

Simulationswerkzeuge für Erdwärmesonden

Numerische Modellrechnung ■ Präsentiert wird ein Programm zur Auslegungsrechnung und Simulation von Erdwärmesondenfeldern. Dieses besteht aus einer effektiven Finite-Differenzen-Formulierung für koaxiale und Doppel-U-Erdwärmesonden, welche in das Simulationsprogramm SHEMAT implementiert wurde. Dabei kann das Langzeitverhalten von Einzelsonden und Sondenfeldern in dreidimensionalen Modellen betrachtet werden.

Ein neuer Ansatz zur numerischen Erfassung der physikalischen Prozesse in einer Erdwärmesonde und deren Rückkopplung auf das umgebende Medium basiert auf thermischen Widerständen, sodass eine hohe Gitterauflösung der Sondengeometrie nicht erforderlich ist. Somit wird die Simulationszeit im Rechenprozess erheblich verkürzt. Es können sowohl flache als auch tiefe Erdwärmesonden betrachtet werden. Die Kopplung mit SHEMAT wird über eine effektive Wärmeproduktion realisiert. Durch diese Verbindung ist es möglich, die Erdwärmesonden in beliebige, heterogene geologische Modelle zu integrieren. Zusätzlich kann der Einfluss von Strömung im Untergrund untersucht werden. Dies ist insbesondere für das Langzeitverhalten von einzelnen Sonden bzw. Sondenfeldern und ihrer thermischen Auswirkung auf den Untergrund wichtig.

Software für Erdwärmesonden

Es existieren verschiedene numerische Werkzeuge zur Simulation des thermischen Verhaltens von Erdwärmesonden, wie z. B. der „Earth Energy Designer (EED)“ [1] oder das Programm „EWS“ [2]. Eine möglichst genaue Vorhersage des langfristigen Verhaltens von Erdwärmesonden ist für eine optimale Dimensionierung wünschenswert. Die genannten Programme erlauben zwar eine schnelle Berechnung der notwendigen Parameter, jedoch mit der Einschränkung, dass nur der konduktive Wärmestrom betrachtet werden kann. Zum Wärmetransport im Untergrund trägt aber unter Umständen die Grundwasserströmung bei, die erhebliche Aus-

wirkung auf die Effizienz einer Sonde haben kann. Andererseits führt eine Simulation mit einem Programm, welches sowohl Wärme als auch Strömung berücksichtigt, zwangsläufig zu großen Modellen und somit zu langen Rechenzeiten. Daher ist ein Kompromiss zwischen den verschiedenen Programmen erstrebenswert. Vorgestellt wird ein Ansatz, der ein eindimensionales Finite-Differenzen-Gitter zur Simulation der Erdwärmesonde mit einem allgemeinen Programm zur Modellierung von Strömung, Wärme- und reaktivem Stofftransport koppelt.

Implementation in SHEMAT

Das Programm SHEMAT (Simulator of Heat and Mass Transport, [3]) berechnet Strömung und Wärmetransport mittels finiter Differenzen. Der neue Ansatz zur Simulation des Wärmetransports zwischen auf- und abströmendem Fluid, Rohrmaterialien sowie der Bohrlochhinterfüllung wird über thermische Widerstände realisiert. Dabei können sowohl Koaxialsonden als auch Doppel-U-Sonden berücksichtigt werden. In letzterem Fall ist wegen der komplexen Geometrie die Berechnung der thermischen Widerstände nicht trivial, daher wird auf den Ansatz von [4] zurückgegriffen. Die gesamte Sonde wird als eindimensionales Finite-Differenzen-Gitter über eine effektive Wärmeproduktion an das Programm SHEMAT gekoppelt. Dadurch kann ein beliebiger, heterogener und durchströmter Untergrund betrachtet werden. Das Programm liefert die Möglichkeit, die Erdwärmesonden an beliebigen Stellen in einem 3-D Modell zu

