

Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden

Stefanie Hähnlein · Nelson Molina-Giraldo · Philipp Blum · Peter Bayer · Peter Grathwohl

Eingang des Beitrages: 19. 5.2009 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 9. 9.2009
© Springer-Verlag 2010

Zusammenfassung Erdwärmesonden (EWS) werden immer häufiger zur Klimatisierung von Gebäuden eingesetzt. Dabei kommt es durch lokalen Wärmeentzug zu Temperaturanomalien (Kältefahnen) im Untergrund. Um der gegenseitigen Beeinflussung solcher Kältefahnen vorzubeugen, wird von Behörden in Deutschland meist ein Mindestabstand zwischen einzelnen Anlagen von 10 m empfohlen. Die Längen der Kältefahnen können sowohl analytisch als auch numerisch modelliert werden. Die hier vorgestellten analytischen Gleichungen gelten für stationäre Bedingungen und simulieren Konduktion, Konvektion und Dispersion. Die Berechnungen zeigen, dass die Fahnenlängen von verschiedenen Materialparametern und insbesondere der Fließgeschwindigkeit abhängig sind. So werden die Kältefahnen in Kiesaquifereen kurzfristig länger als die in geringer durchlässigen Gesteinseinheiten, und sie überschreiten bei gemittelter Entzugsleistung die 10 m innerhalb einer Heizperiode. Im hier berechneten Fall erreicht eine Kältefahne nach 100 Tagen die 10 m bereits bei einem kontinuierlichen Wärmeentzug von 55 W m^{-1} . Dafür können sich Kältefahnen im Kies jedoch schneller regenerieren. Die simulierten Ergebnisse werden im rechtlichen Kontext diskutiert.

Dipl.-Geol. S. Hähnlein (✉) · Dipl.-Ing. N. Molina-Giraldo · Dr. P. Blum · Dr. P. Bayer · Prof. Dr. P. Grathwohl
Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen, Deutschland
E-Mail: stefanie.haehnlein@uni-tuebingen.de

Dipl.-Ing. N. Molina-Giraldo
E-Mail: nelson.molina-giraldo@uni-tuebingen.de

Dr. P. Blum
E-Mail: philipp.blum@uni-tuebingen.de

Dr. P. Bayer
E-Mail: peter.bayer@uni-tuebingen.de

Prof. Dr. P. Grathwohl
E-Mail: grathwohl@uni-tuebingen.de

Cold plumes in groundwater for ground source heat pump systems

Abstract Shallow geothermal energy installations, especially ground source heat pump (GSHP) systems are increasingly being used for air conditioning and temperature control in buildings. Heating applications, for example, result in cold temperature anomalies (cold plumes) in the subsurface. To avoid interactions between adjacent cold plumes, authorities recommend minimum distances of about 10 m between installations. The length of these plumes can be simulated analytically and numerically. The presented analytical solutions are valid for steady-state conditions and consider conduction, convection and dispersion. The results show that the length depends on different parameters, especially flow velocity. The plumes in gravel aquifers become temporarily longer than in less permeable aquifers. Even under average energy extraction rates, they can exceed 10 m in length after one heating period. In the presented example the plume has a length of 10 m after 100 days under a continuous energy extraction rate of 55 W m^{-1} . However, these plumes can regenerate quickly. Finally, the analytical results are discussed in a legal context.

Keywords Ground source heat pumps (GSHP) · Borehole heat exchanger (BHE) · Cold plumes · Analytical solutions · Geothermal energy

Einführung

Klimaschutz und Energiesicherheit stehen heute auf annähernd jeder politischen Agenda, und der Einsatz erneuerbarer Energien steigt stetig an (BMU 2007a). Durch effizienten und sparsamen Energieeinsatz können fossile Roh-

stoffe eingespart und zusätzlich CO₂-Emissionen verringert werden (z. B. Blum et al. 2010). Ein besonderes Einsparpotenzial bietet die Wärmeversorgung von Häusern in der kalten Jahreszeit. Dabei stellt die oberflächennahe Geothermie einen favorisierten Lösungsweg dar. In jüngerer Zeit – insbesondere motiviert durch steigende Rohstoffpreise – wurde die Förderung der oberflächennahen Geothermie intensiviert, und es ist davon auszugehen, dass die flache Geothermie (<400 m) in einem umweltfreundlichen Energiemix der Zukunft eine wichtige Rolle spielt. Sie ist bei geeigneten hydrogeologischen Bedingungen für Einfamilienhäuser und Großanlagen gleichermaßen geeignet. Die Zahl der oberflächennahen geothermischen Anlagen steigt kontinuierlich an – alleine vom Jahr 2003 bis 2008 hat sich die Anzahl in Deutschland von 6197 auf 29.993 installierte Erdwärmesondenanlagen pro Jahr verfünffacht (BWP 2009). Im Februar 2007 sprach die Geothermische Vereinigung e. V. von insgesamt 120.000 installierten Anlagen der flachen Geothermie in Deutschland (GtV 2008).

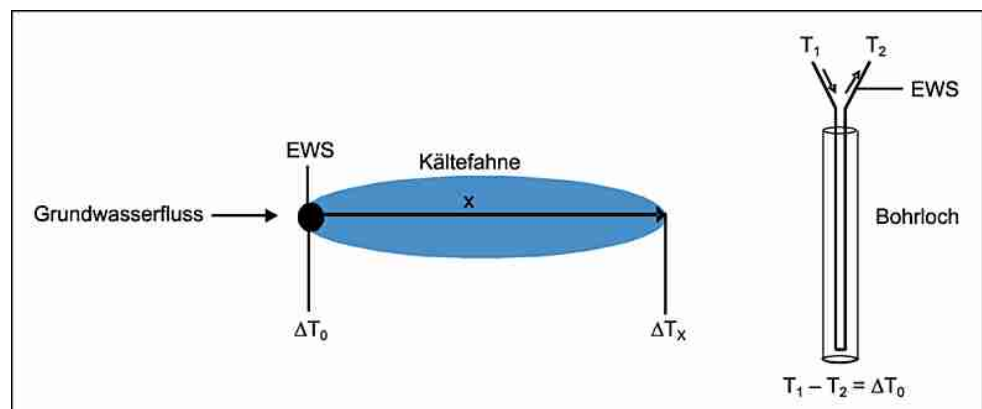
Oberflächennahe geothermische Anlagen können in geschlossene und offene Systeme gegliedert werden. Am häufigsten werden Erdwärmesonden (EWS), d. h. geschlossene Systeme, eingesetzt. Hier zirkuliert ein Wärmeträgermedium in einem meist vertikalen Bohrloch und transportiert die Wärme aus dem Untergrund zur Wärmepumpe. Bei der Nutzung von EWS zur Klimatisierung – zum Kühlen oder Heizen – kommt es durch Wärmeeintrag oder -entzug im Untergrund zu lokalen Temperaturveränderungen. Es entsteht ein lokaler Temperaturgradient, der sich bei rein konduktivem Wärmetransport radial um die Sonde ausbreitet. Wenn im Grundwasser der konvektive Wärmetransport überwiegt, bildet sich eine Wärme- bzw. Kältefahne (Temperaturfahne) parallel zum Grundwasserfluss aus (Abb. 1). Sobald sich ein Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr/-entzug und dem natürlichen Wärmeausgleich eingestellt hat, breitet sich die Temperaturänderung nicht weiter aus, und es stellt sich ein stationärer Zustand ein. Es können zwei Wärmetransportprozesse unterschieden werden. Dies ist zum einen der konduktive Transport, auch Wärmeleitung genannt und zum an-

deren der konvektive Transport. Bei letzterem wird die Wärme mit dem Grundwasser transportiert, weshalb dieser Prozess auch als advektiver Wärmetransport bezeichnet wird. Beide Begriffe, konvektiv und advektiv, werden gleichermaßen verwendet.

