

## Beeinflussung der Grundwassertemperatur durch Wärmeentzug und Wärmeeintrag - theoretische Grundlagen

---

Prof. Dr. H. Kobus  
Technische Universität Stuttgart

### 1. EINLEITUNG

Die krisenhafte Entwicklung der Energiewirtschaft in den zurückliegenden Jahren hat uns nicht nur deutlich gemacht, wie weitgehend unsere Energieversorgung vom Erdöl abhängig ist, sondern auch das Bewußtsein dafür geschärft, daß die fossilen Energievorräte der Erde nur begrenzt verfügbar sind. Es ist daher dringend geboten, mit Primärenergie sparsam umzugehen und neue Energiequellen zu erschließen. In diesem Zusammenhang bietet unter anderem die Wärmepumpe eine Möglichkeit, die im Untergrund gespeicherte Umgebungswärme zu nutzen und so einen Beitrag - wenn auch in bescheidenem Maßstab - zur Einsparung von Primärenergie zu leisten.

Überlegungen zur thermischen Nutzung des Grundwassers müssen sich an den vorrangigen Belangen der Trinkwasserversorgung orientieren. Dies bedeutet, daß im Interesse des Grundwasserschutzes durch die Wahl geeigneter Kältemittel sowie durch technische Maßnahmen zur Funktionssicherheit der Anlagen sichergestellt werden muß, daß das Eindringen trinkwassergefährdender Stoffe in den Grundwasserleiter ausgeschlossen wird.

Einer energiewirtschaftlich sicher wünschenswerten Ausweitung des Einsatzes von Wärmepumpen steht auch entgegen, daß die zu erwartenden Veränderungen der Temperaturen im Grundwasserleiter durch den Betrieb der Anlage noch nicht mit genügender Sicherheit beurteilt werden können. Dieser Frage ist der vorliegende Beitrag gewidmet. Es werden die theo-

retischen Grundlagen der Wärmeausbreitung im Untergrund angesprochen und der derzeitige Wissensstand über die Entwicklung der Temperaturanomalie im Bereich einer Warm- oder Kaltwassereinleitung dargelegt.

Regionale Betrachtungen zeigen in Ballungsgebieten erhebliche anthropogene Grundwassererwärmungen. Entsprechende regionale Wärmebilanzbetrachtungen lassen bei einer sorgfältig geplanten Bewirtschaftung den Betrieb von Wärmepumpen in solchen Gebieten ohne gravierende Veränderungen der großräumigen Grundwassertemperaturen möglich erscheinen.

## 2. ANTHROPOGENE VERÄNDERUNGEN DER NATÜRLICHEN GRUNDWASSER-TEMPERATUR

In größerer Tiefe wird die natürliche Temperatur des Untergrunds vom geothermischen Wärmestrom ( $5 \div 8 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ ) bestimmt, der einen vertikalen geothermischen Gradienten von circa  $0,03 \text{ K/m}$  verursacht. In den oberflächennahen Schichten wird die jeweils vorherrschende Grundwassertemperatur mitbestimmt von der jeweiligen Temperaturrandbedingung an der Geländeoberfläche. Die jahreszyklischen Lufttemperaturschwankungen wirken sich ins Erdinnere aus, wobei hochfrequente Schwankungen rasch ausgedämpft werden und die jahreszyklischen Schwankungen sich bis zu Tiefen in der Größenordnung von  $10 \text{ m}$  unter Gelände spürbar bemerkbar machen. Unterhalb dieses Bereichs sind die Grundwassertemperaturen im wesentlichen zeitlich konstant und entsprechen in etwa der jahresgemittelten Lufttemperatur des Gebiets (KAPPELMAYER und HAENEL, 1974).

Im Bereich infiltrierender Oberflächengewässer können die natürlichen Grundwassertemperaturen beträchtliche Schwankungen aufweisen, die auf den Wärmeeintrag bzw. -entzug durch das infiltrierende Fluß- oder Seewasser zurückzuführen sind.

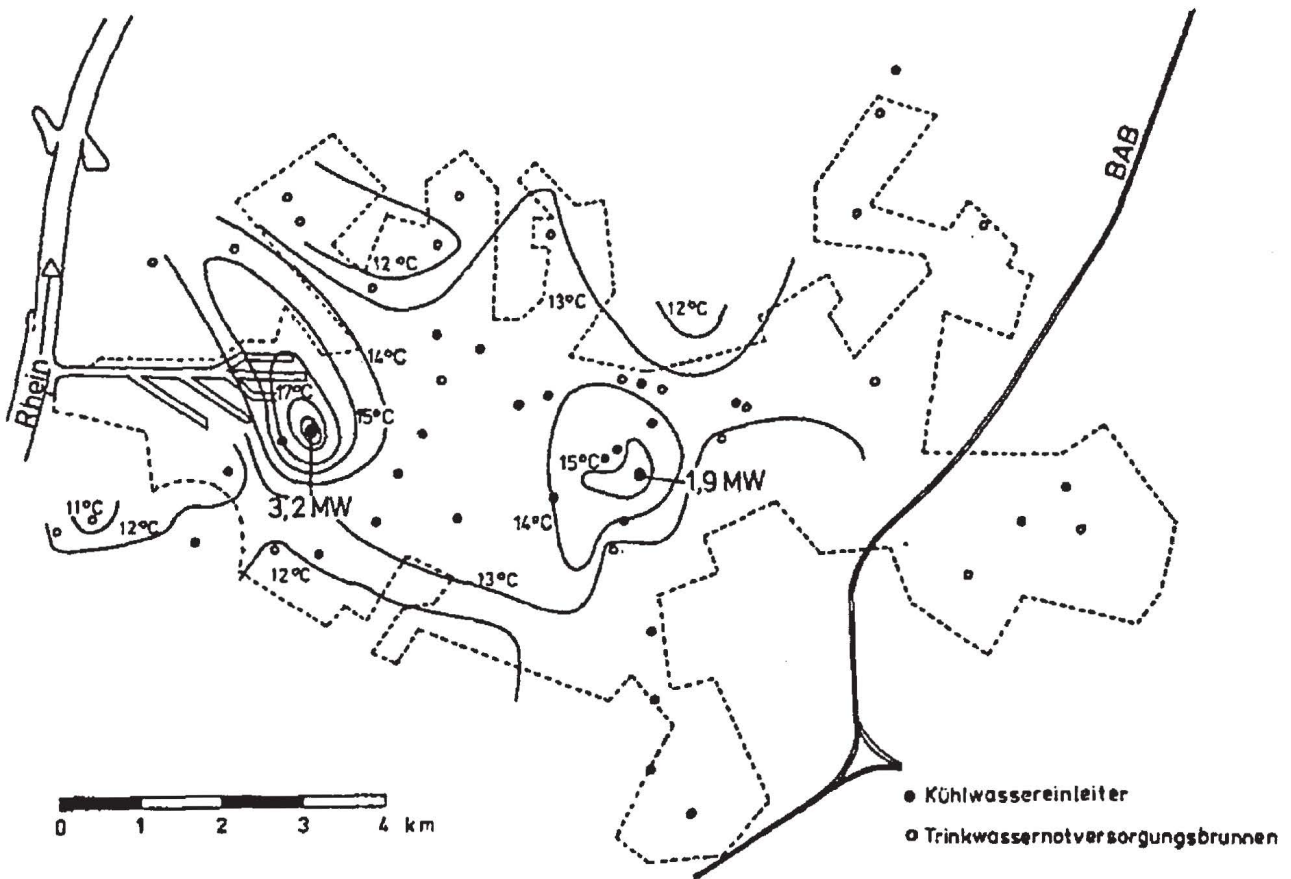
Anthropogene Veränderungen der natürlichen Grundwassertemperatur kommen durch vielfältige Ursachen zustande. In dicht besiedelten Gebieten führt die Bebauung und Versiegelung der Oberflächen zu einer "Isolierung" des Untergrunds mit abgeminderter Wärmeabgabe an die Atmosphäre. Des weiteren stellen Heizungskeller, Fernwärmeleitungen und Kanalisationen jeweils örtliche Wärmequellen dar. Schließlich tragen zahlreiche Einleiter erwärmten Kühlwassers zur Erhöhung der Grundwassertemperaturen bei. Aus der Vielzahl kleiner Wärmeleitungen resultieren flächenhafte Erwärmungen des oberflächennahen Grundwassers, die in Ballungsgebieten bis zu 4 K betragen (WERNER und BALKE, 1977).

In Bild 1 sind gemessene Grundwassertemperaturen im Bereich der Stadt Karlsruhe als Beispiel für anthropogen bedingte Grundwassererwärmungen dargestellt. Man erkennt deutlich, daß besonders gravierende Temperaturerhöhungen im Bereich von zwei industriellen Kühlwassereinleitungen auftreten. Deshalb soll im folgenden das Hauptaugenmerk auf Wärmeeintrag und -entzug durch Direkteinleiter gerichtet werden.

