

Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten

Simone Pannike, Martin Kölling, Björn Panteleit, Jörg Reichling, Volker Scheps, Horst D. Schulz

Kurzfassung

Die Entnahme bzw. Zuführung von Wärme im Untergrund durch oberflächennahe Erdwärmesonden (EWS) bei Heizung bzw. Kühlung von Gebäuden führen zur Ausbildung von Temperaturanomalien (Kältefahnen bzw. Wärmefahnen) im Umfeld der Sonde. Die Ergebnisse numerischer Modellierungen unterstreichen die Bedeutung des fließenden Grundwassers für den Wärmeentzug aus Lockergesteinen. Die Modellierungen haben gezeigt, dass einerseits die

Eigenschaften des Sedimentes und hier insbesondere die hydraulische Durchlässigkeit, andererseits die entnommene Wärmemenge großen Einfluss auf die Ausdehnung der Fahnen haben. Das fließende Grundwasser steuert sowohl die Ausbreitung der abgekühlten, als auch die Nachlieferung warmer Wassermassen. Anhand der hier vorgestellten Modellrechnungen können Voraussagen über die Ausdehnungen von Temperaturanomalien in einem Korngrößenpektrum von Ton bis Grobsand, mit Fließgeschwindigkeiten von $5 \cdot 10^{-11}$ bis $1 \cdot 10^{-05}$ m/s getroffen werden. Der Wärmeentzug wurde in Szenarien mit verschiedenen Wärmemengen von 3.600 bis 10.800 kWh pro Jahr simuliert. Über die Umrechnung der Wärmeleistung in Entzugsleistung pro Sondenmeter können Aussagen über die Kältefahnen bei verschiedenen Erdwärmesondenlängen getroffen werden.

Dipl. Geol. S. Pannike,
Arbeitsgruppe Geobiologie, MARUM – Universität Bremen,
Leobener Str., 28359 Bremen,
Telefon: +49 421 218-65743, Telefax: +49 421 218-65715,
E-Mail: pannike@uni-bremen.de

Dr. M. Kölling, Prof. Dr. H.D. Schulz,
Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen,
Bibliothekstraße 1, 28359 Bremen,
Telefon: +49 421 218-3928, -3393, Telefax: +49 421 218-4321,
E-Mail: koelling@uni-bremen.de, hdschulz@uni-bremen.de

Dr. B. Panteleit,
Geologischer Dienst für Bremen,
Friedrich-Mißler-Straße 46/48, 28211 Bremen,
Telefon: +49 421 20346-83, Telefax: +49 421 20346-64,
E-Mail: b.panteleit@nlfb.de

Dr. J. Reichling,
Geschäftsstelle der Kommission für Geoinformationswirtschaft
des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit an der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe,
Stilleweg 2, 30655 Hannover,
Telefon: +49 511 643-3000, Telefax: +49 511 643-2995,
E-Mail: j.reichling@bgr.de

Dr. V. Scheps,
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg,
Stahnsdorfer Damm 77, 14532 Kleinmachnow,
Telefon: +49 33203 36-610, Telefax: +49 33203 36-702,
E-Mail: scheps@lgrb.de

Eingang des Beitrages: 29.06.2005
Eingang des überarbeiteten Beitrages: 05.01.2006

Abstract

Influences of hydrogeological parameters by borehole heat-exchangers in unconsolidated rocks

Extracting heat from and input of heat into sediments using shallow ground-source heat pumps, so called Borehole Heat Exchanger (BHE) causes cold or hot plumes of anomalies of groundwater temperature different in all directions from the BHE. The simulations shown in this paper emphasize the significance of ground-water flow to the heat extraction from unconsolidated rocks. The simulation results show big influence of the amount of extracted heat and the sediment properties, especially the hydraulic conductivity, on the dimension of cold plumes. Groundwater flow is the main factor of influence on the spreading of cooled water as well as supply of warmer water masses. The results of modelling can help to predict the dimension of these plumes growing under the given conditions of various grain sizes, ranging from clay to coarse sand, and ground-water flow velocities between $5 \cdot 10^{-11}$ to $1 \cdot 10^{-05}$ m/s. Furthermore different heat capacity values, ranging from 3,600 to 10,800 kWh a year were simulated. Converting the heat capacity of a BHE into a specific heat extraction capacity per meter allows the transfer of our results to other boreholes.

Einführung

Geothermie ist weltweit neben Wind, Sonne, Wasserkraft und Biomasse die wichtigste erneuerbare Energiequelle. Die oberflächennahe Geothermie, überwiegend in Tiefen bis 100 m, stellt in Deutschland eine praktikable Alternative zur konventionellen Wärmeerzeugung dar. Bei der Nutzung der geothermischen Energie stellt sich die Frage nach den Auswirkungen, die die Entnahme von Wärme auf den Untergrund und speziell den Grundwasserleiter hat. Wie viel Wärme kann entzogen werden? Wie weit breitet sich die Abkühlung aus? Von welchen Parametern ist die Ausbreitung der Abkühlung abhängig? Wie groß muss der Abstand zwischen einzelnen geothermischen Anlagen sein? Bewegt sich die Temperaturabsenkung über Grundstücksgrenzen hinaus? Für die Auslegung einer Erdwärmesonde (EWS) müssen Wärmebedarf (Grund- und Spitzenlast), Kenngrößen der Bohrung und der Erdwärmesonde, Klimadaten sowie die hydrogeologischen Verhältnisse bekannt sein.

In den Anforderungen an Erdwärmepumpen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 2002) wird für kleine Anlagen mit einer Wärmeleistung bis 30 kW eine Entfernung der Erdwärmesonde zur Liegenschaftsgrenze von 5 m gefordert. Diese Angabe findet sich auch in der Richtlinie 4640 des Verbandes der deutschen Ingenieure (VDI 2001) und wurde von allen Bundesländern, die bisher eine Regelung eingeführt haben, so übernommen. Die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin fordert in einem Merkblatt „Wärmepumpenanlagen“ (SENSTADT 2004), dass das Grundwasser in einem Abstand zur EWS von 5 m nicht unter 4 °C abgekühlt werden darf. Den Besitzern aller angrenzenden Grundstücke muss dabei gewährleistet werden, ebenfalls die Wärme des flachen Untergrundes mit einer Erdwärmesonde zu nutzen.

Der geothermische Wärmefluss aus dem Erdinneren beträgt zwischen 0,055 und 0,08 W/m² (EED Datenbank, ESKILSON et al. 2000). In gut durchlässigen Aquiferen wird mit dem Grundwasser stetig Energie zugeführt, die ursprünglich vom Regen- und Sickerwasser aus der Sonnenstrahlung aufgenommen wurde. Demzufolge tragen auch die Neubildung von Grundwasser und der Transport dieses Grundwassers an den Ort der Wärmeentnahme zur Regeneration bei. Durch die Wärmeentnahme entstehen Temperaturanomalien, die im Weiteren als Kältefahnen bezeichnet werden. Diese Kältefahnen breiten sich so weit aus, bis ein Gleichgewicht zwischen der Entnahme und dem Zufluss von Wärme entsteht.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Verbesserung der Vorstellungen über die Ausbreitung von Kältefahnen und den Transport von Wärme in oberflächennahen Aquiferen leisten. Ziel ist es, eine Datenbasis zu schaffen, um die Auswirkungen einer Erdwärmesonde für Projekte verschiedener Größenordnungen und hydrogeologischer Situationen abschätzen zu können. Dafür werden Form und Geschwindigkeit der Ausdehnung der Kältefahnen im Untergrund betrachtet. Die hydraulischen und thermischen Parameter für die Modellierung wurden an Proben aus einer Bohrung im August 2004 auf dem Gelände der Universität Bremen (ARNING 2006) bestimmt sowie aus der Literatur entnommen.

Die Simulation der Wärmeentnahme und Wärmezugabe durch eine Erdwärmesonde erfolgt mit dem Programm SHEMAT/Processing SHEMAT (CLAUSER 2003). Fünf Sedimente (Grob-, Mittel-, Feinsand, Schluff und Ton), drei Grundwassergefälle

(0,5 ‰, 1 ‰ und 2 ‰) und vier Szenarien mit unterschiedlichen Wärmeentnahmemengen werden jeweils als Einschichtfälle gerechnet. In einem fünften Szenario wird anhand der Bohrung auf dem Universitätsgelände Bremen ein Mehrschichtfall simuliert, um die Gesamtwirkung von Schichten mit unterschiedlichen hydraulischen und thermischen Parametern auf die Ausbreitung der Temperaturanomalie zu untersuchen. Bei diesen Rechnungen werden die Temperaturabsenkungen um 0,1 °C, 0,5 °C und 1,0 °C betrachtet. Die Messgenauigkeit von Temperatursonden beträgt ca. 0,1 bis 0,5 °C (z. B. RÖHRENWERK KUPFERDREH 2006). Die Autoren gehen davon aus, dass eine Temperaturveränderung von weniger als 1,0 °C nach den Vorgaben der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung als „weitgehend abgeklungen“ bezeichnet werden kann (SENSTADT 2004).

Parametrisierung des Modells

Mit SHEMAT können Grundwasserfluss und Wärmetransport kombiniert werden. Bei Voruntersuchungen wurden die Zeitschritte der einzelnen Rechnungen, sowie die Zellgröße variiert, um die optimalen Werte für diese Modellparameter zu ermitteln. Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit müssen die Zeitschritte verkleinert werden, um das Courant Kriterium für die Rechnungen zu erfüllen (CLAUSER 2003). Die Zellen im Nahbereich der Sonde sind klein, um eine hohe Auflösung der Temperaturgradienten in diesem Bereich zu erzielen. In größerer Entfernung von der Erdwärmesonde ist das Gitter gröber. Die als Erdwärmesonde definierte Zelle ist von den Modellrändern so weit entfernt, dass die bei der Modellierung entstehenden Veränderungen nur innerhalb des Modellgebietes stattfinden. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die vorgegebenen Randbedingungen kann so ausgeschlossen werden.

Das Modellgebiet für die Szenarien 1 bis 4 ist 200 bis 300 m lang und 120 m breit, bei einer 100 m mächtigen homogenen Schicht (siehe Anhang Abb. A2, <http://www.geochemie.uni-bremen.de>). Bei einigen Sedimentarten und Fließgeschwindigkeiten musste das Modellgebiet verlängert werden, um den Abstand zwischen der Kältefahne und den Modellrändern ausreichend dimensionieren zu können. Für das Szenario 5, in dem die Sedimentabfolge der Bohrung auf dem Gelände der Universität Bremen simuliert wird, ist das Modellgebiet 230 m lang, 120 m breit und 50 m mächtig. Abbildung 6 zeigt schematisch den Aufbau des Modells für Szenario 5.

Mit SHEMAT können nur gespannte Grundwasserleiter simuliert werden. Das Gefälle wurde eingestellt, in dem der linke Rand des Fließfeldes entsprechend auf einem um 0,5 ‰, 1 ‰ oder 2 ‰ höheren Grundwasserstand fixiert wurde als die gegenüberliegende Seite des Modellgebietes. Die Ausgangstemperatur betrug 10 °C. An den Modellrändern wurde die Temperatur auf diesem Ausgangswert konstant gehalten. Der geothermische Wärmefluss wurde nach SCHNEIDER et al. (2003) auf 0,08 W/m² gesetzt. Die im Modell verwendeten und für Norddeutschland typischen hydraulischen und thermischen Parameter für die Szenarien 1 bis 4 sind Tabelle 1 zu entnehmen. Die Parameter für Szenario 5 hingegen wurden an Proben aus der Versuchsbohrung in Bremen ermittelt.