Um den Vorgaben des Wasserhaushaltsgesetzes bezüglich eines vorsorgenden Grundwasserschutzes zu entsprechen und die Auswirkungen der Temperaturanomalien einzuschränken, wurden von den Bundesländern Leitfäden zur Nutzung von EWS eingeführt. Darin sind Sonden- und Grenzabstände für den Bau von EWS vorgegeben. Sondenabstände bezeichnen den Mindestabstand zwischen zwei EWS. Grenzabstände beschreiben die Distanz, die zwischen einer EWS und der Grundstücksgrenze eingehalten werden soll. Die empfohlenen Mindestabstände liegen zwischen 5 m und bis zu 10 m (Tab. 1, Walker-Hertkorn et al. 2008, Hähnlein et al. 2009). Wird als Grenzabstand 5 m empfohlen, so ergibt sich zwischen zwei EWS auf unterschiedlichen Grundstücken ein Mindestabstand von 10 m. Weitere technische Regelungen für die oberflächennahe Geothermie bietet die Richtlinie des Verbands Deutscher Ingenieure (VDI) 4640 (VDI 4640-1, VDI 4640-2). Darin enthalten sind ebenfalls Mindestabstände und mögliche Entzugsleistungen je nach Eigenschaft des Untergrunds.

Dieses Thema ist auch Gegenstand der Studie von Paniké et al. (2006). Sie verwenden für ihre numerischen Szenarienmodellierungen von Kältefahnen im Grundwasser das Strömungs- und Wärmetransportmodell SHEMAT, womit stationäre und transiente Transportprozesse in hydrogeothermischen Reservoiren zwei- und dreidimensional dargestellt werden können (Bartels et al. 2003). Für die ersten Szenarien nehmen sie homogene Schichten an und belegen diese mit den hydro- und geologischen Eigenschaften der norddeutschen Lockersedimente. In der zweiten Modellgruppe werden mehrschichtige Modelle betrachtet, die über unterschiedliche thermische Parameter verfügen. Die Modellierungen werden für einen Zeitraum von 30 Jahren durchgeführt. Dabei wird der Wechsel der Winter-

Abb. 1 Schematische Darstellung (*links*) einer Kältefahne bei dominierendem konvektivem Wärmetransport bei Einsatz einer Erdwärmesonde, sowie (*rechts*) wie ΔT_0 aus der Temperatur des Wärmeträgermediums in der EWS berechnet wird



Tab. 1 Übersicht über Mindestabstände zwischen Erdwärmesonden sowie zwischen Erdwärmesonden und Grundstücksgrenzen in den Bundesländern. Bei Abschluss der Arbeit lag von Bremen noch kein Leitfaden vor

Bundesland	Mindestabstand	
	zur nächsten Sonde	zur Grundstücksgrenze
Baden-Württemberg ^b	10 m	k. A.
Bayern ^{a,c}	6 m	5 m
Berlin ^{a,d}	5 m/6 m [*]	5 m
Brandenburg ^e	5 m/6 m [*]	k. A.
Hamburg ^{a,f}	5 m/6 m	5 m
Hessen ^{a,g}	k. A.	5 m
Mecklenburg-Vorpommern ^h	5 m/6 m [*]	5 m
Niedersachsen ^{a,i}	5 m zw. Sonden einer Anlage/ 10 m zur nächsten Anlage	k. A.
Nordrhein-Westfalen ^j	k. A.	k. A.
Rheinland-Pfalz ^{a,k}	10 m	3 m
Saarland ^{a,l}	5 m zw. Sonden einer Anlage	k. A.
Sachsen ^{a,m}	5 m/6 m [*]	k. A.
Sachsen-Anhalt ⁿ	k. A.	k. A.
Schleswig-Holstein ^o	5 m/6 m [*]	k. A.
Thüringen ^{a,p}	5 m/6 m [*]	5 m

k. A. keine Angabe; entsprechend * VDI 4640 Blatt 2; ^aGültigkeit bis 30 kW Leistung; ^bLFBW (2005); ^cLFBAY (2003); ^dLFB (2007); ^eLGRBBB (2008); ^fLFHH (2009); ^gLFH (2006); ^hLFMVP (2006); ⁱLFN (2006); ^jLFNRW (2004); ^kLFRRP (2006); ^lLFSL (2008); ^mLFS (2007); ⁿLFSA (2005); ^oLFSS (2006); ^pLFT (2007)

(= Heizperiode) und Sommersaison (= Ruhephase) berücksichtigt. Teilweise wird im Sommerhalbjahr ein Wärmeeintrag simuliert. Die Werte für die Parameter wurden verschiedenen Literaturquellen entnommen (z. B. Freeze & Cherry 1979, Hölting 1996). Sie liegen für Ton (Schluff, Mittelsand) bei der Porosität bei 55 % (43 %; 38 %), für die Abstandsgeschwindigkeit mit einem Gradienten von $1,0 \cdot 10^{-3}$ bei $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ ($1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$; $4,2 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$) sowie für die Wärmeleitfähigkeit bei $1,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $2,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Berechnet wird die Länge der Kältefahne einer EWS in Fließrichtung, entgegen der Fließrichtung sowie die Breite der Kältefahne. Die simulierten Längen in Fließrichtung (von der Sonde bis zu dem Punkt, an dem eine Temperaturabweichung von 1°C erreicht ist) variieren, je nach gewähltem Szenario und Gesteinseinheit, zwischen 0,2 m (Grobsand, entzogene Wärmemenge: 8.100 kWh a^{-1}) und knapp 18 m nach 30 Jahren (Schluff, Wärmeentnahme von $10.800 \text{ kWh a}^{-1}$ und zusätzlichem Betrieb von jeweils 300 h im Sommer und Winter zur Bereitstellung von Warmwasser). Die Modellierungen von Panike et al. (2006) zeigen, dass in Lockersedimenten mit guter Durchlässigkeit der advective Wärmetransport mit dem Grundwasser gegenüber der Konduktion überwiegt. Des Weiteren wird dargestellt, dass die Fahnenlänge von der Fließgeschwindigkeit, der Entzugsleistung und den Sedimenteigenschaften abhängt. Aufgrund der vielfältigen Einflussparameter kommen sie zu dem Schluss, dass für eine Genehmigung von EWS Untergrundbedingungen und benötigte Wärmeleistung genau bekannt sein müssen.

Weitere numerische Modellierungen im Bereich des Wärmetransports im Zusammenhang von EWS wurden beispielsweise von Pahud et al. (2002) und Mahabadi (2006) durchgeführt. Pahud et al. (2002) verwenden numerische Modelle, um die Auswirkungen auf das Wärmeträgermedium zu betrachten. Mahabadi (2006) hingegen berechnet die Längen von Kältefahnen mit den Parametern für den Untergrund Berlins. In Hecht-Méndez et al. (2010) werden weitere numerische Modellwerkzeuge und Anwendungen im Zusammenhang von EWS ausführlich diskutiert.

Solche numerischen Modellierungen eignen sich insbesondere für große Anlagen mit mehreren EWS und heterogene Aquifere. Die im Folgenden präsentierten analytischen Gleichungen erlauben hingegen eine schnelle Abschätzung der Ausdehnung von Kältefahnen bei Einzelanlagen unter der Annahme eines homogenen Untergrunds. Für den häufigsten Einsatz von EWS, nämlich bei Einfamilienhäusern, kann in der Regel kein numerisches Wärmetransportmodell erstellt werden, und man ist auf Vereinfachungen angewiesen. Dennoch müssen zur Planung alle wichtigen Wärmetransportmechanismen im Grundwasser, d. h. Konduktion, Konvektion und Dispersion, berücksichtigt werden. Ziel dieser Arbeit ist die Abschätzung der maximalen Länge von Kältefahnen im Grundwasser durch den Einsatz von EWS. Dazu werden analytische Lösungen zum Wärmetransport im Grundwasser für den stationären Zustand herangezogen. Schwerpunkt ist die analytische Beschreibung für den zweidimensionalen (2D-) Fall ausgehend von einer vertikalen Linienquelle (EWS). Zum Vergleich wird auch der dreidimensionale (3D-) Fall diskutiert. Im Gegensatz zu vielen

existierenden Arbeiten zum Wärmetransport im Grundwasser (z. B. Bear 1972, De Marsily 1986) werden sowohl die hydromechanische Dispersion als auch die Wärmeleitung im Grundwasser berücksichtigt (z. B. Hidalgo et al. 2009, Molina-Giraldo et al. 2010). Nachfolgend werden zuerst die analytischen Gleichungen vorgestellt und anschließend einige Beispielrechnungen zur Ausdehnung der Kältefahnen durchgeführt. Des Weiteren werden die Ergebnisse im rechtlichen Kontext diskutiert und im Vergleich zu den Resultaten aus den numerischen Modellierungen von Pannike (2005) und Pannike et al. (2006) betrachtet.

