

Beeinflussung von Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen

Helmut KOBUS und Hans MEHLHORN*)

Schlagwörter: Hydrogeologie, Wärmepumpen, Grundwasserbeeinflussung, Umweltauswirkungen

Grundwasserbetriebene Wärmepumpen sind energiewirtschaftlich zwar wünschenswert, doch steht ihrem verstärkten Einsatz derzeit noch entgegen, daß über die Auswirkungen solcher Anlagen auf das Grundwasser bisher nur sehr wenig bekannt ist. Im vorliegenden Beitrag werden zunächst die Grundlagen der Wärme- und Schadstoffausbreitung in Grundwasserleitern behandelt und die Transportmechanismen Konvektion, Dispersion und Wärmeleitung erläutert. Für einfache Strömungsfälle werden quasi-stationäre Lösungen zur Abschätzung der langfristig zu erwartenden Temperaturanomalie vorgestellt. Die Bedeutung von dispersiven Vermischungseffekten sowie von Schichtungseffekten zufolge temperaturbedingter Dichteunterschiede wird ebenfalls diskutiert. Damit liefert der Aufsatz einen ersten Beitrag zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Wärmepumpen.

Groundwater heat pumps are desirable from the point of view of energy demand, but their increased application is presently hampered by the fact that very little is known so far about the effects of such installations upon the groundwater. The present paper first treats the fundamentals of the spreading of heat and matter in porous media and describes the transport mechanisms of convection, dispersion and heat conduction. For simple flow configurations, quasi-steady solutions are given for estimating the temperature anomaly to be expected in the long run. The significance of dispersive mixing and of buoyancy effects due to the temperature differences is also discussed. The paper thus provides a first contribution towards quantifying the environmental effects of heat pumps.

*) Prof. Dr. Helmut Kobus und Dipl.-Ing. Hans Mehlhorn, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 7000 Stuttgart 80.

1. Einführung

Durch die angespannte Lage auf dem Energiemarkt ist die Notwendigkeit, Energie zu sparen und neue Energiequellen zu erschließen, mehr und mehr deutlich geworden. Wärmepumpen können hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten, und es wird vielerorts angestrebt, den Einsatz von Wärmepumpen zu verstärken. Einer energiewirtschaftlich sicherlich wünschenswerten Ausweitung des Einsatzes von Wärmepumpen steht entgegen, daß über die Auswirkungen solcher Anlagen auf die Umwelt sehr wenig bekannt ist. Dies trifft insbesondere auch auf grundwasserbetriebene Wärmepumpen zu, denen der vorliegende Beitrag gewidmet ist. Bei dieser Betriebsform wird Wasser dem Grundwasserleiter entnommen, im Wärmetauscher abgekühlt und danach wieder in das Grundwasser zurückgeleitet (*Bild 1*).

Zur Beurteilung der Auswirkungen solcher Wärmepumpen auf das Grundwasser sind folgende Fragen zu beantworten:

- Wie rasch breiten sich Temperaturänderungen im Grundwasser aus, wenn eine Wärmepumpe in Betrieb genommen wird?
- Wie weit sind im Endzustand Temperaturveränderungen im Grundwasser infolge des Betriebs von Wärmepumpen zu erwarten?

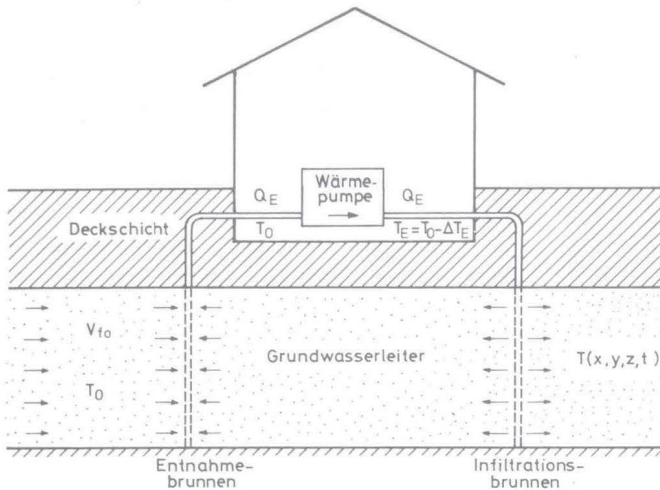


Bild 1. Funktionsprinzip einer mit Grundwasser betriebenen Wärmepumpe.

- Im Falle einer Betriebsstörung können unter Umständen Betriebsmittel der Wärmepumpe in das Grundwasser eindringen. Wie rasch und wie weit breiten sich diese Chemikalien im Grundwasser aus?
- In welchem Abstand müssen Entnahme- und Infiltrationsbrunnen angeordnet sein, um eine direkte Rückströmung des abgekühlten Wassers vom Infiltrationsbrunnen zum Entnahmehrinnen zu vermeiden? Eine solche Rückströmung ist gleichbedeutend mit einer erheblichen Verminderung des Wirkungsgrades der Wärmepumpe.
- Inwieweit wird durch eine Abkühlung des Grundwassers das chemische und biologische Gleichgewicht gestört oder wie weit können diese Temperaturveränderungen als umweltverträglich angesehen werden?

Voraussetzung für die Beantwortung dieser Fragen ist eine ausreichende Kenntnis des Strömungs- und Temperaturfeldes im Grundwasserleiter. Das Strömungsfeld wird durch die geologischen Gegebenheiten des Grundwasserleiters (Porosität, Durchlässigkeit, Speicherkapazität, Mächtigkeit), die hydrologischen Randbedingungen (Grundwasserneubildung, Oberflächengewässer etc.), die Einleitungs- bzw. Entnahmeraten sowie das Temperaturfeld (Abhängigkeit der Dichte und Viskosität von der Temperatur) bestimmt. Bei bekannter Temperaturverteilung kann das Strömungsfeld mit Hilfe von konventionellen Methoden der Grundwasserhydraulik für gegebene oder zu prognostizierende Zustände genügend genau bestimmt werden. Die Strömungsverhältnisse im Bereich einer Wärmepumpe sind in einem Beitrag zum Status-Seminar „Wärmepumpen und Gewässerschutz“ [12] eingehend beschrieben.

