

## BERECHNUNGSGRUNDLAGEN FÜR WÄRMEAUSBREITUNG UND -TRANSPORT IM GRUNDWASSER

Helmut Kobus

Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

### ZUSAMMENFASSUNG

Es wird ein Überblick über die Berechnungsgrundlagen zur Erfassung von Wärmeausbreitungsvorgängen im Untergrund gegeben. Für anthropogene Wärmeeinleitungen werden die wesentlichen Einflußgrößen identifiziert. Die für die Ausbildung einer Temperaturanomale maßgeblichen Transportmechanismen werden beschrieben. Anhand der Beschreibungsgleichungen für die Grundwasserströmung und den Wärmetransport wird deutlich, daß es sich hierbei um gekoppelte Prozesse handelt, deren simultane Lösung von komplexer Natur ist. Mit der Zielsetzung, praktikable Ingenieurösungen zu erarbeiten, wird deshalb eine konzeptionelle Gliederung in einen Nahbereich, in dem Auftriebseffekte dominieren, einen Zwischenbereich mit Temperaturschichtungen und einen Fernbereich vorgenommen. Es werden Forschungsergebnisse von Untersuchungen im Nahfeld vorgestellt, die eine Eingrenzung der Auftriebseffekte ermöglichen. Für die Behandlung der großräumigen Temperaturausbreitung wird das Verweilzeitenkonzept herangezogen, mit dessen Hilfe die Temperaturanomale näherungsweise berechnet werden kann, sofern die vertikalen Wärmeaustauschvorgänge mit der Atmosphäre hinreichend genau erfaßt werden können. Für einzelne Einleitungen lassen sich Näherungslösungen für Planungszwecke angeben. Erstrebenswertes Ziel ist es, regionale Wärmebilanzmodelle für Grundwasserleiter zu erstellen, die als Planungshilfe bei der Bewirtschaftung der Grundwasservorräte unter Berücksichtigung der vorrangigen Belange der Trinkwasserversorgung eingesetzt werden können.