Die spezifische Entzugsleistung (P_{Entzug} in [W/m]) ist abhängig von der entnommenen Wärmemenge, der Wärmeleitfähigkeit (λ in [W/(m · K)]) des Sediments und dem fließendem Grundwasser. SANNER (2005) hat mit dem Programm EED für verschie-

Tab. 1: Hydraulische Modellparameter für die Erdwärmesonde (EWS) und die modellierten Sedimente Ton (T), Schluff (U), Feinsand (fS); Mittelsand (mS) und Grobsand (gS): Durchlässigkeitsbeiwert (k_f), Permeabilität (K), Gesamtporosität (n), effektive Porosität (ne), Gefälle (i), Filtergeschwindigkeit (v_f) und Abstandsgeschwindigkeit (v_a). Daten aus ¹⁾ FREEZE & CHERRY (1979), ²⁾ CHIASSON et al. (2000) und ³⁾ HÖLTING (1996). Thermische Modellparameter: spezifische Wärmeleitfähigkeit (λ) und spezifische Wärmekapazität (c). Daten aus ⁴⁾ HENNING & LÜHR (2001), ⁵⁾ CHIASSON et al. (2000) und ⁶⁾ ESKILSON et al. (2000).

* Für die EWS wurde die Durchlässigkeit sehr klein gewählt, da sie für das Grundwasser eine hydraulische Barriere darstellt. Eine hohe Porosität simuliert den Röhrencharakter einer Erdwärmesonde.

** Wert aus den Literaturdaten abgeschätzt, siehe Tabelle A1 (a).

*** Die thermischen Parameter entsprechen einer EWS mit einem Sondenfluidgemisch aus Wasser und 20 % Ethylenglycol nach SIGNORELLI (2004).

	k_f [m/s]	K [m ²]	n [-]	ne [-] ³	i [%]	v_f [m/s]	v_a [m/s]	λ [W/(m · K)] ⁴	c [MJ/(m ³ · K)]
EWS	$7,5 \cdot 10^{-13}$ *	$1,0 \cdot 10^{-19}$ *	0,90 *	–	–	–	–	0,51 ***	4,05 ***
T	$5,0 \cdot 10^{-09}$	$6,7 \cdot 10^{-16}$	0,55 ¹	0,05	0,5 1,0 2,0	$2,5 \cdot 10^{-12}$ $5,0 \cdot 10^{-12}$ $1,0 \cdot 10^{-11}$	$5,0 \cdot 10^{-11}$ $1,0 \cdot 10^{-10}$ $2,0 \cdot 10^{-10}$	1,3	3,0 ⁵
U	$5,0 \cdot 10^{-06}$	$6,7 \cdot 10^{-13}$	0,43 ¹	0,05–0,1	0,5 1,0 2,0	$2,5 \cdot 10^{-09}$ $5,0 \cdot 10^{-09}$ $1,0 \cdot 10^{-08}$	$5,0 \cdot 10^{-08}$ $1,0 \cdot 10^{-07}$ $2,0 \cdot 10^{-07}$	1,5	2,85 ⁵
fS	$5,0 \cdot 10^{-05}$	$6,7 \cdot 10^{-12}$	0,40 ²	0,10–0,20	0,5 1,0 2,0	$2,5 \cdot 10^{-08}$ $5,0 \cdot 10^{-08}$ $1,0 \cdot 10^{-07}$	$2,5 \cdot 10^{-07}$ $5,0 \cdot 10^{-07}$ $1,0 \cdot 10^{-06}$	2,2	2,5 ⁶
mS	$5,0 \cdot 10^{-04}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$	0,38 ¹	0,12–0,25	0,5 1,0 2,0	$2,5 \cdot 10^{-07}$ $5,0 \cdot 10^{-07}$ $1,0 \cdot 10^{-06}$	$2,1 \cdot 10^{-06}$ $4,2 \cdot 10^{-06}$ $8,3 \cdot 10^{-06}$	2,4	2,5 ⁶
gS	$5,0 \cdot 10^{-03}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	0,36 **	0,15–0,30	0,5 1,0 2,0	$2,5 \cdot 10^{-06}$ $5,0 \cdot 10^{-06}$ $1,0 \cdot 10^{-05}$	$1,7 \cdot 10^{-05}$ $3,3 \cdot 10^{-05}$ $6,7 \cdot 10^{-05}$	2,7	2,5 ⁶

dene Wärmeleitfähigkeiten die Entzugsleistungen berechnet. Werden diese Daten geplottet, so lassen sich für verschiedene Szenarien die folgenden Gleichungen daraus ableiten (siehe Anhang Abbildung A3, <http://www.geochemie.uni-bremen.de>):

[1] 2.100 h jährliche Betriebszeit der Erdwärmesonde, ohne Grundwasserfluss:

$$P_{\text{Entzug}} = -0,75 \lambda^2 + 12,93 \lambda + 17,58$$

[2] 2.100 h jährliche Betriebszeit, mit Grundwasserfluss:

$$P_{\text{Entzug}} = -0,97 \lambda^2 + 13,81 \lambda + 22,13$$

[3] 1.800 h jährliche Betriebszeit, ohne Grundwasserfluss:

$$P_{\text{Entzug}} = -0,85 \lambda^2 + 13,62 \lambda + 18,8$$

[4] 1.800 h jährliche Betriebszeit, mit Grundwasserfluss:

$$P_{\text{Entzug}} = -1,04 \lambda^2 + 14,24 \lambda + 23,39$$

Die Erdwärmesonde wurde auf 0,1 m mal 0,1 m dimensioniert. Die Durchlässigkeit wurde sehr klein gewählt, da die Sonde von Grundwasser nicht durchflossen werden soll. Die Porosität wurde in dieser Zelle sehr hoch gesetzt, um zu simulieren, dass in der Realität in der röhrenförmigen Sonde ein Fluidgemisch aus Wasser und einem Frostschutzmittel zirkuliert. Für die Modellierung werden der Erdwärmesonde die thermischen Parameter einer 20-prozentigen Ethylenglycol-Lösung zugewiesen (SIGNORELLI 2004).

Der Heizbedarf eines Niedrigenergie-Einfamilienhauses wird mit 2 bis 7 kW angegeben (HENNING & LÜHR 2001). Für die vorliegende Modellierung wurde deshalb ein Heizbedarf von 6 kW zugrunde gelegt. Die Erdwärmesonde muss demnach bei einer

Arbeitszahl von 4 dem Untergrund zur Beheizung des Hauses eine Wärmeleistung von 4,5 kW entziehen. Wird die Erdwärmesonde nur zur Heizung eines Gebäudes benutzt, beträgt die gesamte Jahresarbeitszeit einer Erdwärmesonde verteilt auf das Winterhalbjahr ca. 1.800 h. Zusätzlich kann auch die Energie für die Warmwasserbereitstellung mit der Erdwärmesonde erzeugt werden. Dann ist eine jährliche Arbeitszeit von 2.400 h nötig (VDI 2001). Die zusätzlichen 600 Arbeitsstunden verteilen sich über das gesamte Jahr. Die für eine Wärmeleistung (P_w in [W]) benötigte Länge der Erdwärmesonde (L_{EWS} in [m]) kann aus den spezifischen Entzugsleistungen berechnet werden (SANNER 2005):

$$[4] L_{\text{EWS}} = P_w / P_{\text{Entzug}}$$

Insgesamt wurde mit Wärmeleistungen von 4,5 und 3 kW gearbeitet. In Tabelle 2 sind die dafür notwendigen Längen der Erdwärmesonden für die verschiedenen Sedimente aufgeführt. Die spezifischen Entzugsleistungen wurden mit Formel (IV) für eine Betriebszeit von 1.800 h pro Jahr mit fließendem Grundwasser berechnet. Die Szenarien 1 bis 4 berücksichtigen die Abhängigkeit der Ausbreitung der Kältefahne von der entnommenen Wärmemenge und der Betriebszeit. In diesen Szenarien wird jeweils von einem homogenen Einschichtfall ausgegangen. In Szenario 5 wird anhand des vereinfachten Profils der Bohrung auf dem Gelände der Universität Bremen untersucht, wie sich ein aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen hydrogeologischen und thermischen Eigenschaften bestehender Untergrund auf die Ausbreitung der Temperaturanomale auswirkt. Alle Modelle betrachten eine Gesamtbetriebszeit in Höhe einer geschätzten Lebensdauer der Erdwärmesonde von 30 Jahren.

Tab. 2: Spezifische Entzugsleistung (*Szenario 1 + 2*), berechnet nach Gleichung 4. Benötigte Sondenlängen für einen Wärmeentzug von 4,5 und 3 kW, berechnet nach Gleichung 5. Für Ton und Schluff reicht die spezifische Entzugsleistung nicht aus, um mit einer 100 m langen Erdwärmesonde 4,5 kW Wärmeleistung zu fördern.

Sediment	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m · K)]	spezifische Entzugsleistung [W/m]	Länge der Sonde [m]	
			bei 4.500 W	bei 3.000 W
T	1,3	40	112	75
U	1,5	43	106	71
fs	2,2	50	90	60
mS	2,4	52	87	58
gS	2,7	55	83	55

Das *Szenario 1* dient zum Vergleich der Kälteausbreitung in verschiedenen Sedimenten und Gefällen. Dabei wird dem Untergrund 4.500 W Wärmeleistung in einer Betriebszeit von 1.800 h pro Jahr entzogen. Das entspricht einer Wärmemenge von 8.100 kWh. Die Betriebszeit beschränkt sich aufgrund des saisonalen Wärmebedarfes auf das Winterhalbjahr. Die Wärmeleistung beträgt verteilt auf ein halbes Jahr 1.875 W. Das Sommerhalbjahr dient als sechsmonatige Ruhephase. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird die Länge der EWS nicht variiert. Das führt dazu, dass die geforderte Leistung die spezifische Entzugsleistung eines Tones und Schluffes bei einer 100 m langen EWS übersteigt (Tab. 2). Die Sonde ist für diesen Fall unterdimensioniert. Aus diesem Grunde wird in *Szenario 2* eine Wärmeleistung von 3 kW über eine Betriebszeit von 1.800 h entzogen. Das entspricht einer jährlichen Wärmemenge von 5.400 kWh.

In *Szenario 3* wird die geothermische Energie zusätzlich zur Warmwasserbereitung genutzt. Wie in *Szenario 1* beträgt die Wärmeleistung 4,5 kW. Die Betriebszeit erhöht sich aber auf 2.400 h pro Jahr. Die zusätzlichen 600 Betriebsstunden verteilen sich gleichmäßig auf das Sommer- und Winterhalbjahr. Insgesamt wird somit pro Jahr eine Wärmemenge von 10.800 kWh

entnommen, 9.450 kWh im Winter- und 1.350 kWh im Sommerhalbjahr. Im Sommer kann der Untergrund zusätzlich als Kältequelle genutzt werden. Wie sich der Wärmeeintrag im Sommer auf die Regeneration des Wärmeentzugs im Winter auswirkt, wird in *Szenario 4* simuliert. Für ein Einfamilienhaus kann eine Kälteleistung von 2 kW ohne Wärmepumpe über einen Zeitraum von 500 Arbeitsstunden erreicht werden (KOHLSCH 2005). Im Modell wird eine Wärmemenge von 1.000 kWh auf ein halbes Jahr verteilt in den Untergrund eingebracht. Für die Heizung im Winterhalbjahr wird, wie in *Szenario 1*, jährlich eine Wärmemenge von 8.100 kWh entzogen.