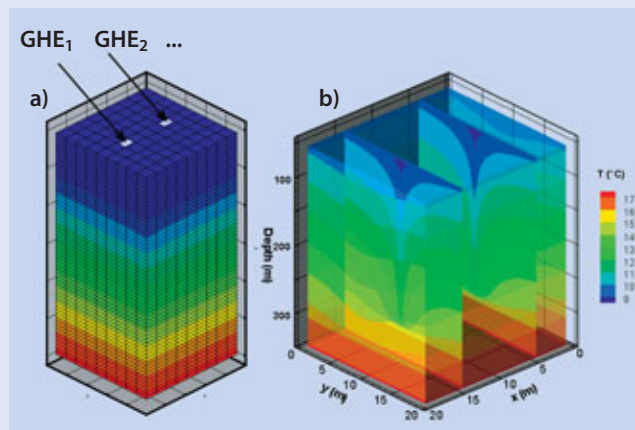


Abb. 1 a) Die Orte der betrachteten Erdwärmesonden werden durch die Stelle (i,j) an der Oberfläche des Gitters bestimmt; b) Das Temperaturfeld eines 3D Modells mit zwei 250 m langen Erdwärmesonden nach einem Dauerbetrieb von 100 Tagen

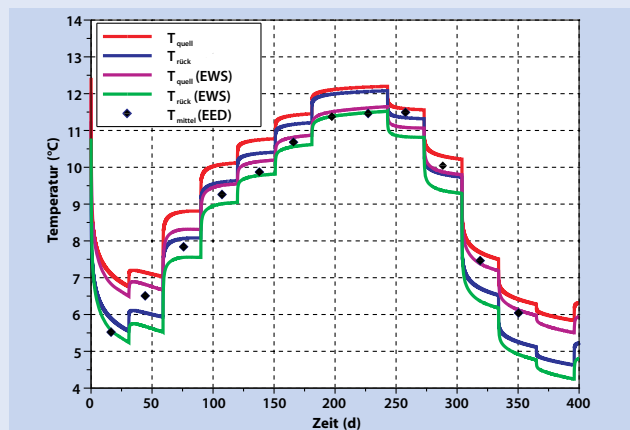


Abb. 2 Vergleich der mit dem neuen Ansatz ermittelten Temperaturen einer Erdwärmesonde mit dem Programm EED und EWS für einen typischen Jahresverlauf, beginnend im Januar

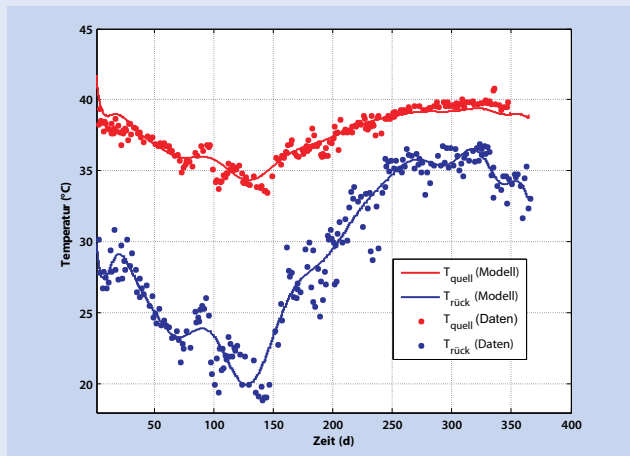


Abb. 3 Vergleich der modellierten Quell- und Rücklaufemperaturen mit gemessenen Werten der tiefen Erdwärmesonde Weggis (Thermal1) im Jahre 2000 [6]

platzieren (Abb. 1). Unter Einhaltung numerischer Stabilitätskriterien bestimmt nur die Größe des 3-D Modells die Simulationsdauer, die zusätzliche Zeit zur Berechnung der Erdwärmesonden ist vernachlässigbar.

