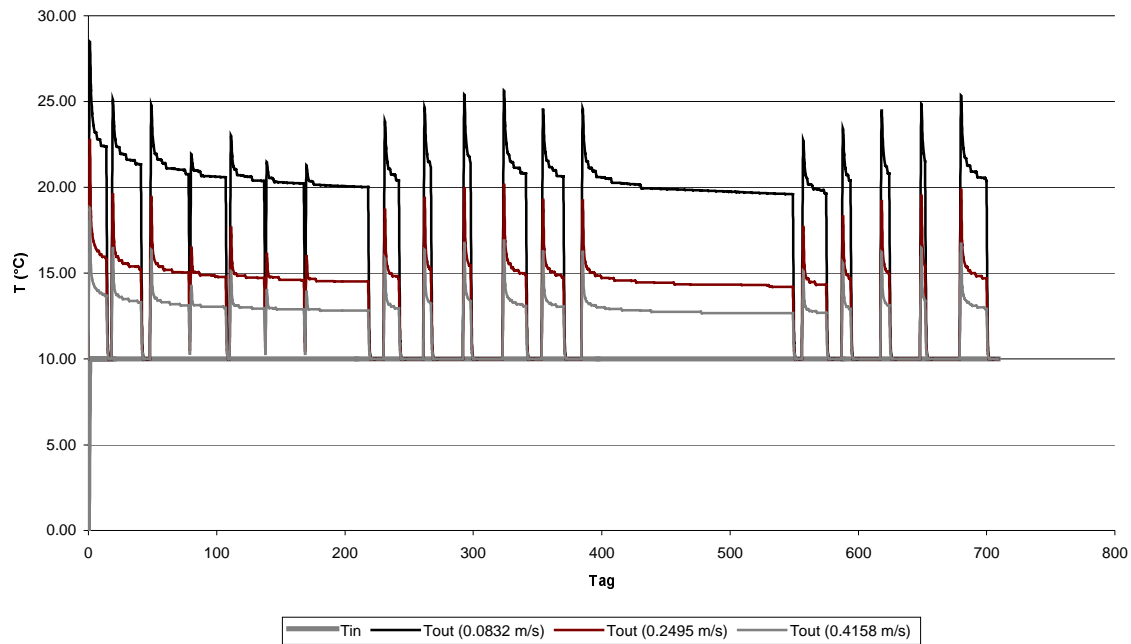


Abb.II.7.4. Simulationen mit verschiedenen Durchflüssen und konst. Eintrittstemperatur (10° C).

7.3. Modellierung 3 - Unterschiedliche λ' des Inner Pipes -

Mit dieser letzten Modellierung werden die Eigenschaften des geplanten Inner Pipes gesucht. Mit den folgenden Simulationen will man zeigen, dass die Wahl der Eigenschaften des Innen Pipes (vor allem die ang. Wärmeleitfähigkeit) einen grossen Einfluss auf die Resultaten besitzen kann.

Man hat 3 Simulationen berechnet mit drei verschiedenen angepassten Wärmeleitfähigkeiten, diese sind in der Tabelle II.7.2. dargestellt.

Tab.II.7.2. Benutzte ang. Wärmeleitfähigkeiten bei der Modellierung 3.

Ang. Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Bemerkungen
0.1220	50	nicht isoliert
0.0610	0.122	relativ gut isoliert
0.0305	0.041	sehr gut isoliert

Die Erniedrigung der Wärmeleitfähigkeiten für das Inner Pipe, könnte wie bei der Tiefenerdwärmesonde Weggis TH1 erfolgen, d.h. mit zwei konzentrischen Stahlrohren, zwischen denen sich Luft befindet (s. bei Teil I Abschnitte 1.4.2. und 1.4.3.).

Die Resultate der Simulationen sind in den Abbildungen II.7.5. und II.7.6. dargestellt. Die Resultate in der Abbildung II.7.5. wurden mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 5 °C berechnet, die in der Abbildung II.7.6. hingegen mit 10 °C.

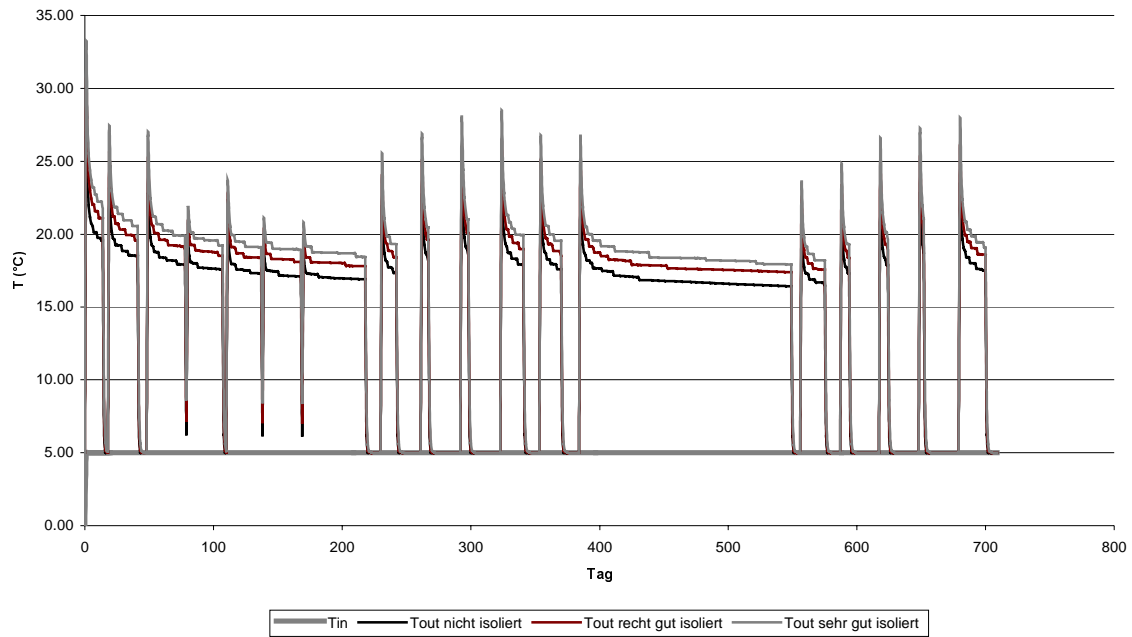


Abb.II.7.5. Darstellung der Simulationen mit verschiedenen ang. Wärmeleitfähigkeiten des Innenrohres und konst. Eintrittstemperatur (5°C).

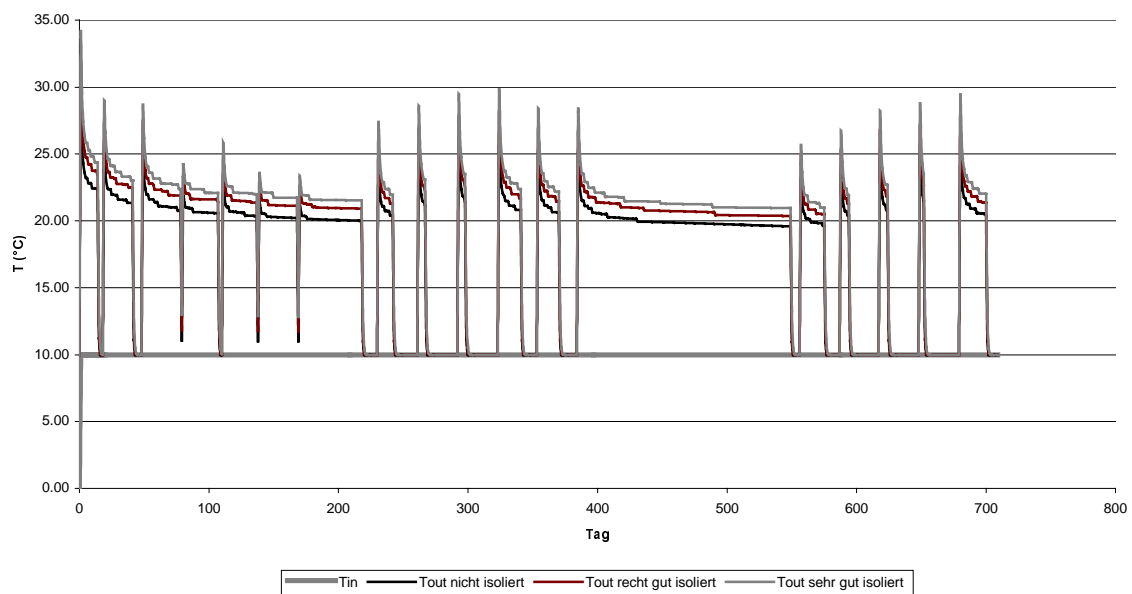


Abb.II.7.6. Darstellung der Simulationen mit verschiedenen ang. Wärmeleitfähigkeiten des Innenrohres und konst. Eintrittstemperatur (10°C).