Auf dem Gelände der Universität Bremen wurde im Sommer 2004 eine Bohrung abgeteufelt. Dabei wurden der geologische Aufbau beschrieben (ARNING 2006) und Proben für die Bestimmung der Korngröße und der Wärmeleitfähigkeit genommen. Die Korngrößenuntersuchung erfolgte mit dem Partikelgrößenanalysator Coulter LS 230 am Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg. Die Wärmeleitfähigkeit wurde am Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA-Institut) in Hannover mit dem Wärmeleitfähigkeitsmessgerät TK04 der Firma TeKa unter Verwendung der Methode des instationären Wärmestroms gemessen (HALISCH & TIETZE 2005). Die gewonnenen Daten wurden in *Szenario 5a bis d* als Modellparameter eingesetzt. Das Bohrprofil wurde für *Szenario 5a* exemplarisch auf vier repräsentative Schichteinheiten reduziert und als Mehrschichtfall mit einer Gesamtmächtigkeit von 50 m nachgebildet. Das Liegende besteht aus einem mindestens 25 m mächtigem, feinsandigen Schluff. Die darüber liegende 15 m mächtige Schicht wird aus grobsandigem Mittelsand gebildet, die wiederum von 5 m mächtigem, feinsandigen Mittelsand überdeckt wird. Für das Modell sollte dieses Sedimentpaket von einer 5 m mächtigen, ungesättigten Schicht aus grobsandigem Mittelsand bedeckt sein. Für diesen Fall wurde eine Schicht ohne Grundwasserfluss mit den thermischen Eigenschaften ungesättigten Sedimentes nachgebildet. Sie ist praktisch undurchlässig für Grundwasser und weist die thermischen Eigenschaften feuchten Sandes auf (Tab. 3). Zu Vergleichszwecken wurden Einschichtfälle mit den gemittelten Werten (5b) sowie den Hauptkomponenten grobsandigem Mittelsand (5c) und Schluff (5d) modelliert.

Tab. 3: Hydraulische Parameter der Sedimente aus *Szenario 5a bis d*. Der Durchlässigkeitsbeiwert (k_f) wurde experimentell bestimmt. Die Gesamtporosität (n) und das Gefälle (i) wurden abgeschätzt, die Filtergeschwindigkeit (v_f) aus k_f und i berechnet, die Abstandsgeschwindigkeit (v_a) wurde aus dem aus Tabelle 1 ermittelten linearen Zusammenhang zwischen v_f und v_a ($v_a = 5 \cdot v_f + 2 \cdot 10^{-7}$) berechnet. Thermische Parameter der Sedimente: Werte für die Wärmeleitfähigkeit (λ) wurden experimentell bestimmt und die Wärmekapazität (c) abgeschätzt.

* Eine ungesättigte Schicht kann mit SHEMAT nicht berechnet werden. Als Annäherung wurde die Durchlässigkeit sehr klein gewählt, um den Grundwasserfluss zu verhindern. Für λ und c wurden die Werte für einen feuchten Mittelsand gewählt (EED-Datenbank (ESKILSON et al. 2000)).

** v_a konnte nicht mit Gleichung (VI) berechnet werden. Hier wurde eine effektive Porosität von $n_e = 0,15$ zu Grunde gelegt.

*** Die Mächtigkeiten der Schichten wurden in die Mittelwertberechnung mit einbezogen. Für k_p , K und n der ungesättigten Zone wurden die Werte für den gesättigten grobsandigen Mittelsand eingesetzt.

	k_f [m/s]	K [m ²]	n [-]	i [%]	v_f [m/s]	v_a [m/s]	λ [W/(m · K)]	c [MJ/(m ³ · K)]
mS, gs („ungesättigt“)*	$7,5 \cdot 10^{-14}$	$1,0 \cdot 10^{-20}$	0,38	0,5	$3,8 \cdot 10^{-17}$	$2,5 \cdot 10^{-16}$ **	1,0	1,8
mS, fs	$2,3 \cdot 10^{-04}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$	0,37	0,5	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	2,4	2,5
mS, gs	$5,3 \cdot 10^{-04}$	$7,1 \cdot 10^{-11}$	0,38	0,5	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	2,5	2,4
U, fs	$3,2 \cdot 10^{-06}$	$4,3 \cdot 10^{-13}$	0,40	0,5	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	1,9	2,6
Mittelwerte ***	$2,4 \cdot 10^{-04}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$	0,39	0,5	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	2,0	2,5

Sediment	λ [W/(m · K)]	spezifische Entzugsleistung * [W/m]	Länge der Sonde ** [m]		
			bei 4.500 W	bei 3.000 W	bei 2.000 W
mS, gs („ungesättigt“)	1,0	37	122	81	54
mS, fs	2,4	52	87	58	38
mS, gs	2,5	53	85	57	38
U, fs	1,9	47	96	64	43
Mittelwert	2,0	48	94	63	42

Tab. 4: Spezifische Entzugsleistungen und Sondenlängen für die in *Szenario 5* eingesetzten Sedimente Schicht 1: Mittelsand, grobsandig, „ungesättigt“, Schicht 2: Mittelsand, feinsandig (mS, fs), Schicht 3: Mittelsand, grobsandig (mS, gs) und Schicht 4: Schluff, feinsandig (U, fs), abgeleitet aus deren Wärmeleitfähigkeiten (λ). Für 4.500 und 3.000 W ist eine 50 m lange Erdwärmesonde unterdimensioniert.
* nach Gleichung 4
** nach Gleichung 5

Die hydraulischen und thermischen Parameter der simulierten Schichten sind in Tabelle 3 dargestellt. Die effektive Porosität wurde an den Proben nicht bestimmt. Zur Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit wurden deshalb die Filtergeschwindigkeiten aus Tabelle 1 gegen die entsprechenden Abstandsgeschwindigkeiten aufgetragen. Daraus ergibt sich eine lineare Funktion der Form:

$$[6] \quad v_a = 5 \cdot v_f + 2 \cdot 10^{-7}$$

Die Erdwärmesonde hat aufgrund der Mächtigkeit des Modellgebietes eine Länge von 50 m. Tabelle 4 zeigt die nach Gleichung 4 berechneten spezifischen Entzugsleistungen und die entsprechend notwendigen Längen der Erdwärmesonde für verschiedene Wärmeleistungen nach Gleichung 5. Für die vorliegenden Sedimente wäre eine 50 m lange Sonde für eine Wärmeleistung von 4.500 oder 3.000 W unterdimensioniert. Deshalb entzieht die Erdwärmesonde in *Szenario 5* dem Untergrund 2.000 W pro Jahr in einer Betriebszeit von 1.800 h. Das entspricht einer Wärmemenge von 3.600 kWh. Verteilt auf ein halbes Jahr beträgt die Wärmeleistung der Sonde 1.666 W. Das Sommerhalbjahr dient als Ruhephase.

Ergebnisse

Aus der Modellierung wurden als Vergleichsgrößen jeweils die Flächen der Ausbreitung der Temperaturanomalien, also die Kältefahnen, identifiziert. Diese Flächen können durch signifikante Vektoren in, gegen und senkrecht zur Fließrichtung beschrieben werden. Grundsätzlich wurden drei unterschiedliche Kältefahnen betrachtet, jedoch werden hier überwiegend die Ergebnisse der Variante F (1,0) dargelegt:

- F (0,1): Fläche mit einer im Vergleich zur unbeeinflussten Umgebung um mindestens 0,1 °C abgesenkten Temperatur, entspricht der 0,1 °C Isotherme.
- F (0,5): Fläche mit einer im Vergleich zur unbeeinflussten Umgebung um mindestens 0,5 °C abgesenkten Temperatur (0,5 °C Isotherme).
- F (1,0): Fläche mit einer im Vergleich zur unbeeinflussten Umgebung um mindestens 1,0 °C abgesenkten Temperatur (1,0 °C Isotherme).

Die Ausdehnungen der Kältefahnen (1,0) für *Szenario 1* sind in Tabelle 5 angegeben. Hierzu wurden die Gesamtlänge (L), die Länge der abgekühlten Fläche von der Erdwärmesonde in Fließrichtung des Grundwassers (L_1), die Länge der abgekühlten Fläche entgegen der Fließrichtung (L_2), sowie die Breite (B) der abgekühlten Fläche gemessen (Abb. 1). Die in orange dargestellten Flächen wurden von der Wärmeentnahme nicht beeinflusst.

Gelbe Flächen sind um 0,1 bis 0,5 °C abgekühlt. Grün zeigt die Flächen mit einer Temperaturdifferenz zwischen 0,5 und 1,0 °C. Alle Flächen, die durch den Betrieb der Erdwärmesondenanlage um mehr als 1,0 °C abgekühlt worden sind, werden in blau dargestellt. Die Temperaturverteilungen weisen den Zustand nach dem 30. Winterhalbjahr für *Szenario 1* (-4,5 kW, 1.800 h) für alle Sedimente aus. Die Fließgeschwindigkeit steigt mit zunehmender Durchlässigkeit des Sedimentes und wachsendem Gefälle. Der Maßstab ist in allen Abbildungen gleich. Zum Teil variiert der Standort der Erdwärmesonde. Die Länge des Modells wurde bei einigen Sedimenten verändert, um Beeinflussungen durch die Randbedingungen auszuschließen.

Bei tonigen Sedimenten breitet sich die Kälte nahezu radial-symmetrisch um die Erdwärmesonde aus. Die unterschiedlichen Gefälle haben keinen Einfluss auf Form und Länge der Kältefahnen. Für Ton ist die Länge in Fließrichtung L_1 praktisch gleich der Länge gegen die Fließrichtung L_2 . Die Breite der Kältefahne entspricht der Gesamtlänge L. Ab Fließgeschwindigkeiten von $3,8 \cdot 10^{-8}$ m/s wird die Abkühlung in Fließrichtung ver-

Tab. 5: Ausdehnung der um 1 °C abgekühlten Kältefahnen F (1,0) nach dem 30. Winterhalbjahr. Gesamtlänge (L), Länge von der Erdwärmesonde in Fließrichtung (L_1), Länge entgegen der Fließrichtung (L_2) und Breite (B) der Kältefahnen.