Die Wärme- und Schadstoffausbreitung in Grundwasserleitern wird durch folgende Mechanismen maßgeblich beeinflusst:

1. Ausbreitung durch Konvektion. Diese wird durch das Strömungsfeld bestimmt.
2. Vermischung durch korngerüstbedingte Dispersion.
3. Wärmeleitung und Wechselwirkung mit dem Korngerüst.
4. Wärmeaustausch mit der Atmosphäre.

Die quantitative Erfassung von Ausbreitungsvorgängen im Grundwasser setzt ein hinreichendes Verständnis dieser Mechanismen voraus. Berechnungsansätze für die Prognostizierung von Kaltwassereinleitungen müssen alle maßgeblichen Einflüsse quantifizierbar berücksichtigen, wobei jedoch so weit wie zulässig Vereinfachungen getroffen werden müssen, um zu praktisch anwendbaren Ingenieurösungen zu kommen. Im folgenden sollen zunächst diese Ausbreitungsmechanismen diskutiert, Näherungsverfahren zur Berechnung des Temperaturfeldes vorgestellt und die Beeinflussung des Strömungsfeldes durch Temperaturdifferenzen angesprochen werden.

2. Schadstoffausbreitung bei Einleitungen ohne Temperaturunterschied

Die Ausbreitung des eingeleiteten Wassers sowie darin möglicherweise enthaltener Schadstoffe erfolgt primär durch *konvektiven Transport* mit der Abstandsgeschwindigkeit v_a . Diese ergibt sich aus der Filtergeschwindigkeit v_f und der effektiven Porosität n_e zu

$$v_a = v_f / n_e$$

Solange die Temperaturunterschiede der Einleitung vernachlässigbar klein bleiben, ist das Geschwindigkeitsfeld wohlbekannt, und es läßt sich sofort angeben, wohin ein möglicherweise durch den Infiltrationsbrunnen in den Grundwasserleiter eingedrungener Schadstoff gelangt

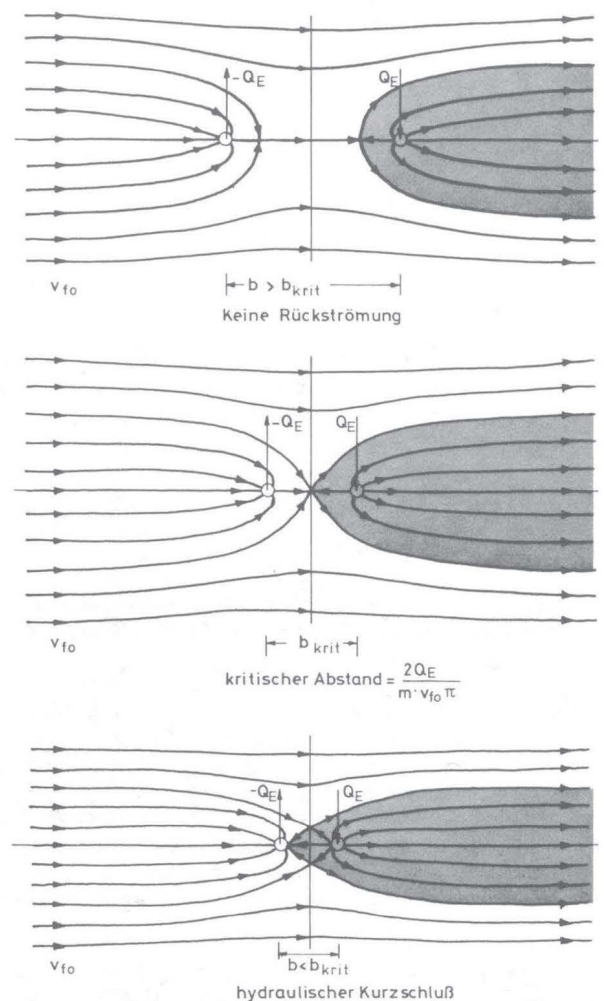
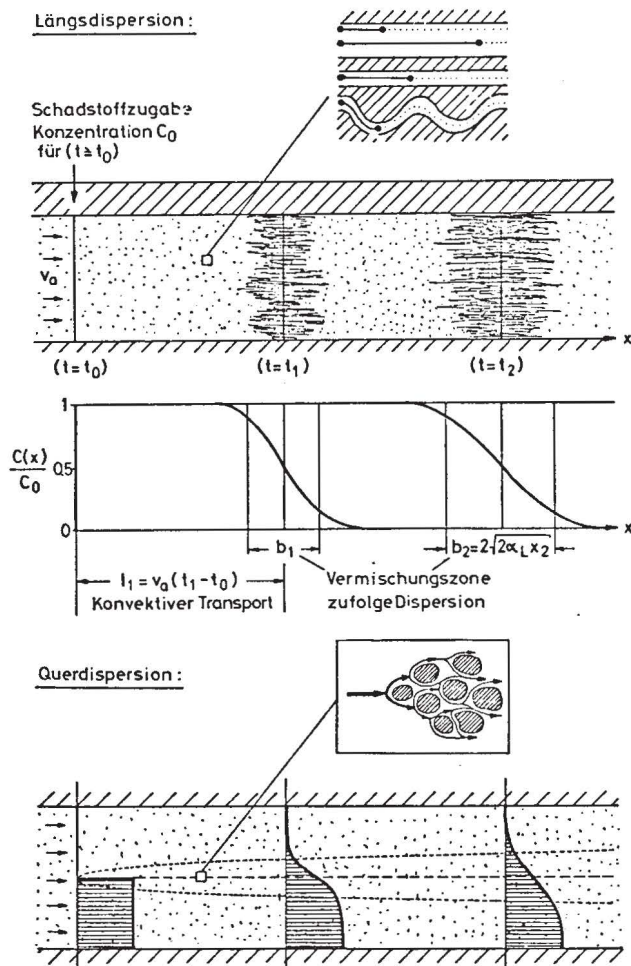


Bild 2. Entnahme- und Infiltrationsbrunnen in Grundströmung.

