

3 Modellierung des großräumigen Wärmetransports im Grundwasser

Modelling of large-scale heat transport in groundwater

Thomas Söll und Helmut Kobus

Kurzfassung

Die natürlichen Temperaturverhältnisse im Untergrund werden durch anthropogene Einflüsse und insbesondere durch hydraulische und thermische Nutzungen des Grundwassers verändert. Die Planung entsprechender Grundwasserbewirtschaftungsmaßnahmen erfordert Wärmetransportmodelle, welche eine Beschreibung des großräumigen Wärmetransports im Untergrund ermöglichen. Ziel des vorliegenden Beitrags war daher die Entwicklung und Erprobung numerischer Mehrschichtenmodelle, die zur Beschreibung der durch punktförmige Wärmequellen und -senken verursachten Temperaturveränderungen dienen können. Die Besonderheiten des großräumigen Wärmetransports und der in der Regel vorherrschende Mangel an Daten zwingen hierbei zur Mittelwertbildung und zu problemorientierten Vereinfachungen bei den Lösungsansätzen und der Modelldimensionalität.

Für die Berechnung des Wärmetransports wurde sowohl ein vertikal-ebenes Stromstreifenmodell als auch ein horizontal-ebenes Mehrschichtenmodell entwickelt. Das vertikal-ebene Stromstreifenmodell basiert auf der Charakteristikenmethode und simuliert den Wärmetransport entlang eines Stromstreifens in einem beliebig geschichteten Grundwasserleiter. Dem horizontal-ebenen Mehrschichtenmodell liegt ein Ersatzsystem zugrunde, in welchem der Grundwasserleiter selbst durch zwei mobile Schichten repräsentiert wird und hierbei durch die immobile Deckschicht einerseits und das immobile Liegende andererseits eingegrenzt wird. Mit Hilfe dieser Konfigurationen können in den Modellansätzen jeweils die wesentlichen Wärmetransport-, Wärmeaustausch- und Wärmespeicherprozesse erfaßt werden.

Aufgrund der Entwicklungszeiten großräumiger Temperaturanomalien von mehreren Jahren bis Dekaden werden quasistationäre natürliche Strömungsverhältnisse angesetzt. Wärmeaustausch- und -speicherprozesse in den Deckschichten und im Liegenden werden mit Hilfe eindimensionaler Quell-Senkenansätze beschrieben.

Bei der numerischen Berechnung wird zunächst für gegebene stationäre Strömungsrandbedingungen mit Hilfe des Druckfeldmodells die Piezometerhöhen- bzw. Druck-

höhenverteilung approximiert und hieraus mit dem Bahnlinienmodell das stationäre Geschwindigkeitsfeld berechnet. Mit diesem Feld wird anschließend der zeitabhängige Wärmetransport in jeweils aufeinanderfolgenden konvektiven und dispersiven Rechenschritten ermittelt.

Den hydraulischen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Schluck- und Entnahmebrunnen kommt in der Praxis besondere Bedeutung zu. Deshalb wurde ein numerisches Verfahren entwickelt, das die Berechnung der gegenseitigen hydraulischen Beeinflussungen von Schluck- und Entnahmebrunnensystemen ermöglicht.

Das Anwendungsspektrum der Wärmetransportmodelle wird anhand mehrerer Beispiele aufgezeigt: Wirksamkeit einer Stockwerkstrennung von Entnahme und Zugabe zur Minderung eines thermischen Kurzschlusses; thermische Beeinflussung eines Wasserwerks durch eine Kühlwassereinleitung; Abschätzung des nutzbaren Wärmeenergiepotentials in Bereichen mit (geogen oder anthropogen) erhöhten Grundwassertemperaturen.

Summary

The natural temperature distribution in the subsurface is changed by anthropogenic influences and in particular by hydraulic and thermal uses of groundwater. The planning of corresponding groundwater resources management requires heat transport models which describe the large-scale heat transport in the subsurface. The aim of this contribution was therefore the development and testing of numerical multilayer models, which can serve for the description of temperature changes due to local heat sources and sinks. The specific characteristics of large-scale heat transport and the usual lack of data require necessarily the use of averages and of problem-oriented simplifications in the model concepts and the model dimensionality.

The natural groundwater temperature field is described in section 3.2, as well as the temperature changes due to anthropogenic influences. Section 3.3 contains the calculation concepts including the problem-oriented approximations as well as a survey of the hydrothermal parameters.

Approximations for determining anthropogenic temperature anomalies and hydraulic interactions are treated in section 3.4. The parameters for cooling length and cooling time are defined (figure 3.2), and an estimation of the cooling length of anthropogenic temperature anomalies with one-dimensional analytical solutions is derived.

The hydraulic and/or thermal interactions between various infiltration- and withdrawal wells is of particular relevance in practical applications. Therefore, a numerical scheme has been developed, which allows the calculation of the respective hydraulic interactions between infiltration- and withdrawal well systems.

For the calculation of heat transport, section 3.5 contains the development of both a vertical-cut two-dimensional stream tube model and a horizontal-plane multi layer model. The vertical-cut stream tube model is based on the method of characteristics and simulates the heat transport along a stream tube in an arbitrarily layered aquifer

(figure 3.5). The horizontal-plane multi layer model represents a simplified system, in which the aquifer itself is represented by two mobile layers, which are bounded by the immobile surface layer on the one hand and the immobile aquifer base on the other hand (figures 3.6 to 3.8). With the help of these configurations, the model concepts can each reproduce the essential heat transport, heat exchange and heat storage processes in the subsurface.

Due to the fact that the development of large scale temperature anomalies requires several years to decades, quasi-steady natural flow conditions are assumed. Heat exchange and storage processes in the cover layer and in the aquifer base are described by means of one-dimensional source-sink terms (figure 3.9).

In the numerical calculation, as described in figure 3.6, at first the pressure field model is used for given steady flow boundary conditions to calculate the piezometer head respectively pressure head distribution in the field, and from this the stream line model calculates the steady velocity field and the path lines. In this flow field, subsequently the time-dependent heat transport is computed in a succession of convective and dispersive calculation steps.

The spectrum of possible applications of the heat transport models is illustrated by several examples in section 3.6. The first case shows the calculation of the thermal interaction between a discharge- and an injection well which are located at a horizontal distance leading to a return flow (short circuit) if the wells are located within the same aquifer (figure 3.12). The effect of a vertical separation of the discharge – and injection horizons in a layered aquifer is also discussed (figure 3.13). The second example gives an estimation of the thermal effects of an industrial cooling water discharge into the groundwater upon the raw water of a water supply plant (figures 3.15 and 3.16). Finally the possibilities for management of groundwater and subsurface temperatures in a metropolitan region with a number of different groundwater users are illustrated (figures 3.17 to 3.21, table 3.2).

General conclusions are given in section 3.7.

Applications of the heat transport models to several field case investigations are described in Chapter 8 of the book.

3.1 Einleitung

Grundwassertemperaturen werden durch Siedlung und Industrie sowie auch durch Grundwassernutzungen in vielfältiger Weise von Menschen beeinflusst. Die hieraus resultierenden Veränderungen gegenüber dem natürlichen Zustand werden als anthropogene Temperaturanomalien bezeichnet.

Den thermischen Einfluß der Besiedelung auf die Grundwassertemperaturen im Bereich von Köln, Duisburg und Karlsruhe haben Balke (1974), Heitfeld et al. (1981) sowie Hötzl und Makurat (1981) gezeigt (Grundwassertemperaturen bis ca. 20° C). Vergleichbare Temperaturerhöhungen sind für den Untergrund der Stadt München (Höllein et al. 1983) und den Großraum Straßburg (Merheb 1984) dokumentiert. Eine erste Wärmeenergiebilanz wurde für den Karlsruher Untergrund von Lofi et al. (1977) erstellt. Als die wichtigsten anthropogenen Faktoren zeigten sich hierbei neben dem Abwasserkanalnetz und der Oberflächenversiegelung deutliche Einflüsse von industriellen Einleitungen erwärmten Brauchwassers in das Grundwasser. Durch den Wärmeintrag oder -entzug durch Direkteinleiter können aufgrund der hohen spezifischen Wärmefracht des Wassers beträchtliche lokale Temperaturanomalien verursacht werden (Balke 1979; Kobus 1979; Kobus und Mehlhorn 1980).

Eine Nutzung von Grundwasserwärme erfolgt durch den Einsatz von Grundwasserwärmepumpen, deren Bedeutung für den Grundwasserwärmehaushalt z.B. von DVWK (1983), Kobus (1979), Kobus und Mehlhorn (1980) diskutiert wird, sowie auch durch die saisonale Speicherung von Wasser, das mit Solarenergie erwärmt wurde, in einem Grundwasserstockwerk mit vernachlässigbarer Grundströmung (Sauty et al. 1982a,b; Tsang und Doughty 1985).

Die wichtigsten Fragen, die im Zusammenhang mit der Ausbildung von Temperaturanomalien oder mit der Nutzung der Grundwasserwärme zur Primärenergieeinsparung auftreten, lauten:

- Ist bei der Planung technischer Anlagen für Warm- oder Kaltwassereinleitungen sichergestellt, daß kein hydraulischer oder thermischer Kurzschluß zwischen Entnahme- und Schluckbrunnen auftritt? Welche Möglichkeiten bestehen zur Verhinderung bzw. Minderung eines anlageinternen thermischen Kurzschlusses?
- Welche räumliche Erstreckung erreicht eine Temperaturanomalie und wann wird der stationäre Endzustand erreicht?
- Welche Auswirkungen haben anthropogene Temperaturveränderungen auf die Grundwasserqualität?
- Welche wechselseitigen Beeinflussungen treten zwischen jetzigen oder zukünftig geplanten Anlagen auf?
- Welche Möglichkeiten zur Nutzung der gespeicherten Wärmeenergie bestehen?
- Ergeben sich bei einer thermischen Nutzung des Grundwassers Konflikte mit den in der Regel vorrangigen Belangen der Trinkwasserversorgung?
- Kann eine gegenseitigen Beeinflussung von Grundwassernutzungen, bei denen Grundwasser einerseits zur Wärmeengewinnung und andererseits zur Wärmeentsor-

gung verwendet wird, quantifiziert und für eine optimale Betriebsweise genutzt werden?

Die Beantwortung dieser Fragen setzt voraus, daß die Ausbreitung und der Transport von Wärme in Grundwasserleitern berechnet werden kann. Aufbauend auf den Arbeiten (Kobus 1983a,b) war deshalb das Hauptziel des Forschungsvorhabens die Entwicklung problemorientierter, vereinfachter Wärmetransportmodelle als Berechnungsinstrumentarium, das zur Beantwortung der obigen Fragestellungen sowie für die Entwicklung von Strategien für eine gezielte Nutzung des Grundwassers und für eine Bewirtschaftung der Grundwasserwärme herangezogen werden kann. Für die praktische Anwendung liegt hierbei eine der Hauptschwierigkeiten in der Beschaffung geeigneter Naturdaten. Dies betrifft sowohl die Erkundung der hydraulischen und hydrothermischen Untergrundeigenschaften des Untersuchungsgebiets als auch die Differenzierung der anthropogenen Temperaturabweichungen im Feld gegenüber dem natürlichen Zustand.

3.2 Natürliche Grundwassertemperaturen und deren Veränderung durch anthropogene Einflüsse

3.2.1 Näherungsweise Beschreibung des geogenen Temperaturfeldes

Das natürliche Temperaturfeld im Untergrund wird durch den vertikalen Wärmeenergieaustausch über die Bodenoberfläche einerseits und durch den geothermischen Wärmestrom andererseits bestimmt. Bei oberflächennahen Grundwasserleitern dominiert der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre, der von den meteorologischen Bedingungen abhängt und einen ausgeprägten und typischen Jahresgang aufweist. Der Beitrag des geothermischen Wärmestroms zum Temperaturhaushalt des oberflächennahen Grundwassers ist dagegen vernachlässigbar klein.

Maßgebend für das Temperaturgeschehen im Grundwasser ist der zeitliche Verlauf des Bodenwärmestroms infolge Wärmeleitung und Konvektion. Dabei ist – abgesehen vom Nahbereich infiltrierender Oberflächengewässer oder Gebieten mit lokal erhöhten Sickerwasserzutritten (z.B. Schmelzwasser) – der Wärmeleitungsanteil im Regelfall gegenüber dem konvektiven Wärmeeintrag dominant (Grima 1984).

Abgesehen von klimatischen Veränderungen halten sich bei längeren Betrachtungszeiträumen (z.B. Dekaden) die geogenen Wärmeein- und -austräge an der Bodenoberfläche energiebilanzmäßig die Waage. Ab Flurabständen von etwa 10 bis 15 Metern herrscht eine zeitlich weitgehend konstante Temperatur im Untergrund vor, die in etwa dem Jahresmittel der Lufttemperatur des Gebiets entspricht oder geringfügig (1–2 K) darüberliegt. Für Mitteleuropa kann ein Wert im Bereich von 8 bis 12° C als repräsentativ gelten (Balke 1974).

3.2.2 Bestimmung anthropogener Temperaturanomalien

Schon eine geringe anthropogene Veränderung des jahreszeitlichen Wärmeaustauschs zwischen Atmosphäre und dem Boden kann zu einer deutlichen Veränderung des natürlichen Temperaturgleichgewichts im Untergrund führen und eine dauerhafte Erwärmung oder Abkühlung des Grundwassers zur Folge haben.

Die Ermittlung der anthropogenen Temperaturabweichungen muß stets indirekt erfolgen, da es prinzipiell unmöglich ist, an einem Feldpunkt im Untergrund sowohl den anthropogen veränderten Istzustand als auch den geogenen Gleichgewichtszustand der Temperatur zu bestimmen.

Folglich ist man dazu gezwungen, die gesuchte Zielgröße (anthropogene Temperaturabweichung) aus einem Vergleich von Temperaturwerten zu bilden, die entweder zu unterschiedlichen Zeitpunkten an demselben Ort (Methode 1) oder aber an verschiedenen Punkten zeitgleich (Methode 2) ermittelt wurden. Bei beiden Vorgehensweisen setzen sich die Temperaturdifferenzen streng genommen immer aus einem anthropogenen Anteil und einem (unbekannten) geogenen Anteil zusammen. Letzterer ist von den örtlich oder zeitlich variierenden hydrothermischen Parametern des Untersuchungsgebiets und den lokalen Wärmeströmen abhängig und kann demzufolge auch an eng benachbarten Punkten verschieden sein. Ein stark voneinander abweichendes zeitliches Verhalten zeigen beispielsweise die natürlichen Grundwassertemperaturen im Ober- und Unterstrom von infiltrierenden Oberflächengewässern (siehe auch Kap. 8).

Eine direkte Bestimmung der anthropogenen Temperaturabweichung ist dann möglich, wenn die geogenen Temperaturschwankungen im interessierenden Betrachtungszeitraum vernachlässigbar sind (Trivialfall). Sofern mit geogenen Temperaturveränderungen zu rechnen ist (Regelfall), muß bei der Auswertung der Methode 1 vorausgesetzt werden können, daß der zeitliche Verlauf der natürlichen Grundwassertemperaturen (Temperaturganglinie) von möglichst vielen Jahreszyklen vorliegt, um unter Zuhilfenahme statistischer Untersuchungsmethoden (Trendanalyse, Frequenzanalyse) eine Extrapolation der Temperaturvergangenheit auf die Gegenwart durchführen zu können. Im allgemeinen ist jedoch die Temperaturvorgeschichte nicht bekannt, so daß sich nach einer Bestandsaufnahme der hydrogeologischen Verhältnisse örtliche Unterschiede hinsichtlich des Wärmeeintrags in der Praxis mit einer geringeren Fehlerquote abschätzen lassen als die zeitlichen Variationen der Temperaturrandbedingungen; die anthropogenen Temperaturänderungen im Feld (Naturdaten) werden demzufolge üblicherweise nach der Methode 2 ermittelt.

3.3 Berechnungsansatz und Näherungen

3.3.1 Grundlagen

Die strömungsmechanischen Grundlagen und die hydrothermischen Gesetzmäßigkeiten des Wärmeenergie-transport- und -austauschs sind bekannt (Bear 1979; Carslaw und Jaeger 1959). Der Wärmeenergie-transport im Grundwasser erfolgt im wesentlichen durch Wärmeleitung, Konvektion und Dispersion (Sauty 1980). Die vergleichsweise große spezifische Oberfläche des porösen Untergrunds begünstigt einen raschen Wärmeaustausch des Wassers mit dem Korngerüst primär durch Wärmeleitung, so daß die Temperatur des Wassers und des Korns mit guter Näherung zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort identisch ist. Daß dies auch bei instationären Vorgängen in natürlichen Grundwasserleitern in aller Regel gut zutreffend ist, haben Mehlhorn und Kobus (1979) gezeigt. Die Differentialgleichung für den Wärmetransport im Grundwasser erhält man aus einer Wärmeenergiebilanzbetrachtung an einem Kontrollvolumen:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \frac{\rho_w c_w n_e \vec{v}_a T}{(\rho c)_G} - \operatorname{div} \frac{D_w + \lambda_{\text{eff}}}{(\rho c)_G} \operatorname{grad}(T) - \frac{w}{(\rho c)_G} = 0 \quad (1)$$

Ihre Lösung erfordert die Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen für das Temperaturfeld und die Kenntnis des gesamten Strömungs- bzw. Druckfeldes

$$\operatorname{div} \left[\frac{k_0}{v_w \rho_w} (\operatorname{grad} p + \rho_w g \vec{e}_z) \right] - q' = 0 \quad (2)$$

welches über die Zustandsgleichungen für die Dichte $\rho_w = f_1(T)$ und die Zähigkeit $v_w = f_2(T)$ mit dem Temperaturfeld gekoppelt ist.

Eine annähernd exakte Lösung des obigen nichtlinearen Systems zweier partieller Differentialgleichungen mit nichtkonstanten Koeffizienten ist mit Hilfe numerischer Modelle möglich. Dreidimensionale Wärmetransportmodelle, die bisher entwickelt wurden (IGWMC 1982), dienen primär systematischen Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen, bei denen die Modellparameter als bekannt vorausgesetzt werden und mit denen das Verständnis für die physikalischen Wärmetransport- und -speicherprozesse gefördert werden sollte. Beispiele hierfür sind Untersuchungen zum Ablauf von Zweiphasenströmungen bei der Erdölförderung, zu temperaturbedingten Schichtenströmungen (Mehlhorn 1982) oder zum Betriebsverhalten von Grundwasserwärmespeichern (Doughty et al. 1982; Pelka 1985; Tsang und Doughty 1985).

In der Praxis ist jedoch eine Vielzahl der benötigten Werte für die Parameter und Temperaturrandbedingungen nicht bekannt, so daß eine exakte Berechnung von natürlichen Temperaturfeldern im Grundwasser prinzipiell nicht erreichbar ist. Statt dessen muß im Hinblick auf die verfügbaren Daten ein idealisiertes (vereinfachtes)

Modell des Untergrundes erstellt werden, in welchem wegen der erforderlichen Größe des Betrachtungsmaßstabs gemittelte großräumige Temperaturfelder berechnet werden.

Im folgenden wird deshalb die Entwicklung von Wärmetransportmodellen zur Abschätzung anthropogener Temperaturveränderungen im Grundwasser vorgestellt, die eine sinnvolle Approximation der im lokal bis kleinregionalen Skalenbereich dominanten Wärmetransportprozesse ermöglichen und deren Modelleingabeparameter mit den zur Verfügung stehenden Naturdaten verträglich sind.

3.3.2 Problemorientierte Vereinfachungen

Die wichtigsten hier getroffenen Vereinfachungen betreffen die Koppelung des Strömungs- und Temperaturfeldes. Es sind dies:

- Temperaturbedingte Auftriebseffekte und Temperaturschichtungen:
Der unmittelbare Nahbereich eines Schluckbrunnens, in dem bei Einleitungen mit Temperaturunterschieden die Wärmeausbreitung dreidimensional und extrem nicht-linear erfolgen kann (Mehlhorn 1982), muß aus Maßstabsgründen (Diskretisierung) von der eigentlichen Modellierung ausgeschlossen und bei den Temperaturrandbedingungen berücksichtigt werden. Außerhalb des Temperaturnahbereichs kann die Grundwasserströmung in der Regel horizontal eben betrachtet werden; temperaturbedingte Dichteeffekte bleiben in den hier entwickelten Wärmetransportmodellen generell unberücksichtigt ($\rho_w = \text{const.}$).
- Temperaturbedingte Durchlässigkeitsänderungen:
Temperaturveränderungen im Grundwasser führen prinzipiell zu Durchlässigkeitsänderungen im Untergrund, die ihrerseits auf das Druckfeld im Grundwasser zurückwirken. Da mit einer Durchlässigkeitserhöhung (bei Warmwassereinleitung) auch stets ein Abbau bestehender Druckhöhengradienten einhergeht (bei Kaltwassereinleitungen sind die Verhältnisse entsprechend umgekehrt), resultiert im Ergebnis eine vergleichsweise geringe Veränderung der (durch das Produkt beider Größen charakterisierten) Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Wärmefront. Die nicht berücksichtigten Abweichungen müssen in Relation zu den Abweichungen in den Geschwindigkeiten gesehen werden, welche durch die natürliche Heterogenität des Untergrundes vorgegeben sind. Demzufolge kann beim Vergleich von Modellrechnungen mit Felddaten der Fehler infolge einer unzulänglichen Repräsentation der k_f -Struktur im Modellansatz denjenigen infolge der Nichtberücksichtigung des Temperatureinflusses bei mäßigen Temperaturunterschieden bei weitem übersteigen. Unter diesem Gesichtspunkt wurden temperaturbedingte Durchlässigkeitsänderungen im Rahmen der Modellberechnungen vernachlässigt.
- Strömungsrandbedingungen:
Großräumige Temperaturanomalien im Grundwasser haben Entwicklungszeiten von Jahren bzw. Jahrzehnten. Demzufolge ist es gerechtfertigt, den Modellberech-

nungen ein quasistationäres (zeitlich gemitteltes) natürliches Strömungsfeld zugrunde zu legen und lediglich den Wärmeenergietransport instationär zu verfolgen. Die Druckwellenfortpflanzungsgeschwindigkeit im Grundwasser ist bedeutend größer als die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Wärmeenergiefront. Zeitliche Veränderungen des Strömungsfeldes, die durch das An- und Abschalten von Brunnen hervorgerufen werden, können somit mit guter Näherung durch ein zeitliches Hintereinanderschalten einzelner stationärer Strömungsfelder erfaßt werden.