Sediment	v_a [m/s]	L (1,0) [m]	L_1 (1,0) [m]	L_2 (1,0) [m]	B (1,0) [m]
T	$5,0 \cdot 10^{-11}$	23,6	11,8	11,9	23,7
T	$1,0 \cdot 10^{-10}$	23,6	11,8	11,8	23,6
T	$2,0 \cdot 10^{-10}$	23,8	11,9	11,9	23,6
U	$3,8 \cdot 10^{-8}$	22,7	11,8	10,9	22,6
U	$7,5 \cdot 10^{-8}$	22,1	12,1	10,1	22,3
U	$1,5 \cdot 10^{-7}$	22,3	13,0	9,3	22,1
fs	$1,9 \cdot 10^{-7}$	16,4	10,4	6,0	15,2
fs	$3,8 \cdot 10^{-7}$	13,9	9,5	4,3	11,7
fs	$7,5 \cdot 10^{-7}$	9,2	6,3	2,9	8,1
mS	$1,5 \cdot 10^{-6}$	6,0	4,5	1,5	5,0
mS	$3,1 \cdot 10^{-6}$	5,0	4,1	0,9	3,5
mS	$6,2 \cdot 10^{-6}$	3,0	2,6	0,5	1,8
gS	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,1	0,9	0,2	0,7
gS	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,6	0,4	0,1	0,3
gS	$5,0 \cdot 10^{-5}$	0,3	0,2	0,1	0,3

schoben. $L_1(1,0)$ ist bei Schluff und allen Sanden größer als $L_2(1,0)$. Die Abkühlung wird mit zunehmender Fließgeschwindigkeit verstärkt mit dem Grundwasser transportiert. Die Kältefahnen $F(0,1)$ von Fein- bis Mittelsand mit 0,5 ‰ Gefälle werden immer länger. Ab Mittelsand mit 1 ‰ Gefälle bis hin zum Grobsand mit der höchsten Fließgeschwindigkeit nehmen die Ausdehnungen wieder ab. Die unregelmäßigen Ausbildungen, die bei Mittelsand mit 1 ‰ Gefälle quer zur Grundwasserfließrichtung auffallen, entstehen aufgrund der Wechsel zwischen Betriebs- und Ruhephasen. In den Sommermonaten, wenn die Erdwärmesonde nicht in Betrieb ist, verkleinern sich die Kältefahnen, da ständig Wärme nachfließt, ohne entnommen zu wer-

den. Bei Mittelsand mit 2 ‰ Gefälle sowie bei Grobsand mit 1 ‰ Gefälle hat sich die Kältefahne, die im vorangegangenen Winter entstanden ist, abgeschnürt. Diese Strukturen sind nur bei der 0,1 °C Isotherme ausgeprägt.

Je schneller das Grundwasser fließt, desto kleiner wird die Gesamtlänge $L(1,0)$. Sie ist bei Ton mit knapp 24 m am größten und beträgt bei Grobsand nur 0,3 bis 1,1 m. Die Länge in Fließrichtung L_1 breitet sich bei Schluff mit einer Abstandsgeschwindigkeit von $1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s am weitesten aus. Es werden Längen von maximal 13 m ($U, 2$ ‰ Gefälle) erreicht. Bei den Sanden liegt die Ausbreitung der Kältefahne (1,0) in Fließrichtung zwischen 10 m ($fS, 0,5$ ‰ Gefälle) und 20 cm ($gS, 2$ ‰ Gefälle).

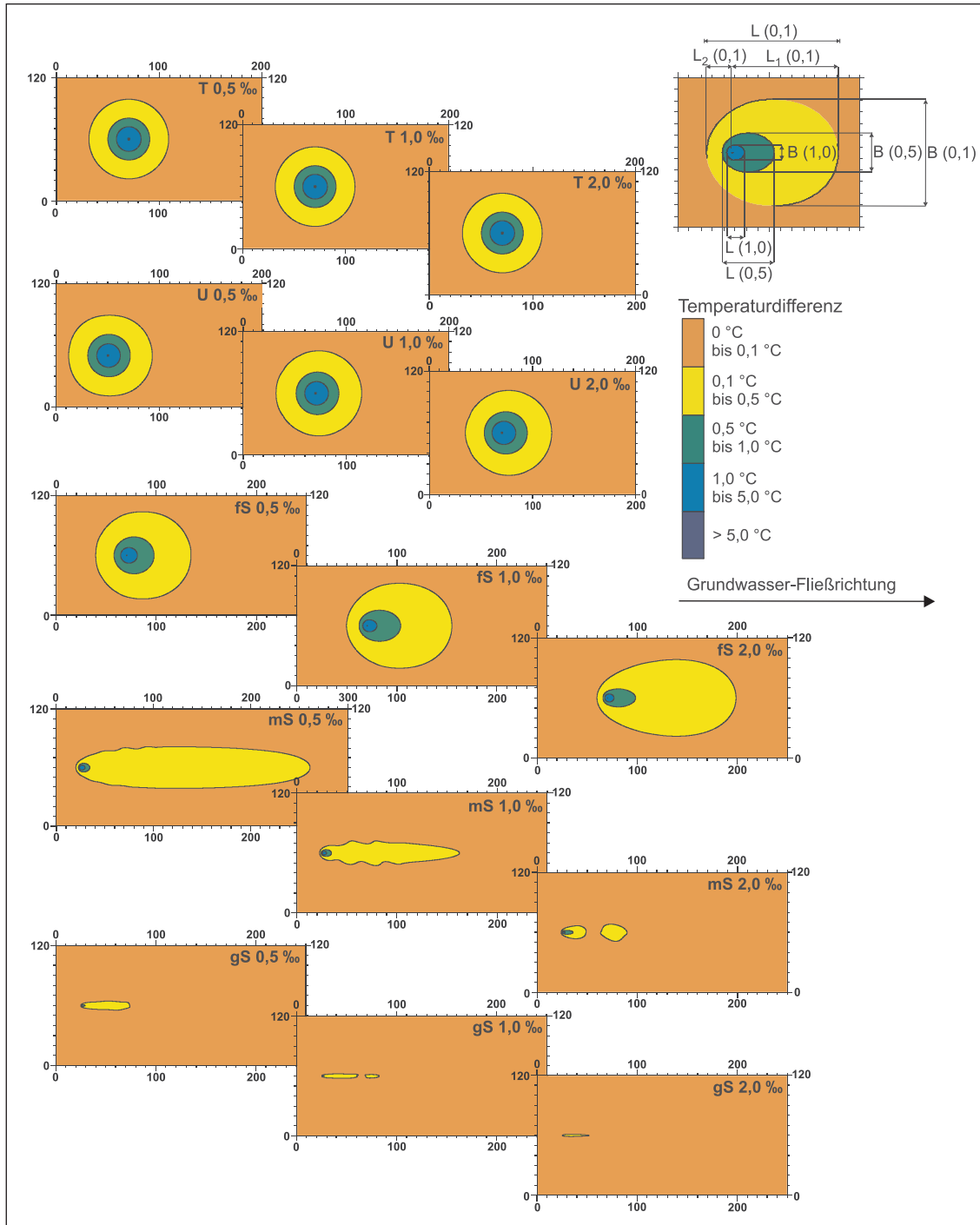


Abb. 1: Temperaturverteilungen im Modellgebiet nach dem 30. Winterhalbjahr (30. Betriebsphase), für Szenario 1 und alle Sedimente. Betrachtet werden bei der Auswertung der Modellierung die drei Kältefahnen $F(0,1)$, $F(0,5)$ und $F(1,0)$, die im Vergleich zur Umgebungstemperatur um $\geq 0,1$ °C, $\geq 0,5$ °C und $\geq 1,0$ °C kälter sind. Von den modellierten Kältefahnen wurde jeweils die Größe, sowie die Gesamtlänge (L), die Länge von der EWS in Fließrichtung (L_1), die Länge von der EWS entgegen der Fließrichtung (L_2) und die Breite (B) bestimmt.

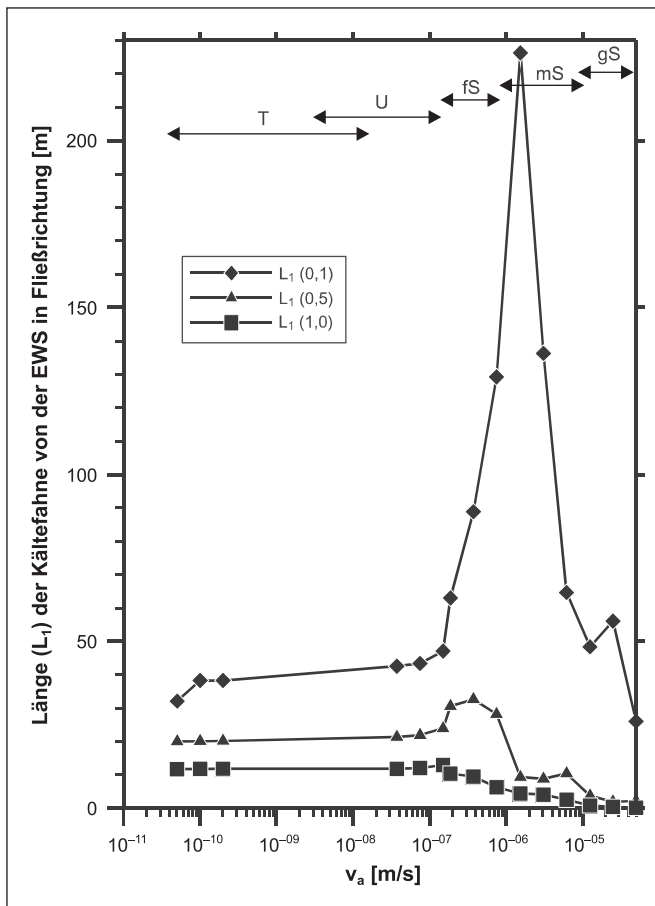


Abb. 2: Länge L_1 der Kältefahnen F (0,1), F (0,5) und F (1,0) von der Erdwärmesonde in Grundwasserfließrichtung nach dem 30. Winterhalbjahr, gegen die Abstandsgeschwindigkeit v_a aufgetragen. Die um 0,1 °C abgekühlte Fahne F (0,1) breitet sich viel weiter aus als die stärker abgekühlten Bereiche. Die größte Ausbreitung von ca. 230 m wird bei einer Abstandsgeschwindigkeit von ca. $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s (Mittelsand, 0,5 ‰ Gefälle) erreicht. Der um 1,0 °C abgekühlte Bereich breitet sich maximal um ca. 13 m in Fließrichtung aus (U, 2 ‰ Gefälle, $v_a = 1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s).

Die Abhängigkeit der Kälteausbreitung von der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers zeigt Abbildung 2. Dargestellt ist die Länge L_1 der drei Kältefahnen F (0,1), F (0,5) und F (1,0) aufgetragen gegen die Abstandsgeschwindigkeit v_a . Die Kältefahnen erreichen ihre maximale Ausbreitung bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten. Die Abkühlung um 0,1 °C erreicht ihre maximale Ausdehnung bei Mittelsand mit einem Gefälle von 0,5 ‰ ($v_a = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s). Die Kältefahnen F (0,5) und F (1,0) sind bei geringeren Fließgeschwindigkeiten von $v_a = 4 \cdot 10^{-7}$ m/s (Feinsand, 1 ‰ Gefälle) bzw. $v_a = 1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s (Schluff, 2 ‰ Gefälle) am längsten.

Neben den Endzuständen nach 30 Jahren Betriebszeit ist auch die zeitliche Entwicklung der Temperaturanomalie interessant. Abbildung 3a zeigt die Entwicklung der Länge (L_1) der Kältefahnen F (0,1), F (0,5) und F (1,0) von der Erdwärmesonde in Fließrichtung des Grundwassers über die 30 Betriebsjahre in Schluff, Fein- und Mittelsand bei einem Gefälle von 1 ‰. In Abbildung 3b ist die Entwicklung der Temperaturen 10 m in Grundwasserfließrichtung von der Sonde bei jeweils 1 ‰ Gefälle für Szenario 1 dargestellt.