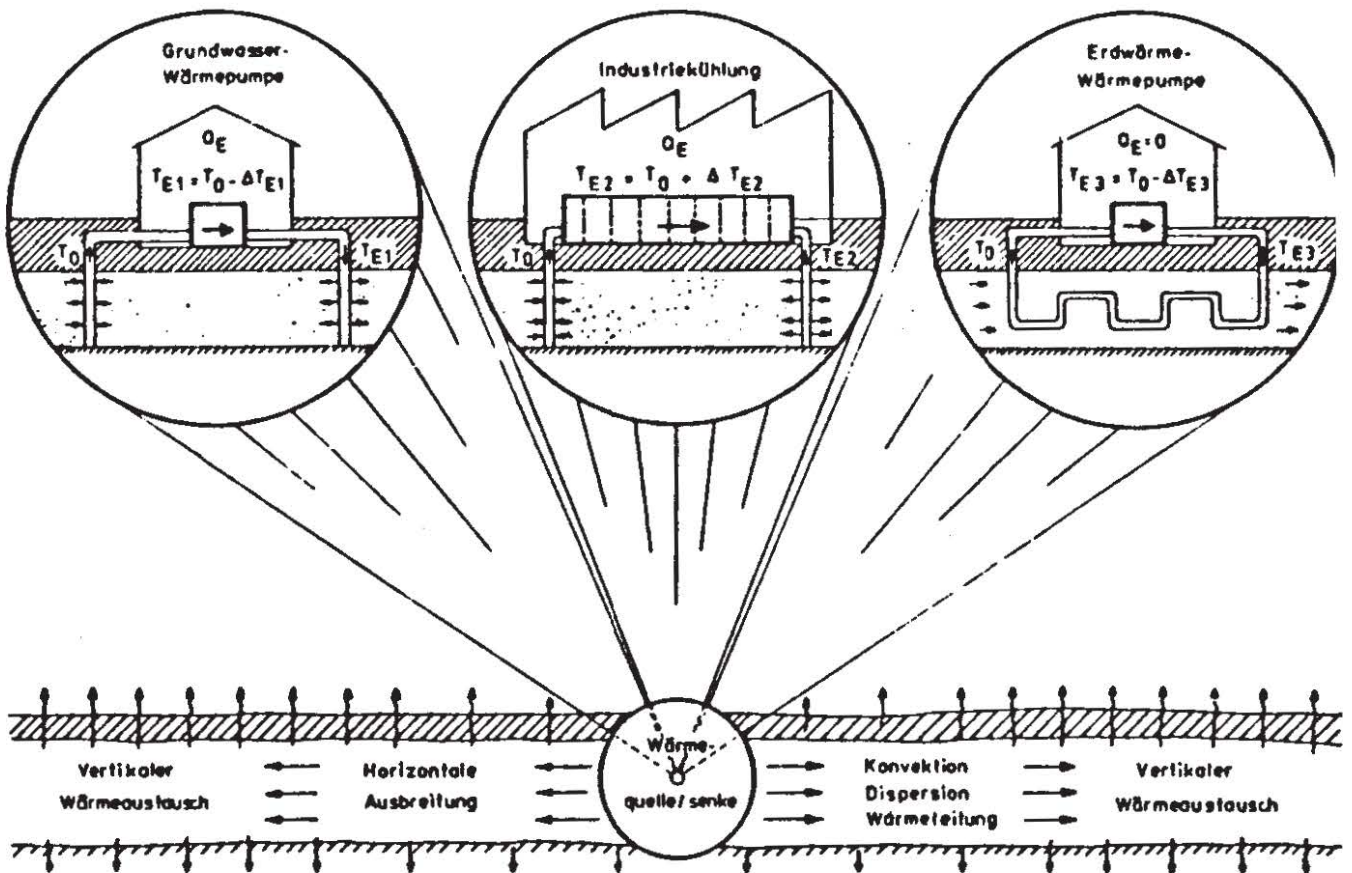
## 1. EINLEITUNG

Die Ausbreitung von Wärme im Untergrund ist ein komplexer Prozeß, der Vielzahl von Einflußgrößen unterworfen ist. Die rechnerische Erfassung des Wärmetransports setzt zunächst voraus, daß die Parameter identifiziert werden, die diesen Transportprozeß maßgeblich beeinflussen. Aus dieser Kenntnis ist zu beurteilen, inwiefern einzelne Einflußgrößen in einem rechnerischen Ansatz berücksichtigt werden müssen und unter welchen Voraussetzungen einfache Näherungsrechnungen zulässig sind.

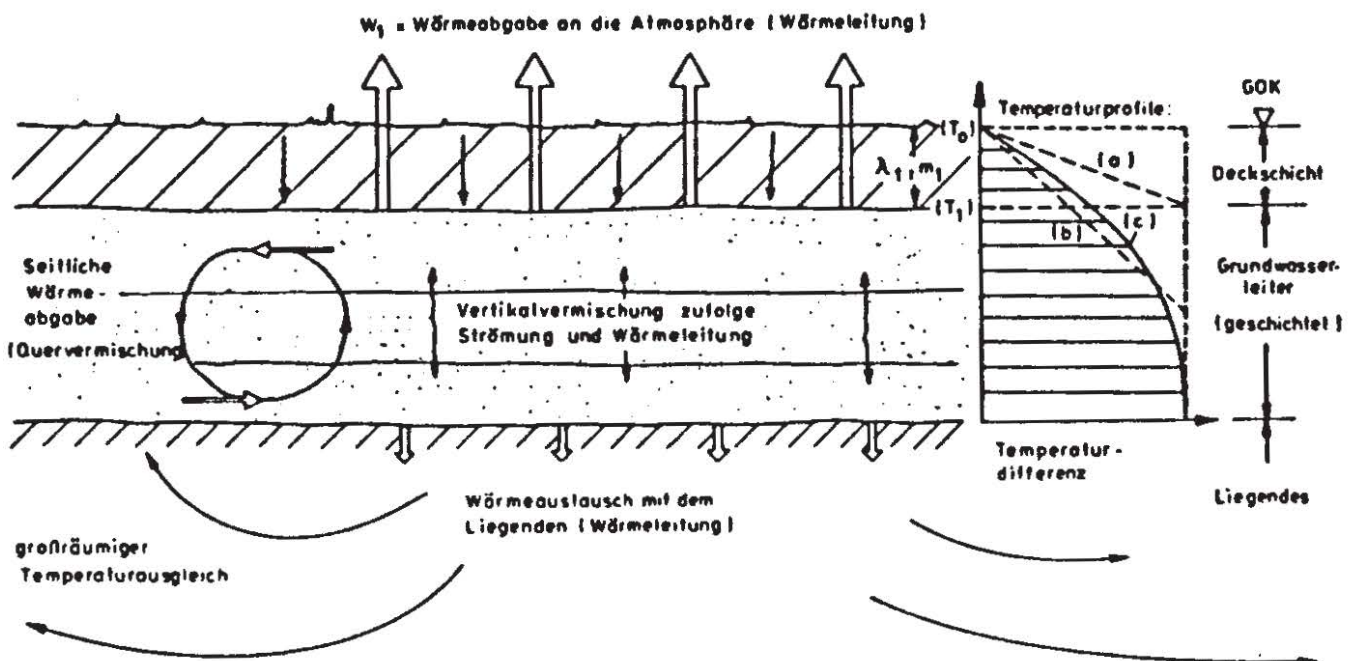
Im folgenden werden die Auswirkungen eines anthropogenen Wärmeintrags oder Wärmeentzugs betrachtet, wie sie schematisch in Bild 1 dargestellt sind. Als Wärmequellen bzw. Wärmesenken kommen hierbei grundsätzlich sowohl solche Anlagen in Frage, die keinen Zufluß zum Grundwasser mit sich bringen und somit 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 Direkteinleitung, wie sie auch für grundwasserbetriebene Wärmepumpen von primärem Interesse ist.

In einem natürlichen Grundwasserleiter werden die vorherrschenden ungestörten Grundwassertemperaturen bestimmt vom natürlichen geothermischen Wärmestrom und 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 m unter Gelände spürbar bemerkbar machen. In größeren Tiefen sind die Grundwassertemperaturen im wesentlichen konstant und entsprechen in etwa der jahresgemittelten Lufttemperatur des Gebiets (KAPPELMAYER und HAENEL, 1974).





