



*Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Swiss Federal Office of Energy*

Programme
Géothermie

Long Term Influence of Multiple Heat Extraction Boreholes

**Program 3-D FRACTure and comparison with a
g-function calculated with the SBM program**

rédigé par
R. Brenni, Prof. Dr. Th. Kohl
Institut für Geophysik, ETH Hönggerberg
CH – 8093 Zürich

Dr. D. Pahud
SUPSI – DCT
Laboratori di energia, ecologia ed economia (LEEE)
CH – 6952 Canobbio

par ordre de
Office fédéral de l'énergie

Avril 2001, projet DIS 39690, contrat DIS 79488 Rapport intermédiaire

SUMMARY

For typical borehole heat exchangers (length of about 100m), the long term influence of neighbouring borehole heat exchangers normally appears after several years of operation, and approaches asymptotically a stationary state. Depending on the number of boreholes involved, it may take from several tens up to several hundred of years before the magnitude of the influence stabilises. In these conditions it is difficult to collect measurements of thermally interacting borehole heat exchangers. However there is a need to be able to answer the question of the long term influence of neighbouring borehole heat exchangers, as this situation is supposed to occur more often in the future, as the number of ground coupled heat pump systems (GCHP system) steadily increases with time. This topic needs also to be studied if themes such as “neighbour rights” or sustainability related to GCHP system are discussed.

This report is focused on the first phase of the project, whose objective is to check the g-function calculation with a more detailed programme. Three boreholes on an equilateral triangle is the borehole configuration chosen for the comparison between the two programs FRACTure and SBM. SBM is used in the g-function mode, in order to test the concept of g-function against the more detailed program FRACTure. The agreement between the results obtained with the two programs indicates that for typical boreholes of 100 meters deep the g-function analysis provides fast and sufficiently accurate results.

Cette étude a été accomplie sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie. Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions.

Inhaltverzeichnis

Summary	2
1 Introduction	4
2 Objectives	5
3 Einführung	5
3.1 Numerische Modellierung	5
<i>FRACTure.....</i>	<i>6</i>
<i>Weitere benutzte Softwares.....</i>	<i>6</i>
3.2 Wärmeübergang.....	7
<i>Laminare Strömung</i>	<i>8</i>
<i>Übergangszone und Turbulente Strömung</i>	<i>8</i>
4 Modell	9
5 Randbedingungen.....	10
6 Resultate	10
6.1 Bohrlochtemperatur (aus stationären Simulationen).....	10
6.2 Transiente Simulation.....	11
6.3 Comparison with SBM	12
7 Conclusion	12
8 Literaturverzeichnis	13
9 Anhang.....	14
9.1 Anhang A - Graphische Darstellungen des 3D-Gitters –	14
9.2 Anhang B - Temperaturfeld mit 10m-Bohrungsabstand -.....	15
<i>Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50\text{ m}$</i>	<i>15</i>
<i>Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -4\text{ m}$</i>	<i>16</i>
9.3 Anhang C - Temperaturfeld mit 5m-Bohrungsabstand-	17
<i>Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50\text{ m}$</i>	<i>17</i>
<i>Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -2\text{ m}$</i>	<i>18</i>

1 Introduction

For typical borehole heat exchangers (length of about 100m), the long term influence of neighbouring borehole heat exchangers normally appears after several years of operation, and approaches asymptotically a stationary state. Depending on the number of boreholes involved, it may take from several tens up to several hundred of years before the magnitude of the influence stabilises. In these conditions it is difficult to collect measurements of thermally interacting borehole heat exchangers. However there is a need to be able to answer the question of the long term influence of neighbouring borehole heat exchangers, as this situation is supposed to occur more often in the future, as the number of ground coupled heat pump systems (GCHP system) steadily increases with time. This topic needs also to be studied if themes such as “neighbour rights” or sustainability related to GCHP system are discussed.

The long term influence of thermally interacting boreholes has been addressed by Eskilson (1987) in the case of pure heat conduction in the ground. Based on analytical solutions, he established simple, conservative and qualitative rules, which are also valid for the stationary state:

- the boreholes can be considered as independent from each other if the spacing B is greater than the borehole length H . The thermal influence is always negligible.
- the thermal influence is always small if the spacing B is comprised between $H/2$ and H .

On the other hand, Kälén and Hopkirk (1991) made a study about the minimum spacing between two GCHP systems. They recommend that the spacing should never be below 5 m.

For borehole spacing comprised between 5 m and $H/2$, and for a specified period of time, the influence may or may not be neglected and has to be quantified. Eskilson developed the concept of g-functions for the calculation of the long term effect of heat extraction on the borehole temperature. Calculated for a given borehole configuration, the g-functions determine, together with the ground properties, the time evolution of the borehole wall temperature induced by the annual-averaged heat extraction rate. Comparisons with the borehole wall temperature that would be obtained with the g-function of a single borehole gives the thermal influence of the borehole interaction, quantified as a temperature drop on the borehole wall (or the heat carrier fluid). This temperature drop induces a reduction of the average performance coefficient of the heat pump and can be expressed in terms of a thermal performance decrease of the GCHP system; a decrease of 2 K in the heat pump evaporator can be obtained for a given borehole spacing, time period and average heat extraction rate. This decrease reduces the performance coefficient (COP) of about 0.15 – 0.20, which is about 5% of a typical annual performance coefficient (COP of 3 to 4). In this case the system would require about 5% more electric energy to provide the same thermal energy output.

2 Objectives

The overall objectives are to elaborate usable results on the long term thermal influence of multiple heat extraction boreholes, in order to:

- provide estimations of the long term influence of neighbouring borehole heat exchangers on the heat carrier fluid temperature for typical situations;
- express a minimum borehole spacing for several borehole configurations in relation to the decrease of the fluid temperature level and also the system thermal performances at the end of given periods of time;
- express the sensitivity of the minimum borehole spacing in relation to a thermal recharge of the ground or a lower annual heat extracted energy.

The g-functions calculated by Eskilson will be computed in a form that shows the correlation between the borehole spacing and the decrease of the fluid temperature level in the boreholes (or the GCHP thermal performances) for different configurations of boreholes.