Anthropogen verursachte Wärmeeinleitungen weisen in der Regel Wärmeströme auf, die örtlich unvergleichbar größer sind als der natürliche geothermische Wärmestrom. Dieser kann deshalb im Folgenden mit guter Näherung vernachlässigt werden. Es wird davon ausgegangen, daß der Grundwasserleiter im ungestörten Zustand eine Gleichgewichtstemperatur  $T_0$  aufweist, die dem Jahresmittel der Lufttemperatur entspricht, und daß der Grundwasserkörper eine ausgeglichene Wärmebilanz aufweist, abgesehen von den oben genannten jahreszeitlichen Schwankungen in Oberflächennähe. Diesem Gleichgewichtszustand werden die anthropogen verursachten Temperaturänderungen linear überlagert, so daß jeweils nur die Abweichungen von der natürlichen Temperatur betrachtet werden:

$$\Delta T = T - T_0 \quad (1)$$





**Bild 1:** Anthropogen bedingte Erhöhung der Grundwassertemperaturen im Bereich der Stadt Karlsruhe (Isothermenplan vom 6.10.1976)

### 3. ANORDNUNG EINER EINZELANLAGE

#### 3.1 Globale Wärmebilanz

Die Auswirkungen eines anthropogenen Wärmeeintrags oder Wärmeentzugs sind schematisch in Bild 2 dargestellt. Als Wärmequellen bzw. Wärmesenken kommen sowohl solche Anlagen in Frage, die keinen Zufluß zum Grundwasser mit sich bringen und somit die Strömungsbilanz unverändert lassen (beispielsweise Wärmepumpen mit im Untergrund verlegten Wärmetauschern im geschlossenen System), als auch Anlagen, bei denen erwärmtes oder abgekühltes Wasser in den Grundwasserleiter eingespeist wird. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich vorwiegend auf die letztgenannte Art der Direkt-



einleitung, wie sie auch für grundwasserbetriebene Wärmepumpen von primärem Interesse ist.

Die Wärmeausbreitung im Bereich einer Wärmequelle im Untergrund wird zunächst von den Randbedingungen an der Wärmequelle geprägt, insbesondere von der Zugabeverteilung über die Tiefe und von der Einleitungstemperaturdifferenz. Die Hauptausbreitungsrichtung der eingeleiteten Wärme ist im wesentlichen horizontal; die natürliche Grundwasserströmung sowie die durch die Einleitung induzierte Strömung bewirken eine horizontale Verfrachtung der Wärme durch Konvektion, Dispersion und Wärmeleitung im Grundwasserleiter. Während dieses Ausbreitungsprozesses wird auch jeweils das durchströmte Korngerüst des Grundwasserleiters mit aufgewärmt bzw. abgekühlt, wodurch sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärmefront wesentlich verlangsamt. Gleichzeitig finden in vertikaler Richtung Wärmeaustauschprozesse mit dem Liegenden und mit den Deckschichten statt, die im wesentlichen durch Wärmeleitung bestimmt werden. Maßgeblich wird schließlich die Wärmeabgabe durch die Deckschichten an die Atmosphäre, von deren Größe letztlich die Ausdehnung der Temperaturanomalie bestimmt wird.

Eine elementare Wärmebilanzbetrachtung zeigt, daß die an der Wärmequelle zugeführte Wärmeenergie zunächst im Grundwasserleiter gespeichert wird und somit bei einem kontinuierlichen Input zu einer stetigen Vergrößerung der Anomalie führt. Dem wirkt die Wärmeabgabe durch die Deckschichten an die Atmosphäre entgegen. Dieser Wärmeoutput ist abhängig vom jeweils vorherrschenden Temperaturgradienten zwischen Grundwasser und Atmosphäre und von der Größe der Austauschfläche, also von der Ausdehnung der Temperaturanomalie. Bei konstanter Wärmezufuhr wird daher die Temperaturanomalie so lange wachsen, bis die Austauschfläche groß genug ist, daß ein Gleichgewichtszustand der Art erreicht wird, daß der an der Quelle zugeführte Wärmestrom gerade der Wärmeabgabe an die Atmosphäre entspricht.

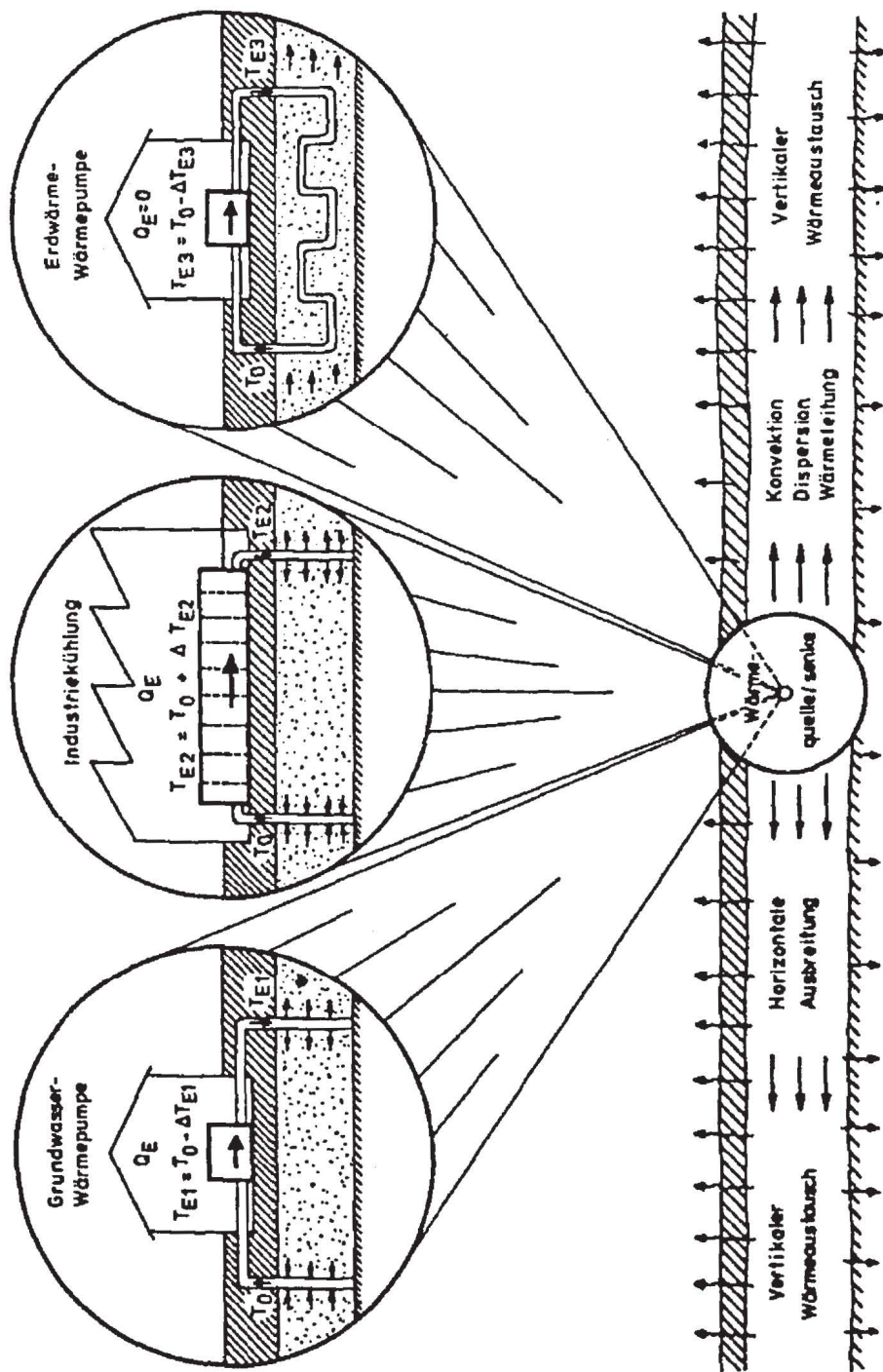


Bild 2: Wärmeinleitungen ins Grundwasser

Diese Wärmebilanzbetrachtung gilt unverändert auch für den Fall einer Kaltwassereinleitung, wie er bei der Grundwasserwärmepumpe von Interesse ist. In diesem Fall wird die Einleitung zur Wärmesenke, so daß die Vorzeichen der Wärmeströme jeweils umzudrehen sind. Als wesentliche Unterschiede zwischen einer Warmwasser- und einer Kaltwassereinleitung sind zu nennen:

- Die dichtebedingten Auftriebseffekte wirken bei der Kaltwassereinleitung nach unten, bei der Warmwassereinleitung nach oben. Kaltwasser hat daher die Tendenz, im Grundwasser abzusinken. Dadurch wird der effektive Temperaturgradient zur Geländeoberfläche abgemindert und somit die Wiederaufwärmung verlangsamt. Hierdurch ergibt sich eine Tendenz zu einer Vergrößerung der horizontalen Abmessungen der Temperaturanomale.
- Die realisierbaren Temperaturdifferenzen zwischen ungestörtem Grundwasser und Einleitung sind dadurch begrenzt, daß zu jedem Zeitpunkt die Temperaturen im positiven Bereich gehalten werden müssen, um Vereisungserscheinungen zu vermeiden. Die vorgeschlagenen Grenzwerte liegen deshalb bei Mindesttemperaturen von 4 bis 5°C und bei zulässigen Einleitungstemperaturdifferenzen von etwa 5 K.