**Bild 1:** Wärmeeinleitungen ins Grundwasser



**Bild 2:** Prinzipskizze zum Wärmeaustausch

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 dieser 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:

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

## 2. GLOBALE WÄRMEBILANZ

Die Wärmeausbreitung im Bereich einer Wärmequelle im Untergrund ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Das Ausbreitungsverhalten 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 Wärme front 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.

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 Temperaturanomalie.
- 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. 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.

#### 3.1 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

$$\vec{v}_a = \vec{v}_f / n_e \quad (2)$$

Bei einer Einleitung mit einer Temperaturdifferenz sind Strömungs- und Wärmefeld miteinander gekoppelt und somit nur simultan erfaßbar. Als erste Näherung wird man jedoch zunächst das Strömungsfeld berechnen, wie es sich bei vernachlässigbar kleinen Temperaturunterschieden der Einleitung einstellt. In diesem Fall berechnet sich das Strömungsfeld nach den Gesetzmäßigkeiten der klassischen Grundwasserhydraulik (Darcy-Gesetz).

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<sup>2</sup>) ersichtlich wird:

$$k_f \equiv \frac{\rho g}{\eta} k_o = \frac{g}{\gamma} k_o \quad (3)$$

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 4).

### 3.2 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 Quer- richtung herbeizuführen.

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. In homogenen und isotropen Medien kann die Dispersion durch zwei skalare Größen ausgedrückt werden: einen Längsdispersionskoeffizienten  $D_L$  und einen Querdispersionskoeffizienten  $D_T$  senkrecht zur Strömungsrichtung. Für praktische Zwecke kann der korngerüstbedingte Dispersionsanteil näherungsweise als Produkt der Abstandsgeschwindigkeit und einer "Dispersivität"  $\alpha_{L,T}$  beschrieben werden:

$$D_L \text{ [m}^2\text{/s]} = \alpha_L |\vec{v}_a| \quad ; \quad D_T \text{ [m}^2\text{/s]} = \alpha_T |\vec{v}_a| \quad (4)$$

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. In der Natur ermittelte Zahlenwerte, welche auch die Effekte der Makrodispersion zwangsläufig mit enthalten, liegen um zwei bis drei Zehnerpotenzen höher als Laborwerte. Die entsprechenden Werte für die Querdispersion sind in der Regel um eine Zehnerpotenz kleiner als für die Längsdispersion. Die Bestimmung der Dispersivitäten für natürliche Grundwasserleiter bereitet allerdings meist große Schwierigkeiten, da die Dispersivität keine direkt meßbare Größe ist.

Bei der Wärmeausbreitung liefert in der Regel die Wärmeleitung einen signifikanten Beitrag zur dispersiven Vermischung, der zusätzlich zur korngerüstbedingten Dispersion und Makrodispersion mit berücksichtigt werden muß.

### 3.3 Wärmeleitung und Wärmeaustausch mit dem Korngerüst

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

$$v_T = \frac{n_e \cdot \rho_w \cdot c_w}{\rho_b \cdot c_b} v_a = \frac{\rho_w c_w}{\rho_b c_b} \cdot v_f \quad (5)$$

Hierbei ist  $(\rho_w c_w)$  und  $(\rho_b c_b)$  die jeweilige spezifische Volumenwärme des Wassers und des gesättigten Bodenmaterials (Dimension  $J/m^3K$ ). 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.



### 3.4 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 2):

$$W_1 = A \cdot \lambda_1 \frac{T_1 - T_0}{m_1} = A \lambda_1 \frac{\Delta T}{m_1} \quad (6)$$

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.

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 halbbunendlich 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 Temperaturanomale sind sie schließlich ohne Bedeutung.

## 4. BESTIMMUNGSGLEICHUNGEN UND LÖSUNGSWEGE

In Bild 3 sind die vollständigen Bestimmungsgleichungen für

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

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

Hieraus resultierende Bewegungsgleichung :

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

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 :

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

Bild 3: Bestimmungsgleichungen für Grundwasserströmungen mit Temperaturänderungen