This report resumes the first phase of the work, whose objective is to check the g-function calculation with a more detailed programme. It is intended to use the 3-D Finite Element Program FRACTure, well established for simulating GCHP behaviour (Salton 1999, Maraini 2000), for the calculation of 3 boreholes arranged on a triangular pattern. The long term temperature evolution of the average borehole temperature is simulated and compared to the corresponding g-function. In a second phase of this project the same model will investigate the influence of ground water flow on the temperature of the GCHP.

This report contains a description of the 3-D program FRACTure and a direct comparison of the case with three boreholes with the g-function calculation.

3 Einführung

3.1 Numerische Modellierung

Die numerischen Methoden erzeugen diskrete Lösungen und die verbreiteten Methoden für die Lösung partieller Differentialgleichungen sind. Die hier angewandte Finite-Elemente-Methode (FE) besitzt den Vorteil, den Untergrund durch beliebige Körper zu diskretisieren (z.B. aus Dreiecken, Vierecken, Prismen oder Tetraedern). Das in dieser Arbeit benützte numerische Programm FRACTure basiert auf dieser 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.

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.

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.

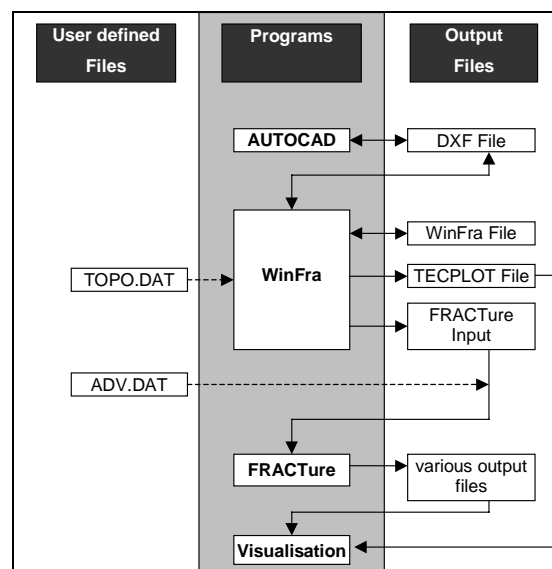


Fig.1. Benutzte Programme und Ausgabedateien zur Erstellung und Berechnung eines Modells mit FRACTure (aus KOHL, 1999).

3.2 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 Erdwärmesonde ist zwischen Verrohrung und Sole (Fluid) die Festlegung eines Wärmeüberganges sinnvoll. Die Grösse des Wärmeüberganges ist linear von dem Temperaturunterschied der angrenzenden Elemente abhängig.

Der Wärmeübergang in einem solchen Rohrsystem ist in erster Linie zur Beschreibung des Wärmetransports senkrecht zur Rohrwand notwendig. Er repräsentiert somit einen 1-D Vorgang, der mit bekannten Gesetzmässigkeiten wie dem Ohm'schen Gesetz beschrieben werden kann. Somit ist der gesamte thermische Widerstand gleich der Summe aller individuellen Widerstände. Wenn laterale Temperaturänderungen im Rohr vernachlässigt werden (d.h. perfekter lateraler Wärmetransport) dann ist der thermische Widerstand auf die Rohrwand begrenzt, aufgrund des Wärmeübergangs vom bewegten Fluid zur Rohrwand (in der Wärmeleitung vorherrscht):

$$R_{tot} = R_{transf} + R_{Rohr} = \frac{1}{h} + \frac{d}{\lambda}$$

mit λ der Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$], h dem Wärmeübergangskoeffizienten vom Fluid zur Wand [$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$] und d der Dicke der Rohrwand [m].

In der FRACTure Eingabeprozedur wird der Wert von h implizit durch eine "angepasste Wärmeleitfähigkeit" der Rohrwand, λ' , angegeben. Somit werden die unterschiedlichen Prozesse, Wärmeübergang und Wärmeleitung, mit Hilfe eines einzigen Parameters λ' beschrieben. Somit gilt

$$\begin{aligned} \frac{d}{\lambda'} &= \frac{1}{h} + \frac{d}{\lambda} \\ \Rightarrow \lambda' &= \frac{d}{\frac{1}{h} + \frac{d}{\lambda}} = \frac{d \cdot h \cdot \lambda}{\lambda + h \cdot d} \end{aligned}$$

Da FRACTure immer den vollen thermischen Leitfähigkeitstensor berechnet, können unterschiedliche Werte für laterale und parallele Komponente der Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand angegeben werden. Somit bleibt eine volle 3D Beschreibung der Wärmetransportprozesse erhalten. Die Berechnung des Wärmeübergangs basiert auf unterschiedlichen empirischen Formulierungen, die je nach Problemstellung individuell gestaltet werden können.

Typischerweise wird der Wärmeübergangskoeffizient, h , über die Nusselt Zahl, Nu , berechnet:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L}$$

mit λ_f der Wärmeleitung des Fluids [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$] und L einer typischen geometrischen Länge des Rohrsystems (der allgemein dem inneren Durchmesser des Rohres entspricht) [m].

Die Definition von Nu hängt von der Fließcharakteristik im Rohr ab. Turbulente Strömung verursacht höhere Nu als laminare Strömung. Unterschiedliche Formulierungen wurden hierbei für laminare und turbulente Strömung benutzt. Das jeweilige hydraulische Regime im Rohr wird durch die Reynolds Zahl, Re , beschrieben. $Re > 10000$ charakterisiert turbulente Strömung; $Re < 2300$ beschreibt laminare Strömung; dazwischen ist die Übergangszone. Bei einem gegebenen Fließgeschwindigkeit, v , und einem inneren Durchmesser des Rohrs, D , kann die Reynolds Zahl, Re , folgendermassen berechnet werden:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{v \cdot D}{\frac{\mu}{\rho_f}} = \frac{v \cdot D \cdot \rho_f}{\mu}$$

mit ν , der kinematischen Viskosität des Fluids [typischerweise $\sim 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$], die aus der dynamischen Viskosität, μ [$\sim 10^{-3} \text{Pa s}$] und der Dichte des Fluids berechnet wird, ρ_f [$\sim 10^3 \text{kg m}^{-3}$].