Aus den Abbildungen II.7.5. und II.7.6. kann man bemerken, dass mit einer 4-fachen kleineren ang. Wärmeleitfähigkeit, kann man während einer langen Aktivitätsperiode ungefähr 1.5°C grössere Austrittstemperaturen erhalten.

8. Schlussfolgerungen

Ziel dieser zweiten Teil der Arbeit war die Erstellung von Daten aus einer geplanten Tiefenerdwärmesonde im Russland. Es wurden Simulationen mit unterschiedlichen Eintrittstemperaturen, Durchflüssen und angepassten Wärmeleitfähigkeiten des Inner Pipes berechnet. Die Resultate können mit grosser Wahrscheinlichkeit bei der Planung dieser Tiefenerdwärmesonde, vor allem was die Wahl des Inner Pipes und die maximale Durchflussrate betrifft, behilflich sein.

Eine umfassende Schlussfolgerung kann nicht festgestellt werden, denn man besitzt zu wenige Informationen über die gewünschte Leistung und Ausnutzung dieser Erdwärmesonde. Man hofft trotzdem, dass die Resultate der verschiedenen Simulationen bei der Planung nützlich sein können.

Man kann deswegen auch nicht feststellen, ob eine Isolation des Inner Pipes günstig wäre. Denn die Austrittstemperaturen können mit unterschiedlichen Durchflüssen ziemlich stark variieren. Alle Simulationen bei der Modellierung 3 wurden nämlich mit einem konstanten Durchfluss von 0.0832 m/s (was 10 m³/h Durchflussmenge entspricht) während der Aktivitätsperioden berechnet.

Um verträgliche Austrittstemperaturen zu simulieren sollten auch bessere Daten über die spezifische Wärmekapazität des umgebenden Gesteins, der Hinterfüllung und der Rohre und über die Wärmeleitfähigkeit der Rohre zu Verfügung stehen.

Überblick

In dieser Arbeit wurden zwei (Grund-)Gittern aufgebaut. Die Erstellung eines Gitters, das als Ausgangsbasis der verschiedenen Modellierungen und Berechnungen dienen muss, ist zeitaufwendig. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Passagen für den Aufbau eines Gitters und für die Simulation eine Erdwärmesonde aufgelistet werden.

Bei der Zeichnung des Gitters im AUTOCAD soll nur ein Layer benutzt werden, d.h. die Materialeigenschaften der verschiedenen Maschen werden nach der Überprüfung der Konsistenz des gesamten Gitters zugeteilt. Die 1D-Elemente werden nach dieser Überprüfung in der Mitte der Innen- und Aussenrohre eingezeichnet. Nach der Zeichnung der Linienelementen werden auch die Randbedingungen festgestellt. Mit diesem Gitter soll dann die Modellsensitivität durchgeführt werden. Dieser Teil der Arbeit soll minutiös verlaufen, denn mit diesen verschiedenen Tests kann man erkennen, ob das Gitter schon genügend gut aufgebaut ist. Nachdem man diese Tests erledigt hat, sollten man im Besitz von diesen wichtigen Informationen sein:

- Minimale horizontale Ausdehnung (normalerweise 10x bis 20x der Tiefe der Erdwärmesonde)
- Minimale vertikale Ausdehnung (normalerweise 2x der Tiefe der Erdwärmesonde)
- Einfluss der Maschengrösse (genügt das Grundgitter oder ist die Simulation mit einer Verfeinerung des Grundgitters vernünftiger?)
- Ideale Zeitdiskretisierung
- Einfluss der Verteilung sowie der Dauer der Ab- und Anschaltzyklen
- Verfeinerung der Zeitdiskretisierung bei der An- bzw. Abschaltung der Sonde ist nötig?
- Fliessgeschwindigkeiten in den Rohren

Nachdem man die Modellsensitivität erledigt hat, soll man das Temperaturverlauf in der Bohrung überprüfen. Dies kann nur dann stattfinden, wenn man im Besitz von verträglichen Bohrloch-Messdaten ist, d.h. die Formationstemperatur muss bekannt sein.

Mit der Formationstemperatur kann das Modell kalibriert werden. Dies kann beispielweise durch die Änderung des Wärmeflusses erfolgen, vor allem wenn die Parameter des umgebenden Gestein verträgliche Werte sind.

Nach der Kalibrierung können die verschiedenen Simulationen gestartet werden.

Die Art der Simulation ist von den vorhandenen Messdaten abhängig. Wenn man im Besitz von einer grossen Datenmenge (s. Teil I dieser Arbeit) ist, kann man zuerst eine grobe Modellierung erstellen, die dann als Anfangsbedingung für eine feinere Modellierung dienen wird, vor allem wenn die Messdaten sehr unregelmässig sind. Bei dieser groben Modellierung soll aber die Durchflussmenge und die Aktivitätszeit der Sonde ungefähr stimmen. Die Anfangsbedingungen sind nämlich sehr wichtig, denn diese widerspiegeln das Verfahren der Erdwärmesonde (d.h. wie gross ist die Belastung dieser Anlage während des vorhergehenden Zeitschnittes auf dem umgebenden Gestein).

Die Modellierung von einer geplanten Anlage muss hingegen die Berechnung des gesamten Wertespektrums einschliessen. Diese Werte können bei der Planung der Anlage behilflich sein.

Symbole

Wichtige Indizes:

f	Index für fluide Phase
in	Eintritt
out	Austritt
r	Index für Rohr
s	Index für feste Phase
s1	Index für erstes Element mit gemeinsamer Grenzfläche
s2	Index für zweites Element mit gemeinsamer Grenzfläche

Lateinische Symbole:

A	Austauschfläche, $[A] = \text{m}^2$
c	Wärmekapazität, $[c] = \text{J/K}$
c_p	spezifische Wärmekapazität, $[c_p] = \text{J/kgK}$
d	Rohrdurchmesser, $[d] = \text{m}$
C_1, C_2	frei wählbare Variablen
f	Quellenterm
g	Erdbeschleunigung, $[g] = \text{m/s}^2$
G	Geothermischer Gradient, $[G] = \text{K/m}$
h	Wärmeübergangskoeffizient, $[h] = \text{W/m}^2\text{K}$
K	hydraulische Leitfähigkeit, $[K] = \text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$
M	ursprünglicher Wert der Randbedingung
N	neuer Wert der Randbedingung
Nu	Nusseltzahl, dimensionslos
p	Druck, $[p] = \text{Pa}$
q	1-D Wärmefluss, $[q] = \text{W/m}^2$
q_{geo}	Geothermischer Wärmefluss, $[q_{\text{geo}}] = \text{W/m}^2$
x	horizontale Abstand vom Sondenzentrum, $[x] = \text{m}$
R	thermischer Widerstand, $[R] = \text{m}^2\text{K/W}$
R_{tot}	gesamter thermische Widerstand des Innenrohres, $[R_{\text{tot}}] = \text{m}^2\text{K/W}$
Re	Reynoldszahl, dimensionslos
S	spezifischer Speicherkoeffizient, $[S] = 1/\text{Pa}$
t	Zeit, $[t] = \text{s}$
T	Temperatur, $[T] = \text{K}$
T_0	Oberflächentemperatur, $[T_0] = \text{°C}$
T_1, T_2	Randtemperaturen des Elementes, $[T_1, T_2] = \text{K}$
T_f	Temperatur der flüssigen Phase, $[T_f] = \text{K}$
T_s	Temperatur der festen Phase, $[T_s] = \text{K}$
T_{in}	Eintrittstemperatur in der Sonde, $[T_{\text{in}}] = \text{°C}$
T_{out}	Austrittstemperatur in der Sonde, $[T_{\text{out}}] = \text{°C}$
Q	Durchflussrate am Sondenanfang, $[Q] = \text{m}^3/10\text{min}$
z	Tiefe $[z] = \text{m}$

Griechische Symbole:

ΔT	Temperaturunterschied, $[\Delta T] = \text{K}$
Δx	Länge eines Elementes in Flussrichtung, $[\Delta x] = \text{m}$
λ	Wärmeleitfähigkeit, $[\lambda] = \text{W/mK}$
λ_{tot}	gesamte Wärmeleitfähigkeit des Innenrohres, $[\lambda_{\text{tot}}] = \text{W/mK}$
λ'	Angepasste Wärmeleitfähigkeit, $[\lambda'] = \text{W/mK}$
v_f	Advektionsgeschwindigkeit, $[v_f] = \text{m/s}$
ρ	Dichte, $[\rho] = \text{kg/m}^3$
ρ_{trans}	thermische Leistung durch den Wärmeübergang, $[\rho_{\text{trans}}] = \text{W}$
∇T	Temperaturgradient, $[\nabla T] = \text{K/m}$

Literaturverzeichnis

- BINER M. (1995): Numerische Modellsimulationen zur Dimensionierung und Versuchsplanung einer Erdwärmesonden-Testanlage, Diplomarbeit an der Abteilung für Umweltnaturwissenschaften der ETHZ.
- BIRD R. B., STEWART W.E. und LIGHTFOOT E. N. (1960): Transport Phenomena, Wiley International Edition, New York, Kapitel 2.3 und 2.4, S. 42-54.
- BURKART R., HOPKIRK R. J., EUGSTER W. J. und RYBACH L. (1989): Erdwärmesonden-Heizanlagen: Durch Messungen und Berechnungen bestimmte Auslegungs- und Betriebsgrößen, Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Studie Nr. 46.
- BUSSLINGER A. (1994): Numerische Modellierung einer Erdwärmesonden-Testanlage, Diplomarbeit an der Abteilung für Erdwissenschaften der ETHZ.
- ESKILSON P. (1987): Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- EUGSTER W. J. (1991): Erdwärmesonden – Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund, Diss. ETHZ Nr. 9524.
- EUGSTER W. J. und FÜGLISTER H. (1997): Tiefenerdwärmesonde Weggis 1, Schlussbericht, Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft.
- FORSCHUNGSGRUPPE GEOTHERMIK UND RADIOMETRIE (2000): Geothermie-Statistik Schweiz 1990-1999, Schlussbericht, Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, DIS Projekt-Nr. 24843, DIS Vertrag-Nr. 74986.
- GEOFORM AG (1994): Geothermiebohrung Weggis, Schlussbericht Geologie/ Geophysik/ Bohrtechnik, Im Auftrag des Bundesamt für Energiewirtschaft, Nr. gf-138-12.
- GREBER E. ET AL (1996): Geothermische Eigenschaften des Molassebeckens (Pilotstudie-Wärmeleitfähigkeit), Schlussbericht, Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft.
- HELLSTRÖM G. (1991): Ground Heat Storage: Thermal Analyses of Duct Storage Systems, Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, Kapitel 7, S. 37-72.
- HOPKIRK R. J., STADLER T. J. und EUGSTER W. J. (1994): Tiefenerdwärmesonde Weggis, Zwischenbericht, Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und PSEL.

- KOHL T. (1992): Modellsimulation gekoppelter Vorgänge beim Wärmeentzug aus heissem Tiefengestein, Diss. ETHZ Nr. 9802.
- KOHL T. (1999): FRACTure (V.3.1.) Finite Element Program with WinFra (V. 051) Mesh Generator. Internes Manual ETHZ.
- LEU W. ET AL (1999): Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich bis 500 m). Datenbank für Wärmeleitfähigkeit, Gesteinsdichte und Porosität, Schlussbericht, Programm Geothermie, Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, April 1999.
- MARAINI S. (2000): Vergleich von Software zur Dimensionierung von Erdwärmesonden-Anlagen, Diplomarbeit an der Abt. für Erdwissenschaften der ETH Zürich.
- OEKOPLAN AG (1998): Messbericht Erdwärme-Tiefensonde, 1. Jahresbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern.
- RYBACH L. und HOPKIRK J. (1995): Shallow and deep Borehole Heat Exchangers – Achievements and Prospects, World Geothermal Congress, Florence.
- SALTON M. (1999): Untersuchungen zum Verhalten von Erdwärmesonden, Diplomarbeit an der Abt. für Erdwissenschaften der ETH Zürich.

Anhang A

Im Anhang A ist ein Extrakt aus dem Input.dat-File für die Modellierung 1 (s. Abschnitt 11.1.). Für die Erstellung dieses Input.dat-Files wurde das Grundgitter benutzt.

```

0
ein Eingabe File das von WinFra 0.59g 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
*    125     2       3       977     2       2         3         85
* LOESUNGSALGORITHMUS
*   ipcg     isym     ifact   itmax   tol
*     1     1       25     50000  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         0         0         1         0
*   3     13        0         0         1       86400
*   4     1         0         0         1       86399
*   5     1         0         0         1         1
*   6     3         0         0         1       86400
*   7     1         0         0         1       86399
*   8     1         0         0         1         1
*   9     22        0         0         1       86400
*  10     1         0         0         1       86399
*  11     1         0         0         1         1
*  12     6         0         0         1       86400
*  13     1         0         0         1       86399
*  14     1         0         0         1         1
*  15     29        0         0         1       86400
*  16     1         0         0         1       86399
*  17     1         0         0         1         1
*  18     1         0         0         1       86399
*  19     1         0         0         1         1
*  20     27        0         0         1       86400
*  21     1         0         0         1       86399
*  22     1         0         0         1         1
*  23     2         0         0         1       86400
*  24     1         0         0         1       86399
*  25     1         0         0         1         1
*  26     26        0         0         1       86400
*  27     1         0         0         1       86399
*  28     1         0         0         1         1
*  29     1         0         0         1       86399
*  30     1         0         0         1         1
*  31     29        0         0         1       86400
*  32     1         0         0         1       86399
*  33     1         0         0         1         1
*  34     1         0         0         1       86399
*  35     1         0         0         1         1
*  36     29        0         0         1       86400
*  37     1         0         0         1       86399
*  38     1         0         0         1         1
*  39     18        0         0         1       86400
*  40     1         0         0         1       86399
*  41     1         0         0         1         1
*  42     11        0         0         1       86400
*  43     1         0         0         1       86399
*  44     1         0         0         1         1
*  45     11        0         0         1       86400
*  46     1         0         0         1       86399
*  47     1         0         0         1         1
*  48     18        0         0         1       86400
*  49     1         0         0         1       86399
*  50     1         0         0         1         1
*  51     5         0         0         1       86400
*  52     1         0         0         1       86399
*  53     1         0         0         1         1
*  54     24        0         0         1       86400
*  55     1         0         0         1       86399
*  56     1         0         0         1         1
*  57     5         0         0         1       86400
*  58     1         0         0         1       86399

