

Schlussbericht März 2002

Langzeiteffekt von Mehrfach- Erdwärmesonden

ausgearbeitet durch

Dr. D. Pahud

SUPSI – DCT – LEEE, Laboratorio di energia, ecologia ed economia

CH – 6952 Canobbio

Tel: 091 935 13 53

Fax: 091 935 13 09

daniel.pahud@dct.supsi.ch

Dr. T. Kohl, Dr. T. Mégel

GEOENERGIE % GeoWatt

Sihlfeldstrasse 81

CH – 8004 Zürich

Tel: 01 242 14 54

Fax: 01 242 14 58

megel@geowatt.ch

R. Brenni

Institute für Geophysik, ETH Hönggerberg

CH – 8093 Zürich

SUMMARY

Due to the increasing density of borehole heat exchanger (BHE) systems in Switzerland, their mutual influence needs to be investigated. Depending on the number of systems involved, it may take from several tens up to several hundred of years for typical BHE lengths of ~100m before they start influencing each other. There is however a need to account for their long term influence since this situation is supposed to occur more often in future, as the number of ground coupled heat pump systems (GCHP system) steadily increases with time. Since it is difficult to collect measurements of thermally interacting BHE's in these conditions, only simulation programs will provide a solution to this problem. This topic needs also to be studied to discuss themes such as "neighbour rights" or sustainability related to GCHP system.

The first phase of the project is to check the often-used "g-function" calculation. Therefore, the programs SBM being used in g-function mode and the fully numerical finite element program FRACTure are tested. The comparison between the two programs is performed for a three-borehole configuration of an equilateral triangle. Under the assumption of steady-state conditions and a homogeneous, purely diffusive subsurface, a good agreement of the programs could be established. In these conditions the g-function analysis provides fast and sufficiently accurate results. Further calculations, performed with FRACTure, investigated the possible effect of a subsurface aquifer. Depending on the aquifer thickness and flow rate, the results indicated a performance increase of up to 70%. Although a time constant was roughly considered, further calculations need to be performed. Especially, the transient behaviour, effects of heterogeneous subsurface or temperature-dependant material behaviour should be investigated in further steps. This first comparison has demonstrated that both programs SBM and FRACTure working with completely different algorithms can reliably be used for simulations of BHE systems.

In the second phase of the project, the g-function concept is used to calculate the long term influence of the two borehole configurations (two-boreholes and three-boreholes forming an equilateral triangle). The results are presented in a graphical form in order to quickly assess a particular problem. The ground thermal conductivity may vary between 1 and 4 Wm⁻¹K⁻¹, the borehole length between 50 and 200 m, the borehole spacing between 5 and 100 m and the time horizon between 5 and 200 years. The long term influence is estimated for any mean annual heat extraction rate, which includes an eventual thermal recharge of the ground. The influence of a regional ground water flow is not taken into account. As calculated with FRACTure, such an influence may significantly improve the situation by decreasing the long term temperature drop at the borehole wall.

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 Einführung	5
2 Zielsetzungen.....	6
3 Methodik.....	7
3.1 Das FE-Programm FRACTure	7
3.2 Behandlung des Wärmeübergangs	8
4 FE-Grundmodell (ohne Aquifer)	10
4.1 Gittergeometrie	10
4.2 Materialien.....	12
4.3 Randbedingungen (ohne Aquifer)	12
5 Modell mit Aquifer	13
6 Resultate	14
6.1 Transiente Simulation (ohne Aquifer).....	14
6.2 Vergleich mit dem Programm SBM	14
6.3 Einfluss von Grundwasserströmungen.....	15
7 Methodology used with the g-function concept	16
7.1 The g-function concept	16
7.2 Methodology used for the estimation of long term effects	17
8 Long term thermal influence (pure heat conduction case)	18
8.1 Depth of the borehole.....	18
8.2 Effect of a thermal recharge of the ground.....	19
8.3 Estimation of the long term influence for the two borehole configurations.....	19
9 Schlussfolgerungen	20
10 Literaturverzeichnis	21

11	Anhang.....	22
11.1	Anhang A - Graphische Darstellungen des 3D-Gitters –	22
11.2	Anhang B - Temperaturfeld mit 10m-Bohrungsabstand -	23
11.3	Anhang C - Temperaturfeld mit 5m-Bohrungsabstand-	25
11.4	Anhang D - Temperaturfeld mit Aquifer, 5 m Bohrungsabstand	27
11.5	Appendix E – Graphical estimation of long term influence for 2 borehole configurations.....	28

1 Einführung

Die gegenseitige thermische Beeinflussung von benachbarten Erdwärmesonden (typische Länge von etwa 100 m) tritt erst nach mehreren Jahren auf und nähert sich langsam einem stationären Wert. Dieser stationäre Wert wird in Abhängigkeit der Anzahl und des gegenseitigen Abstandes der Sonden erst nach etlichen zehn oder hundert Jahren erreicht. Daher ist es praktisch unmöglich die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden messtechnisch zu erfassen. Da die Anzahl der installierten Erdwärmesonden auch künftig wachsen wird, kommt der Fragestellung nach der langfristigen gegenseitigen Beeinflussung von Erdwärmesonden eine zentrale Bedeutung zu, insbesondere im Hinblick auf Bewilligungs- und Nachhaltigkeitsfragen.

Der Effekt der gegenseitigen thermischen Beeinflussung von Erdwärmesonden wurde von Eskilson (1987) für den Fall von reiner Wärmeleitung im Untergrund vorgenommen. Basierend auf analytischen Lösungen konnten konservative und qualitative Regeln erstellt werden, die auch für den stationären Fall gelten:

- Die Erdwärmesonden können als unabhängig betrachtet werden, falls der Abstand B grösser als die Erdwärmesondenlänge H ist. Die thermische Beeinflussung ist dann stets vernachlässigbar.
- Die thermische Beeinflussung ist stets klein, wenn der Abstand B zwischen $H/2$ und H liegt.

Zudem wurde von Kälin und Hopkirk (1991) vorgeschlagen, dass der minimale Abstand zwischen zwei Erdwärmesonden nie 5 m unterschreiten darf.

Liegt der Abstand zweier Erdwärmesonden zwischen 5 m und $H/2$, so muss quantifiziert werden, ob die Beeinflussung vernachlässigt werden kann oder nicht. Eskilson entwickelte das g-Funktion-Konzept zur Bestimmung der Bohrlochtemperatur bei einer langfristigen Wärmeentnahme. Für eine bestimmte Bohrlochkonfiguration, eine mittlere jährliche Wärmeentnahme sowie für bestimmte Bodeneigenschaften bestimmt die g-Funktion die zeitliche Entwicklung der Temperatur der Bohrlochwand. Detailliertere Resultate liefern numerische Berechnungen mit Finiten Elementen oder Finiten Differenzen.

Werden die Resultate verglichen mit den Werten für eine alleinstehende Erdwärmesonde, so ergibt sich die Beeinflussung als einen Temperaturunterschied an der Bohrlochwand (oder der Wärmeträgerflüssigkeit). Wird dem Boden Wärme entzogen, so führt diese Temperaturabnahme zu einer Reduktion des mittleren Wirkungsgrades der Wärmepumpe, was auch als eine Abnahme der Leistung des Erdwärmesondensystems angesehen werden kann. Sinkt auf Grund einer bestimmten Konfiguration von mehreren Erdwärmesonden die Verdampfertemperatur in der Wärmepumpe um 2 K, so reduziert sich die Jahresarbeitszahl (JAZ) um etwa 0.15-0.20, was etwa 5% einer typischen Jahresarbeitszahl von 3 bis 4 entspricht. In diesem Fall würde das System bei gleichbleibender Wärmeabgabe etwa 5% mehr Strom benötigen.

Die Kapitel 3 - 6 dieses Berichtes umfassen die Ergebnisse einer ersten Arbeitsphase, in der folgende Arbeiten ausgeführt wurden:

- Das 3-D Finite Element Programm FRACTure, das sich als sehr geeignet für die Simulation von Erdwärmesonden erwiesen hat (Salton 1999, Maraini 2000) wurde verwendet, um die Ergebnisse der g-Funktion zu verifizieren. Die langfristige Temperaturentwicklung einer Konfiguration bestehend aus drei in einem Dreieck angeordneten Sonden wird berechnet und mit den entsprechenden Resultaten der g-Funktionsberechnung verglichen.
- Mit derselben Konfiguration wird der Effekt von strömendem Grundwasser auf die Entzugsleistung der Erdwärmesonde berechnet.

Bei den hier gewählten Randbedingungen ist es für die thermischen Prozesse im Untergrund unerheblich, ob dem Boden Wärme zugeführt oder entzogen wird. Zum Zwecke der Vergleichbarkeit mit SBM wurde in den folgenden Berechnungen immer von einer Wärmezufuhr ausgegangen.

In the second phase of the project (see chapter 7 and 8) the results of the g-function calculations are represented in graphical 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 two borehole configurations: 1) two boreholes and 2) three boreholes arranged in a triangular pattern.

The main purpose of the graphical display is to provide a quick estimation of the long-term influence for each borehole in the calculated configuration. It is intended that a particular problem should be graphically solved when supplying borehole length, ground thermal conductivity and average net heat extraction rate (including a thermal recharge). Depending on the need and success of such an approach, the methodology can be applied to other borehole configurations.

2 Zielsetzungen

Im Hinblick auf die Planungssicherheit von Mehrfach-Erdwärmesondenanlagen ergeben sich die folgenden allgemeinen Zielsetzungen:

- Abschätzung des Temperatureffektes von typischen Konfigurationen von Erdwärmesonden auf die Wärmeträgerflüssigkeit;
- Abschätzung eines minimalen Abstandes für verschiedene Erdwärmesonden-Konfigurationen in Abhängigkeit der Temperaturabnahme der Wärmeträgerflüssigkeit und des thermischen Wirkungsgrades der Anlage nach einer bestimmten Periode;
- Abschätzung der Sensitivität des minimalen Sondenabstandes in Abhängigkeit zur thermischen Aufladung des Untergrundes oder der verminderten jährlichen Wärmeentzugsrate.

3 Methodik

In diesem Bericht wird vor allem auf das Finite Element Modell eingegangen. Die verwendeten Geometrien, Materialparameter und Randbedingungen gelten aber auch für die Berechnungen mit dem Programm SBM.

3.1 Das FE-Programm 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.

Für die Erstellung des Eingabefiles für den Solver (Input.dat-File), das die Maschengenerierung, die Definition der Randbedingungen und die Zuteilung der verschiedenen Materialparameter, umfasst, wird zusätzliche Softwares verwendet.

In der Abbildung 3.1. sind die verschiedenen Programme und Files dargestellt, die für die Simulationen mit FRACTure angewendet werden.

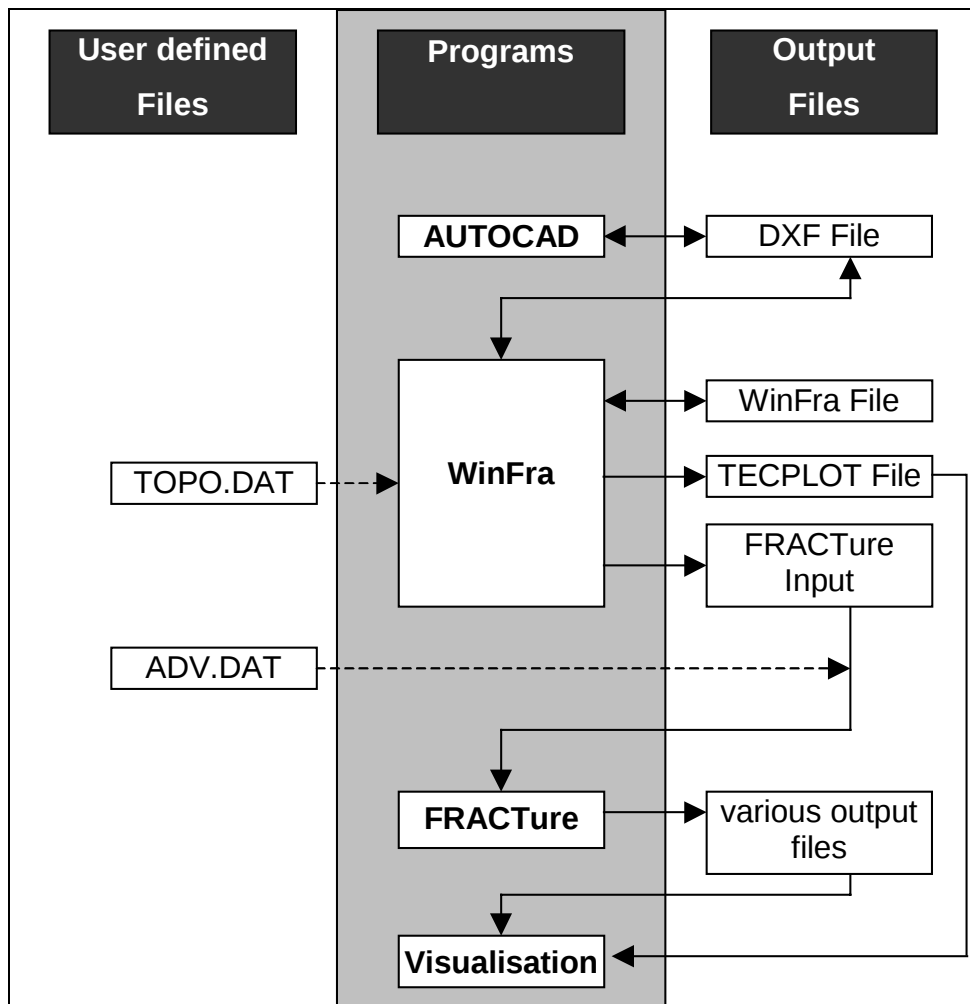


Fig. 1: Benutzte Programme und Ausgabedateien zur Erstellung und Berechnung eines Modells mit FRACTure (aus KOHL, 1999).

3.2 Behandlung des Wärmeübergangs

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 Wärmeträgerflüssigkeit 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 von der bewegten Wärmeträgerflüssigkeit 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 von der Wärmeträgerflüssigkeit 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 [m] eine kennzeichnende Abmessung, die bei einem Rohrsystem dem Rohrrinnendurchmesser entspricht.

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 der Wärmeträgerflüssigkeit [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 der Wärmeträgerflüssigkeit 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:

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

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 der Wärmeträgerflüssigkeit, $(\rho c_p)_f$ [$\sim 4200 \text{ kg m}^{-1} \text{ K}^{-1}$] berechnen lässt.

Laminare Strömung

Bei laminarer Strömung kann dann Nu folgendermassen berechnet werden

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

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

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

Übergangszone und Turbulente Strömung

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

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

4 FE-Grundmodell (ohne Aquifer)

4.1 Gittergeometrie

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 $z = 0 \text{ m}$ 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-Gitters 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 1m² 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:

Tabelle 1: Vertikale Auflösung des Gitters (ohne Aquifer)

Vertikale Auflösung (ohne Aquifer)			
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

4.2 Materialien

In der Tabelle 2 sind die benutzten Modellparameter dargestellt:

Tabelle 2: Modellparameter für ein Bohrloch.

Geometrische Parameter		
L: Max. Modelltiefe	m	100
Bohrlochdurchmesser	m	1.20E-01
Rohrdurchmesser Innen	m	2.60E-02
Rohrdurchmesser Aussen	m	3.20E-02
A: Rohrquerschnitt	m ²	5.31E-04
Betriebs-Parameter		
Leistung	W	1000
Durchfluss	m ³ /s	2.39E-04
Fluidgesch.: $v = Q/A$	m/s	4.50E-01
Matrrial-Parameter		
Lambda Rohr	W/mK	4.00E-01
Lambda' Rohr	W/mK	3.72E-01
Lambda Bentonit	W/mK	7.00E-01
Lambda Matrix	W/mK	2.50E+00
Lambda Wasser	W/mK	6.00E-01
Rho*cp Rohr	J/m ³ K	2.00E+06
Rho*cp Bentonit	J/m ³ K	3.40E+06
Rho*cp Matrix	J/m ³ K	2.40E+06
Rho*cp Wasser	J/m ³ K	4.18E+06
Wärmeübergang	m ² K/W	1.79E+03
Wärmewiderstand (Fluid-Rohr)	K/W/m	5.70E-04
dynamische Viskosität	kg/ms	1.14E-03
Reynoldszahl	-	1.03E+04

4.3 Randbedingungen (ohne Aquifer)

Pro Sonde wird in der stationären Simulation eine Einspeisung von 1 kW in den Untergrund vorgegeben. Hierdurch wird im Gegensatz zur üblichen Wärmenutzung der Untergrund erwärmt. Da die Zirkulationsrate fix vorgegeben ist, wird dies durch iterative Anpassung der Sonden-Eintrittstemperatur in FRACTure erreicht. Aufgrund der unterschiedlichen Auskühlung des Untergrundes wird diese Eintrittstemperatur für unterschiedliche Konfigurationen

auch unterschiedliche Werte annehmen. Im FE- Modell wurden die in Tab.3 beschriebenen hydraulische und thermische Randbedingungen festgelegt.

Tabelle 3: Randbedingungen im FE-Modell.

Hydraulische Randbedingungen		
Druckpotential bei der Ende der Sondenaustritte	m	0
Zufluss des Fluids bei Sondeneinlass	m ³ /s	2.39E-04
Fluss an Modellränder	m/s	0
Thermische Randbedingungen		
Eintrittstemperatur des Sondenfluids	°C	9 (für 5 m Sondenabstand) 8 (für 10 m Sondenabstand)
Oberflächentemperatur (Boden)	°C	0
Wärmefluss an der Basis und den seitlichen Modellrändern	W/m ²	0 ¹

5 Modell mit Aquifer

In die beiden Grundmodelle mit einem Sondenabstand von 5 m und einem Sondenabstand von 10 m wurde je in einer Tiefe von 50 m (bei Sondenlängen von 100 m) ein Aquifer von 1 m, resp. von 20 m Mächtigkeit eingebaut. Mit diesen 4 Modellen wurde der Effekt einer Strömung von 1 m/Tag und von 5 m/Tag berechnet. Dabei wurde auch der Effekt von zwei verschiedenen Anströmungsrichtungen (Strom 1 und Strom 2) an die 3 Sonden untersucht (vgl. Fig. 2). Insgesamt ergaben sich damit 16 verschiedene Modelle.

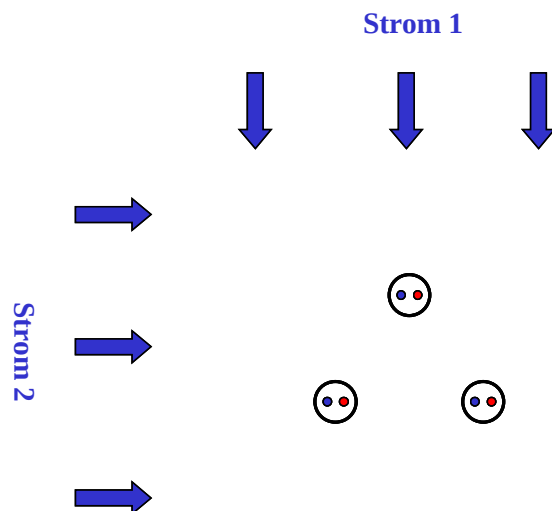


Fig. 2: Anströmungsrichtungen Strom 1 und Strom 2 an die drei Sonden (Aquifermodelle)

¹ Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit SBM, berücksichtigt das FE Modell keinen geothermischen Wärme-
fluss, wodurch der Wärmeaustausch ausschliesslich an der Modelloberfläche erfolgt. Dies entspricht nicht der
effektiven Gegebenheit.

6 Resultate

6.1 Transiente Simulation (ohne Aquifer)

Zur groben Abschätzung der Zeitkonstanten wurden transiente Berechnungen durchgeführt jeweils mit 10 m-Sondenabstand und mit 5 m Sondenabstand. Die entsprechenden Resultate sind in Figuren 3 und 4 dargestellt.

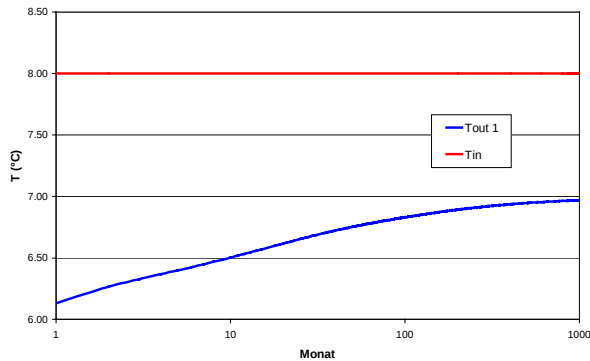


Fig. 3 Austrittstemperaturen einer Sonde (T_{out1}) und Eintrittstemperatur (T_{in}) für 10 m-Sondenabstand

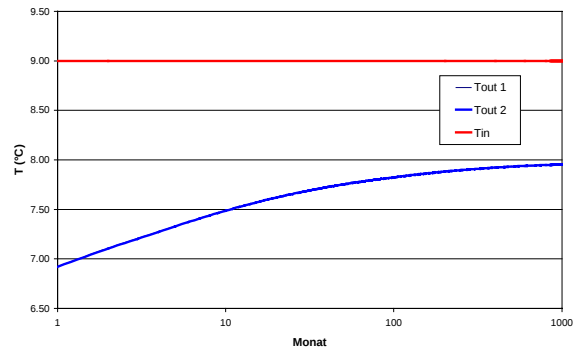


Fig. 4 Austrittstemperaturen für zwei Sonden (T_{out1} , T_{out2}) und Eintrittstemperatur (T_{in}) für 5m-Sondenabstand

Es zeigt sich, dass sich die konstante Entzugsleistung von 1 kW nach etwa 80 Jahren einstellt. Davor ist die Entzugsleistung wesentlich grösser und beträgt zu Beginn der Entnahme etwa den doppelten Wert.