Temperaturausbreitung im Grundwasser

Die Grundlagen des Stoff- und Wärmetransports finden sich z. B. in Bear (1972), Häfner et al. (1992) und De Marsily (1986). Carslaw & Jaeger (1959) erläutern die mathematischen Grundlagen des Wärmetransports. Analytische Lösungen für den Wärmetransport im Grundwasser finden sich beispielsweise in Diao et al. (2004) und Hecht-Méndez et al. (2010).

Bei der Berechnung von Temperaturanomalien im Untergrund sind konduktiver und konvektiver Wärmetransport zu unterscheiden sowie stationäre und nichtstationäre Bedingungen. Wegen der ähnlichen Beschreibung von Stoff- und Wärmetransport können analytische Lösungen zum Transport von Schadstoffen (Fried et al. 1979, Domenico & Robbins 1985) auch für Wärmetransport verwendet werden.

Grundsätzlich wird in analytischen Ansätzen zwischen Punkt-, Linien- und Flächenquellen unterschieden. Dabei entsprechen die Linienquellen am ehesten den Erdwärmesonden. Ausgangspunkt unserer Betrachtung ist eine punktbzw. linienförmige Kälte- bzw. Wärmequelle im Aquifer. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- das poröse Medium ist homogen,
- die physikalischen Eigenschaften sind temperaturunabhängig,
- die Temperatur ist über die komplette Länge der EWS konstant,
- es existiert eine gleichmäßige Hintergrundtemperatur im Grundwasser.

Für die Ausbreitung der Temperatur im Grundwasser gilt generell:

$$\begin{aligned}
 [1] \quad nc_w \frac{\partial T}{\partial t} &= -v_a nc_w \frac{\partial T}{\partial x} + (\lambda_m + D_m nc_w) \\
 &\quad \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c_s \frac{\partial T}{\partial t} \\
 \Rightarrow (nc_w + \rho_b c_s) \frac{\partial T}{\partial t} &= -v_a nc_w \frac{\partial T}{\partial x} + (\lambda_m + D_m nc_w) \\
 &\quad \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) m
 \end{aligned}$$

T , n , λ_m , c_w und c_s bezeichnen die Temperatur [$^{\circ}\text{C}$ bzw. K], die Porosität [–], die Wärmeleitfähigkeit [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] des porösen Mediums sowie die volumetrische Wärmekapazität des Wassers [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$] und die spezifische Wärmekapazität des Feststoffs [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]. Für die Trockenraumdichte ρ_b [kg m^{-3}] gilt: $\rho_b = \rho_s(1 - n)$, wobei ρ_s die Dichte des Feststoffes (Dichte des Minerals) ist. Parameter v_a steht für die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [m s^{-1}]. Der Term $\Delta T(nc_w + \rho_b c_s)$ bezeichnet den Energieinhalt des porösen Mediums [kJ m^{-3}] („Energie pro Volumen“) bei einer bestimmten Temperaturdifferenz (ΔT). D_m ist der hydromechanische Dispersionskoeffizient [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], der meist als Produkt der Abstandsgeschwindigkeit (v_a) und der Dispersivität (α) beschrieben wird. D_m kann für den longitudinalen oder transversalen Dispersionskoeffizienten stehen und mit der entsprechenden Dispersivität (α_l oder α_t) berechnet werden. Bei höheren Geschwindigkeiten kann D_m nichtlinear mit v_a zunehmen (Olsson & Grathwohl 2007). Gleichung 1 gilt analog auch für den Wärmetransport mit Sickerwasser in der ungesättigten Zone (Mortensen et al. 2006).

Unter stationären Bedingungen ($\partial T / \partial t = 0$) fallen die Speicherterme in Gleichung 1 weg:

$$\begin{aligned}
 [2] \quad 0 &= -v_a nc_w \frac{\partial T}{\partial x} \\
 &\quad + (\lambda_m + D_m nc_w) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned}$$

bzw.

$$\begin{aligned}
 [3] \quad 0 &= -v_a \frac{\partial T}{\partial x} \\
 &\quad + \left(\frac{\lambda_m}{nc_w} + D_m \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).
 \end{aligned}$$

Die Gleichungen 1–3 sind analog zu den gängigen Stofftransportgleichungen im Grundwasser. Im Folgenden werden rein stationäre Bedingungen und nur die transversale Dispersion betrachtet. Die Wärmeleitfähigkeit und die transversale Dispersion werden dabei zum transversalen Wärmedispersionskoeffizienten (D_t) [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] zusammengefasst:

$$[4] \quad D_t = \frac{\lambda_m}{c_w n} + \alpha_t v_a.$$

D_t kann für den stationären Fall auch direkt aus der Wärmeleitungsgleichung, dem Fourierschen Gesetz (1822), abgeleitet werden:

$$[5] \quad F = -\lambda_m \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

F ist die Wärmestromdichte [$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$], $\Delta T / \Delta x$ bezeichnet den Temperaturgradienten [K m^{-1} bzw. $^{\circ}\text{C m}^{-1}$]. Der Wärmeleitfähigkeitswert λ_m beinhaltet sowohl die Wärmeleitung im Feststoff als auch im Porenraum. Für den zusätz-

lichen Wärmetransport durch Dispersion, d. h. im strömenden Grundwasser, gilt:

$$[6] \quad F = \alpha_t v_a \frac{nc_w \Delta T}{\Delta x}.$$

Addiert man Gleichung 5 und 6, erhält man die gleiche Formulierung für die Koeffizienten der Wärmeleitung bzw. Dispersion wie in Gleichung 2 bzw. 4:

$$[7] \quad F = (\lambda_m + \alpha_t v_a nc_w) \frac{\Delta T}{\Delta x} \\ = \left(\frac{\lambda_m}{nc_w} + \alpha_t v_a \right) \frac{nc_w \Delta T}{\Delta x} = D_t \frac{nc_w \Delta T}{\Delta x}.$$

Unter instationären Bedingungen müssten die Wärmespeicherterme berücksichtigt werden. Der transversale Wärmedispersionskoeffizient $D_{t,a}$ lautet dann wie folgt:

$$[8] \quad D_{t,a} = \frac{\lambda_m + \alpha_t v_a nc_w}{nc_w + \rho_b c_s} = \frac{\frac{\lambda_m}{nc_w} + \alpha_t v_a}{1 + \frac{c_s \rho_b}{c_w n}},$$

wobei der Nenner im letzten Term den Retardationskoeffizienten (R) für den Wärmetransport darstellt ($R = 1 + (\rho_b c_s)/(nc_w)$).

2D und 3D analytische Lösungen

Analog zum Transport von Schadstoffen lassen sich die analytischen Gleichungen für die Berechnung der Länge von Temperaturfahnen für 2D- und 3D-Fälle formulieren. Für den 3D-Fall (ΔT in Abhängigkeit von den räumlichen Koordinaten x, y, z ; Abb. 2) lautet die analytische Lösung für Gleichung 2 bzw. 3 bei einer Punktquelle (analog zu Fried et al. 1979, Förstner & Grathwohl 2007):

$$[9] \quad \Delta T(x, y, z) = \frac{F_P}{v_a nc_w 4\pi D_t \frac{x}{v_a}} \exp \left[\frac{-(y^2 + z^2)}{4D_t \frac{x}{v_a}} \right].$$

ΔT bezeichnet die Differenz zur Hintergrundtemperatur des Grundwassers in Kelvin oder °C an einem Punkt (x, y, z) . F_P ist die Entnahmeleistung [$J s^{-1}$ bzw. W] an einem Punkt x .

Bei einer linienförmigen Quelle vertikal zur Fließrichtung (2D-Fall) erfolgt die transversale Wärmeausbreitung nur in eine Raumrichtung (Abb. 3):

$$[10] \quad \Delta T(x, y) = \frac{F_L}{v_a nc_w \sqrt{4\pi D_t \frac{x}{v_a}}} \exp \left(\frac{-(y^2)}{4D_t \frac{x}{v_a}} \right).$$

F_L ist hier die Entnahmeleistung pro Länge [$J s^{-1} m^{-1}$ bzw. $W m^{-1}$].

Interessiert nur die Temperaturentwicklung entlang der Achse der Fahne, d. h. für $y = 0$ und $z = 0$, dann fallen die Exponentialterme in den Gleichungen 9 und 10 weg. Im 3D-Fall ändert sich die Temperatur mit $1/x$ und im realistischen 2D-Fall mit $1/\sqrt{x}$.