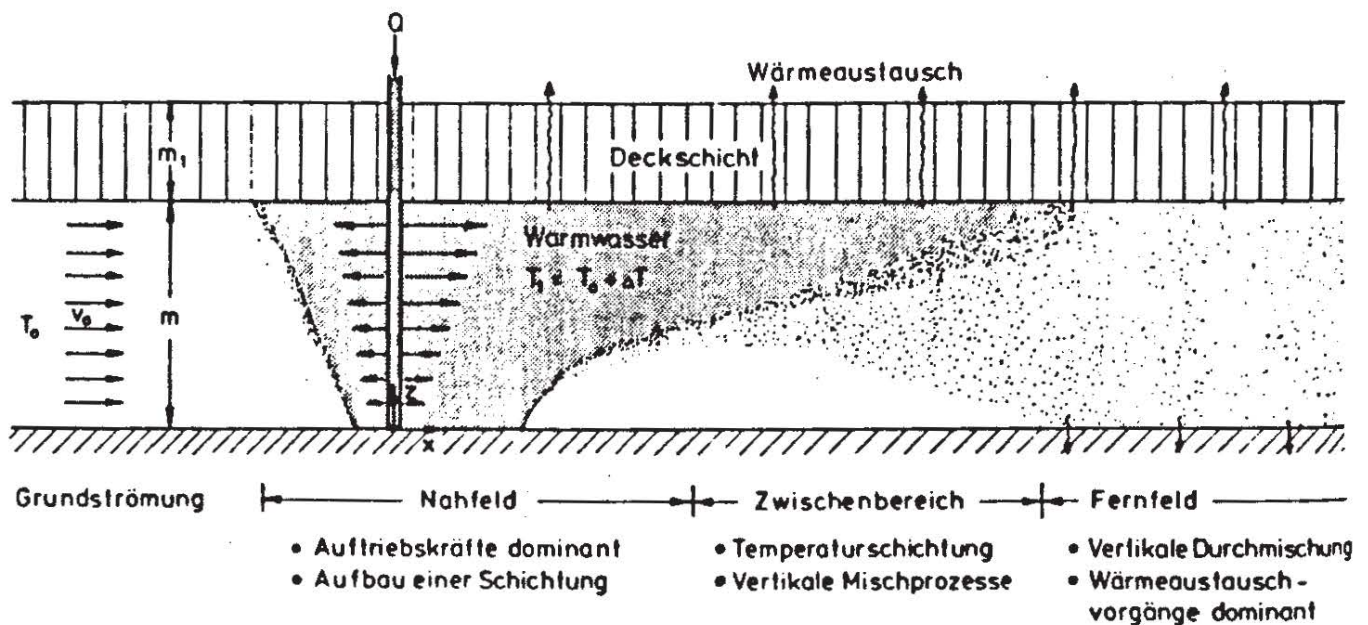


Bild 4: Das Strömungs- und Temperaturfeld einer Warmwasserinfiltration



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 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 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 zur Verfügung stehen. Dies setzt voraus, daß die Dichte- und Zähigkeitsänderung 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 Einleitungsbereich angesetzt) zeigt die Größenordnung dieses Einflusses.

Wenn die Temperaturunterschiede so groß werden, daß Auftriebseffekte das Strömungsfeld verändern, dann sind diese vertikalintegrierten 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 Intensivität 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 4 dargestellt ist, dann kann man hierbei mehrere Bereiche unterscheiden:

Im Nahfeld der Einleitung dominieren die Einleitungsparameter; Auftriebseffekte können zu vertikalen Strömungskomponenten und zur Ausbildung von Temperaturschichtungen führen. Wegen ihrer vergleichsweise geringen horizontalen Ausdehnung (Größenordnung 1 bis 10mal die Mächtigkeit  $m$ ) kann in diesem Bereich der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre zunächst vernachlässigt werden. Dieser Bereich wird in Kapitel 5 behandelt.

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 horizontal-ebenen Näherungsverfahren berechnen, die in Kapitel 6 behandelt werden.

Anhand der verschiedenen Teillösungen läßt sich dann das Gesamtproblem einer Ingenieurlösung zuführen. Die in Kapitel 5



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 6 erläutert wird.

## 5. 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

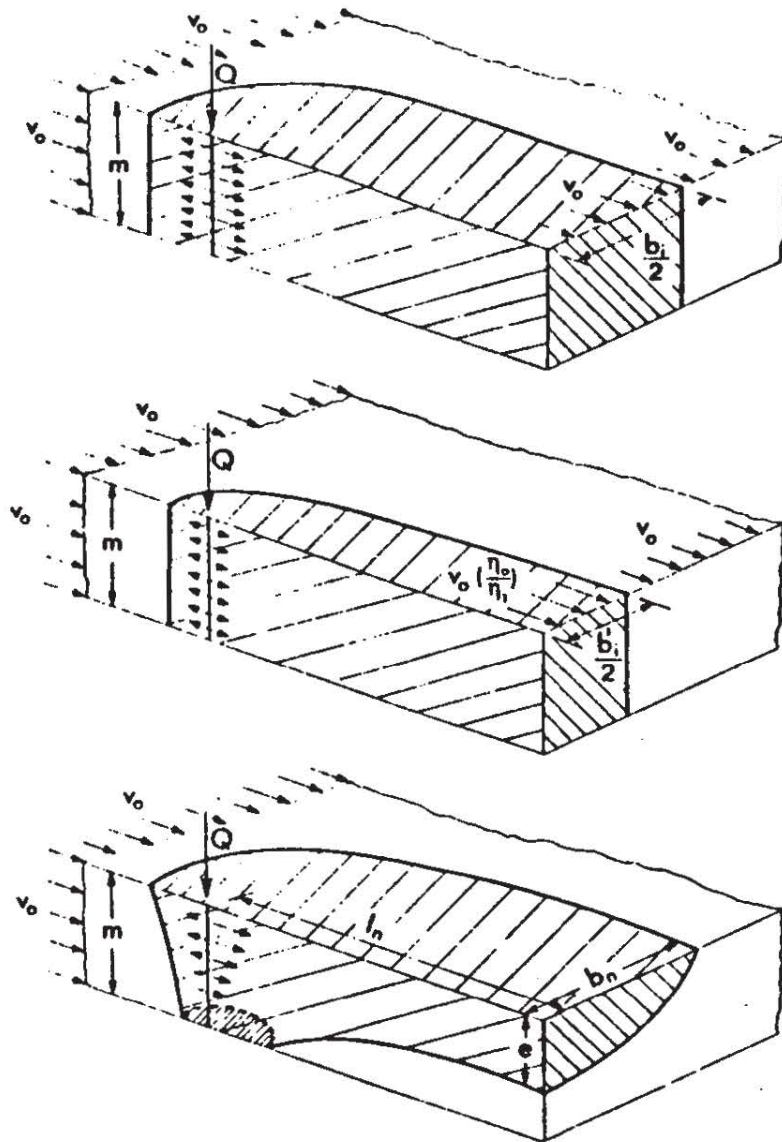
$$Q^* = \left( \frac{\eta_1}{\eta_0} \right) \frac{Q}{v_0 \cdot m^2} = \frac{b'_i}{m} \quad (7)$$

