

# Rechtlichen Rahmenbedingungen bei der thermischen Grundwasserbewirtschaftung

XXXXXXXXXXXX ■ Mit dem steigenden Einsatz von Erdwärmesonden wird auch die thermische Belastung des Untergrundes intensiviert. Im vorliegenden Artikel werden die Grundlagen zum Wärmetransport im Untergrund durch Erdwärmesonden vorgestellt. Die dabei entstehenden Temperaturfahnen (Kälte- bzw. Wärmefahnen) im Zusammenhang mit den durch die unterschiedlichen Leitfäden definierten Mindestabständen werden ausführlich diskutiert.

**D**ie thermische Grundwasser Nutzung erfreut sich bei den aktuell steigenden Energiepreisen und angesichts der Klimadiskussion zunehmender Beliebtheit. Grundwassergeothermie gilt als regenerative Ressource, die fast unerschöpflich und überall verfügbar ist. Dabei werden häufig Erdwärmesonden (EWS) eingesetzt. Diese Technologie stellt sowohl für private Anwender als auch für Unternehmen und Behörden eine ansprechende Alternative zu den konventionellen Klimatisierungstechniken dar. Hydrologen und Juristen stellt dies vor die Aufgabe einer zugleich ökologischen und rechtlichen Bewertung. Ziel muss es sein, ein Gleichgewicht zwischen der Nutzung des Grundwassers und seinem Schutz als primäre Trinkwasserressource in Deutschland herzustellen. Der vorliegende Artikel greift diesen Balanceakt als Thema auf und befasst sich mit den technisch-rechtlichen Grundlagen. Es werden die zu erwartenden räumlichen Ausdehnungen der thermischen Veränderungen von EWS im Unter-

grund erörtert und ihre Relevanz vor dem Hintergrund der vorherrschenden Rechtslage diskutiert.

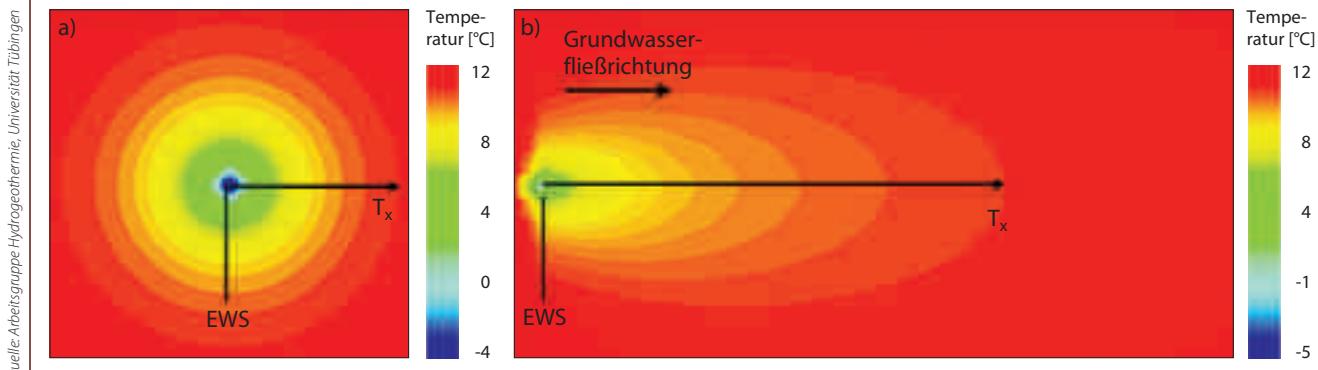
## Grundlagen

Bei der thermischen Nutzung des Grundwassers kommen verschiedene Anlagen zum Einsatz. Dabei können offene und geschlossene Systeme unterschieden werden. Zu den offenen Systemen gehören beispielsweise Wasser/Wasser- Anlagen und Aquifer- speicher, die auch unter dem Begriff Grundwasserbrunnen zusammengefasst werden. Hier zirkuliert das Grundwasser als Wärmeträgermedium zwischen den Brunnen und entzieht dem Untergrund die Wärme. Prominentes Beispiel für ein Aquiferspeicher ist die Wärmeversorgung des Reichstagsgebäudes. Bei den geschlossenen Systemen, dazu gehören unter anderem Erdwärmesonden, zirkuliert ein frostsicheres Wärmeträgermedium in einer (Doppel-) U- oder Koaxialsonde und transportiert die extrahierte Wärme aus dem Untergrund zur Wärmepumpe. Die thermische Nutzung des Grund-

wassers zur Klimatisierung von Gebäuden führt zu Temperaturanomalien im Untergrund. Diese Anomalien können sich ausbreiten und dabei geothermische Anlagen in der Nachbarschaft beeinflussen oder auch Auswirkungen auf die Ökosysteme des Untergrundes haben. Um die Interaktionen mit nachbarschaftlichen Anlagen einzämmen und negative Einflüsse auf den Untergrund verhindern zu können, ist es notwendig, die Ausmaße der Anomalien zu kennen. Im Folgenden werden die Grundlagen für eine analytische Abschätzung der Ausdehnungen von Einzelsonden bzw. Kleinanlagen im Einfamilienhausbereich vorgestellt.

