

Berechnung der Entzugsleistung einer Erdwärmesonde

Einfluss von Diffusivität, ihrer Temperaturabhängigkeit
und Grundwasserströmung

R.Wagner, C.Clauser, RWTH Aachen

1. Abstract

The thermal energy yield of a ground heat exchanger depends on different factors. On the one hand technical characteristics like borehole diameter, pipe insulation etc. affect the efficiency of the ground heat exchanger. On the other hand the thermal properties of the earth, in particular the thermal conductivity and the product of density and specific heat capacity (thermal capacity), must be known when calculating the thermal energy yield as a function of time. Additionally, the efficiency of a ground heat exchanger can be increased if groundwater flow advects additional heat to the borehole.

The influence of the time- and temperature-dependence of thermal conductivity on the efficiency of a ground heat exchanger is demonstrated by a numerical simulation. The ground heat exchanger has a length of 2240 m and samples a temperature-interval from 10 °C at the surface to 72 °C at a depth of 2240 m. Accordingly the thermal conductivity of the rock increases from $3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ at the surface to $2,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ at the bottom of the model. As a consequence, the theoretical power of a ground heat exchanger calculated with the numerical model SHEMAT, increases up to 10%, if the temperature-dependence of the thermal conductivity is taken into account instead of using a constant thermal conductivity.

Simulation of the influence of different groundwater flow rates on the temperature in a ground heat exchanger showed that the thermal energy in the well increases with the thickness of the aquifer and the Darcy-velocity of the groundwater-flow. The thermal energy yield of a ground heat exchanger increases up to 10 % for a groundwater flow rate of $3 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in an aquifer of 300 m thickness.

Finally, measurements of the thermal conductivity of different Bunter sandstone samples show surprisingly large anisotropy of up to 10 % for samples without visible anisotropy.

2. Einleitung

Die Berechnung der Entzugsleistung einer Erdwärmesonde hängt von verschiedenen Faktoren ab. Einerseits beeinflussen sondenspezifische Eigenschaften wie der Bohrl Lochdurchmesser, die Rohrisolierung etc. die maximal mögliche Wärmeleistung, andererseits müssen die physikalischen Eigenschaften des Untergrundes, also die Wärmeleitfähigkeit λ und das Produkt aus Dichte und spezifische Wärmekapazität

(thermische Kapazität), ρc , möglichst genau bekannt sein (diese beiden Größen lassen sich in der thermischen Diffusivität $a = \lambda/\rho c$ zusammenfassen).

Oft wird bei der numerischen Simulation die Temperaturabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften des Untergrundes nicht mitberücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass die Entzugsleistung einer Sonde unterschätzt wird. Durch die Zirkulation der Kreislaufflüssigkeit kühlt sich der Bereich um die Sonde immer weiter aus. Dies hat eine wachsende thermische Diffusivität, also eine zunehmende Wärmeleitfähigkeit und eine abnehmende spezifische Wärmekapazität des sich abkühlenden Untergrundes zur Folge.

Neben der thermischen Diffusivität spielen außerdem die hydrogeologischen Bedingungen im Untergrund eine wichtige Rolle, insbesondere der konvektive Wärmetransport durch Grundwasserströmungen in porösen Aquiferen. Diese die Entzugsleistung bestimmenden Faktoren sollen hier kurz untersucht werden.

3. Numerisches Modell

Zur Berechnung der Entzugsleistung einer Erdwärmesonde wurde das numerische Modell SHEMAT mit dem dazugehörigen Prä- und Postprozessor „Processing SHEMAT“ (www.geophysik.rwth-aachen.de/shemat) eingesetzt. SHEMAT ist ein Werkzeug für die simultane Berechnung von Strömung, Wärme- und Speziestransport sowie von chemischen Reaktionen in porösen Medien. Es ist besonders dafür geeignet, den Einfluss von Lösungs- und Ausfällungsreaktionen auf die Transporteigenschaften des Porenraumes zu berechnen. Die Differenzialgleichungen für Strömung und (Wärme-) Transport werden auf einem rechtwinkligen kartesischen bzw. zylindersymmetrischen Finite – Differenzen (FD)-Gitter berechnet.

Die hydraulischen Fluideigenschaften wie spezifischer Speicherkoefizient, Kompressibilität, Dichte, dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität werden während der Simulation mit dem numerischen Algorithmus WATER (Mase und Bessler, 1991) an veränderte Druck- und Temperaturverhältnisse angepasst. Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$ des Gesteins wird nach Zoth und Haenel (1988) berechnet:

$$\lambda(T) = C(T) \left[\frac{\lambda_{ref}(T_{ref})}{C(T_{ref})} - \left(\frac{\lambda_{ref}(T_{ref})}{C(T_{ref})} - 1 \right) \left(\frac{T - T_{ref}}{400 \text{ °C} - T_{ref}} \right) \right] \quad (1)$$

$$C(T) = \frac{700 \text{ °C}}{350 \text{ °C} + T} + 0.7$$

Die spezifische Wärmekapazität $c(T)$ wird durch ein Polynom zweiter Ordnung beschrieben¹:

$$c(T) = A_0 + A_1 T + A_2 T^{-2} \quad (2)$$

Nimmt man beispielsweise für die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes einen Wert von $\lambda_{ref} = 2,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ bei $T = 20 \text{ °C}$ an, ergibt sich nach Gl. (1) für $T = 70 \text{ °C}$ nur mehr eine Leitfähigkeit von $2,58 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