```

59	1	0	0	1	1				
60	24	0	0	1	86400				
61	1	0	0	1	86399				
62	1	0	0	1	1				
63	17	0	0	1	86400				
64	1	0	0	1	86399				
65	1	0	0	1	1				
66	11	0	0	1	86400				
67	1	0	0	1	86399				
68	1	0	0	1	1				
69	16	0	0	1	86400				
70	1	0	0	1	86399				
71	1	0	0	1	1				
72	13	0	0	1	86400				
73	1	0	0	1	86399				
74	1	0	0	1	1				
75	29	0	0	1	86400				
76	1	0	0	1	86399				
77	1	0	0	1	1				
78	30	0	0	1	86400				
79	1	0	0	1	86399				
80	1	0	0	1	1				
81	30	0	0	1	86400				
82	1	0	0	1	86399				
83	1	0	0	1	1				
84	18	0	0	1	86400				
85	1	0	0	1	86399				
86	1	0	0	1	1				
87	30	0	0	1	86400				
88	1	0	0	1	86399				
89	1	0	0	1	1				
90	22	0	0	1	86400				
91	1	0	0	1	86399				
92	1	0	0	1	1				
93	6	0	0	1	86400				
94	1	0	0	1	86399				
95	1	0	0	1	1				
96	18	0	0	1	86400				
97	1	0	0	1	86399				
98	1	0	0	1	1				
99	11	0	0	1	86400				
100	1	0	0	1	86399				
101	1	0	0	1	1				
102	6	0	0	1	86400				
103	1	0	0	1	86399				
104	1	0	0	1	1				
105	22	0	0	1	86400				
106	1	0	0	1	86399				
107	1	0	0	1	1				
108	6	0	0	1	86400				
109	1	0	0	1	86399				
110	1	0	0	1	1				
111	23	0	0	1	86400				
112	1	0	0	1	86399				
113	1	0	0	1	1				
114	3	0	0	1	86400				
115	1	0	0	1	86399				
116	1	0	0	1	1				
117	26	0	0	1	86400				
118	1	0	0	1	86399				
119	1	0	0	1	1				
120	20	0	0	1	86400				
121	1	0	0	1	86399				
122	1	0	0	1	1				
123	8	0	0	1	86400				
124	1	0	0	1	86399				
125	1	0	0	1	1				
* KOPPLUNGSSEQUENZEN HYDRAULIK:									
*	n	nthyd	niter	alpha	beta	gamma	iterj	relaxj	epsil
	1	0	1	0	1	9.0E-01	100	8.0E-01	1.0E-06
	2	-1	1	0	1	9.0E-01	100	8.0E-01	1.0E-06
	3	0	1	0	1	9.0E-01	100	8.0E-01	1.0E-06
	4	0	1	0	1	9.0E-01	100	8.0E-01	1.0E-06
	5	-1	1	0	1	9.0E-01	100	8.0E-01	1.0E-06
	6	0	1	0	1	9.0E-01	100	8.0E-01	1.0E-06
	7	0	1	0	1	9.0E-01	100	8.0E-01	1.0E-06
	.								
	.								
	.								
	125	0	1	0	1	9.0E-01	100	8.0E-01	1.0E-06
* KOPPLUNGSSEQUENZEN THERMIK:									
*	n	nttherm	niter	alpha	beta	gamma	iterj	relaxj	epsil
	1	-1	1	0	1	9.0E-01	10	8.0E-01	1.0E-06
	2	1	1	0	1	1.00000	10	8.0E-01	1.0E-06
	3	1	1	0	1	1.00000	10	8.0E-01	1.0E-06
	4	1	1	0	1	1.00000	10	8.0E-01	1.0E-06
	5	1	1	0	1	1.00000	10	8.0E-01	1.0E-06

```

6          1          1          0          1  1.00000          10  8.0E-01  1.0E-06
7          1          1          0          1  1.00000          10  8.0E-01  1.0E-06
.
.
.
125        1          1          0          1  1.00000          10  8.0E-01  1.0E-06
* MONITORKNOTEN
*   Knr      dof      Spez
   977        2          1
   6          2          1
***** WINFRA ERSTELLT NOCH KEINE MONITORKNOTEN ! *****
* KNOTENKOORDINATEN
*   Knr.      gen  x1-Koord  x2-Koord  x3-Koord
   1          0  0.0205000  0.0000000  0.0000000  1.0000000  100.0000000  1.0000000
   2          0  0.0205000-0.5000000  0.0000000
   3          0  0.0365000-0.5000000  0.0000000
   4          0  0.0365000  0.0000000  0.0000000
   5          0  0.0582000-0.5000000  0.0000000
   6          0  0.0582000  0.0000000  0.0000000
   7          0  0.0799000-0.5000000  0.0000000
   8          0  0.0799000  0.0000000  0.0000000
   9          0  0.0889000-0.5000000  0.0000000
  10         0  0.0889000  0.0000000  0.0000000
.
.
.
  977         0  0.0000000  0.0000000  0.0000000
   0          0          0          0          0
* RANDBEDINGUNGEN
*   Knr      Knr      Ink      dof1      dof2      ...
   6          6          1          0          1
  22         22          1          0          1
 507        507          1          0          1
 576        576          1          0          1
 691        691          1          0          1
 918        918          1          0          1
 929        929          1          0          1
 938        938          1          0          1
 953        953          1          0          1
 954        954          1          0          1
 959        959          1          0          1
 977        977          1          1          0
   0          0          0          0          0
* KRAFTVEKTOREN - GROESSE DER RANDBEDINGUNG
*   Knr      gen      dof1      dof2      ...
   22         0          0          9.2
  507         0          0          9.2
  576         0          0          9.2
  691         0          0          9.2
  918         0          0          9.2
  929         0          0          9.2
  938         0          0          9.2
  953         0          0          9.2
  954         0          0          9.2
  959         0          0          9.2
   0          0          0          0
* KRAFTVEKTOREN 2
   6          0          0          30
   0          0          0          0
* BELASTUNGSFUNKTION NR. 1
*   Zeit      Wert1
   0          1          1          0          0
 1209599     1          1          0          0
 1209600     1          1          0          0
 1555199     1          1          0          0
 1555200     1          1          0          0
 3542399     1          1          0          0
 3542400     1          1          0          0
 4147199     1          1          0          0
 4147200     1          1          0          0
 6739199     1          1          0          0
 6739200     1          1          0          0
 6825599     1          1          0          0
 6825600     1          1          0          0
 9244799     1          1          0          0
 9244800     1          1          0          0
 9503999     1          1          0          0
 9504000     1          1          0          0
11836799     1          1          0          0
11836800     1          1          0          0
11923199     1          1          0          0
11923200     1          1          0          0
14515199     1          1          0          0
14515200     1          1          0          0
14601599     1          1          0          0
14601600     1          1          0          0
17193599     1          1          0          0

```

17193600	1	1	0	0
18835199	1	1	0	0
18835200	1	1	0	0
19871999	1	1	0	0
19872000	1	1	0	0
20908799	1	1	0	0
20908800	1	1	0	0
22550399	1	1	0	0
22550400	1	1	0	0
23068799	1	1	0	0
23068800	1	1	0	0
25228799	1	1	0	0
25228800	1	1	0	0
25747199	1	1	0	0
25747200	1	1	0	0
27907199	1	1	0	0
27907200	1	1	0	0
29462399	1	1	0	0
29462400	1	1	0	0
30499199	1	1	0	0
30499200	1	1	0	0
31967999	1	1	0	0
31968000	1	1	0	0
33177599	1	1	0	0
33177600	1	1	0	0
35769599	1	1	0	0
35769600	1	1	0	0
38447999	1	1	0	0
38448000	1	1	0	0
41126399	1	1	0	0
41126400	1	1	0	0
42767999	1	1	0	0
42768000	1	1	0	0
45446399	1	1	0	0
45446400	1	1	0	0
47433599	1	1	0	0
47433600	1	1	0	0
48038399	1	1	0	0
48038400	1	1	0	0
49679999	1	1	0	0
49680000	1	1	0	0
50716799	1	1	0	0
50716800	1	1	0	0
51321599	1	1	0	0
51321600	1	1	0	0
53308799	1	1	0	0
53308800	1	1	0	0
53913599	1	1	0	0
53913600	1	1	0	0
55987199	1	1	0	0
55987200	1	1	0	0
56332799	1	1	0	0
56332800	1	1	0	0
58665599	1	1	0	0
58665600	1	1	0	0
60479999	1	1	0	0
60480000	1	1	0	0
61257599	1	1	0	0
61257600	1	1	0	0
* BELASTUNGSFUNKTION NR. 2: für Injektionstemperatur				
* Zeit	Wert1			
0	1	1	0	8.93
1209599	1	1	0	8.93
1209600	1	1	0	8.93
1555199	1	1	0	8.93
1555200	1	1	0	8.21
3542399	1	1	0	8.21
3542400	1	1	0	8.21
4147199	1	1	0	8.21
4147200	1	1	0	10.38
6739199	1	1	0	10.38
6739200	1	1	0	10.38
6825599	1	1	0	10.38
6825600	1	1	0	12.38
9244799	1	1	0	12.38
9244800	1	1	0	12.38
9503999	1	1	0	12.38
9504000	1	1	0	10.62
11836799	1	1	0	10.62
11836800	1	1	0	10.62
11923199	1	1	0	10.62
11923200	1	1	0	9.52
14515199	1	1	0	9.52
14515200	1	1	0	9.52
14601599	1	1	0	9.52
14601600	1	1	0	9.14
17193599	1	1	0	9.14