## Wärmetransport und Kältefahnen

Eine thermisch veränderte Zone wird bei Wärmeentzug als Kältefahne, bei Wärmezufuhr als Wärmefahne bezeichnet. Da in Deutschland Erdwärmesonden bisher vor allem zur Beheizung von Gebäuden eingesetzt werden, wird im weiteren Verlauf vereinfachend nur der Fall des Wärmeentzugs betrachtet und von den dabei entstehen-



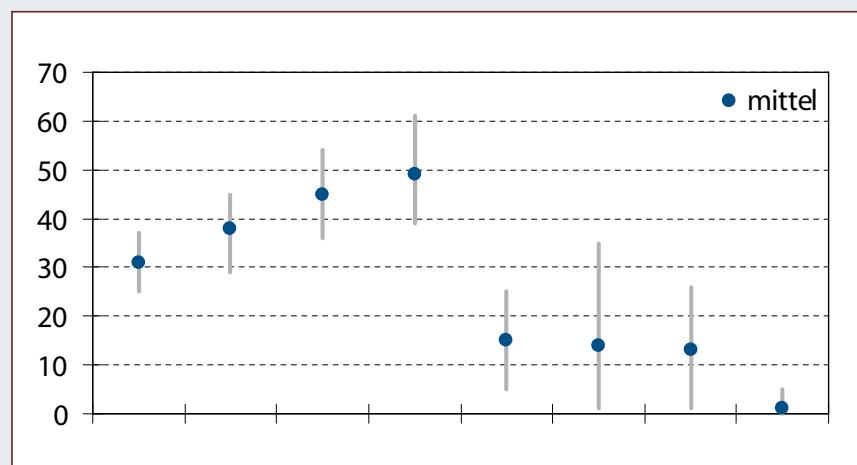
**Abb. 1+2** Exemplarisches numerisches 2D-Modell (Aufsicht) einer Kältefahne von einer Erdwärmesonde (EWS). In 1) bei konduktiven Bedingungen und 2) mit konvektiven Bedingungen. Dabei dehnt sich die Kältefahne parallel zum Grundwasserfluss aus. Die Skalen zeigen die Temperatur in Celsius [°C] an.

den Kältefahnen gesprochen. Die Ausführungen sind aber auf Wärmefahnen direkt übertragbar. Die Kältefahne beschreibt die thermisch veränderte Zone, in der ein Temperaturgradient zwischen der Sonde und einem Punkt ( $T_x$ ) besteht (Abb. 1).  $T_x$  kann festgelegt werden als die ursprüngliche ungestörte Untergrundtemperatur oder eine akzeptierte Temperaturabweichung. Die zwei wesentlichen zugrundeliegenden Wärmetransportprozesse sind Konduktion und Konvektion. Konduktion ist Wärmeleitung oder Wärmediffusion aufgrund eines Temperaturunterschiedes in einem Feststoff oder ruhenden Fluid. Konvektion ist der Wärmeaustausch, wenn die erwärmten Teilchen mit Hilfe eines Konvektionsstromes, d. h. dem Grundwasser, ihre Lage verändern und dabei die Wärme transportieren.

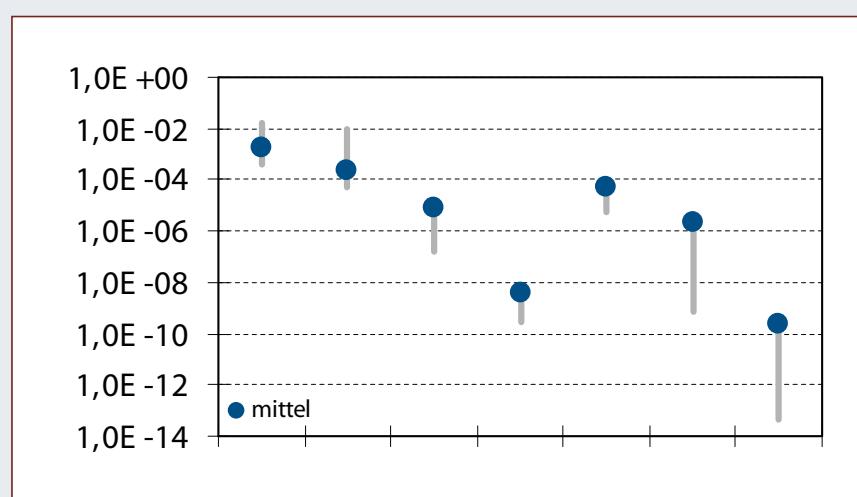
Wichtige geophysikalische Parameter für die thermische Grundwassernutzung sind die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Feststoff. Ebenso von Bedeutung für die Konvektion ist die natürliche Grundwasserfließgeschwindigkeit, die von der Porosität und dem hydraulischen Durchlässigkeitsparameter des Feststoffs abhängig ist. Als weiterer wichtiger Parameter ist die Entzugsleistung zu nennen. Die Entzugsleistung beschreibt die extrahierte Wärmemenge aus dem Untergrund und ist abhängig vom Wärmebedarf und den geologischen Verhältnissen. Bei rein konduktivem Wärmetransport breitet sich die Fahne radial um die Sonde aus. Bei dominant konvektiven Bedingungen dehnt sich die Fahne von der Wärmequelle (EWS) vor allem parallel zum Grundwasserfluss aus. Hierbei kommt es neben der longitudinalen auch zu einer transversalen Ausdehnung. Diese entsteht durch die Dispersion quer zur Grundwasserfließrichtung. Um die Kältefahnen modellieren zu können, müssen die oben genannten Parameter bekannt sein. Im nächsten Abschnitt werden diese Parameter genauer vorgestellt und ein Modell für die analytische Berechnung der Anomalien erörtert.