(Bild 2). Der Schadstoff wird mit der Grundströmung stromab transportiert (Bild 2a). Wenn infolge eines zu kleinen Abstandes zwischen Entnahme- und Infiltrationsbrunnen „Kurzschlußströmung“ entsteht, dann gelangt ein Teil der Einleitung zurück in den Entnahmebrunnen (Bild 2c).

Die Frage, ob eine Kurzschlußströmung auftritt, läßt sich anhand der Kenntnis des Strömungsfeldes direkt beantworten. Auch der prozentuale Anteil der Kurzschlußströmung kann berechnet werden.

Der konvektive Transport ist mit einer starken Vermischung verbunden. Die Ursache dieser Vermischung ist die hydrodynamische Dispersion, welche aus der kombinierten Wirkung von molekularer Diffusion und korngerüstbedingter Dispersion entsteht. Bild 3 zeigt am Beispiel der Ausbreitung einer Schadstofffront die Wirkung der Dispersion sowohl in Strömungsrichtung als auch quer dazu: die hydrodynamische Dispersion bewirkt einen Abbau von Konzentrationsgradienten mit der Zeit.



Charakteristische Zahlenwerte der Längsdispersivität α_L [9]:

Material	α_L
Labor: gleichförmiger Sand $d_{50} = 0,6 \text{ mm}$	$\alpha_L \approx 0,6 \text{ cm}$
Natur: Sand	$1 \text{ cm} < \alpha_L < 50 \text{ cm}$
Kies	$20 \text{ cm} < \alpha_L < 100 \text{ cm}$
Grobkies	$1 \text{ m} < \alpha_L < 20 \text{ m}$

Bild 3. Hydrodynamische Dispersion.

Dies bedeutet unter anderem, daß bei einer Schadstoffausbreitung die erste spürbare Konzentrationserhöhung dem Mittelwert der Front (wie er sich aus der Berechnung des rein konvektiven Transports ergibt) stets vorausseilt. Für die Beurteilung möglicher Schadensfälle kann deshalb die Berücksichtigung des dispersiven Transports wesentlich sein.

Zur quantitativen Erfassung der hydrodynamischen Dispersion wird diese in Analogie zur molekularen Diffusion durch einen Dispersionskoeffizienten D beschrieben, welcher im allgemeinen Fall ein vom Geschwindigkeitsvektor und der Porenmatrix abhängiger Tensor ist [1; 2].

In homogenen und isotropen Medien kann der Dispersionskoeffizient durch zwei skalare Größen ausgedrückt werden:

D_L [m²/s] = Längsdispersionskoeffizient (in Strömungsrichtung)

D_T [m²/s] = Querdispersionskoeffizient (senkrecht zur Strömungsrichtung)

Für praktische Zwecke lassen sich die Dispersionskoeffizienten für einen weiten Geschwindigkeitsbereich unter Vernachlässigung der molekularen Diffusion näherungsweise beschreiben mit Hilfe der „Dispersivität“ α :

$$D_L = \alpha_L \cdot v_a; D_T = \alpha_T v_a$$

Die Dispersivitäten α_L und α_T haben die Dimension einer Länge und können als Bodenkenngrößen betrachtet werden. Die Dispersivität ist um so größer, je grobkörniger, ungleichförmiger und inhomogener der Grundwasserleiter ist. In der Natur ermittelte Zahlenwerte liegen um 2 bis 3 Zehnerpotenzen höher als Laborwerte, wie Bild 3 deutlich macht. Die entsprechenden Werte für α_T sind in der Regel um eine Zehnerpotenz kleiner. Die Bestimmung der Dispersivitäten für natürliche Grundwasserleiter bereitet meist große Schwierigkeiten, da α_L und α_T nicht direkt meßbare Größen sind.

Ist die Dispersivität eines Grundwasserleiters bekannt, dann läßt sich die horizontal-ebene Ausbreitung eines konservativen perseveranten Schadstoffes für vorgegebene Rand- und Anfangsbedingungen numerisch berechnen.

3. Wärmeausbreitung in Porengrundwasserleitern

Die Ausbreitung von Wärme im Grundwasser erfolgt analog zum Schadstofftransport durch Konvektion, Dispersion und durch Wärmeleitung. Als wesentliche Unterschiede zwischen Wärme- und Schadstofftransport sind zu nennen:

1. Temperaturveränderungen bewirken Änderungen der Fluideigenschaften. So können zum einen durch Dichteänderungen bedingte Auftriebseffekte das Strömungsfeld drastisch verändern, wie in Kap. 5 gezeigt wird. Zum anderen ist eine Viskositätsänderung gleichbedeutend mit einer Änderung der Durchlässigkeit k_f , wie aus der Beziehung zwischen der Durchlässigkeit k_f [m/s] und der Permeabilität k_o [m²] ersichtlich wird:

$$k_f = \frac{Q \cdot g}{\eta} \cdot k_o$$

Temperaturänderungen von nur wenigen Grad können die Durchlässigkeit beträchtlich verändern [10].