4. Modellierung einer tiefen Erdwärmesonde

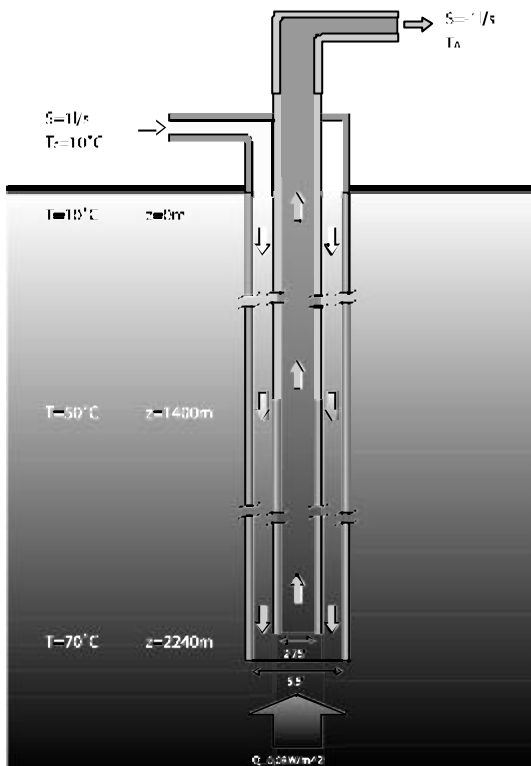


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Temperatursonde (Erläuterungen im Text).

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau einer Erdwärmesonde, deren Entzugsleistung mit SHEMAT berechnet werden soll. Die Sonde ist 2240 m tief und besteht aus einem Innen- und Außenrohr, welche jeweils einen Innendurchmesser von 2,75 Zoll bzw. 5,5 Zoll und eine Wandstärke von 1 cm aufweisen. Die Rohre besitzen die spezifische Wärmeleitfähigkeit und die thermische Kapazität von Stahl ($\lambda = 50 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho c = 3,6 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ für $T=10 \text{ °C}$). Es wird angenommen, dass die Temperatur an der Erdoberfläche konstant gleich 10 °C ist und bis in 2240 m Tiefe auf 72 °C ansteigt. Dies entspricht einem Temperaturgradienten von etwa 36 K km^{-1} . Der untere Rand des Modellraumes liegt in 2940 m Tiefe. Dort beträgt die Temperatur 92 °C . Außerdem wird ein spezifischer Wärmefluss durch den unteren Modellrand von $0,08 \text{ W m}^{-2}$ angenommen.

Die kalte Kreislaufflüssigkeit (Wasser, $T_0 = 10 \text{ °C}$) wird mit einer Injektionsrate von 1 L s^{-1} in das Außenrohr gepumpt, wo es sich bis zum Boden der Sonde erwärmt, im Innenrohr aufsteigt und am Sondenausgang mit der Temperatur T_A austritt². Um Energieverlust durch Wärmeaustausch zwischen den beiden Rohren beim Aufsteigen der Flüssigkeit durch das Innenrohr zu vermeiden, ist dieses bis zu einer Tiefe von 1400 m wärmeisoliert ($\lambda = 0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Die Wärmeleitfähigkeit und thermische Kapazität des die Sonde umgebenden Gesteins betragen $\lambda = 2,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ bzw.

¹Allgemein nimmt die Wärmekapazität beliebiger Körper mit der Temperatur zu. Diese Abhängigkeit ist derzeit noch nicht in SHEMAT implementiert. Der Energietransport wird jedoch alleine durch die Diffusivität bestimmt. Durch Annahme einer konstanten Wärmekapazität muss man lediglich eine zu geringe thermische Diffusivität in Kauf nehmen was dazu führt, dass die Entzugsleistung unterschätzt wird.

² Beim Betrieb einer Erdwärmesonde lässt sich eine zeitlich unveränderliche Eintrittstemperatur nicht realisieren, da der Wärmetauscher das heiße Fluid nicht bis auf die Temperatur der Erdoberfläche abkühlen kann. Der Dauerbetrieb der Erdwärmesonde stellt außerdem eine weitere Vereinfachung dar, da in der Regel (tiefe) Erdwärmesonden nicht mehr als 2000 Stunden pro Jahr in Betrieb sind.

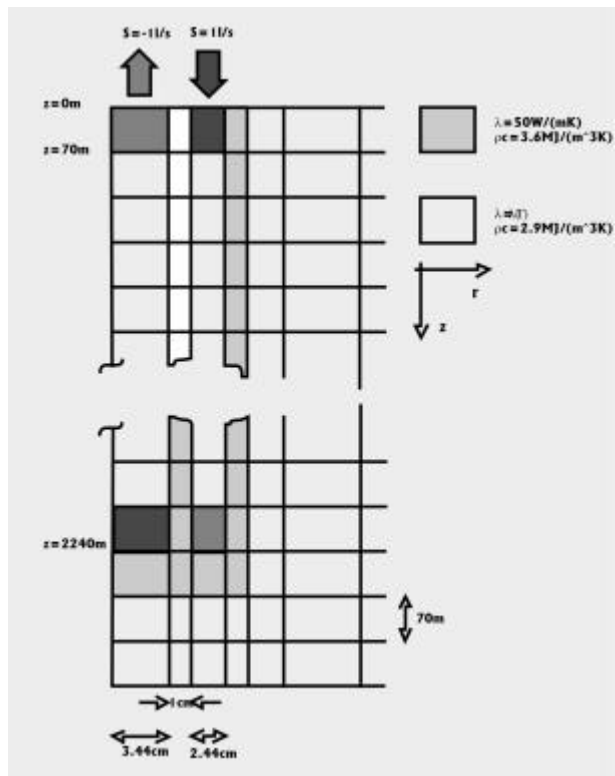
$\rho c = 2,1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ (bei $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). Außerdem wird angenommen, dass der Untergrund trocken ist, um einen möglichen Einfluss der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit von Porenwasser auszuschließen.