### Modell und Parameter

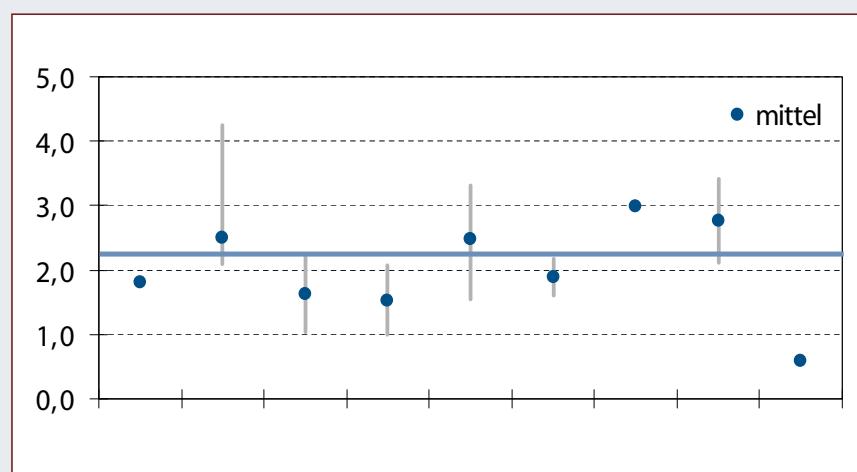
Für die Modellierung von Temperaturanomalien können hochauflösende



**Abb. 3** Verteilung der Matrixporositätswerte bei verschiedenen Gesteins- bzw. Sedimenttypen (vertikale Linien) mit Mittelwerten (roter Punkt) (berechnet mit Werten aus: [12, 13, 15,]) Kluftporositäten wurden nicht mit aufgenommen. Ein Porenraumanteil von 20 % entspricht einer Porosität von 0,2.



**Abb. 4** Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte bei verschiedenen Gesteins- bzw. Sedimenttypen (vertikale Linien) mit Mittelwerten (roter Punkt) (berechnet mit Werten aus: [7, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18])



**Abb. 5** Spannbreite von Wärmeleitfähigkeitswerte (berechnet mit Werten aus: [9, 10, 14, 16, 20]) verschiedener Gesteins- bzw. Sedimenttypen (vertikale Linien) mit Mittelwerten (roter Punkt). Zum Vergleich ist zusätzlich die Wärmeleitfähigkeit von Wasser aufgeführt. Die grüne Linie markiert die mittlere Wärmeleitfähigkeit von 2,2 W/(m K) der Locker- und Festgesteine.)

numerische Modelle eingesetzt werden. Dies sind beispielsweise MT3DMSHEAT [1], FEFLOW [2] oder SHEMAT (Simulator for Heat and Mass Transport) [3]. Für eine einfache prozess-basierte Abschätzung können aber auch rein analytische Lösungen herangezogen werden [4]. Letztere sollen hier den Schwerpunkt bilden. Es wird das Modell eines wassergesättigten porösen Mediums zugrunde gelegt. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- das Aquifermaterial ist homogen,
- die ungestörte Untergrundtemperatur ist an jedem Punkt gleich und
- die physikalischen Eigenschaften sind unabhängig von der Temperatur.

Des Weiteren werden dominant konduktive Bedingungen betrachtet. Da

die geologischen und hydrogeologischen Standortbedingungen sehr variieren, müssen am Einzelfall hydrogeologische/geophysikalische Parameter bestimmt werden.

- **Porosität:** In Abbildung 3 ist die Spannbreite der Porositätswerte (Matrixporosität) für verschiedene Gesteins- bzw. Sedimenttypen sowie der jeweilige Mittelwerte dargestellt. Im Gegensatz zu den Festgesteinen (Sandstein, Tonstein, Kalkstein, Kristallin) ist bei den Lockergesteinen (Kies, Sand, Schluff, Ton) ein klarer Trend zu erkennen: mit geringer werdender Korngröße steigt der Porenraumanteil. Die mittleren Porositätswerte für Lockergesteine liegen zwischen 30% und 50%. Für die Festgesteine außer Kristallingesteine (~ 1%)

liegt die mittlere Matrixporosität bei ca. 15%. In dieser Gruppe sind deutlich größere Spannbreiten zu erkennen als bei den Lockergesteinen. Besonders auffällig ist dies beim sehr variablen Tonstein: hier reichen die Werte von 0,5% bis 40%.

- **Hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert:** Einen weiteren wichtigen Parameter stellt der hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert dar (Abb. 4), der zur Berechnung der Grundwasserfließgeschwindigkeit (Tab. 1) benötigt wird. Dafür wird nach Darcy die Filtergeschwindigkeit des Grundwassers berechnet. Das Gesetz von Darcy lautet  $q = k_f \cdot i$ , wobei  $k_f$  der hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert mit der Einheit [m/s] und  $i$  ein hydraulischer Gradient ist, der das Gefälle der Grundwasseroberfläche in [m/m] beschreibt. Der  $k_f$ -Wert bezeichnet den Widerstand des Gesteins/Sediments, das vom Wasser durchflossen wird, mit ein. Die Spannbreite der Mittelwerte reicht ungefähr von  $1,7 \cdot 10^{-3}$  m/s (Kies) bis  $2,2 \cdot 10^{-10}$  m/s (Kristallin). Aus der Filtergeschwindigkeit und der effektiven Porosität kann die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers berechnet werden.
- **Wärmeleitfähigkeit:** In Abbildung 5 sind die spezifischen Wärmeleitfähigkeitswerte für gesättigte Locker- und Festgesteine dargestellt. Bei den Wärmeleitfähigkeitswerten besteht ein deutlich heterogenes Bild als bei den Porositäten. Die errechneten Mittelwerte reichen von  $1,5 \text{ W}/(\text{m K})$  bis  $3,0 \text{ W}/(\text{m K})$ . Die mittlere Wärmeleitfähigkeit aller Werte liegt bei  $2,2 \text{ W}/(\text{m K})$ . Innerhalb der Gruppe der Locker- und Festgesteine gibt es keine klaren Trends. Insbesondere die Werte von Sand zeigen deutliche Unterschiede auf und weisen damit auf die lokalen Besonderheiten der hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes hin. Dieser Umstand verdeutlicht, wie wichtig eine genaue Standortkenntnis für die Berechnung der Kältefahnen ist.