Vergleich mit anderen Programmen und Messungen

Um den neuen Ansatz zu validieren, wurden zunächst Vergleiche mit den existierenden Programmen durchgeführt. Als Modell diente eine 100 m Doppel-U Sonde in einem homogenen Untergrund (Tab. 1), welches als existierende Sonde [5] entnommen wurde. Während der Ansatz von EWS semi-analytisch ist und sowohl Quell- als auch Rückgabetemperaturen berechnet, gibt EED nur Monatsmittel der Fluidtemperatur über die gesamte Sondenlänge an. Die Berechnungen erfolgen mit einem rein analytischen Ansatz. Im Beispiel (Abb. 2) ergeben sich Differenzen von etwa 1 K gegenüber EED. Ein Vergleich mit dem Programm EWS ergibt eine gute Übereinstimmung. Die Beispiele verdeutlichen die Größenordnung der Unsicherheiten, welche jedoch aufgrund der Verschiedenartigkeit der Ansätze (analytisch und Finite Differenzen) zu erwarten sind und sich in einem akzeptablen Bereich bewegen. Schließlich wurden Daten aus einer tiefen Erdwärmesonde in Weggis (Schweiz) zur Validierung des Programms herangezogen (Abb. 3). Über mehrere Jahre wurden die Betriebsdaten wie Ein- und Austrittstemperatur und Pumprate aufgezeichnet und vollständig dokumentiert [6]. Die Sonde Weggis wurde unter Berücksichtigung der umgebenden Geologie und der Bohrungsgeometrie mit dem Programm abgebildet und die aufgezeichneten Betriebsdaten zur Validierung der Software benutzt. Hierzu wurden die registrierten Rücklaufemperaturen und die Pumpraten als Eingangsparameter vorgegeben und die Quelltemperaturen der Sonde mit dem Programm berechnet. Der Vergleich dieser und der gemessenen Quelltemperaturen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Damit wird dokumentiert, dass mit diesem Programm auch tiefe Erdwärmesonden simuliert werden können und Parameter wie die zu erwartende Quelltemperatur oder die thermische Leistung der Sonde prognostiziert werden können.

Parameter	Wert
Bohrlochdurchmesser	0,115 m
Rohrdurchmesser, Wandstärke	32 mm, 5,8 mm
Wärmeleitfähigkeit Rohr	$0,42 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Länge	100 m
Pumprate	$1,476 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Fluid	Wasser-Ethylenglykol (20 %)
Leistung (variierend)	208 W – 2070 W
Wärmeleitfähigkeit Boden	$2,46 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung	$0,81 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Thermische Kapazität Boden	$2,6 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Simulationszeit	10 Jahre

Tabelle 1 Eigenschaften der für das Modell genutzten Erdwärmesonde

Einfluss von Grundwasserströmung

Um den Einfluss der Grundwasserströmung auf das Verhalten von Erdwärmesonden zu untersuchen, wurde ein 3-D Modell mit einer 100 m langen Erdwärmesonde erstellt. Die Auslegung entspricht der Sonde aus dem Validierungsbeispiel. In dem Modell wird die Rücklauftemperatur konstant bei 5 °C gehalten und über ein hydraulisches Gefälle eine relativ große Darcy-Strömungsgeschwindigkeit von ►

Alles an Bord: Doppelkopf + Container

für Brunnenbau und Geothermie

ROTOMAX XL GTC

Maschinen + Rohre	nur 13 t
Leistung	103 kW
Getriebe	26.000 Nm
Hyd. Spannkopf	Ø 178
Zugkraft Spannkopf	14 t
Zugkraft Zange	36 t
Doppelbrechzange	35.000 Nm
Containerinhalt	54 m, Ø 178 + 162 m, Ø 95