Hier interessiert nur, welche Temperatur T_A die Kreislaufflüssigkeit beim Austritt aus dem Innenrohr besitzt und weniger der technische Prozess bei der Umwandlung der thermischen Energie in elektrische. Als Entzugsleistung P wird hier die Wärmeenergie E des austretenden Wasservolumens V pro Zeiteinheit Δt definiert:

$$P(t) = \frac{dE}{dt} = \frac{V \rho c \Delta T}{\Delta t} = \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ s}} (\rho(T_A) c(T_A) \cdot T_A(t) - \rho(T_0) c(T_0) \cdot T_0) \quad (3)$$

$$\approx \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ s}} \rho(T_0) c(T_0) (T_A - T_0)$$

Die nächste Skizze (Abbildung 2) zeigt die Modellierung der Erdwärmesonde im FD-Gitter. Das gesamte zylindersymmetrische Modell besitzt eine radiale Ausdehnung von etwa 1600 m und eine vertikale Ausdehnung von 2940 m . In vertikaler z -



Richtung haben die einzelnen FD-Blöcke eine konstante Größe von 70 m . In radialer Richtung wachsen sie gleichmäßig bis auf eine Maximalgröße von 100 m an. Insgesamt besteht das Modell aus 1134 Gitterblöcken. Die dunkelgrau markierten Blöcke („Pumpen“ oder „Brunnen“) besitzen eine konstante Förderate von $S = -1 \text{ L s}^{-1}$, die schwarzen Blöcke („Injektionsbrunnen“) eine konstante Injektionsrate von $S = 1 \text{ L s}^{-1}$.

Die Strömung im Zentralrohr sowie im Ringraum wird durch entsprechend dimensionierte Quellen und Senken an den Enden der Rohre approximiert, wobei der Wärmetransport am Punkt der Strömungsumkehr im Bohrloch tiefsten durch einen thermischen Kurzschluss der beiden Blöcke realisiert wird.

Abbildung 2: Diskretisierung der Temperatursonde mit einem FD-Gitter in SHEMAT (Erläuterungen im Text).

Die Geschwindigkeit v_z der Rohrströmung wird nach dem Darcy - Ansatz berechnet:

$$v_z = K \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\rho g k}{\mu} \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (4)$$

wobei g die Schwerebeschleunigung, k die Permeabilität, μ die (temperaturabhängige) dynamische Viskosität des Wassers und h das hydrostatische Potential ist. Im

Gegensatz zu einer realen laminaren Rohrströmung wird also davon ausgegangen, dass die Fluidgeschwindigkeit über den gesamten Rohrquerschnitt konstant ist. Im Vergleich mit der Darcy-Strömung tritt Turbulenz bei der laminaren Rohrströmung, welche ein parabelförmiges Geschwindigkeitsprofil entlang des Rohrquerschnitts besitzt, mit zunehmender Flussrate früher auf. Diese Effekte können jedoch schon vom numerischen Ansatz her hier nicht mit berücksichtigt werden. Es wird daher laminares Strömen vorausgesetzt.

Unter diesen Voraussetzungen wurde die Temperatur T_A am Sondenaustritt mit einer konstanten Injektionsrate von 1 L s^{-1} über einen Zeitraum von 100 Jahren simuliert und die Entzugsleistung der Sonde nach Gl. (3) berechnet. Um den Einfluss der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit zu untersuchen, wurde in einer zweiten Simulation diese Kopplung ausgeschaltet und für den gesamten Untergrund eine temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit definiert. Um die beiden Simulationen quantitativ zu vergleichen, wurde bei der zweiten Simulation für den Untergrund nach Gl. (1) eine mittlere Leitfähigkeit $\bar{\lambda}$ für den Untergrund im Temperaturbereich von $10^\circ\text{C} - 92^\circ\text{C}$ berechnet:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i(T_i)}{n} = 2.73 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}, \quad n=82,$$

für $T_1 = 10^\circ\text{C}$ und $T_n = 92^\circ\text{C}$, s. auch Abb. 3.

Die Entzugsleistung einer Sonde nimmt im Verlauf der Zeit ab, da mehr Wärmeenergie aus der Sondenumgebung entzogen wird, als durch den basalen Wärmefluss nachgeliefert werden kann. Jedoch sollten die beiden Simulationen eine unterschiedlich starke Abnahme der Entzugsleistung mit der Zeit zeigen: In der gekoppelten Simulation erhöht sich mit der Auskühlung der Sondenumgebung auch die Wärmeleitfähigkeit. Damit ergibt sich im Vergleich mit der Simulation ohne Kopplung ein größerer radialer Wärmefluss in Richtung der Sonde.

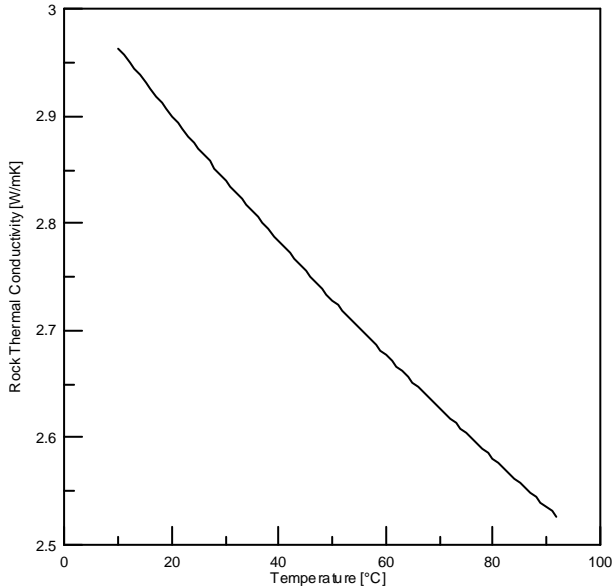


Abbildung 3: Abhängigkeit der Gesteins-Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur (nach Zoth und Haenel, 1988)

nachgeliefert werden kann. Jedoch sollten die beiden Simulationen eine unterschiedlich starke Abnahme der Entzugsleistung mit der Zeit zeigen: In der gekoppelten Simulation erhöht sich mit der Auskühlung der Sondenumgebung auch die Wärmeleitfähigkeit. Damit ergibt sich im Vergleich mit der Simulation ohne Kopplung ein größerer radialer Wärmefluss in Richtung der Sonde.