6.2 Vergleich mit dem Programm SBM

Das Programm SBM (Eskilson, 1986) berechnet die Temperatur der Bohrlochwand in Abhängigkeit der Zeit. Dabei wird ein konstanter Wärmeeintrag von 10 W/m definiert, was einem Wärmeeintrag von 1 kW in ein 100 m tiefes Bohrloch entspricht. Bei 3 Erdwärmesonden ergibt dies einen Gesamteintrag von 3 kW. In SBM wurden dabei dieselben Materialeigenschaften und Randbedingungen gewählt wie in den Berechnungen mit FRACTure.

Um Temperaturwerte für einen stationären Zustand zu erhalten, wurden die Berechnungen mit dem SBM für 10'000 Jahren durchgeführt. Die Resultate von FRACTure wurden über die Bohrlochlänge gemittelt, um sie mit den Werten von SBM vergleichen zu können (Tabelle 4).

Tabelle 4: Vergleich der berechneten mittleren Bohrlochtemperaturen von den Programmen SBM und FRACTure.

[°C]	Sondenabstand 10 m	Sondenabstand 5 m
FRACTure	5.59	6.58
SBM	5.67	6.40
Differenz [K]	0.08	-0.18
Differenz [%]	1.4%	-2.7%

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Resultaten der Berechnungen mit SBM und FRACTure.

6.3 Einfluss von Grundwasserströmungen

Im allgemeinen führt ein strömendes Grundwasser einen Teil der durch die Sonde eingebrachten Wärme ab, wodurch sich der Wärmeeintrag in den Untergrund erhöht. Die Berechnungen mit den 16 verschiedenen Modellen mit Grundwasserströmung ergaben folgende Resultate:

Tabelle 5: Zuwachs des Wärmeeintrags auf Grund einer Aquiferströmung bei Sondenabstand von 5 m

Strömungs- richtung	Aquifermächtig- keit [m]	Wärmeeintrag [kW]		Zuwachs Wärmeeintrag [in % gegenüber 3 kW]	
		1 m/Tag	5 m/Tag	1 m/Tag	5 m/Tag
Strom 1	1	3.43	3.57	14	19
Strom 2	1	3.43	3.56	14	19
Strom 1	20	4.62	5.10	54	70
Strom 2	20	4.56	5.00	52	67

Tabelle 6: Zuwachs des Wärmeeintrags aufgrund einer Aquiferströmung bei Sondenabstand von 10 m

Strömungs- richtung	Aquifermächtig- keit [m]	Wärmeeintrag [kW]		Zuwachs Wärmeeintrag [in % gegenüber 3 kW]	
		1 m/Tag	5 m/Tag	1 m/Tag	5 m/Tag
Strom 1	1	3.38	3.50	13	17
Strom 2	1	3.38	3.50	13	17
Strom 1	20	4.39	4.80	46	60
Strom 2	20	4.33	4.72	44	57

Es zeigt sich, dass sich durch eine Grundwasserströmung ein signifikanter Leistungszuwachs (bis zu 70%, vgl Tabelle 5) ergibt. Die Signifikanz der Strömungs- und Aquiferparameter sind wie folgt:

Tabelle 7: Signifikanz der Strömungs- und Aquiferparameter auf die Einzugs-/Eintragsleistung einer Mehrfach-Sondenanlage aus 3 Sonden, Dreiecksanordnung

Signifikanz	Parameter
Hoch	Aquifermächtigkeit
Mittel	Strömungsgeschwindigkeit
Tief	Anströmrichtung

7 Methodology used with the g-function concept

7.1 The g-function concept

Claesson and Eskilson have shown by numerical studies that the thermal process within the borehole can be separated from the thermal process in the ground by considering the average temperature of the borehole wall T_b (CLAESSON and ESKILSON, 1987a). When a constant heat extraction rate q_1 [W m^{-1}] is extracted from a borehole, the evolution of the borehole wall temperature T_b [$^{\circ}\text{C}$] can be calculated with the help of a dimensionless g-function $g(Es, r_b/H)$.

$$T_b(t) = T_m - \frac{q_1}{2\pi\lambda} g(Es, r_b/H)$$

The undisturbed ground temperature T_m [$^{\circ}\text{C}$] is the average temperature of the ground layer crossed by the borehole before heat is extracted. H [m] is the borehole length along which heat is extracted. H is called the active borehole length. The total depth of the borehole is $D+H$, where D [m] is the distance from the ground surface to the top part of the borehole where heat is extracted. The radius of the borehole is r_b [m] and the ground thermal conductivity is denoted λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]. Es [-] is called the Eskilson number and is defined by the ratio t/t_s . The time t_s [s] is the time scale associated to a single borehole so that the steady state solution provides a good approximation of the borehole temperature.

$$t_s = \frac{H^2}{9a}$$

The thermal diffusivity a [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] is defined by the ratio $\lambda/\rho C$, where ρC [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$] is the ground volumetric heat capacity.

The solution for a variable heat extraction rate $q(t)$ is obtained from the solution for a constant heat extraction step q_1 by using the principle of superposition.

The concept of g-function can be applied to any borehole configuration. Eskilson did calculate many different configurations with the Superposition Borehole Model (SBM) he developed (ESKILSON and CLAESSON, 1987). The g-function depends also on geometric parameters, such as the dimensionless borehole spacing B/H . With few boreholes, the dependence on D/H was found to be small (CLAESSON and ESKILSON, 1987b).

The g-functions do not depend on the parameters for the heat exchanger in the borehole. For a different borehole radius r_1 [m] the dependence is simple (CLAESSON and ESKILSON, 1987b).

$$g(Es, r_1/H, \dots) = g(Es, r_b/H, \dots) - \ln\left(\frac{r_1}{r_b}\right)$$

7.2 Methodology used for the estimation of long term effects

Calculated for a given borehole configuration, the g-functions determine, together with the ground properties, the long-term 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 (ground coupled heat pump system); as previously mentioned 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.

G-functions are calculated for two borehole configurations. They are 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). The two selected configurations are:

Borehole configuration

- 2 boreholes
- 3 boreholes arranged in a triangular pattern (as in chapter 3)

Typical ground properties and borehole length are defined and used for the computation of the cases. They are:

Ground thermal conductivity

- 1.0 - 1.5 - 2.0 - 3.0 - 4.0 Wm⁻¹K⁻¹

Ground volumetric heat capacity

- 2.4 MJm⁻³K⁻¹

Borehole length

- 50 - 100 - 200 m

For each borehole configuration, 15 cases are calculated. The long term thermal influence is expressed in terms of additional temperature drop relative to a single borehole of **same length**. The temperature drop is plotted in relation to the borehole spacing and after several period of times. They are:

Period of time

- 5 - 10 - 25 - 50 - 100 - 200 years

The long term temperature drop is calculated for a reference heat extraction rate of 10 W/m; it is actually proportional to the heat extraction rate, thus easily converted to other values. (A constant heat extraction rate of 10 W/m corresponds to an annual heat extraction of 87.6 kWh/m.)

As previously mentioned, the long term temperature drop induces a decrease of the heat pump thermal performance. In practice, the sensitivity of the heat pump COP to the fluid temperature in the evaporator is about 0.1 COP/K (KÄLIN and HOPKIRK 1991). With this value, the long term thermal influence is also plotted in terms of the reduction of the heat pump COP.

8 Long term thermal influence (pure heat conduction case)

8.1 Depth of the borehole

The depth of the borehole influences the time scale of the thermal process until a stationary state is obtained. Figure 5 shows the time evolution of the temperature decrease at the borehole wall for a constant heat extraction rate of 10 W/m. The temperature decrease is shown for a single borehole heat exchanger, but for three different borehole lengths (50, 100 and 200 m).

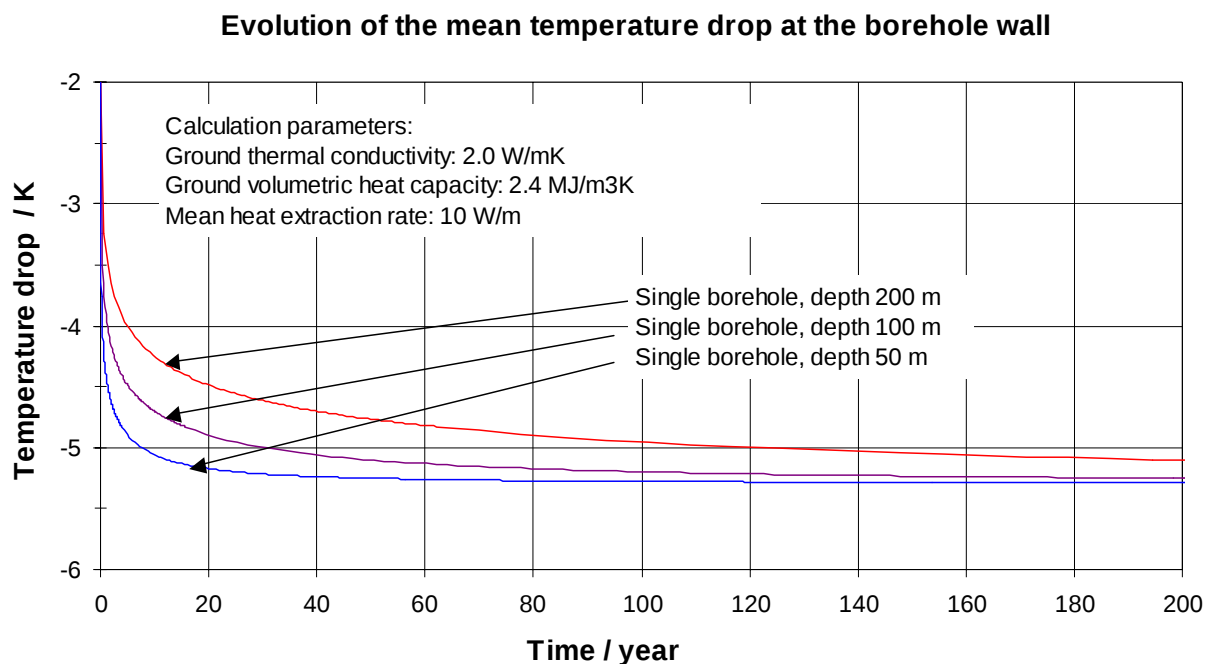


Fig. 5 Temperature drop at the borehole wall for a heat extraction rate of 10 W/m.

The temperature drop is the same in stationary state. As the borehole depth has an influence on the timescale of the thermal process, the evolution of the temperature drop at the borehole wall is not the same for boreholes of different depths. The temperature drop is slower with deeper boreholes.

In the following sections, the long-term influence of neighbouring boreholes is assessed with the comparison to the situation with a single borehole of same depth. **It means that the long-term influence of boreholes of different depths cannot be directly compared.**

8.2 Effect of a thermal recharge of the ground

The importance of a thermal recharge of the ground is easily assessed with the resulting average heat extraction rate. If 50% of the extracted annual energy is injected back into the ground, the resulting heat extraction rate is decreased by a factor 2. The corresponding long term effects, which are proportional to the average heat extraction rate, are also decreased by a factor 2. The temperature drop or COP drop shown the graphs is simply corrected (multiplied) by the following factor:

$$F_{\text{correction}} = \frac{(Q_{\text{ext}} - Q_{\text{inj}})}{87.6}$$

Where

Q_{ext} : annual thermal energy extracted from the ground per meter borehole [$\text{kWh m}^{-1} \text{y}^{-1}$]

Q_{inj} : annual thermal energy injected back into the ground per meter borehole [$\text{kWh m}^{-1} \text{y}^{-1}$]

87.6 [$\text{kWh m}^{-1} \text{y}^{-1}$] : annual thermal energy extracted with an average heat extraction rate of 10 W/m. The curves in the graphs are calculated with this value.

8.3 Estimation of the long term influence for the two borehole configurations

The long-term influence can be estimated in relation to the borehole spacing with the help of the 15 graphs calculated for each of the two borehole configurations (see appendix E). For parameters in the ranges given in section 7.2, the long-term influence can be extrapolated from the graphs. Then the relation given in section 8.2 can be used to correct for the average heat extraction rate. Sensitivity to the ground volumetric heat capacity is, with common values, not so important.

As can be seen from the graphs, a lower ground thermal conductivity induces a larger long-term influence. However, with a higher thermal conductivity, the average mean heat extraction rate would be larger, which tends to increase the long-term influence. Furthermore the graphs cannot be used to directly compare two borehole configurations of different depths. Other factors should also be taken into consideration, such as the average ground temperature along the borehole. This temperature normally increases with a longer borehole thanks to the geothermal heat flux. The movement of a regional ground water flow is another factor which may also have a strong influence (see chapter 6). For all these reasons, the graphs should only be used to estimate the long term influence of a particular problem.

9 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wurde anhand einer Dreieckskonfiguration von 3 Erdwärmesonden mit einem Abstand von jeweils 5 m und 10 m die Simulation eines Wärmeeintrages von 3 x 1 kW in den Untergrund mit zwei verschiedenen Rechenprogrammen durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass unter den gemachten Annahmen (homogener Untergrund, konstante Materialparameter, nur Wärmeleitungsprozesse, stationärer Zustand) für diese Konfiguration die Berechnungen mit dem Programm SBM (g-Funktion) und dem detaillierteren Programm FRACTure (3D Finite Elemente) vergleichbare Resultate in Bezug auf den Wärmeeintrag in den Untergrund erzielt werden.

Die Berechnungen mit dem Programm FRACTure haben aber auch gezeigt, dass der Wärmeeintrag der 3 Erdwärmesonden infolge einer Anwesenheit eines Aquifers von 1 m und 20 m Mächtigkeit und einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/Tag und 5 m/Tag um bis zu 70% höher liegt. Die Anströmungsrichtung an diese Sondenkonfiguration war dabei nur von untergeordneter Bedeutung.

Die hier durchgeführte transiente Berechnung zeigen nur grob die Zeitkonstante für diese Systeme an. Dieser Effekt sollte unbedingt in einer folgenden Phase untersucht werden. Es ist damit zu rechnen, dass der Anstieg bei fixierter Entzugsleistung langsamer vonstatten geht.

In diesen Berechnungen wurden Effekte wie die starke Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit im Bereich zwischen 0°C und 40°C, inhomogener Untergrund, konstanter oder variierender Leistungsentzug/-eintrag in das System nicht berücksichtigt. Diese Effekte sollen auch in eine weitere Untersuchungen miteinbezogen werden.

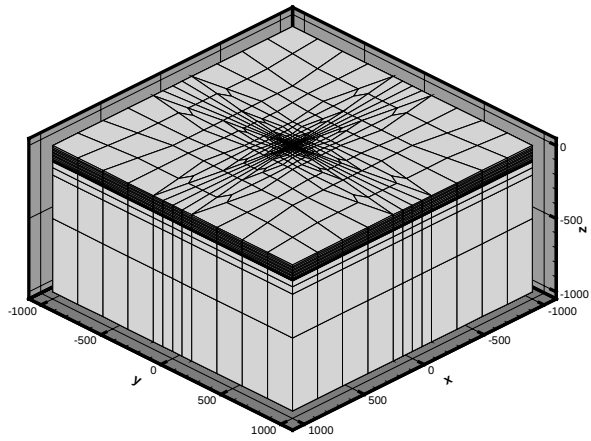
The g-function concept is used to calculate the long term influence of a borehole configuration in the case of pure heat conduction in the ground. A set of graphs is produced for two different borehole configurations (two-boreholes and three-boreholes forming an equilateral triangle). The main purpose is to provide the reader with a quick estimate of the long term influence for his particular problem. Depending on the need and success of such an approach, the methodology can be applied to other borehole configurations.

10 Literaturverzeichnis

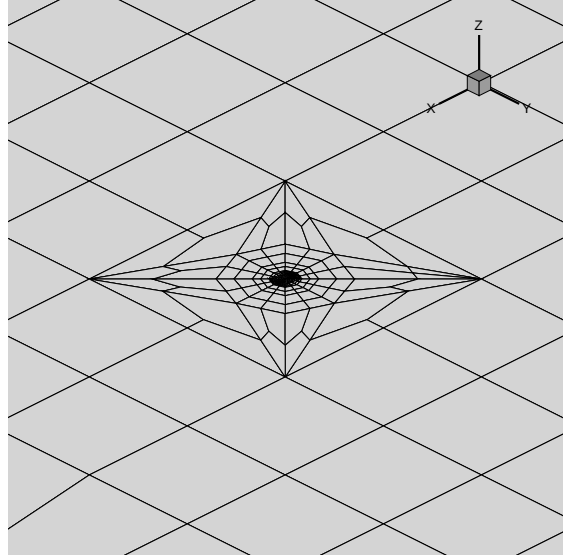
- BIRD R. B., STEWART W.E. und LIGHTFOOT E. N. (1960): Transport Phenomena, Wiley International Edition, New York, Kapitel 2.3 und 2.4, S. 42-54.
- BRENNI R. (2000): Modellsimulationen von Tiefenerdwärmesonden-Anlagen an den Fallbeispielen Weggis und Medyaguino, Diplomarbeit an der Abt. für Erdwissenschaften der ETH Zürich.
- CLAESSON J., ESKILSON P. (1987a): Conductive Heat Extraction by Thermally Interacting Deep Boreholes. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.
- CLAESSON J., ESKILSON P. (1987b): Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.
- 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.
- ESKILSON P., CLAESSON J. (1987): Simulation Model for Thermally Interacting Heat Extraction Boreholes. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.
- 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.

11 Anhang

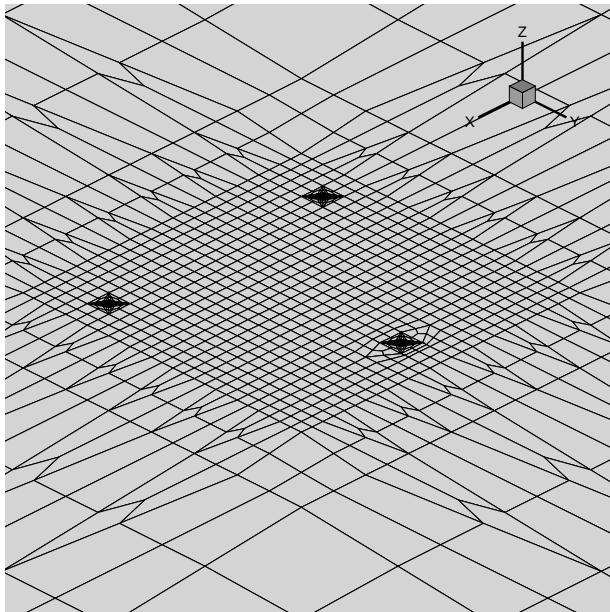
11.1 Anhang A - Graphische Darstellungen des 3D-Gitters –



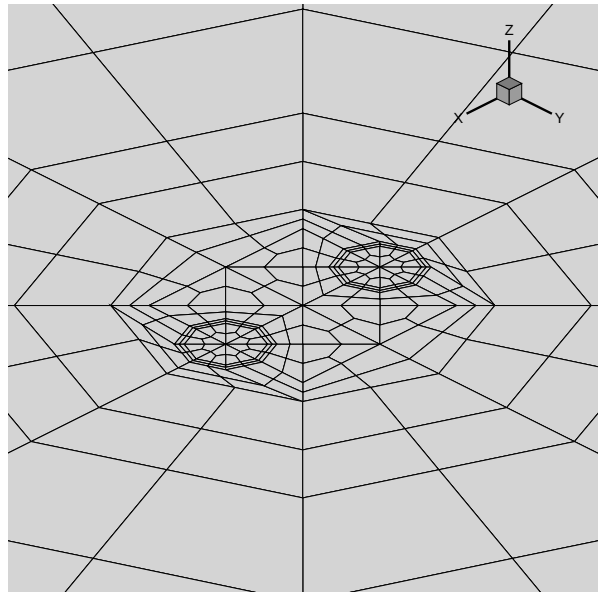
Darstellung des 3D_Gitters.



3D-Gitter (Zoom 2).



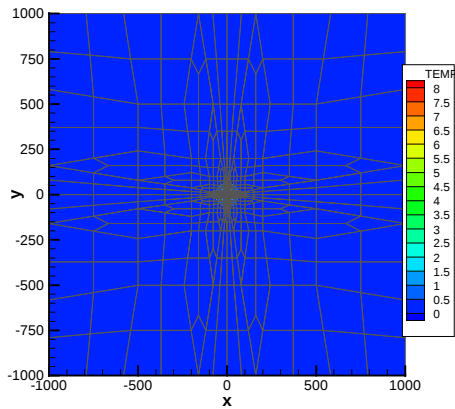
3D-Gitter (Zoom 1).