- Wärmeaustausch- und -speicherprozesse:

Der Wärmeaustausch des Grundwasserleiters mit der Atmosphäre bestimmt das Abklingen der Temperaturveränderungen im Endzustand. Der größte Beitrag resultiert hierbei aus dem vertikalen Wärmestrom im Bereich der durch die Trennstromlinien definierten Temperaturfahne. Laterale und in den Untergrund gerichtete Wärmetransportprozesse sind demgegenüber im Endzustand wegen der vergleichsweise geringen Temperaturgradienten sekundär. Zu Beginn einer sich bildenden Temperaturanomale ist dagegen auch die Wärmespeicherung in den hangenden und liegenden Bodenschichten von Bedeutung, welche zu einer zusätzlichen Verzögerung der dynamischen Entwicklung von Temperaturanomalien führt. Bei den liegenden Bodenschichten überwiegt wegen der vergleichsweise geringen Temperaturgradienten zur Geländeoberfläche die Fähigkeit zur Wärmespeicherung und zur Konservierung der Temperaturvorgeschichte („Temperaturgedächtnis“). Diese Erscheinungen können mit guter Näherung durch einen eindimensionalen Quell- Senken-Ansatz erfaßt werden.

- Natürliche Grundwassertemperatur:

Mit Blick auf die mit zunehmender Tiefe unter der Geländeoberfläche exponentiell abklingenden geogenen Temperaturschwankungen (Carlslaw und Jaeger 1959; Gröber et al. 1963) und die Langfristigkeit thermischer Ausbreitungsprozesse im Grundwasser (Kobus et al. 1983) ist es häufig zulässig, die ungestörte Temperatur in der Modellrechnung dem Jahresmittelwert gleichzusetzen und Schwankungsanteile zu vernachlässigen.

3.3.3 Hydrothermische Kenngrößen

Eine Voraussetzung für die Eingrenzung und Quantifizierung anthropogener Temperaturanomalien in praktischen Anwendungsfällen ist die Kenntnis der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} und der spezifischen Volumenwärme ρc_G des Untergrundes. Hierunter werden in Analogie zur Durchlässigkeit k_f integrale Parameter verstanden, die die diffusiven Wärmetransport- und -speicherprozesse innerhalb des betrachteten Mittelvolumen summarisch beschreiben sollen. Erfahrungswerte sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Tab. 3.1. Wärmeleitfähigkeit und spezifische Volumenwärme von Stoffen und natürlichen Böden (aus Söll 1987a).

Heat conductivity and specific heat of materials and natural soils (from Söll 1987a).

Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ [J/s m K]	spezifische Volumenwärme ρc [MJ/m ³ K]
Wasser (20 °C)	0,6	4,2
Luft (trocken, 0 °C 760 Torr)	0,024	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Quarz	6,0	2,0
Quarzsand trocken	0,2–0,4	0,98–1,4
Quarzsand gesättigt	2,1–3,1	–
Sand feucht	0,704	1,15
Granit	2,9–4,1	2,0–2,2
	2,1	2,1–2,5
Sandstein	1,28–2,1	1,6–1,8
	1,375	1,8–2,0
	1,2–3,0	–
Kalkstein	1,2–2,2	2,1–2,2
	1,7–2,7	–
Sedimentgesteine (Sandstein, Muschelkalk)	2,3	–
Muschelkalk	2,6–3,3	–
Lehm	0,9–1,6	1,3–1,4
Ton, wenig Sand (49% feucht)	1,28	1,3
Lehm, schlammig	1,1	1,7
Ton, sandig	1,3–1,77	1,2
Schiefer	1,5–2,0	2,0–2,2
	1,5–3,7	–
Ackererde (sandig, 10% Wasser)	1,26	–

3.4 Näherungsansätze zur Eingrenzung anthropogener Temperaturanomalien und hydraulischer Wechselwirkungen

3.4.1 Abkühlänge und Abkühlzeit

Eine anthropogene Temperaturanomalie ist dadurch gekennzeichnet, daß ihr Temperaturniveau generell von dem ungestörten Temperaturfeld des Untergrundes abweicht. Zur eindeutigen Kennzeichnung einer anthropogenen Temperaturanomalie müssen daher zu jedem Zeitpunkt die auftretenden ortsspezifischen Temperaturerhöhungen oder -absenkungen an einem Feldpunkt gegenüber den geogenen Temperaturverhältnissen betrachtet werden. Letztere unterliegen ihrerseits Temperaturschwankungen.

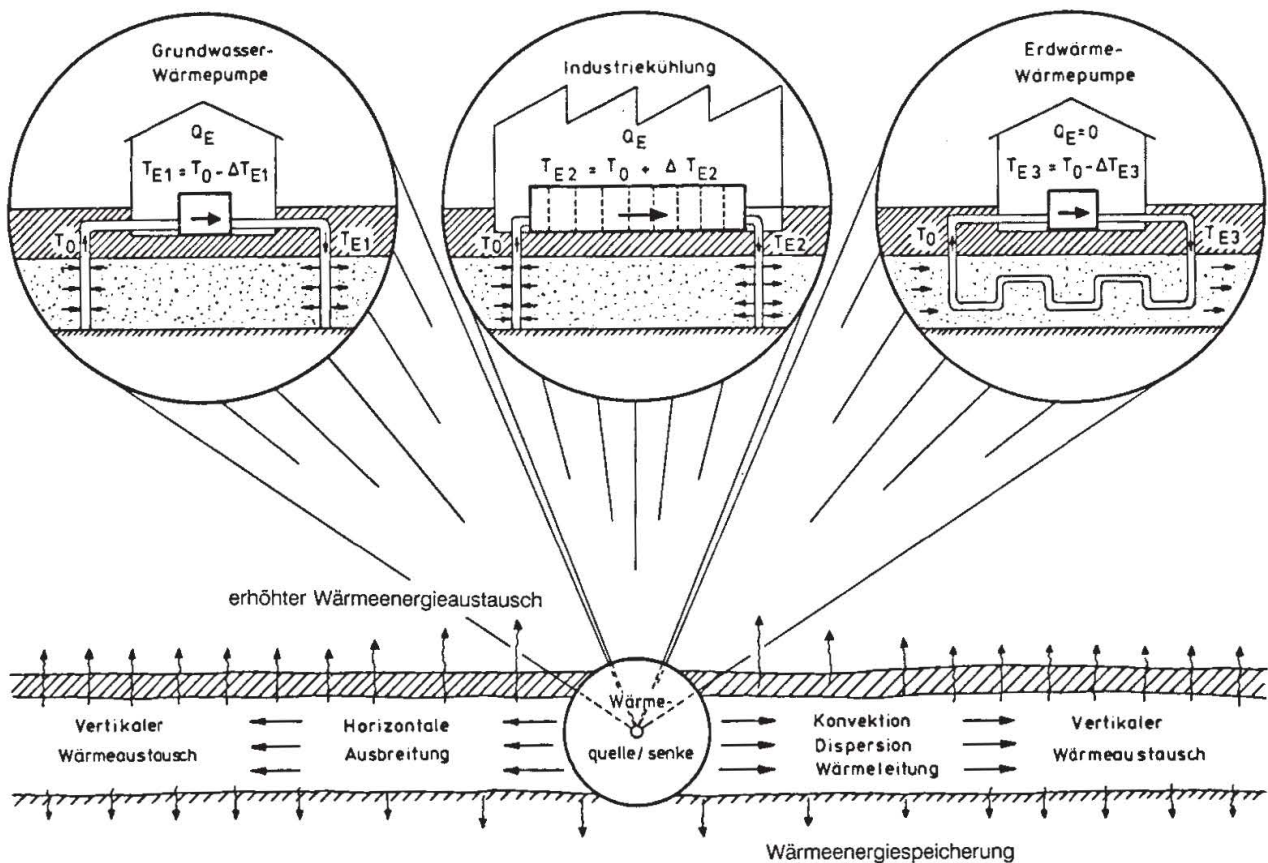


Abb. 3.1. Anthropogene Wärmeeinleitungen in das Grundwasser (Kobus 1983b).
Anthropogenic heat inputs into groundwater (Kobus 1983b).

Anthropogene Temperaturanomalien im Grundwasser sind die Folge anthropogener Wärmequellen und -senken (Abb. 3.1), die das natürliche Temperaturgleichgewicht stören. Eine elementare Wärmeenergiebilanzbetrachtung zeigt, daß bei stationärer Strömung und stationärer Wärmeenergiezugabe die Wärmeenergie zunächst im Grundwasser und im Gestein gespeichert wird. Dies führt bei kontinuierlicher Infiltration zu einer stetigen Vergrößerung der Anomalie, deren Hauptausbreitungsrichtung durch die Strömung vorgegeben ist. Dem wirkt limitierend der allseitige Wärmeaustausch des erwärmten oder abgekühlten Brauchwassers mit den umgebenden Bodenschichten entgegen. Maßgebend wird schließlich die Wärmeabgabe an die Atmosphäre, die von den vorherrschenden Temperaturgradienten zwischen Grundwasser und Bodenoberfläche und von der Größe der Austauschfläche (Ausdehnung der Anomalie) abhängt. Bei konstanter Energiezufuhr an der Quelle wird daher die Anomalie so lange anwachsen, bis ein Gleichgewicht zwischen der Energiezufuhr und der Abgabe an die Atmosphäre erreicht ist.

Sofern man in erster Näherung laterale Vermischungsprozesse außer Betracht läßt, ist bei tiefengemittelter Betrachtung der Strömung und der Temperatur die Geometrie der Austauschfläche bei dominantem konvektivem Transport durch den Trennstrom-

linienverlauf weitgehend definiert (Abb. 3.2). Ein eindeutiges Längenmaß der Temperaturanomalie in Strömungsrichtung kann jedoch nur dann definiert werden, wenn neben der Strömung auch der Wärmeaustausch des Brauchwassers mit seiner Umgebung mit in die Betrachtungen einbezogen wird und die Temperaturabweichungen im Abstrombereich der Fahne zu den maximalen Änderungen an der Wärmeenergiequelle in Bezug gesetzt werden.

Zur Kennzeichnung der Hauptabmessungen von Temperaturanomalien in Strömungsrichtung wird deshalb eine Abkühlänge L_a definiert als diejenige Entfernung von der anthropogenen Wärmequelle, bei der die Temperaturdifferenz ΔT bis auf 10% der Einleitungstemperaturdifferenz ΔT_E abgebaut ist (Abb. 3.2).

Die Größe der so definierten Temperaturanomalie ist sowohl vom absoluten Temperaturniveau T_E einer Brauchwassereinleitung als auch von der natürlichen Bezugstemperatur T_o des Grundwassers unabhängig, solange Nichtlinearitäten vernachlässigbar sind.

Zum Abbau der anthropogenen Temperaturveränderungen ist eine bestimmte Abkühlzeit t_a erforderlich. Die Abkühlzeit und die zugehörige Abkühlänge L_a korrelieren bei gegebenen Strömungsverhältnissen und bei dispersionsfreier Betrachtung eindeutig miteinander (Laufzeitenmethode).

Unter üblichen Einleitungsbedingungen wird zumeist kein stationärer Zustand erreicht, da sowohl die Einleitungsraten als auch die zugehörigen Temperaturdifferenzen zeitlich variieren können. Hierdurch werden innerhalb des Grundwasserbereichs und in den angrenzenden Bodenzonen (Deckschicht, Liegendes) instationäre Wärmespeicher- und -austauschvorgänge hervorgerufen, die mit zunehmender Frequenz der Randbedingungswechsel (Temperatur und/oder Strömung) an der Quelle einer verstärkten Dämpfung unterliegen.

Der Einfluß schwankender Einleitungstemperaturen T_E auf die Temperaturanomalie läßt sich in den Fällen (analytisch) quantifizieren, in denen die Einleitung langfristig mit einer konstanten Infiltrationsrate erfolgt und das Strömungsfeld insgesamt stationär ist.

Sofern die Temperaturganglinie an der Infiltrationsstelle in einen zeitlichen Mittelwert und eine Summe von periodischen Schwankungsanteilen zerlegt werden kann (z.B. Fourierreihenentwicklung), sind Näherungsverfahren nach dem Superpositionsprinzip von Teillösungen möglich.

Zur Kennzeichnung der Reichweite instationärer, periodischer Temperaturschwankungen in Strömungsrichtung läßt sich – analog zur Abkühlänge L_a – eine Dämpfungslänge L_d definieren als die Entfernung von der Wärmequelle, bei der die Schwankungsanteile ΔT_p bis auf 10% der einleitungsbedingten Amplituden $\Delta T_{E,p}$ abgebaut sind. Die Dämpfungslänge L_d von Temperaturschwankungen ist generell kleiner als die Abkühlänge L_a der Temperaturanomalie. Von Kobus et al. (1983) und Söll (1981a) werden hierzu eindimensionale Berechnungsverfahren auf der Grundlage der Laufzeitenmethode vorgestellt und an Beispielen erläutert.

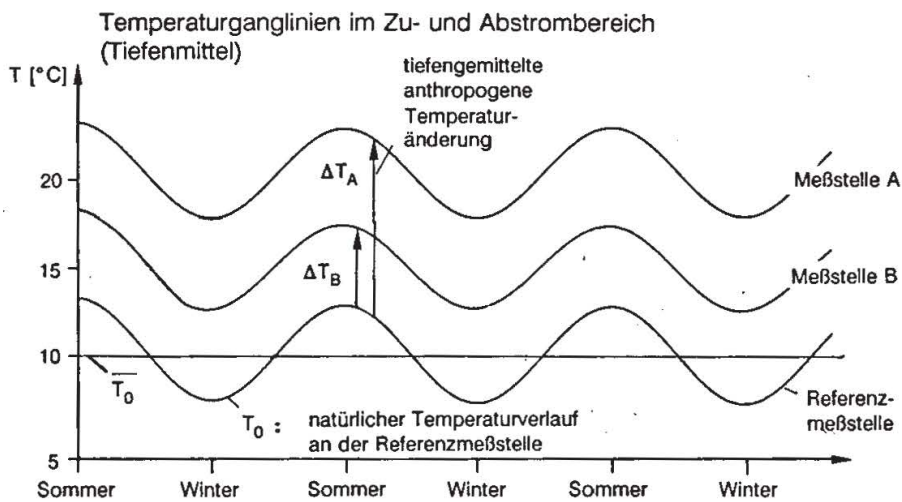
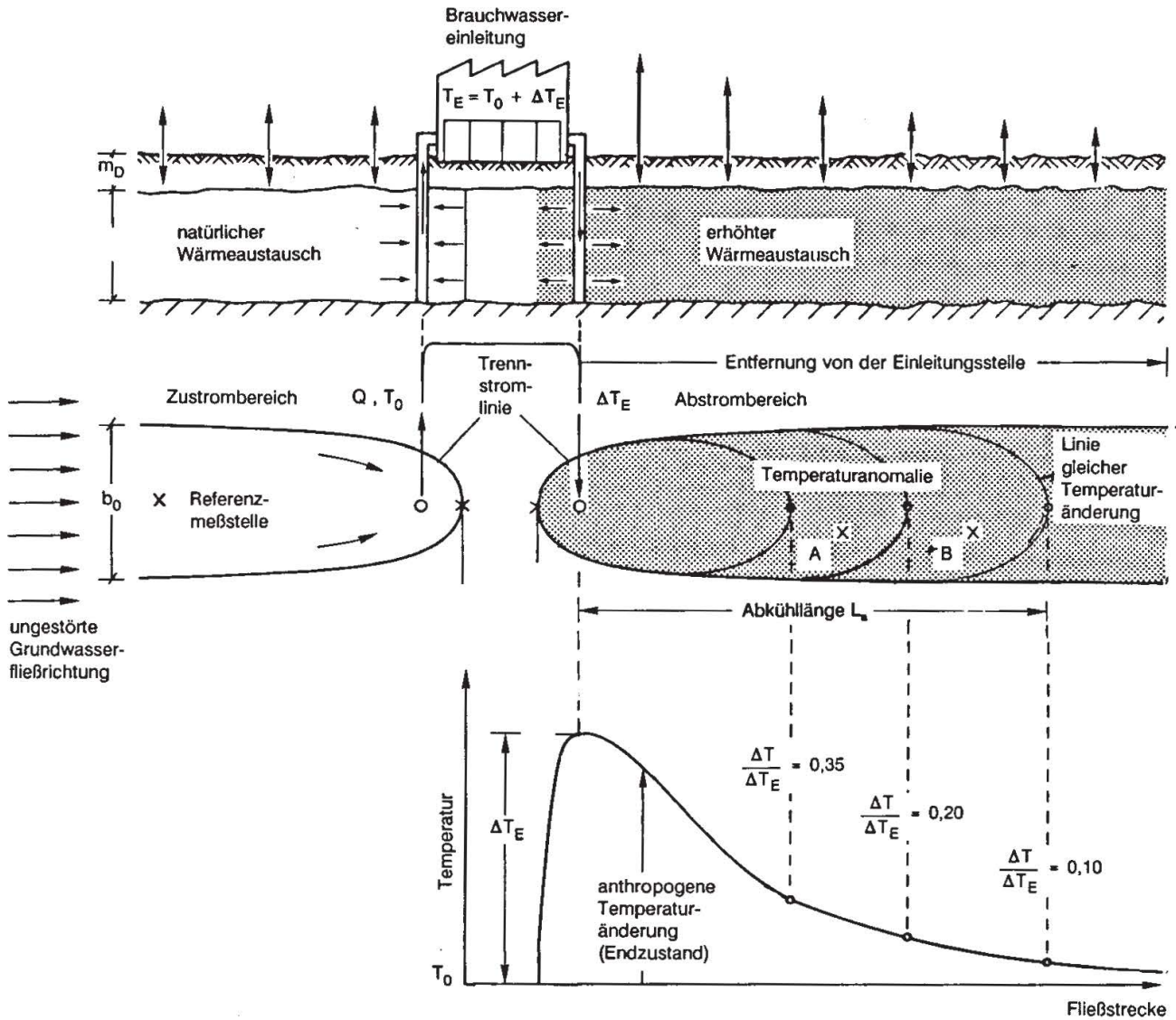


Abb. 3.2. Abkühlänge einer Temperatur-anomalie im Endzustand bei stationärer Wärmeenergie-zugabe. Zeitlicher Temperaturverlauf im Zu- und Abstrombereich.

Cooling length of an temperature anomaly in its final stage for continuous heat discharge. Temporal temperature development in approach and efflux region.

3.4.2 Abschätzung der Abkühlänge anthropogener Temperaturanomalien mit Hilfe eindimensionaler analytischer Lösungen

Unter stationären Strömungsverhältnissen gelingt für einfache Temperaturanfangs- und -randbedingungen eine direkte Integration der Wärmetransportgleichung. Geschlossene analytische Lösungen z.B. von Avdonin, Rubinstein, Ogata and Banks werden von Grima (1984), Noyer (1977) sowie Voigt und Häfner (1985) diskutiert und dienen z.B. bei Sauty et al. (1982a,b) und Söll (1987a) als Grundlage für dimensionslose Typkurvendiagramme bzw. Grenzwertabschätzungen.

Bei einer eindimensionalen Betrachtung kann die Wärmetransportgleichung (Gl. 1) für jede beliebige Stromlinie eines stationären Strömungsfeldes angesetzt werden. Eine elementare Wärmebilanzbetrachtung führt zu dem Ergebnis, daß das Abkühl- bzw. das Erwärmungsverhalten nach Abklingen instationärer Wärmeaustausch- und Wärmespeichervorgänge und bei vernachlässigbaren longitudinalen Vermischungsprozessen im Endzustand näherungsweise als Funktion der Verweilzeit t_a dargestellt werden kann (Kobus et al. 1983).

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_E} = e^{-\frac{\lambda_D \cdot t_a}{\rho_w c_w n_e m_G m_D}} \quad (3)$$

Die Umkehrfunktion der Gleichung (3) kann zur Berechnung der Abkühlzeit t_a einer Temperaturanomalie herangezogen werden. Die Frage, welche Abkühlänge der Temperaturanomalie sich hierbei letztendlich einstellt, hängt vom Strömungsfeld ab.

Bei Parallelströmung ($v_a = \text{const.}$) erhält man im Ergebnis eine einfach zu handhabende Formel für die Abkühlänge:

$$L_{a,P} = \frac{\rho_w c_w n_e m_G m_D v_a}{\lambda_D} \ln(10) \quad (4)$$

Bei ausschließlicher Radialströmung (Abstandsgeschwindigkeit entsprechend der Zylinderformel) führt eine analoge Rechnung zu dem folgenden Ausdruck:

$$L_{a,r} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \ln(10) \frac{\rho_w c_w Q_{\text{inf}} m_D}{\lambda_D}} \quad (5)$$

Der allgemeine Fall des Temperaturfeldes eines Infiltrationsbrunnens in einer natürlichen Grundströmung liegt zwischen den Grenzwerten einer Einleitung in einen ruhenden Grundwasserleiter (Radialströmung) und einer Einleitung in einen starken Grundwasserstrom (Parallelströmung). Das Temperaturfeld wird demzufolge durch die relative Abkühlänge

$$L_a^* = \frac{L_{a,P}}{L_{a,r}} = v_{fo} m_G \sqrt{\frac{\pi \ln(10)}{Q_{inf}} \cdot \frac{Q_w c_w}{\lambda_D / m_D}} \quad (6)$$

charakterisiert. Dieser Parameter gibt das Verhältnis der Abkühlängen bei Parallelströmung bzw. Radialströmung an und bestimmt, durch welches elementare Strömungsfeld die jeweilige Gegebenheit angenähert werden kann. Für $L_a^* \ll 1$ dominiert der radialsymmetrische Strömungsanteil; es ergibt sich eine kreisförmige Abkühlfläche mit dem Radius L_a . Im Fall $L_a^* \gg 1$ mit überwiegender Grundströmung ergibt sich eine linienförmige Erstreckung in Strömungsrichtung. Im Fall $L_a^* \approx 1$ tragen beide Strömungsanteile gleichermaßen zur Ausbreitung bei. In diesem Fall kann die Abkühlänge iterativ aus Gleichung (7) berechnet werden:

$$\frac{\ln(10) Q_w c_w m_G}{\lambda_D / m_D} = \frac{L_a}{v_{fo}} - \frac{Q_{inf}}{\pi v_{fo}^2 m_G} \ln \left[\frac{2 \pi v_{fo} m_G}{Q_{inf}} L_a + 1 \right] \quad (7)$$

3.4.3 Berechnung von hydraulischen Wechselwirkungen

Bei der Standortplanung von Grundwasserbrunnen ist die Frage der gegenseitigen Beeinflussung bereits bestehender oder geplanter Anlagen von zentraler Bedeutung. Zur Beantwortung der hiermit zusammenhängenden betriebstechnischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Fragen wird deshalb ein entsprechendes (numerisches) Verfahren zur Bestimmung des Trennstromlinienverlaufs und der Austauschraten für (beliebig) komplexe Strömungskonfigurationen benötigt. Die Entwicklung dieses Berechnungsverfahrens ist bei Söll (1987a,c) im einzelnen dargestellt. Das Berechnungsverfahren gliedert sich in folgende Schritte:

- Berechnung der Staupunkte,
- Untersuchung der Strömung im Umfeld der numerisch approximierten Staupunkte,
- Berechnung des großräumigen Trennstromlinienverlaufs,
- Berechnung von anteiligen Zustromraten aus der Trennstromliniengeometrie in Brunnennähe.