Dies ist in Abbildung 4 zu erkennen, wo die Entzugsleistung für ein Modell mit voller Kopplung ($\lambda = \lambda(T)$, $\rho c = \rho(T)c(T)$) und mit ausgeschalteter Kopplung ($\lambda = \text{konst.}$, $\rho c = \text{konst.}$) aufgetragen ist. Der Unterschied beträgt nach einer Simulationsdauer von einem Jahr etwa 10 kW , wobei sich diese Leistung auf die Wärmeenergie des geförderten Wassers pro Zeiteinheit bezieht.

Die in Abbildung 4 eingetragene Entzugsleistung entspricht derjenigen einer idealen Sonde mit theoretischem Wirkungsgrad 1.

Es fällt auf, dass zu Beginn der Simulation die Entzugsleistung für eine ungekoppelte Rechnung größer ist als für eine gekoppelte. Dies hängt möglicherweise mit der sich

erst allmählich ausbreitenden Auskühlung der Sondenumgebung zusammen: bei der gekoppelten Simulation ist die Wärmeleitfähigkeit im heißen Bereich des Untergrundes zunächst noch geringer als im oberen Bereich der Sonde. Erst durch die Ausbreitung der Kaltfront über den gesamten Teufenbereich außerhalb der Sonde nimmt der Wärmefluss in Sondenrichtung infolge der zunehmenden Wärmeleitfähigkeit zu. Mit zunehmender Betriebszeit der Sonde wird schließlich die Entzugsleistung mit einer gekoppelten Simulation deutlich größer.

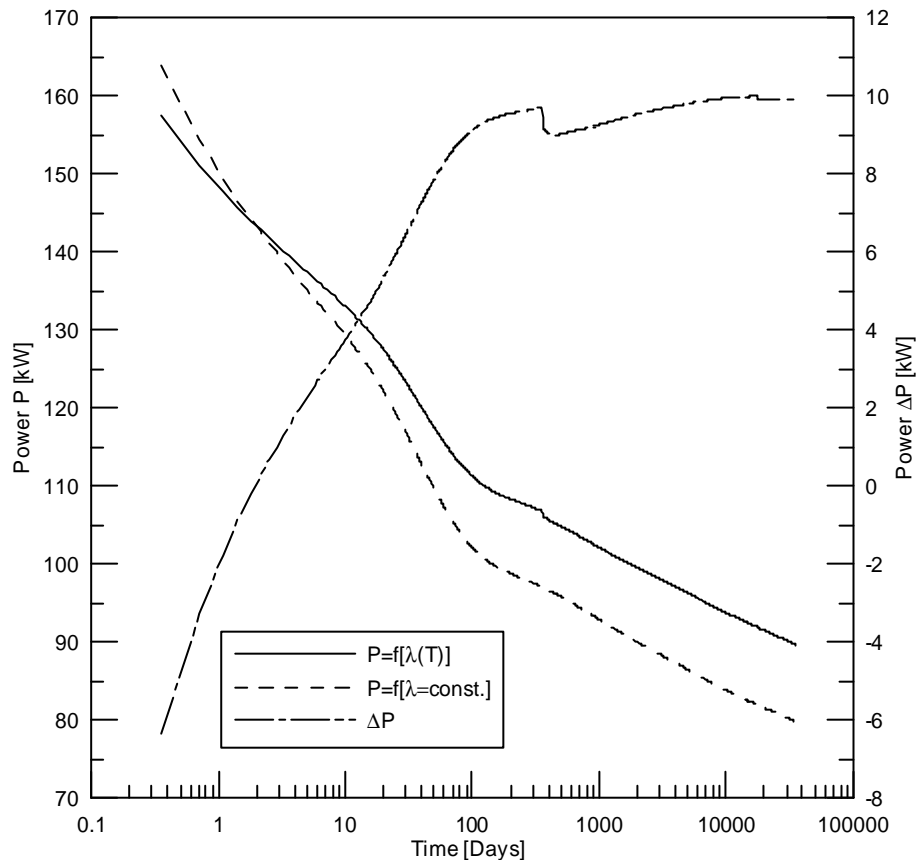


Abbildung 4: Entzugsleistung einer Erdwärmesonde mit temperaturabhängiger bzw. konstanter Wärmeleitfähigkeit des Gesteins. Die Stufe in der durchgezogenen Linie bei $T=365$ Tagen wird durch eine Veränderung der Zeitschrittsteuerung während der Simulation verursacht.

5. Regionale Strömungsfelder im Untergrund

Messungen an trockenen und saturierten Sandsteinproben (s. Anhang) zeigen, dass ein mit Wasser gefüllter Porenraum eine signifikant höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt. Somit ist der Wärmefluss in radialer Richtung zur Sonde hin bei einem gesättigten Untergrund größer als bei einem trockenen Untergrund.

Ein weiterer standortabhängiger Faktor für die Größe der Entzugsleistung ist der Grundwasserfluss in einem Aquifer, falls dieser von einer Erdwärmesonde durchteuft wird. In diesem Fall wird der Wärmefluss zur Sonde hin nicht nur durch den konduktiven Wärmetransport des Gesteins (und des Porenwassers) alleine bestimmt, sondern zusätzlich auch durch den advektiven Wärmetransport des strömenden Grund-

wassers. Je nach Darcy-Geschwindigkeit der Grundwasserströmung kann so eine größere Wärmemenge zur Erdwärmesonde transportiert werden. Entweder steigert dies die Entzugsleistung oder verringert die Auskühlung der Sondenumgebung.