Bei Mittelsand mit einem Gefälle von 1 ‰ ($v_a = 3 \cdot 10^{-6}$ m/s) breitet sich die Kältefahne F (0,1) zunächst sehr schnell aus und erreicht nach ca. 10 Jahren eine maximale Größe (Abb. 3a). Die Kältefahnen F (0,5) und F (1,0) zeigen für dieses Sediment deutlich die Ausbreitung der Abkühlung während der Betriebsphase und die Wiedererwärmung der abgekühlten Bereiche in den Ruhephasen. Die Kältefahnen erreichen schon nach dem ersten Jahr eine maximale Ausdehnung. Während der Ruhephasen werden sie wieder vollständig zurück gebildet. Die Kältefahne F (1,0) kann in den ersten Jahren für Schluff und Feinsand in den Ruhephasen fast vollständig ausgeglichen werden. Nach dem dritten Winterhalbjahr für Schluff und dem 8. Winterhalbjahr für Feinsand reichen die 6 Monate Ruhephase nicht mehr aus, um die Ausbreitung der Abkühlung wieder rückgängig zu machen. In Feinsand nimmt die Länge der Kältefahne F (1,0) nach ca. 25 Jahren nur noch geringfügig zu. Für die anderen Kältefahnen F (0,5) und F (0,1) wird eine solche stabile maximale Ausdehnung in den modellierten 30 Betriebs-

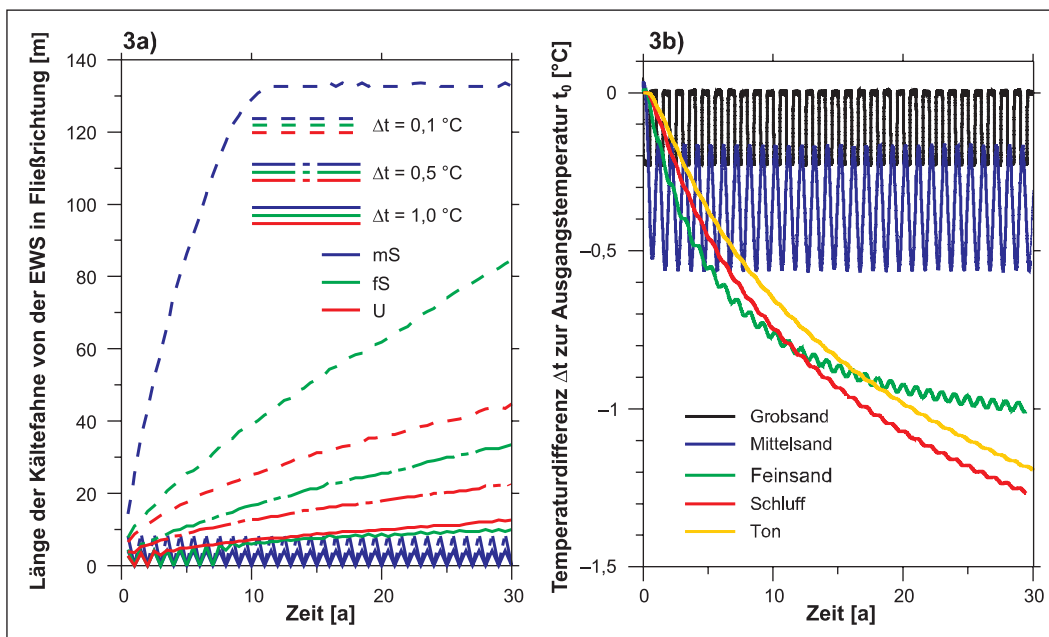


Abb. 3: a) Ausbreitung der Kälte über die Zeit in Schluff, Fein- und Mittelsand, bei einem Gefälle von jeweils 1 ‰. Dargestellt sind jeweils die Längen L_1 der Kältefahnen F (0,1), F (0,5) und F (1,0). Wärme bzw. Kälte kann in größeren Sedimenten schneller transportiert werden, als in feineren, weniger gut durchlässigen Sedimenten. b) Veränderung der Temperatur über die Zeit in allen Sedimenten bei einem Gefälle von 1 ‰ in einem Abstand von 10 m von der Erdwärmesonde in Grundwasserfließrichtung. Je größer das Sediment, desto größer sind die Einflüsse der Betriebs- und Ruhephasen.

Tab. 6a: Ergebnisse der Modellierung für *Szenario 2* (Wärmeentnahme von 5.400 kWh pro Jahr): Ausdehnung der Kältefahne F (1,0). Eine 100 m lange Erdwärmesonde ist nach Tabelle 2 für Ton und Schluff mit einer Wärmeleistung von 4,5 kW überfordert. Deshalb wurde in *Szenario 2* die Wärmeleistung auf 2 kW reduziert. Für die Sande wurden jeweils die Gefälle von 1 ‰ gerechnet. Die Ergebnisse dienen dazu, die Abhängigkeit der Kältefahne von der entnommenen Wärmemenge zu bestimmen.

Sediment	v_a [m/s]	L (1,0) [m]	L_1 (1,0) [m]	L_2 (1,0) [m]	B (1,0) [m]
T	$5,0 \cdot 10^{-11}$	15,00	7,50	7,50	15,00
T	$1,0 \cdot 10^{-10}$	15,00	7,50	7,50	15,00
T	$2,0 \cdot 10^{-10}$	15,00	7,50	7,50	15,00
U	$3,8 \cdot 10^{-08}$	13,25	6,88	6,38	13,13
U	$7,5 \cdot 10^{-08}$	12,75	7,13	5,63	13,13
U	$1,5 \cdot 10^{-07}$	13,13	7,50	5,63	13,13
fS	$3,8 \cdot 10^{-07}$	7,19	4,38	2,81	6,88
mS	$3,1 \cdot 10^{-06}$	2,47	1,88	0,59	1,94
gS	$2,5 \cdot 10^{-05}$	0,29	0,14	0,16	0,29

jahren der Sonde nicht erreicht. Bei Schluff breiten sich die drei Kältefahnen mit der Zeit kontinuierlich weiter aus. Abbildung 3b zeigt, dass bei Mittel- und Grobsand die Temperaturen in einem Abstand zur Sonde von 10 m während der Betriebsphasen im Vergleich zur Ausgangstemperatur um ca. 0,25 °C bzw. 0,6 °C sinken. In den Ruhephasen wird die Abkühlung nahezu, bei Grobsand sogar vollständig ausgeglichen. In Feinsanden sind die Betriebs- und Ruhephasen weniger ausgeprägt. Nach ca. 25 Jahren pendelt sich die Temperatur in diesem

Tab. 6b: Ergebnisse der Modellierung für *Szenario 3* (Wärmeentnahme von 10.800 kWh/a): Ausdehnung der Kältefahne F (1,0). Die Wärmeleistung der EWS beträgt hierbei 4,5 kW. Zusätzlich zur Heizung wird die Wärme zur Bereitstellung von Warmwasser genutzt. Dafür wird die Sonde im Sommer und Winter jeweils 300 h zusätzlich betrieben. Die Folgen sind deutlich größere Ausdehnungen der Kältefahnen im Vergleich zu *Szenario 1*.

Sediment	v_a [m/s]	L (1,0) [m]	L_1 (1,0) [m]	L_2 (1,0) [m]	B (1,0) [m]
T	$1,0 \cdot 10^{-10}$	30,77	15,38	15,38	22,31
U	$3,8 \cdot 10^{-08}$	29,23	15,38	13,85	29,23
U	$7,5 \cdot 10^{-08}$	30,00	16,15	13,85	29,23
U	$1,5 \cdot 10^{-07}$	30,00	17,69	12,31	29,23
fS	$1,9 \cdot 10^{-07}$	25,38	16,92	8,46	22,31
fS	$3,8 \cdot 10^{-07}$	22,69	17,31	5,38	17,69
fS	$7,5 \cdot 10^{-07}$	14,17	10,83	3,33	10,83
mS	$1,5 \cdot 10^{-06}$	7,50	5,75	1,75	6,25
mS	$3,1 \cdot 10^{-06}$	6,42	5,43	0,99	4,20
mS	$6,2 \cdot 10^{-06}$	4,07	3,58	0,49	2,22
gS	$1,3 \cdot 10^{-05}$	1,42	1,23	0,19	0,86
gS	$2,5 \cdot 10^{-05}$	0,76	0,62	0,14	0,38
gS	$5,0 \cdot 10^{-05}$	0,38	0,23	0,14	0,28

Abstand von der Sonde auf ca. 1 °C unterhalb der Ausgangstemperatur ein. Für Schluff und Ton wird innerhalb der Gesamtbetriebszeit der Sonde von 30 Jahren kein stabiler Wert erreicht. Die Temperaturen sinken hier auf ca. 1,3 °C unterhalb der Ausgangstemperatur. Die Ergebnisse für die *Szenarien 2 bis 4* sind in Tabelle 6a bis c dargestellt. Es sind jeweils die Längen L (1,0), L_1 (1,0), L_2 (1,0) sowie die Breite B (1,0) angegeben. In Abbildung 4 ist die Ausbreitung der Kältefahne F (1,0) von der Erdwärmesonde in Fließrichtung des Grundwassers (L_1 (1,0)) für die *Szenarien 1 bis 4*, sowie zusätzlich für die *Szenarien 5a bis 5d* gegen die Abstandsgeschwindigkeit v_a aufgetragen. Die Kurven für die einzelnen Szenarien folgen alle in etwa dem gleichen Muster. Die Länge L_1 ist bei Schluff mit einem Gefälle von 2 ‰ ($v_a = 1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s) am größten. Die Ausbreitung der Kältefahnen ist von der Fließgeschwindigkeit und von der entnommenen Wärmemenge abhängig. Wird die Wärmeentnahme um ca. 30 % verringert (*Szenario 2*: -3 kW, 1.800 h), so breitet sich die Kältefahne bei Tonen und Schluffen um 30 bis 40 % weniger weit aus. In den gröberen Sedimenten ist dieser prozentuale Unterschied noch deutlicher, allerdings sind die absoluten Werte geringer.