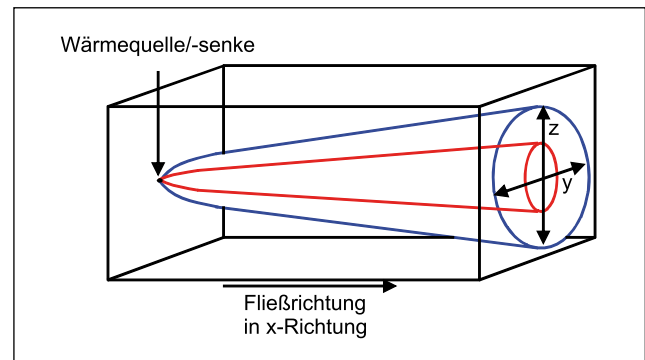


Abb. 2 Quell- und Fahngeometrie für eine Punktquelle; rote und blaue Kegel bezeichnen hohe bzw. kleinere Temperaturabweichungen vom Hintergrund

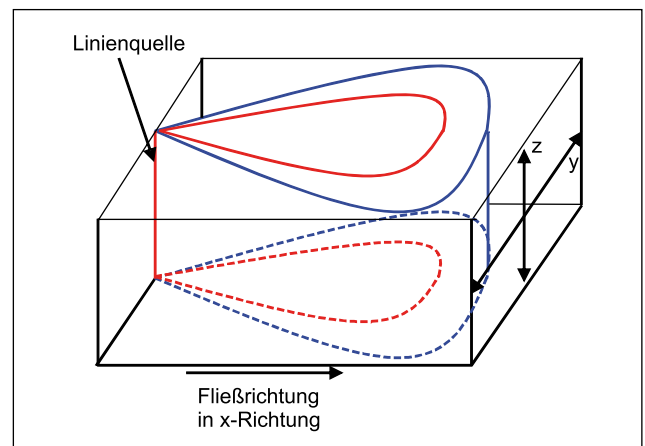


Abb. 3 Quell- und Fahngeometrie für eine Linienquelle; rote und blaue Linien stellen eine höhere bzw. niedrigere Temperaturabweichung vom Hintergrund dar

Liegt statt einer Punkt- und Linienquelle eine flächenhafte Quelle senkrecht zur Strömungsrichtung (y, z) vor (Abb. 4a), dann gilt für den Temperaturverlauf entlang der Fahnenachse im 3D-Fall:

$$[11] \quad \Delta T(x) = \Delta T_0 \operatorname{erf} \left[\frac{Y}{4\sqrt{D_t \frac{x}{v_a}}} \right] \operatorname{erf} \left[\frac{Z}{4\sqrt{D_t \frac{x}{v_a}}} \right].$$

Y und Z bezeichnen die Ausdehnung der Flächenquelle. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt hier in der Mitte der Flächenquelle (Abb. 4a, 4b). Die Wärmeausbreitung findet somit in der YZ -Ebene in jeweils zwei Richtungen ($\pm y$ und $\pm z$) statt. Wird der Ursprung an den Rand der Fläche verlegt, kann die Wärmeausbreitung in dieser Ebene nur noch in eine Richtung ($-y$) stattfinden (Abb. 4c). Es gilt dann für die vertikale Koordinate in Gleichung 11 nicht $z/4$ sondern $z/2$ (Domenico & Schwartz 1990). Die Entnahmeleistung hängt somit mit der Temperaturdifferenz in der Quelle (ΔT_0) über die senkrecht zur Fließrichtung von

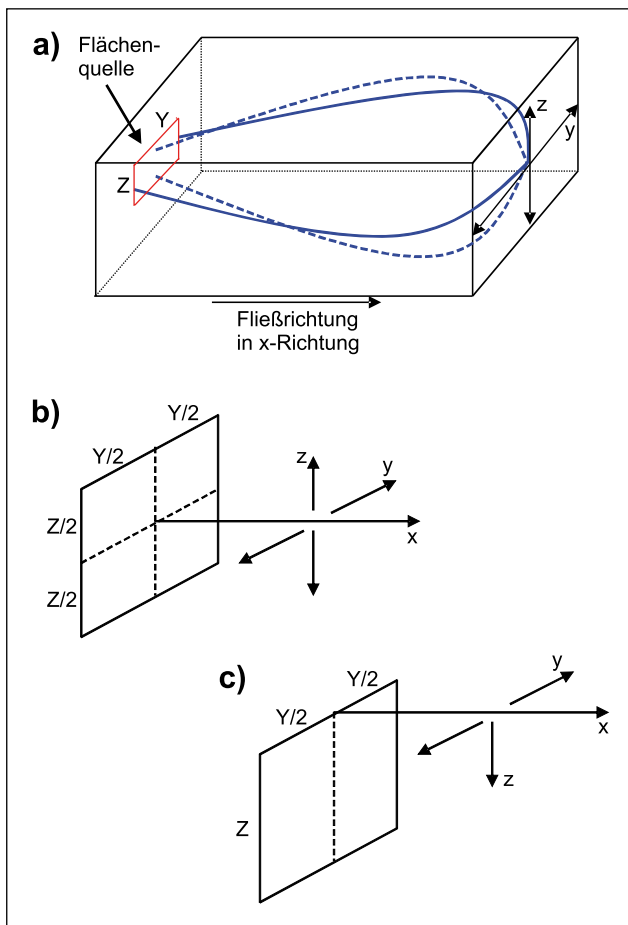


Abb. 4 (a) Quell- und Fahngeometrie für eine Flächenquelle. Die gestrichelte und die durchgezogene Linie zeigen die vertikale (z) und horizontale (y) Ausdehnung der Temperaturabweichung vom Hintergrund an. (b) Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Mitte der Flächenquelle. (c) Der Ursprung des Koordinatensystems liegt am Rand der Flächenquelle, die Wärmeausbreitung entlang y ist in zwei Richtungen, entlang z nur vertikal nach unten möglich

der Quelle eingenommenen Fläche ($A = YZ$) und der Abstandsgeschwindigkeit wie folgt zusammen:

$$[12] F_P = \Delta T_0 n v_a c_w A.$$

Im 2D-Fall (quasi infinite vertikale Quelle mit Breite Y) gilt dann:

$$[13] \Delta T(x) = \Delta T_0 \operatorname{erf} \left[\frac{Y}{4 \sqrt{D_t \frac{x}{v_a}}} \right].$$

In diesem Fall hängt die Entzugsleistung mit der Temperaturdifferenz in der Quelle (ΔT_0) und der Fließgeschwindigkeit wie in Gleichung 12 zusammen, wird aber pro Tiefe z angegeben:

$$[14] F_L = \frac{F_P}{Z} = \Delta T_0 n v_a c_w Y.$$

Dominiert die Querdispersion gegenüber der Wärmeleitung ($\alpha_t v_a \gg \lambda / (c_w n)$), dann ist entsprechend Gleichung 11

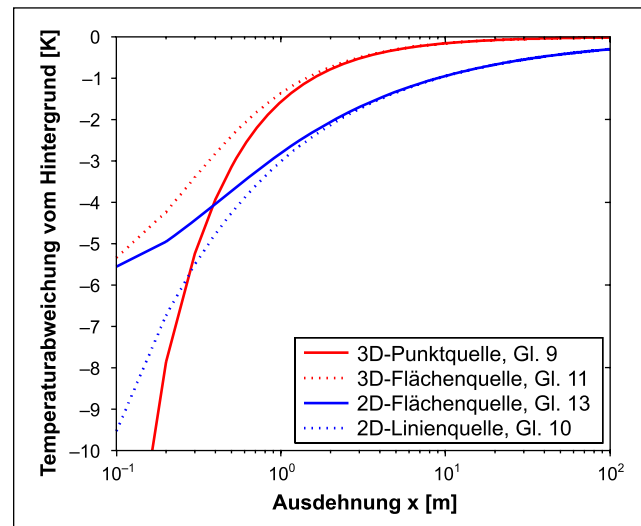


Abb. 5 Vergleich der analytischen Lösungen für 2D- (blau) und 3D-Fälle (rot) für Punkt- bzw. Linienquellen und Flächenquellen mit $v_a = 8,0 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ (ca. $0,7 \text{ m Tag}^{-1}$), $n = 0,31$, $\alpha_t = 0,1 \text{ m}$, $\alpha_l = 1 \text{ m}$, $\lambda = 2,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $F_P = 60 \text{ W}$ bzw. $F_L = 60 \text{ W m}^{-1}$, $Y = Z = 1 \text{ m}$

und 13 die Ausdehnung der Temperaturfahne unabhängig von der Fließgeschwindigkeit v_a .