Aus modelltechnischen Gründen muss zur Berechnung des Grundwassereinflusses auf die Entzugsleistung ein anderes Lösungskonzept verfolgt werden, da die Modellierung bei Ausnutzen von Zylindersymmetrie keine azimutale Koordinate erlaubt. Somit ist die Parametrisierung eines lateral homogenen Grundwasserflusses in diesem Fall unmöglich. Die Modellierung der Sonde in einem dreidimensionalen kartesischen Gitter erfordert dagegen eine sehr feine räumliche Parametrisierung, wenn die Rohrgeometrie einigermaßen realistisch in einem rechtwinkligen Koordinatensystem parametrisiert werden soll. Dies hat extrem lange Rechenzeiten zur Folge, sodass sich die Entzugsleistung für eine Betriebsdauer von vielen Jahren nicht mehr in vernünftigen Zeiten berechnen lässt.

Daher wird für bestimmte Gitterblöcke des Modells eine konstante (negative) Wärmeproduktionsrate in Watt pro Volumen vorgegeben. Die Erdwärmesonde lässt sich dann durch eine Sonde in einem dreidimensionalen FD-Gitter modellieren, wobei die einzelnen Gitterpunkte der Sonde eine definierte negative Wärmeproduktionsrate besitzen. Da hier nur der Einfluss der Grundwasserströmung untersucht werden soll, spielt es keine Rolle, dass der Wärmeentzug in der Sonde zeitlich konstant ist: der zusätzliche advective Wärmetransport durch die Grundwasserströmung wird dazu führen, dass die Temperaturabsenkung bei gleichbleibender Entzugsrate in der Sonde geringer ausfällt, wenn die Simulation mit einem Modell ohne Grundwasserströmung verglichen wird.

6. Modellierung der Grundwasserströmung

Das dreidimensionale Modell der Erdwärmesonde ist in Abbildung 5 skizziert. Insgesamt besteht das Modell aus 10 übereinanderliegenden Schichten mit einer Mächtigkeit von jeweils 280 m. Die horizontalen Schichten bestehen aus 25×25 Gitterblöcken. Die Sonde wird durch die Blöcke in der Mitte der horizontalen Schichten modelliert. Mit einer lateralen Ausdehnung von 0,061 m×0,061 m besitzt die Sonde in diesem Modell die gleiche Fläche wie im zylindersymmetrischen Modell (s. Abschnitt 3), während zu den Modellrändern hin die Blockgrößen der Sondenumgebung auf bis zu 500 m anwachsen.

Die Anfangstemperaturen in den einzelnen Schichten zu Beginn der Simulation werden nach dem in Abschnitt 3 verwendeten Temperaturgradienten von 36 K km^{-1} berechnet. Somit beträgt die Temperatur in der obersten Schicht 10 °C und nimmt in jeder Schicht um 8,86 °C auf maximal 90 °C in der untersten Schicht zu. Durch die Basis des Modells fließt ein Wärmestrom von $0,08 \text{ W m}^{-2}$.

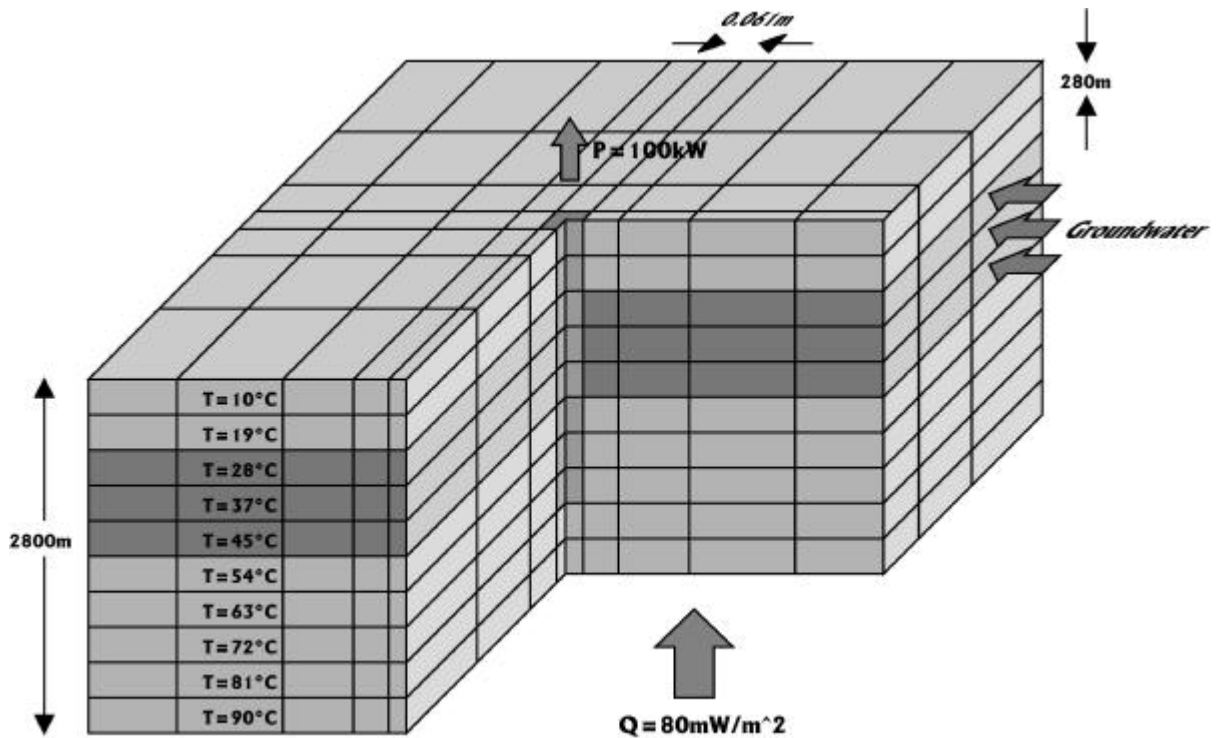


Abbildung 5: Erdwärmesonde in einem 3-dimensionalen FD-Grid. Der Wärmeentzug wird durch eine zeitlich konstante Rate von $P = -100 \text{ kW}$ realisiert. In den horizontalen Schichten 3, 4 und 5 (dunkelgrau) wird der konduktive Wärmefluss zur Sonde hin durch Grundwasserströmung (horizontale Pfeile) verstärkt.