Bei *Szenario 3* wurde im Vergleich zu *Szenario 1* ca. 30 % mehr Wärme entnommen. Das führt nach einer Laufzeit der Erdwärmeanlage von 30 Jahren zu einer Ausbreitung der Kältefahne F (1,0) von bis zu 18 m bei Schluff und Feinsand mit Fließgeschwindigkeiten von $4 \cdot 10^{-8}$ bis $4 \cdot 10^{-7}$ m/s. In tonigen und schluffigen Sedimenten, sowie in Mittel- und Grobsanden ist die Kältefahne im Vergleich zu *Szenario 1* ca. 25–35 % größer. Feinsande weisen eine um bis zu 65 % größere Ausdehnung auf. Die Zugabe von Wärme durch Kühlung von Gebäuden im Sommer (*Szenario 4*) verringert die Ausbreitung der Kältefahnen im Vergleich zur reinen Wärmeentnahme (*Szenario 1*) in

Tab. 6c: Ergebnisse der Modellierung für *Szenario 4*: Ausdehnung der Kältefahne F (1,0). Zusätzlich zur Wärmeentnahme von 8.100 kWh im Winter (entspricht einer jährlichen Wärmeleistung von 4,5 kW in 1.800 h), wird im Sommer eine Wärmemenge von 1000 kWh in den Untergrund eingegeben. Das entspricht einer jährlichen Kälteleistung von 2 kW in 500 h. Bei Abstandsgeschwindigkeiten bis ca. $7 \cdot 10^{-8}$ m/s verändert sich die Länge der Kältefahne mit der Abstandsgeschwindigkeit kaum. Ab $7 \cdot 10^{-7}$ m/s ist ein starker Rückgang der Länge mit zunehmenden Abstandsgeschwindigkeiten zu sehen. Für Ton, Mittelsand und Grobsand wurden jeweils nur die Gefälle von 1 ‰ gerechnet. Schluff und Feinsand bilden einen Übergangsbereich. Für diese Sedimente wurden zusätzlich zum Gefälle von 1 ‰ auch die Gefälle von 2 ‰ für Schluff bzw. 0,5 ‰ und 2 ‰ für Feinsand gerechnet.

Sediment	v_a [m/s]	L (1,0) [m]	L_1 (1,0) [m]	L_2 (1,0) [m]	B (1,0) [m]
T	$1,0 \cdot 10^{-10}$	20,63	10,31	10,31	20,63
U	$7,5 \cdot 10^{-08}$	19,47	10,53	8,95	19,21
U	$1,5 \cdot 10^{-07}$	17,00	11,25	5,75	19,25
fS	$1,9 \cdot 10^{-07}$	13,13	8,13	5,00	13,13
fS	$3,8 \cdot 10^{-07}$	10,77	6,92	3,85	10,00
fS	$7,5 \cdot 10^{-07}$	7,84	5,26	2,59	7,33
mS	$3,1 \cdot 10^{-06}$	5,00	4,08	0,92	2,76
gS	$2,5 \cdot 10^{-05}$	0,56	0,42	0,14	0,35

tonigen und schluffigen Sedimenten um ca. 2 m. In besser durchlässigen Sedimenten ist der Unterschied in der Ausbreitung bei verschiedenen Wärmeentnahmemengen weniger deutlich. In Grobsand weisen die Kältefahnen F (1,0) für die 4 verschiedenen Szenarien eine Länge (L_1) von 0,14 m (Szenario 2, $v_a = 2,5 \cdot 10^{-5}$ m/s) bis 1,4 m (Szenario 3, $v_a = 1,25 \cdot 10^{-5}$ m/s) auf. Den Einfluss der entnommenen Wärmemenge auf die Temperaturentwicklung im Sondenumfeld zeigt Abbildung 5. Dargestellt ist der Temperaturverlauf an einem 10 m von der Sonde entfernten Messpunkt für Schluff mit einem Gefälle von 1 ‰ für alle vier Szenarien. Die einzelnen Betriebs- und Ruhephasen sind an Hand der Wellenform zu erkennen. Die Entnahme von Wärme im Winterhalbjahr führt zu einer stärkeren Abkühlung, während im Sommerhalbjahr die Temperaturen nicht sinken. Wie zu erwarten, nimmt die Temperatur bei geringerer Wärmeentnahme weniger stark ab. Für Szenario 2 nähert sich die Temperatur am Ende der 30 Jahre Gesamtbetriebszeit der Sonde einem stabilen Wert an. In den anderen drei Szenarien sinkt die Temperatur immer weiter ab.

Szenario 5 dient zur Untersuchung des Verhaltens von Kältefahnen in einem Untergrund, der aus mehreren Schichten mit verschiedenen hydraulischen und thermischen Eigenschaften aufgebaut ist. Dafür wurde der geologische Aufbau, der an einer Bohrung auf dem Gelände der Universität Bremen aufgenommen wurde, zu Grunde gelegt und auf vier Schichten vereinfacht.

In Abbildung 4 werden die Ergebnisse der Szenarien 1 bis 4 mit denen der Szenarien 5a bis 5d verglichen. Allerdings ist bei einem direkten Vergleich zu beachten, dass für die Szenarien 1 bis 4 die Erdwärmesonde 100 m lang ist, in Szenario 5 hingegen

nur 50 m. Das macht eine Umrechnung der entzogenen Wärmemenge in die tatsächliche Entzugsleistung erforderlich. In Szenario 1 werden jährlich 4,5 kW entzogen. Jeder Meter der Sonde liefert demzufolge 45 W. In Szenario 2 werden die 3 kW mit einer Entzugsleistung von 30 W pro Sondenmeter erreicht. Dem Untergrund wird in Szenario 5 mit der 50 m langen Sonde eine Wärmeleistung von 2 kW entzogen, das entspricht einer Entzugsleistung von 40 W/m. Daraus folgt, dass sich die Kältefahnen der Szenarien 5a bis 5d weniger weit ausbreiten sollten, als die von Szenario 1, aber weiter als die von Szenario 2. Bei diesem Vergleich wird für Szenario 5a vernachlässigt, dass aus einem Meter grobsandigem Mittelsand mehr Energie entzogen werden kann, als zum Beispiel aus einem Meter feinsandigem Schluff (siehe Berechnung zu spez. Entzugsleistungen, Tab. 4).

Abbildung 4 zeigt, dass die Ergebnisse für die Szenarien 5b bis 5d den Erwartungen entsprechen. Die Ausdehnung der Kältefahnen F (1,0) liegt bei allen drei Szenarien zwischen denen mit den entsprechenden Fließgeschwindigkeiten von Szenario 1 und 2. Bei Szenario 5a breitet sich die Kältefahne F (1,0) für den feinsandigen Schluff weniger weit und für den grobsandigen Mittelsand weiter aus, als erwartet. Die Kältefahne F (1,0) der ungesättigten Schicht wurde in dieser Abbildung nicht dargestellt, da die Fließgeschwindigkeit annähernd 0 ist. Der um mindestens 1 °C abgekühlte Bereich breitet sich hier weniger weit aus als in Ton und Schluff in den Szenarien 1 und 2.

Abbildung 6 zeigt die Temperaturverteilung jeweils in einem horizontalen Schnitt durch die Mitte der vier Schichten. Da SHEMAT keine ungesättigten Bereiche modellieren kann, wurden für die obere Schicht eine sehr geringe Durchlässigkeit und die thermischen Eigenschaften von feuchtem Sand gewählt.

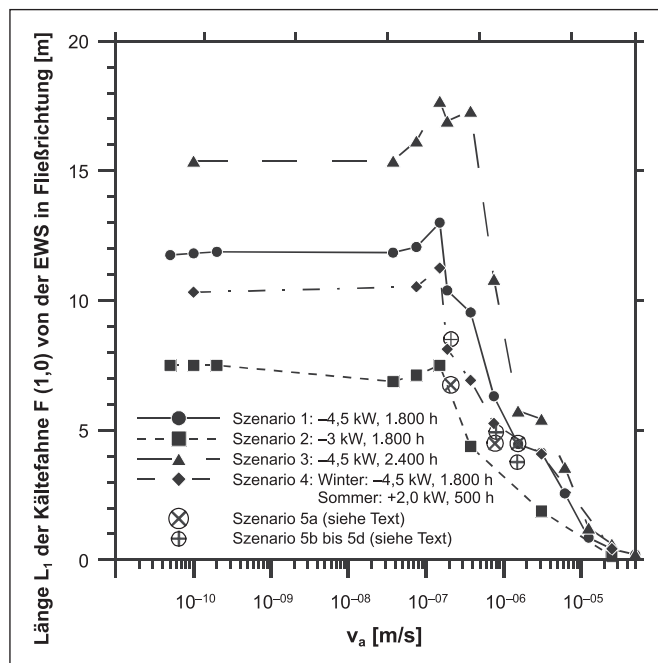


Abb. 4: Länge L_1 der Kältefahne F (1,0) von der Sonde in Fließrichtung des Grundwassers gegen die Abstandsgeschwindigkeit v_a für die Szenarien 1 bis 4 sowie für die Szenarien 5a bis 5d.

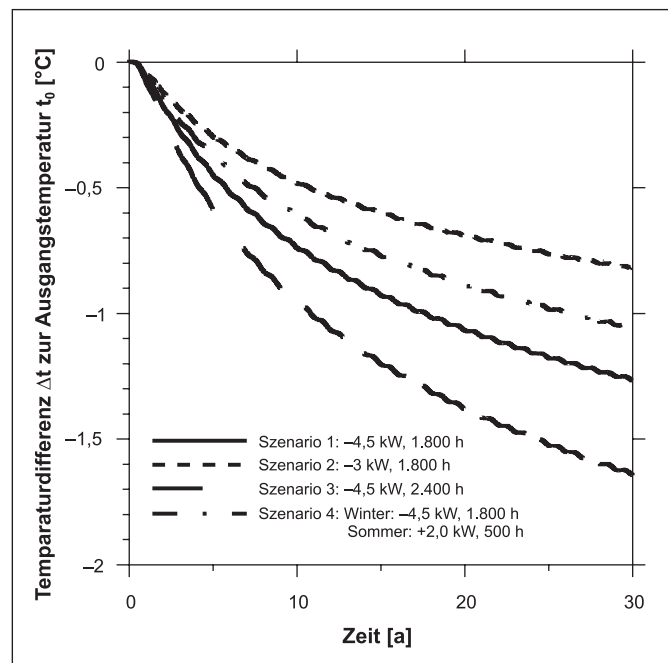


Abb. 5: Temperaturentwicklung in einem Abstand von 10 m von der Sonde in Fließrichtung des Grundwassers als Differenzen zur Ausgangstemperatur, für Schluff mit einem Gefälle von 1 ‰, für alle vier Szenarien. Die kleinen Wellen zeigen die einzelnen Betriebs- und Ruhephasen der Anlage. Je mehr Wärme dem Boden entnommen wird, desto mehr kühlt die Umgebung der Sonde ab. Für das Szenario 2 mit der geringsten Wärmeentnahme wird am Ende der 30 Betriebsjahre annähernd eine stabile Temperatur erreicht.

	v_a [m/s]	L (1,0) [m]	L_1 (1,0) [m]	L_2 (1,0) [m]	B (1,0) [m]
Szenario 5a: „ungesättigte Zone“	$2,5 \cdot 10^{-16}$	10,0	5,5	4,5	9,5
mS, fs	$7,7 \cdot 10^{-07}$	8,0	5,3	2,8	7,3
mS, gs	$1,5 \cdot 10^{-06}$	6,3	4,8	1,5	5,0
U, fs	$2,1 \cdot 10^{-07}$	13,0	6,8	6,3	12,8
Szenario 5b: Mittelwerte	$8,0 \cdot 10^{-07}$	7,1	4,9	2,3	6,4
Szenario 5c: mS, gs	$1,5 \cdot 10^{-06}$	5,1	3,8	1,3	4,3
Szenario 5d: U, fs	$2,1 \cdot 10^{-07}$	16,5	8,5	8,0	16,8

Tab. 7: Ergebnisse der Szenarien 5a und 5b bis 5d. Angegeben sind die Ausdehnungen der um mindestens 1,0 °C abgekühlten Kältefahnen F (1,0) nach der 30. Betriebsphase. Bei Szenario 5a wurde die Temperaturverteilung jeweils in einem horizontalen Schnitt in der Mitte der Schichten berechnet.