Die transversale Ausbreitung der Temperatur in der abstromigen Fahne in eine Raumrichtung (y oder z ; hier durch r ersetzt) kann näherungsweise über das mittlere Verschiebungsquadrat abgeschätzt werden:

$$[15] r^2 = 2D_t \frac{x}{v_a}$$

oder bei Überwiegen der Querdispersion:

$$[16] r^2 = 2\alpha_t x.$$

Zur Berechnung der Ausdehnung von Kältefahnen stehen also verschiedene analytische Lösungen zur Verfügung, die von der Quellgeometrie (Punkt-, Linien- oder Flächenquelle) abhängig sind. Für den folgenden Vergleich der analytischen Lösungen wurden mittlere Werte von Kies verwendet (Abb. 5). Die analytischen Lösungen für die Punkt- und Linienquellen zeigen im Vergleich zu den Flächenquellen größere Temperaturabweichungen im direkten Abstrom der Sonde; in einem Abstand (hier bereits ab ungefähr 2 m) von der Sonde stimmen die Lösungen jeweils für den 2D- und 3D-Fall aber sehr gut überein. Im 3D-Fall klingt die Temperaturanomalie schneller ab als im 2D-Fall, da hier eine weitere Raumrichtung für die Ausbreitung („Verdünnung“) der Wärme bzw. Kälte zur Verfügung steht. Der 2D-Fall (vertikale Linienquelle) kommt in der Realität einer Erdwärmesonde wohl am nächsten und kann deshalb für die Bestimmung der maximalen Ausdehnung der Kältefahne verwendet werden (Gl. 10 bzw. 18).

Ausbreitung von Kältefahnen

Wie Abbildung 5 zeigt, können zur Berechnung der Ausdehnung der Temperaturfahne bis zu einem Punkt x mit festgelegter absoluter Temperaturdifferenz (relativ zur Hintergrundtemperatur) $\Delta T(x)$ in Grundwasserfließrichtung ($y = z = 0$) einfache analytische Lösungen, d. h. Gleichungen 9 und 10, herangezogen werden:

$$[17] \text{ 3D: } x = \frac{F_P}{v_a n c_w 4\pi D_t \frac{\Delta T_x}{v_a}},$$

$$[18] \text{ 2D: } x = \frac{F_L^2}{v_a n^2 c_w^2 4\pi D_t \Delta T_x^2}.$$

Überwiegt bei gegebener Entnahmeleistung (F_0) die Wärmeleitung (λ) gegenüber der hydromechanischen bzw. thermischen Querdispersion (D_t), dann nimmt die Länge der Temperaturfahne im 2D-Fall mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ab. Dominiert die hydromechanische Dispersion, was aber erst bei Fließgeschwindigkeiten über 1 m d^{-1} und verhältnismäßig großen Querdispersivitäten ($> 10 \text{ cm}$) zu erwarten ist, dann reduziert sich die Ausdehnung der Temperaturfahne im 3D-Fall nach Gleichung 17 linear (hier nicht graphisch dargestellt) und im 2D-Fall quadratisch mit zunehmender Fließgeschwindigkeit (siehe Abb. 6). Dies hängt damit zusammen, dass bei höheren Fließgeschwindigkeiten die oberstromige Wärmezufuhr zur Sonde entsprechend größer ist und die Quervermischung mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ebenfalls zunimmt.

Nach Gleichung 18 kann sehr einfach die Strecke berechnet werden, in der die beispielsweise an der Erdwärmsonde aufgetretene Temperaturabweichung in Fließrichtung bis auf eine bestimmte Temperaturdifferenz ($\Delta T(x)$) abgeklungen ist. Die wichtigsten Parameter sind die Entzugsleistung (F_0), die zwischen 10 W m^{-1} und 100 W m^{-1} variieren

kann, und als technisch-rechtliches Kriterium die akzeptable Temperaturabweichung vom Hintergrund ($\Delta T(x)$). In der Schweiz werden dafür beispielsweise $\pm 3^\circ\text{C}$ akzeptiert (GSchV-CH 1998).

Eine Übersicht zu weiteren hydraulischen und thermischen Parametern für verschiedene poröse Medien bietet Tabelle 2. Exemplarisch werden jeweils Minimal- und Maximalwerte der gesteinspezifischen Porositäts- und Wärmeleitfähigkeiten angegeben. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes liegt bei ca. $2,1 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($1,5\text{--}3,0 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ist abhängig von der Porosität, daher können die Wärmeleitfähigkeitswerte grundsätzlich auch über Mischungs-

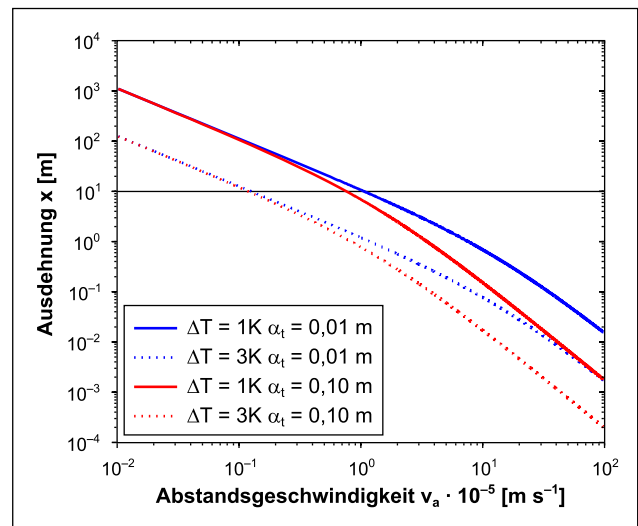


Abb. 6 Ausdehnungen der Kältefahnen nach Gl. 18 in Abhängigkeit von der transversalen Dispersivität und der Abstandsgeschwindigkeit mit $F_L = -60 \text{ W m}^{-1}$; $n = 0,31$; $\lambda = 2,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Tab. 2 Übersicht zu Abstandsgeschwindigkeiten, Porositäten und Wärmeleitfähigkeiten von Locker- und Festgesteinen. Die Abstandsgeschwindigkeiten wurden nach dem Gesetz von Darcy mit einem Gradienten von $1 \cdot 10^{-3}$ berechnet. Die min. und max. Werte hier spiegeln nur die Extremwerte wider. Die Mittelwerte wurden aus diesen und weiteren Werten berechnet

Medium	Abstandsgeschwindigkeit $v_a [\text{m s}^{-1}]^*$	Porosität			Wärmeleitfähigkeit		
		$n [-]$			$\lambda [\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}]$		
	Mittelwert	Min.	Max.	Mittelwert	Min.	Max.	Mittelwert
Kies	$8,0 \times 10^{-6} \text{ a,c,h}$	$0,24^c$	$0,38^c$	0,31	$1,8^i$	$1,8^i$	1,8
Sand	$1,5 \times 10^{-6} \text{ a,c,e,f,i}$	$0,25^d$	$0,53^c$	0,38	$1,7^i$	$5,0^i$	2,5
Schluff	$1,0 \times 10^{-7} \text{ a,c,d,f,i}$	$0,34^c$	$0,61^c$	0,45	$0,9^i$	$2,4^j$	1,6
Ton	$1,0 \times 10^{-10} \text{ a,c,f,i}$	$0,34^c$	$0,70^d$	0,49	$0,9^i$	$2,3^i$	1,5
Sandstein	$5,9 \times 10^{-7} \text{ b,c,d,e,g}$	$0,05^d$	$0,30^d$	0,15	$1,3^e$	$4,3^b$	2,5
Kalkstein	$7,5 \times 10^{-8} \text{ b,c,d,e}$	$0,005^e$	$0,40^c$	0,13	$1,4^k$	$4,1^k$	3,0
Tonstein	$5,5 \times 10^{-13} \text{ e,k}$	$0,005^e$	$0,40^e$	0,14	$1,5^k$	$2,2^k$	1,9
Kristallin	$4,3 \times 10^{-8} \text{ b,c,d}$	0^d	$0,025^c$	0,01	$1,9^i$	$4,1^i$	2,8

*Berechnet über k_f -Mittelwerte aus: ^aBalke et al. (2000); ^bDe Marsily (1986); ^cDomenico & Schwartz (1990); ^dFreeze & Cherry (1979);

^eHäfner et al. (1992); ^fHölting (1996); ^gLGRB (2007); ^hSchulze (2004); ⁱVDI 4640 Blatt 1 (2000); ^jPannike (2005); ^kAfU (2005)