Die Prandtl Zahl, Pr , ist eine materialspezifische Konstante, die das Verhältnis von kinematischer Viskosität zu thermischer Diffusivität beschreibt. Er wird ausgedrückt über:

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa} = \frac{\nu}{\frac{\lambda_f}{(\rho c_p)_f}} = \frac{c_{p_f} \cdot \mu}{\lambda_f}$$

mit κ der thermischen Diffusivität [typischerweise $\sim 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$], die sich aus der Wärmeleitfähigkeit, λ_f [$\sim 0.6 \text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$], und der Wärmekapazität des Fluids, $(\rho c_p)_f$ [$\sim 4200 \text{kg m}^{-1} \text{K}^{-1}$] berechnen lässt.

Laminare Strömung

Bei laminarer Strömung kann dann Nu folgendermassen berechnet werden

$$Nu = \frac{Nu_0}{\tanh(2.43 \cdot Pr^{0.1667} \cdot X^{0.1667})}$$

wobei $Nu_0 = \frac{3.657}{\tanh(2.264 \cdot X^{0.3333} + 1.7 \cdot X^{0.6667})} + \frac{0.0499 \cdot \tanh X}{X}$

und $X = \frac{L}{D \cdot Pr \cdot Re}$

Übergangszone und Turbulente Strömung

In der Übergangszone ($2300 < Re < 10^4$) kann die folgende Gleichung angewandt werden:

$$Nu = 0.024 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3333}$$

4 Modell

Die Grundkonfiguration für drei Sonden bestand aus einem gleichseitigen Dreieck mit variabler Länge. Die Berechnungen erfolgten für zwei unterschiedlichen Fälle mit Seitenlängen von 5 m und 10 m. Diese Konfiguration wurde zentral in einem grossräumigen, 2000 x 2000m x 1000m umfassenden Finite Element Gitter integriert (s. Anhang A oben). Um die drei einzelnen Sonden mit dieser Geometrie noch korrekt darstellen zu können, musste das FE Gitter im Zentrum stark verfeinert werden. Die Sonden wurden mit einer Genauigkeit von 10^{-4} m diskretisiert, wobei die Rohrdicke und Durchmesser bestmöglich angepasst wurden. Der Kreisquerschnitt der Einzelsonden wurde durch ein Achteck mit demselben Umfang wie die zu simulierende Sonde dargestellt (s. Anhang A unten).

Der Gitteraufbau erfolgt hauptsächlich in zwei Schritte: erstens wird ein 2D-Gitter erstellt, das den Querschnitt bei $z = 0$ m modelliert (Der Aufbau dieses horizontalen Querschnittes wird im AUTOCAD-Programm erstellt), zweitens wird in WinFra-Programm mittels Kopieren der 2D-Schicht das 3D-Modell aufgebaut.

Die Generierung dieses 2D-Gitter erfolgt ebenfalls in zwei Schritte:

- Modellierung der Geometrie einer einzelnen Sonde (1m x 1m Quader): In der horizontalen Richtung sollen die Sondenrohre, die Rohrwände, die Hinterfüllung und die Matrix aufgelöst werden.
- Aufbau des gesamten Grundgitters: Nachdem man die Geometrie einer einzelnen Sonde modelliert hat, beginnt man den Aufbau des gesamten Gitters (Quader mit 2000m-Kantenlänge. Die Sonden werden in einzelne 1m^2 grosse quadratische Felder eingebaut.

Die Strömung des Fluids in der U-Rohre wird mit 1D-Elementen modelliert, die sich in der Mitte der Förder- und Injektionsrohren befinden. Die Zuteilung der Materialien erfolgt im Programm WinFra.

Aus einem 2D Querschnitt wird in WinFra das 3D-Gitter erstellt. Durch die Angabe der Tiefen einzelner 2D Schichten wird dabei ein 3D-Gitter aufgebaut. Die vertikale Auflösung ist in der Tabelle 1 definiert:

Tab.1. Vertikale Auflösung.

Vertikale Auflösung			
Tiefenbereich (m)	z-Schritt (m)	Tiefenbereich (m)	z-Schritt (m)
0-90	10	100.05-100.1	0.05
90-95	5	100.1-100.5	0.4
95-99	2	100.5-101	0.5
99-99.5	0.5	101-105	4
99.5-99.9	0.2	105-110	5
99.9-99.95	0.05	110-150	40
99.95-99.99	0.02	150-200	50
99.99-100.01	0.01	200-500	300
100.01-100.05	0.04	500-1000	500

In der Tabelle 2 sind die benutzten Modellparameter dargestellt:

Tab.2. Modellparameter für ein Bohrloch.

Wichtige Parameter			
L: Max. Modelltiefe (m)	100	Lambda Matrix (W/mK)	2.50E+00
Bohrlochdurchmesser (m)	1.20E-01	Lambda Wasser (W/mK)	6.00E-01
Rohrdurchmesser Innen (m)	2.60E-02	Rho*cp Rohr (J/m ³ K)	2.00E+06
Rohrdurchmesser Aussen (m)	3.20E-02	Rho*cp Bentonit (J/m ³ K)	3.40E+06
A: Rohrquerschnitt (m ²)	5.31E-04	Rho*cp Matrix (J/m ³ K)	2.40E+06
P: Leistung (W)	1.00E+03	Rho*cp Wasser (J/m ³ K)	4.18E+06
q: Bas. Wärmefluss (W/m ²)	0.00E+00	Q: Durchfluss (m ³ /s)	2.39E-04
Oberflächentemp.: T _{ob} (°C)	0.00E+00	Fluidgesch.: v = Q/A (m/s)	4.50E-01
ΔT (°C)	-1.00E+00	heat resistance (fluid-pipe) (K/W/m)	5.70E-04
Lambda Rohr (W/mK)	4.00E-01	dynamic viscosity (kg/ms)	1.14E-03
Lambda' Rohr (W/mK)	3.88E-01	Reynold number	1.03E+04
Lambda Bentonit (W/mK)	7.00E-01	heat transfer coefficient (m ² K/W)	1.79E+03

5 Randbedingungen

Die Randbedingungen des Modells wurden im Programm WinFra als Neumann- und Dirichlet-Randbedingungen definiert (s. Tab.3.)