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 5). Je größer dieser Parameter wird, umso ausgedehnter wird das Temperaturfeld, und umso unbedeutender werden örtliche Auftriebseffekte sein.

Der relative Auftrieb ist definiert als

$$B^* = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \cdot \frac{(q/v_0) k_{r0}}{v_0} \quad (8)$$

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.



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 5: Das Temperaturnahfeld bei vertikaler Durchmischung und bei Temperaturschichtung (MEHLHORN und KOBUS 1983)

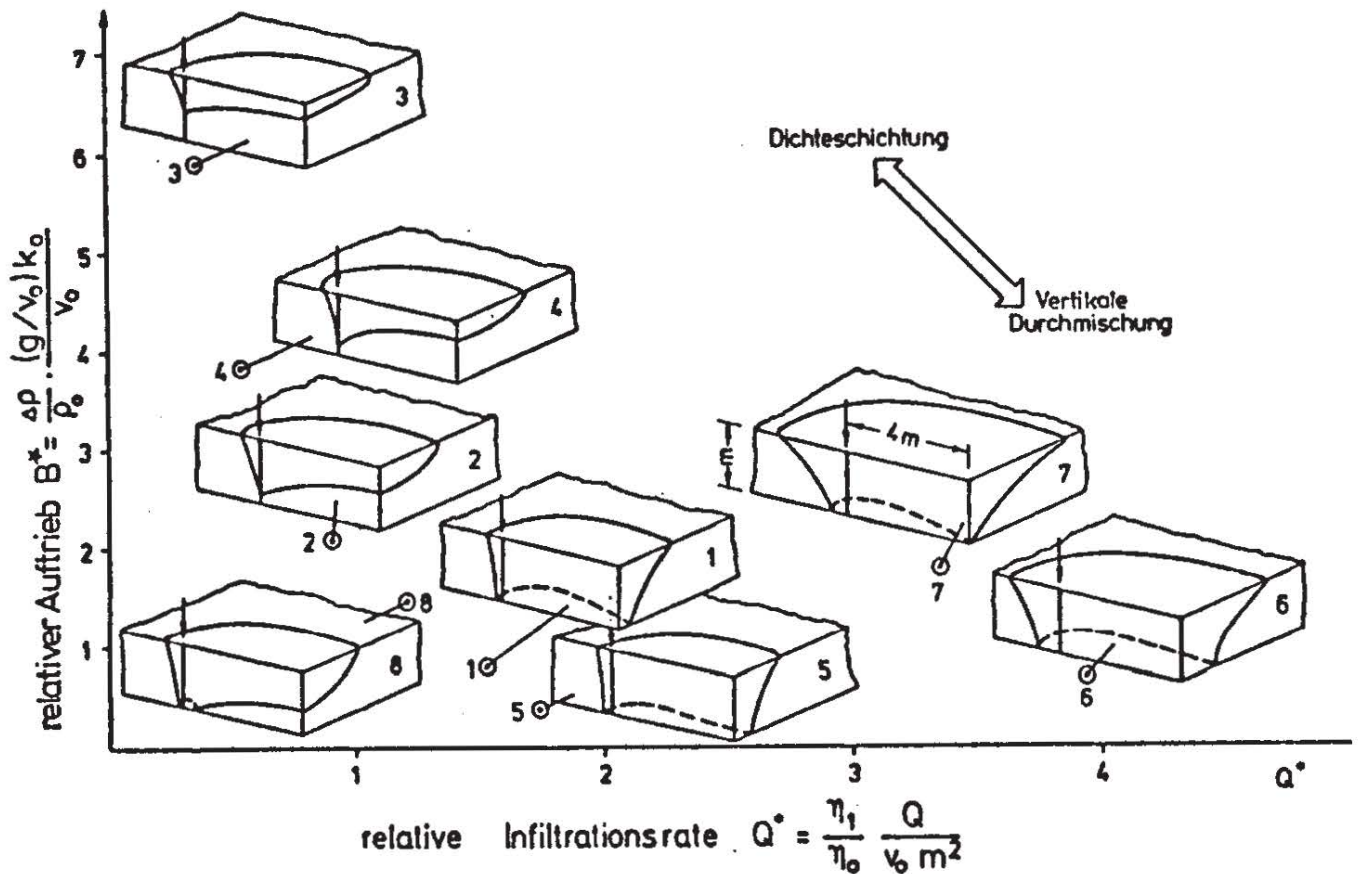
Die Rayleighzahl

$$Ra = \frac{c_w}{c_b} \cdot \frac{(\Delta \rho g k_0) / (\rho_0 \nu_0)}{D/m} \quad (9)$$