17193600	1	1	0	8.75
18835199	1	1	0	8.75
18835200	1	1	0	8.75
19871999	1	1	0	8.75
19872000	1	1	0	9.85
20908799	1	1	0	9.85
20908800	1	1	0	9.85
22550399	1	1	0	9.85
22550400	1	1	0	11.05
23068799	1	1	0	11.05
23068800	1	1	0	11.05
25228799	1	1	0	11.05
25228800	1	1	0	7.02
25747199	1	1	0	7.02
25747200	1	1	0	7.02
27907199	1	1	0	7.02
27907200	1	1	0	10.18
29462399	1	1	0	10.18
29462400	1	1	0	10.18
30499199	1	1	0	10.18
30499200	1	1	0	8.01
31967999	1	1	0	8.01
31968000	1	1	0	8.01
33177599	1	1	0	8.01
33177600	1	1	0	7.28
35769599	1	1	0	7.28
35769600	1	1	0	7.16
38447999	1	1	0	7.16
38448000	1	1	0	6.56
41126399	1	1	0	6.56
41126400	1	1	0	6.20
42767999	1	1	0	6.20
42768000	1	1	0	6.59
45446399	1	1	0	6.59
45446400	1	1	0	6.38
47433599	1	1	0	6.38
47433600	1	1	0	6.38
48038399	1	1	0	6.38
48038400	1	1	0	7.04
49679999	1	1	0	7.04
49680000	1	1	0	7.04
50716799	1	1	0	7.04
50716800	1	1	0	7.42
51321599	1	1	0	7.42
51321600	1	1	0	7.42
53308799	1	1	0	7.42
53308800	1	1	0	7.79
53913599	1	1	0	7.79
53913600	1	1	0	7.79
55987199	1	1	0	7.79
55987200	1	1	0	8.54
56332799	1	1	0	8.54
56332800	1	1	0	8.54
58665599	1	1	0	8.54
58665600	1	1	0	5.53
60479999	1	1	0	5.53
60480000	1	1	0	5.53
61257599	1	1	0	5.53
61257600	1	1	0	5.94
* BELASTUNGSFUNKTION NR. 3: für Ein- und Abschaltung der Pumpe				
* Zeit	Wert1			
0	0.06975	1	0	0
1209599	0.06975	1	0	0
1209600	0	1	0	0
1555199	0	1	0	0
1555200	0.05412	1	0	0
3542399	0.05412	1	0	0
3542400	0	1	0	0
4147199	0	1	0	0
4147200	0.08615	1	0	0
6739199	0.08615	1	0	0
6739200	0	1	0	0
6825599	0	1	0	0
6825600	0.10166	1	0	0
9244799	0.10166	1	0	0
9244800	0	1	0	0
9503999	0	1	0	0
9504000	0.08938	1	0	0
11836799	0.08938	1	0	0
11836800	0	1	0	0
11923199	0	1	0	0
11923200	0.09308	1	0	0
14515199	0.09308	1	0	0
14515200	0	1	0	0
14601599	0	1	0	0
14601600	0.10087	1	0	0
17193599	0.10087	1	0	0

17193600	0.08857	1	0	0				
18835199	0.08857	1	0	0				
18835200	0	1	0	0				
19871999	0	1	0	0				
19872000	0.11327	1	0	0				
20908799	0.11327	1	0	0				
20908800	0	1	0	0				
22550399	0	1	0	0				
22550400	0.12078	1	0	0				
23068799	0.12078	1	0	0				
23068800	0	1	0	0				
25228799	0	1	0	0				
25228800	0.12341	1	0	0				
25747199	0.12341	1	0	0				
25747200	0	1	0	0				
27907199	0	1	0	0				
27907200	0.10225	1	0	0				
29462399	0.10225	1	0	0				
29462400	0	1	0	0				
30499199	0	1	0	0				
30499200	0.09908	1	0	0				
31967999	0.09908	1	0	0				
31968000	0	1	0	0				
33177599	0	1	0	0				
33177600	0.09687	1	0	0				
35769599	0.09687	1	0	0				
35769600	0.10811	1	0	0				
38447999	0.10811	1	0	0				
38448000	0.10883	1	0	0				
41126399	0.10883	1	0	0				
41126400	0.10916	1	0	0				
42767999	0.10916	1	0	0				
42768000	0.10657	1	0	0				
45446399	0.10657	1	0	0				
45446400	0.10004	1	0	0				
47433599	0.10004	1	0	0				
47433600	0	1	0	0				
48038399	0	1	0	0				
48038400	0.09674	1	0	0				
49679999	0.09674	1	0	0				
49680000	0	1	0	0				
50716799	0	1	0	0				
50716800	0.13802	1	0	0				
51321599	0.13802	1	0	0				
51321600	0	1	0	0				
53308799	0	1	0	0				
53308800	0.14157	1	0	0				
53913599	0.14157	1	0	0				
53913600	0	1	0	0				
55987199	0	1	0	0				
55987200	0.18206	1	0	0				
56332799	0.18206	1	0	0				
56332800	0	1	0	0				
58665599	0	1	0	0				
58665600	0.08726	1	0	0				
60479999	0.08726	1	0	0				
60480000	0	1	0	0				
61257599	0	1	0	0				
61257600	0	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	966	10	2	0	0	0	0	4
* nsurf1	ntran1	nvol1	nsout1	lfsur1	lfvol1	ibuoy	ilinh	
0	0	0	0	1	1	0	0	
* nsurf2	ntran2	nvol2	nsout2	lfsur2	lfvol2	iadv	nthema	ilint
8	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					
* Nicht isol. Förderrohr								
9	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1		
	0	0	0	0				
9	5.30E-01	5.30E-01	5.30E-01	3540000	3540000	0	0	1
	0	0	0	0				
* Isolierter Förderrohr								
1	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1		
	0	0	0	0				
1	4.75E-02	4.75E-02	4.75E-02	2210719	2210719	0	0	1
	0	0	0	0				
* Sondenfluid								

2	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1			
	0	0	0	0	0				
2	10	6.0E-01	6.0E-01	4180000	4180000	0	0	1	
	0	0	0	0	0				
* Auss. Verrohrung oben									
3	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1			
	0	0	0	0	0				
3	4.51E-01	4.51E-01	4.51E-01	3540000	3540000	0	0	1	
	0	0	0	0	0				
* Auss. Verrohrung unten									
10	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	1				
	0	0	0	0	0				
10	4.66E-01	4.66E-01	4.66E-01	3540000	3540000	0	0	1	
	0	0	0	0	0				
* Hinterfüllung									
6	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1			
	0	0	0	0	0				
6	2	2	2	1600000	1600000	0	0	1	
	0	0	0	0	0				
* Tech. Zwischenrohr									
7	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1			
	0	0	0	0	0				
7	50	50	50	3540000	3540000	0	0	1	
	0	0	0	0	0				
* Gestein									
8	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1			
	0	0	0	0	0				
8	2.33	2.33	2.33	2080000	2080000	0	0	1	
	0	0	0	0	0				
* Ankerrohrtour									
5	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1			
	0	0	0	0	0				
5	50	50	50	3540000	3540000	0	0	1	
	0	0	0	0	0				
* Wasser									
4	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1			
	0	0	0	0	0				
4	6.0E-01	6.0E-01	6.0E-01	4180000	4180000	0	0	1	
	0	0	0	0	0				
* GRAVITATION									
0	1	0							
* KNOTEN-ELEMENT-ZUORDNUNG									
* El-nr Mat ien ...									
1	1	1	2	3	4	0			
2	2	4	3	5	6	0			
3	2	6	5	7	8	0			
4	3	8	7	9	10	0			
5	4	10	9	11	12	0			
6	5	12	11	13	14	0			
7	6	14	13	15	16	0			
8	7	16	15	17	18	0			
9	6	18	17	19	20	0			
10	8	20	19	21	22	0			
.									
.									
.									
966	8	975	974	976	976	0			
0	0	0	0	0	0	0			
* OBERFLAECHENKRAEFTE									
* Eln Seite Kraft Kraft ...									
717	1	9.0E-02	9.0E-02						
733	4	9.0E-02	9.0E-02						
812	2	9.0E-02	9.0E-02						
816	2	9.0E-02	9.0E-02						
913	2	9.0E-02	9.0E-02						
920	2	9.0E-02	9.0E-02						
934	2	9.0E-02	9.0E-02						
938	2	9.0E-02	9.0E-02						
* MONITORELEMENTE									
* Eln Intp Komp.									
***** WINFRA ERSTELLT NOCH KEINE MONITORELEMENTE ! *****									
* HYDRO-THERM. ELEMENTGRUPPE NR. 2									
* ELEMENTKONTROLLE									
* ntype numel numat iopt istprt nicode imass impexp nen									
41	104	5	2	0	0	0			2
* nsurf1 ntran1 nvolf1 nsout1 lfsur1 lfvoll1 ibuoy ilinh									
1	0	0	3	3	2	0			0
* nsurf2 ntran2 nvolf2 nsout2 lfsur2 lfvoll2 iadv nthema ilint									
0	0	0	0	1	1	11			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									
* LinElem. Aufwärts oben									
1	1	1	1	0	0	1.32E-03			
	0	0	0	0	0				

```

1  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000  0  0  1.32E-03
0  0  0  0  0  0  0  0
* LinElem. Aufwärts unten
3  1  1  1  0  0  1.90E-03
0  0  0  0  0  0
3  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000  0  0  1.90E-03
0  0  0  0  0  0
* LinElem. Abwärts unten
5  1  1  1  0  0  9.56E-03
0  0  0  0  0  0
5  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000  0  0  9.56E-03
0  0  0  0  0  0
* LinElem. Abwärts oben
2  1  1  1  0  0  1.59E-02
0  0  0  0  0  0
2  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000  0  0  1.59E-02
0  0  0  0  0  0
* LinElem. Horizontal
4  1  1  1  0  0  1.54E-02
0  0  0  0  0  0
4  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000  0  0  1.54E-02
0  0  0  0  0  0
* GRAVITATION
0  1  0
* KNOTEN-ELEMENT-ZUORDNUNG
* El-nr Mat ien ...
1  1  977  26  0
2  1  26  27  0
3  1  27  42  0
4  1  42  47  0
5  1  47  57  0
6  1  57  73  0
7  1  73  77  0
8  1  77  93  0
9  1  93  102  0
10  1  102  107  0
.
.
104  2  32  5  0
0  0  0  0  0
* OBERFLAECHEKRAEFTE
* Eln Seite Kraft Kraft ...
30  2  1
* MONITORELEMENTE
* Eln Intp Komp.
30  1  1
30  1  2
30  1  3
***** WINFRA ERSTELLT NOCH KEINE MONITORELEMENTE ! *****
+end