Neben den geophysikalischen Eigenschaften des Untergrundes beeinflusst auch der Wärmeentzug (die spezifische Entzugsleistung) die Kältefahne. In der Richtlinie VDI 4640, Blatt 1-3 sind neben grundlegenden Informationen zur

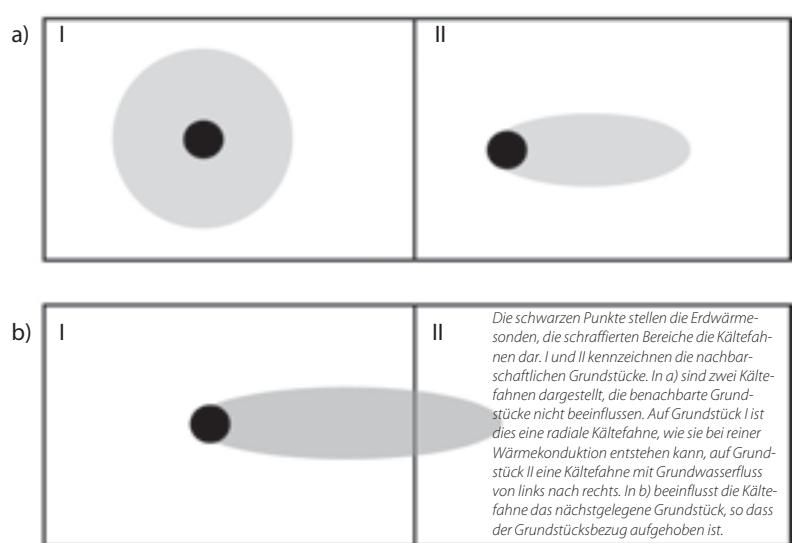


Abb. 6 Grundstücksbezug einer Kältefahne

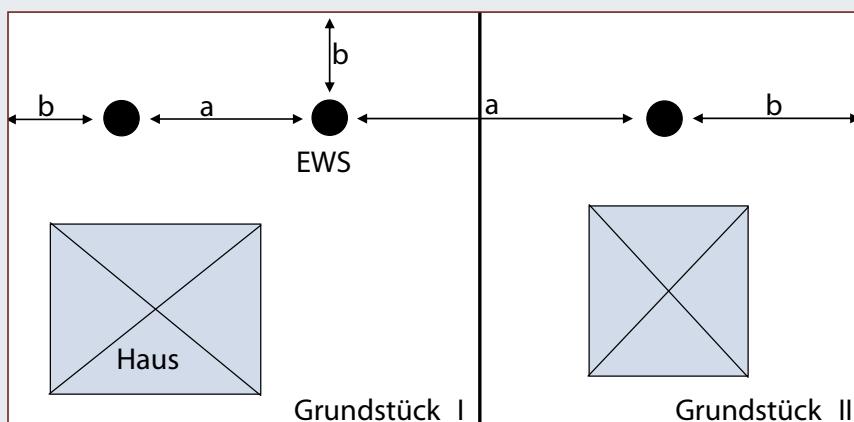


Abb. 7 Definition des Mindestabstands. Die schwarzen Punkte stellen die Erdwärmesonden (EWS) auf den zwei Grundstücken I und II dar.

a beschreibt den Abstand zur nächsten Sonde

b beschreibt den Abstand zwischen der EWS und der Grundstücksgrenze.



Quelle: Systemma

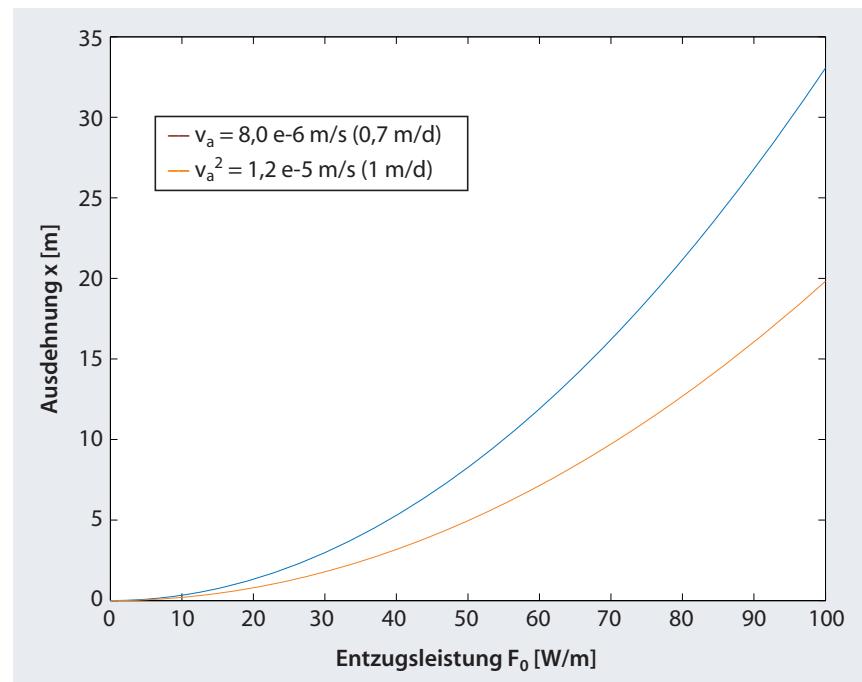
**Abb. 8** Grenzabstand. Gerade in städtischen Gebieten gestaltet sich der Einbau nicht immer einfach.

thermischen Grundwassernutzung für verschiedene Medien und Betriebszeiten die möglichen spezifischen Entzugsleistungen (VDI 4640, Blatt 2) zusammengestellt. Diese Richtlinie wird aktuell überarbeitet und beschreibt den aktuellen Stand der Technik.