### 3.2 Hydraulischer Kurzschluß

In der Regel wird das für thermische Nutzungen verwendete Grundwasser in einem Entnahmebrunnen gefördert und in einem Abstand  $a$  über einen Infiltrationsbrunnen zurückgeführt. Hierbei wird angestrebt, den Abstand  $a$  groß genug zu halten, um einen hydraulischen und thermischen Kurzschluß zu vermeiden, da sich dieser nachteilig auf den Wirkungsgrad der Anlage auswirkt.

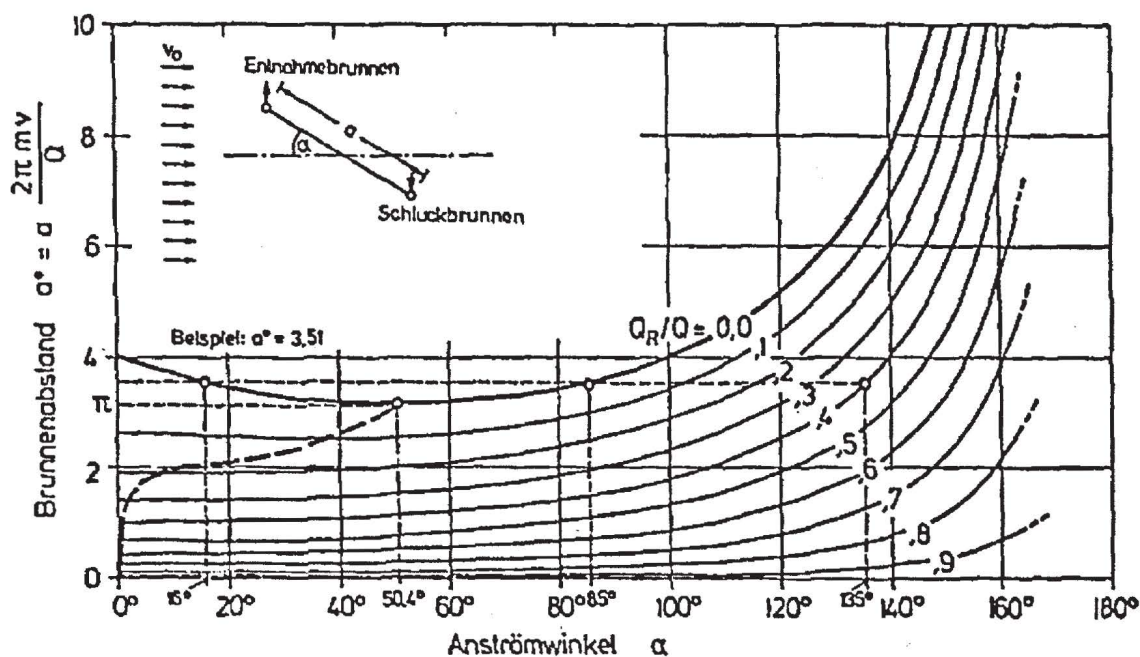
Für eine vorgegebene Situation läßt sich der kritische Abstand, bei dem ein hydraulischer Kurzschluß eintritt, für stationäre Strömungsverhältnisse mit Hilfe der Potentialtheorie berechnen (MEHLHORN, SPITZ und KOBUS, 1981). Bild 3 zeigt in dimensionsloser Form den kritischen Abstand für



verschiedene Anordnungen relativ zur Grundströmung sowie für kleinere Abstände den jeweiligen Rückströmanteil. Mit Hilfe dieses Diagramms kann der hydraulische Kurzschluß beurteilt werden, solange keine ausgeprägte Schichtenströmung auftritt; eine solche macht Kurzschlußströmungen auch über größere Entfernungen möglich.

### 3.3 Thermischer Kurzschluß

Bei Einleitungen mit Temperaturunterschieden ist ein hydraulischer Kurzschluß zwangsläufig auch mit einem thermischen Kurzschluß verbunden. Darüber hinaus kann es zufolge Wärmeleitung auch zu thermischem Kurzschluß kommen, selbst wenn hydraulisch keine Rückströmung stattfindet. Dies ist insbesondere dann zu erwarten, wenn eine "Stockwerkstrennung" dazu benutzt wird, einen hydraulischen Kurzschluß auszuschließen. Wird beispielsweise im oberen Teil des Grundwasserleiters entnommen und im unteren Teil in erwärmtem Zustand wieder infiltriert, dann wird im Laufe der Zeit durch Wärmeleitung ein thermischer Kurzschluß auch ohne jede hydraulische Verbindung entstehen.



**Bild 3:** Rückströmraten zwischen Schluck- und Entnahmebrunnen in Abhängigkeit von deren Anordnung

### 3.4 Auswirkungen des Kurzschlusses

Für den Betrieb einer Wärmepumpen- oder Kühlanlage bedeutet ein Rückströmanteil  $Q_R$ , daß

- bei Beibehaltung der Infiltrationstemperatur  $T_E$  und der Entnahmerate  $Q$  die gewinnbare Wärmeenergie  $E_R$  gegenüber dem Fall  $E_O$  ohne Kurzschluß reduziert wird:

$$E_R/E_O = (Q - Q_R)/Q \quad (2)$$

- bei Beibehaltung der genutzten Wärmeenergie und der Entnahmerate die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{E,R}$  erhöht werden muß:

$$\Delta T_{E,R}/\Delta T_{E,O} = Q/(Q - Q_R) \quad (3)$$

- bei Beibehaltung der genutzten Wärmeenergie und der Infiltrationstemperatur  $T_E$  die Entnahme- bzw. Infiltrationsrate gegenüber dem Fall ohne Rückströmung erhöht werden muß, um die Effektivitätsminderung zu kompensieren, wobei sich allerdings auch der Rückströmanteil wiederum erhöht.

## 4. MECHANISMEN DES WÄRMETRANSPORTS

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

- Ausbreitung durch Konvektion mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit;
- Vermischung durch Dispersion;
- Wärmeleitung und Wechselwirkung mit dem Korngerüst;
- vertikale Wärmeaustauschprozesse.

Die quantitative Erfassung von Ausbreitungsvorgängen im Grundwasser setzt ein hinreichendes Verständnis dieser Mechanismen voraus.

### 4.1 Konvektion

Die Ausbreitung des eingeleiteten Wassers und der darin enthaltenen Wärmeenergie 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

$$\vec{v}_a = \vec{v}_f/n_e \quad (4)$$

Temperaturveränderungen bewirken Änderungen der Fluideigenschaften Dichte  $\rho$  und Zähigkeit  $\eta$ . Eine Viskositätsänderung ist gleichbedeutend mit einer Änderung der Durchlässigkeit, wie aus der Beziehung zwischen der Durchlässigkeit  $k_f$  (m/s) und der Permeabilität  $k_o$  ( $m^2$ ) ersichtlich wird:

$$k_f = \frac{\rho g}{\eta} k_o = \frac{g}{\nu} k_o \quad (5)$$

Temperaturveränderungen von nur wenigen Grad können die Durchlässigkeit beträchtlich verändern. Dieser Effekt muß daher in den Berechnungen Berücksichtigung finden.

Temperaturbedingte Dichteunterschiede zwischen Einleitung und Grundwasser können Auftriebseffekte hervorrufen, durch die das Strömungsfeld drastisch verändert wird. Da Auftriebseffekte stets in Richtung der Schwerkraft wirken, können sie mit den üblichen horizontal-ebenen Rechenansätzen nicht erfaßt werden (siehe Kapitel 5).

#### 4.2 Dispersion

Der konvektive Transport ist stets mit einer starken Vermischung verbunden. Die Ursache dieser Vermischung ist die hydrodynamische Dispersion, welche aus der kombinierten Wirkung entsteht von

- Wärmeleitung (molekulare Diffusion),
- korngerüstbedingte Dispersion zufolge Abweichung der tatsächlichen Strömung in den Porenkanälen von der rechnerisch gemittelten Strömung,
- Makrodispersion zufolge des geologisch inhomogenen Aufbaus eines Grundwasserleiters mit stärker und weniger durchlässigen Schichten.

Die Wirkung der Dispersion besteht stets darin, vorherrschende Temperaturgradienten im Laufe der Zeit abzubauen und eine Vermischung hauptsächlich in Strömungsrichtung, aber auch in Querrichtung herbeizuführen.

Zur quantitativen Erfassung der hydrodynamischen Dispersion wird diese in Analogie zur molekularen Diffusion durch einen



Längsdispersionskoeffizienten  $D_L$  und einen Querdispersionskoeffizienten  $D_T$  senkrecht zur Strömungsrichtung ausgedrückt, wobei für praktische Zwecke der korngerüstbedingte Dispersionsanteil näherungsweise als Produkt der Abstandsgeschwindigkeit und einer "Dispersivität"  $\alpha_{L,T}$  beschrieben werden kann:

$$D_L \text{ [m}^2\text{/s]} = \alpha_L |\vec{v}_a| \quad ; \quad D_T \text{ [m}^2\text{/s]} = \alpha_T \cdot |\vec{v}_a| \quad (6)$$

Die Dispersivitäten  $\alpha_L$  und  $\alpha_T$  haben die Dimension einer Länge und können als Bodenkenngrößen betrachtet werden. Die Dispersivität ist umso größer, je grobkörniger, ungleichförmiger und inhomogener der Grundwasserleiter ist.