Somit weist diese Schicht praktisch kein fließendes Wasser sowie eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität auf (Tab. 4). Das ließe eine Ausbreitung der Kältefahne ähnlich der in Ton für Szenario 1 erwarten (Abb. 1). Trotzdem ist die Kältefahne F (0,1) ca. 130 m weit in Fließrichtung des in den darunter liegenden Schichten vorhandenen Grundwassers aus-

gedehnt. Die Kältefahne F (1,0) breitet sich in diese Richtung in der ungesättigten Zone ebenfalls um einen Meter weiter aus, als gegen die Fließrichtung (Tab. 7). Die Kältefahnen F (0,1) in den beiden gesättigten Mittelsand-Schichten mit Fließgeschwindigkeiten von $7,7 \cdot 10^{-07}$ bzw. $1,5 \cdot 10^{-06}$ m/s breiten sich mit dem Grundwasser ca. 140 bis 150 m weit aus. Im feinsandigen Schluff

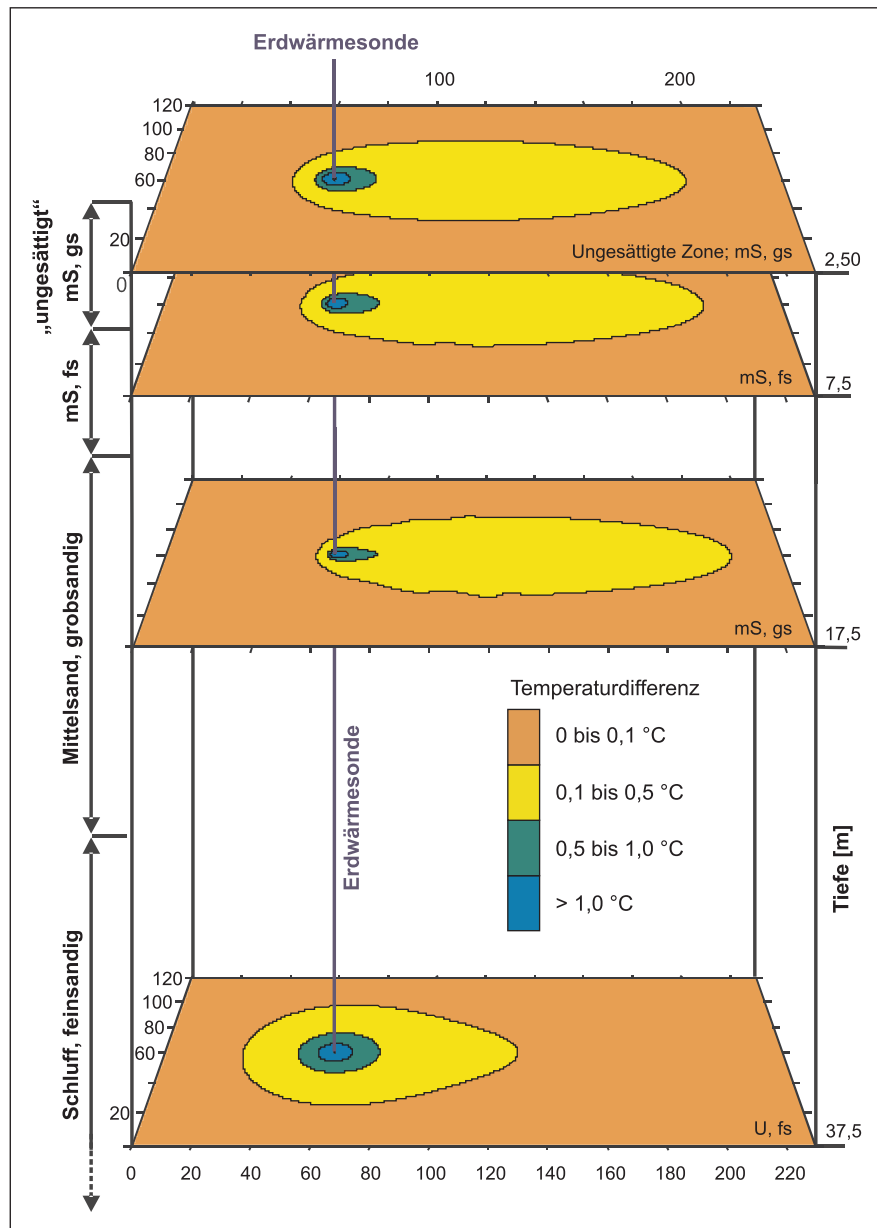


Abb. 6: Ergebnisse von Szenario 5a. Temperaturverteilung nach dem 30. Winterhalbjahr für die 4 Schichten dieses Modells. Insgesamt ist das Modellgebiet 50 m mächtig. Die Abbildung zeigt jeweils einen horizontalen Schnitt in der Mitte der einzelnen Schichten. In den oberen drei Schichten sind die dargestellten Kältefahnen F (0,1), F (0,5) und F (1,0) in Fließrichtung des Grundwassers stärker ausgebreitet. Bei Schluff zeigt nur die Kältefahne F (0,1) diese Ausdehnung. Die Kältefahnen F (0,5) und F (1,0) haben sich annähernd radialsymmetrisch um die Sonde herum ausgebildet.

weist die Kältefahne F (0,1) eine leichte Ausdehnung in Fließrichtung auf.

Szenario 5 dient außerdem der Untersuchung, ob die Ausbreitung der Kältefahnen mit einem vereinfachten Modellgebiet ausreichend genau wiedergegeben wird, dem die über die Tiefe gemittelten hydrogeologischen und thermischen Parameter zugewiesen wurden (*Szenario 5b*). In Tabelle 7 sind die Längen und Breiten der Kältefahnen nach dem 30. Winterhalbjahr angegeben. Zum Vergleich dienen die *Szenarien 5b* bis *5d*, die als Einschichtfälle mit den Mittelwerten sowie den Parametern für die beiden mächtigsten Schichten aus *Szenario 5a* (mS, gs und U, fs) gerechnet wurden. Das mit den Mittelwerten gerechnete *Szenario 5b* gibt nicht die mittlere Ausdehnung der Kältefahnen von *Szenario 5a* wieder. Bei *Szenario 5d* breitet sich die Kältefahne weiter aus als in der feinsandigen Schluffschicht von *Szenario 5a*. In dem grobsandigen Mittelsand in *Szenario 5c* erreicht die Kältefahne hingegen eine geringe Ausdehnung als im gleichen Sediment des Mehrschichtfalls.

Diskussion und Ausblick

Durch die Entnahme von Wärme durch eine Erdwärmesonde entsteht ein Temperaturgradient zwischen einem Minimum in der Erdwärmesonde und der Ausgangstemperatur der Umgebung. Dadurch fließt der Sonde Wärme von den Seiten zu. Die Abkühlung breitet sich je nach entnommener Wärmemenge und den Eigenschaften des Sedimentes aus. Der Transport von Wärme kann konduktiv über die Wärmeleitfähigkeit des Sedimentpaketes oder konvektiv durch fließendes Grundwasser erfolgen. In einem Aquifer ist das fließende Wasser ein sehr effektives Wärmetransportmittel. Das zeigen auch die Arbeiten von MAGES (1994) und CHIASSON et al. (2000). Die im Grundwasser enthaltene Wärmeenergie wurde ursprünglich vom Niederschlag aus der Sonnenenergie aufgenommen und mit dem Sickerwasser in den Untergrund transportiert. Die zweite wichtige Wärmequelle ist der geothermische Wärmefluss aus dem Erdinneren.

Die Modellierungen zeigen, dass das Grundwasser das Haupttransportmittel für die Wärme in durchlässigen Sedimenten ist. Ein Anstieg des Gefälles hat große Auswirkungen auf die Ausbreitung der Kältefahnen (Abb. 1). Die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers steigt mit zunehmender Durchlässigkeit und steigendem Gefälle. Das Wasser gibt seine Wärme ab, wenn es an der Sonde vorbeifließt und transportiert so die Abkühlung in Fließrichtung, bis es selbst durch die Umgebung wieder erwärmt wird. Die Kältefahne dehnt sich durch diesen Prozess mit zunehmender Fließgeschwindigkeit weiter in Fließrichtung des Grundwassers aus.

Bei hoher Fließgeschwindigkeit wird mit dem Wasser soviel Wärme nachtransportiert, dass sich das abgekühlte Wasser sehr schnell wieder erwärmen kann. Es wird also eine geringere Menge kälteres Wasser in Fließrichtung transportiert. Die Kältefahne breitet sich mit zunehmender Fließgeschwindigkeit weniger weit aus wie bei Mittel- und Grobsand (ab $v_a > 2 \cdot 10^{-6}$ m/s) zu sehen ist. Der Umgebung wird weniger Wärme entzogen, und die Wärmeenergie in der Sonde ist größer wie auch von WAGNER & CLAUSER (2002) sowie von KLEINER (2003) berechnet wurde.

Ist die Durchlässigkeit des Sedimentes gering, wie in Ton oder Schluff, so steht weniger Grundwasser zur Wärmenachlieferung

zur Verfügung. Durch den Temperaturgradienten wird Wärme aus den angrenzenden Gebieten konduktiv in Richtung der Erdwärmesonde transportiert. Die Kältefahne breitet sich in Ton nahezu radialsymmetrisch aus. Bei Schluff bewirkt die etwas höhere Fließgeschwindigkeit eine geringe Verschiebung der Kältefahne in Grundwasserfließrichtung. Die geringe Wärmeleitfähigkeit dieser Sedimente führt dazu, dass die Wärme nicht schnell genug nachgeliefert wird. Die Temperaturen in der Erdwärmesonde sinken bei anhaltendem Wärmeentzug sehr stark ab.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Kältefahne F (0,1) im Mittelsand ausbreitet, ist viel höher als in den weniger durchlässigen Sedimenten. Die Wechsel zwischen Betriebs- und Ruhephasen haben in einem Abstand zur Sonde von 10 m bei Mittel- und Grobsanden großen Einfluss auf die Temperatur. Bei Feinsand sind die einzelnen Phasen anhand der zeitlichen Veränderungen der Temperatur in diesem Abstand zur Sonde zu sehen. Bei Schluff und Ton gibt es in 10 m Entfernung zur Sonde praktisch keinen Temperaturunterschied zwischen den Betriebs- und Ruhephasen.

Ein Gleichgewicht zwischen Wärmeentnahme und Wärmenachlieferung durch den geothermischen Wärmefluss oder das fließende Grundwasser ist dann erreicht, wenn keine Energie mehr von den Seiten heran fließt, sich die Kältefahne also nicht weiter ausbreitet (HUBER & PAHUD 1999). Kleine Temperaturdifferenzen breiten sich viel weiter aus als größere und benötigen zur Ausbildung ihrer maximalen Ausdehnung länger. Während die Kältefahnen F (0,5) und F (1,0) für Mittelsand mit einem Gefälle von 1 ‰ ihre maximalen Längen schon nach der ersten Betriebszeit erreicht haben, benötigt die Kältefahne F (0,1) ca. 10 Jahre bis zu einer stabilen Größe.