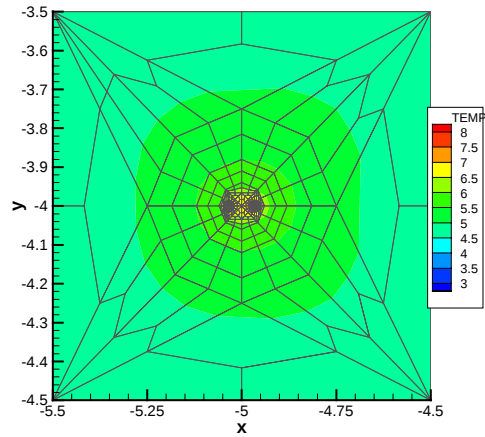
3D-Gitter (Zoom 3).

11.2 Anhang B - Temperaturfeld mit 10m-Bohrungsabstand -

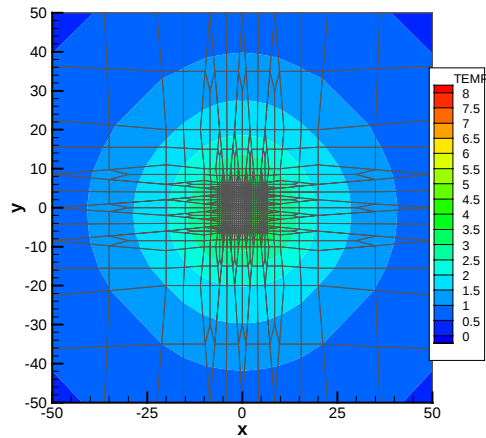
Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50$ m



Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50$ m



Temperaturfeld um eine einzige Bohrung (zoom 3).



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

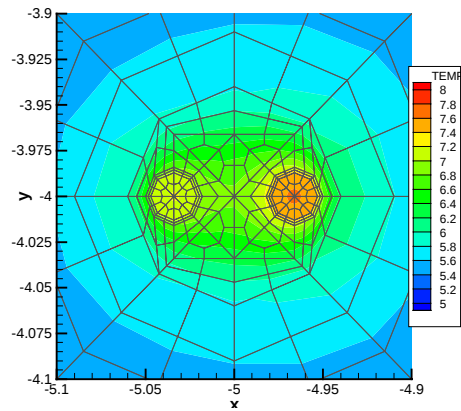
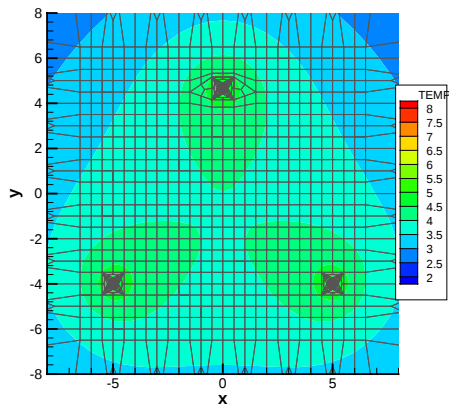
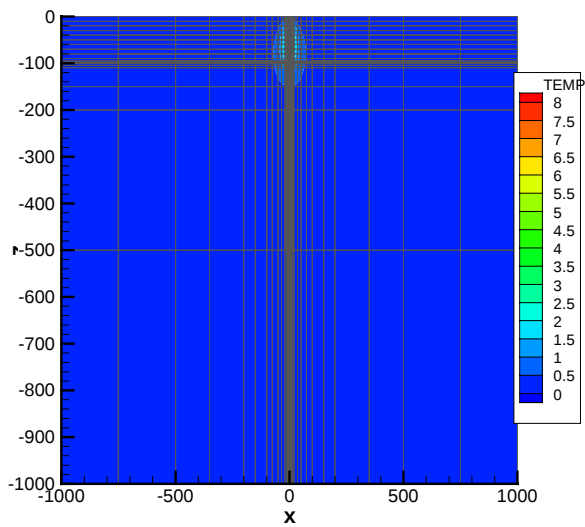


Fig.6. Temperaturverteilung in der Bohrung (zoom 4).

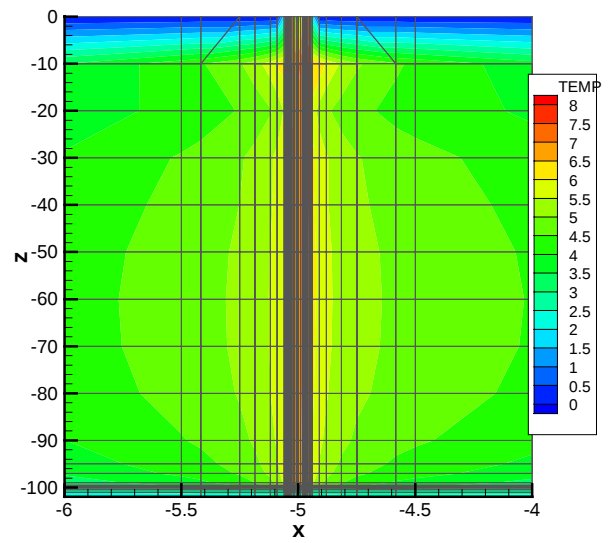


Einfluss der einzelnen Bohrungen auf das Temperaturfeld (zoom 2).

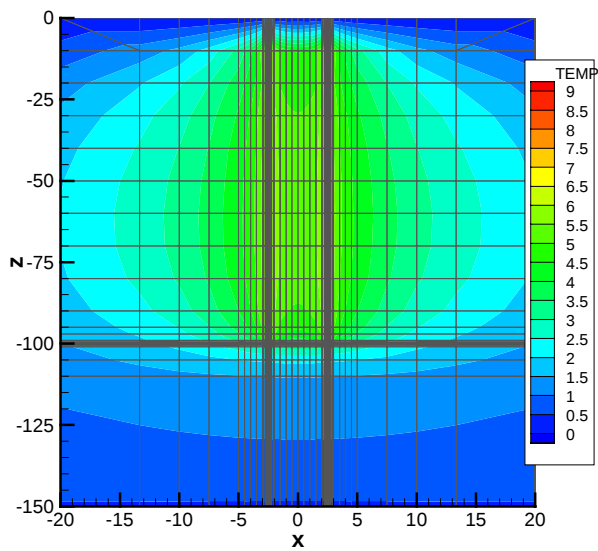
Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -4$ m



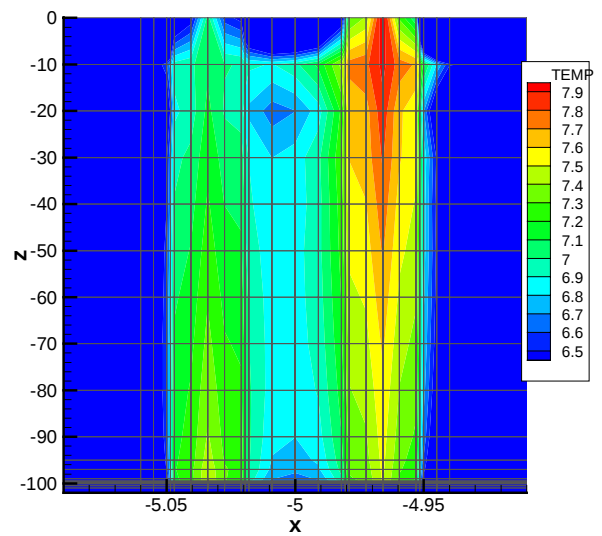
Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -4$ m.



Einfluss einer einzelnen Bohrung auf Temperaturfeld (zoom 2).



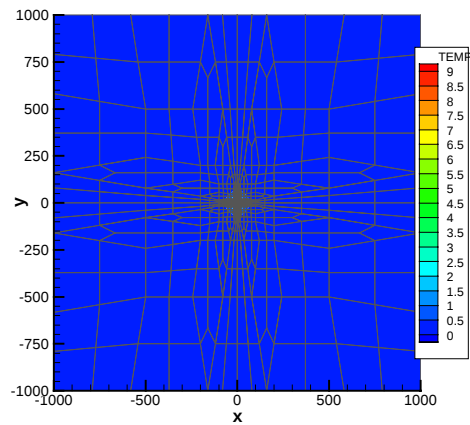
Einfluss von 2 Bohrungen auf Temperaturfeld (zoom 1).



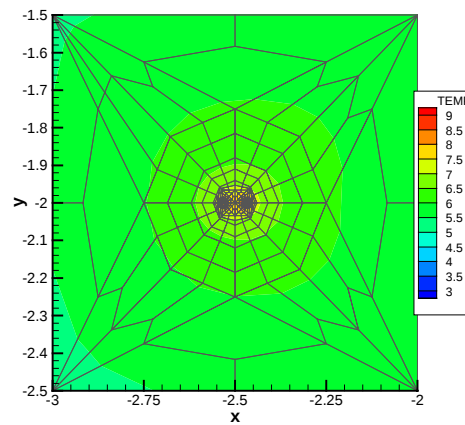
Einfluss einer einzelnen Bohrung auf Temperaturfeld (zoom 3).

11.3 Anhang C - Temperaturfeld mit 5m-Bohrungsabstand-

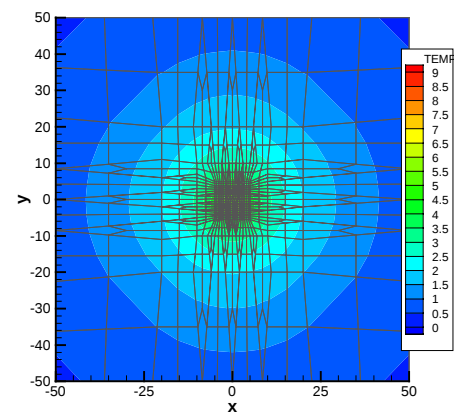
Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50$ m



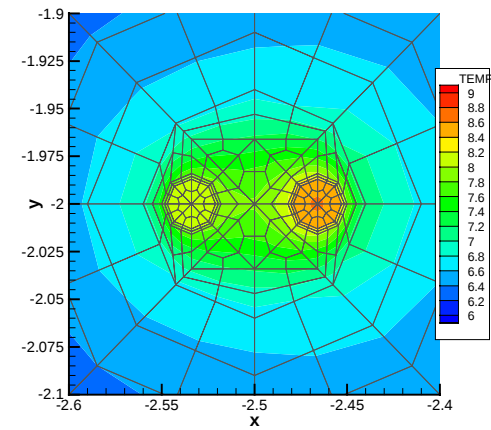
Horizontale Temperaturverteilung bei $z = -50$



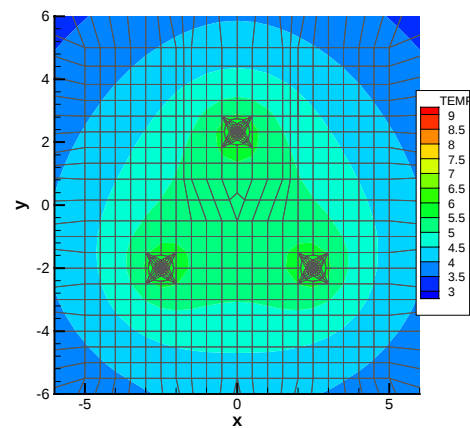
Temperaturfeld um eine einzige Bohrung (zoom 3).



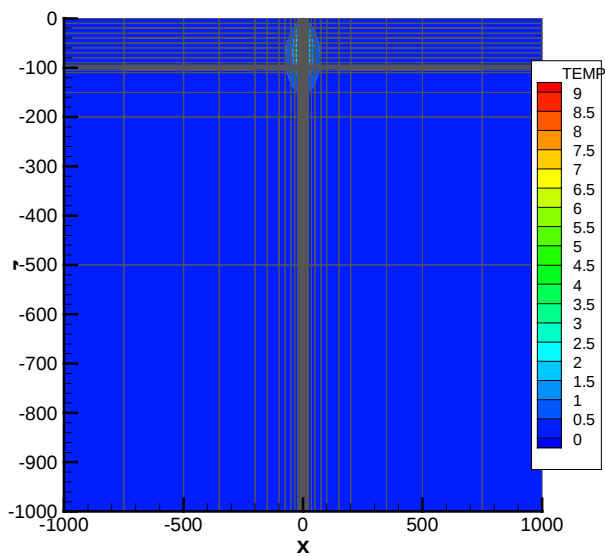
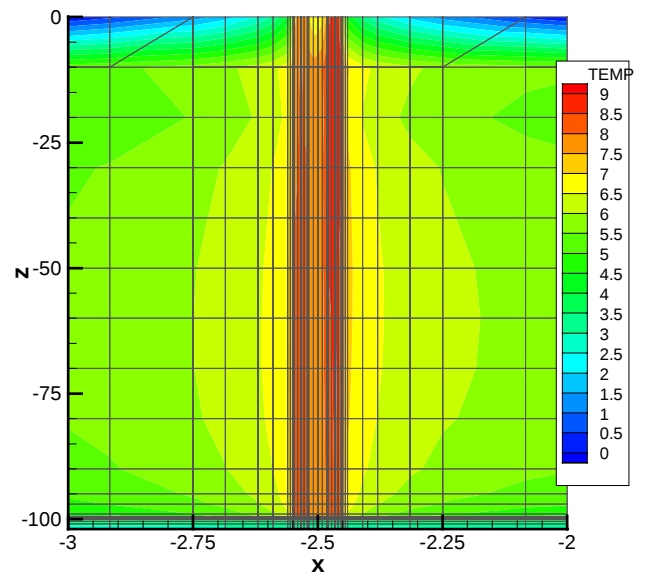
Gesamter Einfluss der 3 Bohrungen auf das Temperaturfeld (zoom 1).



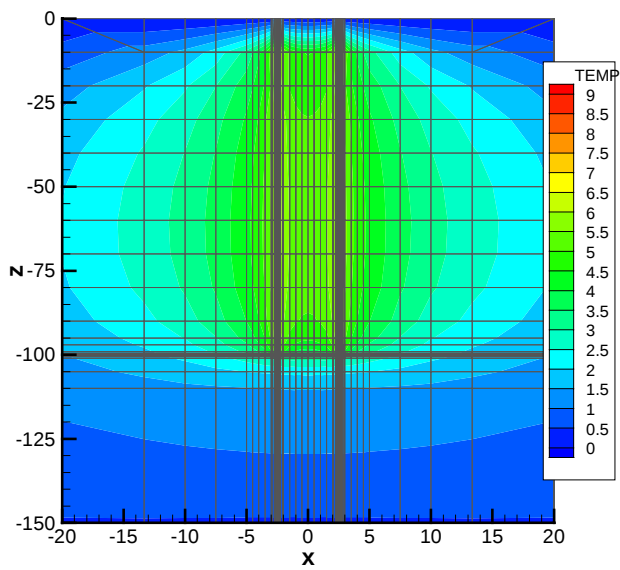
Temperaturverteilung in der Bohrung (zoom 4).



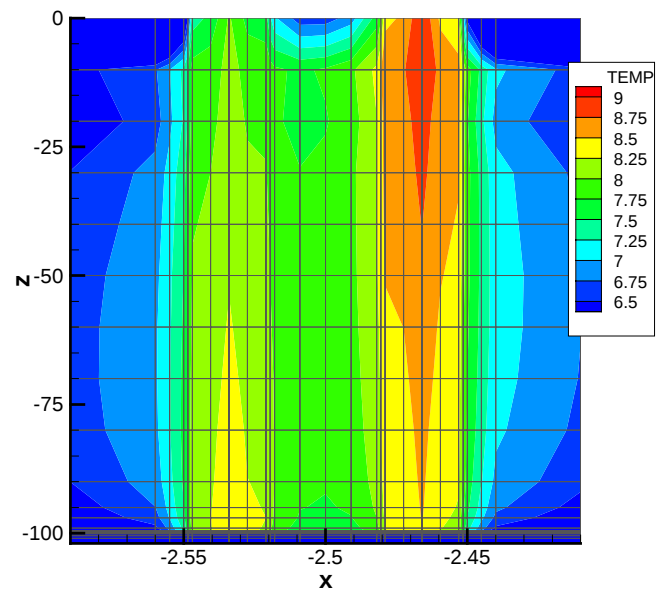
Einfluss der einzelnen Bohrungen auf das Temperaturfeld (zoom 2).

Vertikale Temperaturverteilung bei $y = -2$ mVertikale Temperaturverteilung bei $y = -2$ m.

Einfluss einer einzelnen Bohrung auf Temperaturfeld (zoom 2).

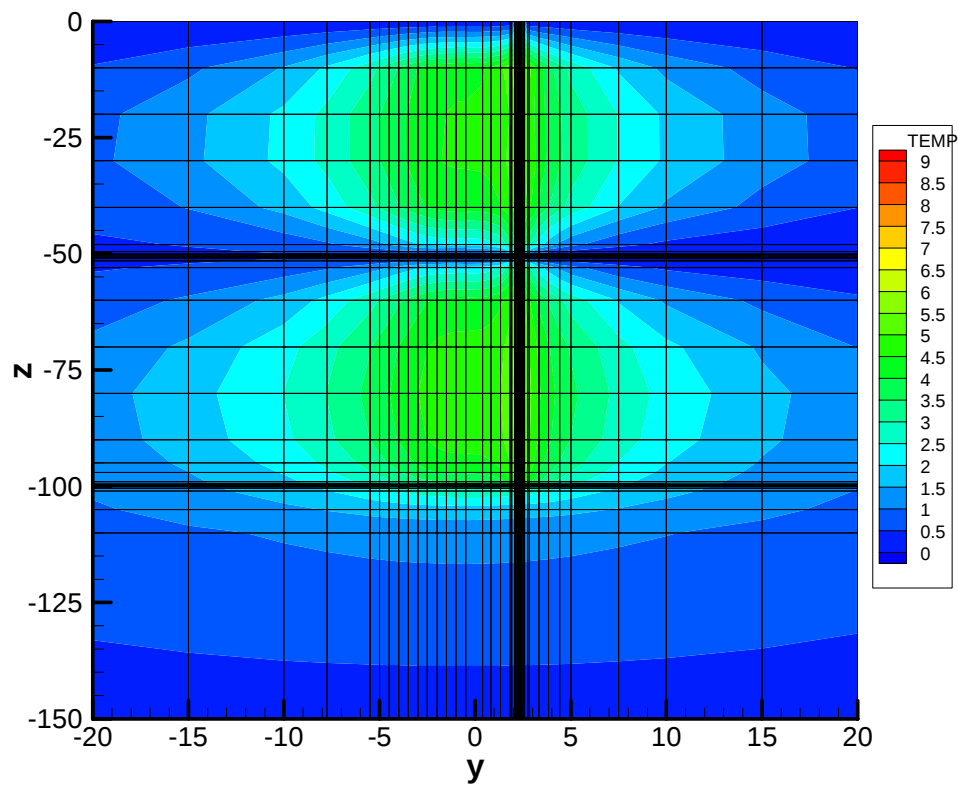


Einfluss von 2 Bohrungen auf Temperaturfeld (zoom 1).

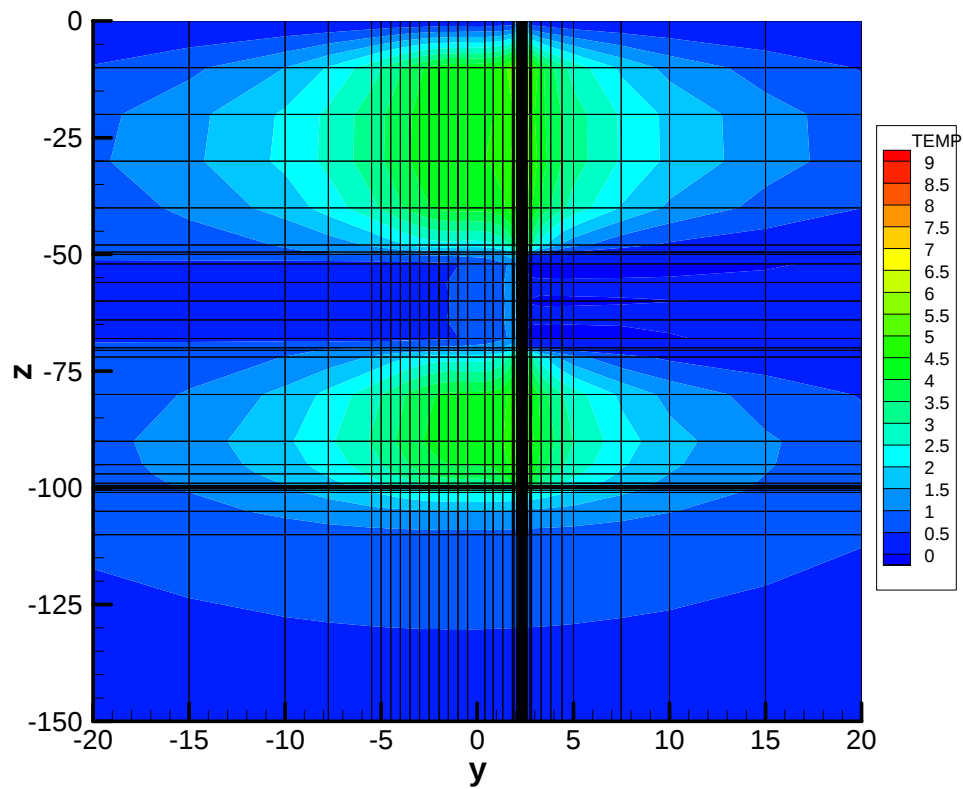


Einfluss einer einzelnen Bohrung auf Temperaturfeld (zoom 3)

11.4 Anhang D - Temperaturfeld mit Aquifer, 5 m Bohrungsabstand



Vertikale Temperaturverteilung bei $x = 0$ m, 1 m Aquifermächtigkeit



Vertikale Temperaturverteilung bei $x = 0$ m, 20 m Aquifermächtigkeit

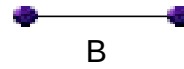
11.5 Appendix E – Graphical estimation of long term influence for 2 borehole configurations

The long-term influence can be estimated in relation to the borehole spacing with the help of the 15 graphs calculated for each of the two borehole configurations (two boreholes and three boreholes arranged in a triangular pattern). For parameters in the ranges given in section 7.2, the long-term influence can be extrapolated from the graphs. Then the relation given in section 8.2 can be used to correct for the average heat extraction rate. Sensitivity to the ground volumetric heat capacity is, with common values, not so important.