2. Zur dispersiven Vermischung liefert bei der Wärmeausbreitung die Wärmeleitung einen signifikanten Beitrag zusätzlich zur korngerüstbedingten Dispersion. Sie muß daher mit berücksichtigt werden.
3. Die konvektive Transportgeschwindigkeit v_T für Wärme ist wesentlich kleiner als die für den Schadstofftransport v_a :

$$v_T = \frac{n_e \rho_w c_w}{\rho_b \cdot c_b} \cdot v_a = \frac{\rho_w c_w}{\rho_b c_b} \cdot v_f$$

Dies hat seine Ursache im Wärmeaustausch zwischen Grundwasser und Korngerüst. Eine Veränderung der Grundwassertemperatur zieht eine entsprechende Aufwärmung oder Abkühlung des Korngerüsts nach sich, was ein entsprechend langsames Fortschreiten einer Wärmefront im Untergrund bewirkt. Bei Laborversuchen mit einem gleichförmigen Sand (mittlerer Korndurchmesser 0,6 mm) ergab sich das Geschwindigkeitsverhältnis zu $(v_T/v_a = 0,53)$ [10].

Aufgrund dieser Unterschiede kann demnach aus der Wärmeausbreitung nicht direkt auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schadstoffen geschlossen werden. Dies ist insbesondere für die Beurteilung der Gefährdung bei Unfällen bedeutsam: der Schadstoff wird sich stets rascher ausbreiten als die Temperaturveränderung.

Neben der vorwiegend horizontal ausgerichteten Wärmeausbreitung durch Konvektion, Dispersion und Wärmeleitung im Grundwasserleiter findet auch in der vertikalen Richtung ein Wärmetransport statt, welcher primär geprägt wird durch den Wärmeaustausch W_1 zwischen dem Grundwasser und der Atmosphäre. Dieses läßt sich im stationären Fall durch folgende Beziehung näherungsweise beschreiben (s. Bild 4):

$$W_1 = A \cdot \lambda_1 \cdot \frac{(T_1 - T_L)}{m_1}$$

Hierin ist A die betrachtete Oberfläche, m_1 der Flurabstand und λ_1 das Wärmeleitvermögen der ungesättigten Bodenzone zwischen Grundwasseroberfläche und Erdoberfläche. Dieses ist sowohl von der Bodenart als auch vom Feuchtigkeitsgehalt abhängig und kann im allgemeinen nur grob abgeschätzt werden. T_1 ist die Grundwassertemperatur in Höhe der Grundwasseroberfläche und T_L die mittlere Lufttemperatur.

Die oberflächennahe Grundwassertemperatur T_1 ist im Falle einer vertikal durchmischten Strömung gleich dem Querschnittsmittelwert T_m . Treten jedoch temperaturbedingte Schichtungseffekte auf, dann ist für eine stabile Schichtung T_1 stets größer als T_m , so daß die Wärmezufuhr zum Grundwasser verringert wird.

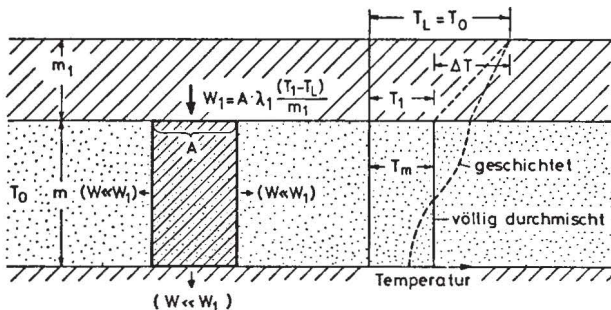
Um Aussagen über die Veränderung des Temperaturfeldes durch eine Wärmepumpe treffen zu können, ist zudem die Kenntnis der Grundwassertemperatur vor Inbetriebnahme der Wärmepumpe erforderlich. Die natürliche Grundwassertemperatur wird bestimmt durch

- die thermischen Eigenschaften des Wassers und des Korngerüsts;
- den Flurabstand;
- den geothermischen Wärmestrom (cirka 0,06 W/m²);
- die Lufttemperatur an der Bodenoberfläche.

Naturmessungen zeigen, daß die Grundwassertemperaturen nur im oberflächennahen Bereich bis zu Tiefen von rd. 10 bis 30 m von den jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur beeinflusst werden, während in größeren Tiefen eine konstant bleibende Grundwassertemperatur beobachtet wird.

Anthropogene Einflüsse haben in dicht besiedelten Gebieten zur beträchtlichen regionalen Erhöhung der Grundwassertemperaturen geführt. Dies hat seine Ursache zum einen in der Abminderung der natürlichen Wärmeabgabe durch Bebauung und zum anderen in anthropogener Wärmezufuhr durch Kühlwassereinleitungen, Abwasser- und Fernheizleitungen, Gebäude etc. Bild 5 zeigt am Beispiel der Stadt Karlsruhe die regionalen Auswirkungen solcher Einflüsse auf die Grundwassertemperaturen [13].

Der Wärmeentzug durch den Betrieb von Wärmepumpen hat eine Absenkung der Grundwassertemperatur zur Folge. Im Licht der oben genannten Beobachtungen erscheint es global gesehen möglich, dem Boden Wärme in der gleichen Größenordnung zu entziehen, wie ihm anthropogen zugeführt wird. Auch der natürliche geothermische Wärmestrom kann ohne drastische Temperatur-



Wärmebilanz für ein ortsfestes Bodenvolumen:

$$A \cdot m \cdot \rho_b \cdot c_b \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = A \cdot \lambda_1 \cdot \frac{T_1 - T_0}{m_1}$$

Wärmebilanz für ein mitbewegtes Wasserpaket:

$$A \cdot m \cdot n_e \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = A \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\Delta T}{m_1}$$

$$\Delta T = \Delta T_E \cdot e^{-\left(\frac{\lambda_1}{n_e \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot m_1}\right) t}$$