#### 4.3 Wärmeleitung und Wärmeaustausch mit dem Korngerüst

Die konvektive Transportgeschwindigkeit  $v_T$  für Wärme ist wesentlich kleiner als die für den Stofftransport maßgebliche Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$ :

$$v_T = \frac{n_e \rho_w c_w}{\rho_b c_b} v_a = \frac{\rho_w c_w}{\rho_b c_b} v_f \quad (7)$$

Hierbei ist  $(\rho_w c_w)$  und  $(\rho_b c_b)$  die jeweilige spezifische Volumenwärme des Wassers und des gesättigten Bodenmaterials (Dimension  $\text{J/m}^3\text{K}$ ). Wegen des Wärmeaustauschs zwischen Grundwasser und Korngerüst zieht eine Veränderung der Grundwassertemperatur stets eine Aufwärmung oder Abkühlung des durchflossenen Korngerüsts nach sich, was ein entsprechend langsames Fortschreiten einer Wärme front im Untergrund bewirkt. Je nach den thermischen Eigenschaften des Bodenmaterials und je nach Größe der effektiven Porosität nimmt das Geschwindigkeitsverhältnis  $(v_T/v_a)$  Zahlenwerte im Bereich von 0,5 bis 0,1 an.

#### 4.4 Vertikale Wärmeaustauschprozesse

Neben der vorwiegend horizontal ausgerichteten Wärmeausbreitung 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. Dieser läßt sich im stationären Fall durch folgende Beziehung näherungsweise beschreiben (siehe Bild 4):

$$W_1 = A \lambda_1 \frac{T_1 - T_0}{m_1} = A \lambda_1 \frac{\Delta T}{m_1} \quad (8)$$

Hierin ist  $A$  die betrachtete Oberfläche,  $m_1$  der Flurabstand und  $\lambda_1$  die Wärmeleitfähigkeit der ungesättigten Bodenzone zwischen Grundwasseroberfläche und Erdoberfläche. Diese 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  $T_0$  die Lufttemperatur.

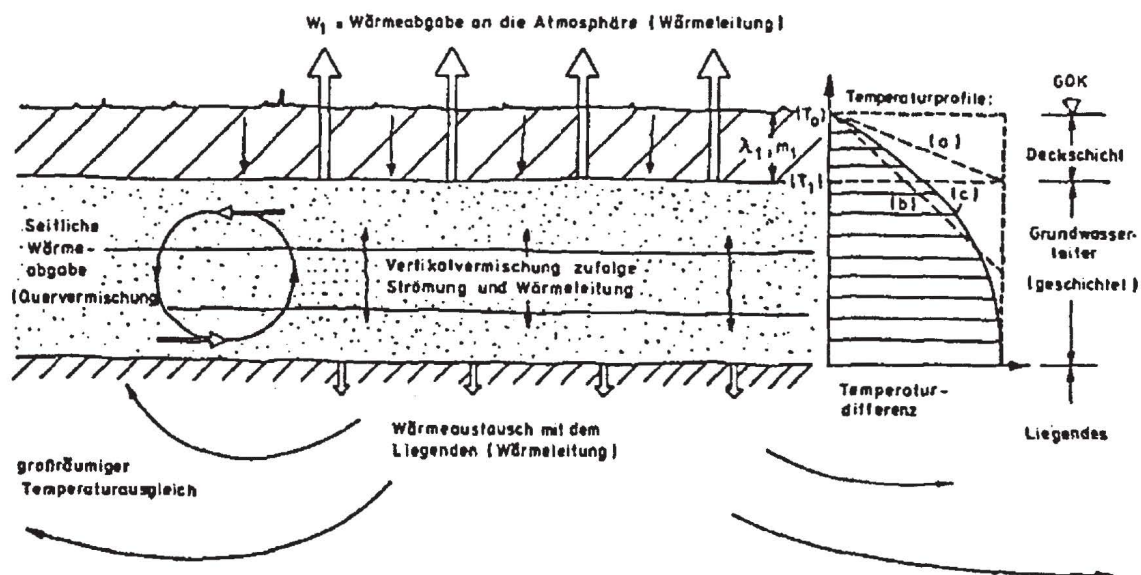


Bild 4: Prinzipskizze zum Wärmeaustausch

Die oberflächennahe Grundwassertemperatur  $T_1$  ist im Falle einer vertikal durchmischten Strömung gleich dem Querschnittsmittelwert  $T_m$ . Treten jedoch zufolge der Einleitungsbedingungen oder zufolge unzureichender vertikaler Vermischung im Grundwasserleiter deutliche Abweichungen vom Mittelwert  $T_m$  auf, dann können sich diese stark auf den tatsächlichen Wärmeaustausch auswirken.

In ähnlicher Weise ist auch der Wärmestrom vom Grundwasserleiter zum Liegenden hin in Ansatz zu bringen. In diesem Fall handelt es sich um Wärmeeinleitung in einen als halbunendlich betrachteten Körper (SÖLL und KOBUS, 1982). Die hierbei auftretenden Wärmeströme sind jedoch im Regelfall wesentlich kleiner als der Austausch mit der Atmosphäre; für den stationären Endzustand der Temperaturanomalie sind sie schließlich ohne Bedeutung.

## 5. BESTIMMUNGSGLEICHUNGEN UND LÖSUNGSWEGE

In Bild 5 sind die vollständigen Bestimmungsgleichungen für temperaturbeeinflusste Grundwasserströmungen angegeben. Die Kombination der Kontinuitätsgleichung mit dem Darcy-Gesetz liefert die Bewegungsgleichung für die Grundwasserströmung. Eine Bilanz der Wärmeströme an einem Kontrollvolumen liefert die Wärmetransportgleichung. Diese sagt aus, daß die Summe aller spezifischen Wärmeströme aus dem Kontrollvolumen heraus gleich der negativen Wärmespeicherung im Kontrollvolumen sein muß. Hierbei unterscheidet man die Anteile zufolge konvektivem Transport, dispersivem Transport einschließlich Wärmeleitung und zufolge Wärmezufuhr bzw. Abgabe. Der Ansatz für den Dispersionskoeffizienten enthält neben dem korngerüstbedingten Anteil auch additiv den Anteil der Wärmeleitung.

Im Vergleich zu den entsprechenden einfacheren Beziehungen für isotherme Grundwasserströmungen zeigt sich als wesentlicher Unterschied, daß wegen der Temperaturabhängigkeit der Stoffeigenschaften  $\rho_w$  und  $v_w$  die Bewegungsgleichung und die Wärmetransportgleichung stets simultan iterativ gelöst



Kontinuitätsgleichung : 
$$-\nabla (\rho_w \vec{v}_f) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w n_e)$$

Darcy - Gesetz : 
$$\vec{v}_f = - \frac{k_0}{\rho_w \gamma_w} (\nabla p - \rho_w \vec{g})$$

Hieraus resultierende Bewegungsgleichung :

$$\nabla \left( \frac{k_0}{\gamma_w} (\nabla p - \rho_w \vec{g}) \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w n_e)$$

Wärmetransportgleichung (Temperatur T) :

$$\frac{\rho_w c_w}{\rho_b c_b} \cdot \vec{v}_f \cdot \nabla T - \nabla D_w \cdot \nabla T + \sum R_w = - \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dispersionskoeffizient :

$$D_{w,L,T} = \frac{n_e \cdot \rho_w c_w}{\rho_b c_b} \alpha_{L,T} |\vec{v}_f| + \frac{\lambda}{\rho_b c_b} = \frac{\rho_w c_w}{\rho_b c_b} \alpha_{L,T} |\vec{v}_f| + \frac{\lambda}{\rho_b c_b}$$

Bild 5: Bestimmungsgleichungen für Grundwasserströmungen mit Temperaturänderungen

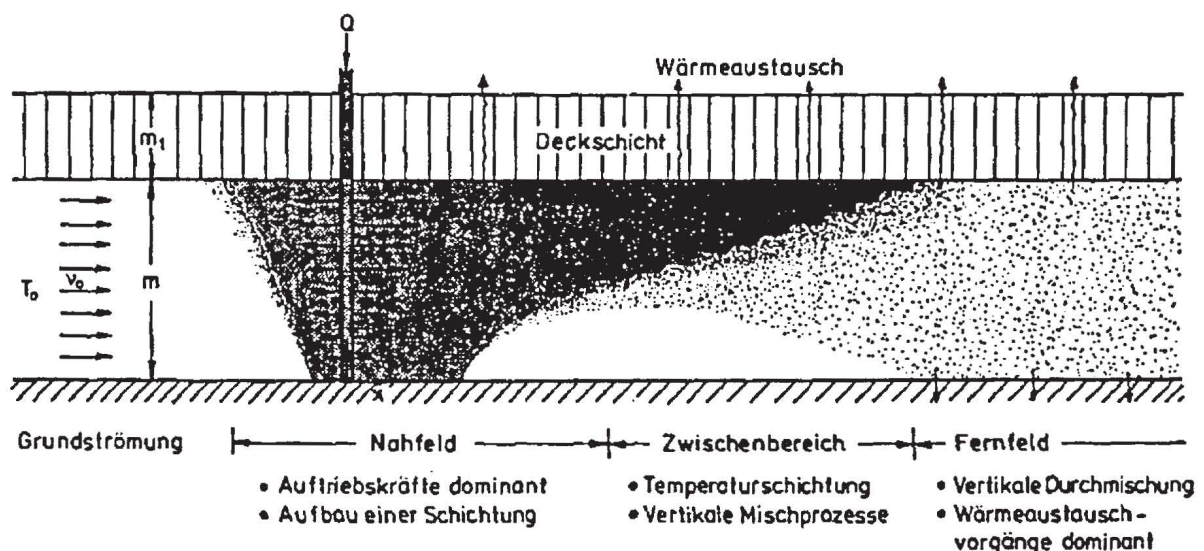


Bild 6: Das Strömungs- und Temperaturfeld einer Warmwasserinfiltration

werden müssen. Die piezometrische Höhe  $h$  ist wegen der veränderlichen Dichte  $\rho_w$  keine geeignete Bezugsgröße mehr.