Es wird eine konstante Entzugsrate von -100 kW angenommen. Da die Sonde nur bis zum Ende der achten Schicht reicht, muss aus den einzelnen Gitterblöcken eine Leistung von $100 \text{ kW} / 8 = 12,5 \text{ kW}$ entzogen werden. Da jeder einzelne Sondenblock ein Volumen von $0,061^2 \text{ m}^2 \times 280 \text{ m} = 1,04 \text{ m}^3$ besitzt, beträgt die jeweilige Wärmeentzugsrate etwa $12,5 \text{ kW} / 1,04 \text{ m}^3 = 12,0 \text{ kW m}^{-3}$.

Die Simulation wird für verschiedene Szenarien gerechnet:

1. Aquifer (gesättigter Porenraum) mit Porosität $\phi = 0,25$ und Permeabilität 10^{-12} m^2 in Schicht 3, 4 und 5 (d.h. von $z = 560 \text{ m}$ bis $z = 1400 \text{ m}$), aber ohne Strömung ($\vec{v}_{\text{Darcy}} = 0$). Die übrigen Schichten 1-2 bzw. 6-10 sind kompakt ($\phi = 0$)
2. wie in 1, aber mit stationärem Strömungsfeld $v_x = 10 \text{ m a}^{-1} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ in Schicht 3
3. wie in 1, aber mit stationärem Strömungsfeld $v_x = 10 \text{ m a}^{-1} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ in Schicht 3 und 4
4. wie in 1, aber mit stationärem Strömungsfeld $v_x = 10 \text{ m a}^{-1} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ in Schicht 3, 4 und 5

5. Die Szenarien 2, 3 und 4 werden für unterschiedliche Grundwasserströmungen wiederholt.

Da die Entzugsleistung als zeitlich konstante Größe definiert ist, wurde als vergleichbares Maß für die unterschiedlichen Szenarien die Abnahme der Wärmeenergie ΔE in der Sonde berechnet:

$$\Delta E = \sum_{k=1}^8 \rho_k(T_k) \cdot c_k(T_k) \cdot V_k \cdot T_k - \rho_k(T_{k,0}) \cdot c_k(T_{k,0}) \cdot V_k \cdot T_{k,0} \quad (5)$$

$$\approx \sum_{k=1}^8 V_k \cdot \rho_k(T_{k,0}) \cdot c_k(T_{k,0}) [T_k - T_{k,0}]$$

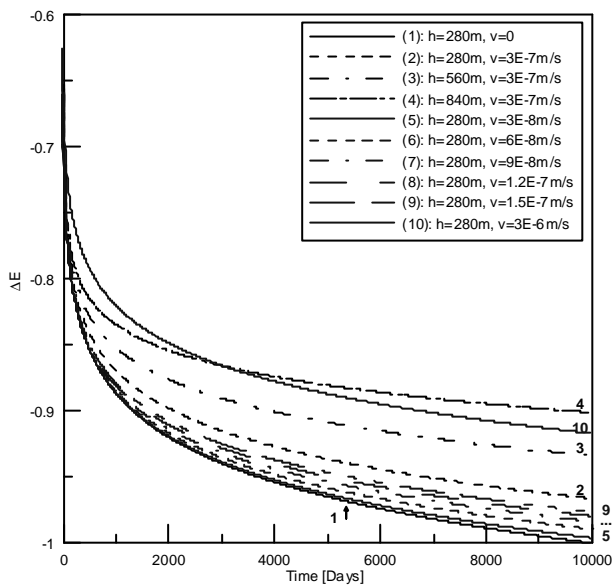


Abb. 6: Zunahme der Wärmeenergie ΔE in der Erdwärmesonde durch Grundwasserströmung als Funktion der Aquifermächtigkeit h (1-4) und der Darcy-Geschwindigkeit v (5-10).

d.h., die Auskühlung der Sonde wird durch den advektiven Wärmefluss reduziert. Der maximale Unterschied beträgt im Falle des Aquifers mit 840 m Mächtigkeit (Kurve 4 in Abb. 6) mehr als 10 % für eine Betriebszeit von knapp 30 Jahren.

Der Zusammenhang ist nochmals in Abbildung 7 verdeutlicht, wo für den Fall eines Aquifers der Mächtigkeit 280m die relative Wärmeenergiezunahme in der Sonde gegenüber dem Modell ohne Grundwasserströmung (ΔE_0) für unterschiedlich starke Grundwasserströmungen aufgetragen ist.