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 Nahfeldes und die Temperaturbedingung an der Grenze zum Zwischenbereich sind von besonderem Interes-





**Bild 6:** Das Temperaturnahfeld in Abhängigkeit von der relativen Infiltrationsrate  $Q^*$  und dem relativen Auftrieb  $B^*$  der Einleitung (MEHLHORN 1982)

se (Bild 5). Diese Größen wurden von MEHLHORN (1982) anhand numerischer und experimenteller Untersuchungen für einen großen Parameterbereich ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 6 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 Temperaturanomale 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.

## 6. GROSSRÄUMIGE WÄRMEAUSBREITUNG

### 6.1 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 der die Wärmeströme in das Liegende und in horizontaler Richtung als vergleichsweise klein vernachlässigt werden. Diese Annahme dürfte mindestens im stationären Endzustand zutreffend sein. Beschreibt man den stationären Wärmeaustausch durch die Deckschicht näherungsweise durch den linearen Ansatz gemäß Gleichung (6), dann erhält man für ein zur Zeit ( $t = 0$ ) zugegebenes Wasserpaket auf dessen Weg durch den Grundwasserleiter eine exponentielle Abklingfunktion der Temperaturdifferenz mit der Verweilzeit nach der Beziehung (KOBUS und MEHLHORN, 1980)

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_E} = e^{-\left(\frac{\lambda_1}{n_e \rho_w c_w m m_1}\right)t} \quad (10)$$

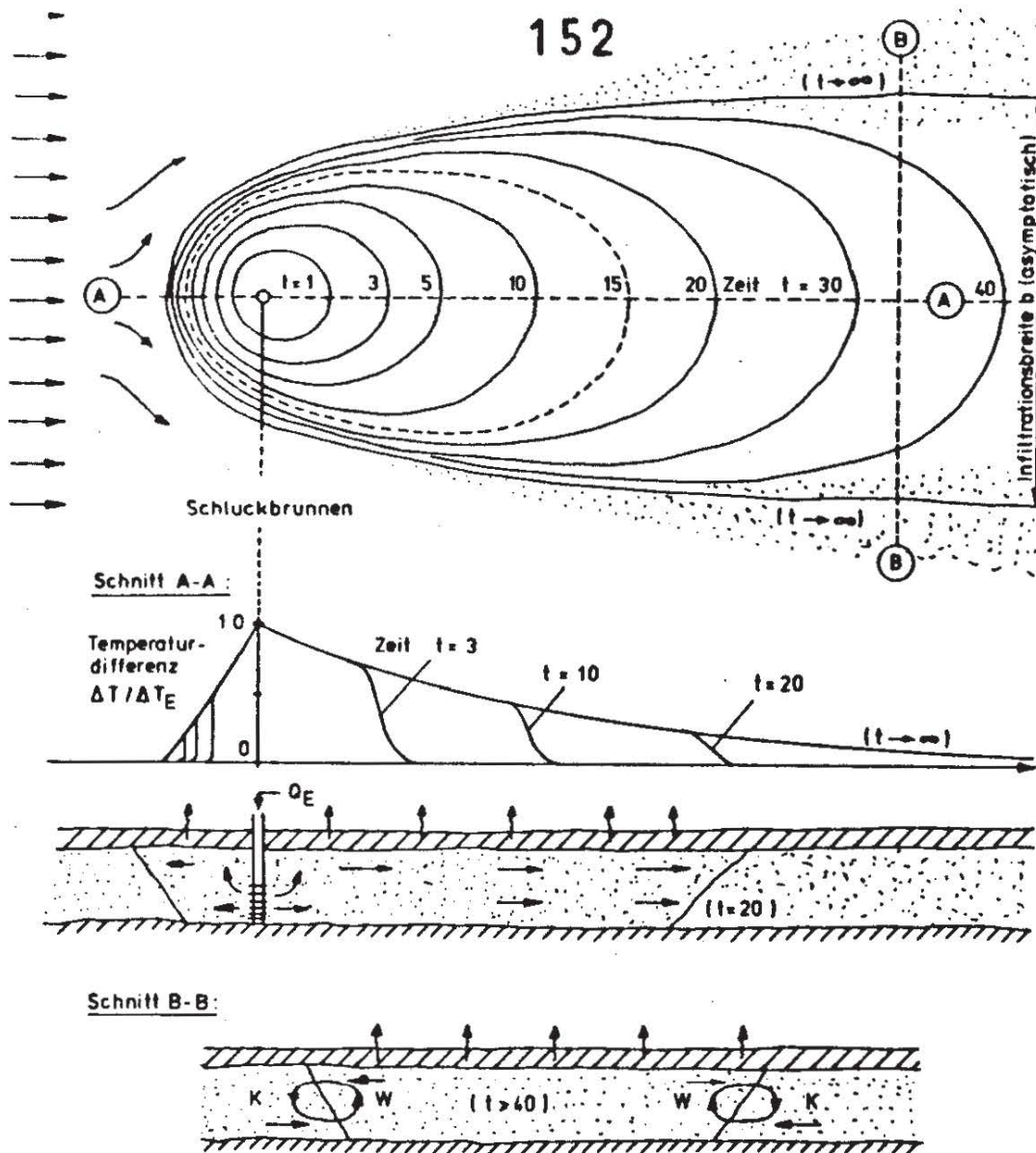
Diese Beziehung ist in Bild 7 dargestellt. Andererseits kann in einer stationären Strömung für jeden Punkt des Strömungsfeldes die mittlere Verweilzeit angegeben werden, die vom Zeitpunkt der Einleitung bis zum Erreichen des betrachteten Punkts verstrichen ist. Für einfache Strömungskonfigurationen können die Verweilzeiten analytisch berechnet 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 statio-