Die Kenntnis sämtlicher Staupunkte im Untersuchungsgebiet ist dabei die erste Voraussetzung für die Berechnung der Trennstromlinien und die Ermittlung der hydraulischen Einzugsgebiete der Schluck- oder Entnahmebrunnen.

Die Staupunkte eines Strömungsfeldes sind singuläre Stellen, an denen der Betrag des örtlichen Geschwindigkeitsvektors identisch Null ist sowie auch das Piezometerhöhengefälle in allen Richtungen gleich Null ist.

Im Rahmen des numerischen FD-Verfahrens zur Berechnung des Strömungsfeldes sind die Piezometerhöhen und die Geschwindigkeiten lediglich an den Knoten des Rechenrasters bzw. an den Grenzen des Rechenrasters bekannt. An allen anderen Stellen werden sie mit Hilfe der an diesen Stützstellen vorliegenden Werte durch Interpolation errechnet (siehe Abb. 3.3).

Im Rahmen der Staupunktsuche ist es das Ziel, den Ort mit dem Geschwindigkeitsminimum innerhalb eines Rechenrasters zu lokalisieren. Hierzu wird in den Zellen, die aufgrund der in ihrer Nachbarschaft vorherrschenden Geschwindigkeitsvektoren einen Staupunkt enthalten können, auf einem in beiden Richtungen zehnmals verfeinerten Suchraster die vorherrschende Geschwindigkeit ermittelt.

Der Ort mit der geringsten Geschwindigkeit bildet daraufhin noch zweimal den Mittelpunkt eines jeweils nochmals um den Faktor 10 verfeinerten Untersuchungsraums, in dem auf einem zehnfach verkleinerten Raster derselbe Algorithmus wiederholt wird (Zoomverfahren, Abb. 3.3). Ein Staupunkt wird somit bis auf ein Tausendstel der Größe des numerischen Rechenrasters (Zoomstufe 0) lokalisiert.

Die als Staupunkt in Frage kommenden Orte werden in einem zweiten Schritt einer Reihe von Plausibilitätskontrollen unterzogen. Als nicht plausibel gelten Stellen, falls eines der folgenden Kriterien zutrifft:

- der Ort liegt in einer nicht durchströmten Zone des Untersuchungsgebiets,
- der Abstand zum nächsten Brunnen ist kleiner als die Diskretisierung des Rechenrasters.

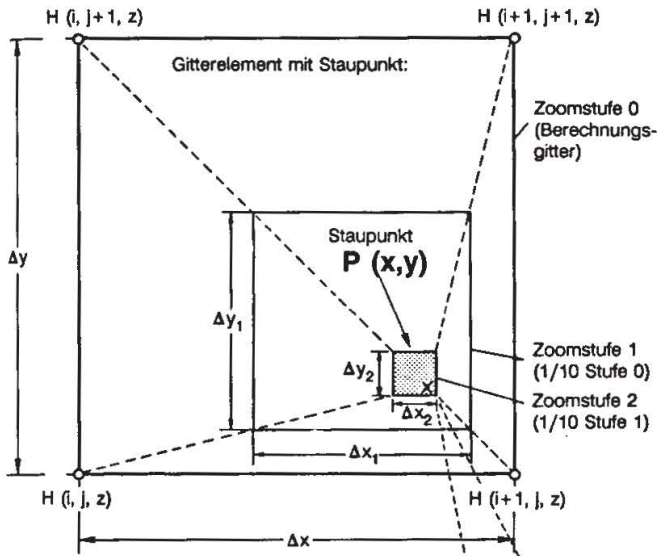
Zu einer abschließenden Beurteilung des Sucherfolgs wird überprüft, inwieweit unter den jeweiligen hydraulischen Strömungsbedingungen (mehrere Brunnen in Betrieb) an den plausiblen Orten eine deutliche Verminderung der Geschwindigkeit v_{\min} im Vergleich zum natürlichen Zustand ohne Brunnen v_0 eingetreten ist. Falls das Geschwindigkeitsverhältnis v_{\min}/v_0 kleiner als $1/1000$ ist, werden die Koordinaten des numerisch ermittelten Geschwindigkeitsminimums als Approximation für einen in unmittelbarer Nähe befindlichen Staupunkt herangezogen.

Die numerische Berechnung der Trennstromlinien beginnt im Umfeld der approximierten Staupunkte und gliedert sich in die Schritte

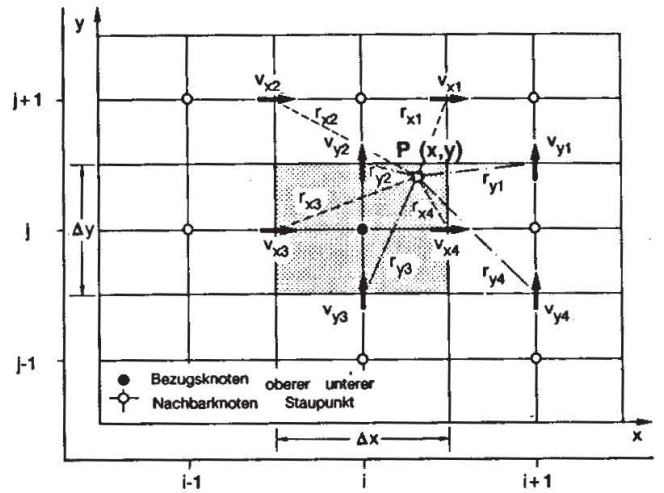
- Untersuchung der Geschwindigkeitsverhältnisse in der unmittelbaren Umgebung der numerisch approximierten Staupunkte,
- Ermittlung des großräumigen Verlaufs der Trennstromlinienäste mit Hilfe der Charakteristikenmethode.

Durch die Untersuchung der Strömung in der Nähe der Staupunkte wird die Zahl der auftretenden Trennstromlinienäste bestimmt. Zunächst wird um einen numerisch approximierten Staupunkt ein Kreis mit einem Radius von 1% der kleinsten Rasterabmessung gezogen, der den exakten Staupunkt einschließt und der als Startort für insgesamt 360 Tracerteilchen dient (Abb. 3.3). Ziel ist es, die Teilchen hinsichtlich ihrer Relativbewegung zum Staupunkt zu klassifizieren und diejenigen vier Teilchen zu

Prinzipbild der Zoomstufen



Interpolation der Geschwindigkeit



$$v_x(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{v_{xi}}{r_{xi}}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{r_{xi}}}$$

$$v_y(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{v_{yi}}{r_{yi}}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{r_{yi}}}$$

Untersuchung der Strömung in Staupunktnähe

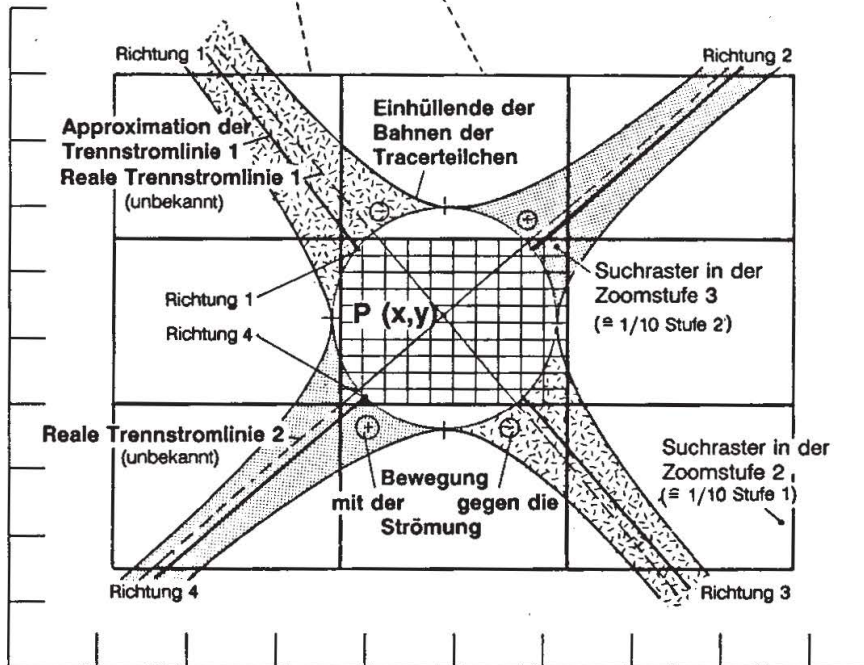


Abb. 3.3. Zoomverfahren zur Eingrenzung der Staupunkte und Ermittlung der Trennstromlinienäste.

Zooming procedure for zoning stagnation points and determination of dividing streamline branches.

identifizieren, die die vier Schnittpunkte der Trennstromlinienäste mit diesem Kreis am besten approximieren.

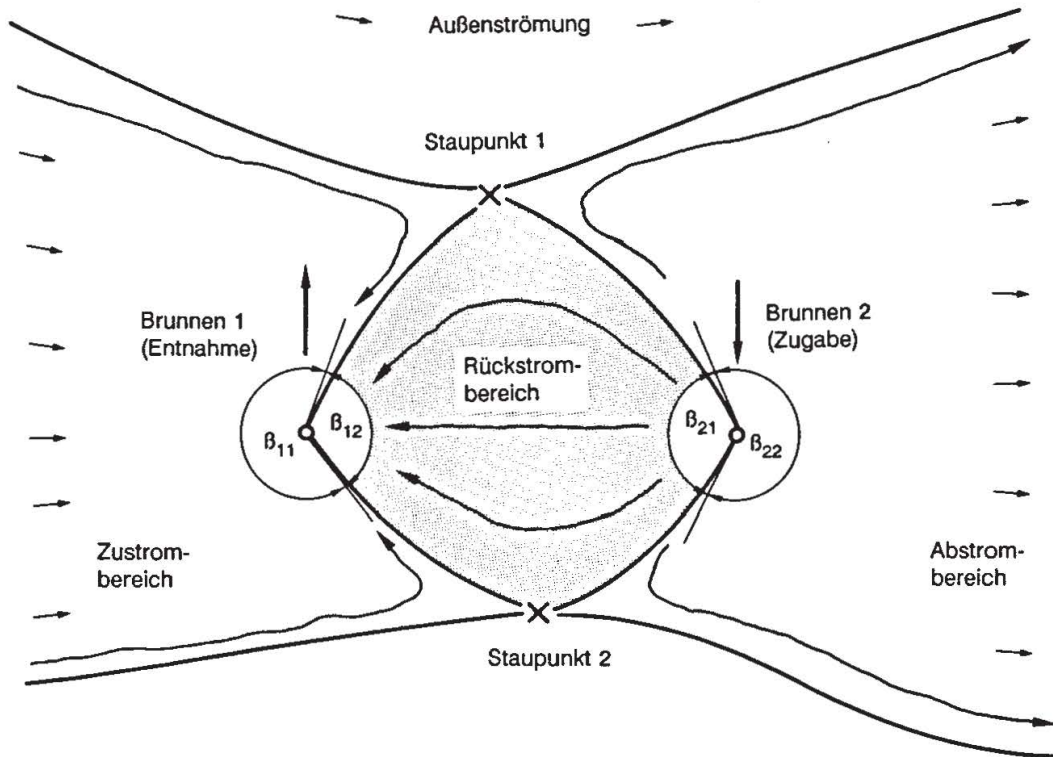
Zur Erkennung der Relativbewegung der Teilchen wird hierbei zunächst innerhalb einer Transportschleife (Söll 1987c) ein Wegschritt in Strömungsrichtung ausgeführt und überprüft, ob sich das Teilchen vom (numerischen) Staupunkt entfernt oder nicht. Im letzteren Fall wird das Teilchen an seinen Ausgangspunkt zurückversetzt und dann entgegen der Strömung bewegt. Dies stellt sicher, daß sich die auf dem Kreisumfang startenden Teilchen im Rahmen der Transportschleife in jedem Fall vom Staupunkt entfernen und sich dabei in der Nähe der zu diesem Zeitpunkt noch unbekanntem Trennstromlinienäste fortbewegen. Die Transportschleife wird abgebrochen, wenn die Teilchen sich mehr als die Länge der Diagonalen eines Rasterelements vom Startpunkt entfernt haben.

Anschließend werden die Teilchen entsprechend den unterschiedlichen Hauptrichtungen, die sie relativ zum Staupunkt einschlugen, nach Richtungsklassen sortiert, gefolgt von der Berechnung des mittleren Startwinkels bzw. -punktes innerhalb der einzelnen Richtungsklassen. Diese approximieren schließlich die Ausgangspunkte der Trennstromlinienäste auf dem Kreis um den Staupunkt.

Bei der folgenden Berechnung des großräumigen Trennstromlinienverlaufs werden somit innerhalb einer Transportschleife (mindestens) vier Tracerteilchen ausgehend von den ermittelten Startpunkten verfrachtet. Um möglichen Geschwindigkeitssprüngen Rechnung tragen zu können und zur Sicherung einer ausreichenden Diskretisierung der Trennstromlinien wird der Zeitschritt von dem Programm so angesetzt, daß der Wegschritt der Tracerteilchen kleiner ist als ein Viertel der kleineren Seitenlängen des Rechenrasters (vgl. auch Abschnitt 3.5.2.3). Die Positionen, die die Teilchen jeweils am Ende eines Schritts einnehmen, dienen zur Diskretisierung des gesuchten Trennstromlinienverlaufs. Sofern ein Teilchen in den Geschwindigkeitsnahbereich eines Brunnens gelangt (siehe Abschnitt 3.5.2.2), wird zu einer noch exakteren Verfolgung der Bahn des Teilchens der zulässige Wegschritt auf ein Zehntel des Rechenrasters herabgesetzt. Die Iteration wird dann noch so lange fortgeführt, bis der Abstand des Teilchens zur Brunnenachse kleiner ist als der Brunnenradius.

Am Brunnenrand kann die Strömung mit sehr guter Näherung als radialsymmetrisch angesehen werden, sofern der Grundwasserleiter dort isotrope und homogene Durchlässigkeitsverhältnisse aufweist. Unter diesen Bedingungen können die Öffnungswinkel der einzelnen Zu- und Abstromsektoren – wie in Abbildung 3.4 angegeben – in anteilige Zu- und Abstromraten umgerechnet werden. Die Zahl der Sektoren und die einzelnen Öffnungswinkel der Zu- und Rückstrombereiche werden näherungsweise mit Hilfe der Richtungswinkel der am Brunnenmantel endenden Trennstromlinienäste errechnet.

Ein für die praktische Anwendung wichtiger Vorteil des oben beschriebenen Verfahrens ist sein – im Vergleich zu anderen Methoden – geringer Rechenaufwand und die anschauliche graphische Darstellung der hydraulischen Wechselwirkungen anhand der Trennstromlinien.



Hydraulischer Anteil von/nach				
	Brunnen 1	Brunnen 2	Zustrombereich	Abstrombereich
Brunnen 1	-	$Q_1 \frac{\beta_{12}}{360}$	$Q_1 \frac{\beta_{11}}{360}$	-
Brunnen 2	$Q_2 \frac{\beta_{21}}{360}$	-	-	$Q_2 \frac{\beta_{22}}{360}$

Abb. 3.4. Quantifizierung der anteiligen Zustromraten aus der Trennstromliniengeometrie in Brunnennähe.

Quantification of flowrate contributions from the dividing streamline geometry near the well.

3.5 Numerische Schichtenmodelle zur Beschreibung des Wärmetransports im Grundwasser

3.5.1 Vertikal-ebener Modellansatz

Das vertikal-ebene Mehrschichtenmodell wurde problemspezifisch zum Studium des Wärmetransports in geschichteten Grundwasserleitern entwickelt (Abb. 3.5). Die Programmstruktur und die praktische Handhabung des Modells ist bei Söll (1987a) detailliert erläutert; demzufolge werden an dieser Stelle nur seine wesentlichen Merkmale hervorgehoben.

Das Modell basiert auf einem Charakteristikenverfahren, bei dem der Wärmetransport im Rahmen einer Zeitschleife iterativ durch aufeinanderfolgende konvektive und

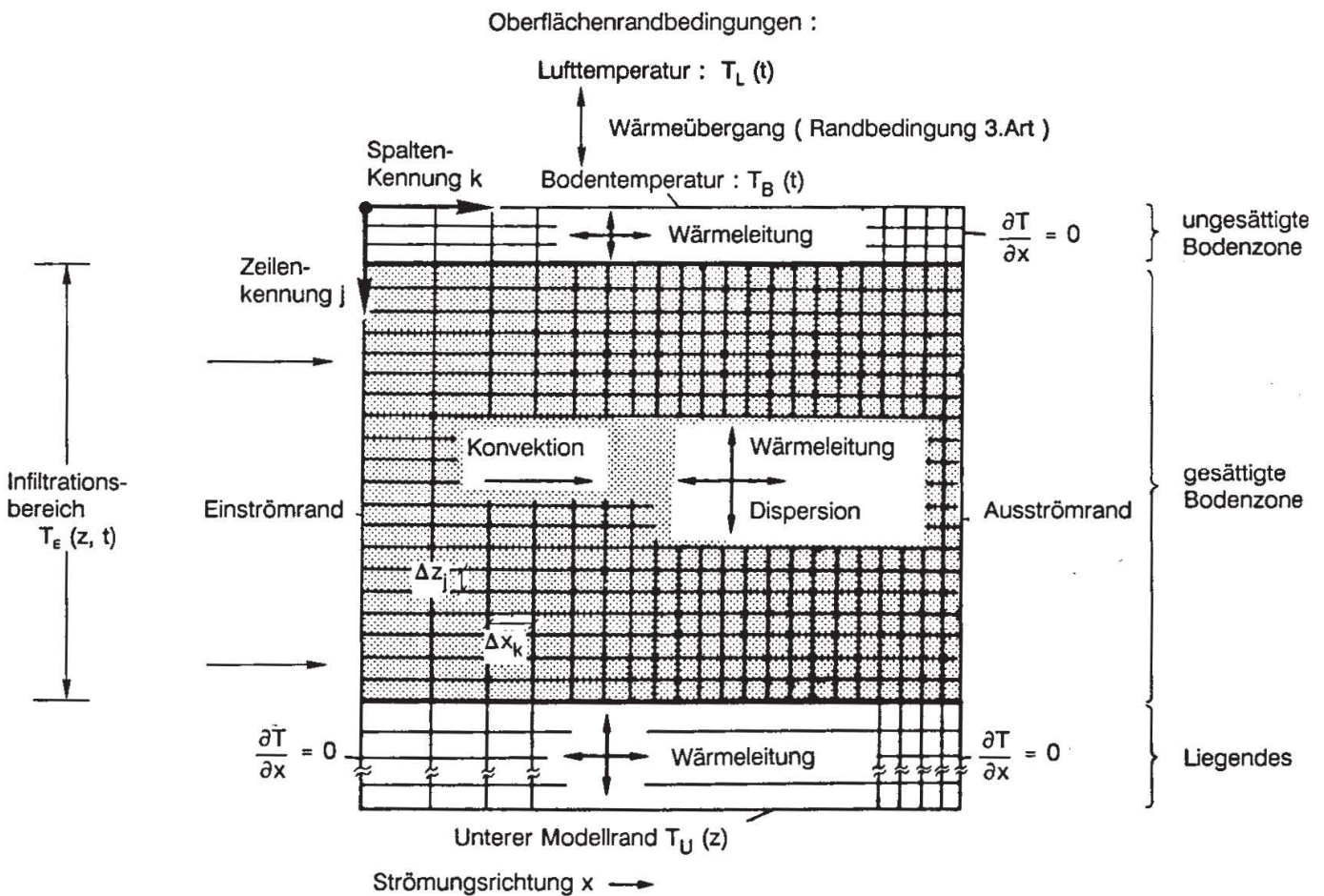


Abb. 3.5. Vertikal-ebenes Mehrschichtenmodell: Diskretisierung, Transportmechanismen und Randbedingungen.

Vertical-plane multilayer model: discretisation, transport mechanisms and boundary conditions.

dispersive „Halbschritte“ berechnet wird. Das numerische Rechenraster in der Betrachtungsebene wird dabei von Tracerelementen gebildet, die im hangenden und liegenden Bereich der gesättigten Zone (d.h. oberhalb des Grundwasserspiegels und unterhalb der Aquiferbasis) ortsfest sind und die im wassergesättigten Tiefenbereich mit der verzögerten Geschwindigkeit der Wärmefront fortbewegt werden können. Der Wegschritt, den die Tracerteilchen im Rahmen des konvektiven Halbschritts ausführen, richtet sich exakt nach dem Courantschen Stabilitätskriterium (explizites Schema):

$$\Delta x(k) = \frac{v_a(k, j) \rho_w c_w n_e \Delta t}{(\rho c)_{\text{eff}}} \quad (8)$$

Die obige Gleichung beschreibt die retardierte Fortbewegung der Wärmefront im Untergrund in Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen und vom Zeitschritt. Wird die Maschenweite des Differenzenschemas (= Länge der Tracerelemente) in jeder Spalte k an diesen Wegstrecken orientiert, lautet die numerische Rekursionsformel zur Darstellung des konvektiven Transports

$$T_{j,k}^{t+\Delta t} = T_{j,k-1}^t \quad (9)$$

mit: j = Zeilenkennung der Temperaturmatrix
 k = Spaltenkennung der Temperaturmatrix

Innerhalb eines konvektiven Halbschritts Δt zum Zeitpunkt t wird die Wärmeenergie im Einflußbereich des Knotens $k-1$ durch die obige Gleichung exakt an den Knoten k sukzessive weitergegeben. Vertikale Strömungskomponenten können nicht modelliert werden; das Verfahren ist jedoch im Rahmen der räumlichen Diskretisierung frei von numerischer Dispersion. Sofern der Grundwasserleiter eine Schichtenstruktur mit tiefenvariabler Abstandsgeschwindigkeit aufweist, wird der konvektive Transport nach Gleichung (9) in den „schnelleren“ Schichten entsprechend häufiger ausgeführt.