As can be seen from the graphs, a lower ground thermal conductivity induces a larger long-term influence. However, with a higher thermal conductivity, the average mean heat extraction rate would be larger, which tends to increase the long-term influence. Furthermore the graphs cannot be used to directly compare two borehole configurations of different depths. Other factors should also be taken into consideration, such as the average ground temperature along the borehole. This temperature normally increases with a longer borehole thanks to the geothermal heat flux. The movement of a regional ground water flow is another factor which may also have a strong influence (see chapter 6). For all these reasons, the graphs should only be used to estimate the long term influence of a particular problem.

Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

1.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 1.0 W/mK

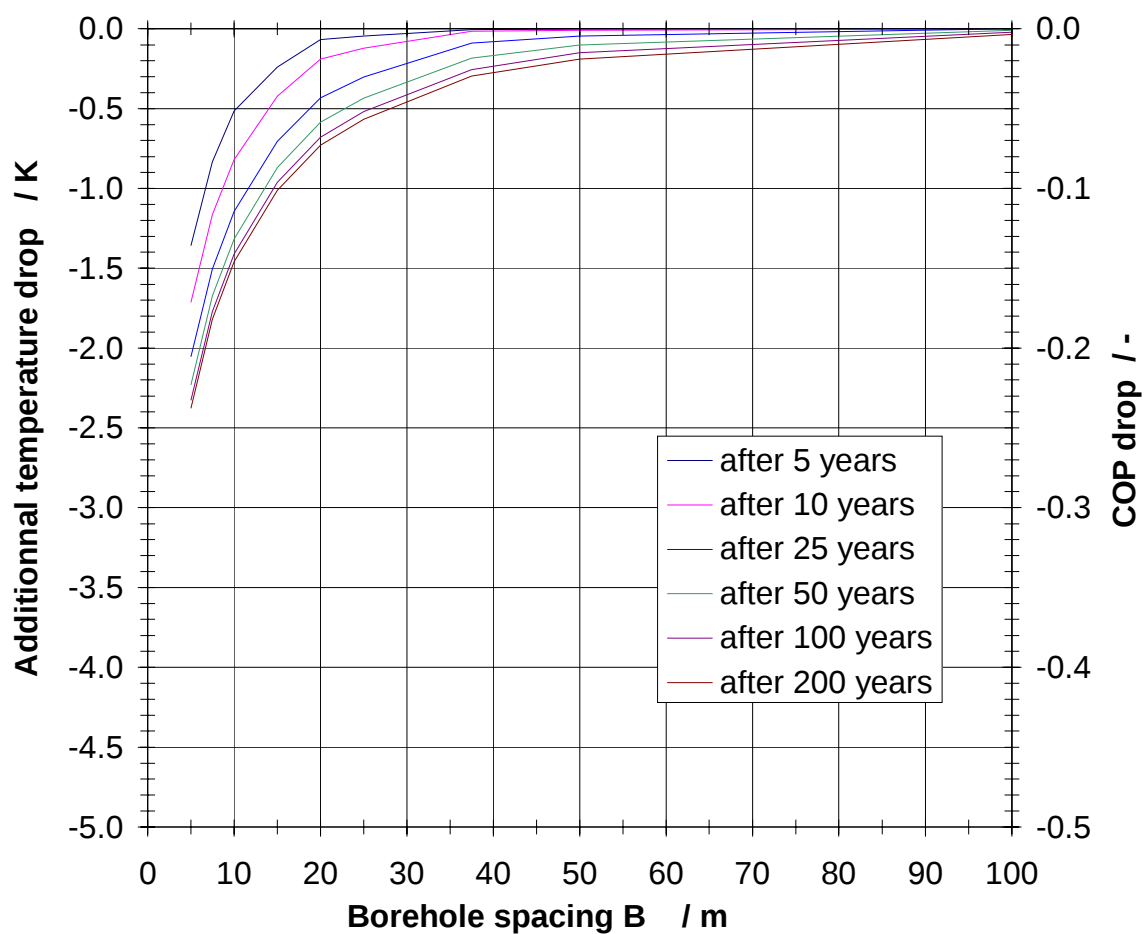
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

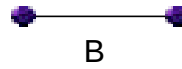
Time scale: 21 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 50m boreholes relative to a single one of 50m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

1.5 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 1.5 W/mK

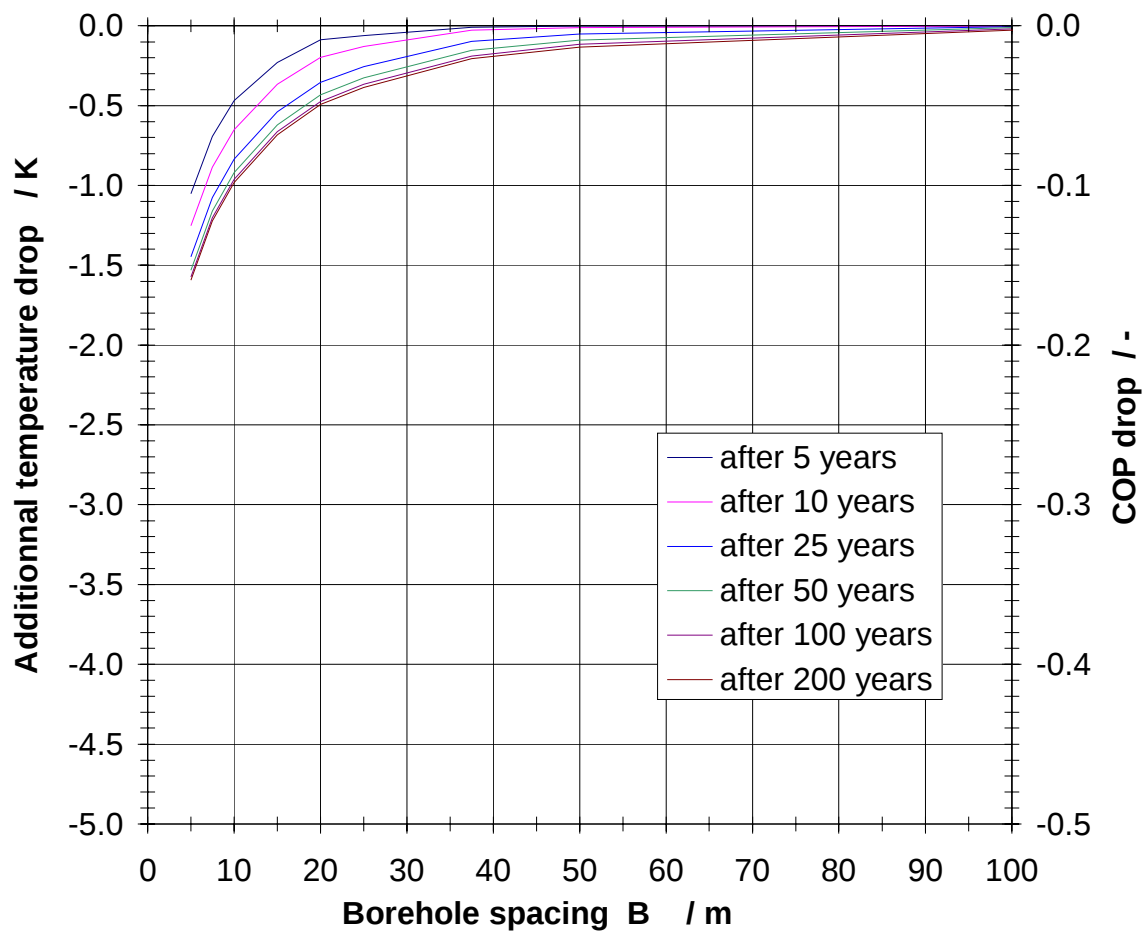
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

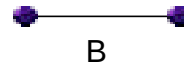
Time scale: 14 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 50m boreholes relative to a single one of 50m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

2.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 2.0 W/mK

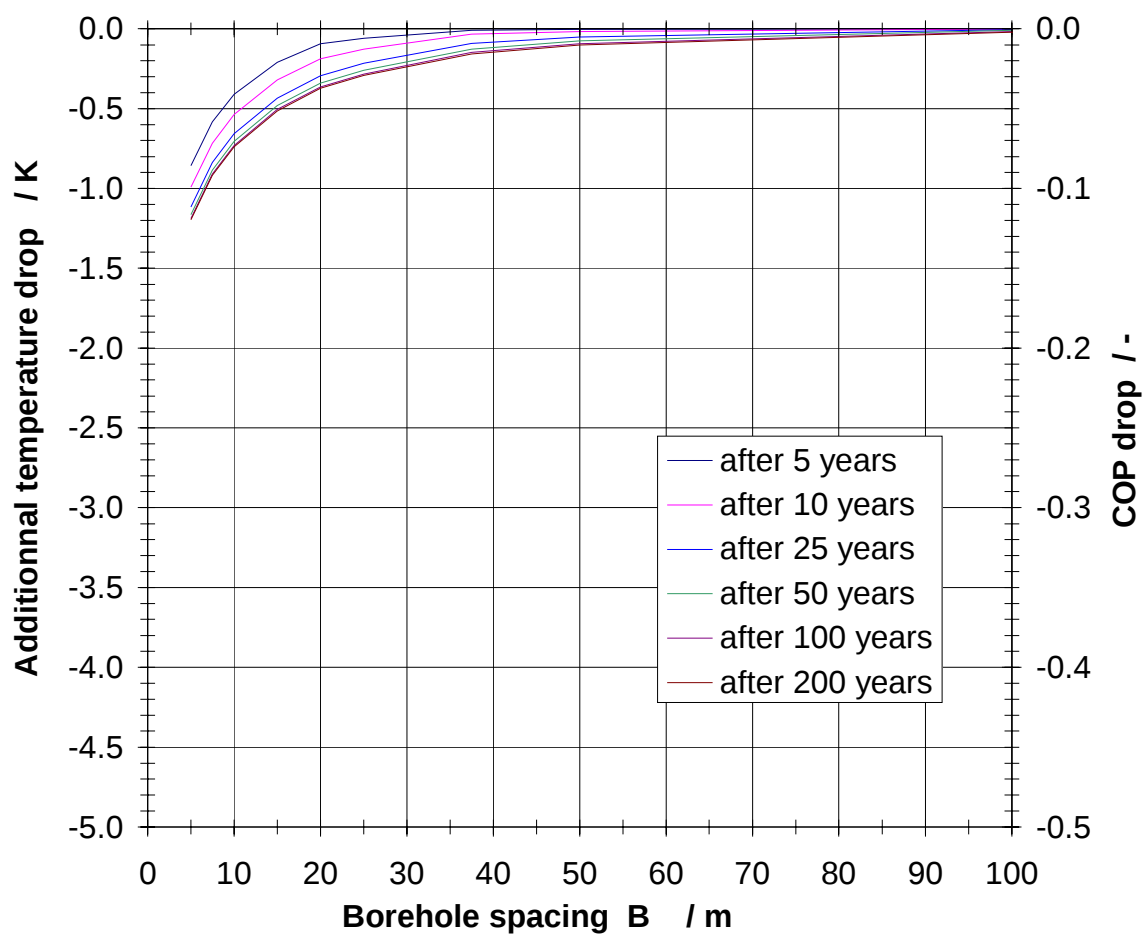
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

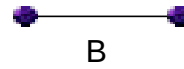
Time scale: 11 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 50m boreholes relative to a single one of 50m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

3.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 3.0 W/mK

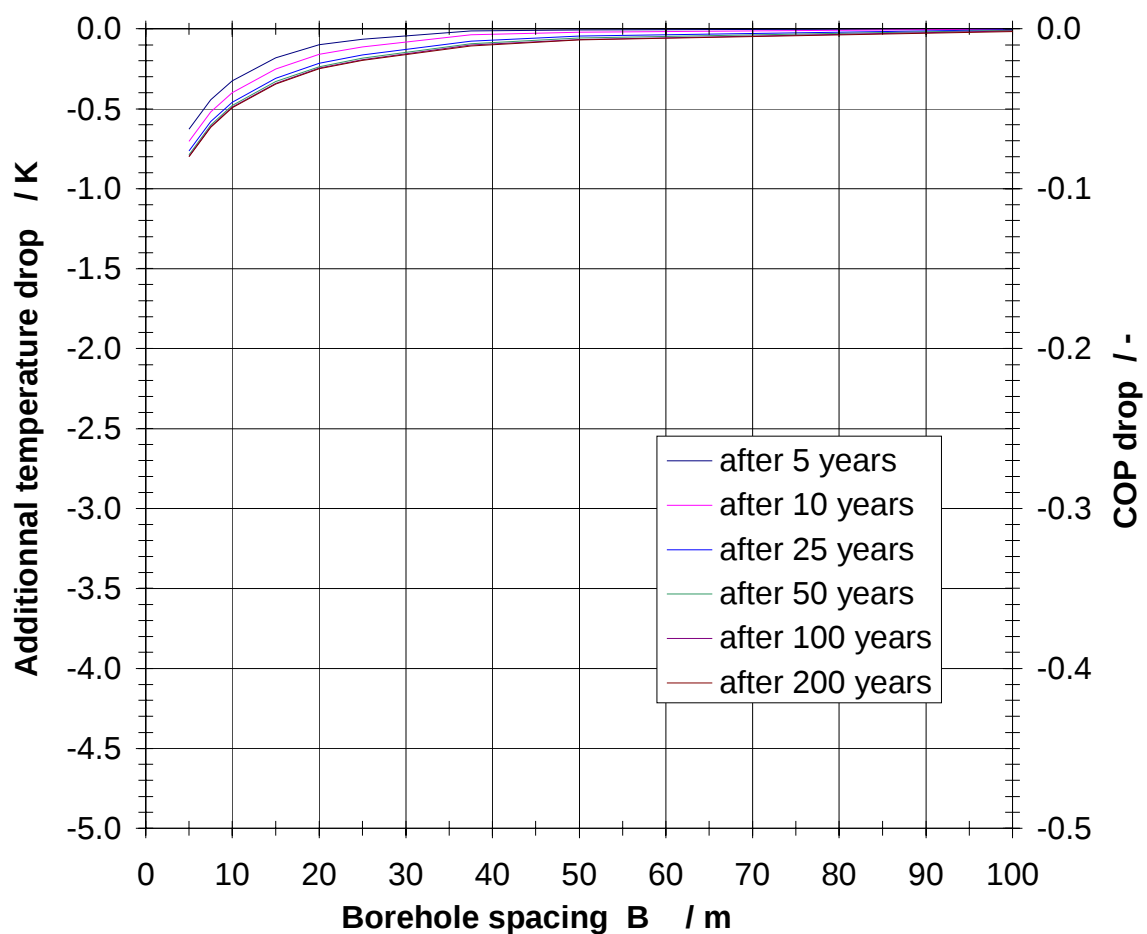
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

qo 10 W/m

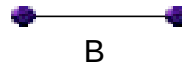
Time scale: 7 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

**Long term influence of the two 50m boreholes
relative to a single one of 50m**



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

4.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole **50 m**

λ borehole **4.0 W/mK**

C ground **2.4 MJ/m³K**

a ground **$1.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$**

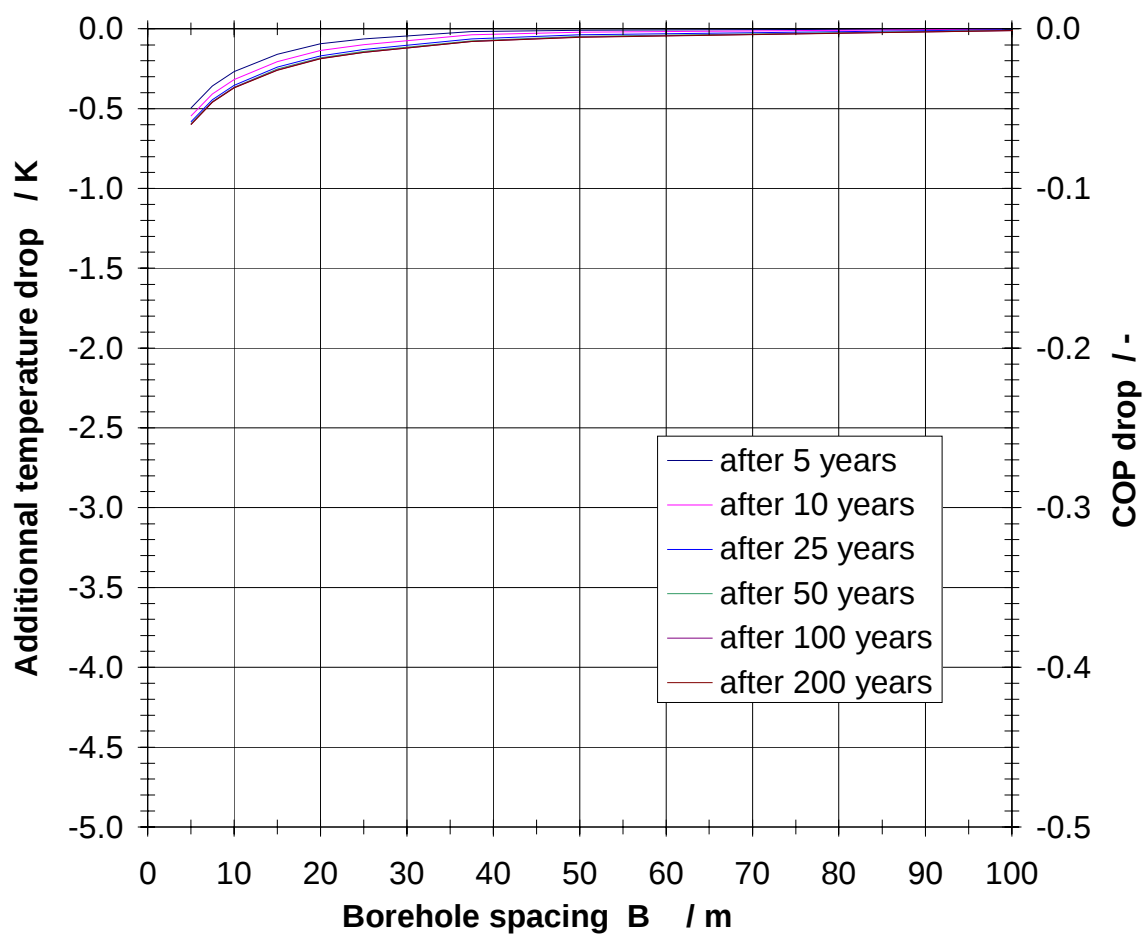
qo 10 W/m

Time scale **5 years**
($t_s = H^2/9a$)

5 years

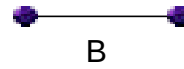
$$(t_s = H^2/9a)$$

Long term influence of the two 50m boreholes relative to a single one of 50m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

1.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 1.0 W/mK

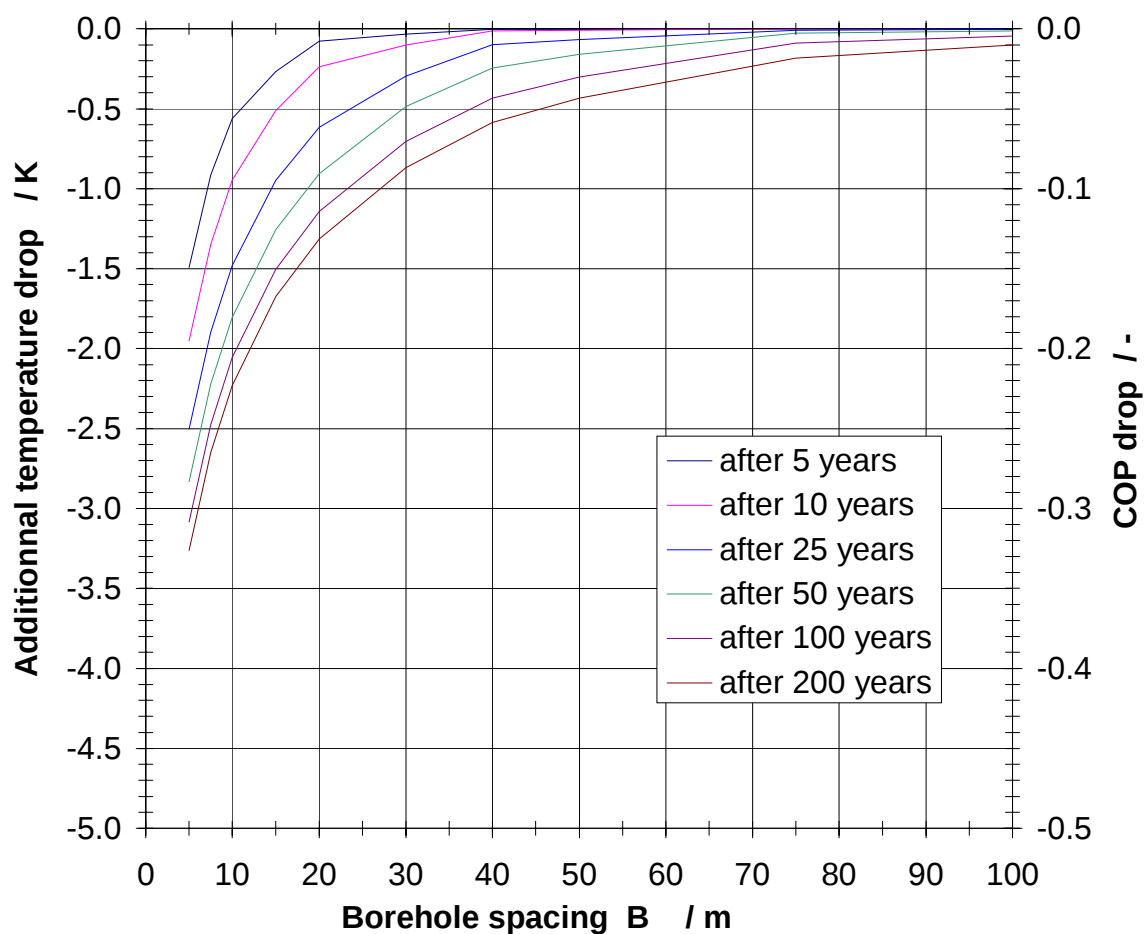
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