Tab.3. Beschreibung der eingegebenen Randbedingungen in WinFra.

Randbedingung	Definition in WinFra
Druckpotential bei der Ende des Austrittsrohres	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 Werte der verschiedenen Randbedingungen für die Geometrie mit 5m und 10m-Abstand sind in den Tabellen 4a und 4b zu sehen. Die unterschiedliche Eintrittstemperaturen ist das Ergebnis einer iterativen Anpassung um eine konstanten Wärmeentzug zu gewährleisten.

Tab.4a Werte der thermischen Randbedingungen

	5 m Abstand	10 m Abstand
Oberflächentemperatur:	0 °C	0 °C
Eintrittstemperatur (T _{in}):	9 °C	8 °C
Basaler Wärmefluss:	0 W/m ²	0 W/m ²

Tab.4b Werte der hydraulische Randbedingungen.

Durchfluss:	4.5·10 ⁻¹ m/s
Hydraulisches Potential bei Koordinatenursprung (0,0):	0 m

6 Resultate

6.1 Bohrlochtemperatur (aus stationären Simulationen)

In der Tabelle 6 sind die gemittelten Bohrlochtemperaturen dargestellt, diese wurden aus 400 Punkte berechnet, d.h. jede Meter Tiefe werden 4 Punkte genommen.

Die mittleren Bohrlochtemperaturen wurde aus dem Temperaturprofil im Bohrloch interpoliert und insgesamt aus interpolierten 400 Punkten (4 Punkte pro 1m Tiefe) berechnet. Die

Punkte bis zu einer Tiefe von -30 m sind aber stark von der Randbedingung für die Oberflächentemperatur beeinflusst, d.h. nur unterhalb -30 m Tiefe sind die Temperaturen vom Erduntergrund bestimmt.

Tab.6. Mittlere Bohrlochtemperatur (T_b).

Geometrie	T Bohrloch (°C) mit allen Daten	T Bohrloch (°C) mit sortierten Daten
10m-Abstand	5.59	5.84
5m-Abstand	6.58	6.79

6.2 Transiente Simulation

Es wurden zwei transiente Berechnungen durchgeführt. Eine Simulation mit der 10m-Abstand-Geometrie und eine Simulation mit der 5m-Abstand-Geometrie. Es muss dabei bemerkt werden, dass die transienten Simulationen nicht mit einem konstanten ΔT berechnet wurden.

Die entsprechenden Resultate sind in der Figuren 2 und 3 zu sehen.

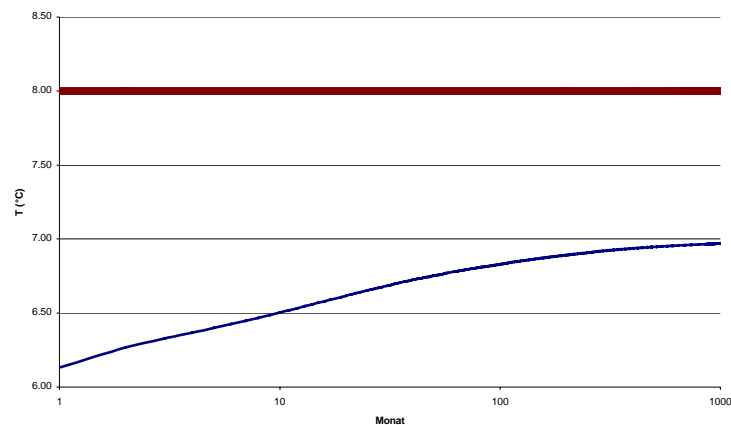


Fig.2. Austrittstemperaturen einer Sonde ($T_{out\ 1}$) und Eintritttemperatur (T_{in}) für 10m-Abstand Geometrie.

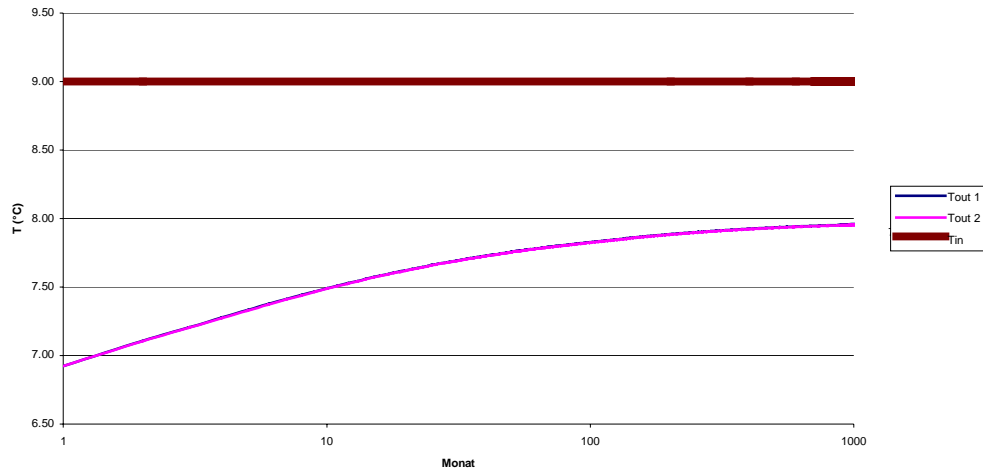


Fig.3. Austrittstemperaturen für zwei Sonden (T_{out1} , T_{out2}) und Eintritttemperatur (T_{in}) für 5m-Abstand Geometrie.

6.3 Comparison with SBM

The program SBM (Eskilson, 1986) is used in the g-function mode for the comparison with FRACTure. This means that a constant borehole temperature is prescribed to the borehole wall. This temperature is varying in the time, as it is calculated so that a constant heat rate is injected in the boreholes. The heat injection rate is fixed to 10 W/m, which corresponds, with 3 boreholes of 100 m each, to a total heat injection rate of 3 kW. The same ground properties, initial and boundary conditions as for FRACTure are used in SBM (see table 2 to 5).