Zur Vermeidung von numerischer Dispersion müssen die Geschwindigkeiten der Schichten die folgende Bedingung erfüllen

$$v_{j,k} = v_{k_0} n_j \quad (10)$$

wobei v_{k_0} die im Datensatz festzulegende Bezugsgeschwindigkeit in der „langsamsten“ Schicht ist und n_j eine natürliche Zahl ist, die die schichtspezifische Relativgeschwindigkeit (bezogen auf v_{k_0}) charakterisiert. Im Fall $n_j = 0$ bedeutet dies, daß sich die betreffende Schicht im Vergleich zur gewählten Bezugsschicht nicht bewegt. Zwischenwerte der Geschwindigkeitsverhältnisse (reelle Brüche) müssen entsprechend gerundet werden, was mit Blick auf die mögliche Bandbreite der k_F -Werte im heterogenen Untergrund jedoch keine Einschränkung des Verfahrens auf wenige Spezialfälle bedeutet.

Den Wärmeenergieaustausch im Rahmen des dispersiven Halbschritts beschreibt eine (explizite) Differenzgleichung (Söll 1987b). Zur Sicherung der Konvergenz der Lösung wird der Zeitschritt Δt_d für den Wärmeaustausch mindestens so klein gewählt, daß der Temperaturgradient zwischen den benachbarten Zellen innerhalb eines Iterationsschritts nicht das Vorzeichen wechselt. Zu Beginn des dispersiven Halbschritts wird folgendes Stabilitätskriterium (Neumann-Kriterium) überprüft:

$$\frac{(\lambda_{\max} + \rho_w c_w n_e v_{j, k_{\max}} \cdot \alpha_T) \cdot \Delta t_d}{(\rho c)_{\min} \cdot \Delta z_{\min}^2} + \frac{(\lambda_{\max} + \rho_w c_w n_e v_{j, k_{\max}} \cdot \alpha_L) \cdot \Delta t_d}{(\rho c)_{\min} \cdot \Delta x_{\min}^2} < 0.25 \quad (11)$$

Bei Nichterfüllung der Gleichung (11) wird der dispersive Austausch innerhalb einer Teilschleife mit verkürzter Austauschzeit, jedoch entsprechend häufiger errechnet.

Einzelheiten des Modells sind in der Programmdokumentation bei Söll (1987b) niedergelegt.

3.5.2 Horizontal-ebener Mehrschichtenansatz

Das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Mehrschichtenmodell ist ein Hilfsmittel, das sowohl zur Quantifizierung von hydraulischen Interaktionen zwischen beliebig gruppierbaren Infiltrations- und Entnahmebrunnensystemen einsetzbar ist als auch zur Berechnung von anthropogenen Temperaturanomalien herangezogen werden kann. Wegen der erforderlichen Größe des Betrachtungsmaßstabs (Diskretisierung, Problematik der Modelleichung) und der Besonderheiten des großräumigen Wärmetransports (Temperaturschichtungen, Wärmeaustausch- und Wärmespeicherprozesse) wurde bei der Modellkonzeption ein Kompromiß zwischen einem komplexen 3D-Ansatz und einem über die gesamte Mächtigkeit tiefenintegrierten Modell gewählt. In dem horizontal-ebenen Mehrschichtenansatz wird ein vierschichtiges Ersatzsystem betrachtet:

- Deckschicht (immobil),
- Modellschicht 1 im Grundwasser (mobil),
- Modellschicht 2 im Grundwasser (mobil),
- Liegendes (immobil).

Auf diese Weise können sowohl Temperaturschichtungen im Grundwasserleiter als auch instationäre Wärmespeichereffekte im Liegenden und in den Deckschichten erfaßt werden. Die einzelnen Bausteine des modular strukturierten Modells sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

Hydraulische Wechselwirkungen werden nach dem in Abschnitt 3.4.3 aufgezeigten Rechenschema anhand des Trennstromlinienverlaufs quantifiziert.

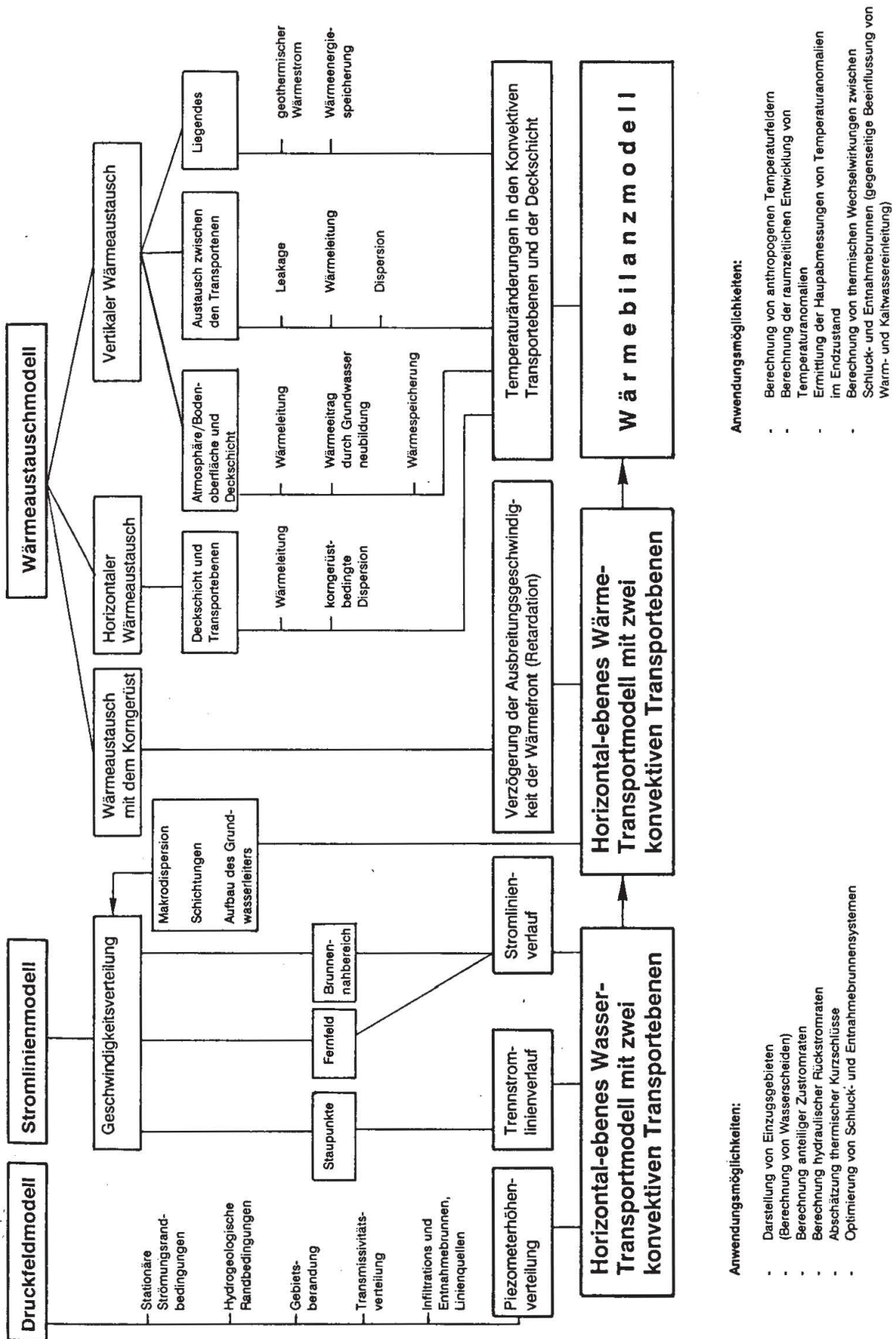


Abb. 3.6. Bestandteile und Aufbau des Mehrschichtenmodells.

Elements and structure of multilayer model.

Die Berechnung des Wärmetransports erfolgt auf der Basis der Charakteristikenmethode in folgenden Schritten:

- (1) Berechnung der Strömung für vorgegebene stationäre hydraulische Randbedingungen,
- (2) Berechnung des zugehörigen vollständigen Stromlinienverlaufs,
- (3) Ausführung des konvektiven Wasser- bzw. Wärmetransports entlang der Stromlinien (konvektiver Halbschritt) und instationäre Berechnung des Wärmeaustauschs (dispersiver Halbschritt),
- (4) bei veränderten hydraulischen Randbedingungen durch An- und Abschalten von Brunnen sowie gegebenenfalls mit entsprechend der berechneten Temperaturverteilung modifizierten k_F -Werten zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ wird die Rechnung für einen weiteren Zeitschritt durchgeführt.

Im weiteren werden die einzelnen Hauptelemente des modular strukturierten Modells und ihr Zusammenwirken erläutert. Eine vollständige Dokumentation des Instrumentariums ist bei Söll (1987c) gegeben.

3.5.2.1 Druckfeld

Das Druckfeldmodell basiert auf der klassischen Bewegungsgleichung für eine halbgespannte stationäre Grundwasserströmung (Bear 1979) mit zwei Grundwasserstockwerken (Schichten). Innerhalb der beiden Stockwerke (Abb. 3.7), die nach dem „Leakage-Prinzip“ miteinander gekoppelt sind, wird die Gültigkeit der Dupuit-Annahme vorausgesetzt.

Die Lösung des Systems von Differenzgleichungen (Söll 1987c) für das Gesamtgebiet erfolgt mittels eines Gleichungslösers nach dem ADIP-Verfahren (Prickett et al. 1981), der durch einen Leakage-Quellterm für zwei Schichten erweitert wurde. Das Druckfeldmodell erzeugt für vorgegebene hydraulische Randbedingungen eine schichtspezifische Piezometerhöhenverteilung. Hierauf baut die Berechnung des Strom- bzw. Bahnliniennetzes auf, das zur Modellierung des konvektiven Wasser- und Wärmetransports direkt weiterverwendet wird.

3.5.2.2 Geschwindigkeitsfeld

Zur Berechnung der Strom- bzw. Bahnlinien wird durch numerische Interpolation und Superposition zunächst ein kontinuierliches Geschwindigkeitsfeld erzeugt, wobei zwei unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche unterschieden werden:

Im Fernbereich von Punktquellen wird der Geschwindigkeitsvektor v_x, v_y an einem beliebigen Punkt $P(x,y)$ zwischen den Knoten als gewichtetes Mittel aus vier Geschwindigkeitswerten gebildet, die an den nächstliegenden Rastergrenzen wirksam sind (siehe Abbildung 3.3, oben rechts).

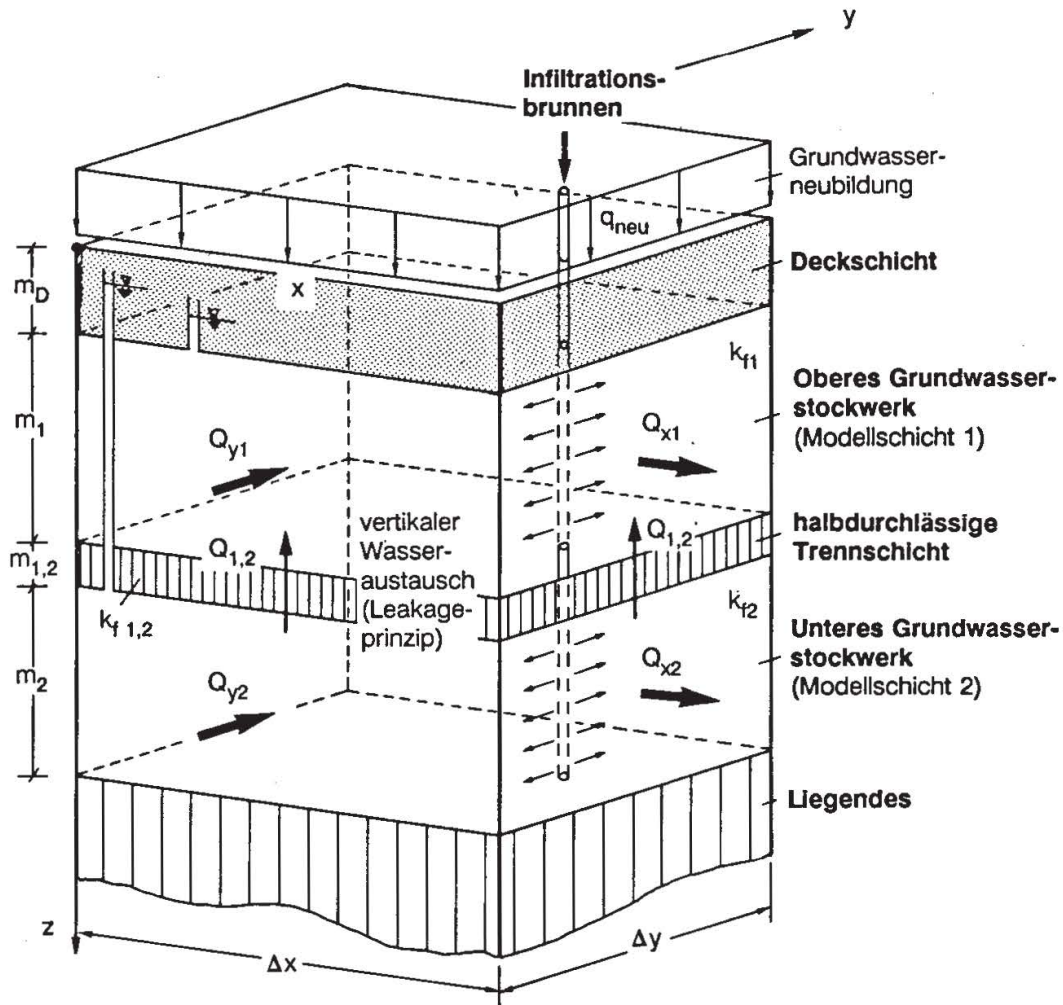


Abb. 3.7. Kontrollvolumen für die Berechnung der Wasserbilanzen in einem stockwerkartig aufgebautem Grundwasserleiter.

Control volume for calculating water balances in a layered aquifer.

Im Nahbereich von punktförmigen Quellen und Senken darf dagegen prinzipiell kein (glättendes) Interpolationsverfahren Verwendung finden, weil das Geschwindigkeitsfeld eine Singularität aufweist und weil bei Einleitungen von Wasser mit Temperaturunterschieden das Strömungsfeld durch temperaturbedingte Schichtungseffekte drastisch verändert sein kann (Mehlhorn 1982).

In diesem Fall muß der Temperaturnahbereich im Umfeld des Schluckbrunnens von der eigentlichen Modellierung ausgeschlossen und ersatzweise bei den Strömungs- und Temperaturrandbedingungen des großräumigen (Schichten-) Modells berücksichtigt werden. Die Größe dieses Bereichs beträgt in Anlehnung an Mehlhorn (1982) für natürliche Grundwasserleiter näherungsweise

$$R = 10 \cdot m_G \cdot k_{fv}/k_{fh} \tag{12}$$

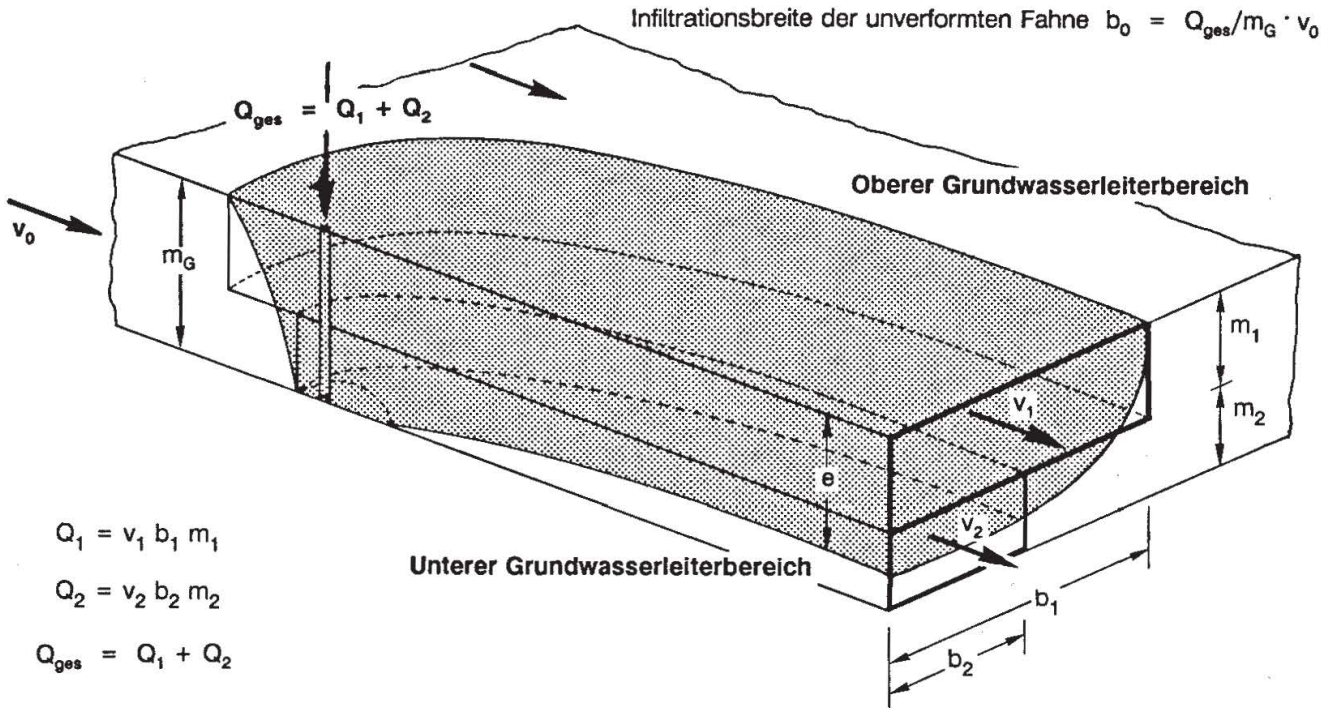


Abb. 3.8. Idealisierung der verformten Brauchwasserfahne im Schichtenmodell.

Idealization of the deformed injected-water plume in the four-layer model.

Der Querschnitt der Brauchwasserfahne, der sich am Rand des Brunnennahbereichs stromabwärts ergibt, ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Im allgemeinen weist dieser sowohl Einschichtungen als auch Verformungseffekte auf, deren Erfassung in einem zweischichtigen Ersatzsystem nur näherungsweise erfolgen kann. Die Übertragung der realen Verhältnisse in das Ersatzsystem erfordert eine Vereinfachung nach einer der folgenden zwei Möglichkeiten:

- Bei geringer Einschichtung und relativ großer Verformung kann der Querschnitt der Brauchwasserfahne am Rand des Brunnennahbereichs näherungsweise durch einen stufenförmigen Modellquerschnitt idealisiert werden, wobei die Summe der Mächtigkeiten m_1 und m_2 der Gesamtmächtigkeit m_G des Grundwasserleiters entspricht. Modelltechnisch erfolgt dies durch den Ansatz einer schichtspezifischen Infiltrationsrate:

$$Q_{1,2} = Q_{ges} \cdot \frac{m_{1,2}}{m_G} \cdot \frac{b_{1,2}}{b_0} \quad (13)$$

- Bei stärkeren Einschichtungen mit relativ geringer Verformung kann die reale Situation (vollkommener Brunnen mit Schichtungseffekten) im Modell durch die Konfiguration eines unvollkommenen Brunnens ohne Schichtungseffekte approximiert werden. Hierzu wird die Mächtigkeit des oberen „Stockwerks“ m_1 an der Dicke e des eingeschichteten Brauchwassers orientiert und die Mächtigkeit des

zweiten, unteren „Stockwerks“ m_2 so gewählt, daß der gesamte Grundwasserbereich von der Aquiferbasis bis zur Schichtungstrennfläche diskretisiert wird; der Brunnendurchfluß Q_{inf} strömt jedoch lediglich dem oberen Stockwerk zu $Q_1 = Q_{\text{inf}}$, $Q_2 = 0$.

Die Ankoppelung des Fernfeldes an den Brunnennahbereich erfolgt in Anlehnung an Charbeneau und Street (1979) mit Hilfe eines neu entwickelten Superpositionsverfahrens. Dieses Superpositionsverfahren setzt homogene und horizontal isotrope Durchlässigkeitsverhältnisse voraus, wobei insbesondere Durchlässigkeits sprünge im näheren Umfeld der Brunnen nicht berücksichtigt werden können. Innerhalb eines Kreisringes um einen Brunnen, dessen innerer Radius R durch die Größe des von der Modellierung ausgeklammerten Temperaturnahfeldes festliegt und dessen äußerer Radius R_2 sich am zugehörigen (numerisch ermittelten) Staupunkt abstand R_S orientiert:

$$R_2 = 0,75 \cdot R_S \quad (14)$$

wird der Geschwindigkeitsvektor wie folgt gebildet:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{R_2 - r}{R_2 - R} v_{xA} + \frac{r - R}{R_2 - R} v_{xN} \quad \text{für} \quad R < r < R_2 \\ v_y &= \frac{R_2 - r}{R_2 - R} v_{yA} + \frac{r - R}{R_2 - R} v_{yN} \end{aligned} \quad (15)$$

mit:

v_{xA}, v_{yA} = analytisch ermittelte Geschwindigkeiten
 v_{xN}, v_{yN} = numerisch ermittelte Geschwindigkeiten
 r = Entfernung zum betrachteten Brunnen

Hierbei charakterisieren die Symbole $v_{x,N}$ und $v_{y,N}$ die Geschwindigkeitskomponenten, die sich anhand der diskreten Piezometerhöhenverteilung und der hydraulischen Parameter des Rechenrasters numerisch interpolieren lassen. Der Geschwindigkeitsvektor gibt mit zunehmender Annäherung an einen Brunnen die wirklichen Geschwindigkeitsverhältnisse unzureichend wieder und wird deshalb durch einen Korrektur (-geschwindigkeits)- vektor v_{xA}, v_{yA} ersetzt.