Es wird deutlich, dass die Entzugsrate einer Erdwärmesonde bereits bei einer langsamen Grundwasserströmung von nur $10 \text{ m a}^{-1} \approx 3,2 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ um mehr als 3% zunimmt. Nach Gl (4) wird eine Darcy-Geschwindigkeit von 10 m a^{-1} in einem guten Grundwasserleiter mit Permeabilität 10^{-12} m^2 bereits durch einen hydrostatischen Druckgradienten von nur 0,03 verursacht. Zusammenfassend lässt sich hier feststellen, dass für eine realistische Einschätzung der Entzugsrate einer Temperatursonde

wobei ρ_k bzw. c_k die Dichte bzw. spezifische Wärmekapazität des Wassers in der Sonde in Schicht k ist, V_k das Volumen des Sondenblockes und T_k die durch die negative Wärmeproduktionsrate in der Sonde veränderliche Temperatur gegenüber der Anfangstemperatur T_0 ist. In Abbildung 6 ist der nach Gl. (5) berechnete transiente Energieverlauf ΔE in der Sonde als Funktion der Darcy - Geschwindigkeit v und als Funktion der Aquifer - Mächtigkeit h aufgetragen. Die Energiekurve für die Simulation ohne Grundwasserfluss ($v=0$, unterste Kurve in Abb. 6) wurde auf - 1 normiert und die anderen Kurven für die verschiedenen Szenarien entsprechend angepasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Aquifermächtigkeit und mit zunehmender Darcy-Geschwindigkeit die Temperaturabsenkung $\Delta T \approx \infty \Delta E$ in der Sonde abnimmt,

nicht nur möglichst vollständige Informationen über die thermische Diffusivität im Untergrund wichtig sind, sondern auch eine Berücksichtigung der Grundwasserströmung.

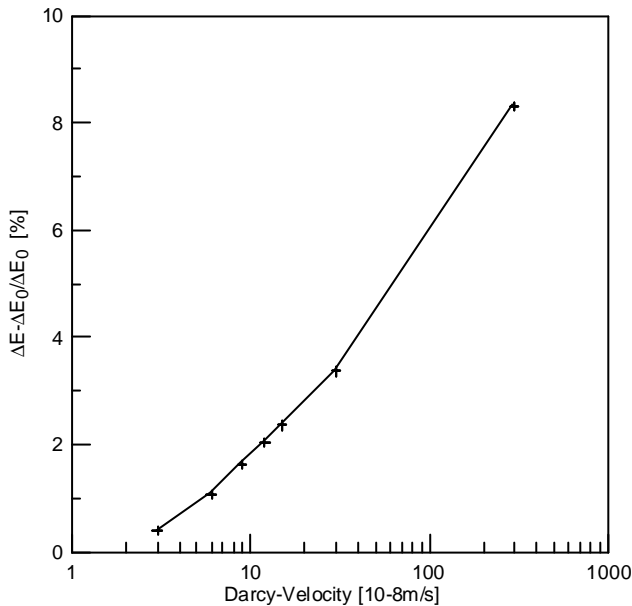


Abb. 7: Prozentuale Zunahme der Wärmeenergie in der Erdwärmesonde als Funktion der Darcy-Geschwindigkeit v .

7. Zusammenfassung

Bei der Berechnung der Entzugsleistung einer tiefen Erdwärmesonde müssen sowohl sondenspezifische Eigenschaften als auch standortgängige Faktoren wie die hydrogeologischen Bedingungen des Untergrundes berücksichtigt werden.

Hier konnte gezeigt werden, dass die Temperaturabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften des Untergrundes, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, bei der numerischen Modellierung berücksichtigt werden muss, wenn die Entzugsleistung einer Erdwärmesonde nicht unterschätzt werden soll. Am Beispiel einer tiefen Erdwärmesonde ($\Delta z = 2240 \text{ m}$, $T = 10 \text{ °C} - 72 \text{ °C}$) ergab sich eine Zunahme der Entzugsleistung um 10%, wenn anstelle einer konstanten Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes deren Temperaturabhängigkeit berücksichtigt wurde.

Hinzu kommt der Einfluss der hydrogeologischen Situation am Standort der Erdwärmesonde. Die Entzugsleistung einer Erdwärmesonde nimmt um bis zu 10 % zu, wenn lateraler Grundwasserfluss mit einer Darcy-Geschwindigkeit von bis zu $3 \times 10^6 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in einem Aquifer von etwa 300 m Mächtigkeit zusätzliche Wärmeenergie durch advektiven Transport zur Sonde hin transportiert.

Bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Buntsandsteinproben wurde eine signifikante Anisotropie von bis zu 10 % festgestellt. Neben ihrer Temperaturabhängigkeit kommt somit eine zusätzliche Variation der Wärmeleitfähigkeit hinzu, welche bei der numerischen Simulation berücksichtigt werden muss. Die Variation der Wärmeleitfähigkeit auf Grund dieser Faktoren erfordert eine genaue Messung dieser Größe an Proben vom Standort einer Erdwärmesonde.

8 . Anhang

In den folgenden beiden Diagrammen ist die an verschiedenen Buntsandsteinproben aus Ettlingen bei Karlsruhe gemessene Wärmeleitfähigkeit (hier: K) aufgetragen. Die Messungen wurden sowohl an trockenen als auch an saturierten Kernen durchgeführt. Außerdem wurde die Leitfähigkeit parallel zur Achse der Bohrkerne (obere Abbildung) und senkrecht zur Achse gemessen.

Die an trockenen und saturierten Sandsteinproben gemessene Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich um bis zu 30 % (s. Abbildung 8). Ein weiteres wichtiges Ergebnis dieser Messungen ist die signifikante Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Sandsteinproben. Hier wurde ein Unterschied von bis zu 10 % zwischen der horizontalen und vertikalen Wärmeleitfähigkeit bestimmt (s. Abbildung 9). Dies bedeutet, dass bei der Modellierung einer Erdwärmesonde die Sättigung des Untergrundes und die Anisotropie des Untergrundes unbedingt beachtet werden muss.