**50 t Zugkraft
für Bergefälle**



Born to drill



Geotec Bohrtechnik GmbH
Aspastraße 26
59394 Nordkirchen

02596 9700-0
contact@geotec-bohrtechnik.de
www.geotec-bohrtechnik.de



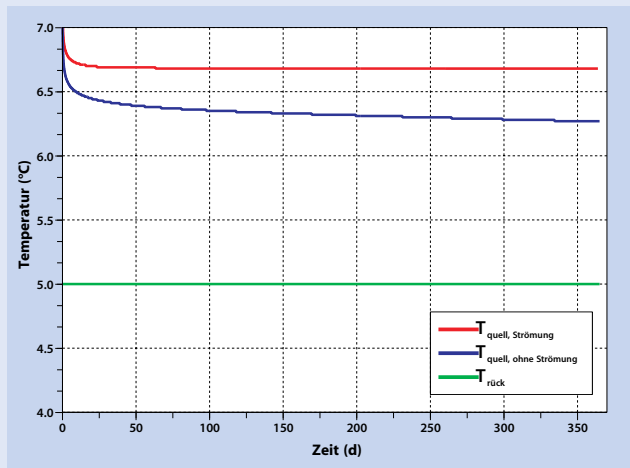


Abb. 4 Der Einfluss von Grundwasserströmung auf die Quelltemperatur der Erdwärmesonde aus Tabelle 1.

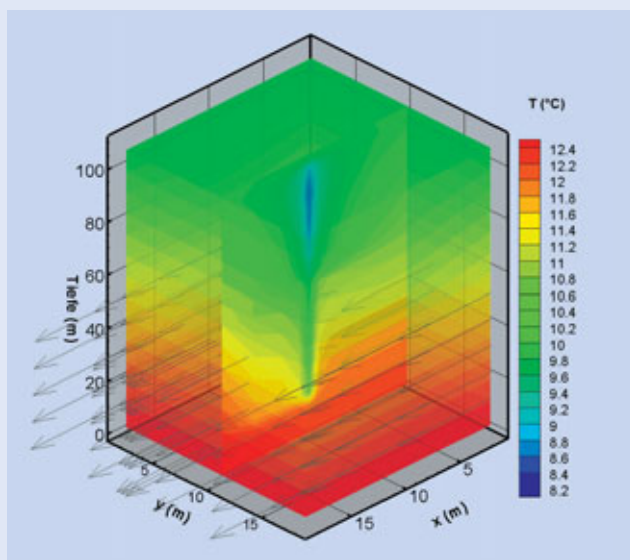


Abb. 5 3D-Temperaturfeld des synthetischen Beispiels zur Untersuchung des Einflusses von Grundwasserströmung.

30 m a⁻¹ realisiert. Während im Falle ohne Strömung die Quelltemperatur auch noch nach einem Jahr weiter abnimmt, führt die Grundwasserströmung ausreichend Wärme heran, um sie nach etwa 50 Tagen konstant bei ca. 6,7 °C zu halten (Abb. 4). Der Einfluss der Grundwasserströmung wirkt sich direkt auf die Quelltemperatur und somit auf die Leis-

tungsfähigkeit der Sonde aus. Je nach Strömungsgeschwindigkeit und Mächtigkeit des Aquifers können bei einer Grundwasserströmung erhebliche Leistungsgewinne für Erdwärmesonden erzielt werden. Mit solchen Modellrechnungen können diese Leistungsgewinne quantifiziert und bei der Planung von Erdwärmesondenfeldern berücksichtigt werden.

Eine Grundwasserströmung wirkt sich nicht nur auf die Leistungsfähigkeit einer Sonde aus, sondern beeinflusst auch das Temperaturfeld in der Umgebung. Während in einem Untergrund mit rein konduktivem Wärmetransport sich in der Umgebung der Sonde ein symmetrischer Temperaturtrichter einstellt, baut sich unter Einwirkung einer Grundwasserströmung ein asymmetrisches Temperaturfeld auf (Abb. 5).