Die Korrekturwerte v_{xA}, v_{yA} erhält man durch lineare Superposition der folgenden Geschwindigkeitsfelder:

- Geschwindigkeitsfeld $v_{x0,N}, v_{y0,N}$ im natürlichen Zustand (Quasi-Parallelströmung; kein Brunnen in Betrieb); dieses wird zu Beginn der Modellierung errechnet und abgespeichert.
- Radialsymmetrische Strömungskomponente infolge Inbetriebnahme des Brunnens (Zylinderformel).

Bei einem Richtungswinkel α vom betrachteten Feldpunkt $P(x,y)$ zur Brunnenachse lauten die Geschwindigkeitskomponenten:

$$v_{xA} = v_{x0,N} + \frac{Q_{\text{inf}} \cdot \cos \alpha}{2\pi m_{\text{Gr}}}; \quad v_{yA} = v_{y0,N} + \frac{Q_{\text{inf}} \cdot \sin \alpha}{2\pi m_{\text{Gr}}} \quad (16)$$

Der Parameter Q_{inf} bezeichnet dabei den Wasserstrom der Punktquelle, der nach Addition oder Subtraktion eventueller knotenspezifischer vertikaler Zu- oder Abflüsse infolge Leakage oder Grundwasserneubildung für die radialen Fließgeschwindigkeiten im Brunnennahbereich maßgebend ist.

Dieses Verfahren stellt einen stetigen Anschluß des lokalen Geschwindigkeitsfeldes in Brunnennähe an das numerisch ermittelte Geschwindigkeitsfernfeld sicher.

3.5.2.3 Approximation des konvektiven Wasser- und Wärmetransports

Der konvektive Transport wird durch sukzessives Umsetzen von Tracerelementen entlang des zum betrachteten Zeitpunkt vorherrschenden Strom- bzw. Bahnlinienfeldes modelliert. Jedes Tracerelement symbolisiert im Fall des Wassertransports ein Wasservolumen V_o , das innerhalb eines Zeitschritts Δt in den Untergrund infiltriert (oder entnommen) wird und dort mit der Abstandsgeschwindigkeit v_a transportiert wird. Bei Wärmetransportvorgängen symbolisiert jedes Element eine spezifische anthropogene Wärmefracht ΔW_o , für deren Transport die retardierte Geschwindigkeit v_T maßgebend ist:

$$\Delta W_o = q_o \rho_w c_w \Delta T_E \Delta t \quad (17)$$

Die räumliche Anordnung der Startpunkte für Bahnlinien an den Quellen und an den Einströmrändern der Schichten wird vom Programm anhand der Kontinuitätsgleichung so errechnet, daß jede Stromröhre den gleichen Durchfluß (Bezugsdurchfluß q_o) erhält.

Anschließend werden die Koordinaten, die die Elemente bei dispersionsfreier Betrachtungen der Transportschleife einnehmen, vorherbestimmt.

End von ihren Startwerten x_o, y_o zu Beginn eines Zeitschritts werden die auf die Positionen

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \int_0^{\Delta t} v_{Tx} dt$$

$$y_1 = y_0 + \Delta y = y_0 + \int_0^{\Delta t} v_{Ty} dt \quad (18)$$

am Zeitschrittende konvektiv verfrachtet. Die Wegstreckenintegrale werden mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens unter Einhaltung einer zulässigen Wegstreckenobergrenze

ze numerisch approximiert (Björck und Dahlquist 1972). Die Koordinaten der Elemente x_1, y_1 am Ende des Zeitschritts charakterisieren die Position der Wärmefront zu diesem Zeitpunkt; sie dienen als Startwerte für weitere Schritte nach demselben Muster.

Wenn alle Elemente das Gebiet verlassen haben oder auf einen Entnahmekanal gestoßen sind, kann der konvektive Transport auf der Grundlage dieses vorab berechneten Koordinatenregisters modelliert werden. Im numerischen Schema geschieht dies durch das sukzessive Umsetzen der einzelnen Elementtemperaturen und -volumina mit der Positionskennung N auf die Positionskennung $N+1$ des bekannten Koordinatenregisters.

Verdünnungs- oder Anreicherungsprozesse infolge „Leakage“ oder Grundwasserneubildung werden bei der Iteration dadurch näherungsweise miteingefasst, daß die während eines Zeitschritts (i) auftretenden Volumenänderungen $\Delta V(N,i)$ durch vertikale Wasserströme q_v anteilig an die Tracerelementvolumina $V(N,i)$ weitergegeben werden,

$$V(N, i + 1) = V(N, i) + \Delta V(N, i)/EZ \quad (19)$$

mit: $\Delta V(N, i) = q_v \cdot \Delta t \cdot \Delta x \cdot \Delta y/EZ$

wobei EZ die Zahl der Tracerelemente im jeweiligen Kontrollvolumen darstellt.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß der für die großräumige Ausbreitung wichtige konvektive Wärmetransport durch die Grundwasserströmung im Vergleich zu FE- oder FD-Verfahren weitgehend frei von numerischer Dispersion nachgebildet wird. Ein Nachteil ist darin zu sehen, daß der Rechenaufwand zur Bestimmung des Strom- und Bahnlinienverlaufs bei häufigem An- und Abschalten von Brunnen relativ groß ist.

3.5.2.4 Wärmeaustausch

Zur Berechnung des dispersiven und diffusiven Wärmeenergieaustauschs wurde ein analytisch-numerisches Näherungsverfahren entwickelt.

Alle horizontalen Wärmeströme in den drei diskretisierten Ebenen (Deckschicht, oberes und unteres Grundwasserstockwerk) werden mit Hilfe eines standardmäßigen Differenzenverfahrens bilanziert, wobei in der gesättigten Zone der Tensorcharakter des dispersiven Wärmestroms analog zu Kinzelbach (1987) mitberücksichtigt ist. Die Berechnung des vertikalen Wärmeaustauschs mit der Atmosphäre und dem Liegenden erfolgt hingegen auf analytisch-numerischer Basis, wobei in Anlehnung an Herrera und Yates (1977) ein Faltungsintegral ausgewertet wird.

Zunächst wird die Temperaturverteilung, die jeweils am Ende eines konvektiven Halbschritts entlang der einzelnen Stromlinien vorliegt, auf das übergeordnete rechteckförmige Rechenraster transformiert. Dies erfolgt durch eine entsprechend den

Elementvolumina gewichtete Mittelung der Temperaturwerte aller Tracerelemente im Einflußbereich eines Knotens.

Die Temperaturverteilung am Ende des konvektiven Halbschritts ist die Ausgangsbasis für die Bilanzierung des Wärmeenergieaustauschs im Rahmen des dispersiven Halbschritts. Am Ende des dispersiven Schritts erfolgt eine Umrechnung der zwischen den Rasterelementen ausgetauschten Wärmeenergie in eine entsprechende Temperaturänderung, die an die Tracerelemente der Strom- oder Bahnlinien weitergegeben wird. Mit der neuen Temperaturverteilung erfolgt der nächste Iterationsschritt nach demselben Muster.

Wärmeaustausch mit der Atmosphäre:

Der Wärmeaustausch zwischen der Atmosphäre T_{atm} und der Bodenoberfläche T_B wird vereinfachend mit Hilfe eines linearen Wärmeaustauschgesetzes (Gröber et al. 1963) berechnet:

$$\Delta W = \beta \cdot (T_B(z = 0) - T_{\text{atm}}) \quad (20)$$

Der Proportionalitätsfaktor β (Wärmeübergangskoeffizient) ist ein reiner Erfahrungswert, der als Summenparameter zur Beschreibung der komplexen Wärmetransportvorgänge an der Bodenoberfläche zu verstehen ist und der bei praktischen Problemstellungen geeicht werden muß. Der Schwankungsbereich für den Wärmeübergangskoeffizienten umfaßt Werte von 8 bis 400 W/m² K (aus WEA 1982/83), wobei mit zunehmenden Zahlenwerten eine Angleichung der Lufttemperatur und der Temperatur der Bodenoberfläche erfolgt.

Schichteninterner vertikaler Wärmeaustausch und Wärmespeicherung:

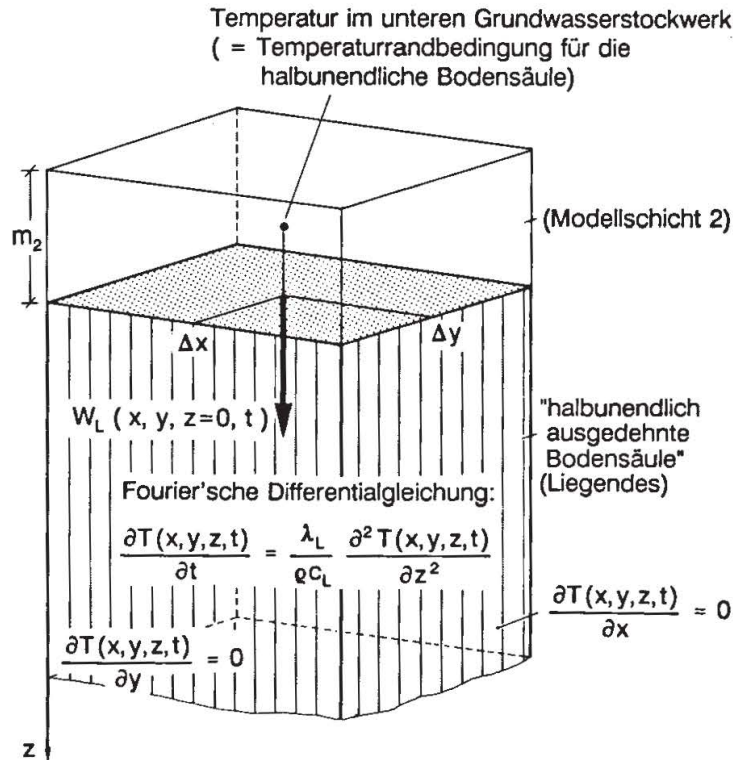
Der vertikale Wärmeaustausch zwischen den Modellschichten erfolgt durch Wärmeleitung und Konvektion; beide Anteile werden näherungsweise linear superponiert (Söll 1987a). Die Wärmeströme infolge Wärmeleitung werden analog zum Wärmeaustauschproblem zweier sich berührender halbumendlicher Körper unterschiedlicher Wärmeeindringzahlen behandelt.

Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, daß das Zeitverhalten des Wärmestroms in der verwendeten analytischen Lösung mit erfaßt ist und der Fehler einer vergleichsweise groben vertikalen Diskretisierung des Modellgebiets teilweise kompensiert wird.

Wärmeaustausch mit dem Liegenden:

Der Wärmeaustausch des Grundwasserleiters mit dem Liegenden wird mit Hilfe einer Quell-Senken-Funktion nachgebildet, deren Randbedingung durch den Temperaturverlauf im unteren Grundwasserstockwerk bestimmt ist. Jedem Knoten des unteren Grundwasserstockwerks wird unten eine (gedachte) halbumendliche Bodensäule angefügt, die selbst nicht durch Rechenknoten diskretisiert ist. Die dort ablaufenden Wärmetransportvorgänge (Wärmeleitung, Wärmespeicherung) werden analytisch (vertikal-eindimensional) beschrieben, wobei horizontale Wärme Flüsse zwischen den

einzelnen Säulen unberücksichtigt bleiben (Abb. 3.9). Diese Näherung trifft für in Längs- und Querrichtung großräumig erstreckte Temperaturanomalien dann zu, wenn in der gesättigten Zone laterale Vermischungsprozesse durch die kombinierte Wirkung von Dispersion und Wärmeleitung zu einer rascheren Querausbreitung als im Liegenden (nur Wärmeleitung) führen.



$W_L(x, y, z = 0, t)$: Wärmestrom zwischen unterem Grundwasserstockwerk (Modellschicht 2) und dem Liegenden

Abb. 3.9. Ersatzsystem für die Modellierung des vertikalen Wärmeaustauschs zwischen dem unteren Grundwasserstockwerk (Modellschicht 2) und dem Liegenden.

Substitute system for modelling vertical heat exchange between the lower aquifer (model layer 2) and the aquifer base.

Sofern ein Rasterelement des unteren Grundwasserstockwerks den Ausgangspunkt für einen Temperaturimpuls darstellt, lautet die Lösung für dessen Ausbreitung in der halbunendlichen Bodensäule (Spiegel 1965)

$$T' = \frac{z}{\sqrt{\frac{4\pi\lambda t^3}{\rho c}}} e^{-\frac{\rho c z^2}{4 \cdot \lambda \cdot t}} \tag{21}$$

Für eine vorgegebene (beliebige) Funktion der Temperaturrandbedingungen $T(t)$ im unteren Grundwasserstockwerk erhält man die Gesamtlösung mit Hilfe eines Faltungsintegrals.

$$T_{\text{ges}} = \int_0^t T'(u) \cdot T(t-u) \cdot du \quad (22)$$

Wichtig für die Temperaturänderung im unteren Grundwasserstockwerk ist der Wärmeenergiestrom am oberen Rand der Bodensäule.

An jedem Rechenraster wird die benötigte Randbedingungsfunktion $T(t-u)$ durch die Temperaturwerte approximiert, die jeweils am Ende eines konvektiven Schritts vorherrschen. Der sich hierbei ergebende treppenförmige Verlauf der Temperaturdifferenzen an einem Ort und der mit ihrer Hilfe errechnete Wärmeaustausch beeinflussen sich dabei wechselseitig (Temperaturvorgeschichte).

Für die in Abbildung 3.10 dargestellten Verläufe erhält man unter Beachtung der Zeitunterschiede zwischen den einzelnen Temperatursprüngen einen analytischen Ausdruck für die Wärmeenergie E_L (Wärmemenge), die im Betrachtungszeitraum zwischen dem unteren Grundwasserstockwerk und der fiktiven halbunendlich ausgehenden Bodensäule ausgetauscht wurde:

$$E_L = \frac{2\lambda_L \Delta x \Delta y}{\sqrt{\frac{\pi \lambda_L}{(\rho c)_L}}} \sum \Delta T_i \sqrt{\tau - t_i} \Theta(\tau - t_i) \quad (23)$$

Es bedeuten:

ΔT_i : Temperaturdifferenz zwischen dem unteren Grundwasserstockwerk und dem Liegenden

t_i : Zeitpunkt, bei dem der i -te Temperatursprung erfolgte

Zur exakten Auswertung des Konvolutionsintegrals (Gl. 23) ist es streng genommen erforderlich, sämtliche Temperatursprünge ΔT_i und die zugehörigen Zeiten t_i im Verlauf der Rechnung zu speichern. Dies ist wegen des mit zunehmender Rechenzeit linear anschwellenden Speicherplatzbedarfs (Hintergrundspeicher) für die Register unpraktikabel.

Andererseits klingt der Einfluß zurückliegender Temperaturänderungen mit zunehmender Zeit ab und wird von dem momentanen Temperaturgeschehen überdeckt. Demzufolge ist es zweckmäßig, lediglich Teile der Temperaturvorgeschichte aus der jüngeren Vergangenheit zu speichern und frühere Ereignisse zyklisch zu vernachlässigen. Der an die halbunendliche Bodensäule (Liegendes) abgegebene Wärmestrom infolge eines einzelnen Temperatursprungs nimmt allerdings nur mit der Quadratwurzel des Betrachtungszeitraums ab (Gl. 23), so daß ein relativ großes Konvolutionsregister vorgehalten werden müßte (Hintergrundspeicher). Wenngleich dies aus Speicherplatzgründen möglich wäre, scheidet es aus Rechenzeitgründen (Lesen und Beschreiben des Registers) generell aus.

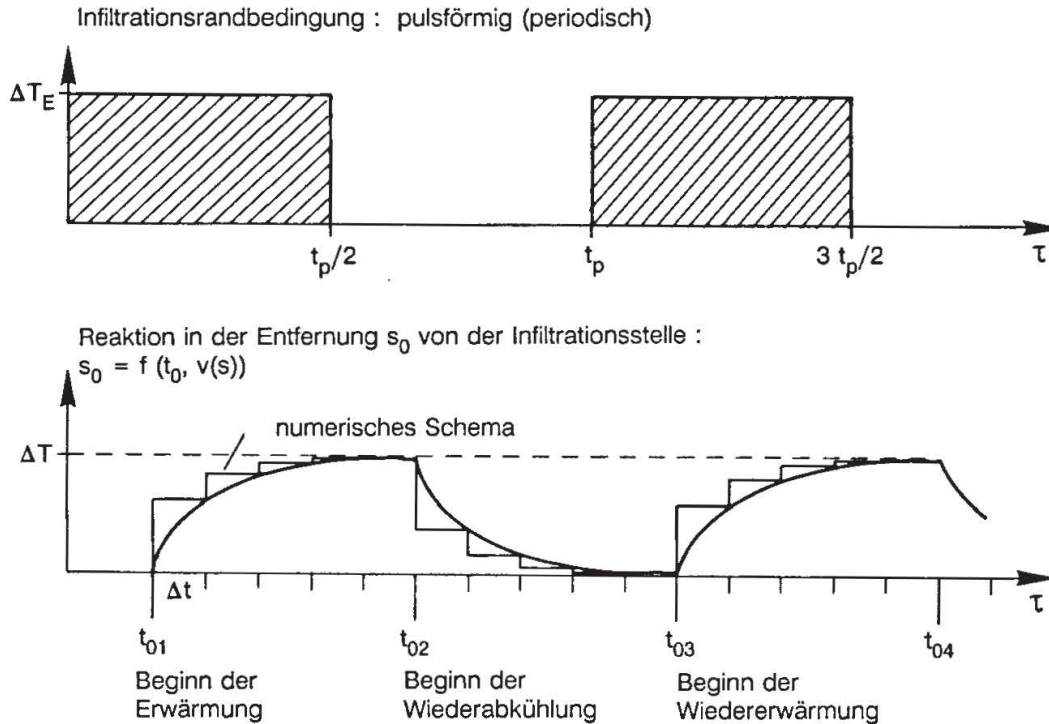


Abb. 3.10. Idealisierter zeitlicher Temperaturverlauf im numerischen Rechenschema bei instationären Temperaturrandbedingungen.

Idealized temporal temperature development in the numerical scheme for unsteady temperature boundary conditions.

Demzufolge wurden im Rahmen einer weiteren Näherung – mit Blick auf den zeitlichen Verlauf saisonaler (oder quasistationärer) Temperatureinleitungsbedingungen – die unterschiedlichen Ankunftszeiten t_i der Temperatursprünge in Gleichung (23) durch den Zeitpunkt t_0 ersetzt, an dem erstmals eine Temperaturänderung am betrachteten Knoten (unteres Grundwasserstockwerk) zu verzeichnen ist. Das Zeitregister (nur ein Wert je Knoten) wird im Verlauf der Rechnung nur dann aktualisiert, wenn eine Vorzeichenänderung des Temperaturgradienten zwischen dem unteren Grundwasserstockwerk und der Bodensäule auftritt (Beginn der Erwärmung – Beginn der Wiederabkühlung). Eine Speicherung der Temperatursprünge kann bei diesem Näherungsansatz demzufolge entfallen, da sie nicht mehr unterschiedlich gewichtet werden.

Man erhält unter Berücksichtigung der gespeicherten Wärme folgenden Ausdruck für die Temperaturänderungen in der unteren, mobilen Modellschicht, die aus dem instationären Wärmeaustausch mit dem Liegenden resultieren und die zu den Temperaturänderungen durch Dispersion und Wärmeleitung infolge des schichteninternen Austauschs hinzuaddiert werden:

$$\begin{aligned}
T_2^{\tau + \Delta t} = T_2^{\tau} - \frac{2\lambda_L}{\sqrt{\frac{\pi\lambda_L}{(\rho c)_L} (\rho c)_2 m_2}} [(T_2^{\tau} - T_L) \sqrt{\tau - t_0} - \\
- (T_2^{\tau - \Delta t - t_0} \sqrt{\tau - \Delta t - t_0})]
\end{aligned}
\tag{24}$$

Zur Darstellung dieser Quell-Senken-Funktion in dem numerischen Schema ist neben der Hintergrundtemperatur T_L (Liegendes) lediglich ein weiteres Feld zur Speicherung der Zeitpunkte erforderlich, an denen sich der Trend der Temperaturveränderungen jeweils umkehrt.

Die Genauigkeit des analytisch-numerischen Quell-Senken-Terms erwies sich im Rahmen der Vergleiche mit dem in Abschnitt 3.5.1 diskutierten Schichtenmodell und mit Naturdaten als bei weitem ausreichend.

3.6 Anwendungsbeispiele

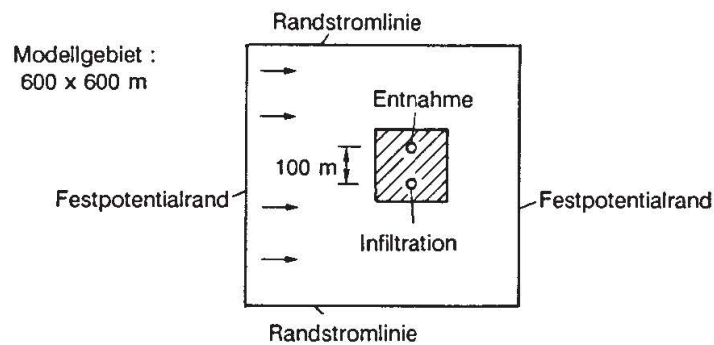
3.6.1 Berechnung eines thermischen Kurzschlusses zwischen Schluck- und Entnahmebrunnen bei vertikaler Trennung der Zugabe- und Entnahmehorizonte

Die thermische Nutzung des Grundwassers sollte in der Praxis zweckmäßigerweise durch eine gekoppelte Entnahme- und Infiltrationsanlage (Brunnendoublette) erfolgen, die sicherstellt, daß der Grundwassermengenhaushalt durch die Bewirtschaftung der Grundwasserwärme nicht verändert wird. Bei einer Einleitung mit Temperaturunterschieden ist ein hydraulischer Kurzschluß zwischen dem Entnahme- und Infiltrationsbrunnen zwangsläufig auch mit einem thermischen Kurzschluß verbunden, der in der Regel unerwünscht ist. Der Planer hat daher zunächst die vordringliche Aufgabe, die Anlage so zu dimensionieren, daß nach Möglichkeit keine thermische Wechselwirkung eintritt, bzw. daß die Effektivitätsminderung durch den Kurzschluß minimiert wird.