```

Anhang B

Extrakt aus dem Input.dat-File für die Modellierung 2 (s. Abschnitt 12.1.).

```

0
ein Eingabe File das von WinFra 0.59g erstellt wurde
* AUSFUEHRUNGSKONTROLLE
*   iexec   iacode   idebug   irank   ireadr   iptin   iptut   iprtec
   1         0         0         0         1         0         0         1
* ALLGEMEINE DIMENSIONIERUNG
*   numseq   ndhist   nsd       numnp   ngdof   nlvect   nltftn   nptslf
  152         2         3       977         2         2         3       101
* LOESUNGALGORITHMUS
*   ipcg     isym     ifact     itmax     tol
   1         1         25     50000   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         0         0         1         0
   3         50        0         0         1         600
   4         1         0         0         1         599
   5         1         0         0         1         1
   6         70        0         0         1         600
   7         1         0         0         1         599
   8         1         0         0         1         1
   9         98        0         0         1         600
  10         1         0         0         1         599
  11         1         0         0         1         1
  12         37        0         0         1         600
  13         1         0         0         1         599
  14         1         0         0         1         1
  15         102       0         0         1         600
  16         1         0         0         1         599
  17         1         0         0         1         1
  18         4         0         0         1         600
  19         1         0         0         1         599
  20         1         0         0         1         1
  21         121       0         0         1         600
  22         1         0         0         1         599
  23         1         0         0         1         1
  24         28        0         0         1         600
  25         1         0         0         1         599
  26         1         0         0         1         1
  27         127       0         0         1         600
  28         1         0         0         1         599
  29         1         0         0         1         1
  30         53        0         0         1         600
  31         1         0         0         1         599
  32         1         0         0         1         1
  33         62        0         0         1         600
  34         1         0         0         1         599
  35         1         0         0         1         1
  36         91        0         0         1         600
  37         1         0         0         1         599
  38         1         0         0         1         1
  39         51        0         0         1         600
  40         1         0         0         1         599
  41         1         0         0         1         1
  42         107       0         0         1         600
  43         1         0         0         1         599
  44         1         0         0         1         1
  45         42        0         0         1         600
  46         1         0         0         1         599
  47         1         0         0         1         1
  48         89        0         0         1         600
  49         1         0         0         1         599
  50         1         0         0         1         1
  51         786       0         0         1         600
  52         1         0         0         1         599
  53         1         0         0         1         1
  54         35        0         0         1         600
  55         1         0         0         1         599
  56         1         0         0         1         1
  57         111       0         0         1         600
  58         1         0         0         1         599
  59         1         0         0         1         1
  60         70        0         0         1         600
  61         1         0         0         1         599
  62         1         0         0         1         1

```

63	68	0	0	1	600
64	1	0	0	1	599
65	1	0	0	1	1
66	106	0	0	1	600
67	1	0	0	1	599
68	1	0	0	1	1
69	35	0	0	1	600
70	1	0	0	1	599
71	1	0	0	1	1
72	68	0	0	1	600
73	1	0	0	1	599
74	1	0	0	1	1
75	57	0	0	1	600
76	1	0	0	1	599
77	1	0	0	1	1
78	114	0	0	1	600
79	1	0	0	1	599
80	1	0	0	1	1
81	24	0	0	1	600
82	1	0	0	1	599
83	1	0	0	1	1
84	50	0	0	1	600
85	1	0	0	1	599
86	1	0	0	1	1
87	238	0	0	1	600
88	1	0	0	1	599
89	1	0	0	1	1
90	70	0	0	1	600
91	1	0	0	1	599
92	1	0	0	1	1
93	80	0	0	1	600
94	1	0	0	1	599
95	1	0	0	1	1
96	74	0	0	1	600
97	1	0	0	1	599
98	1	0	0	1	1
99	93	0	0	1	600
100	1	0	0	1	599
101	1	0	0	1	1
102	6	0	0	1	600
103	1	0	0	1	599
104	1	0	0	1	1
105	6	0	0	1	600
106	1	0	0	1	599
107	1	0	0	1	1
108	40	0	0	1	600
109	1	0	0	1	599
110	1	0	0	1	1
111	53	0	0	1	600
112	1	0	0	1	599
113	1	0	0	1	1
114	127	0	0	1	600
115	1	0	0	1	599
116	1	0	0	1	1
117	24	0	0	1	600
118	1	0	0	1	599
119	1	0	0	1	1
120	66	0	0	1	600
121	1	0	0	1	599
122	1	0	0	1	1
123	83	0	0	1	600
124	1	0	0	1	599
125	1	0	0	1	1
126	76	0	0	1	600
127	1	0	0	1	599
128	1	0	0	1	1
129	77	0	0	1	600
130	1	0	0	1	599
131	1	0	0	1	1
132	15	0	0	1	600
133	1	0	0	1	599
134	1	0	0	1	1
135	115	0	0	1	600
136	1	0	0	1	599
137	1	0	0	1	1
138	61	0	0	1	600
139	1	0	0	1	599
140	1	0	0	1	1
141	67	0	0	1	600
142	1	0	0	1	599
143	1	0	0	1	1
144	94	0	0	1	600
145	1	0	0	1	599
146	1	0	0	1	1
147	47	0	0	1	600
148	1	0	0	1	599
149	1	0	0	1	1

```

150      246      0      0      1      600
151      1      0      0      1      599
152      1      0      0      1      1
* KOPPLUNGSSEQUENZEN HYDRAULIK:
*      n      nthyd      niter      alpha      beta      gamma      iterj      relaxj      epsil
1      0      1      0      1      9.0E-01      100      8.0E-01      1.0E-06
2      -1      1      0      1      9.0E-01      100      8.0E-01      1.0E-06
3      0      1      0      1      9.0E-01      100      8.0E-01      1.0E-06
4      0      1      0      1      9.0E-01      100      8.0E-01      1.0E-06
5      -1      1      0      1      9.0E-01      100      8.0E-01      1.0E-06
6      0      1      0      1      9.0E-01      100      8.0E-01      1.0E-06
7      0      1      0      1      9.0E-01      100      8.0E-01      1.0E-06
.
.
152      0      1      0      1      9.0E-01      100      8.0E-01      1.0E-06
* KOPPLUNGSSEQUENZEN THERMIK:
*      n      nttherm      niter      alpha      beta      gamma      iterj      relaxj      epsil
1      1      1      0      1      1.00000      10      8.0E-01      1.0E-06
2      1      1      0      1      1.00000      10      8.0E-01      1.0E-06
3      1      1      0      1      1.00000      10      8.0E-01      1.0E-06
4      1      1      0      1      1.00000      10      8.0E-01      1.0E-06
5      1      1      0      1      1.00000      10      8.0E-01      1.0E-06
6      1      1      0      1      1.00000      10      8.0E-01      1.0E-06
7      1      1      0      1      1.00000      10      8.0E-01      1.0E-06
.
.
152      1      1      0      1      1.00000      10      8.0E-01      1.0E-06
* MONITORKNOTEN
*      Knr      dof      Spez
977      2      1
6      2      1
***** WINFRA ERSTELLT NOCH KEINE MONITORKNOTEN ! *****
* KNOTENKOORDINATEN
*      Knr      gen      x1-Koord      x2-Koord      x3-Koord
1      0      0.0205000      0.0000000      0.0000000      1.0000000      100.0000000      1.0000000
2      0      0.0205000-0.5000000      0.0000000
3      0      0.0365000-0.5000000      0.0000000
4      0      0.0365000      0.0000000      0.0000000
5      0      0.0582000-0.5000000      0.0000000
6      0      0.0582000      0.0000000      0.0000000
7      0      0.0799000-0.5000000      0.0000000
8      0      0.0799000      0.0000000      0.0000000
9      0      0.0889000-0.5000000      0.0000000
10     0      0.0889000      0.0000000      0.0000000
.
.
977      0      0.0000000      0.0000000      0.0000000
0      0      0      0      0
* RANDBEDINGUNGEN
*      Knr      Knr      Ink      dof1      dof2      ...
6      6      1      0      1
22     22     1      0      1
507    507    1      0      1
576    576    1      0      1
691    691    1      0      1
918    918    1      0      1
929    929    1      0      1
938    938    1      0      1
953    953    1      0      1
954    954    1      0      1
959    959    1      0      1
977    977    1      1      0
0      0      0      0      0
* KRAFTVEKTOREN - GROESSE DER RANDBEDINGUNG
*      Knr      gen      dof1      dof2      ...
22     0      0      9.2
507    0      0      9.2
576    0      0      9.2
691    0      0      9.2
918    0      0      9.2
929    0      0      9.2
938    0      0      9.2
953    0      0      9.2
954    0      0      9.2
959    0      0      9.2
0      0      0      0
* KRAFTVEKTOREN 2
6      0      0      30
0      0      0      0
* BELASTUNGSFUNKTION NR. 1
*      Zeit      Wert1
0      1      1      0      0
30599  1      1      0      0
30600  1      1      0      0