Thermische Visualisierung von Sondenfeldern

Die thermische Interaktion von Erdwärmesonden mit dem Untergrund kann bei großen Sondenfeldern erhebliche Auswirkungen auch auf die weitere Umgebung haben. Eine Prognose der Untergrundtemperaturen im Langzeitbetrieb gewinnt deswegen im Rahmen der Genehmigungsverfahren für Sondenfelder zunehmend an Bedeutung. Daher wurde ein weiteres Softwarewerkzeug entwickelt, mit dem sich die Auswirkung von Sondenfeldern beliebiger Geometrie auf den Untergrund simulieren lässt. Da eine vollständige Simulation von großen Erdwärmesondenfeldern zu sehr langen Rechenzeiten führt, wurde die Software dahingehend modifiziert, nur das Temperaturfeld der Sondenumgebung zu berechnen und nicht explizit die Fluidtemperaturen innerhalb der Sonde wie im obigen Ansatz. Als Eingangsparameter gehen in die Berechnung die prognostizierten Energiemengen in kWh ein, wobei die Eingabe eine freie Variation der Heiz- bzw. Kühllasten mit der Zeit erlaubt. Diese jährlichen Lastprofile werden im Modell in eine effektive Wärmeproduktion umgerechnet. Exemplarische Berechnungsergebnisse sind nachfolgend für ein Sondenfeld von ca. 40 Sonden mit 30 m Tiefe dargestellt. Diese Sonden wurden in einen Drei-Schicht-Modellraum gesetzt. Der grundwasserdurchströmte Bereich befindet sich einer Tiefe von 11 bis 28 m. Für die Grundwasserströmung wurde eine Darcy-Geschwindigkeit von 37,5 m pro Jahr angenommen. **Abbildung 6** zeigt die Temperaturen als Horizontalschnitte des 3-D Modells in 8 m unter GOK, 18 und 28 m unter GOK nach 15 Jahren. Wie zu erwarten, erzeugt der „dichte“ Bereich des Sondenfeldes die stärkste Kältefahne. Sie resultiert

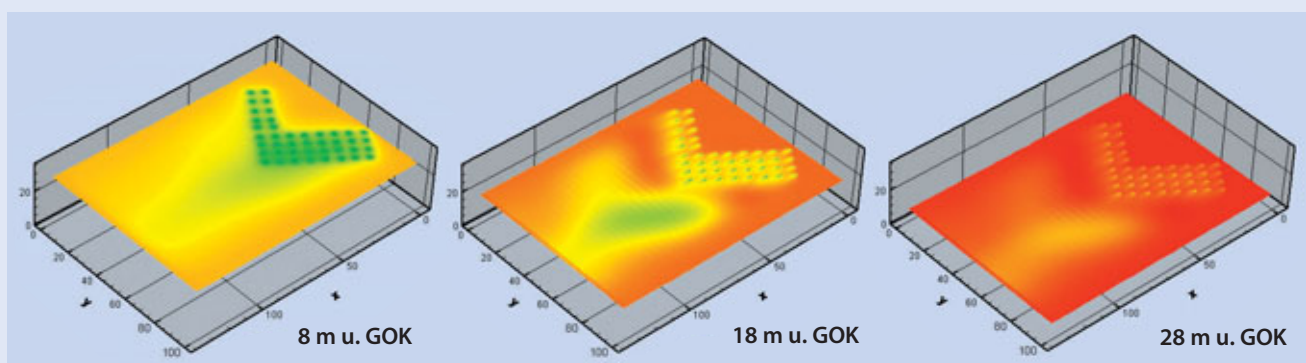


Abb. 6 Horizontalschnitte in drei Tiefenstufen; Visualisierung der Kältefahnen eines Erdsondenfeldes nach 15-jährigem Betrieb

aus der vorangegangenen Heizperiode und ist mit der Grundwasserströmung transportiert worden. Die Temperaturdifferenzen zwischen der Kältefahne und der ungestörten Umgebung erreicht ca. 1,5 K.