**Bild 8:** Schematische Darstellung des Wärmefelds eines Einzelbrunnens in einer Grundströmung

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.

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 Ver-



änderungen unterworfen ist, dann müssen Berechnungen mit Hilfe geeigneter horizontal-ebener numerischer Modelle angestellt werden.

## 6.2 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 5);
- 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.

In all diesen Fällen können erhebliche Abweichungen von den oben beschriebenen, 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 numerische Vergleichsrechnungen in einem Vertikalschnitt mit ausreichender Diskretisierung über die Tiefe (SÖLL und KOBUS, 1982), mit deren Hilfe der Grundwasserleiter besser charakterisiert werden kann.

## 6.3 Die Reichweite einer Temperaturanomalie

Zur Charakterisierung der Abmessungen der Temperaturanomalie im stationären Endzustand sei eine Reichweite definiert als diejenige Entfernung vom Infiltrationsbrunnen, in der die Temperaturdifferenz bis auf 5% des Einleitungswertes  $\Delta T_E$

abgebaut ist. Diese Entfernung ist vom Strömungsfeld abhängig, welches vom Betrag der relativen Infiltrationsrate  $Q^*$  gemäß Gleichung (7) charakterisiert wird.

Die analog definierte Dämpfungslänge für periodische Schwankungen ist stets kleiner als die Reichweite; mit wachsender Periode wird sie größer und erreicht im Grenzfall der stationären Einleitung den Wert der Reichweite (SÖLL und KOBUS, 1982).

## 7. HYDRAULISCHER UND THERMISCHER KURZSCHLUSS ZWISCHEN SCHLUCK- UND ENTNAHMEBRUNNEN

### 7.1 Hydraulischer Kurzschluß

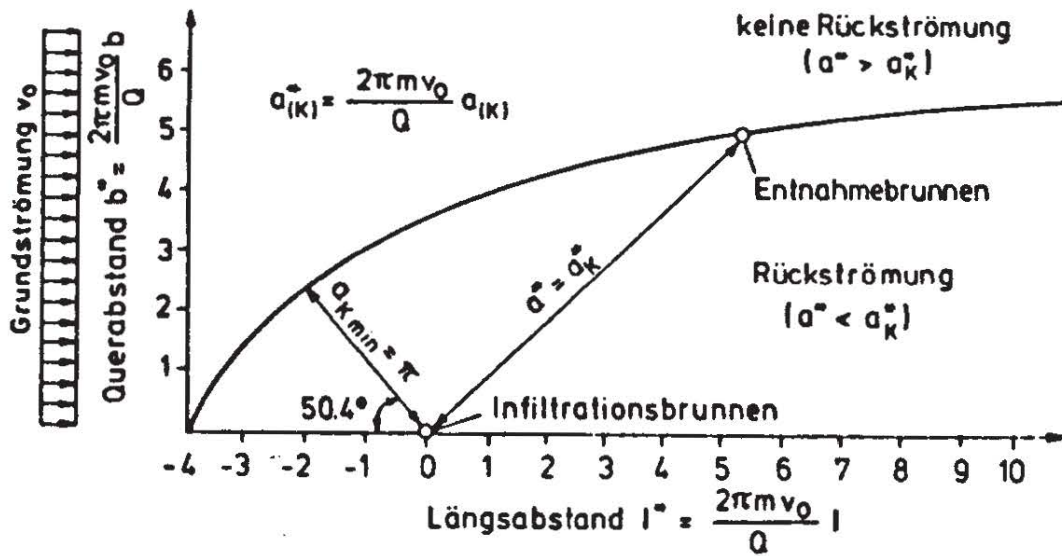
In der Regel wird das für thermische Nutzungen verwendete Grundwasser in einem Entnahmehrunnen gefördert und in einem Abstand  $a$  über einen Infiltrationsbrunnen zurückgeführt. Hierbei wird angestrebt, den Abstand  $a$  groß genug zu halten um einen hydraulischen und thermischen Kurzschluß zu vermeiden, da sich dieser nachteilig auf den Wirkungsgrad der Anlage auswirkt. Die bisherigen Überlegungen gingen stets davon aus, daß der Entnahmehrunnen in genügend großem Abstand vom Infiltrationsbrunnen liegt.