```

73199	1	1	0	0
73200	1	1	0	0
132599	1	1	0	0
132600	1	1	0	0
155399	1	1	0	0
155400	1	1	0	0
217199	1	1	0	0
217200	1	1	0	0
220199	1	1	0	0
220200	1	1	0	0
293399	1	1	0	0
293400	1	1	0	0
310799	1	1	0	0
310800	1	1	0	0
387599	1	1	0	0
387600	1	1	0	0
419999	1	1	0	0
420000	1	1	0	0
457799	1	1	0	0
457800	1	1	0	0
512999	1	1	0	0
513000	1	1	0	0
544199	1	1	0	0
544200	1	1	0	0
608999	1	1	0	0
609000	1	1	0	0
634799	1	1	0	0
634800	1	1	0	0
688799	1	1	0	0
688800	1	1	0	0
1160999	1	1	0	0
1161000	1	1	0	0
1182599	1	1	0	0
1182600	1	1	0	0
1249799	1	1	0	0
1249800	1	1	0	0
1292399	1	1	0	0
1292400	1	1	0	0
1333799	1	1	0	0
1333800	1	1	0	0
1397999	1	1	0	0
1398000	1	1	0	0
1419599	1	1	0	0
1419600	1	1	0	0
1460999	1	1	0	0
1461000	1	1	0	0
1495799	1	1	0	0
1495800	1	1	0	0
1564799	1	1	0	0
1564800	1	1	0	0
1579799	1	1	0	0
1579800	1	1	0	0
1610399	1	1	0	0
1610400	1	1	0	0
1753799	1	1	0	0
1753800	1	1	0	0
1796399	1	1	0	0
1796400	1	1	0	0
1844999	1	1	0	0
1845000	1	1	0	0
1889999	1	1	0	0
1890000	1	1	0	0
1946399	1	1	0	0
1946400	1	1	0	0
1950599	1	1	0	0
1950600	1	1	0	0
1954799	1	1	0	0
1954800	1	1	0	0
1979399	1	1	0	0
1979400	1	1	0	0
2011799	1	1	0	0
2011800	1	1	0	0
2088599	1	1	0	0
2088600	1	1	0	0
2103599	1	1	0	0
2103600	1	1	0	0
2143799	1	1	0	0
2143800	1	1	0	0
2194199	1	1	0	0
2194200	1	1	0	0
2240399	1	1	0	0
2240400	1	1	0	0
2287199	1	1	0	0
2287200	1	1	0	0
2296799	1	1	0	0
2296800	1	1	0	0
2366399	1	1	0	0

2366400	1	1	0	0
2403599	1	1	0	0
2403600	1	1	0	0
2444399	1	1	0	0
2444400	1	1	0	0
2501399	1	1	0	0
2501400	1	1	0	0
2530199	1	1	0	0
2530200	1	1	0	0
2678399	1	1	0	0
2678400	1	1	0	0
* BELASTUNGSFUNKTION NR. 2: für Injektionstemperatur				
* Zeit	Wert1			
0	1	1	0	8.23
30599	1	1	0	8.23
30600	1	1	0	0
73199	1	1	0	0
73200	1	1	0	6.53
132599	1	1	0	6.53
132600	1	1	0	0
155399	1	1	0	0
155400	1	1	0	7.28
217199	1	1	0	7.28
217200	1	1	0	0
220199	1	1	0	0
220200	1	1	0	7.25
293399	1	1	0	7.25
293400	1	1	0	0
310799	1	1	0	0
310800	1	1	0	6.70
387599	1	1	0	6.70
387600	1	1	0	0
419999	1	1	0	0
420000	1	1	0	6.63
457799	1	1	0	6.63
457800	1	1	0	0
512999	1	1	0	0
513000	1	1	0	6.29
544199	1	1	0	6.29
544200	1	1	0	0
608999	1	1	0	0
609000	1	1	0	5.87
634799	1	1	0	5.87
634800	1	1	0	0
688799	1	1	0	0
688800	1	1	0	6.93
1160999	1	1	0	6.93
1161000	1	1	0	0
1182599	1	1	0	0
1182600	1	1	0	6.23
1249799	1	1	0	6.23
1249800	1	1	0	0
1292399	1	1	0	0
1292400	1	1	0	6.10
1333799	1	1	0	6.10
1333800	1	1	0	0
1397999	1	1	0	0
1398000	1	1	0	6.16
1419599	1	1	0	6.16
1419600	1	1	0	0
1460999	1	1	0	0
1461000	1	1	0	7.26
1495799	1	1	0	7.26
1495800	1	1	0	0
1564799	1	1	0	0
1564800	1	1	0	6.25
1579799	1	1	0	6.25
1579800	1	1	0	0
1610399	1	1	0	0
1610400	1	1	0	8.01
1753799	1	1	0	8.01
1753800	1	1	0	0
1796399	1	1	0	0
1796400	1	1	0	6.69
1844999	1	1	0	6.69
1845000	1	1	0	0
1889999	1	1	0	0
1890000	1	1	0	6.30
1946399	1	1	0	6.30
1946400	1	1	0	0
1950599	1	1	0	0
1950600	1	1	0	6.37
1954799	1	1	0	6.37
1954800	1	1	0	0
1979399	1	1	0	0
1979400	1	1	0	6.62
2011799	1	1	0	6.62

2011800	1	1	0	0
2088599	1	1	0	0
2088600	1	1	0	4.25
2103599	1	1	0	4.25
2103600	1	1	0	0
2143799	1	1	0	0
2143800	1	1	0	6.98
2194199	1	1	0	6.98
2194200	1	1	0	0
2240399	1	1	0	0
2240400	1	1	0	6.86
2287199	1	1	0	6.86
2287200	1	1	0	0
2296799	1	1	0	0
2296800	1	1	0	7.12
2366399	1	1	0	7.12
2366400	1	1	0	0
2403599	1	1	0	0
2403600	1	1	0	6.77
2444399	1	1	0	6.77
2444400	1	1	0	0
2501399	1	1	0	0
2501400	1	1	0	5.73
2530199	1	1	0	5.73
2530200	1	1	0	0
2678399	1	1	0	0
2678400	1	1	0	0
* BELASTUNGSFUNKTION NR. 3: für Ein- und Abschaltung der Pumpe				
* Zeit	Wert1			
0	0.09221	1	0	0
30599	0.09221	1	0	0
30600	0	1	0	0
73199	0	1	0	0
73200	0.08512	1	0	0
132599	0.08512	1	0	0
132600	0	1	0	0
155399	0	1	0	0
155400	0.09634	1	0	0
217199	0.09634	1	0	0
217200	0	1	0	0
220199	0	1	0	0
220200	0.09396	1	0	0
293399	0.09396	1	0	0
293400	0	1	0	0
310799	0	1	0	0
310800	0.09303	1	0	0
387599	0.09303	1	0	0
387600	0	1	0	0
419999	0	1	0	0
420000	0.09115	1	0	0
457799	0.09115	1	0	0
457800	0	1	0	0
512999	0	1	0	0
513000	0.09241	1	0	0
544199	0.09241	1	0	0
544200	0	1	0	0
608999	0	1	0	0
609000	0.08526	1	0	0
634799	0.08526	1	0	0
634800	0	1	0	0
688799	0	1	0	0
688800	0.08866	1	0	0
1160999	0.08866	1	0	0
1161000	0	1	0	0
1182599	0	1	0	0
1182600	0.08507	1	0	0
1249799	0.08507	1	0	0
1249800	0	1	0	0
1292399	0	1	0	0
1292400	0.08502	1	0	0
1333799	0.08502	1	0	0
1333800	0	1	0	0
1397999	0	1	0	0
1398000	0.08530	1	0	0
1419599	0.08530	1	0	0
1419600	0	1	0	0
1460999	0	1	0	0
1461000	0.08519	1	0	0
1495799	0.08519	1	0	0
1495800	0	1	0	0
1564799	0	1	0	0
1564800	0.08544	1	0	0
1579799	0.08544	1	0	0
1579800	0	1	0	0
1610399	0	1	0	0
1610400	0.09624	1	0	0
1753799	0.09624	1	0	0