Die Lösung des vollständigen Gleichungssystems für vorgegebene Rand- und Anfangsbedingungen erfordert den Einsatz numerischer Verfahren mit erheblichem Aufwand (MEHLHORN, 1982). Für Ingenieurzwecke ist es jedoch häufig ausreichend, sich mit Näherungslösungen zu begnügen, sofern die Zulässigkeit der getroffenen Vereinfachungen im Einzelfall überprüft wird.

Als erste Näherung dienen die Bestimmungsgleichungen für isotherme Grundwasserströmungen, für deren Lösung die Verfahren der klassischen Grundwasserhydraulik zu Verfügung stehen. Dies setzt voraus, daß die Dichte- und Zähigkeitsänderungen und damit auch die Durchlässigkeitsänderungen klein sind, was nur bei sehr kleinen Temperaturdifferenzen zutreffend ist.

Als weiterer Schritt können die Lösungen der klassischen Grundwasserhydraulik herangezogen werden, um den Einfluß der temperaturabhängigen Variation der Durchlässigkeit einzugrenzen. Ein Vergleich der Lösungen bei ungestörter Grundwassertemperatur und bei der Einleittemperatur (im gesamten Einleitungs-bereich angesetzt) zeigt die Größenordnung dieses Einflusses.

Wenn die Temperaturunterschiede so groß werden, daß Auftriebs-effekte das Strömungsfeld verändern, dann sind vertikal-integrierte Näherungslösungen nicht mehr brauchbar. In solchen Fällen ist grundsätzlich eine dreidimensionale Betrachtung erforderlich, da die Grundwasserströmung im wesentlichen horizontal verläuft und die Auftriebskräfte stets in vertikaler Richtung wirken.

Für die Erarbeitung von Lösungen kann man sich die Tatsache zunutze machen, daß die verschiedenen Einflußgrößen nicht im gesamten Strömungsfeld mit gleicher Intensität wirken, sondern nur in Teilbereichen zum Tragen kommen, so daß sie in anderen Teilbereichen vernachlässigt werden können. Betrachtet man die Ausbreitung erwärmten Wassers in einem Grundwasserleiter, wie dies schematisch in Bild 6 dargestellt ist,

dann kann man mehrere Bereiche unterscheiden:

Im Nahfeld der Einleitung dominieren die Einleitungsparameter; Auftriebseffekte können zu vertikalen Strömungskomponenten und zur Ausbildung von Temperaturschichtungen führen. Wegen seiner vergleichsweise geringen horizontalen Ausdehnung (Größenordnung 1 bis 10mal die Mächtigkeit  $m$ ) kann in diesem Bereich der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre zunächst vernachlässigt werden (Kapitel 6).

Der anschließende Zwischenbereich ist durch vertikale Temperaturschichtungen und vertikale Vermischungsprozesse zum Abbau dieser Schichtungen gekennzeichnet. Nach Erreichen einer Vermischung über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters schließt sich das Fernfeld an. Dort sind vor allem die vertikalen Wärmeaustauschvorgänge mit der Atmosphäre von Bedeutung. Das Fernfeld läßt sich mit geeigneten horizontalen Näherungsverfahren berechnen (Kapitel 7).

Anhand der verschiedenen Teillösungen läßt sich dann das Gesamtproblem einer Ingenieurlösung zuführen. Die in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnisse geben in Abhängigkeit von den Einleitungsparametern an, ob und in welchem Maß eine vertikale Temperaturschichtung zu erwarten ist. Hieraus ergibt sich die Nahfeld-Randbedingung für die weitere, vertikal-integrierte Berechnung, wie sie in Kapitel 7 erläutert wird.

## 6. DAS NAHFELD EINES EINZELBRUNNENS

Die Frage, wie bedeutsam temperaturbedingte Auftriebseffekte für die Entwicklung einer Temperaturanomalie sind, wurde von MEHLHORN (1982) eingehend untersucht. Wichtig war dabei die Frage, wie diese Effekte das Fernfeld beeinflussen und unter welchen Bedingungen sie vernachlässigt werden können.

Für einen homogenen, isotropen Grundwasserleiter konstanter Mächtigkeit  $m$  mit einer stationären und gleichförmigen natürlichen Grundwasserströmung der Filtergeschwindigkeit  $v_0$  wird das Strömungs- und Temperaturfeld einer Einleitung im wesentlichen von drei Parametern bestimmt: die relative

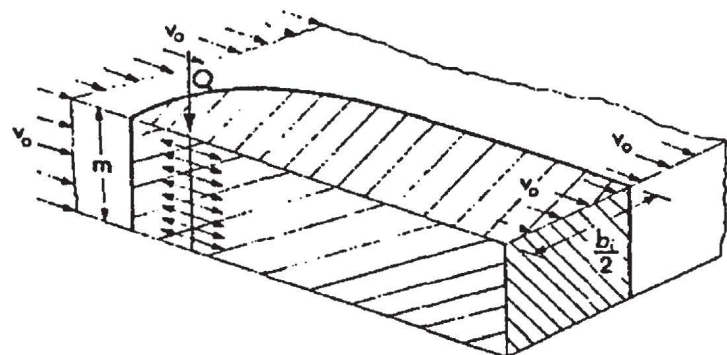


Infiltrationsrate  $Q^*$ , der relative Auftrieb  $B^*$  und die Rayleighzahl  $Ra$ .

Die relative Infiltrationsrate ist definiert als

$$Q^* = \left( \frac{\eta_1}{\eta_0} \right) \frac{Q}{v_0 \cdot m^2} = \frac{b'_i}{m} \quad (9)$$

und gibt das Verhältnis der Infiltrationsrate zum natürlichen Grundwasserstrom an. Sie kann auch als Verhältnis der (um die Durchlässigkeitsänderung bereinigten) Infiltrationsbreite  $b'_i$  des Warm- oder Kaltwassers zur Mächtigkeit  $m$  des Grundwasserleiters interpretiert werden (siehe Bild 7). Je größer dieser Parameter wird, umso ausgedehnter wird das

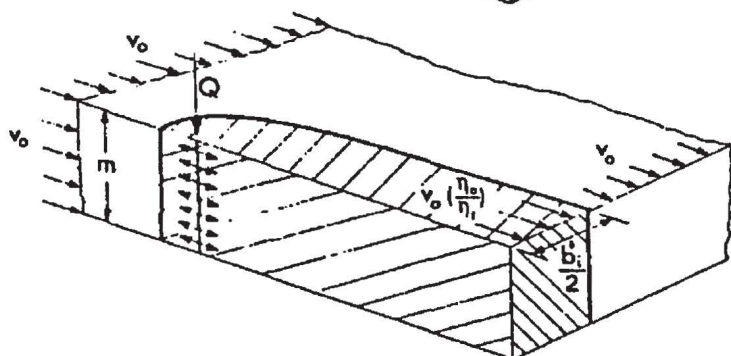


Isotherme Einleitung

( $\Delta T = 0$ )

Infiltrationsbreite

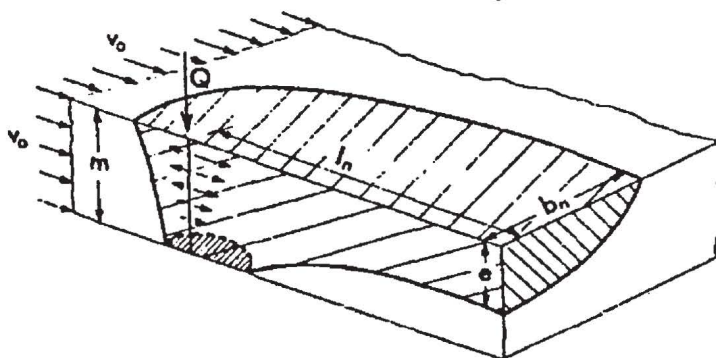
$$b_i = \frac{Q}{v_0 \cdot m}$$



Einleitung mit  $\Delta T$ ,  
vertikalvermischt

Temperatur-korrigierte  
Infiltrationsbreite

$$b'_i = \frac{\eta_1}{\eta_0} \cdot \frac{Q}{v_0 \cdot m}$$



Einleitung mit  $\Delta T$ ,  
dichteschichtet

Temperaturfeld  
charakterisiert  
durch  $l_n; b_n; e$

Bild 7: Das Temperaturnahfeld bei vertikaler Durchmischung und bei Temperaturschichtung

Temperaturfeld, und umso unbedeutender werden örtliche Auftriebseffekte sein.