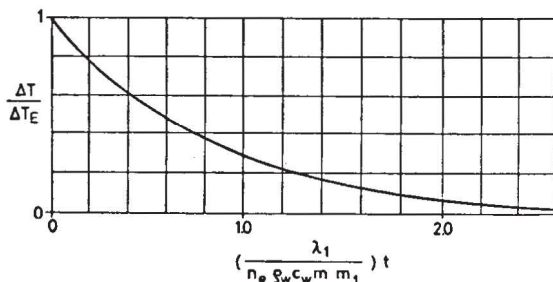
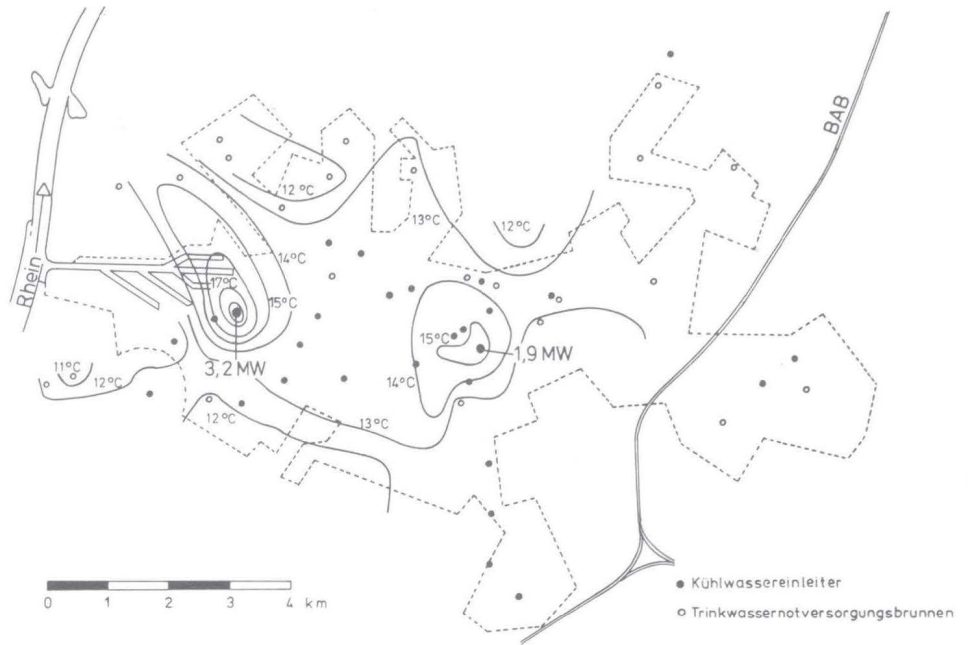


Bild 4. Temperaturfeld bei Kaltwassereinleitungen (Quasistationäre Näherungsrechnung).

Bild 5. Anthropogen bedingte Erhöhung der Grundwassertemperaturen im Bereich der Stadt Karlsruhe (Isothermenplan vom 6. 10. 1976) [13].



veränderungen genutzt werden; allerdings ist sein Beitrag mit rd. 65 kW/km² vergleichsweise gering.

Derartige regionale Bilanzbetrachtungen können allerdings nur Anhaltswerte für die insgesamt nutzbare Wärmeenergie eines Grundwasserleiters geben. Entscheidend für die ökologischen Auswirkungen ist vor allem die örtliche Verteilung (Maximal- und Minimalwerte, Gradienten) der Temperaturen und Geschwindigkeiten, welche unmittelbar von der Anordnung und Beaufschlagung der einzelnen Einleitungen bestimmt wird.

4. Näherungsrechnung für Temperaturanomalien

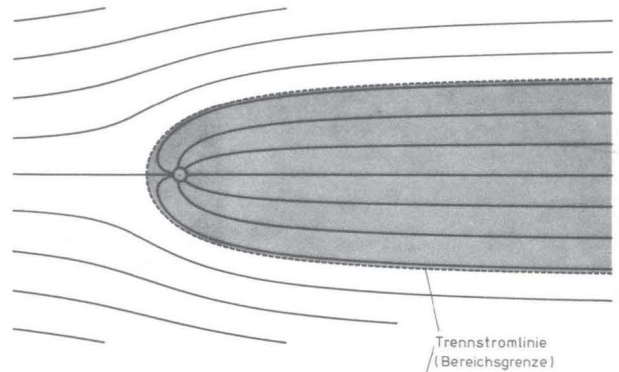
Unter der Voraussetzung, daß der Grundwasserleiter vertikal gut durchmischt ist (d.h., daß Schichtungseffekte vernachlässigt werden), und daß sich die Grundwasserströmung und die Einleitungsbedingungen zeitlich nicht ändern, läßt sich die durch eine Kaltwassereinleitung verursachte Temperaturanomalie für quasistationäre Zustände berechnen. In Übereinstimmung mit Naturbeobachtungen wird eine ungestörte Grundwassertemperatur T_0 zugrunde gelegt, die dem zeitlichen Mittelwert entspricht, und es wird zudem vorausgesetzt, daß die zeitlichen Schwankungen der Lufttemperaturen keinen merklichen Einfluß auf die Grundwassertemperaturen haben. Dies bedeutet, daß im ungestörten Zustand überall dieselbe Bezugstemperatur vorliegt und Wärmeströme nur zufolge der einleitungsbedingten Temperaturunterschiede auftreten.

In diesem Fall stellt sich im Grundwasserleiter eine Temperaturanomalie ein, die dadurch gekennzeichnet ist, daß der dem Grundwasser durch die Wärmepumpe entzogene Wärmestrom durch entsprechend erhöhte Wärmezufuhr aus der Atmosphäre im abgekühlten Bereich wieder zugeführt werden muß. Hierbei ist der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre so dominierend, daß der laterale Wärmeaustausch im Grundwasserleiter vernachlässigt werden kann.