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 9 zeigt in dimensionsloser Form den jeweils kritischen Abstand für verschiedene Anordnungen relativ zur Grundströmung, und Bild 10 gibt für kleinere Abstände den jeweiligen Rückströmanteil an. Mit Hilfe dieser Diagramme kann der hydraulische Kurzschluß beurteilt werden, solange keine ausgeprägte Schichtenströmung auftritt; eine solche macht Kurzschlußströmungen auch über größere Entfernungen möglich.

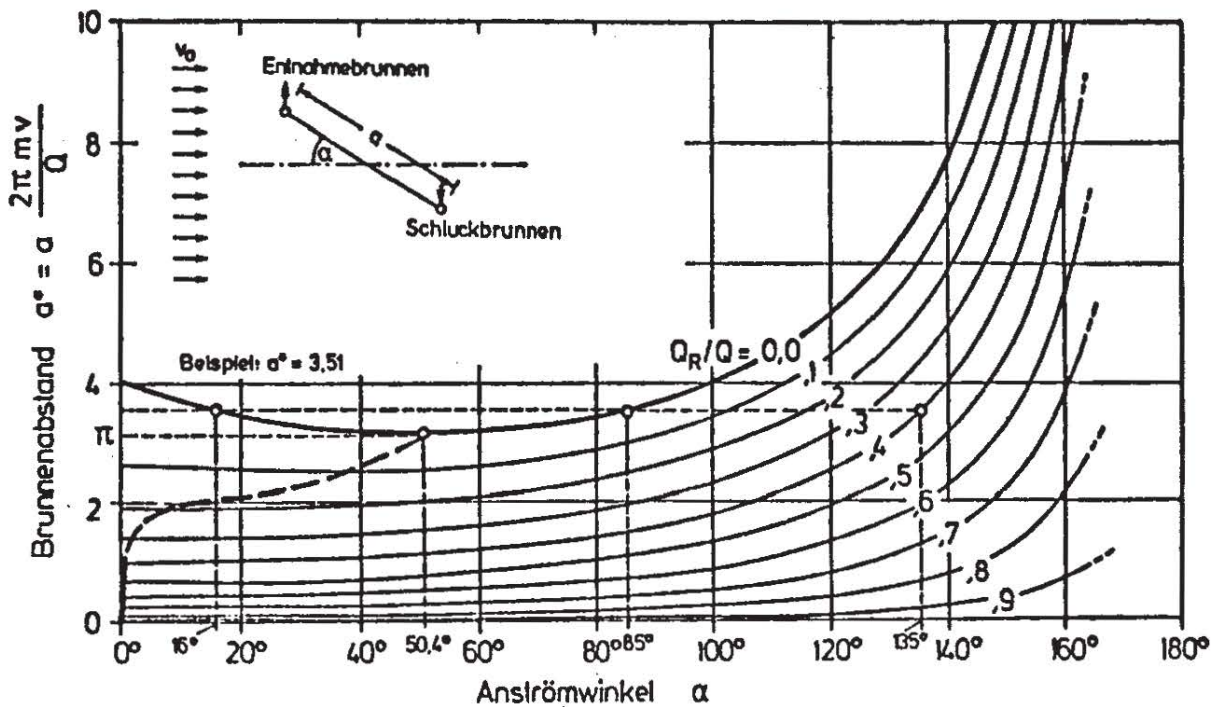
### 7.2 Thermischer Kurzschluß

Bei Einleitungen mit Temperaturunterschieden ist ein hydraulischer Kurzschluß zwangsläufig auch mit einem thermischen





**Bild 9:** Kritischer Abstand zwischen Schluck- und Entnahmekunnen (MEHLHORN, SPITZ und KOBUS 1981)



**Bild 10:** Rückströmratén zwischen Schluck- und Entnahmekunnen in Abhängigkeit von deren Anordnung (MEHLHORN, SPITZ und KOBUS 1981)

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 hydraulische "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.

### 7.3 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:

$$E_R/E_O = (Q - Q_R)/Q \quad (11)$$

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

$$\Delta T_{E,R}/\Delta T_{E,O} = Q/(Q - Q_R) \quad (12)$$

- 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.

## 8. REGIONALE WÄRMEBILANZMODELLE

Die Kapitel 5 bis 7 beziehen sich auf die elementare Konfiguration eines einzelnen Infiltrationsbrunnens in einer stationären, gleichförmigen Grundwasserströmung. Eine unmittelbare Zielsetzung dieser Arbeiten ist es, 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 anhand von Kapitel 5 näherungsweise eingegrenzt und gegebenenfalls 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 Wärmeeinleitung 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 strombanen 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.
- KAPPELMAYER, O., und HAENEL, R. (1974): *Geothermics with special reference to applications*. *Geoexploration Monographs*, Series 1, No.4, Bornträger, Stuttgart-Berlin, 1974.