Der relative Auftrieb ist definiert als

$$B^* = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \cdot \frac{(g/v_0) k_0}{v_0} \quad (10)$$

und gibt das Verhältnis von Auftriebskraft zufolge Dichteunterschied zur Widerstandskraft der natürlichen horizontalen Grundwasserströmung an. Mit größer werdenden Werten dieses Parameters nimmt die Bedeutung der Auftriebseffekte zu.

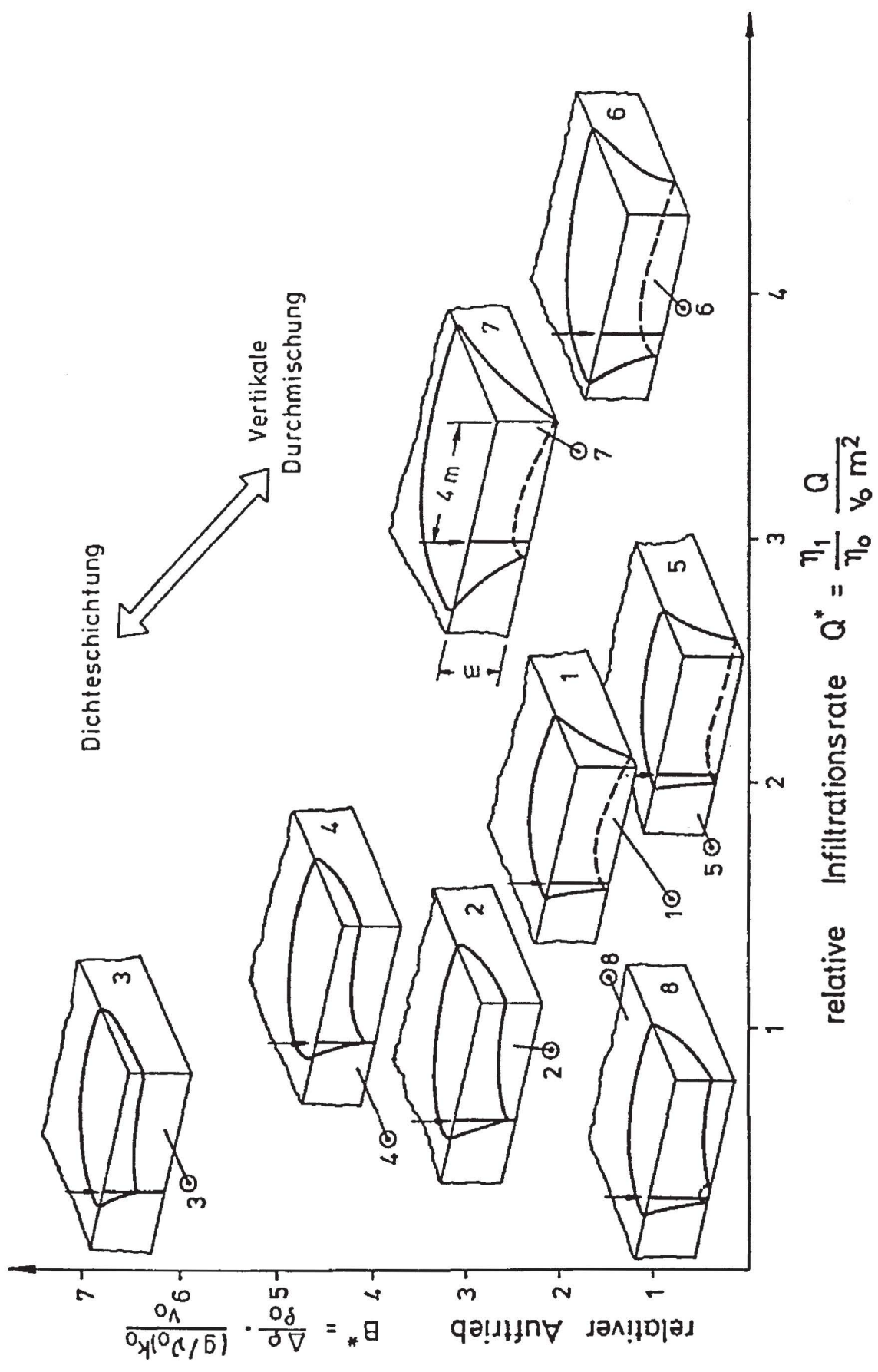
Die Rayleighzahl

$$Ra = \frac{c_w}{c_b} \cdot \frac{(\Delta \rho g k_0) / (\rho_0 v_0)}{D/m} \quad (11)$$

charakterisiert das Verhältnis von vertikalem Wärmetransport zufolge Auftrieb zum vertikalen Wärmetransport durch Wärmeleitung und Vermischung. Bei großen Rayleighzahlen können Auftriebseffekte Temperaturschichtungen erzeugen, während die ausgleichende Wirkung von Wärmeleitung und vertikaler Vermischung dominiert, wenn die Rayleighzahl klein ist und in die Größenordnung von Eins kommt.

Die Hauptabmessungen des Nahfelds und die Temperaturbedingung an der Grenze zum Zwischenbereich sind von besonderem Interesse (Bild 7). Diese Größen wurden von MEHLHORN (1982) anhand numerischer und experimenteller Untersuchungen für einen großen Parameterbereich ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 8 in Abhängigkeit von  $Q^*$  und  $B^*$  dargestellt, wobei die Blockbilder in der Vertikalen um den Faktor zwei überhöht sind.

Die Entwicklung von Temperaturschichtungen im Nahfeld kann drastische Konsequenzen für die Entwicklung und Ausdehnung der Temperaturanomalie insgesamt haben. Bei Temperaturschichtungen wird die Wärme viel rascher transportiert als bei völliger Durchmischung. Darüber hinaus wird von diesen Effekten die vertikale Temperaturverteilung bestimmt, welche ihrerseits den vertikalen Wärmeaustausch durch die Deckschichten zur Atmosphäre maßgebend beeinflusst.



**Bild 8:** Das Temperaturnahfeld in Abhängigkeit von der relativen Infiltrationsrate  $Q^*$  und dem relativen Auftrieb  $B^*$  der Einleitung (MEHLHORN 1982)



## 7. GROSSRÄUMIGE WÄRMEAUSBREITUNG

### 7.1 Vertikal durchmischte Verhältnisse

Ein erster Ansatz für eine vereinfachte Berechnung des Wärmetransports im Fernfeld unter vertikal durchmischten Verhältnissen ist in KOBUS und MEHLHORN (1980) gegeben. Unter der realistischen Annahme, daß der Wärmeaustausch durch die Deckschicht mit der Atmosphäre dominierend ist, wird eine Wärmebilanz für ein mit der Strömung mitbewegtes Kontrollvolumen ("Wasserpaket") aufgestellt, in welcher der stationäre Wärmeaustausch durch die Deckschicht näherungsweise durch den linearen Ansatz gemäß Gleichung (8) erfaßt wird. Für ein zur Zeit ( $t = 0$ ) zugegebenes Wasserpaket erhält man auf dessen Weg durch den Grundwasserleiter eine exponentielle Abklingfunktion der Temperaturdifferenz mit der Verweilzeit nach der Beziehung

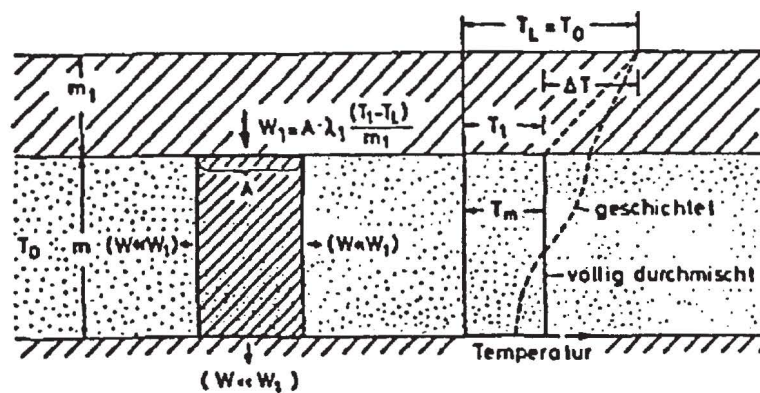
$$\frac{\Delta T}{\Delta T_E} = e^{-\left(\frac{\lambda l}{n_e \rho_w c_w m m_1}\right) \cdot t} \quad (12)$$

Diese Beziehung ist in Bild 9 dargestellt. Andererseits kann in einer stationären Strömung für jeden Punkt des Strömungsfelds die mittlere Verweilzeit angegeben werden, die vom Zeitpunkt der Einleitung bis zum Erreichen des betrachteten Punkts verstrichen ist. Für einfache Strömungskonfigurationen können die Verweilzeiten analytisch berechnen werden (BEAR, 1979); für komplexere Geometrien liefern numerische Strömungsmodelle entsprechende Verweilzeitendiagramme (van den ACKER, 1976).

In der Kombination von Verweilzeit- und Temperaturdifferenzberechnung steht ein Verfahren zur Verfügung, das es ermöglicht, die Ausdehnung einer Temperaturanomalie im stationären Endzustand größenordnungsmäßig abzuschätzen (KOBUS und MEHLHORN, 1980), solange nahfeldbedingte Temperaturschichtungen ausgeschlossen werden können.