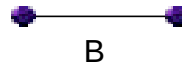
Time scale: 85 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole **100 m**

Ground thermal conductivity **1.5 W/mK**

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 1.5 W/mK

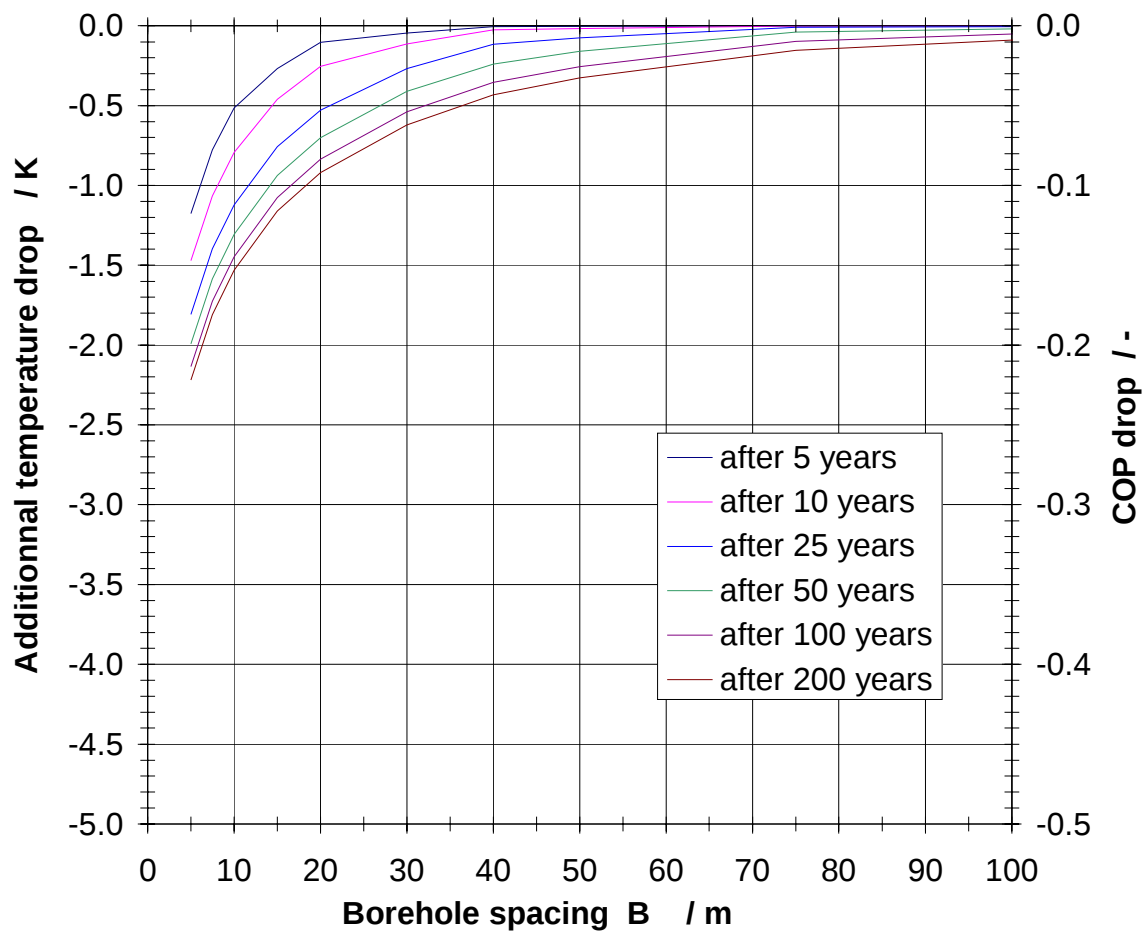
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

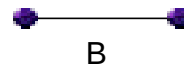
Time scale: 56 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

2.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 2.0 W/mK

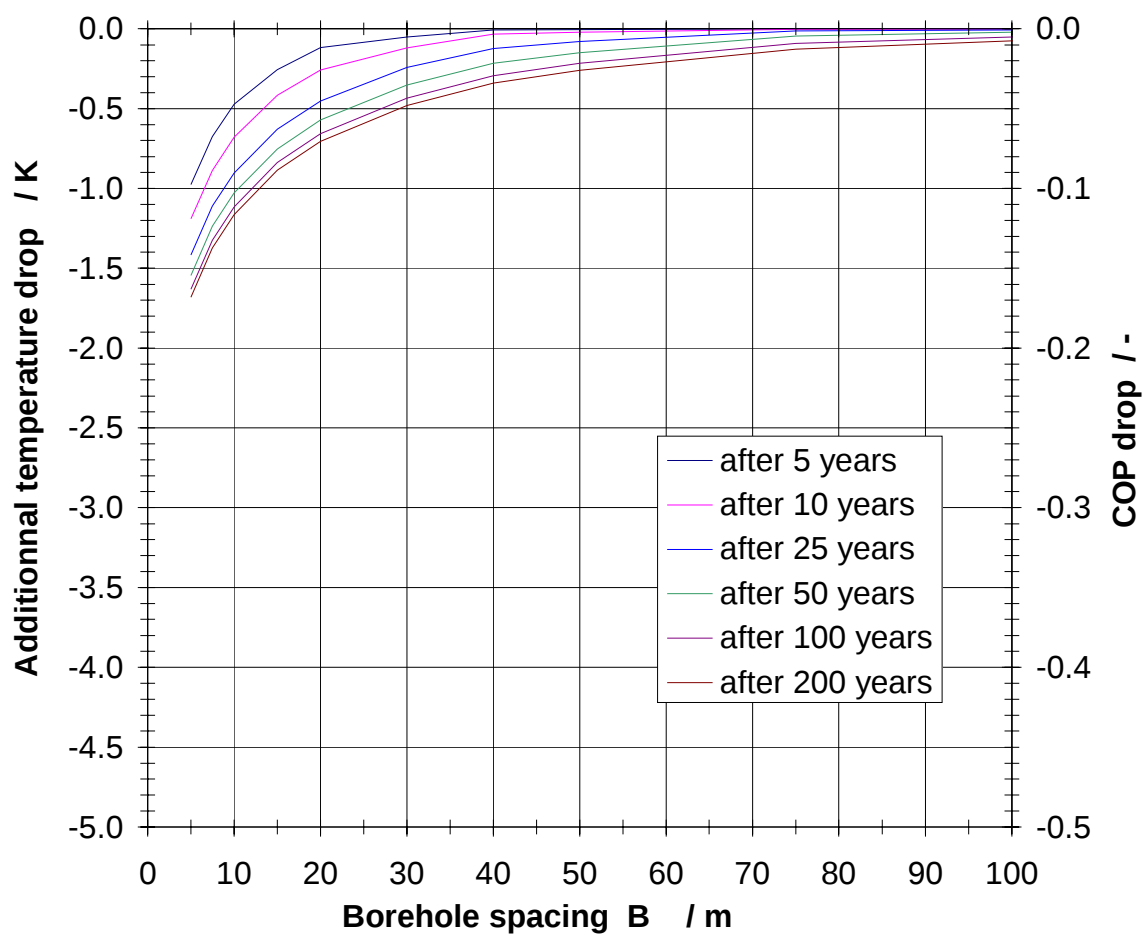
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

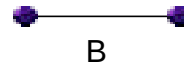
Time scale: 42 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

3.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 3.0 W/mK

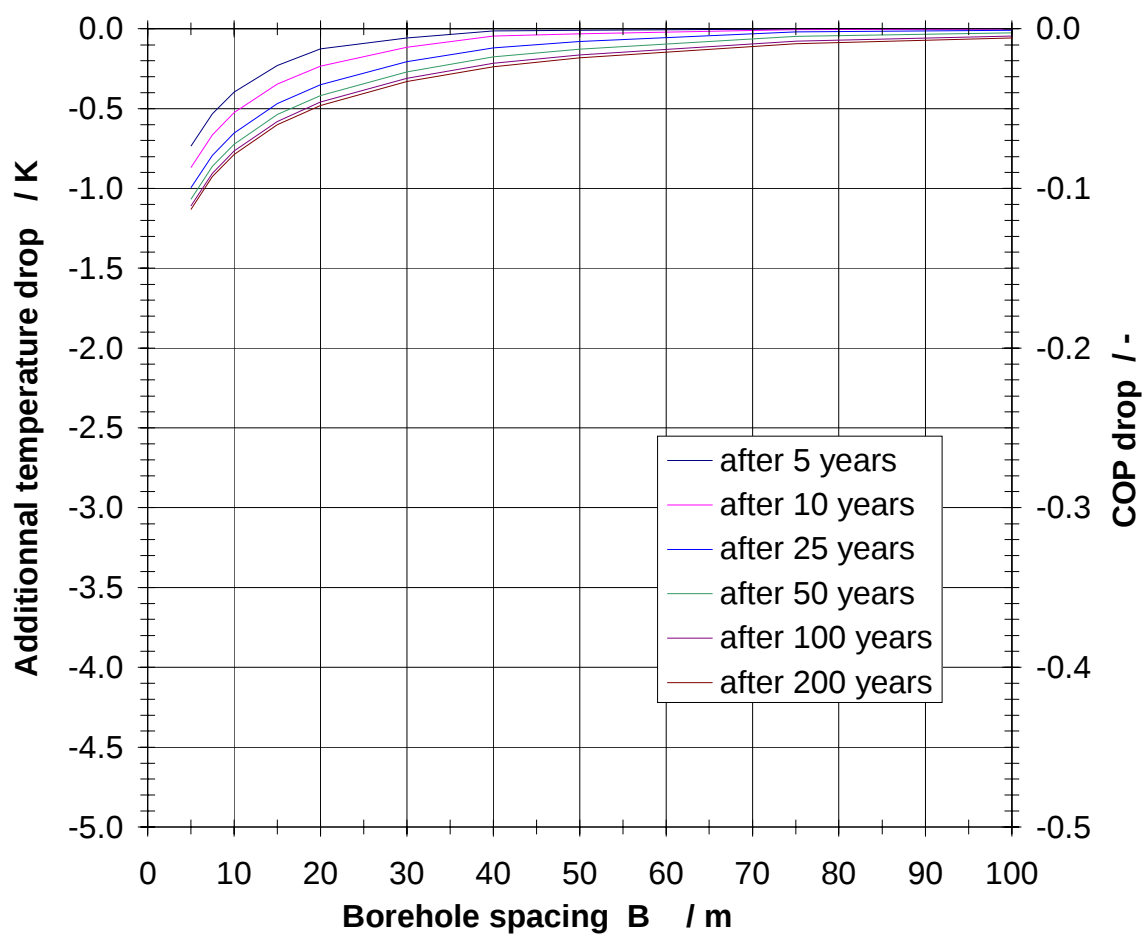
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.3 \cdot 10^{-6}$ m²/s

qo 10 W/m

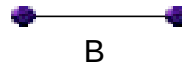
Time scale: 28 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

4.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 4.0 W/mK

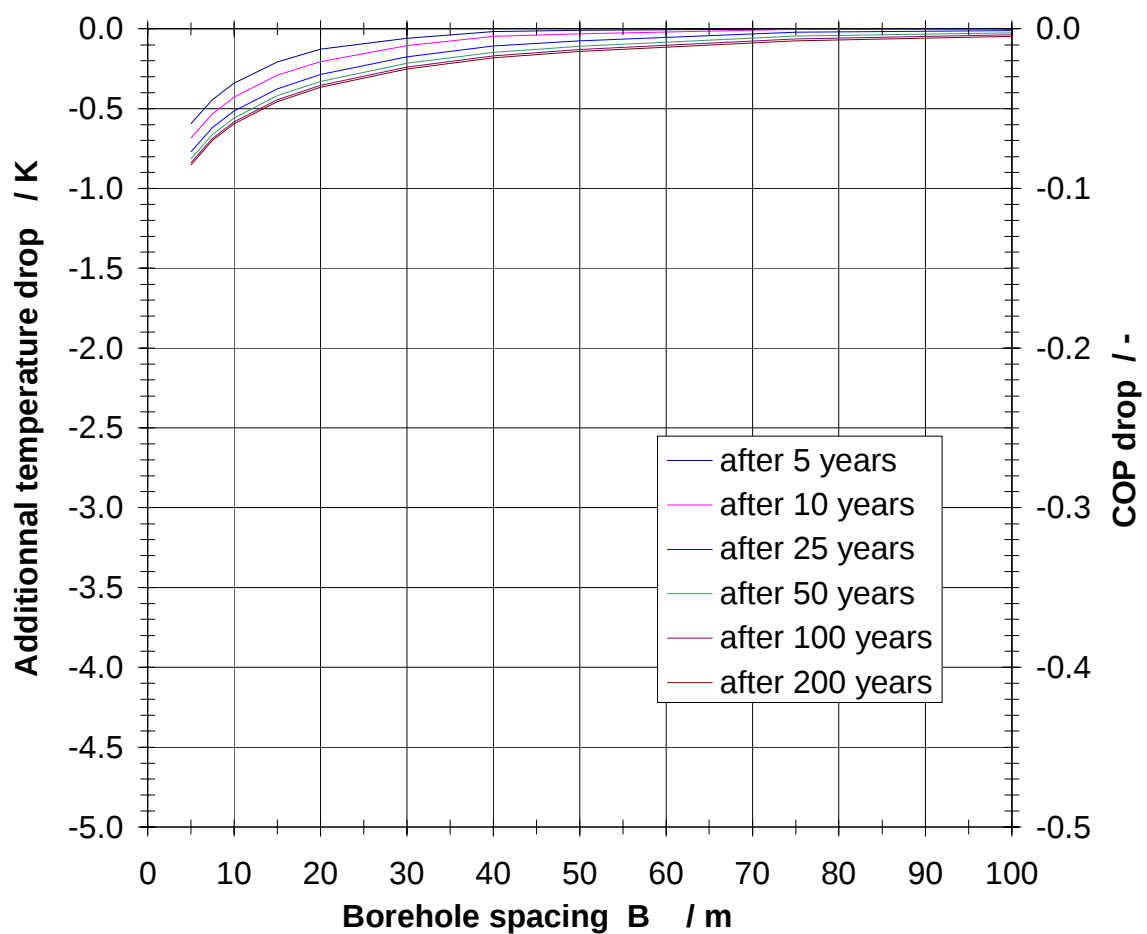
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

Time scale: 21 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 100m boreholes relative to a single one of 100m



A horizontal line segment with two purple square endpoints. The left endpoint is labeled 'A' and the right endpoint is labeled 'B'.

200 m

1.0 W/mK

200 m

1.0 W/mK

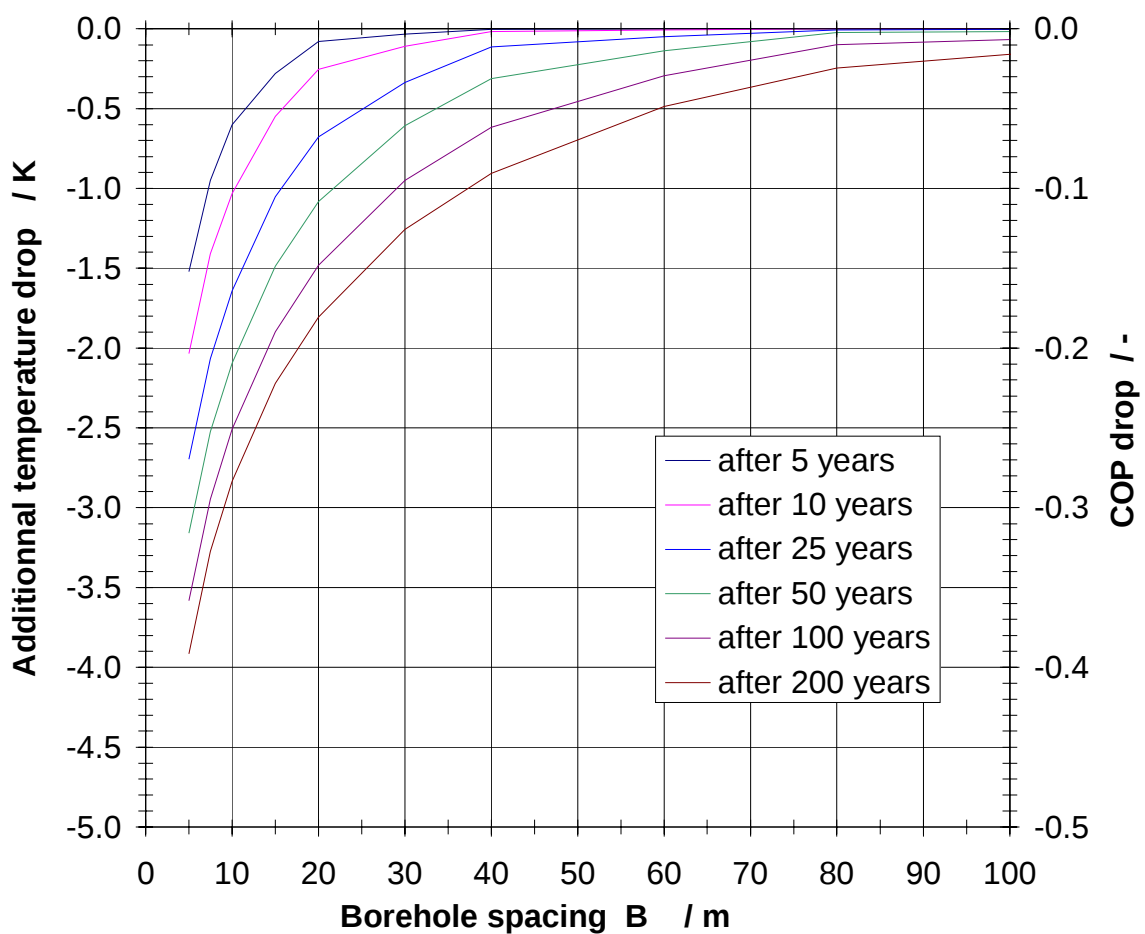
2.4 MJ/m³K

 $0.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

10 W/m

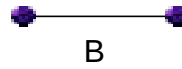
Time scale: 338 years
($ts = H^2/9a$)

Long term influence of the two 200m boreholes relative to a single one of 200m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

1.5 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 1.5 W/mK

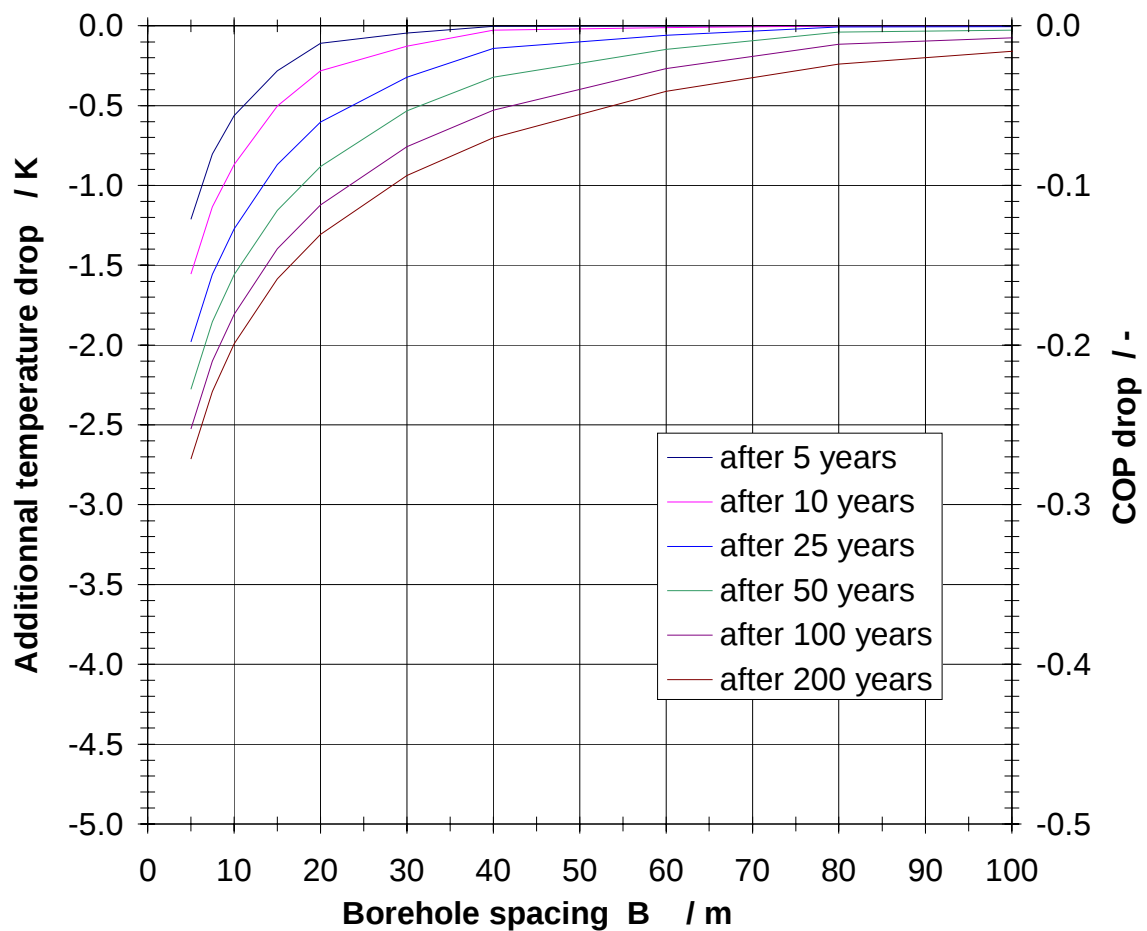
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