Tab. 3 Mittlere Abstandsgeschwindigkeiten in porösen Medien sowie die daraus berechnete Transportstrecke (nach Gl. 21) nach 100 Tagen (Stationaritätskriterium)

Poröses Medium	Abstandsgeschwindigkeit v_a [m d ⁻¹]*	Wegstrecke nach 100 Tagen [m]
Kies	0,7 ^{a,c,h}	69,1
Sand	0,1 ^{a,c,e,f,i}	13,3
Schluff	0,009 ^{a,c,d,f,i}	0,9
Sandstein	0,05 ^{b,c,d,e,g}	5,1
Kalkstein	0,007 ^{b,c,d,e}	0,7
Kristallin	0,004 ^{b,c,d} b,c,d	0,4
Lockergestein (Mittelwert)	0,2	20,8
Festgestein (Mittelwert)	0,05	4,8

*Berechnet über k_f -Mittelwerte aus: ^aBalke et al. (2000); ^bDe Marsily (1986); ^cDomenico & Schwartz (1990); ^dFreeze & Cherry (1979); ^eHäfner (1992); ^fHölting (1996); ^gLGRB (2007); ^hSchulze (2004); ⁱVDI 4640 Blatt 1 (2000)

gesetze bestimmt werden (z. B. Anderson 2005). Die hier angegebenen Werte sind jedoch der Literatur entnommen. Die mittlere Porosität beträgt 0,30 (0,13–0,49). Die transversale Dispersivität α_t , mit deutlich kleineren Werten als die longitudinale Dispersivität ist meist nur ein Bruchteil der mittleren Korngröße und liegt in Abhängigkeit der Abstandsgeschwindigkeit und des Beobachtungsmaßstabs zwischen 0,06 mm und 30 cm (z. B. Klenk & Grathwohl 2002, Maier & Grathwohl 2006, Olsson & Grathwohl 2007, Blum et al. 2008).

Die bisher aufgeführten Gleichungen gelten nur für den stationären Zustand, der sich mit abnehmender Fließgeschwindigkeit und zunehmender Retardation der Temperatur immer langsamer einstellt. Tatsächlich würde nach Gleichung 18 mit abnehmender Fließgeschwindigkeit eine zunehmend lange Temperaturfahne entstehen, die aber entsprechend lange brauchen würde, bis sie sich ausgebildet hat (bei stagnierendem Wasser würde sich eine Temperaturanomalie immer weiter ausbreiten). Der zur Abschätzung der Geschwindigkeit einer Temperaturfront nötige Retardationsfaktor R [–] ergibt sich aus der Gesamtwärmekapazität des porösen Mediums und der Wärmekapazität des mobilen Wassers (4.185 kJ m⁻³ K⁻¹):

$$[19] R = \frac{nc_w + \rho_b c_s}{nc_w} = 1 + \frac{\rho_b c_s}{nc_w}.$$

Bei einer Porosität von 0,33, der Feststoffdichte und Wärmekapazität von 2.650 kg m⁻³ bzw. 800 J kg⁻¹ K⁻¹ von Quarz ergibt sich ein Retardationsfaktor von rund 2, was auch durch Literaturwerte bestätigt wird (Andrews & Anderson 1979, Molson et al. 1992, Rühaak et al. 2008). Die nach einer bestimmten Zeit erreichte Transportstrecke x bei Beachtung der Retardation R ist daher:

$$[20] x = \frac{v_a t}{R}.$$

Überschlägig kann man somit davon ausgehen, dass bei einer Fließgeschwindigkeit von 1 m d⁻¹ innerhalb einer Heiz-

periode von 100 Tagen eine Kältefahne stationär würde und eine Länge von 50 m erreicht. In Tabelle 3 sind zusammenfassend für mittlere Abstandsgeschwindigkeiten und einem hydraulischen Gradienten von $i = 1 \cdot 10^{-3}$ die maximalen Ausdehnungen (zurückgelegte Strecke des Grundwassers) innerhalb des betrachteten Zeitraums von 100 Tagen dargestellt. Diese jedoch wurden konservativ (ohne Retardation) mit

$$[21] x = v_a t$$

berechnet. In Deutschland werden meist 10 m als Mindestabstand zwischen zwei geothermischen Anlagen auf nebeneinander liegenden Grundstücken empfohlen (vgl. Tab. 1). Basierend auf den Entzugsleistungen aus der VDI 4640 können nach Gleichung 18 diese 10 m innerhalb einer Heizperiode von 100 Tagen bei den meisten Gesteinseinheiten (Einheit aus Feststoff und Porenraum), wie beispielsweise bei Ton, Schluff und Sandstein eingehalten werden (siehe Parameterübersicht in Tab. 2). Allerdings ist eine solche Ausdehnung noch nicht stationär und erweitert sich bei dominant-konduktiven Bedingungen in den nächsten Heizperioden.

Die Längen der innerhalb einer Betriebsphase von 100 Tagen stationär werdenden Kältefahnen in kiesigen und sandigen Grundwasserleitern sind in Abbildung 7 dargestellt. Dabei wurden die Kältefahnen mit $k_f = 1,8 \cdot 10^{-3}$ m s⁻¹ (Kies) und $2,5 \cdot 10^{-4}$ m s⁻¹ (Sand); $n_e = 0,22$ bzw. 0,16; $i = 1,0 \cdot 10^{-3}$ und weiteren Werten entsprechend Tabelle 2 berechnet. Die horizontale blaue Linie kennzeichnet den häufig verwendeten 10 m-Mindestabstand (Abb. 7). Die Linie für Sand endet bei der innerhalb einer Heizperiode von 100 Tagen möglichen Transportstrecke nach Gleichung 21 bei 13 m und überschreitet somit die 10 m. Diese Ausdehnung wird bereits mit einer Entzugsleistung von 35 W m⁻¹ erreicht. Die Kältefahne in Kies überschreitet ebenfalls den 10 m-Mindestabstand, kann aber dafür stationär werden und

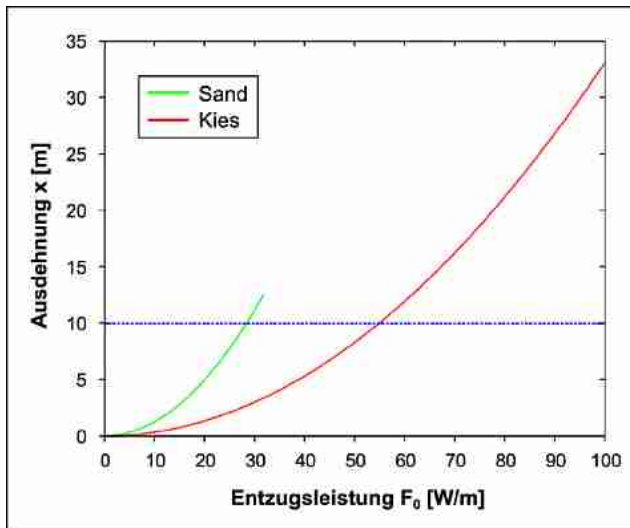


Abb. 7 Ausdehnungen der Kältefahnen in Kies und Sand nach Gleichung 18 bei einer Abkühlung von $\Delta T(x) = 1,0^\circ\text{C}$. Die horizontale blaue Linie kennzeichnet den von den Behörden empfohlenen bzw. einzuhaltenden 10 m-Mindestabstand. Die Linie für Sand endet bei der innerhalb einer Heizperiode von 100 Tagen maximal möglichen Ausdehnung von 13 m

erreicht im gewählten Modellszenario bei $F_0 = 100 \text{ W m}^{-1}$ eine Länge von 33,1 m.

Betrachtet man die in verschiedenen Regelwerken empfohlene Sondenabstände, die im Schnitt bei 5 m liegen, ergibt sich ein ähnliches Bild. In Einzelfällen werden 6 m als Mindestabstand zur nächsten EWS empfohlen. Die Kältefahne in Sand wird bei einer Entzugsleistung ab 20 W m^{-1} (22 W m^{-1}) länger als 5 m (6 m), die Kältefahne in Kies erreicht diese Länge ab 39 W m^{-1} (43 W m^{-1}). In der VDI 4640, Blatt 2 werden als mögliche Entzugsleistungen für 2.400 Betriebsstunden bei wasserführendem Sand und Kies $55\text{--}65 \text{ W m}^{-1}$, für Einzelanlagen mit starkem Grundwasserfluss $80\text{--}100 \text{ W m}^{-1}$ genannt, d. h. die Kältefahnen im Kies sind bei diesen Entzugsleistungen länger als 10 m.