### Rechtliche Situation

Für die Nutzung der Erdwärmesondenanlagen sind rechtlich vor allem das Wasserhaushaltsgesetz (WHG, [5]) und das Bundesberggesetz (BbergG, [6]) von Bedeutung. Sie beschreiben einen rechtlichen Rahmen, der durch die Leitfäden der Bundesländer [7] spezifiziert wird. In [8] werden die rechtlichen Rahmenbedingungen für die thermische Grundwassernutzung und insbesondere das WHG und das BBergG ausführlich betrachtet. Im vorliegenden Artikel wird daher der Schwerpunkt auf die für die Kältefahnen wichtigen Aspekte gelegt.

Das WHG ist für den Schutz der Gewässer zuständig und stellt die Vorsorgepflicht in den Mittelpunkt. Dies bedeutet für die Nutzung der Erdwärme, dass „schädliche Veränderungen“ (§ 3



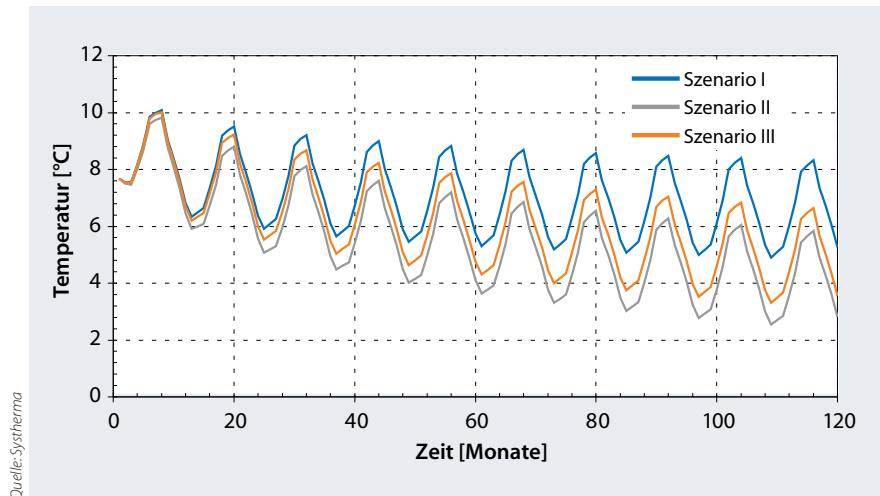
**Abb. 9** Maximale longitudinale Ausdehnung einer Kältefahne in einem Kiesaquifer bei zwei unterschiedlichen Abstandsgeschwindigkeiten.

Abs. 2 Nr. 2 WHG) der chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften vermieden werden müssen. Welche konkreten Anforderungen sich daraus an die Praxis ergeben, ist bisher noch nicht eindeutig geklärt und bundeseinheitlich geregelt. Die Temperatur des Grundwassers gehört zu den physikalischen Eigenschaften, deren Änderung folglich zu vermeiden ist. Bisher sind vor allem technische Temperaturgrenzwerte, die sich auf die Änderungen des Wärmeträgermediums in der Erdwärmesonde beziehen, in der Literatur zu finden [7+9]. Ökologisch orientierte Grenzwerte für künstliche Temperaturanomalien werden dagegen nur in seltenen Fällen vor-

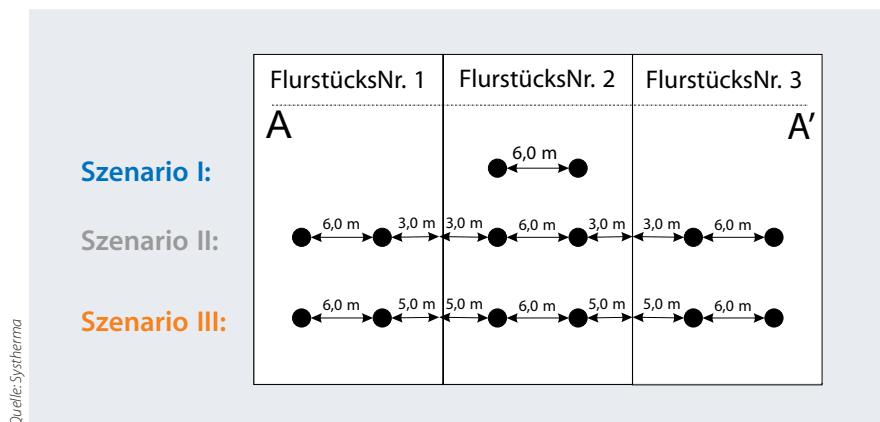
gegeben. Ein Beispiel ist Stuttgart. Dort wird die thermische Veränderung bis in einer „Toleranzentfernung von 50 m“ von der Sonde als „verträglich“ angesehen, wenn „der Untergrund bzw. das Grundwasser um 2 °C kälter (wärmer) als die mittlere Jahresschnittstemperatur ist“, [10] (die mittlere Jahresschnittstemperatur beschreibt in diesem Fall die natürliche Grundwassertemperatur). Für eine Definition der „schädlichen Veränderungen“ der chemischen Eigenschaften kann die Bundesbodenschutzverordnung (Wirkungspfad Boden – Grundwasser) herangezogen werden. Dort sind Prüfwerte für den Eintrag von Schadstoffen in das Grundwasser zu finden [11]. ►