The comparison is limited to the stationary state. In SBM, the calculation have been performed for 10'000 years. In table 7, the calculated borehole temperature T_b are shown. The borehole temperatures obtained with FRACTure are the average value along the full length of the borehole. They are calculated in the stationary state.

Tab.7. Borehole temperature T_b .

T_b / °C	Spacing of 10 m	Spacing of 5 m
FRACTure	5.59	6.58
SBM	5.67	6.40
Difference K	0.08	-0.18
Difference %	1.4%	-2.7%

The agreement between the two programs is satisfactory.

7 Conclusion

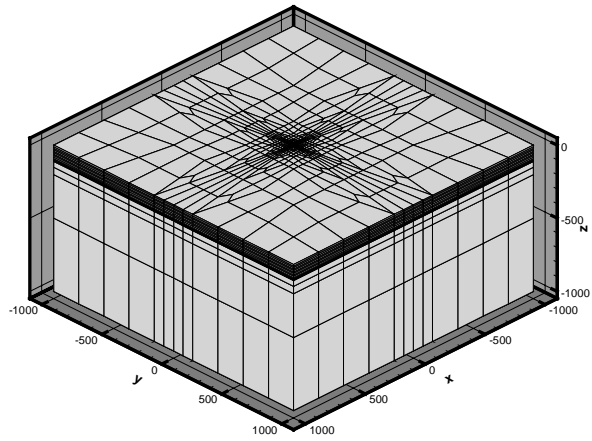
Three boreholes on a equilateral triangle was the borehole configuration chosen for the comparison between the two programs FRACTure and SBM. SBM was used in the g-function mode, as the purpose of the comparison was to test the concept of g-function against the more detailed program FRACTure. The agreement between the results obtained with the two programs indicates that for typical boreholes of 100 meters deep the g-function analysis provide fast and sufficiently accurate results. The g-function concept will be extensively used for the second phase of this study.

8 Literaturverzeichnis

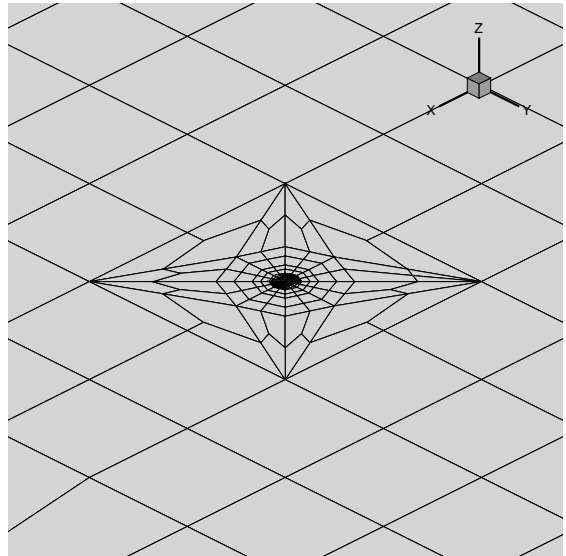
- BIRD R. B., STEWART W.E. und LIGHTFOOT E. N. (1960): Transport Phenomena, Wiley International Edition, New York, Kapitel 2.3 und 2.4, S. 42-54.
- BRENNI R. (2000): Modellsimulationen von Tiefenerdwärmesonden-Anlagen an den Fallbeispielen Weggis und Medyaguino, Diplomarbeit an der Abt. für Erdwissenschaften der ETH Zürich.
- ESKILSON P. (1986): Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- ESKILSON P. (1987) Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- KÄLIN B., HOPKIRK R. J. (1991) Quantitative Empfehlungen über den minimalen Grenzabstand einer Erdwärmesonden-Anlage, im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Switzerland.
- KOHL T. (1999): FRACTure (V.3.1.) Finite Element Program with WinFra (V. 051) Mesh Generator. Internes Manual ETHZ.
- MARAINI S. (2000): Vergleich von Software zur Dimensionierung von Erdwärmesonden-Anlagen, Diplomarbeit an der Abt. für Erdwissenschaften der ETH Zürich.
- SALTON M. (1999): Untersuchungen zum Verhalten von Erdwärmesonden, Diplomarbeit an der Abt. für Erdwissenschaften der ETH Zürich.

9 Anhang

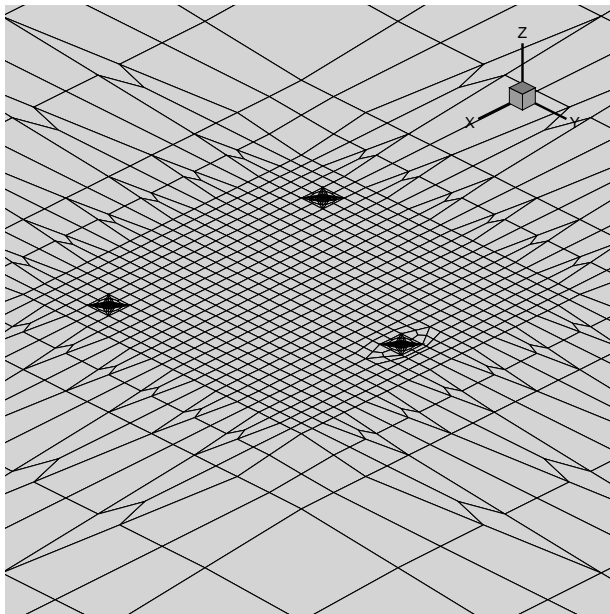
9.1 Anhang A - Graphische Darstellungen des 3D-Gitters –



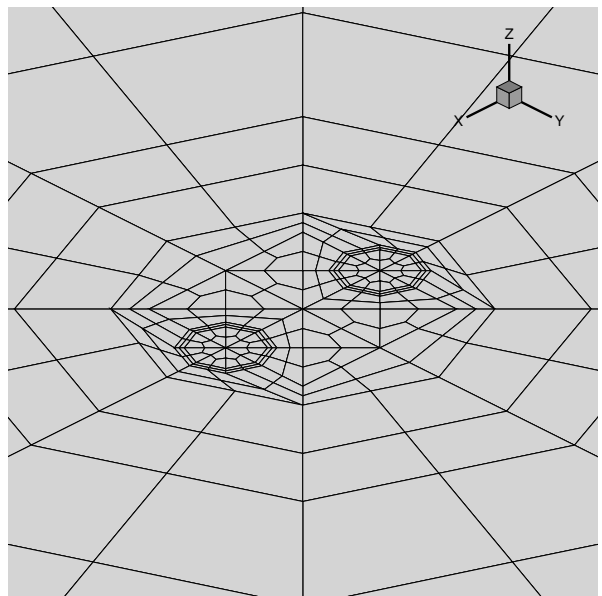
Darstellung des 3D_Gitters.