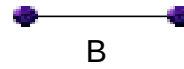
Time scale: 225 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

**Long term influence of the two 200m boreholes
relative to a single one of 200m**



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

2.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 2.0 W/mK

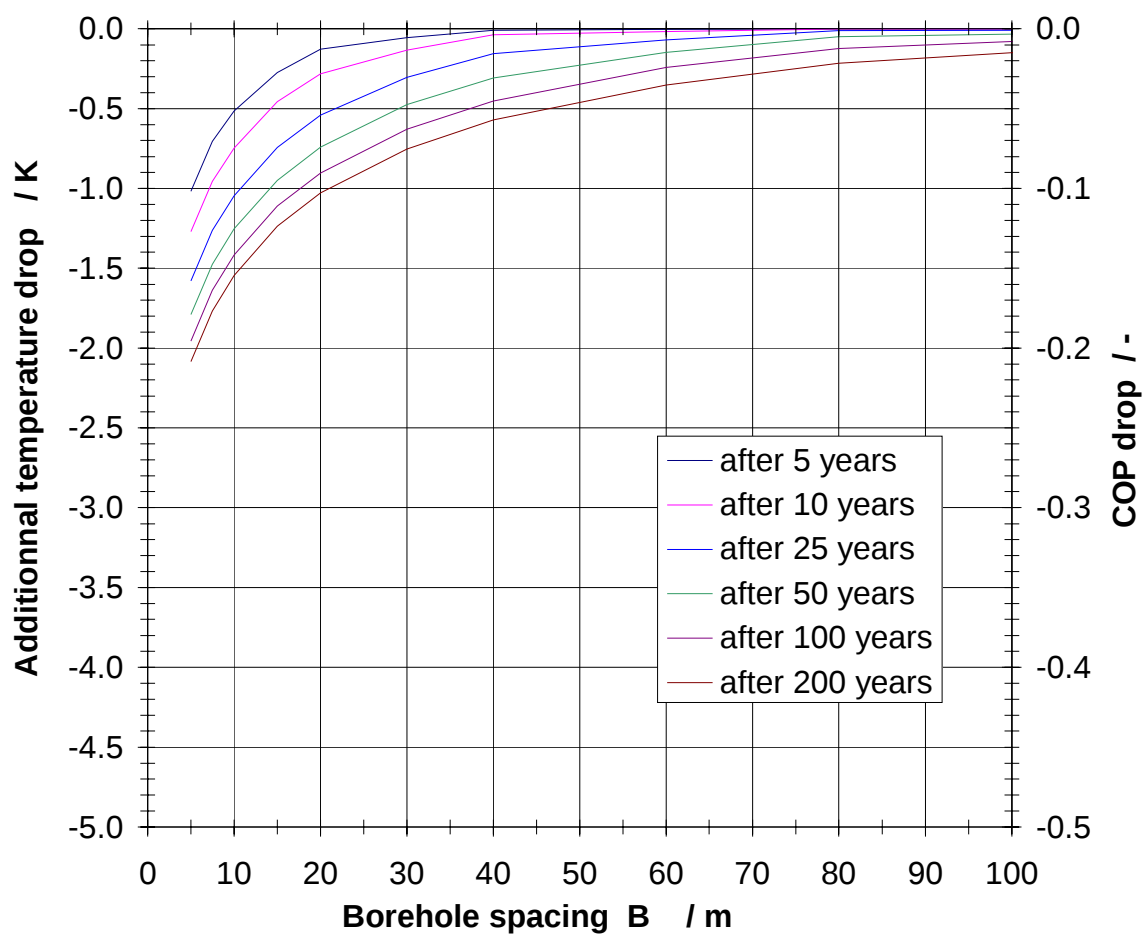
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

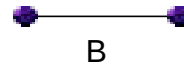
Time scale: 169 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

**Long term influence of the two 200m boreholes
relative to a single one of 200m**



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

3.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 3.0 W/mK

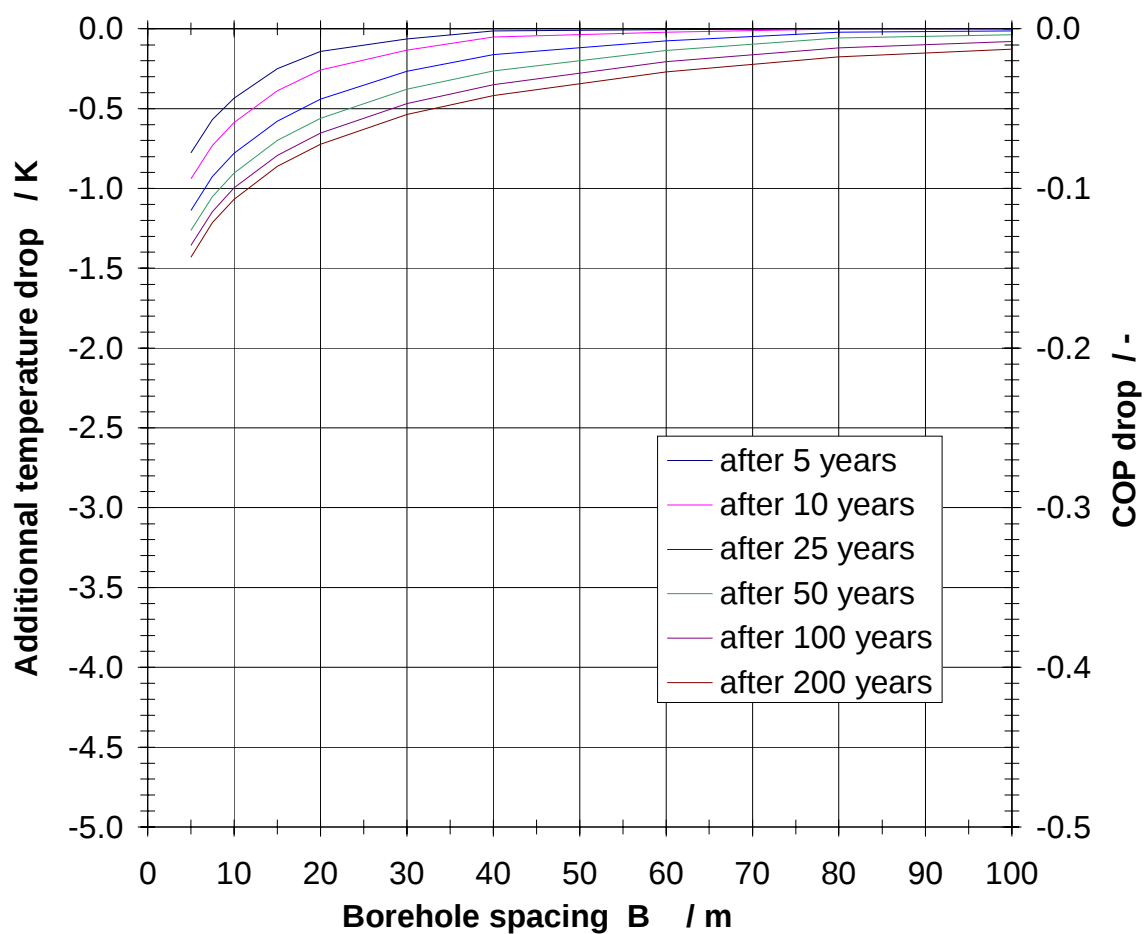
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.3 \cdot 10^{-6}$ m²/s

qo 10 W/m

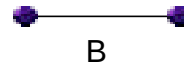
Time scale: 113 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 200m boreholes relative to a single one of 200m



Borehole configuration

Two boreholes



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

4.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 4.0 W/mK

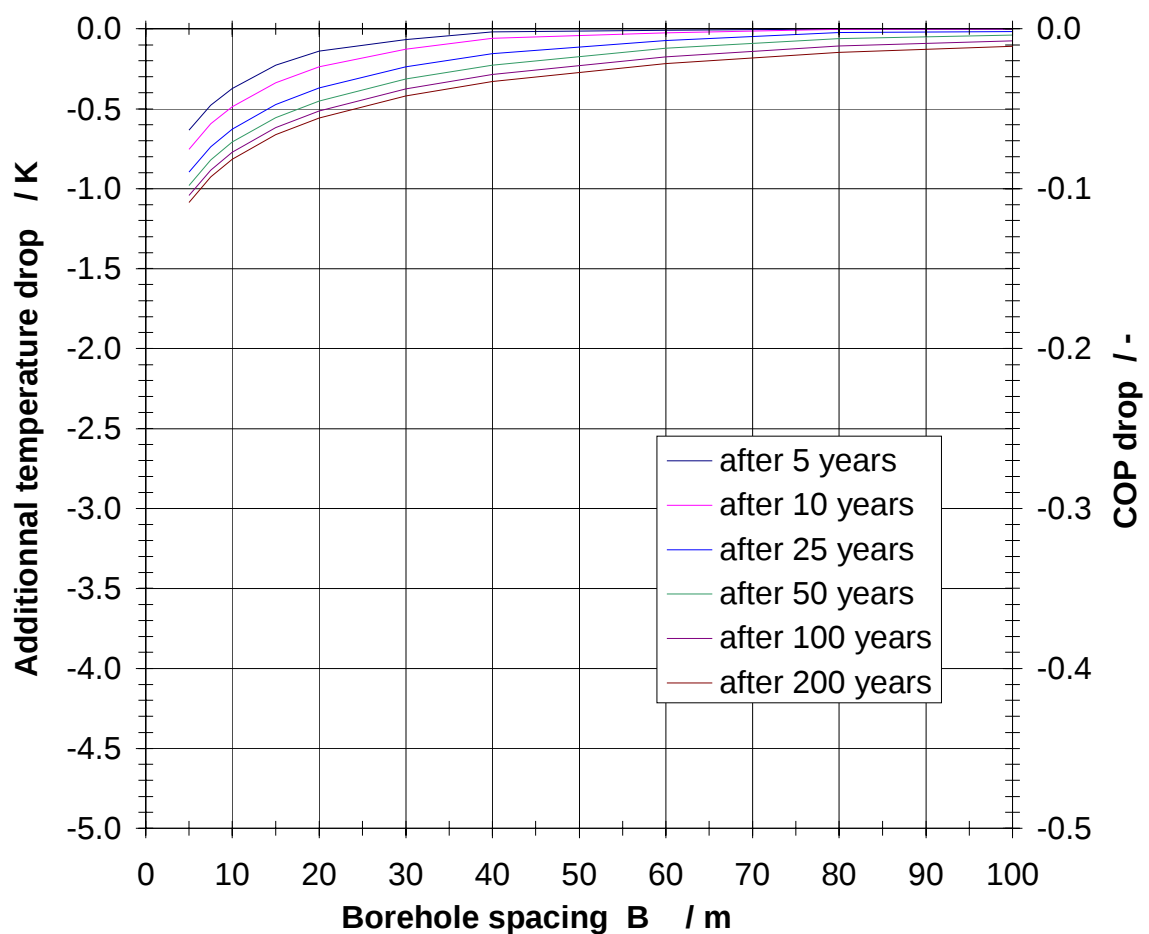
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.7 \cdot 10^{-6}$ m²/s

qo 10 W/m

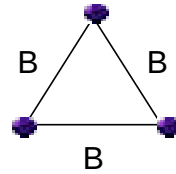
Time scale: 85 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the two 200m boreholes relative to a single one of 200m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

1.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 1.0 W/mK

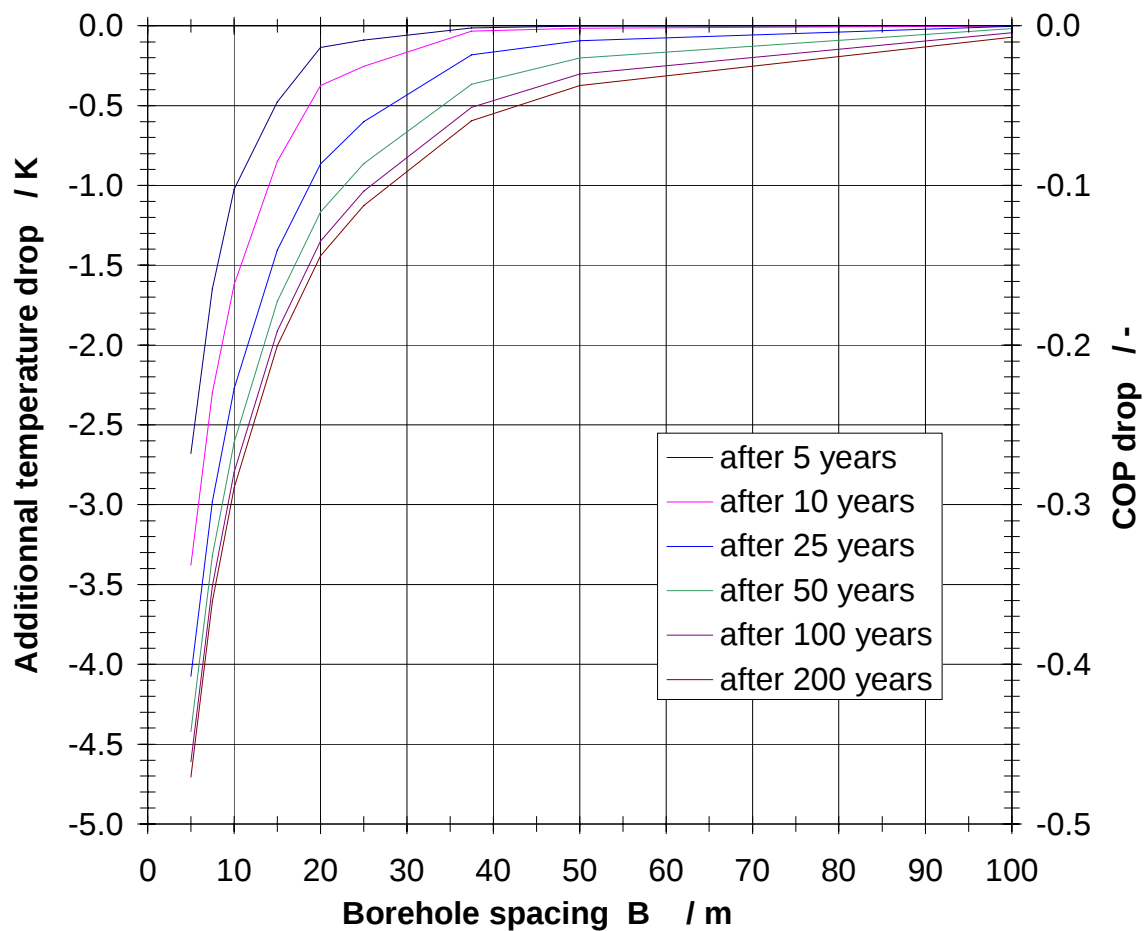
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

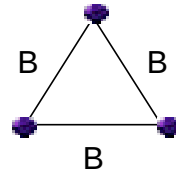
Time scale: 21 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

**Long term influence of the three 50m boreholes
relative to a single one of 50m**



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

1.5 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 1.5 W/mK

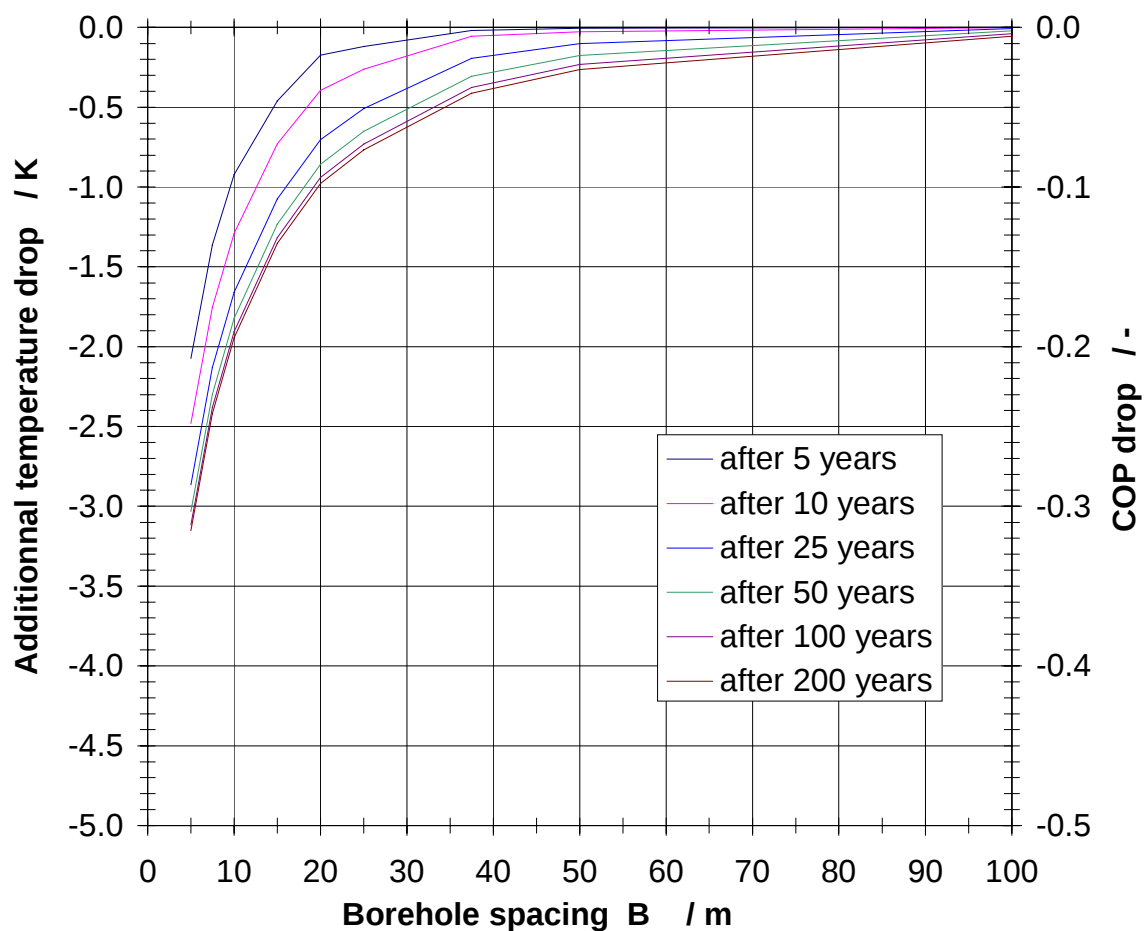
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

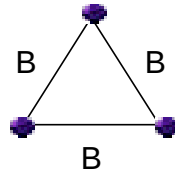
Time scale: 14 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