1753800	0	1	0	0				
1796399	0	1	0	0				
1796400	0.09371	1	0	0				
1844999	0.09371	1	0	0				
1845000	0	1	0	0				
1889999	0	1	0	0				
1890000	0.08510	1	0	0				
1946399	0.08510	1	0	0				
1946400	0	1	0	0				
1950599	0	1	0	0				
1950600	0.08506	1	0	0				
1954799	0.08506	1	0	0				
1954800	0	1	0	0				
1979399	0	1	0	0				
1979400	0.08506	1	0	0				
2011799	0.08506	1	0	0				
2011800	0	1	0	0				
2088599	0	1	0	0				
2088600	0.08561	1	0	0				
2103599	0.08561	1	0	0				
2103600	0	1	0	0				
2143799	0	1	0	0				
2143800	0.08516	1	0	0				
2194199	0.08516	1	0	0				
2194200	0	1	0	0				
2240399	0	1	0	0				
2240400	0.08521	1	0	0				
2287199	0.08521	1	0	0				
2287200	0	1	0	0				
2296799	0	1	0	0				
2296800	0.08506	1	0	0				
2366399	0.08506	1	0	0				
2366400	0	1	0	0				
2403599	0	1	0	0				
2403600	0.09345	1	0	0				
2444399	0.09345	1	0	0				
2444400	0	1	0	0				
2501399	0	1	0	0				
2501400	0.08526	1	0	0				
2530199	0.08526	1	0	0				
2530200	0	1	0	0				
2678399	0	1	0	0				
2678400	0	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	966	10	2	0	0	0	0	4
* nsurf1	ntran1	nvolf1	nsout1	lfsur1	lfvol1	ibuoy	ilinh	
0	0	0	0	1	1	0	0	
* nsurf2	ntran2	nvolf2	nsout2	lfsur2	lfvol2	iadv	nthema	ilint
8	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					
* Nicht isol. Förderrohr								
9	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1		
	0	0	0	0				
9	5.30E-01	5.30E-01	5.30E-01	3540000	3540000	0	0	1
	0	0	0	0				
* Isolierter Förderrohr								
1	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1		
	0	0	0	0				
1	4.75E-02	4.75E-02	4.75E-02	2210719	2210719	0	0	1
	0	0	0	0				
* Sondenfluid								
2	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1		
	0	0	0	0				
2	10	6.0E-01	6.0E-01	4180000	4180000	0	0	1
	0	0	0	0				
* Äuss. Verrohrung oben								
3	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1		
	0	0	0	0				
3	4.51E-01	4.51E-01	4.51E-01	3540000	3540000	0	0	1
	0	0	0	0				
* Äuss. Verrohrung unten								
10	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	1			
	0	0	0	0				
10	4.66E-01	4.66E-01	4.66E-01	3540000	3540000	0	0	1
	0	0	0	0				
* Hinterfüllung								
6	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-14	0	0	1		

```

        0      0      0      0
        6      2      2      2  1600000  1600000      0      0      1
        0      0      0      0
* Tech. Zwischenrohr
        7  1.0E-14  1.0E-14  1.0E-14      0      0      1
        0      0      0      0
        7      50      50      50  3540000  3540000      0      0      1
        0      0      0      0
* Gestein
        8  1.0E-14  1.0E-14  1.0E-14      0      0      1
        0      0      0      0
        8      2.33      2.33      2.33  2080000  2080000      0      0      1
        0      0      0      0
* Ankerrohrtour
        5  1.0E-14  1.0E-14  1.0E-14      0      0      1
        0      0      0      0
        5      50      50      50  3540000  3540000      0      0      1
        0      0      0      0
* Wasser
        4  1.0E-14  1.0E-14  1.0E-14      0      0      1
        0      0      0      0
        4  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000      0      0      1
        0      0      0      0
* GRAVITATION
        0      1      0
* KNOTEN-ELEMENT-ZUORDNUNG
* El-nr      Mat      ien      ...
        1      1      1      2      3      4      0
        2      2      4      3      5      6      0
        3      2      6      5      7      8      0
        4      3      8      7      9      10     0
        5      4      10     9      11     12     0
        6      5      12     11     13     14     0
        7      6      14     13     15     16     0
        8      7      16     15     17     18     0
        9      6      18     17     19     20     0
        10     8      20     19     21     22     0
        .
        .
        966     8      975     974     976     976     0
        0      0      0      0      0      0      0
* OBERFLAECHEKRAEFTE
* Eln      Seite      Kraft      Kraft      ...
        717     1      7.0E-02  7.0E-02
        733     4      7.0E-02  7.0E-02
        812     2      7.0E-02  7.0E-02
        816     2      7.0E-02  7.0E-02
        913     2      7.0E-02  7.0E-02
        920     2      7.0E-02  7.0E-02
        934     2      7.0E-02  7.0E-02
        938     2      7.0E-02  7.0E-02
* MONITORELEMENTE
* Eln      Intp      Komp.
***** WINFRA ERSTELLT NOCH KEINE MONITORELEMENTE ! *****
* HYDRO-THERM. ELEMENTGRUPPE NR. 2
* ELEMENTKONTROLLE
* ntype      numel      numat      iopt      istprt      nicode      imass      impexp      nen
        41      104      5      2      0      0      0      0      2
* nsurf1      ntran1      nvolf1      nsout1      lfsur1      lfvoll      ibuoy      ilinh
        1      0      0      3      3      2      0      0
* nsurf2      ntran2      nvolf2      nsout2      lfsur2      lfvoll      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
* LinElem.  Aufwärts oben
        1      1      1      1      0      0      1.32E-03
        0      0      0      0      0      0
        1  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000      0      0      1.32E-03
        0      0      0      0
* LinElem.  Aufwärts unten
        3      1      1      1      0      0      1.90E-03
        0      0      0      0      0      0
        3  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000      0      0      1.90E-03
        0      0      0      0
* LinElem.  Abwärts unten
        5      1      1      1      0      0      9.56E-03
        0      0      0      0      0      0
        5  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000      0      0      9.56E-03
        0      0      0      0
* LinElem.  Abwärts oben
        2      1      1      1      0      0      1.59E-02
        0      0      0      0      0      0
        2  6.0E-01  6.0E-01  6.0E-01  4180000  4180000      0      0      1.59E-02

```

```

      0      0      0      0
* LinElem. Horizontal
      4      1      1      1      0      0 1.54E-02
      0      0      0      0
      4 6.0E-01 6.0E-01 6.0E-01 4180000 4180000 0 0 1.54E-02
      0      0      0
* GRAVITATION
      0      1      0
* KNOTEN-ELEMENT-ZUORDNUNG
* El-nr      Mat      ien      ...
      1      1      977      26      0
      2      1      26      27      0
      3      1      27      42      0
      4      1      42      47      0
      5      1      47      57      0
      6      1      57      73      0
      7      1      73      77      0
      8      1      77      93      0
      9      1      93      102     0
     10      1      102     107     0
      .
      .
     104      2      32      5      0
      0      0      0      0      0
* OBERFLAECHEKRAEFTE
* Eln      Seite      Kraft      Kraft      ...
      30      2      1
* MONITORELEMENTE
* Eln      Intp      Komp.
      30      1      1
      30      1      2
      30      1      3
***** WINFRA ERSTELLT NOCH KEINE MONITORELEMENTE ! *****
+end

```