Diskussion und Ausblick

Der hier vorgestellte Ansatz zur Berechnung des Temperaturverhaltens von Erdwärmesonden zeigt vielversprechende Ergebnisse. Aufgrund der Kopplung mit dem Programm SHEMAT können beliebige geologische und hydrologische Gegebenheiten berücksichtigt werden. Zudem können mit diesem Programm Koaxial- und Doppel-U-Sonden vollständig und realitätsnah abgebildet werden. Im Modell werden sowohl die Sondengeometrie als auch die thermischen Eigenschaften der Sondenmaterialien und der Hinterfüllung berücksichtigt. Die Eingabe erlaubt die Vorgabe beliebiger Lastprofile, sodass das thermische Verhalten einer Sonde für tageszeitlich oder monatlich wechselnde Wärme- und Kältebedarfsanforderungen prognostiziert werden kann. Für größere Sondenfelder wird über eine indirekte Berechnung das langfristige Verhalten des Temperaturfeldes in der Umgebung der Sonde berechnet. Vergleiche mit existierenden Programmen und mit real gemessenen Daten zeigen eine gute Übereinstimmung und belegen die Aussagekraft der numerischen Berechnungen. Das ist besonders für tiefe Erdwärmesonden von Bedeutung, für die eine möglichst genaue Vorhersage der möglichen Entzugsleistung und der zu erwartenden Quelltemperaturen von entscheidender ökonomischer Bedeutung ist.

Quellenangaben

- [1] Hellström, G. & Sanner, B. (2008), EED Earth Energy Designer, User manual, Version 3.0
- [2] Huber, A. (2008), Benutzerhandbuch zum Programm EWS, Version 4.0; Berechnung von Erdwärmesonden, Huber Energietechnik AG Ingenieur- und Planungsbüro, Zürich, Schweiz
- [3] Clauser, C., ed. (2003), Numerical Simulations of Reactive Flow in: Hot Aquifers: SHEMAT and Processing SHEMAT, Springer, Berlin-Heidelberg
- [4] Hellström, G. (1991), Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems, PhD thesis, Theory. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund
- [5] Signorelli, S. (2004) Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems; Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 15519, 2004
- [6] Eugster, J. & Füglistner, H. (2003), Tiefe Erdwärmesonde Weggis, Messkampagne zur Dokumentierung der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung; Schlussbericht, i. A. des Schweizer Bundesamtes für Energie

Abbildungen: Geophysica

Autoren:

Dr. Renate Pechnig
 Dr. Darius Mottaghy
 Geophysica Beratungsgesellschaft mbH
 Lütticherstr. 32
 52064 Aachen
 Tel.: 0241 1899-2916
 Fax: 0241 1899-2913

E-Mail: d.mottaghy@geophysica.de / r.pechnig@geophysica.de
 Internet: www.geophysica.de



Intelligente Erdwärmegewinnung

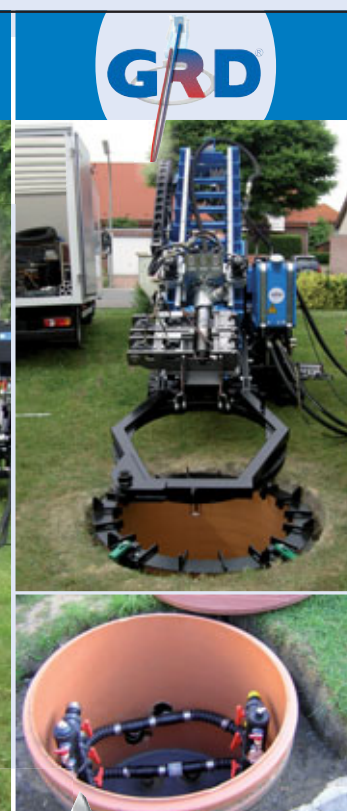
Innovative Maschinentechnik garantiert:

- deutliche Bohrkostensenkung
- dauerhaft hohen Wärmeentzug
- Oberflächenschonung
- kurze Rüst- und Bohrzeiten
- kleine, kompakte Bohranlage
- schnelle Amortisation



So wird Erdwärme zur wirklich lohnenden Energiequelle!

TRACTO-TECHNIK GmbH & Co. KG · P.O. Box 4020 · D 57356 Lennestadt
 Tel.: +49 2723 808219 · Email: marketing@tracto-technik.de · www.tracto-technik.de



GRD-Radial-Bohrverfahren