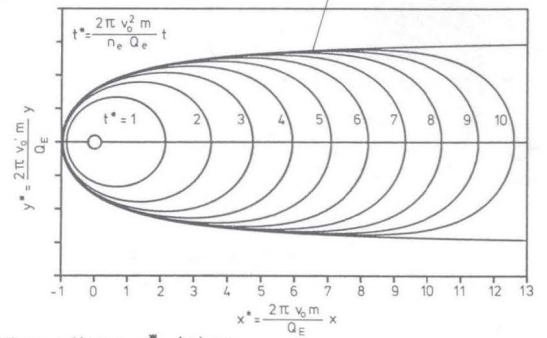
Unter diesen Voraussetzungen läßt sich sowohl für ein

ortsfestes Kontrollvolumen als auch für jedes dem Grundwasserleiter zugeführte Kaltwasserpaket aus einer Wärmebilanz errechnen, wie die Einleitungsdimension

a) Stromlinienbild



b) Linien gleicher Verweilzeiten



c) Verweilzeiten entlang x*-Achse

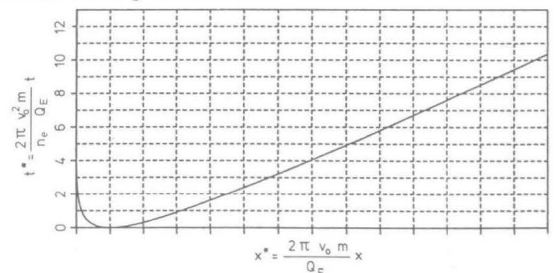


Bild 6. Strömungsfeld und Verweilzeiten für einen Infiltrationsbrunnen in Grundströmung.

ΔT_E aufgrund der Wärmezufuhr aus der Atmosphäre mit der Zeit abgebaut wird. Es ergibt sich eine exponentielle Abnahme mit der Zeit, wie dies in *Bild 4* dargestellt ist. Wenn demnach für ein Kaltwasserpaket die Verweildauer t im Grundwasser bekannt ist, dann liefert diese Beziehung die zugehörige Temperaturdifferenz ΔT .

Andererseits kann in einer stationären Strömung für jeden Punkt des Strömungsfeldes die mittlere Verweilzeit angegeben werden, die vom Zeitpunkt der Einleitung bis zum Erreichen des betrachteten Punktes verstrichen ist. *Bild 6* zeigt an dem einfachen Beispiel eines einzelnen Infiltrationsbrunnens in einem Grundwasserstrom analytisch errechnete Linien gleicher Verweilzeiten. Für komplexe Konfigurationen lassen sich entsprechende Verweilzeitkarten entweder aus analytischen Lösungen oder mit Hilfe numerischer Strömungsmodelle berechnen.

In der Kombination von Verweilzeit- und Temperaturberechnung steht nun ein Verfahren zur Verfügung, das es ermöglicht, die Ausdehnung einer durch Kaltwassereinleitung erzeugten Temperaturanomalie näherungsweise zu berechnen. Ein Beispiel einer solchen Berechnung zeigt *Bild 7*. Das Verfahren kann für Prognoserechnungen eingesetzt werden und ermöglicht eine Abschätzung der zu erwartenden Temperaturanomalien bei zukünftig geplanten Anlagen, sofern die erforderlichen Bodenparameter hinreichend bekannt sind. Allerdings ist die Berechnung auf zeitliche Mittelwerte der zu erwartenden

Temperaturveränderungen beschränkt und setzt eine vertikal gut durchmischte Strömung voraus. Näherungsverfahren, die zeitliche Schwankungen sowohl der Einleitungsbedingungen als auch der Randbedingungen berücksichtigen, werden derzeit von den Autoren entwickelt.

5. Auswirkungen von Temperaturunterschieden auf das Strömungsfeld

Temperaturunterschiede sind zwangsläufig mit Dichteunterschieden gekoppelt, welche dem eingeleiteten Kaltwasser eine (entsprechend der Dichtedifferenz nach unten gerichtete) Auftriebskraft gegenüber dem umgebenden Wasser verleihen. Dadurch hat das relativ schwere Kaltwasser die Tendenz, nach unten abzusinken und sich im unteren Bereich des Grundwasserleiters einzuschichten, so daß eine stabile Schichtung entsteht. Wie die schematische Darstellung in *Bild 8* deutlich macht, wird durch Auftriebseffekte nicht nur das Temperaturfeld sondern auch das Strömungsfeld drastisch verändert.

Die Auswirkungen von Temperaturunterschieden auf das Strömungsfeld werden derzeit im Stuttgarter Institut für Wasserbau im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht [6; 10; 12]. Ziel dieser Bemühungen ist es in erster Linie, Entscheidungshilfen für die Praxis zu liefern zur Beantwortung der Frage, unter welchen Bedingungen Schichtungseffekte zu erwarten sind, und wann sie praktisch vernachlässigt werden können. Hierzu läßt sich das Strömungs- und Temperaturfeld einer auftriebsbehafteten Einleitung charakterisieren durch zwei dimensions-

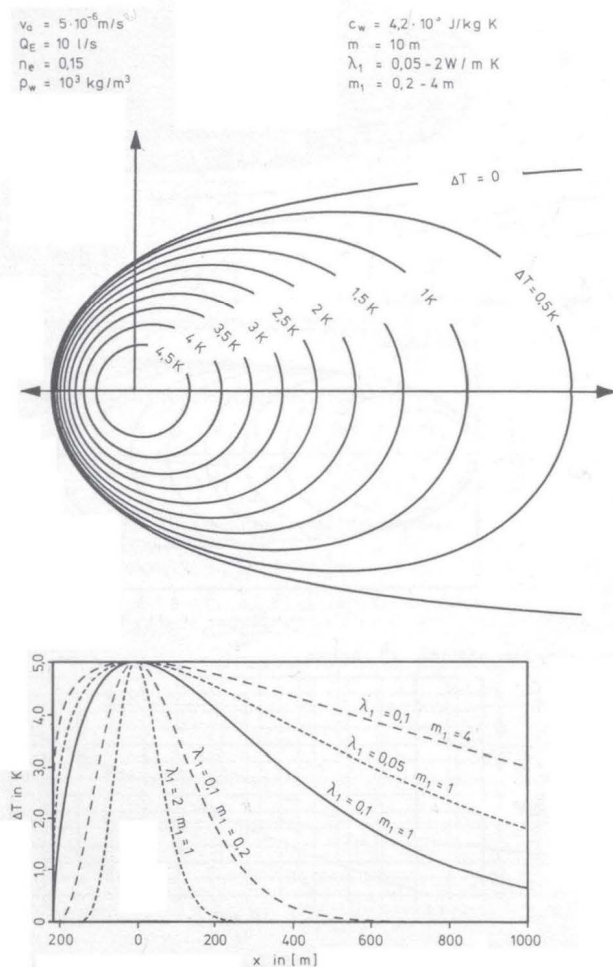


Bild 7. Temperaturanomalie: Zahlenbeispiel.