Je mehr Wärme entnommen wird, desto weiter breitet sich die Abkühlung im Untergrund aus. Vor allem in feinkörnigen Sedimenten ist die Wärmemenge, die entnommen werden soll, entscheidend für die Ausbreitung der Kältefahnen. Die Zugabe von Wärme durch Kühlung von Gebäuden im Sommer kann vor allem in den weniger gut durchlässigen Sedimenten zu einer geringeren Ausbreitung der Kältefahnen führen. In Ton und Schluff wird diese Wärme aufgrund der hohen Wärmekapazität besser gespeichert als in den Sanden und steht somit im Winter zusätzlich zur Verfügung.

Dem Untergrund wird in den *Szenarien 5a* bis *5d* eine Wärmeleistung von 2 kW entzogen. Der Vergleich der Einschichtmodelle *5b* bis *5d* mit dem aus 4 Schichten bestehenden *Szenario 5a* zeigt, dass die Modellierung mit den Mittelwerten (*Szenario 5b*) nicht die mittlere Ausbreitung der Kältefahnen wiedergibt und zu einer Unterschätzung der Kältefahnen führt.

Die Modellierung eines Untergrundes, der aus einer 50 m mächtigen Schicht aus feinsandigem Schluff besteht, führt hingegen zu einer Überschätzung der Auswirkungen (*Szenario 5d*). Die Kältefahnen breiten sich in *Szenario 5d* weiter aus als in der Schicht aus dem gleichen Sediment in *Szenario 5a* (Tab. 7). Im Mehrschichtfall stellt der feinsandige Schluff das Liegende eines 50 m mächtigen Schichtpaketes dar und wird von gut durchlässigen Sanden überlagert. Im Einschichtfall (*Szenario 5d*) muss die gesamte Wärme von dem Schluff geliefert werden, dessen spezifische Entzugsleistung kleiner ist als die von Sanden (Tab. 4). Bei einer Abfolge von Schichten mit unterschiedlichen Entzugsleistungen kann den besser durchlässigen Schichten ein größerer Teil der Wärme entzogen werden. Dem Schluff wird in die-

sem Fall pro Sondenmeter weniger Wärme entzogen. Insgesamt ist aber der Anteil der Schluffschicht an der Gesamtwärmeleistung aufgrund deren Mächtigkeit so groß, dass sich die Kältefahne F (1,0) in dieser Schicht am weitesten ausdehnt (Tab. 7). Die Vereinfachung des Mehrschichtfalles durch ein Sedimentpaket aus Schluff kann somit als „worst case“-Szenario angesehen werden.

Das Sediment der ungesättigten Zone weist von allen in dieser Arbeit betrachteten Sedimenten die geringste spezifische Entzugsleistung auf, da die Wärmeleitfähigkeit eines ungesättigten Sandes sehr gering ist und der Wärmetransport über das Grundwasser fehlt. Der ungesättigten Schicht wird aufgrund dieser Eigenschaften und der geringen Mächtigkeit ein kleiner Teil der Gesamtwärmeleistung der Sonde entzogen. Die Kältefahne F (1,0) breitet sich in Fließrichtung mit 5,5 m weniger weit aus als in einem Ton bei *Szenario 2*.

Die geringere Entzugsleistung im Schluff und der ungesättigten Zone wird durch die verstärkte Wärmeentnahme aus dem gesättigten grobsandigen Mittelsand wieder ausgeglichen. Dem Sediment mit dem höheren Wärmetransportvermögen wird mehr als die berechneten durchschnittlichen 4 kW Wärmeleistung pro Sondenmeter entzogen. Die Kältefahne breitet sich hier weiter aus als im Einschichtfall mit diesem Sediment.

In der ungesättigten Zone wäre aufgrund des fehlenden Grundwasserflusses eine radiale Ausbreitung der Kälte um die Erdwärmesonde herum zu erwarten gewesen. Die Ausbreitung der Kältefahne in Fließrichtung des Grundwassers (Abb. 6) bildet sich durch vertikalen Austausch von Wärme bzw. Kälte mit der darunter liegenden, vom Grundwasser durchflossenen Schicht. So ist auch die Spitze in der Kältefahne F (0,1) im feinsandigen Schluff zu erklären. Die Einflüsse der darüber liegenden Schicht sind hier weniger stark, da die Schichtmächtigkeit viel höher ist.

Aus den Ergebnissen folgt für die Genehmigungspraxis von Erdwärmesonden zur Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie, dass Form und Länge der Kältefahnen stark von der Beschaffenheit des Untergrundes abhängen. Demnach bestimmen die Eigenschaften der Sedimente den benötigten Abstand zu einem Nachbargrundstück. Wird eine Abkühlung von weniger als 1 °C toleriert, so reicht die von der LAWA geforderte Entfernung zur Grundstücksgrenze von 5 m für ein Einfamilienhaus mit einem Wärmebedarf von 4,5 kW (*Szenario 1*) bei einem überwiegend aus Mittel- und Grobsand bestehenden Untergrund aus. Für Sedimente mit geringerer Durchlässigkeit sind zumindest in Grundwasserfließrichtung größere Abstände erforderlich. In einem feinsandigen Untergrund sollte der Abstand zwischen zwei Erdwärmesonden für dieses Szenario je nach Fließgeschwindigkeit des Grundwassers in Fließrichtung zwischen 6 und 10 m liegen, um eine gegenseitige Beeinflussung auszuschließen. Parallel zur Fließrichtung reicht hingegen eine Entfernung von 4 bis 8 m. Bei einer Wärmeleistung von 3 kW sind für Ton und Schluff Abstände zu den Nachbargrundstücken von ca. 8 m erforderlich. Für Fein-, Mittel- und Grobsande sind hingegen Abstände von 5 m bis 20 cm in Fließrichtung ausreichend. Für die Genehmigung von Erdwärmesonden sollten also der Untergrund und die benötigte Wärmeleistung der Sonde genau bekannt sein.

Zur Vereinfachung eines natürlichen, mehrschichtigen Untergrundes kann ein homogenes Modellgebiet gewählt werden, dem die hydraulischen und thermischen Parameter einer Schicht

mit den schlechtesten Wärme- und Grundwasser-Leitfähigkeiten zugewiesen werden. Geringmächtige Schichten können dabei aufgrund des geringen Anteils an der Gesamtwärmeleistung der Sonde vernachlässigt werden.

In weiteren Untersuchungen sollte geprüft werden, wie stark sich Abkühlungen von 0,1 °C, 0,5 °C und 1,0 °C auf die Leistungsfähigkeit benachbarter Erdwärmesonden auswirken. In einem nachfolgenden Projekt sollten die durchgeführten Modellierungen an Hand einer geothermischen Anlage, in deren Umfeld Temperaturfühler verteilt sind, kalibriert werden. Die Modellierung der Erdwärmenutzung in weiteren Mehrschichtfällen, vor allem auch der Auswirkungen des Flurabstandes, sowie das Verhalten der Kältefahnen in porösen Festgesteinen sind ebenfalls sehr interessante Fragestellungen für weitere Forschungen.

Zusätzliche Abbildungen im Anhang:
<http://www.geochemie.uni-bremen.de>

Literatur

- ARNING, E., KÖLLING, M., PANTELEIT, B., REICHLING, J., SCHULZ, H.D. (2006): Einfluss oberflächennaher Erdwärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter.- *Grundwasser* 11 (1): 27–39.
- BREHM, D., KNOBLICH, K. (1989): TRADIKON-3D – ein Modell zur Berechnung des Wärmetransports in Porengrundwasserleitern.- *Zeitschrift für angewandte Geowissenschaften* 8: 29–60.
- CHIASSON, A.C., REES, S.J. et al. (2000): A preliminary assessment of the effects of ground-water flow on closed-loop ground-source heat pump systems.- *ASHRAE Transactions, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*: 380–393.
- CLAUSER, C. (2003): Numerical simulation of reactive flow in hot aquifers – SHEMAT and Processing SHEMAT.- 332 S.; Berlin, Heidelberg.
- ESKILSON, P., HELLSTRÖM, G. et al. (2000): Earth energy designer version 2.0 demo.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979): *Groundwater*.- 604 S.; Englewood Cliffs, N.J.
- HALISCH, M., TIETZE, K. (2005): Aufbau, Test und Einsatz einer TK04-Apparatur zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Gesteinsproben mit der Methode des instationären Wärmestroms – Bericht.- 51 S.; Institut für Geophysik, TU Clausthal; GGA-Institut Hannover.
- HENNING, A., LÜHR, H.-P. (2001): Rechnerische Abschätzung der thermischen Beeinflussung des Untergrundes durch den Betrieb von Erdwärmesonden.- 43 S.; HPL UMWELT-CONSULT GMBH, Berlin.
- HÖLTING, B. (1996): *Hydrogeologie Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*.- 441 S.; Stuttgart.
- HUBER, A., PAHUD, D. (1999): *Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie? Programm Geothermie, Schlussbericht, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Huber Energietechnik, Zürich*.- 18 S.; EPFL-DGC-LASEN, Lausanne.
- KLEINER, S. (2003): Untersuchungen zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen – petrophysikalische Messungen und numerische Simulationen. *Angewandte Geophysik, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen*.- 91 S.; Aachen.
- KOHLSCHE (2005): *Freundliche mündliche Mitteilung Herr Kohlsch, Firma EWS Erdwärme-Systemtechnik GmbH & Co. KG, Delbrück*.
- LAWA (2002): Anforderungen an Erdwärmepumpen. *Gemeinsames Papier der ständigen Ausschüsse „A“ und „G“ der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) vom 16. und 17. 9. 2002*.- 5 S.
- MAGES, E. (1994): Wärmetransportmodellierung im Untergrund des südlichen Raumes von Berlin.- 79 S., *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A, Band 162*.

- RÖHRENWERK KUPFERDREH (2006): Röhrenwerk Kupferdreh Carl Hamm GmbH, <http://www.roehren-hamm.de/geotechnik/produkte/pdf/05-wasseranalytik.pdf>
- SANNER, B. (2005): Kann man eine Erdwärmesonde mit Hilfe von spezifischen Entzugsleistungen auslegen?- [http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/erdwaermesonde/kann_man_erdwaermes...:8.](http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/erdwaermesonde/kann_man_erdwaermes...)
- SCHNEIDER, H., BARTELS, J. et al. (2003): Bewertung der geologischen und verfahrenstechnischen Möglichkeiten einer praktischen Nutzung geothermischer Energie im Bundesland Bremen, Dokumentation im Austrag der Bremer Energie-Konsens GmbH.- 117 S.; Geothermie Neubrandenburg GmbH, Neubrandenburg.
- SENSTADT (2004): Merkblatt Wärmepumpenanlagen (Entwurf): Heizen mit Erdwärme – Merkblatt zur Wärmegewinnung durch Wärmepumpenanlagen aus dem Boden und Grundwasser.- 9 S.; Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin.
- SIGNORELLI, S. (2004): Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems.- 159 S.; ETH Zürich, Zürich.
- VDI (2001): VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.- 23 S.; Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- WAGNER, R., CLAUSER, C. (2002): Berechnung der Entzugsleistung einer Erdwärmesonde – Einfluss von Diffusivität, ihrer Temperaturabhängigkeit und Grundwasserströmung.- Geothermische Response Tests, Lausanne, Geothermische Vereinigung e. V., Geeste: 89–99.