1/4 Seite  
van Dornick

# Rahmenbedingungen, Entwicklungen, Perspektiven

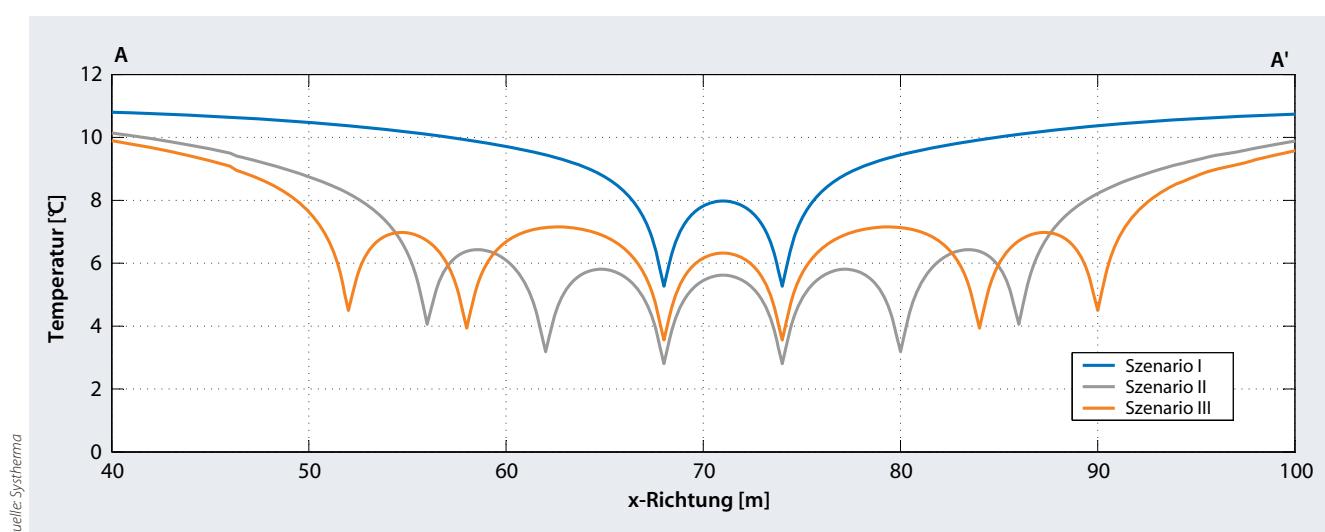


**Abb. 10** Abkühlungstrend der Kältefahnen über zehn Jahre bei drei unterschiedlichen Szenarien (Vgl. Abb. 6b, blau: Szenario 1, grau: Szenario 2, orange: Szenario 3). Gemessen wurde die Temperatur zwischen den beiden Sonden auf Flurstück 2.



**Abb. 11** Darstellung der drei Szenarien für die Modellierungen in Abb. 10 (Abkühlungstrend) und 12 (Ausdehnung der Kältefahnen). Die Erdwärmesonden sind durch schwarze Punkte markiert. Die Dimensionierung ist bei allen Sonden identisch: Heizleistung der Wärmepumpe: 10 kW, Laufzeit der Wärmepumpe: 1800 h/a, spezifische Entzugsleistung: 50 W/m, Sondenlänge jeweils: 75 m, Jahresarbeitszahl (COP): 4,0, mittlere ungestörte Untergrundstemperatur: 11 °C. Es werden dominant-konduktive Bedingungen angenommen.

Aus den bergrechtlichen Vorgaben hingegen lassen sich bereits heute konkrete Regelungen für die Mindestabstände zwischen Erdwärmesonden ableiten. Um die Bewilligungspflicht auszuschließen, dürfen Erdwärmesondenanlagen nicht über die Grundstücksgrenzen hinausragen, das Nachbargrundstück nicht thermisch oder stofflich beeinträchtigen, (Abb. 6) und es darf die gewonne Wärme nur grundstücksbezogen genutzt werden. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Abstände eingehalten werden müssen, um eine thermische Beeinflussung des Nachbargrundstücks und der dortigen Sonde zu vermeiden. Eine Antwort darauf ist nicht im BBergG, dafür aber in den länderspezifischen Leitfäden zu finden. Diese Leitfäden definieren verschiedene Mindestabstände, die zwischen den Erdwärmesonden und einem Bezugspunkt bestehen sollen (Abb. 7, Tab. 2). Als Bezugspunkte dienen weitere Erdwärmesondenanlagen oder die Grundstücksgrenze. In Berlin und im Saarland wird zusätzlich ein Mindestabstand von 3 Metern zu Abwasseranlagen, Fernwärmeleitungen oder Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen verlangt (LFB 2007, LFSL 2007). Eine Durchsicht der vierzehn Leitfäden ergibt insbesondere zwei Orientierungswerte. Zum einen soll ein Mindestabstand von 5 Metern zur nächsten Sonde und zum andern ein Abstand von 5 Metern zur Grundstücksgrenze bestehen. Folglich ist der empfohlene Mindestabstand zur Sonde auf dem nächsten Grundstück 10 Meter. Dabei wird außer in Niedersachsen nicht



**Abb. 12** Temperaturverteilung nach zehn Betriebsjahren für drei Szenarien, wie sie in Abbildung 7 beschrieben sind.

unterschieden, ob sich der vorgegebene Abstand zwischen zwei Sonden auf die Sonden einer Anlage oder den Sondenabstand zwischen unterschiedlichen Anlagen bezieht. Dieser Mindestabstand kann insbesondere in dicht bebauten Gebieten ein Problem darstellen (Abb. 8).