**Long term influence of the three 50m boreholes
relative to a single one of 50m**



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

2.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 2.0 W/mK

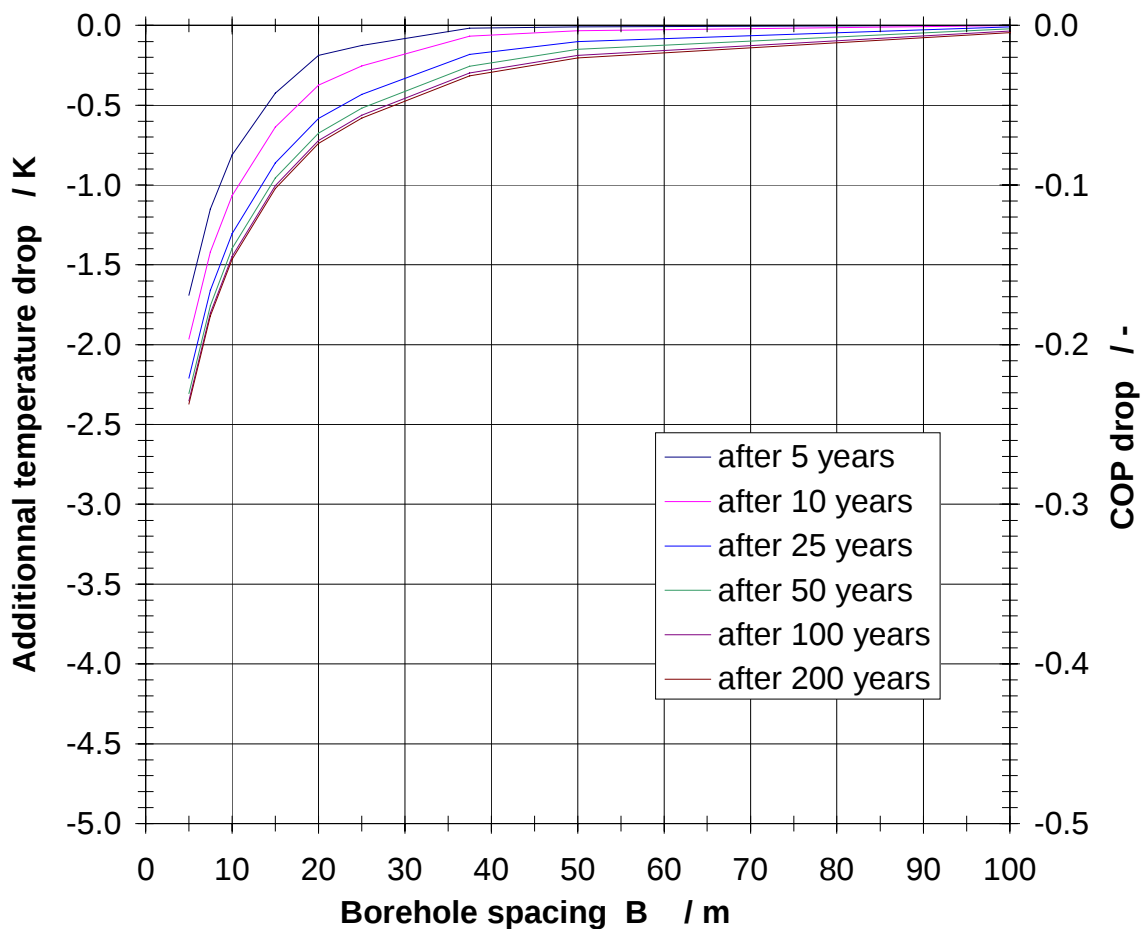
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

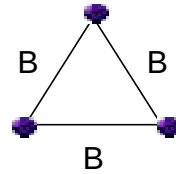
Time scale: 11 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

**Long term influence of the three 50m boreholes
relative to a single one of 50m**



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

3.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 3.0 W/mK

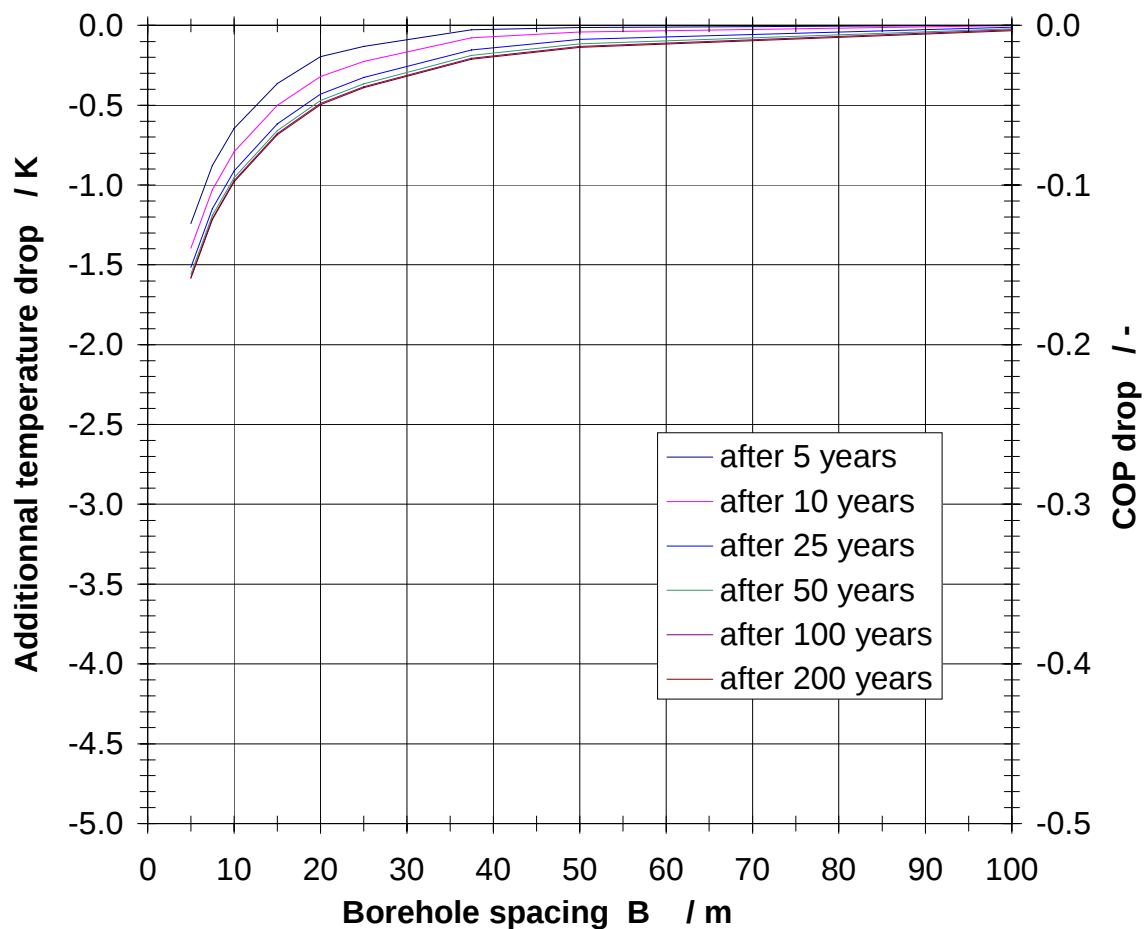
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

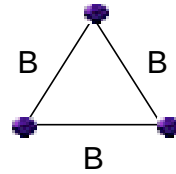
Time scale: 7 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

**Long term influence of the three 50m boreholes
relative to a single one of 50m**



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

50 m

Ground thermal conductivity

4.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 50 m

λ borehole 4.0 W/mK

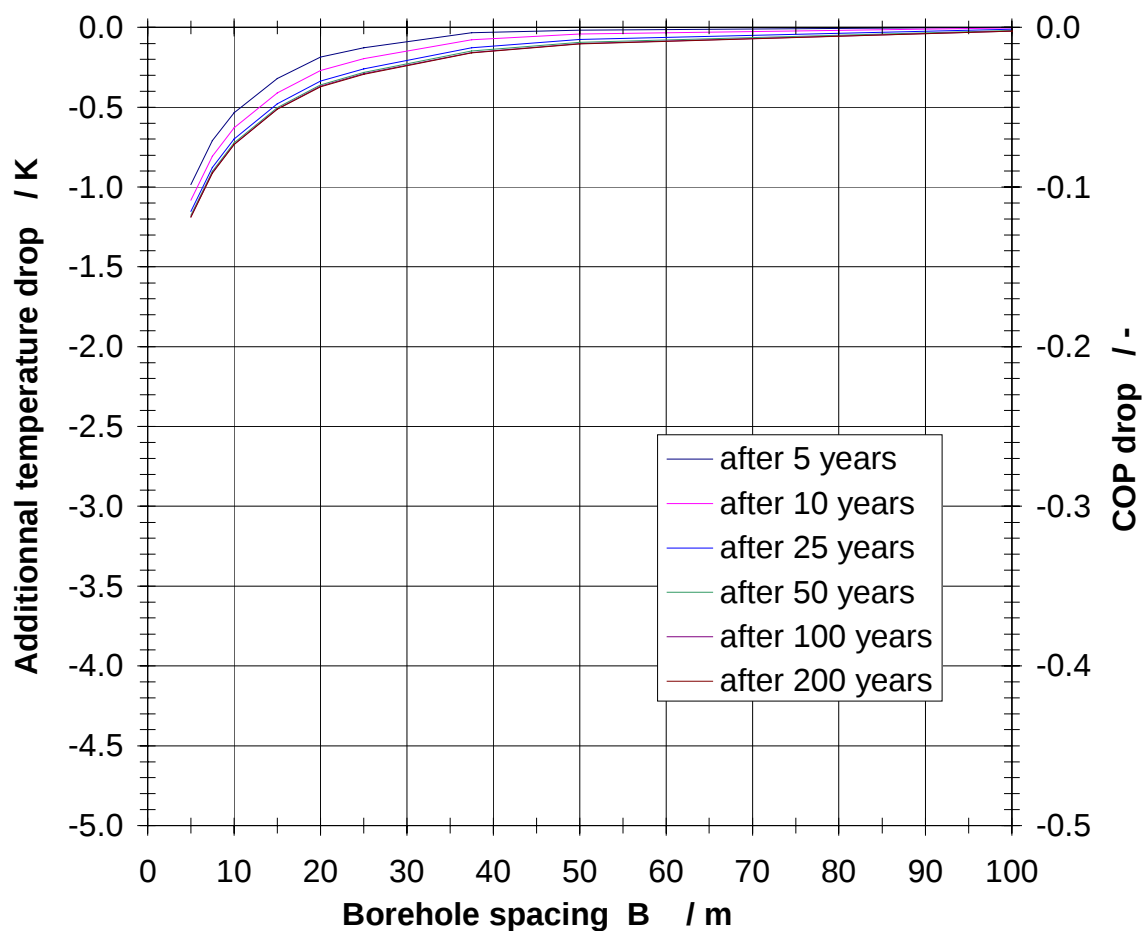
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

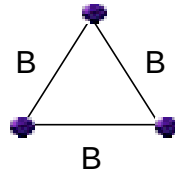
Time scale: 5 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

**Long term influence of the three 50m boreholes
relative to a single one of 50m**



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

1.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 1.0 W/mK

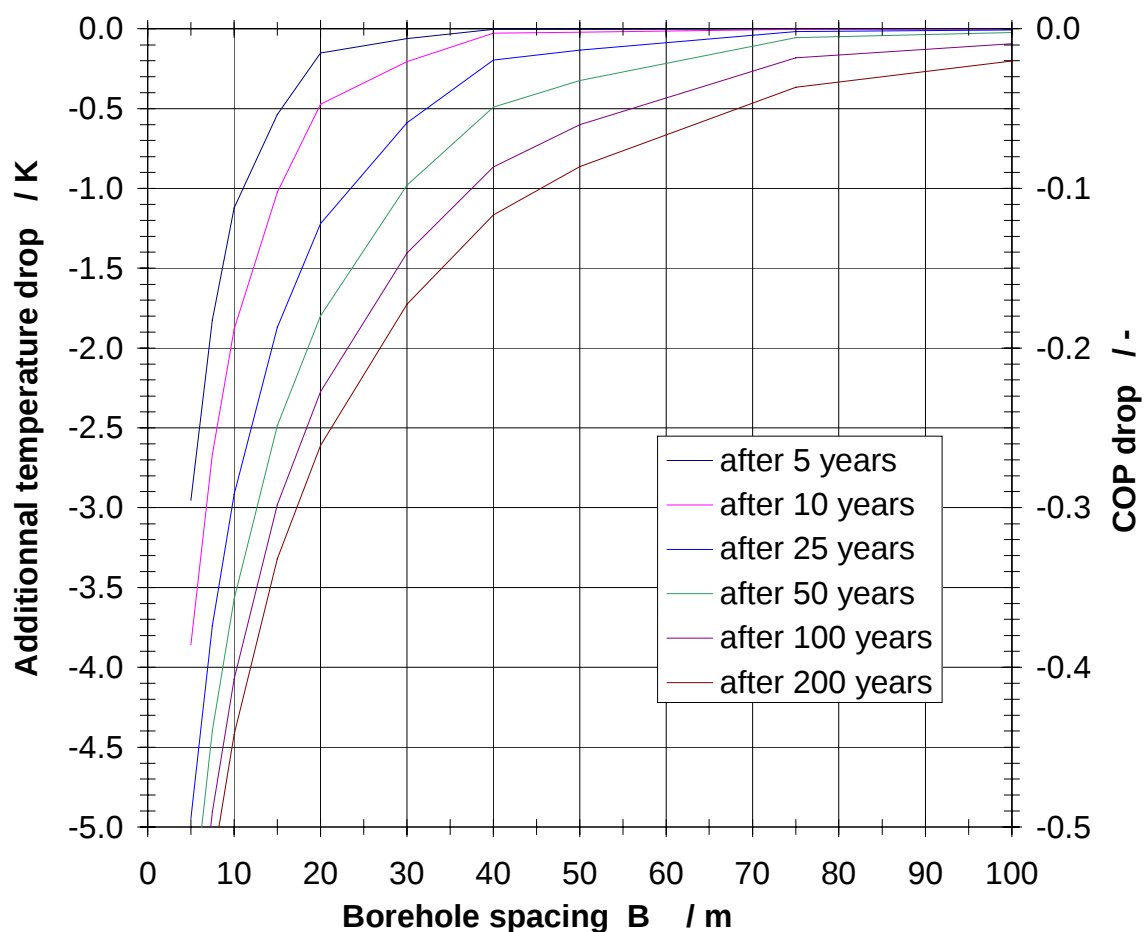
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

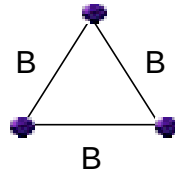
Time scale: 85 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

1.5 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 1.5 W/mK

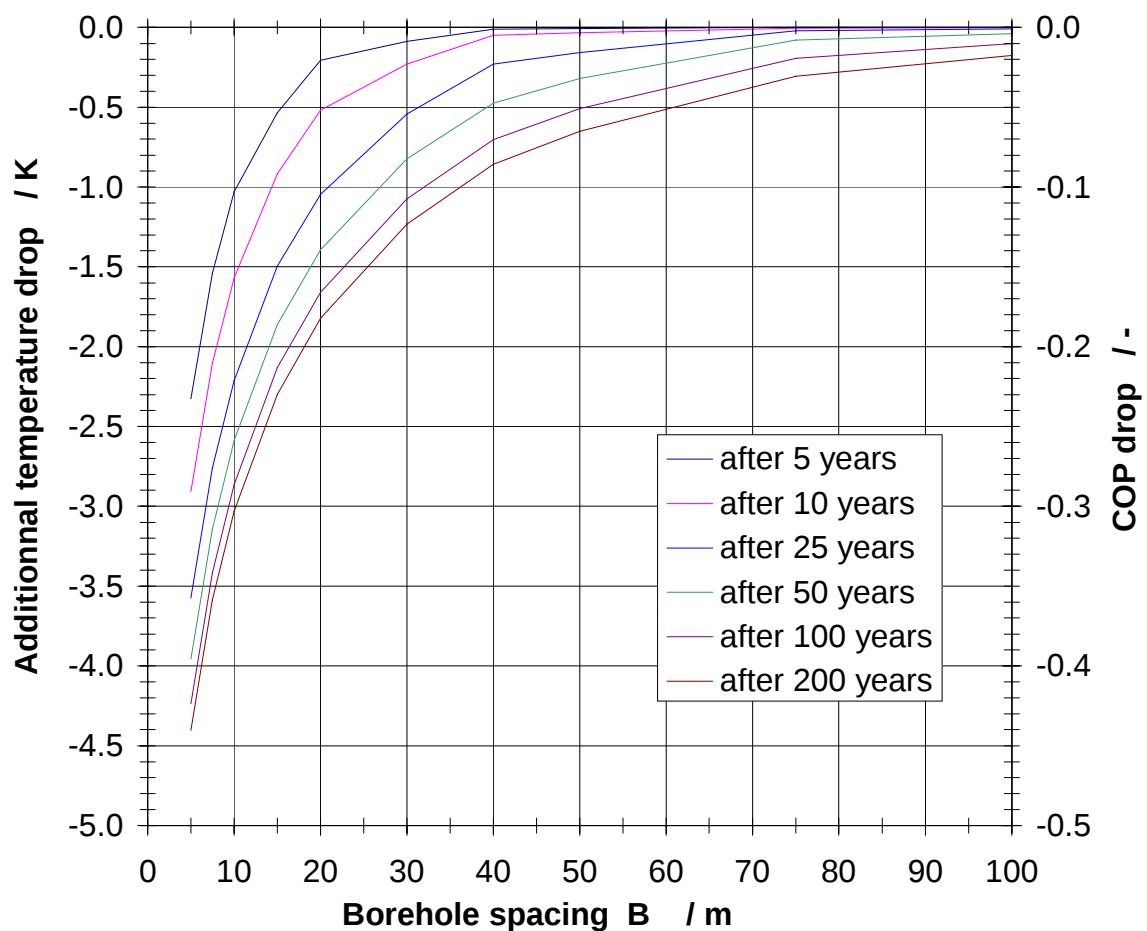
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

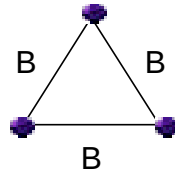
Time scale: 56 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

2.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 2.0 W/mK

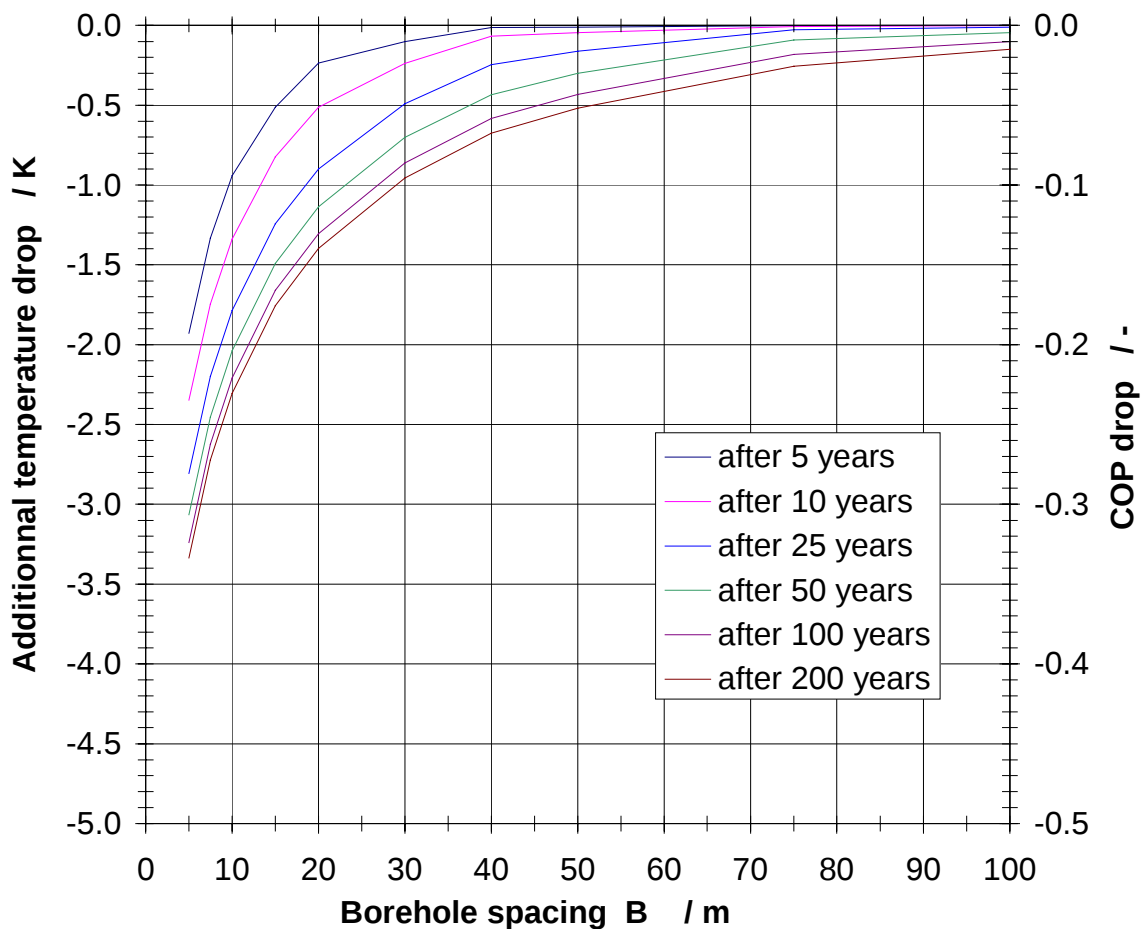
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

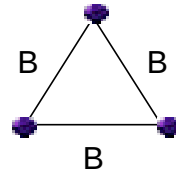
Time scale: 42 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