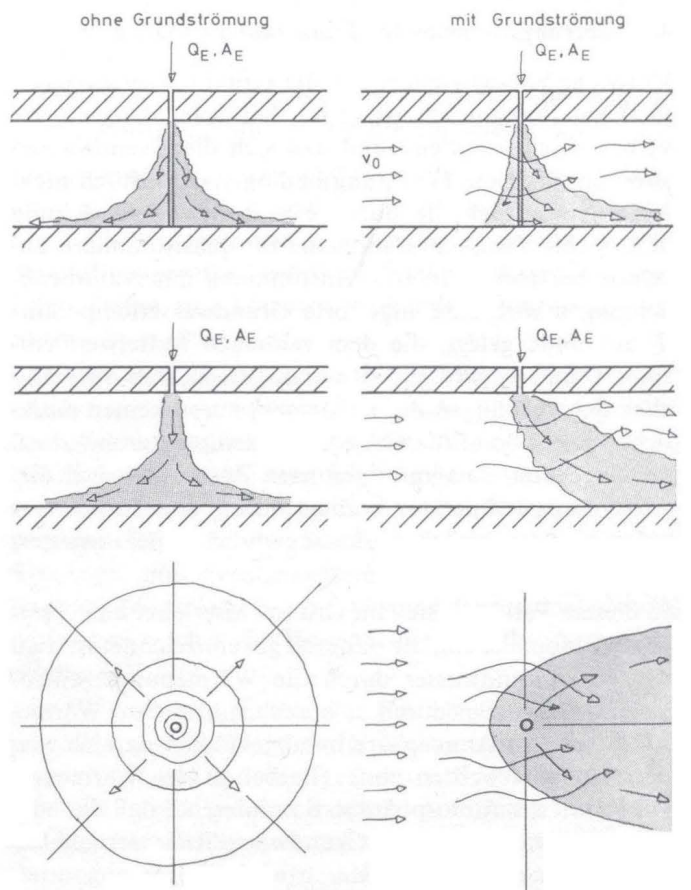


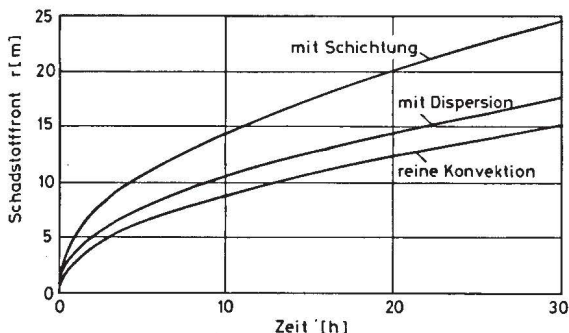
Bild 8. Schichtungseffekte zufolge Temperaturdifferenzen.

Zahlenbeispiel für folgende Bodenkennwerte:

Mächtigkeit	$m = 10 \text{ m}$
eff. Porosität	$n_e = 0.15$
Längsdispersivität	$\alpha_L = 0.5 \text{ m}$
Schichtung	$m / 2$

$x(t), r(t) =$ Position der Schadstofffront ($c \geq 0.16 c_0$)

Einleitung von $Q_E = 10 \text{ l/s}$ in ruhendes Grundwasser:



Parallelströmung ($v_f = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$):

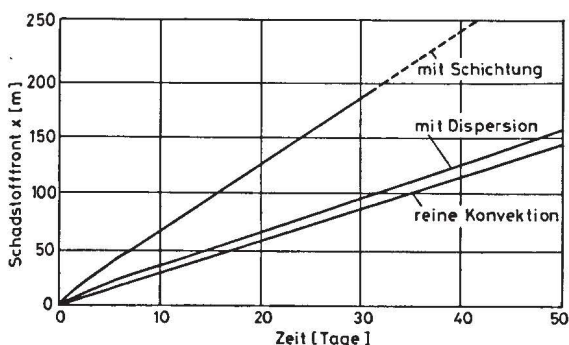


Bild 9. Schadstoffausbreitung: Zahlenbeispiel.

lose Parameter, deren Größe die Schichtungseffekte quantifiziert: der relative Durchfluß und der relative Auftrieb der Einleitung, jeweils bezogen auf die Geschwindigkeits- und Widerstandswerte der Grundströmung.

Um auch ohne Kenntnis der Forschungsergebnisse abschätzen zu können, welchen Einfluß Schichtungseffekte auf die Ausbreitung von Schadstoffen im Grundwasser haben können, sei abschließend ein fiktives Zahlenbeispiel vorgestellt. Bild 9 stellt für den Fall einer Einleitung ohne Grundströmung (axialsymmetrisch) und für den Fall einer Einleitung mit sehr kleinem relativem Durchfluß (Parallelströmung) die rechnerischen Entfernungen der Schadstoff-Front (erste merkliche Konzentrationsänderung) von der Einleitungsstelle zu verschiedenen Zeiten nach Beginn der Schadstoffzugabe dar. Man sieht, daß Dispersions- und Schichtungseffekte eine erheblich raschere Ausbreitung im Grundwasserleiter bewirken als die Berechnung des rein konvektiven Transports ergeben würde. Deshalb erscheint die weitere Erforschung dieser Effekte wichtig.