Für den Fall eines vollkommen verfilterten Zweibrunnensystems, das in einem beliebigen Abstand a und Winkel α relativ zur Richtung der Grundwasserströmung (Parallelströmung) angeordnet ist, haben Mehlhorn et al. (1981) die hydraulischen Rückstromraten in allgemeingültiger Form angegeben.

Der kritische Brunnenabstand kann in der Praxis häufig nicht eingehalten werden (Grundstücksgrenzen). Sofern der Grundwasserleiter einen ausgeprägten stockwerksartigen Aufbau hat, ist es möglich, durch eine entsprechende Trennung der Entnahme- und Zugabehorizonte gegebenenfalls eine Verminderung des thermischen Kurzschlusses zu erreichen.

Im folgenden werden hierzu Ergebnisse von Beispielrechnungen erörtert, die mit dem in Abschnitt 3.5.2 diskutierten Mehrschichtenmodell ermittelt wurden. Einschränkend ist hierbei zu bemerken, daß das Strömungsfeld im Bereich eines Zweibrunnen-Brauchwassersystems insbesondere bei teilweiser Verfilterung der Brunnen strenggenommen nur dreidimensional erfaßt werden kann. In den Anwendungsfällen jedoch, in denen horizontale Fließrichtungen durch eine natürliche Anisotropie der Durchlässigkeit begünstigt sind und ausgedehnte horizontale Sperrschichten im Untergrund auftreten, ist der vertikale Wassertransport oftmals klein im Vergleich zu den örtlichen horizontalen Transportkomponenten. Sofern die Gültigkeit der Dupuit-Annahme für die betrachteten Stockwerksbereiche des Grundwasserleiters zutrifft, ist folglich das



Kenngröße	Deckschicht	Oberes Grundwasser stockwerk	Unteres Grundwasser stockwerk	Einheit
Piezometerhöhengefälle	-	0,01	0,01	[-]
Mächtigkeit	10	15	15	[-]
Durchlässigkeiten (homogen)	-	0,0001	0,0001	[m/s]
Porosität - effektiv		0,1	0,1	[-]
- gesamt	0,3	0,3	0,3	[-]
Längsdispersivität	-	1,0	1,0	[m]
Querdispersivität	-	0,1	0,1	[m]
Wärmeleitfähigkeit	1,5	2,0	2,0	[J/s m K]
Spezifische Volumenwärme	2,7	2,7	2,7	[MJ/m³ K]
geogene Temperatur (Anfangszustand)	10	10	10	[° C]

Abb. 3.11. Lageplan der Brunnen und hydraulische Randbedingungen im Fallbeispiel „Thermischer Kurzschluß“.

Plan view of wells and hydraulic boundary conditions for the case study „thermal interaction“.

hier entwickelte Transportmodell mit zwei nach dem Leakage-Prinzip gekoppelten Transportebenen mit guter Näherung anwendbar.

Die betrachtete Konfiguration läßt sich wie folgt beschreiben. Auf einem Grundstück von $600\text{ m} \times 600\text{ m}$ (Abb. 3.11) ist die Errichtung einer Anlage (Brunnendoublette) zur Nutzung von Grundwasser für industrielle Kühlzwecke geplant. Die zu entsorgende Abwärmeleistung beträgt $0,42\text{ MW}$, die maximal zulässige Temperaturerhöhung 10 K . Hieraus resultiert eine erforderliche Entnahme- und Wiedereinleitungsrate von $0,01\text{ m}^3/\text{s}$. Das Grundstück, das für den Bau der Gesamtanlage zur Verfügung steht, soll einen maximalen Brunnenabstand von $a = 100\text{ m}$ zulassen (Abb. 3.11). Der Grundwasserleiter besitzt zwei Stockwerke mit gleicher Mächtigkeit, die durch eine $0,5\text{ m}$ mächtige teildurchlässige Schicht voneinander getrennt sind. Zwischen beiden Stockwerken kann neben dem Wärmeaustausch durch Wärmeleitung ein konvektiver Wasser- und Wärmeaustausch nach dem Leakage-Prinzip erfolgen; der relative Beitrag des vertikalen Transports durch Konvektion sei jedoch a priori unbekannt, so daß Grenzwertbetrachtungen durchgeführt werden müssen.

Für die Variante 1, bei der Entnahme und Infiltration über beide Grundwasserstockwerke erfolgt, führt eine erste Auswertung der oben angegebenen hydraulischen Daten nach Mehlhorn et al. (1981) zu dem Ergebnis, daß bei einer Einleitung ohne Stockwerkstrennung und bei der gegebenen Brunnenanordnung ($\alpha = 90\text{ Grad}$) mit einer hydraulischen Rückstromrate von etwa

$$Q_R/Q = 0,32 \quad (25)$$

und einer kurzschlußbedingten Temperaturerhöhung von

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{E0}} = \frac{1}{1 - Q_R/Q} = 1,47 \quad (26)$$

zu rechnen ist. Für die gegebenen hydraulischen Randbedingungen erhält man mit dem Schichtenmodell das in Abbildung 3.12 dargestellte Ergebnis. Das numerische Verfahren zur Quantifizierung der hydraulischen Rückstromrate liefert hier – wie der Trennstromlinienverlauf dokumentiert – die gleichen Zahlenwerte wie die analytische Lösung (Verifizierung des numerischen Verfahrens).

Bei einer zweiten Rechenvariante wurde in dem Schichtenmodell eine stockwerkartige Trennung der Entnahme- und Wiedereinleitung vorgenommen. Es wird unterstellt, daß die Trennschicht beide Stockwerke vollkommen hydraulisch separiert, so daß ein konvektiver Wasser- und Wärmeaustausch zwischen den beiden unvollkommenen Brunnen völlig unterbunden ist. Die Einleitung des um $\Delta T = 10\text{ K}$ erwärmten Wassers erfolgt in das untere Stockwerk; die Entnahme erfolgt im oberen.

Die stockwerksbezogene Einleitungs- bzw. Entnahmeraten pro Meter Höhe sind bei dieser Rechenvariante doppelt so groß wie bei der tiefengemittelten Variante 1 (Abb. 3.12), so daß sich die Zu- und Abstrombereiche ausdehnen und sich in der Draufsicht horizontal überlappen (Abb. 3.13). Im unteren Stockwerk breitet sich das infiltrierte Brauchwasser zunächst entlang der Stromlinien aus und tritt dabei in einen allseitigen

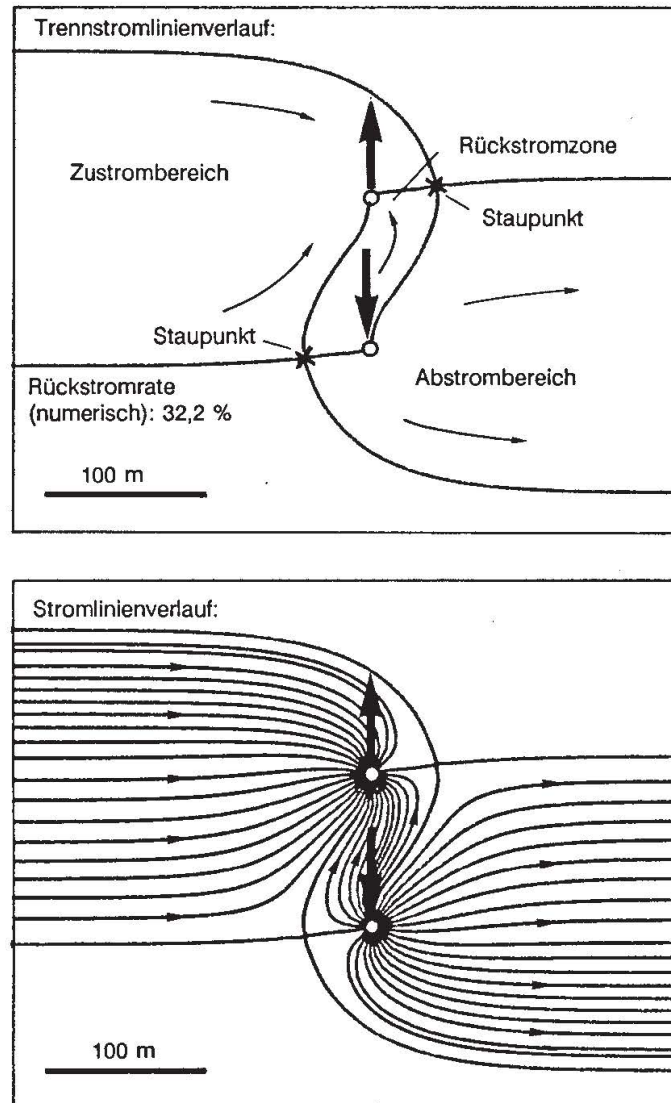


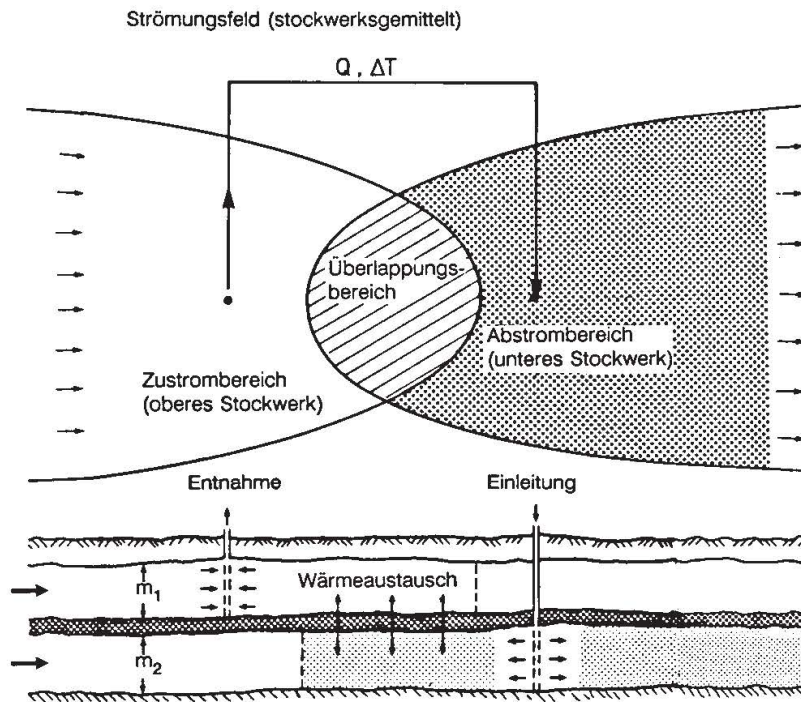
Abb. 3.12. Rückstromverhältnisse und Stromlinienverlauf in Variante 1.
Return flow conditions and streamlines for variation 1.

Wärmeaustausch mit seiner Umgebung durch Dispersion und Wärmeleitung ein. Hieraus resultiert auch im oberen Stockwerk ein Anstieg der Grundwassertemperaturen. In Abbildung 3.14 ist der errechnete zeitliche Verlauf der Temperaturänderungen im Grundwasser sowohl im Bereich der beiden Brunnen als auch im jeweils direkt darüber- bzw. darunterliegenden Bereich dargestellt. Die Kurven entsprechen jeweils über eine Rechenzelle gemittelten Werten. Die Grundwasserleiter zeigen demnach maximale Temperaturänderungen von etwa 5 K im unteren und etwa 4 K im oberen Stockwerk.

Ergänzend sind in Abbildung 3.14 auch die direkt im Entnahme- und Einleitungsbrunnen auftretenden Temperaturdifferenzen dargestellt. Der Betrag der Grundwassererwärmung im Entnahmebrunnen ist hierbei vergleichsweise gering.

In diesem Beispiel beträgt die Temperaturerhöhung infolge des thermischen

Brunnenanordnung in Strömungsrichtung



Brunnenanordnung quer zur Strömung

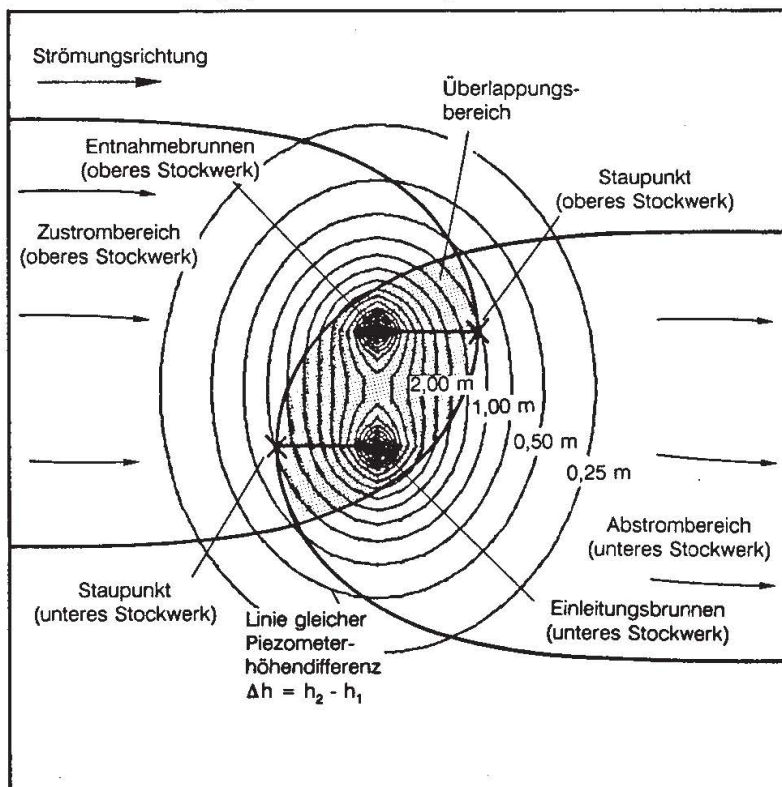


Abb. 3.13. Möglichkeiten zur Vermeidung eines hydraulischen Kurzschlusses. Linien gleicher Piezometerhöhendifferenz zwischen den Grundwasserstockwerken bei vollständiger Trennung der Zugabe- und Entnahmehorizonte (Variante 2).

Possibilities for avoiding hydraulic interaction. Lines of equal differences in piezometric heads between the two aquifer layers at complete separation of discharge and recharge horizons (variation 2).

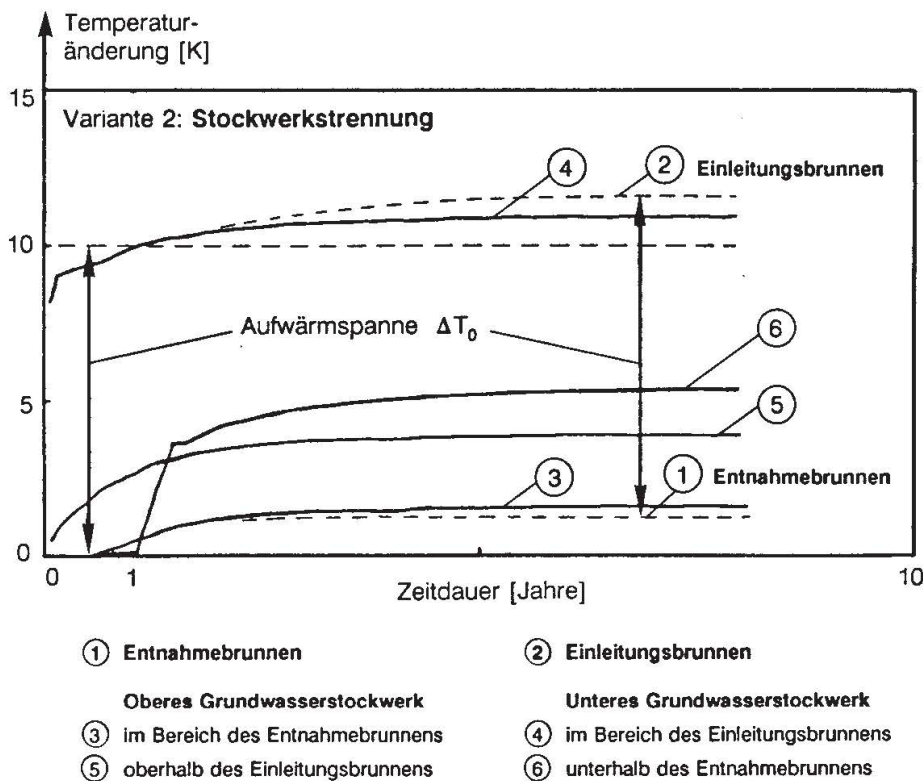


Abb. 3.14. Zeitliche Entwicklung der anthropogenen Temperaturveränderungen (Variante 2).
Time development of anthropogenic temperature variations (variation 2).

Kurzschlusses durch Wärmeleitung cirka $\Delta T_{E,R}/\Delta T_{E_0} = 1,1$. Gegenüber der tiefenge-mittelten Variante 1 erfolgte somit eine deutliche Verringerung des thermischen Kurzschlußeffekts.

Neben den Trennstromlinien im unteren und oberen Stockwerk sind in Abbildung 3.13 die Linien gleicher Piezometerhöhendifferenz zwischen den hydraulisch getrennten Strömungsbereichen dokumentiert. Hieraus ist ersichtlich, daß der Bereich potentieller vertikaler Wassertransportvorgänge auf die Überlappungszone konzentriert ist. Demzufolge wird sich der thermische Kurzschluß bei unvollständiger hydraulischer Stockwerkstrennung gegenüber der vorgestellten Variante erhöhen (Söll 1987a).

Die Ergebnisse der hier diskutierten Modellrechnungen zeigen, daß eine Reduktion eines thermischen Kurzschlusses durch eine Stockwerkstrennung generell erfolgt. Der Erfolg einer Stockwerkstrennung hängt in der Praxis jedoch primär davon ab, inwieweit die beiden Stockwerke tatsächlich hydraulisch entkoppelt sind und welche Flächenerstreckung die Überlappungszone des Zu- und Abstrombereichs einnimmt, in der ein für den thermischen Kurzschluß relevanter vertikaler Wärmeaustausch durch Wärmeleitung und Konvektion stattfinden kann.

3.6.2 Abschätzung der thermischen Beeinflussung des Rohwassers eines Wasserwerks durch eine Kühlwassereinleitung in das Grundwasser

Ein Industrieunternehmen plant die bei der Produktion anfallende überschüssige Prozeßwärme von ca. 3,0 MW mittels einer Kühlwassereinleitung in das Grundwasser zu entsorgen. Die Kühlwassereinleitung soll etwa 6000 m oberstrom eines Wasserwerks gelegen sein. Ziel der Betrachtungen ist eine Abschätzung der thermischen Beeinflussung des Wasserwerks bei folgenden hydraulischen Randbedingungen.

Es wird ein gespannter Grundwasserleiter mit zwei durch eine undurchlässige Schicht hydraulisch getrennten Stockwerken angenommen, dessen Strömungsverhältnisse

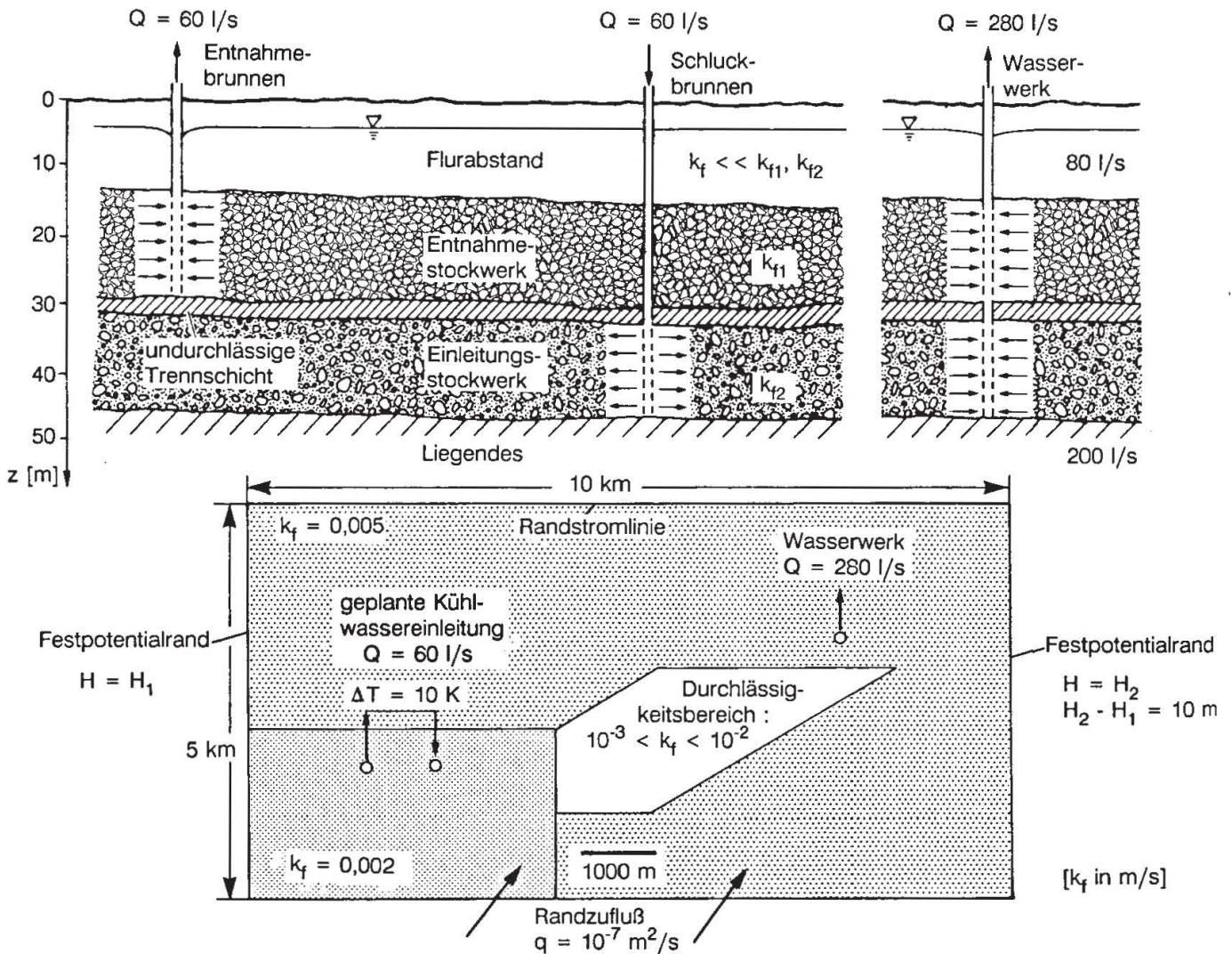


Abb. 3.15. Vertikalschnitt des Grundwasserleiters im Bereich der Kühlwassereinleitung und des Wasserwerks mit Lageplan der Brunnen.