3.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 3.0 W/mK

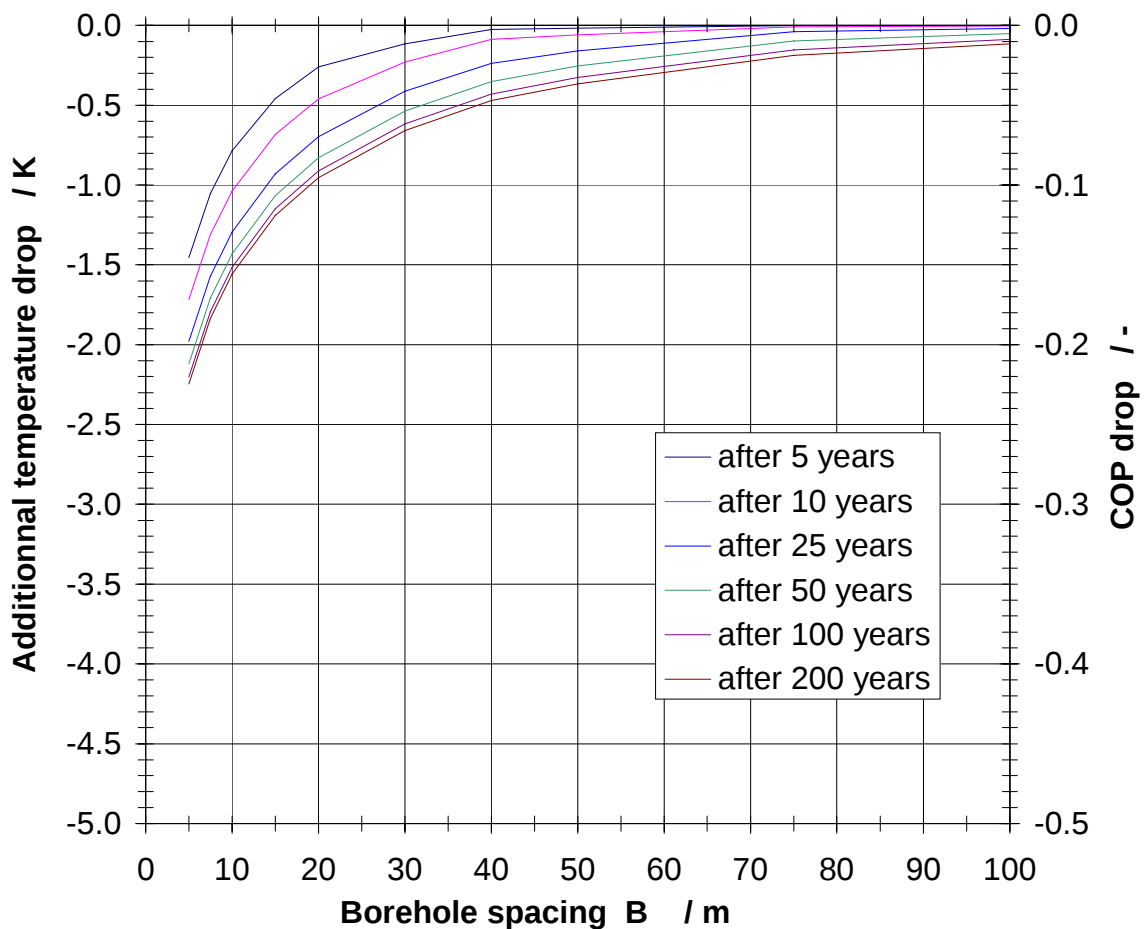
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.3 \cdot 10^{-6}$ m²/s

q_0 10 W/m

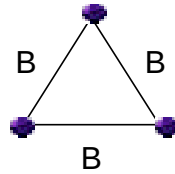
Time scale: 28 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

100 m

Ground thermal conductivity

4.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 100 m

λ borehole 4.0 W/mK

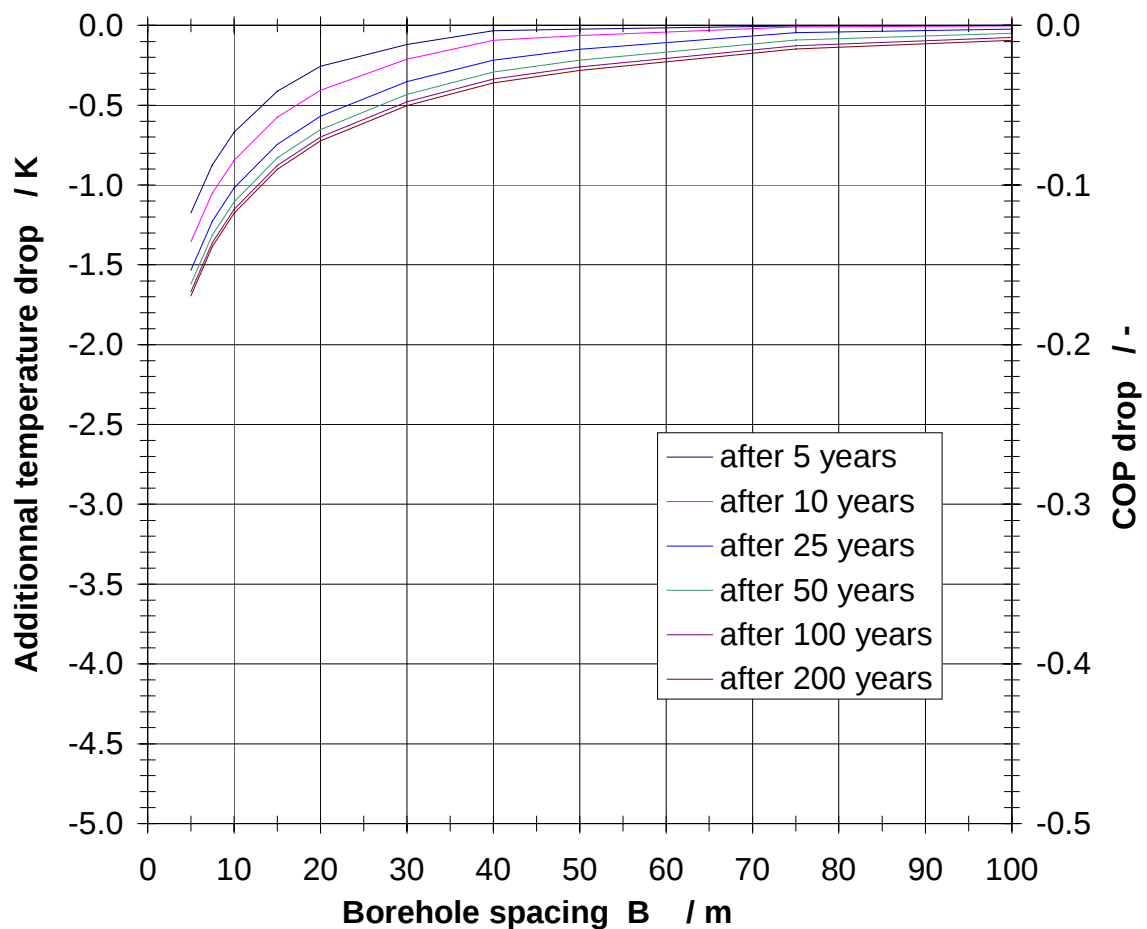
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

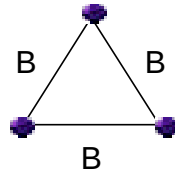
Time scale: 21 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 100m boreholes relative to a single one of 100m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

1.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 1.0 W/mK

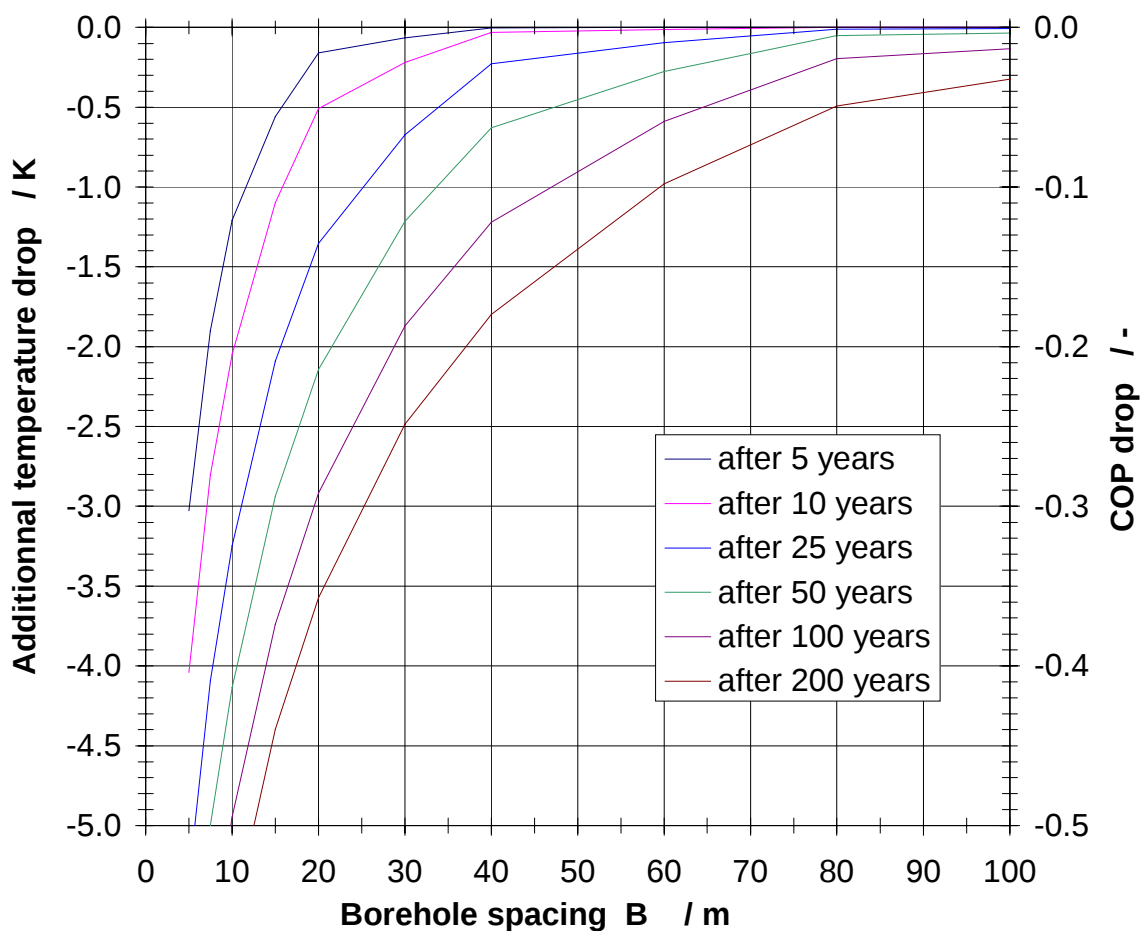
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

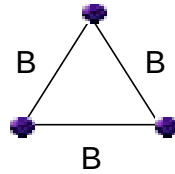
Time scale: 338 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 200m boreholes relative to a single one of 200m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

1.5 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 1.5 W/mK

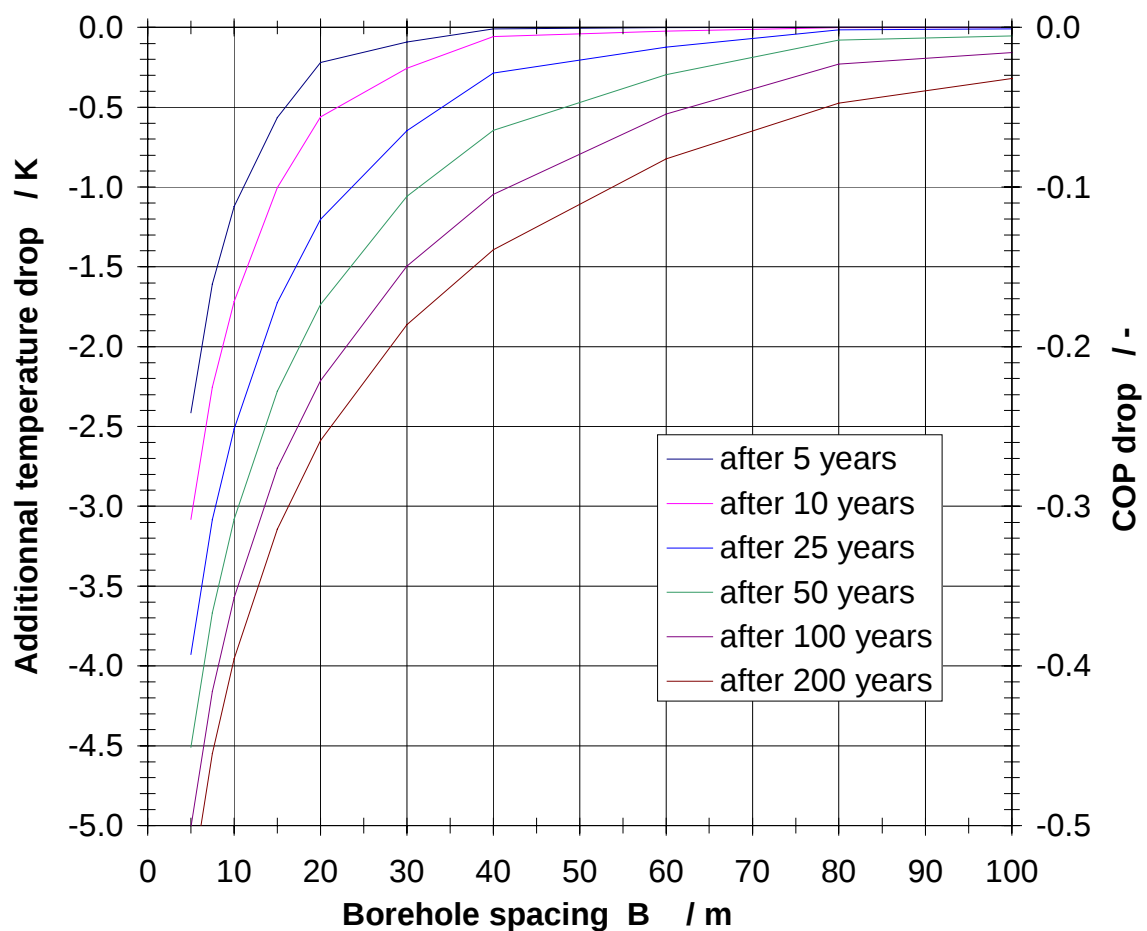
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

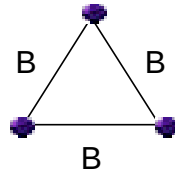
Time scale: 225 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 200m boreholes relative to a single one of 200m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

2.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 2.0 W/mK

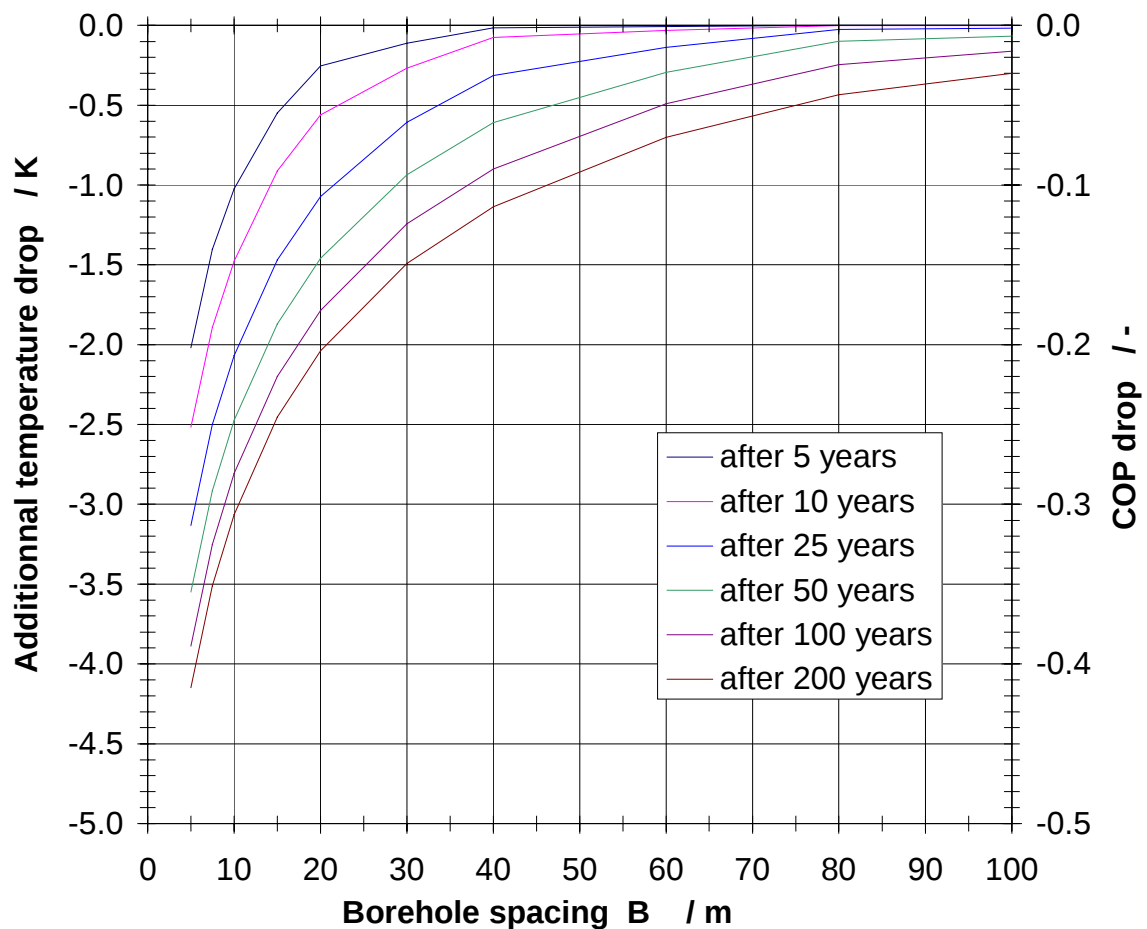
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

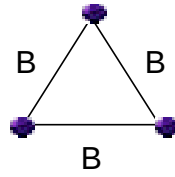
Time scale: 169 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 200m boreholes relative to a single one of 200m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

3.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 3.0 W/mK

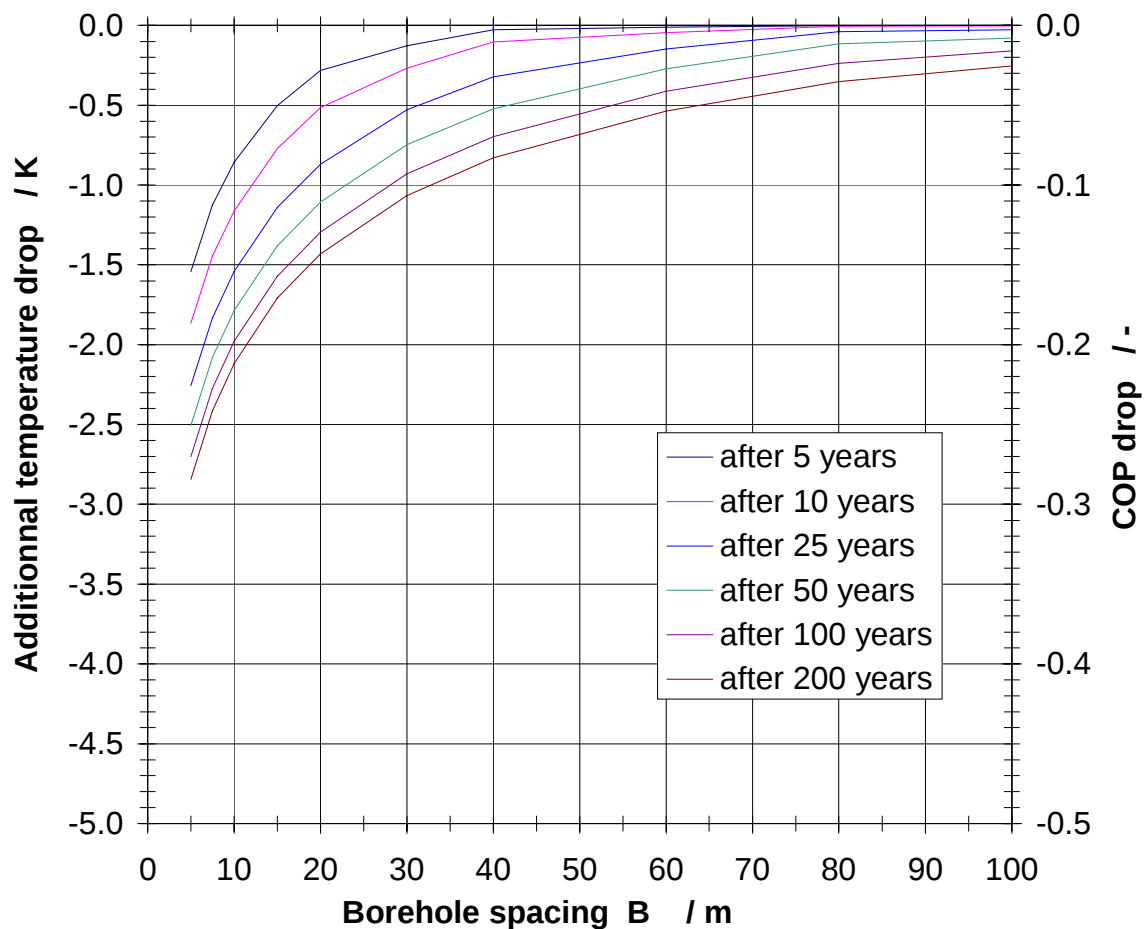
C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

q_0 10 W/m

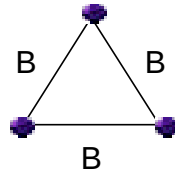
Time scale: 113 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 200m boreholes relative to a single one of 200m



Borehole configuration

Three boreholes in triangle



Length of each borehole

200 m

Ground thermal conductivity

4.0 W/mK

Calculation parameters

H borehole 200 m

λ borehole 4.0 W/mK

C ground 2.4 MJ/m³K

α ground $1.7 \cdot 10^{-6}$ m²/s

q_0 10 W/m

Time scale: 85 years
($t_s = H^2/9\alpha$)

Long term influence of the three 200m boreholes relative to a single one of 200m