## Diskussion

Numerische und analytische Modellierungsergebnisse haben gezeigt, dass die Kältefahnen von Lockergesteinen innerhalb einer Heizperiode länger werden als die der Festgesteine. Über einen längeren Zeitraum betrachtet kühlen sich diese Anomalien jedoch weiter ab, die der Lockergesteine u. U. dagegen nicht. Grundsätzlich gilt das Prinzip der „Wärmenachlieferung“. Je mehr Wärme in gleicher Zeit nachgeliefert wird, desto kürzer wird die Ausdehnung der Temperaturanomalie. Besonderen Einfluss haben dabei die Abstandsgeschwindigkeit und Entzugsleistung. Am Beispiel eines Kiesaquifers zeigt Abbildung 9, wie sich unterschiedliche Abstandsgeschwindigkeiten und Entzugsleistungen auswirken. Berechnet wurde hier die Ausdehnung der Temperaturanomalie zwischen der Sonde und dem Punkt im Abstrom, an dem eine Temperaturdifferenz von 1 °C zur ungestörten Untergrundtemperatur besteht ( $T_x = -1 °C$ ). Die Ergebnisse zeigen, dass die Kältefahne mit zunehmender Entzugsleistung länger wird. Wird nur die Fließgeschwindigkeit verändert, verringert eine höhere Grundwasserfließgeschwindigkeit die Ausdehnung der Kältefahne. Nach der VDI 4640, Blatt 2 kann bei einem Kiesaquaifer mit schnellem Grundwasserfluss eine mögliche Entzugsleistung von 55 W/m - 65 W/m (bei Anlagen < 30 kW Heizleistung) angenommen werden. So wird bei einer Fließgeschwindigkeit von 1 m/d eine Ausdehnung bis ungefähr 8 Meter erreicht, bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,7 m/d kann diese sich auf bis zu 12 Meter ausdehnen.

Bei den Festgesteinen kommt es zu einer kontinuierlichen Abkühlung, wie in Abbildung 10 für einen Zeitraum über zehn Jahre dargestellt ist. Unterschieden werden hier drei Szenarien (Abb. 11) mit unterschiedlicher Sondenanzahl und verschiedenen Abständen zwischen den Sonden. Die Dimensionierung ►

Gestein	Grundwasserfließgeschwindigkeit nach Darcy $v_a$ [m/s]
Kies	$8,0 \times 10^{-6}$
Sand	$1,5 \times 10^{-6}$
Schluff	$1,0 \times 10^{-7}$
Ton	$1,0 \times 10^{-10}$
Sandstein	$5,9 \times 10^{-7}$
Kalkstein	$7,5 \times 10^{-8}$
Kristallin	$4,3 \times 10^{-8}$

**Tabelle 1** Grundwasserfließgeschwindigkeiten bei verschiedenen Gesteins- bzw. Sedimenttypen, berechnet nach Darcy unter der Annahme eines hydraulischen Gradiennten von  $1,0 \times 10^{-3}$  (berechnet mit Werten aus: [7, 9 Blatt 1, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]).

Bundesland	Mindestabstände zur nächsten Sonde / Grundstücksgrenze	Leitfaden
Baden-Württemberg	10 m / k. V.	LFBW 2005
Bayern *	6 m / 5 m	LFBAY 2003
Berlin *	5 m bzw. 6 m <sup>1</sup> / 5 m	LFB 2007
Brandenburg	5 m bzw. 6 m <sup>1</sup> / k. V.	LGRBBB 2008
Hessen *	k. V. / 5 m	LFH 2006
Mecklenburg-Vorpommern	5 m bzw. 6 m <sup>1</sup> / 5 m	LFMVP 2006
Niedersachsen *	5 m (einer Anlage), 10 m (nächste Anlage)/k. V.	LFN 2006
Nordrhein-Westfalen	k. V. / k. V.	LFNRW 2004
Rheinland-Pfalz *	10 m / 3 m	LFRP 2006
Saarland *	3 m / k. V.	LFSL 2007
Sachsen *	5 m bzw. 6 m <sup>1</sup> / k. V.	LFS 2007
Sachsen-Anhalt	k. V. / k. V.	LFSA 2005
Schleswig-Holstein	5 m bzw. 6 m <sup>1</sup> / k. V.	LFSH 2006
Thüringen *	5 m bzw. 6 m <sup>1</sup> / 5 m	LFT 2007

\* gültig für Anlagen bis 30 kW Heizleistung • 1 Leitfaden zitiert VDI 4640 Blatt 2 • k. V. = keine Vorgaben

**Tabelle 2** In den Leitfaden der Bundesländer empfohlene Mindestabstände zwischen Erdwärmesonden und einem Bezugspunkt.