Die zeitliche Entwicklung der Temperaturanomalie unter stationären Einleitungsbedingungen kann näherungsweise ebenfalls mit Hilfe der Verweilzeiten bestimmt werden. Durch numerische

Vergleichsrechnungen konnte nachgewiesen werden, daß die Einflüsse der horizontalen Wärmeleitung und der Längsdispersion nur im Nahbereich und zu Beginn der Einleitung dominierend sind und für größere Abstände und Zeiten vernachlässigbar klein werden. Für den konvektiven Wärmetransport kann daher die Wärmeausbreitung anhand der Verweilzeiten der Wasserströmung und des bodenspezifischen Geschwindigkeitsverhältnisses ( $v_T/v_a$ ) gemäß Gleichung (7) berechnet werden (SÖLL und KOBUS, 1982). Die Entwicklung des Wärme-felds einer einzelnen Einleitung in einer Grundströmung ist in Bild 10 schematisch dargestellt.



Wärmebilanz für ein mitbewegtes Wasserpaket:

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

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

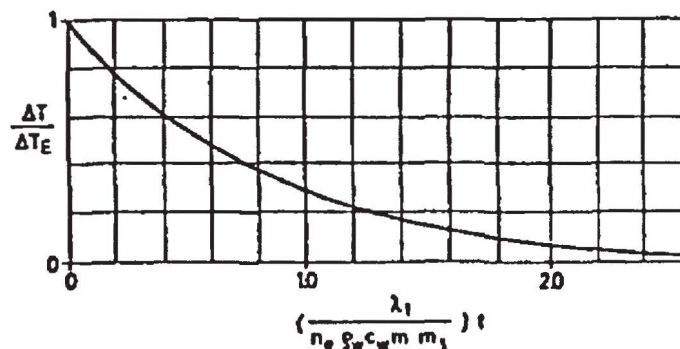
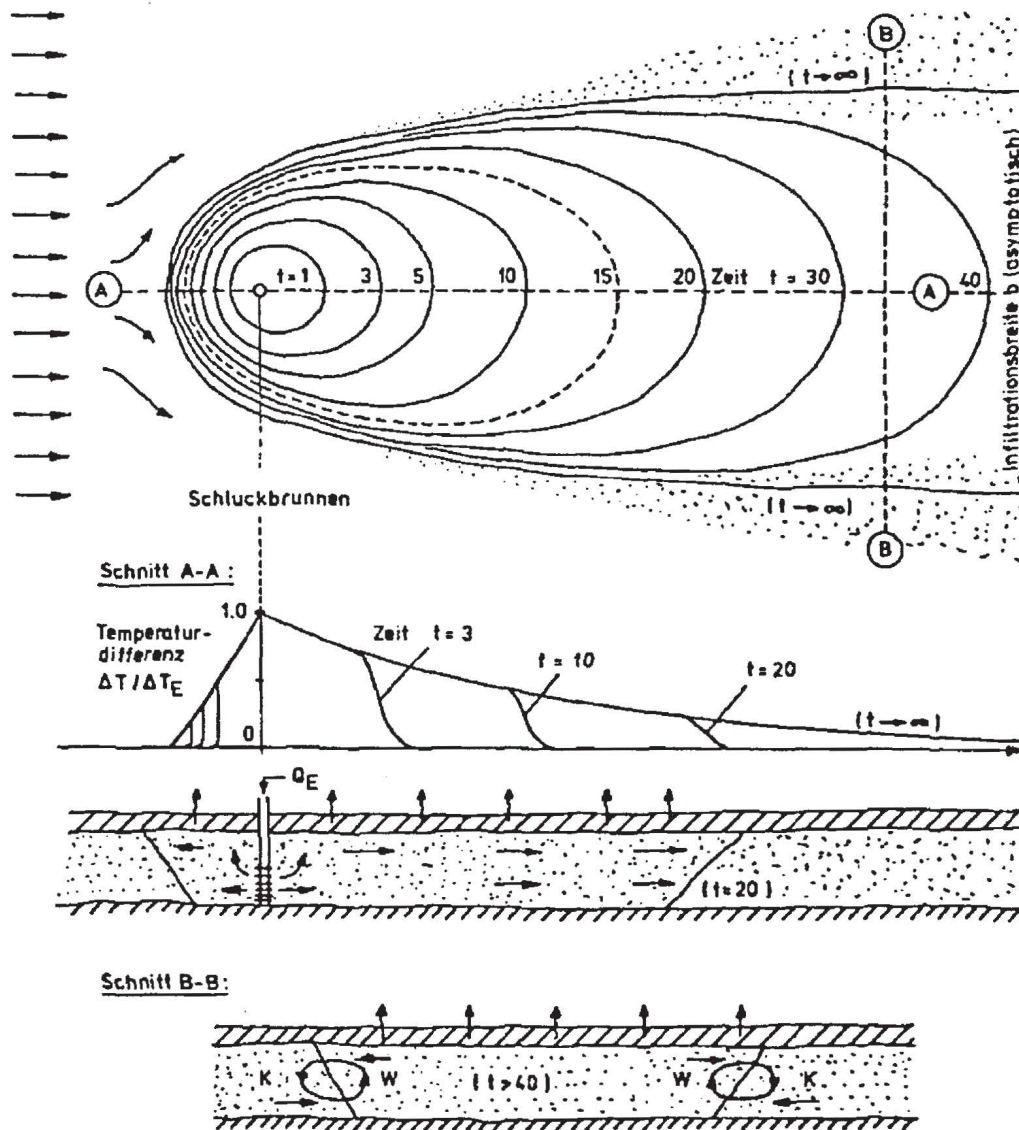


Bild 9: Quasistationäre Näherungsrechnung für das Abklingen von Temperaturdifferenzen im Fernfeld einer Kaltwassereinleitung

Bei periodischen Schwankungen der Einleitungstemperaturdifferenz  $\Delta T_E$  werden höherfrequente Schwankungen rasch ausgedämpft. Saisonale Schwankungen, wie zum Beispiel beim Betrieb von Wärmepumpen, können dadurch berücksichtigt werden, daß eine gegebene Temperaturganglinie der Einleitung zerlegt wird in ihren zeitlichen Mittelwert und eine Summe von geeigneten periodischen Schwankungsanteilen um den Mittelwert herum. Die Dämpfung dieser Schwankungsanteile wird in SÖLL und KOBUS (1982) behandelt.



**Bild 10:** Schematische Darstellung des Wärmefelds eines Einzelbrunnens in einer Grundströmung



Die hier angestellten Betrachtungen gelten für die instationäre Wärmeausbreitung in einem stationären, jahresgemittelten Strömungsfeld. Wenn das Strömungsfeld zufolge An- und Abschalten von Entnahme- oder Infiltrationsbrunnen starken zeitlichen Veränderungen unterworfen ist, dann müssen Berechnungen mit Hilfe geeigneter horizontal-ebener numerischer Modelle angestellt werden.

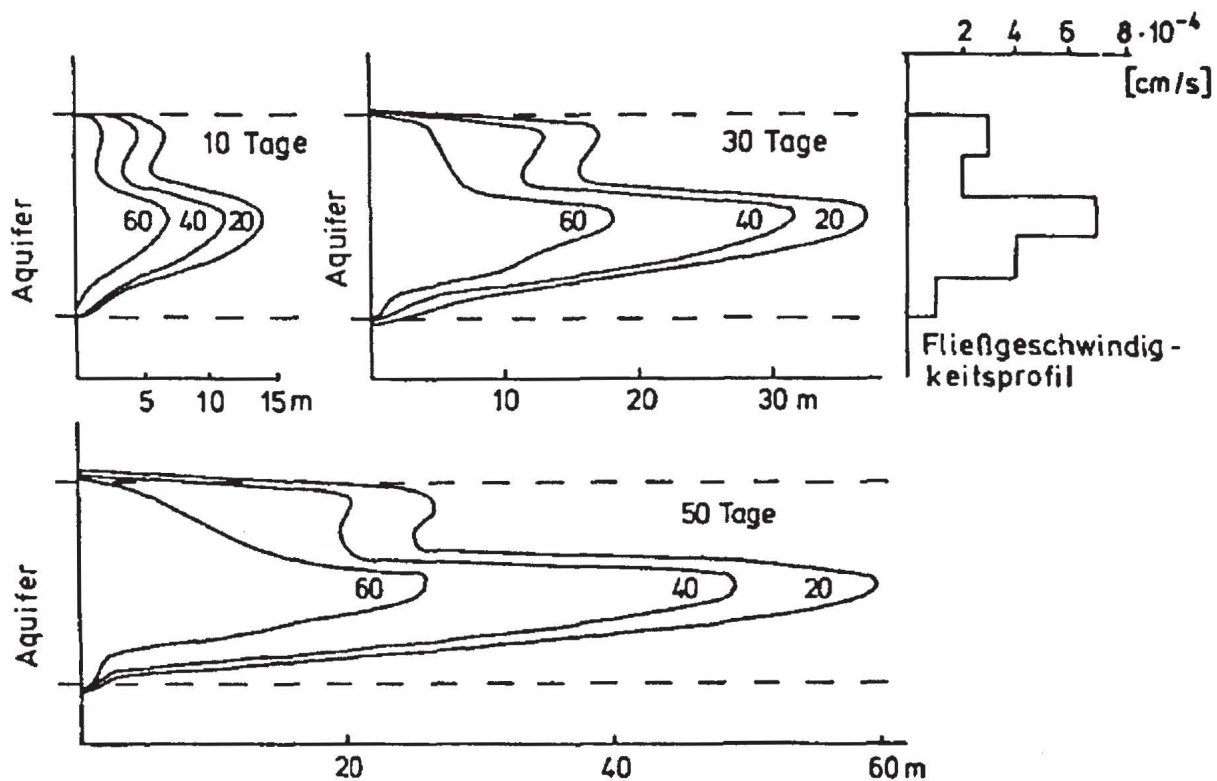
## 7.2 Temperaturschichtungen

Deutliche Abweichungen der vertikalen Temperaturverteilung im Grundwasserleiter vom tiefengemittelten Wert können folgende Ursachen haben:

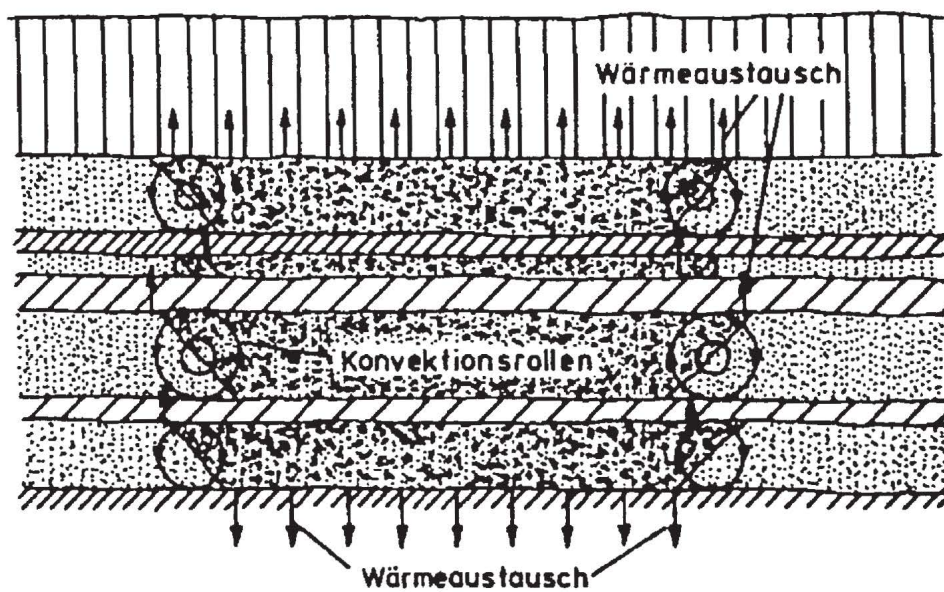
- Die Warm- oder Kaltwassereinleitung erfolgt nicht gleichmäßig über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters, sondern nur in einer bestimmten Höhe (Teilverfilterung);
- Auftriebseffekte führen im Nahfeld zu einer Temperaturschichtung (siehe Kapitel 6);
- zufolge des geologischen Aufbaus des Aquifers mit teils gut, teils schlecht durchlässigen Schichten weicht die Grundwasserströmung von den tiefengemittelten Rechenwerten ab; das erwärmte Wasser breitet sich vornehmlich in den gut durchlässigen Schichten aus, deren jeweilige Höhenlage für das Temperaturprofil von Bedeutung ist (siehe Bild 11).

Ausgeprägte geologische Schichtungen mit deutlich weniger durchlässigen Zwischenschichten ("Stockwerke") können die auftriebsbedingte Konvektion stark verändern dadurch, daß Konvektionsrollen nur in einzelnen Schichten zur Ausbildung kommen (Bild 12). Dies hat eine Reduzierung der Auftriebseffekte zur Folge.

Im Fall einer Schichtung können erhebliche Abweichungen von den tiefengemittelten Rechenwerten auftreten. Eine Eingrenzung dieser Effekte läßt sich näherungsweise dadurch erreichen, daß das Strömungs- und Temperaturfeld für einzelne maßgebliche Schichten bei einem entsprechenden maßgebenden Temperaturgradienten berechnet wird. Hilfreich sind hierbei



**Bild 11 : Warmwasserfahne bei ausgeprägter horizontaler Schichtung ( DELISLE, 1977 )**



**Bild 12 : Auftriebsbedingte Konvektion bei ausgeprägter horizontaler Schichtung ( MEHLHORN, 1982 )**



numerische Vergleichsrechnungen in einem Vertikalschnitt mit ausreichender Diskretisierung über die Tiefe (SÖLL und KOBUS, 1982), mit deren Hilfe der Grundwasserleiter besser charakterisiert werden kann.

## 8. REGIONALE WÄRMEBILANZMODELLE

In den bisherigen Ausführungen wurde vorrangig die elementare Konfiguration eines einzelnen Infiltrationsbrunnens in einer stationären, gleichförmigen Grundwasserströmung betrachtet mit dem unmittelbaren Ziel, für elementare Situationen direkt anwendbare Näherungslösungen zu erarbeiten, die für Abschätzungszwecke in der Ingenieurplanung angewendet werden können.

Darüber hinaus wird an der Entwicklung regionaler Wärmebilanzmodelle gearbeitet. Hierzu werden vertikal-integrierte, horizontal-ebene numerische Modelle entwickelt. Die komplexen Nahfeldbedingungen werden hierfür näherungsweise eingegrenzt und in geeigneter Form als Randbedingung an der Einleitungsstelle eingeführt. Die Wärmeausbreitung erfolgt in aller Regel sehr langsam und dauert Jahre oder Jahrzehnte; daher ist es angebracht, im Modell die instationäre Wärmeausbreitung in einer stationären, jahresgemittelten Grundwasserströmung zu simulieren. Veränderungen des Strömungsfelds zufolge An- oder Abschalten von Pumpen können durch Hintereinanderschalten unterschiedlicher stationärer Strömungszustände hinreichend erfaßt werden. Besondere Bedeutung kommt der Erfassung des vertikalen Wärmeaustauschs mit der Atmosphäre und dem Liegenden und somit auch der vertikalen Temperaturverteilung zu.

Mit Hilfe solcher regionaler Wärmebilanzmodelle wird es möglich sein, die zu erwartenden Auswirkungen einer Wärmeinleitung oder eines Wärmeentzugs zu prognostizieren, die Entwicklung und Ausdehnung von Temperaturanomalien abzuschätzen und die wechselseitige Beeinflussung verschiedener Anlagen in derselben Region zu erfassen. Die methodische Entwicklung solcher Modelle ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten.



## LITERATURHINWEISE

- AKKER, C. van den (1976): Een numerieke berekenings methode von stromlijnen of stromanen met bijbehorende verblijftijden, *H<sub>2</sub>O*, 9(21), 1976.
- BALKE, K.D. (1979): Die Abkühlung des Untergrundes beim Betrieb von Grundwasser-Wärmepumpen. Elektrowärme international Edition A, Juli/September 1979.
- BEAR, J. (1979): *Hydraulics of Groundwater*. McGraw Hill International Book Company, New York, 1979.
- DELISLE, M.A.G. (1977): Modellrechnungen zur Speicherung von Abwärme im flachen Untergrund, VDI-Bericht Nr. 288, 1977.
- KAPPELMAYER, O., und HAENEL, R. (1974): *Geothermics with special references to applications*. Geoexploration Monographs, Series 1, No.4, Borntträger, Stuttgart-Berlin, 1974.
- KOBUS, H. (1979): Ausbreitung von abgekühltem Wasser in Grundwasserleitern. *Berichtsband, Statusseminar "Wärmepumpen und Gewässerschutz"* des Umweltbundesamts, Erich Schmidt Verlag, 1979.
- KOBUS, H., und MEHLHORN, H. (1980): Beeinflussung von Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen. *gfw-wasser/abwasser*, 121. Jg. Heft 6, 1980.
- LAWA-Arbeitsgruppe Wärmebelastung der Gewässer (1980): *Grundlagen zur Beurteilung des Einsatzes von Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht*. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 1980.
- MEHLHORN, H., SPITZ, K.H., und KOBUS, H. (1981): Kurzschlußströmung zwischen Schluck- und Entnahmehrunnen - Kritischer Abstand und Rückströmrate. *Wasser und Boden*, Heft 4, 1981.
- MEHLHORN, H. (1982): *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*. Mitt. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 50, 1982.

- MEHLHORN, H., und KOBUS, H. (1983): On thermal anomalies due to injection-well discharges in porous aquifers. Proceedings, Internationales Symposium über Grundwasser bei der wirtschaftlichen Planung, Koblenz (wird erscheinen 1983).
- NEMECEK, E.P. (1980): Die Beeinflussung des Grundwassers durch Wärmepumpen und Kühlwasser. Österreichische Wasserwirtschaft, Jg. 32, Heft 9/10, 1980.
- SÖLL, T., und KOBUS, H. (1982): Berechnung großräumiger Temperaturfelder im Grundwasser - Bestimmung der dominierenden Wärmetransportmechanismen. Wissenschaftlicher Bericht 82/7 (HWV O35), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1982.
- WERNER, D., und BALKE, K.D. (1977): Die Wärmeausbreitung in der Umgebung eines Kühlwasser-Sickerbrunnens. gfw-wasser/abwasser 118, Heft 11, 1977.