Hier ist jedoch anzumerken, dass die Berechnung der Länge von einer konstanten Entzugsleistung über einen Zeitraum von 100 Tagen ausgeht, was den EWS-Betrieb in der Praxis nur bedingt simuliert, da die Entzugsleistung täglich variiert.

Ergebnisse und Diskussion

Die thermische Nutzung des Untergrundes durch Erdwärmesonden (EWS) führt zu Temperaturanomalien (Wärme- oder Kältefahnen) im Untergrund. Deren Ausdehnung muss bekannt sein, um ihren Einfluss auf benachbarte geothermische Anlagen sowie die Ökosysteme des Untergrundes, insbesondere des Grundwassers interpretieren zu können (z. B.

Schippers & Reichling 2006, Brielmann et al. 2009). Die Länge einer Kältefahne wird u. a. von thermischen und hydraulischen Materialparametern bestimmt und variiert daher unter sonst gleichen Bedingungen je nach hydro- und geologischer Einheit. Der Einfluss unterschiedlicher hydraulischer Gradienten sowie der hydraulischen als auch thermischen Dispersion könnte je nach Einzelfall vertieft werden. Zum Einfluss des hydraulischen Gradienten bestehen bisher jedoch nur wenig grundlegende Untersuchungen (z. B. Bayer & Finkel 2006). Der Einfluss der thermischen Dispersion auf die Länge der Kältefahnen wird in Molina-Giraldo et al. (2010) mithilfe von analytischen Lösungen und in Hidalgo et al. (2009) anhand von numerischen Simulationen ausführlich diskutiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Grundwasserströmung in Sanden und Kiesen eine wichtige Rolle beim Wärmetransport spielt und nicht vernachlässigt werden kann. Der vorgestellte einfache analytische Ansatz (Gl. 18) kann für die Abschätzung der maximalen Länge von Kältefahnen im Grundwasser im stationären Zustand eingesetzt werden. Bei den typischen Entzugsleistungen nach VDI 4640 werden Kältefahnen im Kies innerhalb der hier angenommenen Heizperiode von 100 Tagen stationär und deutlich länger als die in den Leitfäden häufig empfohlenen 10 m. Die Grenzempfehlung von 10 m wird von Kältefahnen in Kiesen bereits bei einer Entzugsleistung von 55 W m^{-1} , sowie einem hydraulischen Gradienten von $1 \cdot 10^{-3}$ überschritten. Über die Sommerperiode kann sich jedoch die im Winter entstandene Temperaturanomalie aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten wieder vollständig regenerieren. Bisherige Modellierungen mit geringdurchlässigen Grundwasserleitern haben gezeigt, dass bei dominant-konduktiven Bedingungen ein kontinuierlicher Abkühlungstrend besteht, bei dem eine vollständige Regenerierung über die Sommermonate nicht stattfindet (Hähnlein et al. 2009). Dabei wurden verschiedene Szenarien angenommen. Mit geringerem Grenz- und Sondenabstand ($2 \times 3 \text{ m}$) besteht eine dauerhaft stärkere Abkühlung als bei größerem Abstand ($2 \times 5 \text{ m}$). Dies bedeutet, die Kältefahnen im Kies werden zwar innerhalb einer Heizperiode länger als die Kältefahnen in Gesteinen mit geringerer Durchlässigkeit, können sich jedoch auch schneller regenerieren.

Pannike et al. (2006) kommen zu dem Ergebnis, dass die Kältefahnen mit einer akzeptierten Abweichung der Temperatur von der ungestörten Untergrundtemperatur von $1,0^\circ\text{C}$ bereits in Mittelsand ihre maximale Länge nach der ersten Betriebsphase erreichen. Dabei erlangen sie beispielsweise bei einer Wärmeleistung von 4,5 kW über 1.800 h und zusätzlicher Kälteleistung von 2 kW in 500 h mit $v_a = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ eine Länge von ca. 4 m. Wird die Anlage zusätzlich noch zur Bereiststellung von Warmwasser im Sommer und Winter genutzt, werden die Kältefahnen über 5 m lang. Definiert man Kältefahnen über eine Temperaturabweichung von nur $0,1^\circ\text{C}$, dann erreichen sie eine Länge

von über 100 m und benötigen ungefähr 10 Jahre, um stationär zu werden. Die Länge der stationären Fahne nimmt mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ab (Gl. 18). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Modellierungen von Pannike et al. (2006) für einen längeren Zeitraum (30 Jahre) durchgeführt wurden. Die Kältefahnen haben hier also bereits die Stationarität erreicht.

Die Ergebnisse von Pannike et al. (2006) bestätigen, dass mit steigender Fließgeschwindigkeit der konvektive Wärmetransport gegenüber dem konduktiven zunehmend dominiert. Bezüglich der Abstände zu benachbarten Grundstücken kommen sie zu dem Ergebnis, dass bei einer akzeptierten Abkühlung von $< 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, sowie einem Wärmebedarf von 4,5 kW bei einem Untergrund aus Mittel- bis Grobsand, der Grenzabstand von 5 m ausreicht. Für geringere Durchlässigkeiten werden dagegen größere Abstände nötig. Der Sondenabstand zwischen zwei EWS parallel zum Grundwasserfluss sollte nach Pannike et al. (2006) bei feinsandigem Untergrund zwischen 6 m und 10 m liegen. Bei einer Wärmeleistung von 3 kW sind bei Ton und Schluff Grenzabstände von 8 m und bei Fein-, Mittel- und Grobsand 5 m bis 20 cm erforderlich.

Die Ergebnisse der analytischen und numerischen Modelle zeigen, dass pauschale Empfehlungen für Mindestabstände den unterschiedlichen Untergrundbedingungen und der jeweiligen geothermischen Nutzung teilweise nicht gerecht werden. Einfache analytische Lösungen (Gl. 18) erlauben jedoch, den Untergrundverhältnissen bedingt gerecht zu werden und können an einzelnen Standorten zur schnellen Abschätzung von Fahnenlängen herangezogen werden. Sie berücksichtigen neben der Konvektion und Konduktion auch den dispersiven Wärmetransport. Grundsätzlich lässt sich zusammenfassen, dass bei einem Untergrund mit höherem Grundwasserfluss die Kältefahnen über längere Zeiträume kürzer sind und sich schneller regenerieren als bei geringeren Durchlässigkeiten, wie beispielsweise bei Ton, Sand oder Kalkstein. Für die Genehmigungspraxis heißt das, dass bei gut durchlässigen Grundwasserleitern die vorhandenen Abstandsempfehlungen kurzfristig (1 Heizperiode) ausreichen. In gering durchlässigem Untergrund können sich Kältefahnen darüber hinaus über längere Zeiträume (Jahrzehnte) deutlich weiter ausdehnen. Geht man von einer erlaubten Abweichung von der Hintergrundtemperatur von $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ aus, würden dann bei Kleinanlagen in stark durchlässigen Kiesen mit den möglichen Entzugsleistungen nach VDI 4640 die 10 m für eine Heizperiode nicht ausreichen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Kältefahnen aus dem Winter vollständig im Sommerhalbjahr regenerieren. Für eine nachhaltige geothermische Nutzung bedeuten diese Ergebnisse, dass in Lockergesteinen (hier Kies und Sand) gegenüber Festgesteinen langfristig kürzere Kältefahnen auftreten, die sich auch schneller regenerieren können. Diese Aspekte sollten in der Praxis bei den Genehmigungsbehörden und bei Planungen von Siedlungsstrukturen

berücksichtigt werden. Wenn der Untergrund kontrolliert als Energieressource genutzt wird, dann können EWS in der Gebäudeklimatisierung weiter erheblich an Bedeutung gewinnen.

Danksagung Für die finanzielle Unterstützung bedanken sich Stefanie Hähnlein bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU, Promotionsstipendienprogramm), Nelson Molina-Giraldo beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, IPSWaT-Programm) sowie Peter Bayer bei der Landesstiftung Baden-Württemberg (Eliteförderung für Postdoktoranden).