Vertical cross section of aquifer in the region of the cooling water discharge and the water works with plan view of the wells.

durch Festpotentiale ($H_1 - H_2 = 10 \text{ m}$) auf dem Rand des Untersuchungsgebiets und einen Randzufluß fixiert sind (Abb. 3.15).

Die Durchlässigkeit des Untergrundes variiert von Stockwerk zu Stockwerk und innerhalb des Untersuchungsgebiets. Dabei sei zur Durchlässigkeit des zweiten Stockwerks im Zustrombereich des Wasserwerks nur soviel bekannt, daß sie zwischen den Werten $0,001 < k_f < 0,01 \text{ m/s}$ liegen.

Die Betreiber der Kühlwassereinleitung sehen vor, Grundwasser mit einem Volumenstrom von 60 l/s aus dem oberen Stockwerk (Mächtigkeit ca. 15 m) zu entnehmen und um 12 K erwärmt in das tiefer liegende Stockwerk (Mächtigkeit ca. 15 m) zu infiltrieren. Die Temperatur des geförderten Grundwassers sei zeitlich konstant $T_o = 10^\circ \text{ C}$. Der Förderstrom des Wasserwerks $Q_{\text{ges}} = 280 \text{ l/s}$ setzt sich aus 80 l/s aus dem Stockwerk 1 und 200 l/s aus dem Stockwerk 2 zusammen (Abb. 3.15).

Der hier diskutierten Grenzwertabschätzung zur zeitlichen Entwicklung der Brauchwasserfahne liegt die Annahme zugrunde, daß die Durchlässigkeit im Zustrombereich des Wasserwerks an der Obergrenze liegt ($k_f = 0,01 \text{ m/s}$, Abb. 3.15). Vorbetrachtungen anhand der in Abschnitt 3.4.2 diskutierten eindimensionalen Berechnungsansätze zeigen, daß bei der hier vorliegenden Konfiguration die Abkühlänge der Temperaturanomalie größer sein kann als die Entfernung vom Schluckbrunnen zum Wasserwerk, so daß an dem Förderbrunnen des Wasserwerks eine anthropogene Temperaturerhöhung eintreten kann. Die numerische Berechnung zeigt jedoch, daß das eingeleitete Kühlwasser zu 30% am Wasserwerk vorbeiströmt und somit der hydraulische Zustromanteil der Kühlwassereinleitung an der Wasserwerksentnahme aus dem Stockwerk 2 lediglich bei etwa 21% liegt.

Aus den Berechnungen ist ersichtlich, daß die Temperaturanomalie im unteren Stockwerk nach fünfzehnjähriger Infiltrationsdauer bis an das Wasserwerk heranreicht, wobei die Temperaturänderungen beim Wasserwerk ca. 1 K betragen (Abb. 3.16).

Sofern die Kühlwassereinleitung nach einer Dauer von 15 Jahren außer Betrieb geht, verändert sich das Strömungsbild (Abb. 3.16); gleichwohl fließt dem Wasserwerk weiterhin teilweise erwärmtes Brauchwasser zu. Die Kühlwasserfahne wandert unter Abschwächung der Temperaturerhöhungen nach unterstrom und erreicht schließlich den Standort des Wasserwerks. Nach einer Zeitspanne von etwa 20 Jahren nach Stilllegung der Kühlwassereinleitung hat sich die Temperaturanomalie durch den natürlichen Wärmeaustausch mit der Atmosphäre nahezu vollständig abgebaut. Weitere Rechenvarianten zu diesem Fallbeispiel sind bei Söll (1987a) dargestellt.

3.6.3 Bewirtschaftung des erwärmten Wassers im Untergrund eines Ballungsraums

Dieses Beispiel ist an der Grundwasserströmung und dem Temperaturfeld unter der Stadt Karlsruhe orientiert, wobei jedoch die hydraulischen Randbedingungen, die Untergrundverhältnisse sowie die thermischen Randbedingungen weitgehend idealisiert wurden. Eine detaillierte Modellierung der komplexen Strömung im Bereich des

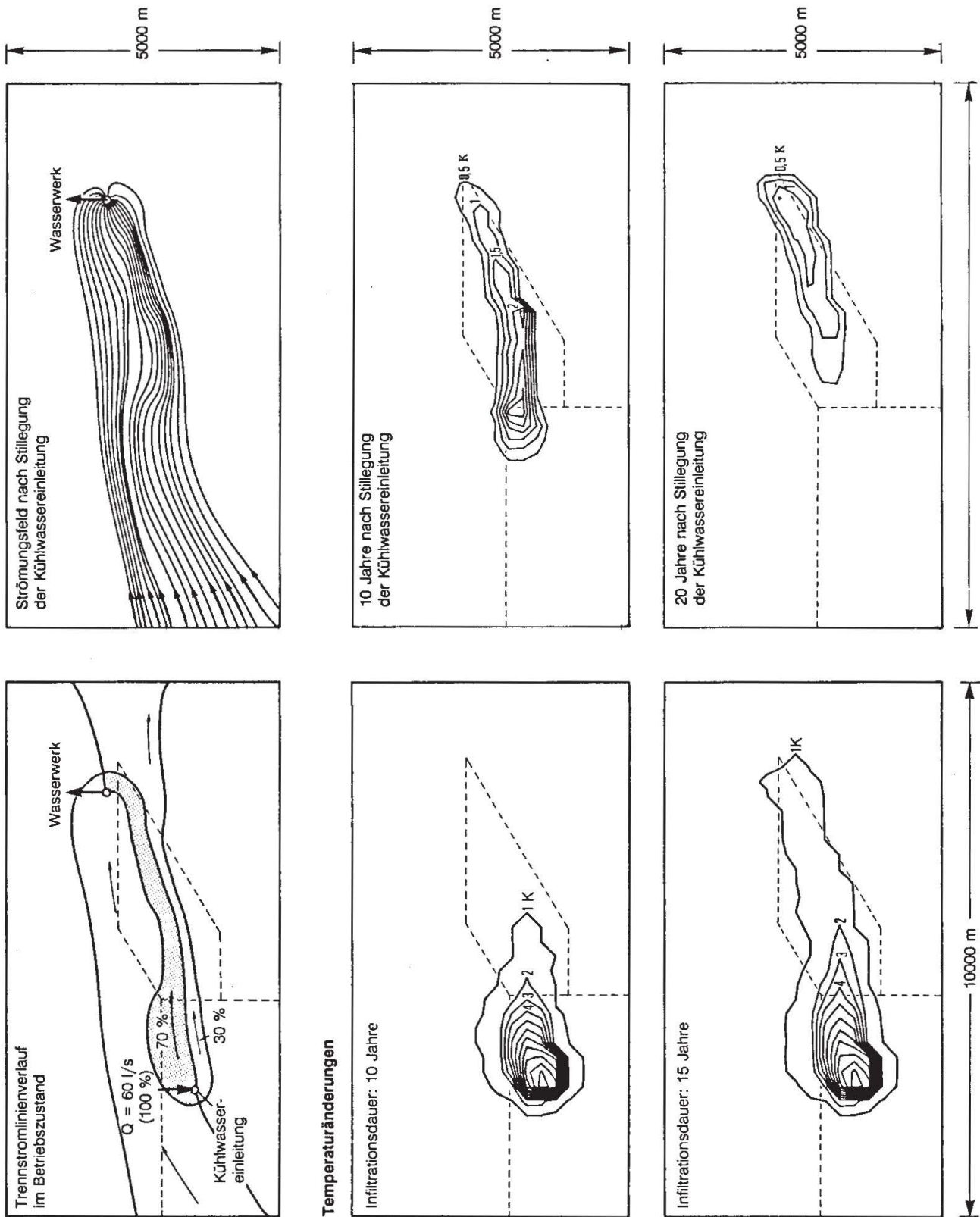


Abb. 3.16. Strömungsverhältnisse und Temperaturanomalie.
Flow conditions and temperature anomaly.

dortigen Stadtgebiets war im Rahmen dieser Arbeit ebensowenig beabsichtigt wie die Erstellung einer auf Naturdaten basierenden Wärmeenergiebilanz für den dortigen Untergrund.

3.6.3.1 Idealisiertes Strömungsfeld

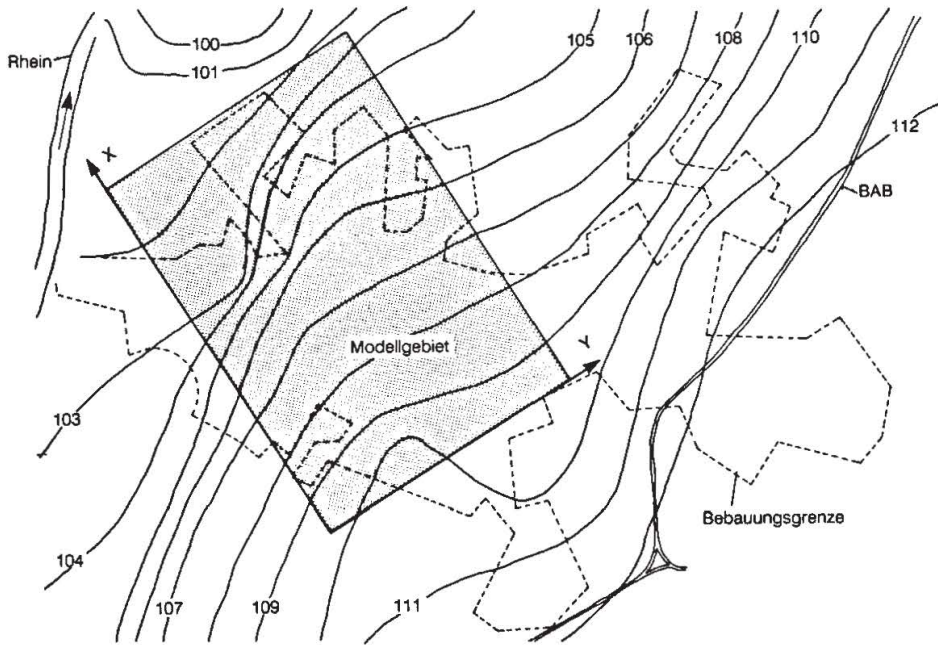
Der in Abbildung 3.17 dargestellte Grundwasserhöhengleichenplan (aus Lofi et al. 1977) diene als Grundlage für ein durch Festpotentiale weitgehend fixiertes stationäres Strömungsfeld innerhalb des zweischichtigen Modellgrundwasserleiters; dessen Gefälle beträgt in beiden Modellschichten im Mittel ein Promille. Die Durchlässigkeit beider 20 m mächtigen Modellschichten wurde zunächst an dem von Lofi et al. (1977) angegebenen Schätzwert orientiert ($k_f = 0,0015 \text{ m/s}$), der – wie die Autoren bemerken – „um eine Zehnerpotenz nach oben oder unten schwanken kann“. Im Zentrum des Modellgebiets („Stadtzentrum“) wurde eine um 50% verringerte Durchlässigkeit angenommen (Gründungen). Die Zahl und die Anordnung von punktförmigen Entnahme- und Infiltrationsstellen orientierte sich an den in Abbildung 3.17 gekennzeichneten Direkteinleitern; hiervon wurden jedoch nur diejenigen berücksichtigt, in deren Umfeld markante Temperatursingularitäten im Isothermenplan ersichtlich sind.

3.6.3.2 Idealisierte Temperaturreandbedingungen

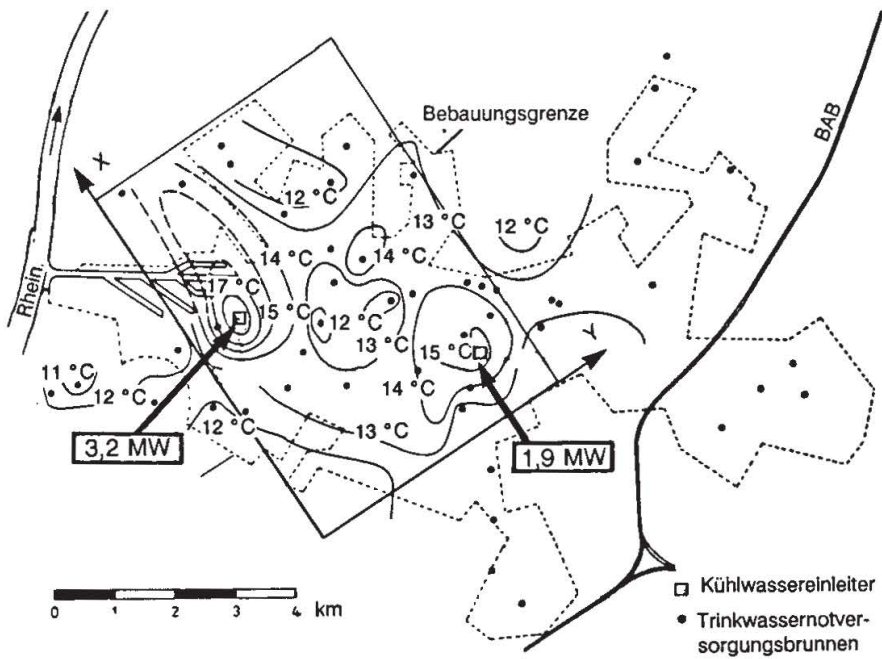
Als Ausgangstemperatur wurde im gesamten Modellgebiet eine konstante Temperatur von $T = 10^\circ \text{ C}$ angesetzt (Anfangsbedingung). Weiterhin wurde angenommen, daß das in das Modellgebiet einströmende Grundwasser keine anthropogenen Temperaturveränderungen aufweist (mittlere Temperatur $T = 10^\circ \text{ C}$).

Die Temperatur des oberen Modellrandes wurde auf $12,0^\circ \text{ Celsius}$ fixiert, so daß gemessen am Anfangszustand ein zeitlich konstanter flächenhafter Wärmestrom von $0,4 \text{ W/m}$ in tiefere Bereiche auftritt, wie er von Lofi et al. (1977) im Rahmen einer ersten Wärmeenergiebilanz für den dortigen Untergrund ermittelt wurde. Eine durch das Flächenwachstum der Stadt und der Industrie bedingte zeit- und ortsvariable Veränderung des flächenhaften Wärmestroms wurde nicht berücksichtigt. In Tabelle 3.2 sind die in der Modellberechnung angesetzten Entnahme- und Zugabebrunnen mit ihren hydraulischen und hydrothermischen Randbedingungen zusammengefaßt.

Es wurde angenommen, daß die flächenhafte Temperaturerhöhung am oberen Modellrand und die Brauchwassereinleitungen zu Beginn der Modellrechnung gleichzeitig erfolgen. Die Kühlwasserdoublotten I, II und III und der Infiltrationsbrunnen 7 (Kühlwassereinleitungen) sind über einen Zeitraum von $0 < t < 25$ Jahre in Betrieb, der Brunnen 8 wird nur 12,5 Jahre betrieben und danach stillgelegt; er dient ab diesem Zeitpunkt als Temperaturmeßstelle.



Grundwasserhöhenplan vom 5.4.1976 für den Raum Karlsruhe



Isothermenplan vom 6.10.1976 - Grundwasseroberfläche

Abb. 3.17. Grundwasserhöhenplan vom 5.4.1976 für den Raum Karlsruhe. Konfiguration für die Modellrechnungen: Piezometerhöhen- und Isothermenplan (aus Lofi et al. 1977).

Piezometric heads of 5.4.1976 for the Aquifer in the Karlsruhe area. Configuration for model calculations: map of piezometric heads and isotherms (from Lofi et al. 1977).

Tab. 3.2. Hydrothermische Brunnenrandbedingungen.
Hydrothermal well boundary conditions.

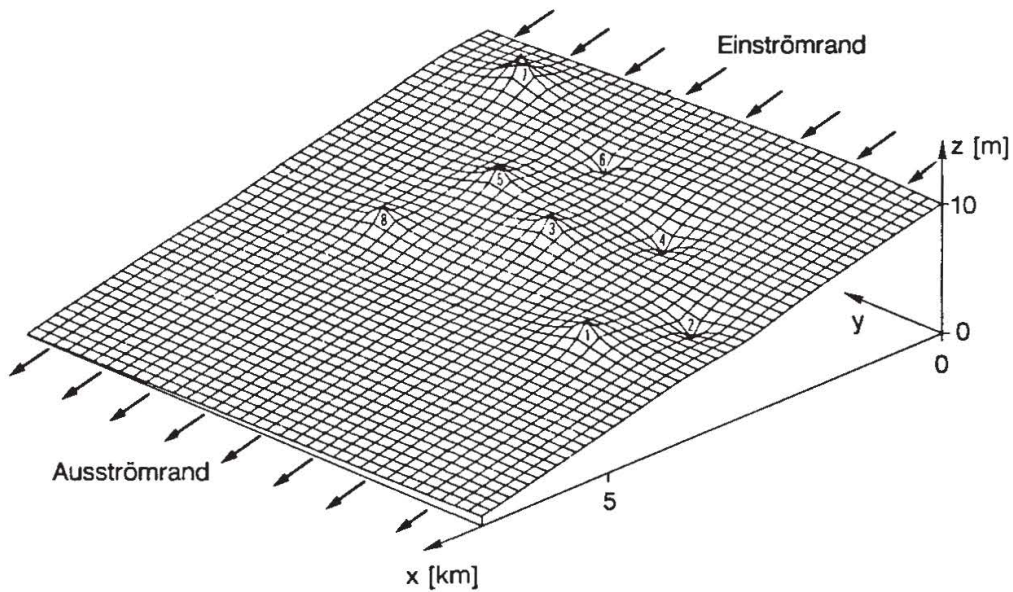
Doublette	Brunnen	Temperatur- erhöhung [K]	Durchfluß [m ³ /s]	Betriebsdauer Anfang-Ende [Jahre]
I	1 Zugabe	9	- 0,1	0-25
	2 Entnahme	-	+ 0,1	
II	3 Zugabe	3	- 0,033	0-25
	4 Entnahme	-	+ 0,033	
III	5 Zugabe	5	- 0,033	0-25
	6 Entnahme	-	+ 0,033	
	7 Zugabe	5	- 0,033	0-25
	8 Entnahme	5	+ 0,033	0-12,5
Einleitungstemperatur [°C]				
IV	9 Entnahme	-	+ 0,1	12,5-25
	10 Zugabe	10	- 0,1	Wärmenutzung
V	11 Entnahme	-	+ 0,075	12,5-25
	12 Zugabe	10	+ 0,075	Wärmenutzung

3.6.3.3 Temperaturverläufe

Die Stromlinien und Piezometerhöhen sind aus Abbildung 3.18 ersichtlich. In Abbildung 3.19 sind die auf den Ausgangszustand ($T_o = 10^\circ \text{C}$) bezogenen anthropogenen Temperaturänderungen nach dreieinhalbjährigem Betrieb der Kühlwassereinleitungen aufgetragen. Um die Direkteinleiter haben sich deutliche Temperaturveränderungen ergeben. Das in das Modellgebiet einströmende Grundwasser wird auf seinem Weg durch den flächenhaften Wärmeeintrag erwärmt; am Entnahmebrunnen 2 steigt die Temperatur des geförderten Wassers in dieser Zeit beispielsweise von 10°C zu Beginn der Rechnung auf etwa 11°C an ($\Delta T = 1 \text{ K}$); entsprechend erhöht sich auch der Absolutwert der Wassertemperatur im zugehörigen Infiltrationsbrunnen 1 (Abb. 3.19). Ähnliche Verhältnisse ergeben sich an den anderen Brunnendoubletten.

In dem hier betrachteten Modellgebiet entspricht die an den Untergrund pro Zeiteinheit abgegebene anthropogene Wärme einer Leistung von insgesamt ca. 15 MW; davon entfallen etwa 5 MW auf zwei Direkteinleiter (Abb. 3.17). Die hieraus resultierenden flächenhaften Temperaturerhöhungen im Grundwasser von etwa $\Delta T = 1-2 \text{ K}$ und die Temperaturspitzen bis $T_{\max} = 20^\circ \text{C}$ im Abstrombereich der

Piezometerhöhenverteilung im Modellgebiet



Stromlinienverlauf im Modellgebiet

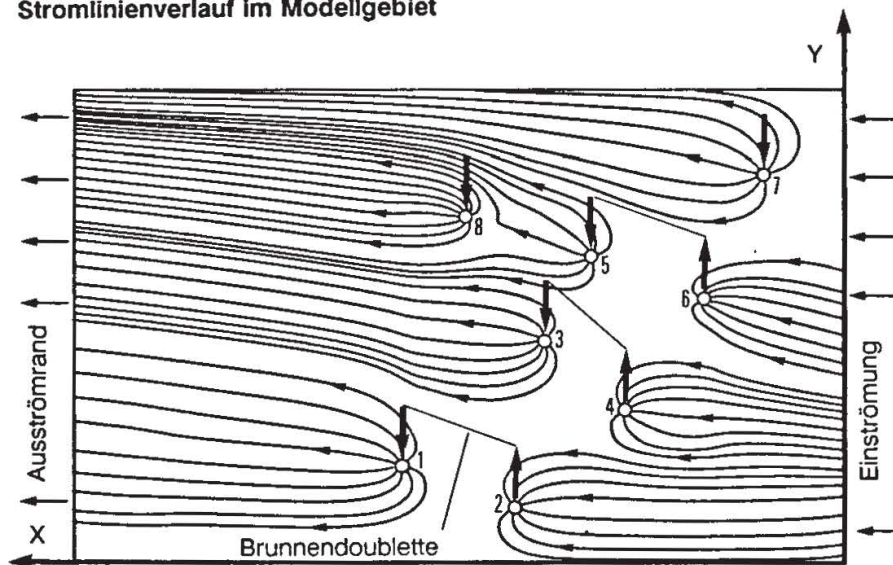


Abb. 3.18. Piezometerhöhen- und Stromlinienverlauf im Modellgebiet.
Piezometric heads and streamlines in the model area.