3D-Gitter (Zoom 2).



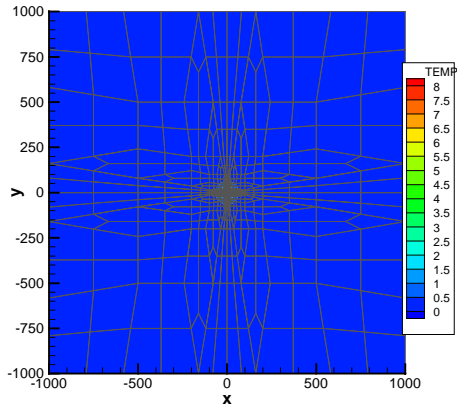
3D-Gitter (Zoom 1).



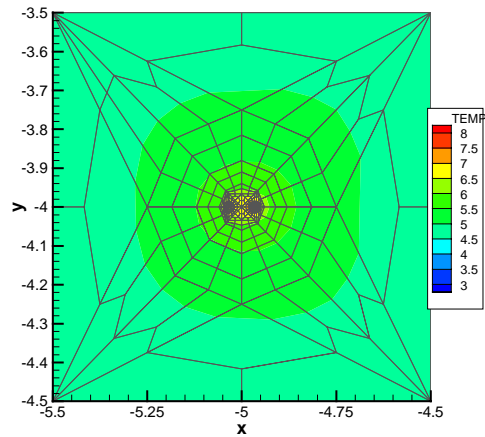
3D-Gitter (Zoom 3).

9.2 Anhang B - Temperaturfeld mit 10m-Bohrungsabstand -

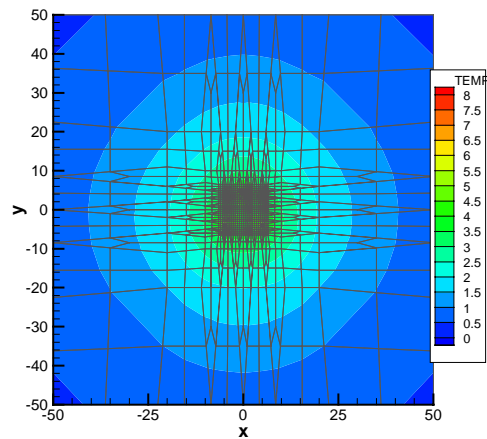
Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50$ m



Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50$ m



Temperaturfeld um eine einzige Bohrung (zoom 3).



Einfluss der 3 Bohrungen auf das Temperaturfeld (zoom 1).

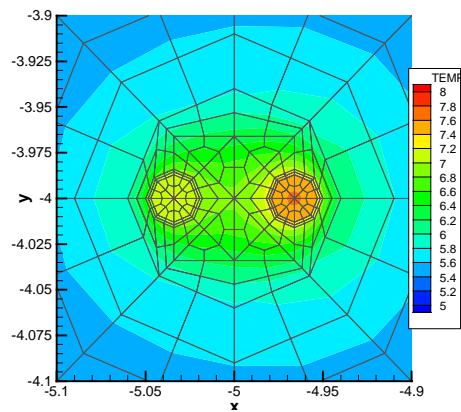
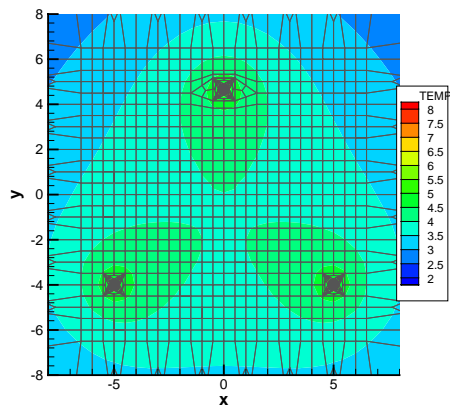
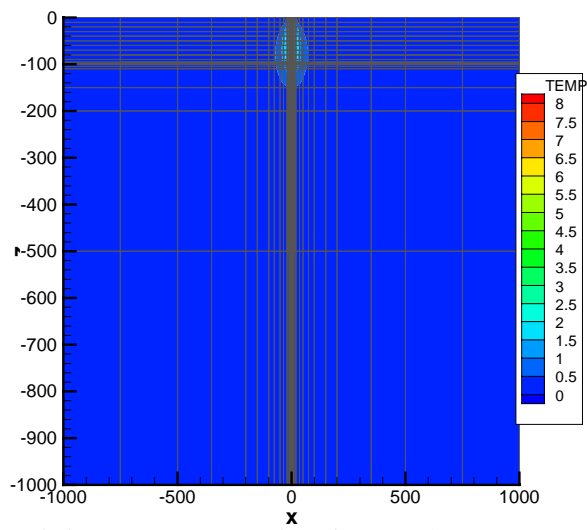


Fig.6. Temperaturverteilung in der Bohrung (zoom 4).