Literatur

- AfU: Nutzung der Geothermie in Stuttgart. Schriftenreihe des Amt für Umweltschutz 1/2005, 89 S. (2005)
- Anderson, M.: Heat as a ground water tracer. *Ground Water* **43**(6), 951–968 (2005)
- Andrews, C.B., Anderson, M.P.: Thermal alteration of groundwater caused by seepage from a cooling lake. *Water Resour. Res.* **15**, 595–602 (1979)
- Balke, K.D., Beims, U., Heers, F.W., Hölting, B., Homrighausen, R., Matthess, G.: Grundwassererschließung, Grundlagen – Brunnenbau – Grundwasserschutz – Wasserrecht, 740 S. Gebrüder Borntraeger, Berlin/Stuttgart (2000)
- Bartels, J., Cheng, L.Z., Chiang, W.-H., Clauser, C., Hurter, S.J., Kühn, M., Meyn, V., Pape, H., Pribnow, D.F.C., Ranalli, G., Schneider, W., Stöfen, H.: Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers, 332 S. Springer, Berlin/Heidelberg (2003)
- Bayer, P., Finkel, M.: Conventional and combined pump-and-treat systems under nonuniform background flow. *Ground Water* **40**, 234–243 (2006)
- Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media, 784 S. Dover, New York (1972)
- Blum, P., Maier, U., Melzer, R., Grathwohl, P.: Bestimmung der transversalen Dispersion im Labor und im Feld. FH-DGG Tagung, Göttingen (2008)
- Blum, P., Campillo, G., Münch, W., Kölbel, T.: CO₂ savings of ground source heat pump systems – a regional analysis. *Renew. Energy* **35**, 122–127 (2010)
- BMU: Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2006 in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007a)
- Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lüders, T.: Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiol. Ecol.* **68**(3), 273–286 (2009)
- BWP: Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen in Deutschland von 2003 bis 2008. Bundesverband WärmePumpe (BWP) e. V., Berlin (2009)
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C.: Conduction of Heat in Solids, 510 S. Clarendon, Oxford (1959)
- De Marsily, G.: Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrogeology for Engineers, 440 S. Academic Press, London (1986)
- Diao, N., Li, Q., Fang, Z.: Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *Int. J. Thermal Sci.* **43**, 1203–1211 (2004)
- Domenico, P.A., Robbins, G.A.: A new method of contaminant plume analysis. *Ground Water* **23**, 476–485 (1985)
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W.: Physical and Chemical Hydrogeology, 824 S. Wiley, New York (1990)
- Freeze, R.A., Cherry, J.A.: Groundwater, 604 S. Prentice-Hall, New Jersey (1979)
- Fried, J.J., Muntzer, P., Zilliox, L.: Ground-water pollution by transfer of oil hydrocarbons. *Ground Water* **17**, 586–594 (1979)

- Förstner, U., Grathwohl, P.: Ingenieurgeochemie: Technische Geochemie – Konzepte und Praxis, 471 S. Springer, Berlin/Heidelberg (2007)
- GSchV-CH: Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998; Schweizer Bundesrat (1998)
- GtV: Schriftliche Mitteilung der Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. (2008) vom 3. April 2008
- Häfner, F., Sames, D., Voigt, H.D.: Wärme- und Stofftransport: Mathematische Methoden, 626 S. Springer, Berlin/Heidelberg (1992)
- Hähnlein, S., Bayer, P., Blum, P., Kübert, M., Walker-Hertkorn, S.: Rechtliche Rahmenbedingungen bei der thermischen Grundwasserbewirtschaftung. Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Geothermie, 14–20 (2009)
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P.: Verifying the solute transport model MT3DMS for heat transport simulation of closed shallow geothermal systems. Ground water (2010) (im Druck)
- Hidalgo, J.J., Carrera, J., Dentz, M.: Steady state heat transport in 3D heterogeneous porous media. Adv. Water Resour. **32**(8), 1206–1212 (2009)
- Hölting, B.: Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 441 S. Enke, Stuttgart (1996)
- Klenk, I.D., Grathwohl, P.: Transverse vertical dispersion in groundwater and the capillary fringe. J. Cont. Hydrol. **58**, 111–128 (2002)
- LFB: Erdwärmennutzung in Berlin – Leitfaden für Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren mit einer Heizleistung bis 30 kW außerhalb von Wasserschutzgebieten, 11 S. Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin (2007)
- LFBA: Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, 19 S. Verkehr und Technologie (2003)
- LFBW: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 26 S. Umweltministerium Baden-Württemberg (2005)
- LFH: Erdwärmennutzung in Hessen – Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 kW. Hessisches Landesamt für Geologie (2006)
- LFHH: Leitfaden zur Erdwärmennutzung in Hamburg, 43 S. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (2009)
- LFN: Leitfaden Erdwärmennutzung in Niedersachsen, 20 S. Niedersächsisches Umweltministerium (2006)
- LFMVP: Leitfaden Erdwärmesonden in Mecklenburg-Vorpommern, 24 S. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2006)
- LFNRW: Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme, 34 S. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2004)
- LFRP: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 22 S. Ministerium für Umwelt Rheinland-Pfalz (2006)
- LFS: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 32 S. Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen (2007)
- LFSA: Geologischer Leitfaden für die oberflächennahe Erdwärmennutzung in Sachsen-Anhalt. Karte; Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (2005)
- LFSh: Leitfaden für oberflächennahe Erdwärmeanlagen, 42 S. Landesamt für Natur und Umwelt, Schleswig-Holstein (2006)
- LFSL: Leitfaden Erdwärmennutzung, 20 S. Ministerium für Umwelt Saarland (2008)
- LFT: Nutzung oberflächennaher Geothermie – Vorläufige Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung angezeigter Vorhaben; Thüringer Landesverwaltungsamt (2007)
- LGRB: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. Schriftliche Mitteilung (2007)
- LGRBBB: Pers. Kom. des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (2008)
- Maier, U., Grathwohl, P.: Numerical experiments and field results on the size of steady state plumes. J. Contam. Hydrol. **85**, 33–52 (2006)
- Mahabadi, O.K.: Geothermal simulation for the city of Berlin, 76 S. EuroAqua, Cottbus (2006)
- Molina-Giraldo, N., Bayer, P., Blum, P.: Evaluating the influence of mechanical thermal dispersion on temperature plumes for closed geothermal systems using analytical solutions. Int. J. Heat Mass Trans. (in Vorbereitung)
- Molina-Giraldo, N., Bayer, P., Blum, P.: Analytical modeling study on the role of dispersivity in heat plumes. Int. J. Heat Mass Trans. (2010) (in Vorbereitung)
- Molson, J.W., Frind, E.O., Palmer, C.D.: Thermal energy storage in an unconfined aquifer, 2. Model development, validation and application. Water Resour. Res. **28**, 2857–2867 (1992)
- Mortensen, A.P., Hopmans, J.W., Mori, Y., Simunek, J.: Multifunctional heat pulse probe measurements of coupled vadose zone flow and transport. Adv. Water Resour. **29**, 250–267 (2006)
- Olsson, Å.H., Grathwohl, P.: Transverse dispersion of non-reactive tracers in porous media: a new nonlinear relationship to predict dispersion coefficients. J. Contam. Hydrol. **92**, 149–161 (2007)
- Pahud, D., Kohl, T., Mégel, T., Brenni, R.: Langzeiteffekte von Mehrfach-Erdwärmesonden, Publikation 220005 im Projekt 39690, 58 S. Bundesamt für Energie, Schweiz (2002)
- Pannike, S.: Ausbreitung von Kältefahnen oberflächennaher Erdwärmesonden in Lockergestein, 48 S. Diplomarbeit, Universität Bremen (2005)
- Pannike, S., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Scheps, V., Schulz, H.D.: Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten. Grundwasser **11**(1), 6–18 (2006)
- Rühaak, W., Rath, V., Wolf, A., Clauser, C.: 3D finite volume groundwater and heat transport modeling with non-orthogonal grids, using a coordinate transformation method. Adv. Water Resour. **31**, 513–524 (2008)
- Schippers, A., Reichling, J.: Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. Grundwasser **11**(1), 40–45 (2006)
- Schulze, S.: Mikrobieller Abbau und Redoxzonierung im Abstrom einer teerölkontaminierten Altablagerung, 101 S. Dissertation, Technische Universität Dresden (2004)
- VDI 4640-1: VDI 4640 Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrundes: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, 31 S. Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf (2000)
- VDI 4640-2: VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, 23 S. Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf (2001)
- Walker-Hertkorn, S., Kübert, M., Hähnlein, S., Bayer, P., Blum, P.: Rechtliche Situation bei der thermischen Grundwassernutzung in Deutschland. Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau **10**, 46–51 (2008)