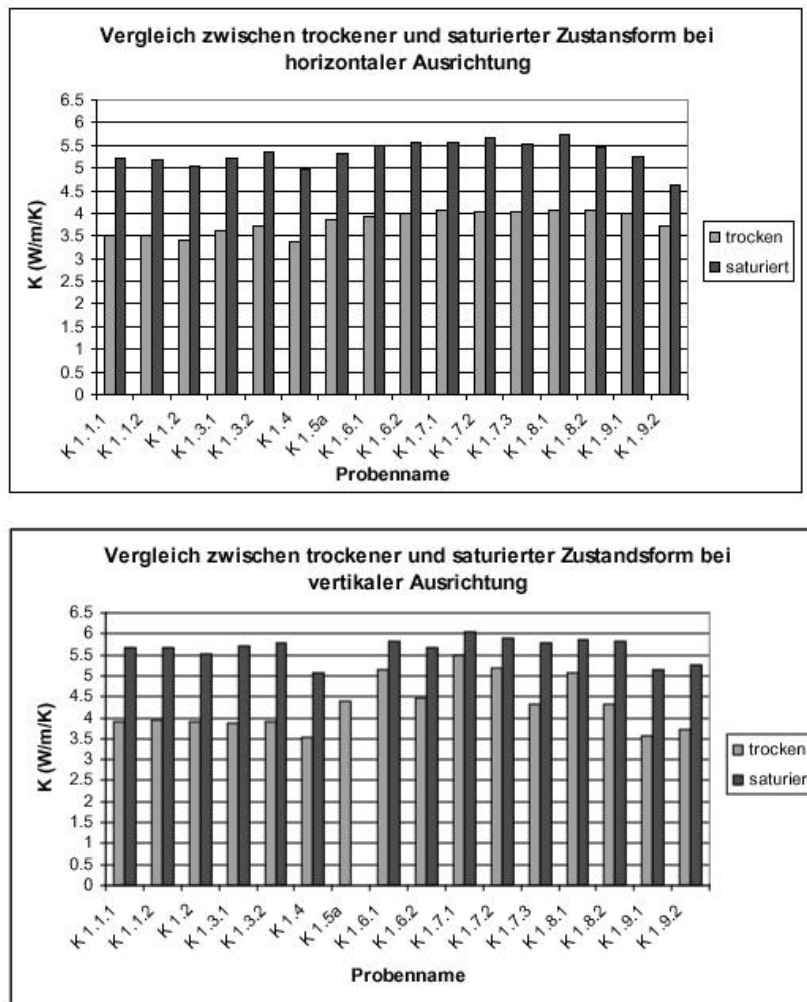


Abbildung 8: Wärmeleitfähigkeit K von trockenen bzw. saturierten Sandsteinproben aus Ettlingen bei Karlsruhe. Die Wärmeleitfähigkeit wurde senkrecht bzw. parallel zur Achse der Kerne gemessen.

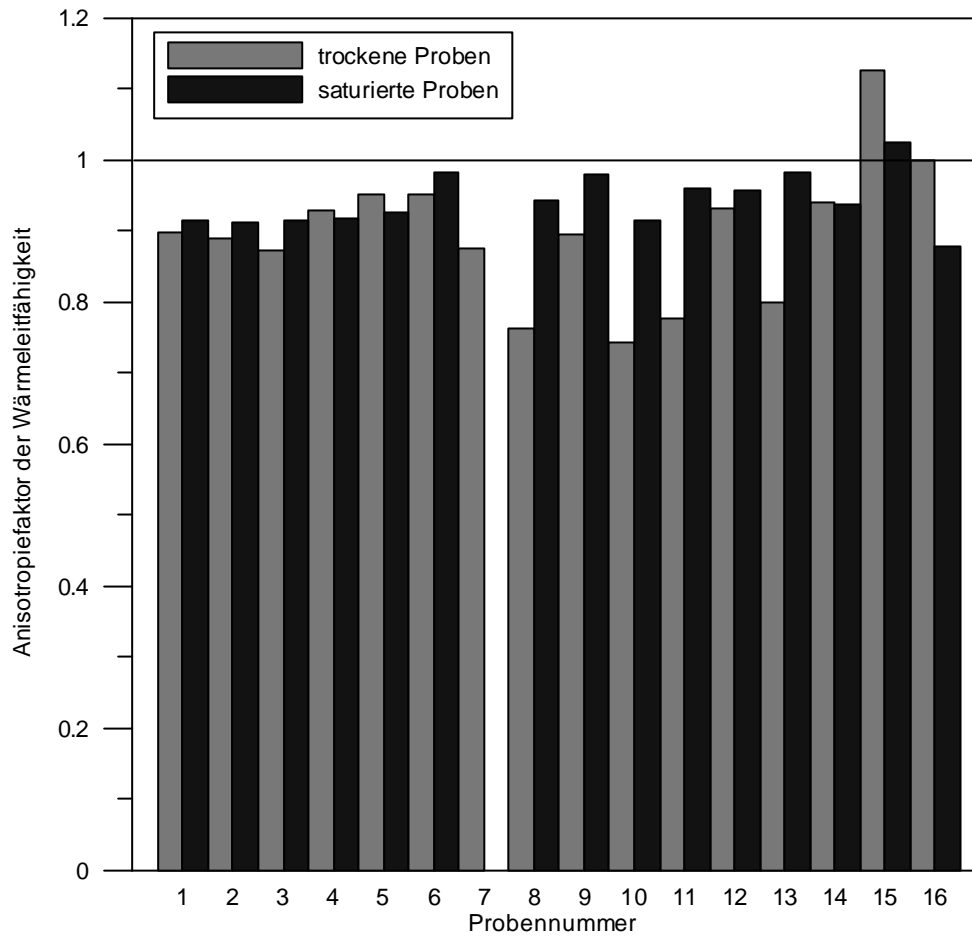


Abbildung 9: Anisotropiefaktor der Wärmeleitfähigkeit, gemessen an verschiedenen Sandsteinproben aus Ettlingen bei Karlsruhe, s. auch Abb. 8.

9. Literatur

Mase, C. and Bessler, J., 1991: WATER , routines for computing the material properties of water as state functions of fluid pressure and temperature, University of British Columbia

Zoth, G. and Hänel, R., 1988, Appendix, in *Handbook of terrestrial heat flow density determination*, S.447-468, ed. Hänel, R. u.a., Kluwer, Dordrecht