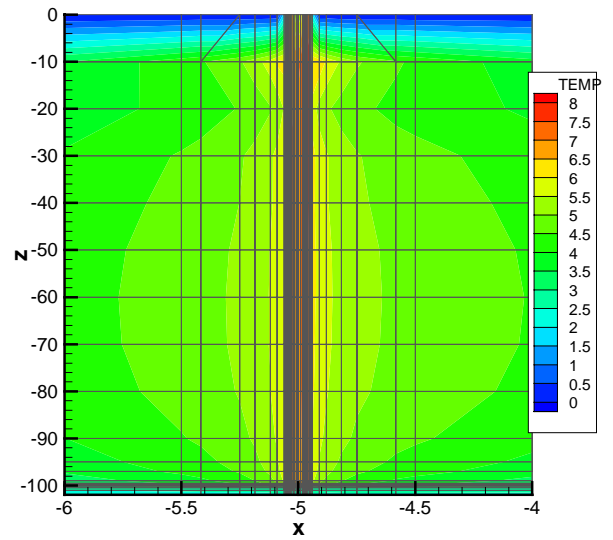


Einfluss der einzelnen Bohrungen auf das Temperaturfeld (zoom 2).

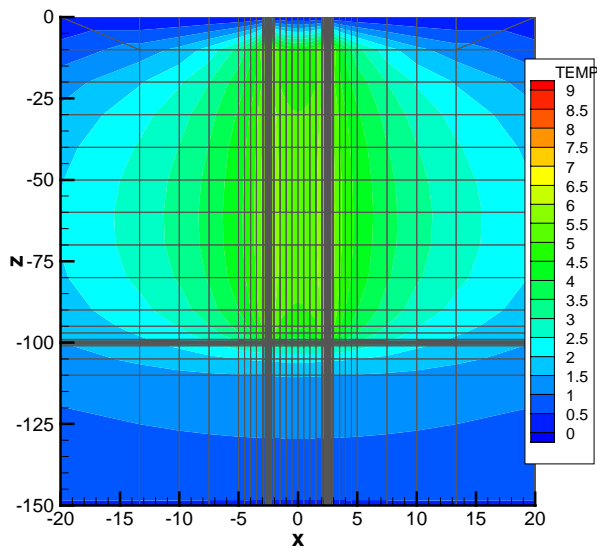
Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -4$ m



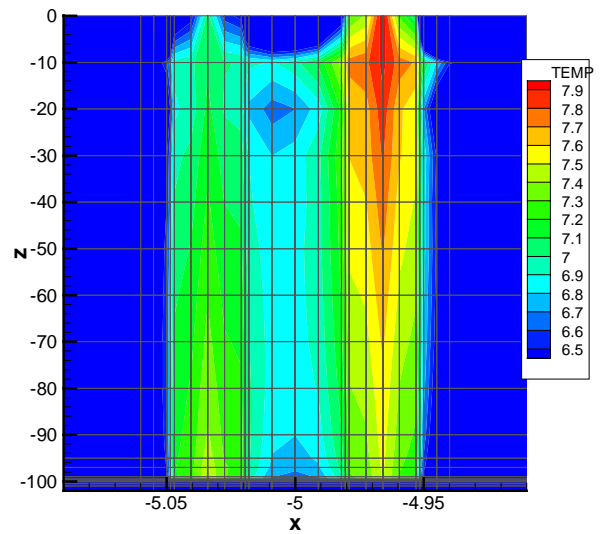
Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -4$ m.



Einfluss einer einzelnen Bohrung auf Temperaturfeld (zoom 2).



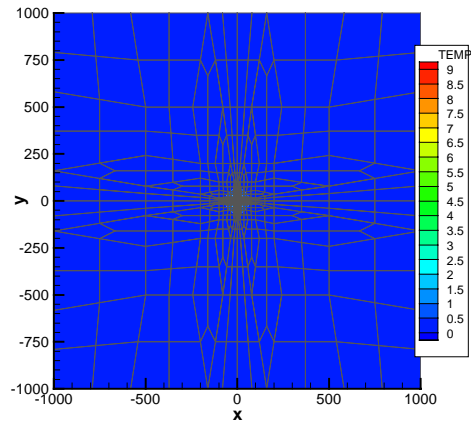
Einfluss von 2 Bohrungen auf Temperaturfeld (zoom 1).



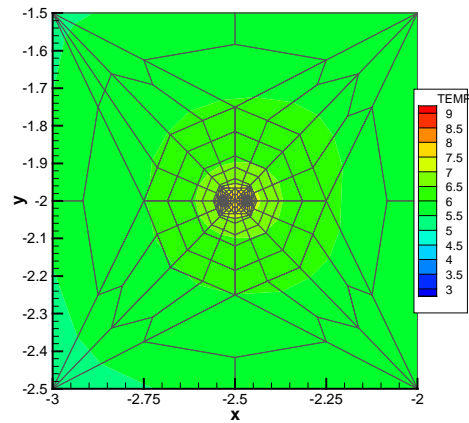
Einfluss einer einzelnen Bohrung auf Temperaturfeld (zoom 3).

9.3 Anhang C - Temperaturfeld mit 5m-Bohrungsabstand-

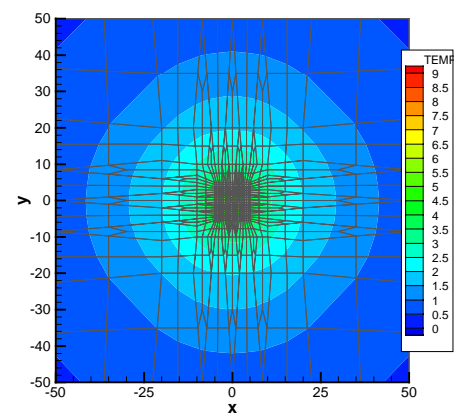
Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50$ m



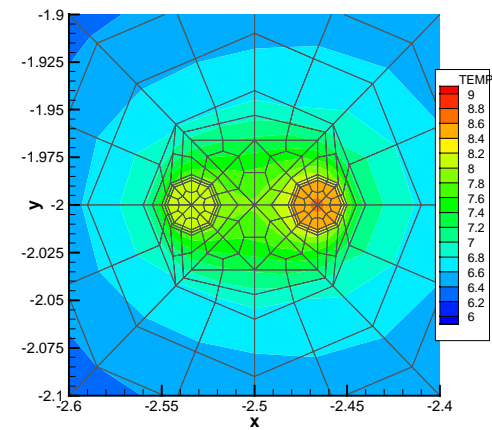
Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50$



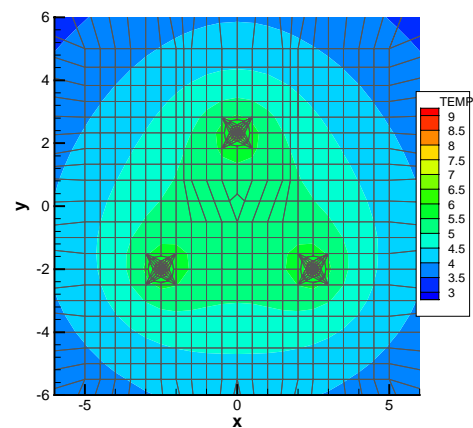
Temperaturfeld um eine einzige Bohrung (zoom 3).