6. Schlußfolgerungen

Die obigen Betrachtungen lassen folgende Schlußfolgerungen im Hinblick auf den Einsatz von Wärmepumpen, die mit Grundwasser betrieben werden, zu:

1. Eingriffe in den Grundwasserhaushalt sind stets langfristiger Natur und bedürfen daher der sorgfältigen Überprüfung. Dies gilt auch hinsichtlich des Wärmeentzugs und einer möglichen Grundwasserverschmutzung durch Schadstoffe beim Betrieb von Wärmepumpen. Allerdings sind eventuelle negative Auswirkungen von Temperaturänderungen grundsätzlich insofern korrigierbar, als bei Beendigung der Einleitung die Temperaturanomalie durch natürliche Prozesse im Lauf der Zeit abgebaut wird. Hingegen ist eine Grundwasserverschmutzung durch Schadstoffe in der Regel nicht rückgängig zu machen.
2. Die anthropogene Beeinflussung der Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen muß regional gesehen werden im Zusammenhang mit den erheblichen anthropogenen Grundwassererwärmungen in dicht besiedelten Gebieten sowie mit dem geothermischen Wärmestrom. Entsprechende regionale Wärmebilanzbetrachtungen zeigen, daß bei einer sorgfältig geplanten Bewirtschaftung der Betrieb von Wärmepumpen ohne gravierende Veränderungen der großräumigen Grundwassertemperaturen möglich erscheint.
3. Hingegen können örtlich im Bereich der Kaltwasser-einleitung beträchtliche Temperaturanomalien auftreten, die es noch näher zu erforschen gilt. Dies betrifft unter anderem auch die Frage einer günstigen Anordnung und Gestaltung von Einleitungen.
4. Offene Fragen grundsätzlicher Natur betreffen vor allem das Auftreten von Schichtungseffekten und deren Auswirkungen auf den konvektiven Transport und die dispersive Vermischung.
5. Ungeachtet dieser offenen Fragen läßt sich feststellen, daß sowohl für die Auswirkungen von Kaltwasser-einleitungen auf das Temperaturfeld als auch für die Ausbreitung von Schadstoffen im Grundwasser quantitative Abschätzungsmöglichkeiten existieren und entsprechende Berechnungsverfahren in der Entwicklung sind. In diesem Zusammenhang sei auf die Tätigkeit des Arbeitsausschusses „Strömungstransport im Untergrund“ im Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau hingewiesen, der sich zur Zeit mit der Sammlung und Auswertung einschlägiger Erfahrungen bei Wärme- und Kälteeinleitungen befaßt.
6. Schließlich sei nochmals betont, daß aus grundsätzlichen Erwägungen persistente Schadstoffe dem Grundwasser ferngehalten werden müssen. Deshalb kommt der Funktionssicherheit der Wärmepumpen besondere Bedeutung zu. Hier ist zu überprüfen, wie mögliche Schadensfälle ausgeschaltet bzw. auf ein tragbares Risiko reduziert werden können.

Literatur

[1] Scheidegger, A. E.: General Theory of Dispersion in Porous Media. 7. Geophysical Research, Vol. 66, No 10, Oct. 1961.
 [2] Bear, J.: Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill International Book Company, 1979.

- [3] *Klotz, D.*: Untersuchungen zur Dispersion in porösen Medien. Z. Deutsche Geologische Gesellschaft, Band 124, 1973.
- [4] *Boochs, P. W.*, et al.: Einfluß der Sorption auf Transportvorgänge im Grundwasser. DGM 21 (3), 1977.
- [5] *Balke, K.-D.*: Das Grundwasser als Energieträger. Brennstoff-Wärme-Kraft 29, Nr. 5, Mai 1977.
- [6] *Mehlhorn, H.* und *Kobus, H.*: Effect of Buoyancy on the Flow and Temperature Field Near Injection Wells. Proc., 18. IAHR-Kongreß, Cagliari, September 1979.
- [7] *Lütkestratkötter, H.*: Numerische Behandlung von Wärmeausbreitungsvorgängen in durchströmten porösen Medien nach der Methode der finiten Elemente. Mitt.-Heft 20, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft RWTH Aachen, 1977.
- [8] *Mull, R.*: Zwischenbericht – Forschungsvorhaben Wärmeausbreitung bei Einleitung von abgekühltem Wasser in Grundwasserleiter, 1979 (unveröffentlicht).
- [9] *Rinnert, B.*: Strömungstransport und Dispersion in Porengrundwasserleitern. Bericht HWV 007, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1978.
- [10] *Mehlhorn, H.*, *Wenzel, W.*, und *Kobus, H.*: Entwicklung von Sandmodellen und Rechenverfahren für Warmwassereinleitungen in das Grundwasser. Bericht HWV 010, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1978.
- [11] *Damrath, R.*, *Kobus, H.*, *Schöttler, V.*, *Zipfel, K.*: Wasserinhaltsstoffe im Grundwasser – Reaktionen, Transportvorgänge und deren Simulation. Berichte 4/79 des Umweltbundesamtes, Berlin: Erich-Schmidt-Verlag 1979.
- [12] *Kobus, H.*: Ausbreitung von abgekühltem Wasser in Grundwasserleitern. Beitrag zum Statusseminar „Wärmepumpen und Gewässerschutz“ des Umweltbundesamtes am 19.–20. 11. 1979 in Berlin, Berichtsband beim Erich-Schmidt-Verlag, Berlin in Vorbereitung.
- [13] *Lofi, W.*, *Mehlhorn, H.* und *Kobus, H.*: Betrachtungen zum Wärmehaushalt des Untergrundes im Raum Karlsruhe. Bericht Nr. 544, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, 1977.