**90 x 60 mm**  
**Tewag**

ist für alle Sonden gleich gewählt. Die Modellierung wurde mit SHEMAT durchgeführt. In Abbildung 12 sind die Ausdehnungen der Kältefahnen für die drei Szenarien nach zehn Jahren dargestellt. Wie zu sehen ist, kommt es bei mehreren Sonden zu einer stärkeren Abkühlung. Folglich wird auch die ungestörte Untergrundtemperatur erst in größerem Abstand erreicht. Gerade in stark bebauten Gebieten stellt dies ein Problem dar. Um für die Zukunft die Belastung des Untergrundes regulieren und nachbarschaftliche Konflikte vermeiden zu können, ist es notwendig die thermische und nachhaltige Grundwassernutzung bundeseinheitlich zu gestalten und rechtlich zu verankern.

## Danksagung

Dank für die finanzielle Unterstützung von S. Hähnlein gilt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU, Promotionsstipendienprogramm). Weiterer Dank der Arbeitsgruppe Hydrogeothermie in Tübingen geht an die Landesstiftung Baden-Württemberg (Elibeförderung für Postdoktoranden).

## Literatur

- [1] Bayer, P., Molina, N. G., Méndez, H., Rasouli, P., Zheng, C., Blum, P.: *Heat transport modeling using MODFLOW/MT3DMS. MODFLOW and More: Ground Water and Public Policy*, Golden, Colorado (2008)
- [2] Diersch, H.-J. G.: *FEFLOW 5.3 – Finite Elemente Subsurface Flow & Transport Simulation System – User's Manual. 5.3, WASY Software*. (2006)
- [3] Clauser, C., Bartels, J.: *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers: SHEMAT and Processing SHEMAT*. 332 S.; Springer, Berlin-Heidelberg (2003)
- [4] Hähnlein, S., Molina, N., Blum, P., Bayer, P., Grathwohl, P.: *Beschreibung von Kältefahnen bei Erdwärmesonden zur Ableitung geeigneter rechtlicher Rahmenvorgaben. Grundwasser. (in Vorbereitung)*
- [5] WHG: *Wasserhaushaltsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. August 2002 (BGBl. I S. 3245), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 666) (1957)*
- [6] BBergG: *Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2833) (1980)*
- [7] 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)
- LFBAY: *Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern*. 19 S.; Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, 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)
- LFMVP: *Leitfaden Erdwärmesonden in Mecklenburg-Vorpommern*. 24 S.; Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2006)
- LFN: *Leitfaden Erdwärmennutzung in Niedersachsen*. 20 S.; Niedersächsisches Umweltministerium (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 Erdwärmepumpen*. Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland (Entwurf 2007) (2007)
- LFT: *Nutzung oberflächennaher Geothermie – Vorläufige Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung angezeigter Vorhaben*. Thüringer Landesverwaltungsamt (2007)
- LGRB: *Hydrogeologische Einheiten*. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. (2007)
- LGRBBB: *Pers. Kom. des Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg* (2008)
- [8] Walker-Hertkorn, S., Hähnlein, S., Kübert, M., Blum, P., Bayer, P.: *Rechtliche Situation bei der thermischen Grundwassernutzung in Deutschland; bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau* (2008)
- [9] VDI 4640: *VDI 4640 Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrundes: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. 31 S. Und Blatt 2: *Thermische Nutzung des Untergrundes: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*, 23 S.; Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf (2000)
- [10] AfU: *Nutzung der Geothermie in Stuttgart*. Schriftenreihe des Amtes f. Umweltschutz 1/2005, 89 S.; (2006)
- [11] BBodSchV: *Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554)*, geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758) (1999)
- [12] Domenico, P.A., Schwartz, F.W.: *Physical and Chemical Hydrogeology*. 824 S.; John Wiley & Sons, New York (1990)
- [13] Freeze, R.A., Cherry, J.A.: *Groundwater*. 604 S.; Prentice-Hall, New Jersey (1979)
- [14] Häfner, F., Sames, D., Voigt, H.D.: *Wärme- und Stofftransport: Mathematische Methoden*. 626 S.; Springer, Berlin Heidelberg (1992)
- [15] Balke, K.D., Beims, U., Heers, F.W., Hölting, B., Homrighausen, R., Matthess, G.: *Grundwasserserschließung, Grundlagen – Brunnenbau – Grundwasserschutz – Wasserrecht*. 740 S.; Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart (2000)
- [16] De Marsily, G.: *Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrogeology for Engineers*. 440 S.; Academic Press, London (1986)
- [17] Hölting, B.: *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. 441 S.; Enke Verlag, Stuttgart (1992)
- [18] Schulze, S.: *Mikrobieller Abbau und Redoxzonierung im Abstrom einer teerölkontaminierten Altab Lagerung*. Technische Universität Dresden. Dissertation. (2004)
- [19] Pannike, S., Kölling, M., Pantelis, B., Reichling, J., Scheps, V., Schulz, H.D.: *Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten*. Grundwasser 11, 6-18 (2006)

## Autoren:

Dipl.-Geol. Stefanie Hähnlein, Dr. P. Bayer, Dr. P. Blum  
Eberhard Karls University Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften  
Sigwartstr. 10  
72076 Tübingen  
Tel.: 07071 29-731-85 (-78) (-70)  
Fax: 07071-5059  
E-Mail: stefanie.haehnlein@ifg.uni-tuebingen.de, peter.bayer@uni-tuebingen.de, philipp.blum@uni-tuebingen.de  
Internet: www.ifg.uni-tuebingen.de

Dr. M. Kübert, Dr. Simone Walker-Hertkorn  
Systherma, Planungsbüro für Erdwärmesysteme GmbH  
Am Haag 12  
72181 Starzach-Felldorf  
Tel.: 07483 92899-0  
Fax: 07483 92899-25  
E-Mail: markus.kuebert@systherma.de  
simone.walker-hertkorn@systherma.de  
Internet: www.systherma.de