Gesamter Einfluss der 3 Bohrungen auf das Temperaturfeld (zoom 1).

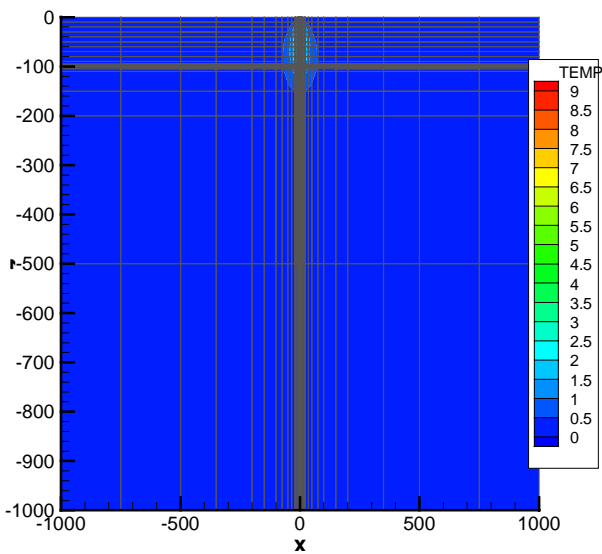


Temperaturverteilung in der Bohrung (zoom4).

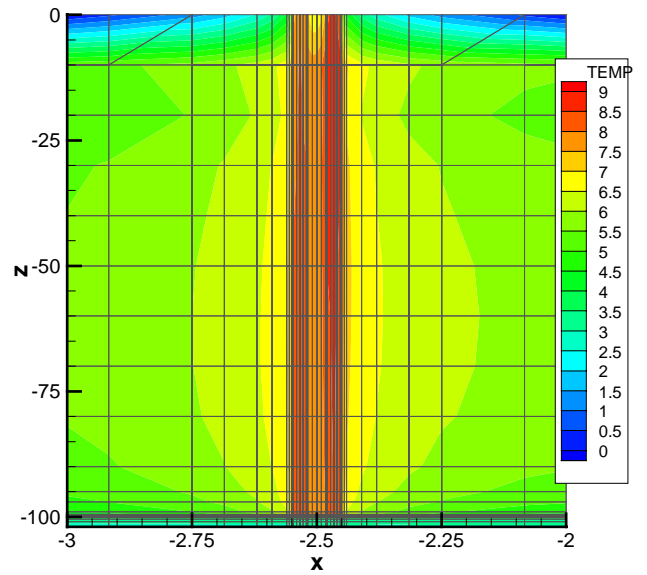


Einfluss der einzelnen Bohrungen auf das Temperaturfeld (zoom 2).

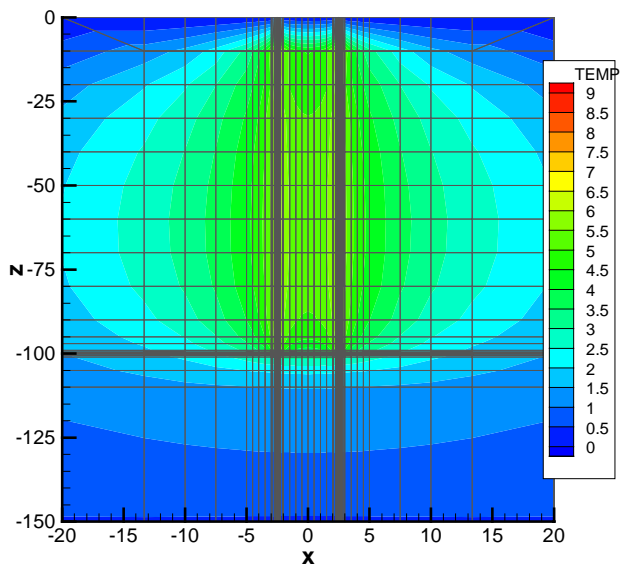
Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -2$ m



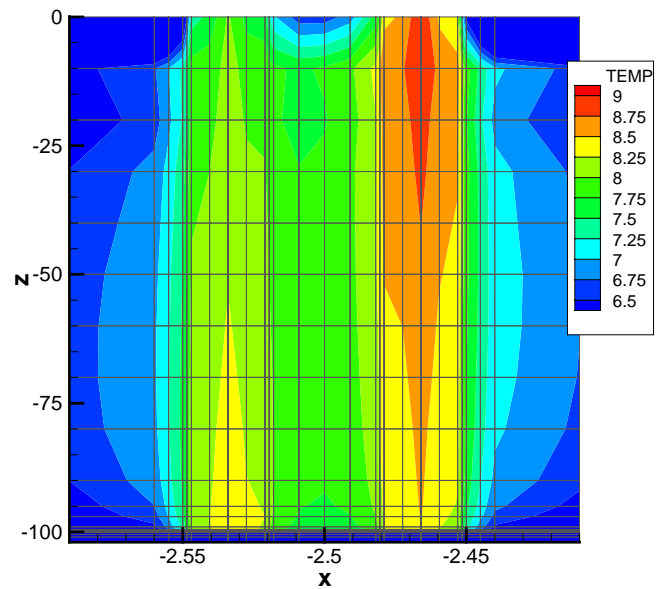
Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -2$ m.



Einfluss einer einzelnen Bohrung auf Temperaturfeld (zoom 2).



Einfluss von 2 Bohrungen auf Temperaturfeld (zoom 1).



Einfluss einer einzelnen Bohrung auf Temperaturfeld (zoom 3)