Direkteinleiter $\Delta T_{\max} = 10 \text{ K}$ stellen ein Wärmeenergiepotential dar, das bei entsprechender Bewirtschaftung der Grundwasserwärme teilweise wiedergewonnen werden kann. Im weiteren wird hierzu exemplarisch eine Bewirtschaftungsvariante diskutiert.

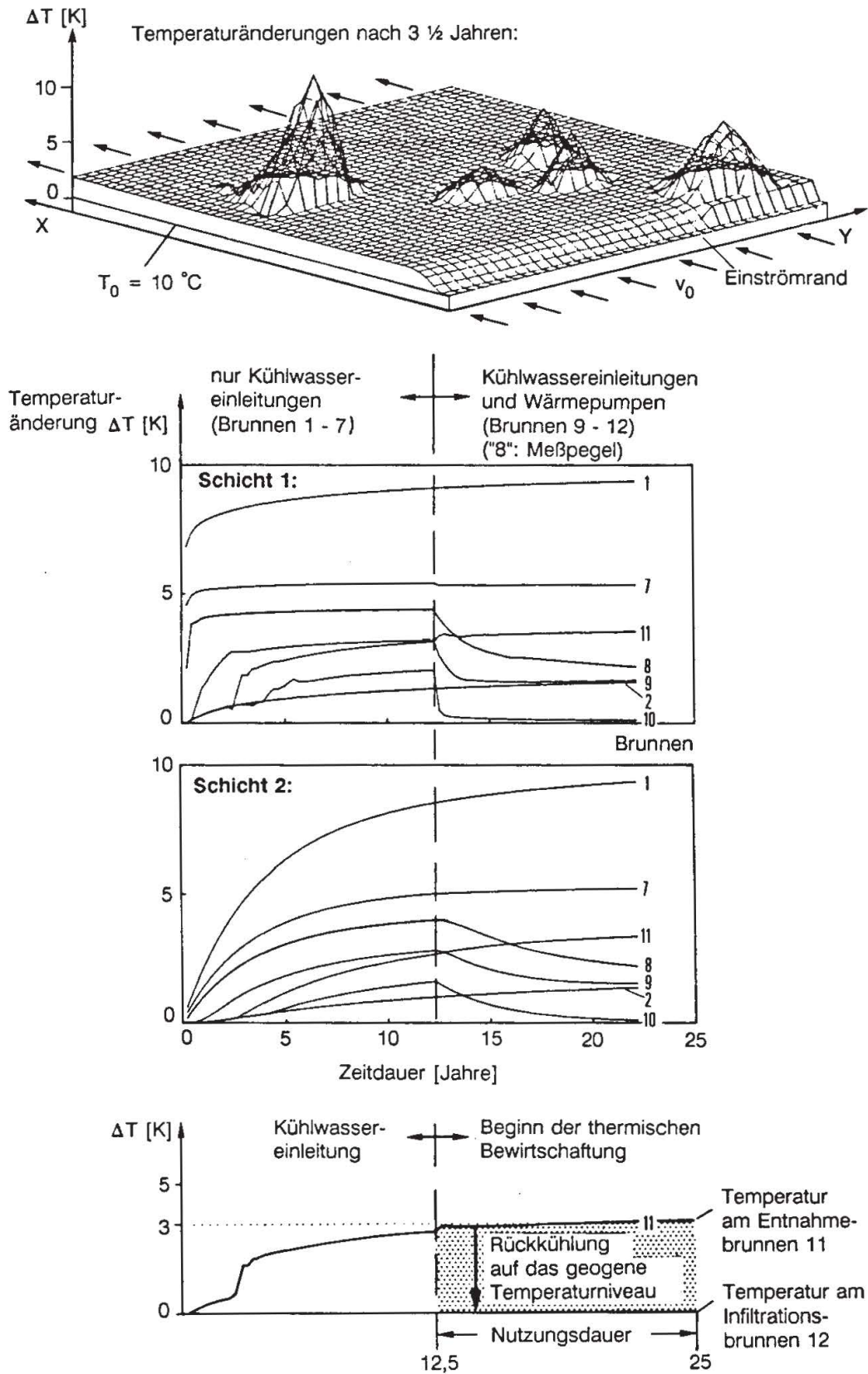


Abb. 3.19. Anthropogene Temperaturveränderungen im Modellgebiet.
 Anthropogenic temperature changes in the model area.

3.6.3.4 Bewirtschaftung der Grundwasserwärme

Nach einer Zeit von 12,5 Jahren wird eine thermische Nutzung des erwärmten Grundwassers im Modellgebiet ins Auge gefaßt. Hierzu wird zunächst die Kühlwasserinfiltration am Brunnen 8 stillgelegt, und gleichzeitig werden die Bewirtschaftungsbrunnen 9 und 10 sowie 11 und 12 (Doubletten) in den Zentren der entstandenen Temperaturanomalien in Betrieb genommen; hieraus ergibt sich zunächst eine veränderte hydraulische Gesamtsituation (Abb. 3.20). Die Nutzung des erwärmten Wassers soll dadurch erfolgen, daß das mit Hilfe der Brunnen 9 und 11 entnommene Wasser zunächst über Wärmetauscher geleitet wird und dabei auf die ungestörte Bezugstemperatur $T_0 = 10^\circ \text{C}$ zurückgekühlt wird. Anschließend wird es an den Stellen 10 und 12 dem Grundwasserleiter aus Wasserbilanzgründen wieder zugeführt.

Der Trennstromlinienverlauf für diese Brunnenkonfiguration (Abb. 3.20) verdeutlicht, daß der Einleiter mit der größten Aufwärmspanne (Doublette 1–2) nunmehr einen hydraulischen Kurzschluß in der Größenordnung von ca. 10% aufweist. Bemerkenswert an den übrigen hydraulischen Wechselwirkungen ist des weiteren die – wenngleich sehr geringe – Interaktion zwischen den Brunnen 4 und 7, obwohl diese senkrecht zur vorherrschenden Strömung sehr weit versetzt sind.

In Abbildung 3.21 sind die Auswirkungen der thermischen Bewirtschaftung dargestellt. Neben den Zonen mit positiven Temperaturänderungen bilden sich bei den Brunnen 10 bzw. in der Rückströmzone der Brunnen 11 und 12 größer werdende Bereiche mit Grundwasser aus, deren Temperaturen sich mit zunehmender Zeit der ungestörten Ausgangstemperatur annähern (siehe auch Abb. 3.19).

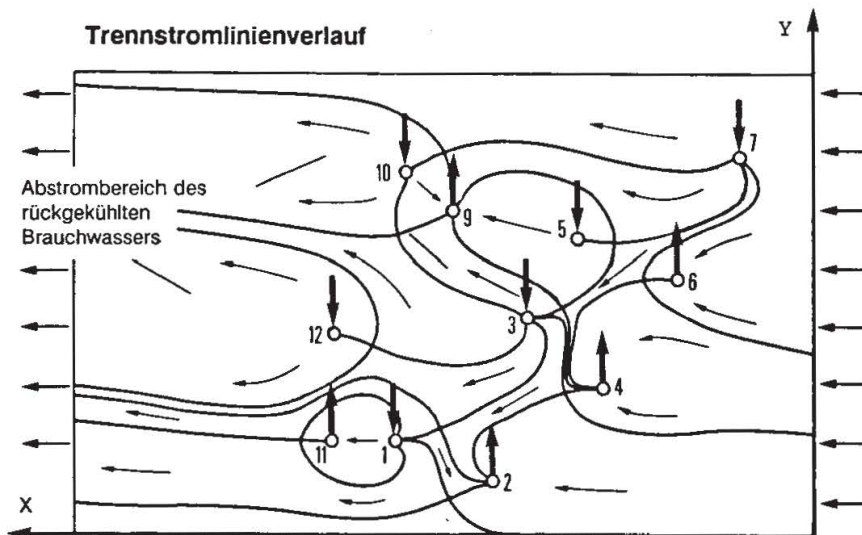


Abb. 3.20. Trennstromlinienverlauf nach Inbetriebnahme der Brunnen zur Bewirtschaftung der anthropogenen Temperaturerhöhungen.

Dividing streamlines after start of operation of the wells for management of anthropogenic temperature rises.

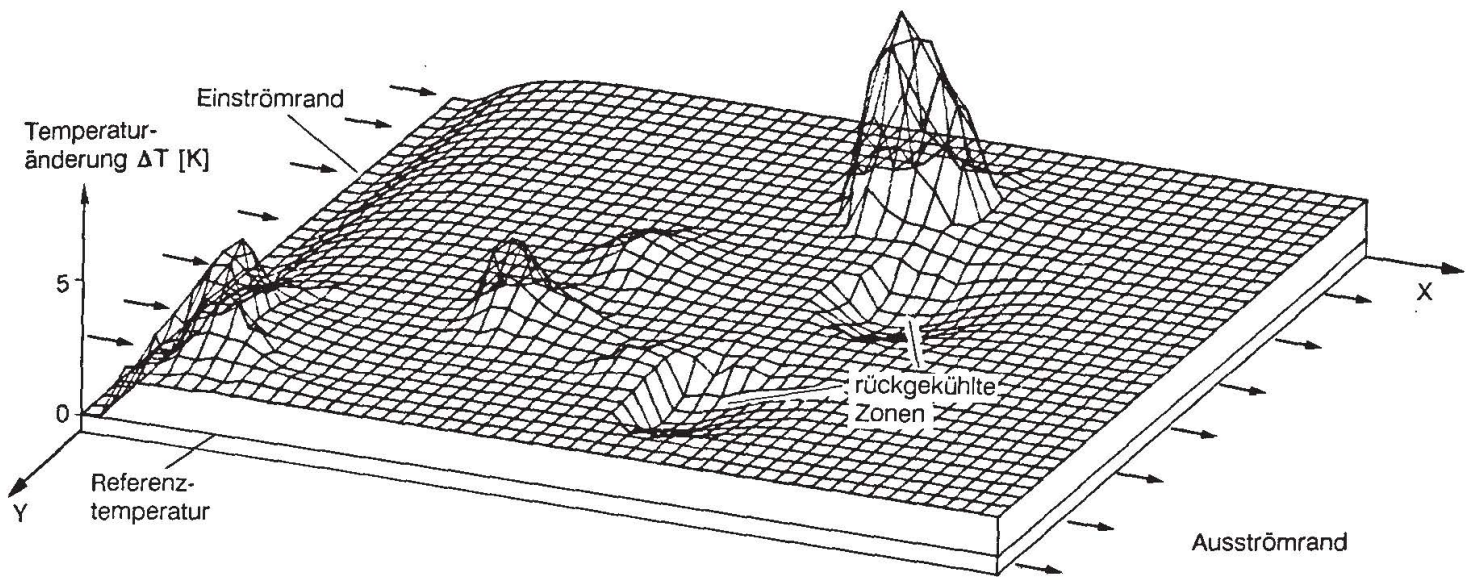


Abb. 3.21. Anthropogene Temperaturveränderungen und Rückkühlbereiche nach zehnjähriger thermischer Bewirtschaftung der Wärmeenergie des Untergrundes.

Anthropogenic temperature changes and back-cooling areas after 10 years of management of thermal energy of the subsurface.

Aufgrund des großen hydraulischen Kurzschlusses bei der Brunnendoublette 9–10 (thermische Nutzung) nimmt hier das nutzbare Wärmeenergiepotential relativ rasch ab. Hingegen ermöglicht die Doublette 11–12 eine dauerhafte thermische Nutzung.

Die thermische Leistung der Anlage beträgt ca. 0,88 MW. Die innerhalb des zwölfmonatigen Betrachtungszeitraums wiedergewinnbare Wärmemenge liegt bei ca. 0,35 TJ.

3.7 Schlußfolgerungen

Aus der Arbeit können folgende Schlußfolgerungen hinsichtlich der Berechnung großräumiger Temperaturanomalien gezogen werden.

- Die Entwicklung von Temperaturanomalien in Grundwasserleitern ist ein sehr langsamer Vorgang, der oft erst nach vielen Jahren oder Jahrzehnten einen stationären Endzustand erreicht. Die Wärmeausbreitung im gesättigten Bereich eines Grundwasserleiters ist im Regelfall ein konvektiv dominierter hydrothermischer Prozeß. Der Erfolg der Berechnungsverfahren zur Quantifizierung der Temperaturveränderungen im Grundwasser und der hydrothermischen Wechselwirkungen von Warm- und Kaltwassereinleitungen hängt wesentlich davon ab, inwieweit es mit Hilfe der Modellansätze gelingt, das Geschwindigkeitsfeld des Grundwasserleiters adäquat zu beschreiben.

- Temperaturunterschiede zwischen dem Grundwasser und dem Korngerüst werden in Porengrundwasserleitern aufgrund der großen spezifischen Kontaktfläche nahezu instantan abgebaut. Dies führt zu einer Retardierung einer Wärme- (Kälte-)front gegenüber dem Transport eines hydrodynamisch neutralen Wasserinhaltsstoffs, die bei der Wärmetransportberechnung berücksichtigt werden muß.
- Berechnungsverfahren ohne eine Koppelung des Strömungs- und Temperaturfeldes können dann zu sehr guten Ergebnissen führen, wenn die Durchlässigkeit des Untergrundes (ohne Temperatureffekte) korrekt im Modellansatz erfaßt wird.
- Die vergleichsweise langsam ablaufenden Wärmeaustausch- und -speichereffekte in den Deckschichten und im Liegenden tragen zu einer zusätzlichen Verzögerung der Ausbreitung einer Temperaturanomale bei, was sich in Temperaturganglinien phänomenologisch als zusätzlicher Dispersionseffekt (größere Vermischungszone, Tailing, etc.) zeigt.
- Der wichtigste Beitrag zum Abbau von Temperaturanomalien resultiert aus dem Wärmeaustausch des Grundwasserleiters mit der Atmosphäre, der bei vorgegebenen Temperaturgradienten primär von der Mächtigkeit und der Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht und vom vorherrschenden Sickerwasserstrom abhängt. Aufgrund dieses Wärmeaustauschs unterliegt das oberflächennahe, geogene Grundwassertemperaturfeld typischen jahreszeitlichen Schwankungen, deren Amplitude mit zunehmender Tiefe abklingt. Sofern nicht Temperaturwerte, sondern lediglich anthropogene Temperaturänderungen interessieren, genügt bei längerfristigen Betrachtungen über mehrere Dekaden der Ansatz zeitlich gemittelter Temperaturrandbedingungen an der Bodenoberfläche (z.B. Jahresmittel der Luft- oder Bodenoberflächentemperatur).
- Das mathematisch-numerische Instrumentarium zur Berechnung der Temperaturentwicklung entlang von Stromlinien und zur Berechnung großräumiger Temperaturfelder im Grundwasser sowie auch zur Quantifizierung hydraulischer Wechselwirkungen zwischen Schluck- und Entnahmebrunnensystemen steht zur Verfügung. Die hier vorgestellten Wärmetransportmodelle wurden in mehreren Fallstudien eingesetzt, wie dies in Kapitel 8 dargestellt wird. In allen praktischen Anwendungsfällen liegen die Hauptprobleme in der Erkundung des Untergrundes und in der Beschaffung von Naturdaten, anhand derer die Parameter der numerisch approximierten Strömungs- und Wärmetransportgleichung bestimmt und die Strömungs- und Temperaturrandbedingungen festgelegt werden können.
- Ohne nähere Kenntnis der möglichen thermisch-biologischen Effekte auf die Grundwasserqualität erscheinen anthropogene Temperaturveränderungen zumindest soweit tolerierbar, als sie sich innerhalb des natürlichen Schwankungsbereichs der Grundwassertemperaturen bewegen. Darüber hinaus müssen erst noch Erfahrungen gesammelt werden. Die Entscheidung, eine Nutzung der Grundwasserwärme zumindest temporär zuzulassen, wird dadurch erleichtert, daß anthropogene Temperaturveränderungen – im Gegensatz zu vielen stofflichen Grundwasserbelastungen – prinzipiell reversibler Natur sind.

Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
c, c_k, c_w	[J/kg K]	spezifische Massenerwärme (Korn, Wasser)
D_w	[J/s m K]	Effektivwert des Wärmedispersionskoeffizienten
\vec{e}_z	[-]	Einheitsvektor in z-Richtung
E	[J]	Wärmemenge
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H, h	[m]	Piezometerhöhe
k_f	[m/s]	Durchlässigkeit
k_o	[m ²]	Permeabilität des Untergrundes
L_a	[m]	Abkühlänge einer anthropogenen Temperatur-anomalie
L_d	[m]	Dämpfungslänge einleitungsbedingter Temperaturschwankungen
m_D, m_G, m_1, m_2	[m]	Mächtigkeit (Deckschichten, Grundwasserleiter, Stockwerk 1, Stockwerk 2)
n_e	[-]	effektive (durchflußwirksame) Porosität
p	[N/m ²]	Druck
q	[m/s]	Sickerwasserstrom (Grundwasserneubildung)
q'	[1/s]	Quellstärke je Volumeneinheit
Q	[m ³ /s]	Infiltration oder Entnahme
t	[s]	Zeit
t_a	[s]	Abkühlzeit einer Temperaturanomalie
t_d	[s]	Dämpfungszeit instationärer Temperaturschwankungen
t_p	[s]	Dauer der Periode einleitungsbedingter Temperaturschwankungen
T, T_o, T_L	[° C]	Temperatur, geogene Grundwassertemperatur, Temperatur des Liegenden
ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
v_a	[m/s]	Abstandsgeschwindigkeit des Fluids
v_f	[m/s]	Filtergeschwindigkeit
v_T	[m/s]	Abstandsgeschwindigkeit der Wärmefront
W	[W/m ²]	spezifischer Wärmeenergiestrom
w	[W/m ³]	Wärmeenergiequelle im Kontrollvolumen
λ, λ_{eff}	[J/s m K]	Wärmeleitfähigkeit, effektive Wärmeleitfähigkeit des Wasser-Korn-Gemischs
$\lambda_D, \lambda_G, \lambda_L$	[J/s m K]	Wärmeleitfähigkeit (Deckschicht, gesättigter Bereich, Liegendes)
ν	[m ² /s]	kinematische Zähigkeit
ρ_k, ρ_w	[kg/m ³]	Dichte (Korn, Wasser)
$(\rho c)_D, (\rho c)_G, (\rho c)_L$	[J/m ³ K]	spezifische Volumenwärme des Wasser-Korn-Gemischs (Deckschicht, Grundwasserleiter, Liegendes)
$\Theta (\tau - t_i)$	[-]	Einheitsstufenfunktion: $\begin{cases} 0 & \text{für } \tau \leq t_i \\ 1 & \text{für } \tau > t_i \end{cases}$

Literatur

- Balke, K. (1974): Der thermische Einfluß besiedelter Gebiete auf das Grundwasser, dargestellt am Beispiel der Stadt Köln. *GW-F-Wasser Abwasser* 3, 117–124.
- Balke, K. (1979): Die Abkühlung des Untergrundes beim Betrieb von Wärmepumpen. *Elektrowärme International*, Edition A.
- Bear, J. (1979): *Hydraulics of Groundwater*. McGraw Hill Book Comp., New York.
- Björck, A.; Dahlquist, G. (1972): *Numerische Methoden*. R. Oldenbourg, München, Wien.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1959): *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford.
- Charbeneau, R.J.; Street, R.L. (1979): Modelling groundwater flow fields containing point singularities: A technique for singularity removal. *Water Resour. Res.* 15 (6), 583–594.
- Doughty, C.; Hellström, G.; Tsang, C.F. (1982): A dimensionless parameter approach to the thermal behavior of an aquifer thermal energy storage system. *Water Resour. Res.* 18 (3), 571.
- DVWK-Schriften 61 (1983): Beiträge zu tiefen Grundwässern und zum Grundwasserwärmehaushalt. Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Grima, M. (1984): *Modelisation des Bilans Thermiques des Aquiferès a Surface Libre Influence de la Zone non Saturée et Etude des Panaches de Rejet de Pompe a Chaleur*. Thèse à l'Université Scientifique et Medicale et L'Institut National Polytechnique de Grenoble, Rapport du B.R.G.M. 84 SGN 108 EAU-IRG.
- Gröber, H.; Erk, S.; Grigull, U. (1963): *Wärmeübertragung*. 3. Aufl. Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- Heitfeld, K.H.; Krapp, L.; Weiler, A. (1981): Temperaturanomale im Stadtgebiet von Duisburg und deren Auswirkungen auf Baumaßnahmen der Stadtbahn. *Z. Dtsch. Geol. Ges.*, 132.
- Herrera, I.; Yates, R. (1977): Integrodifferential equations for systems of leaky aquifers and applications, 3. A numerical method of unlimited applicability. *Water Resour. Res.* 13 (4), 725–732.
- Höllein, K.; Sutter, K.; Wirth, H. (1983): *Grundwassertemperatur München*. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.
- Hötzl, H.; Makurat, A. (1981): Veränderungen der Grundwassertemperaturen unter dicht bebauten Flächen am Beispiel der Stadt Karlsruhe. *Z. Dtsch. Geol. Ges.* 132, 767–777.
- IGWMC (1982): *Heat Transport Models which are Documented and Available*. International Ground Water Modelling Center, Holcomb Research Institute, Butler University, Indianapolis, Indiana.
- Kinzelbach, W. (1987): *Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser*. Schriftenreihe Wasser, Abwasser, Oldenbourg, München.
- Kobus, H. (1979): *Ausbreitung von abgekühltem Wasser in Grundwasserleitern*. Berichtsband, Statusseminar „Wärmepumpen und Gewässerschutz“ des Umweltbundesamtes, Erich Schmitt, Berlin.
- Kobus, H. (1983a): Beeinflussung der Grundwassertemperatur durch Wärmeentzug und Wärme eintrag, Theoretische Grundlagen. In: *Pro Aqua – pro Vita* 83, Band 9C, Wasser- und Umweltprobleme bei Wärmepumpen und Solaranlagen. Pro Aqua AG, Basel.
- Kobus, H. (1983b): *Berechnungsgrundlagen für Wärmeausbreitung und -transport im Grundwasser*. DWWV-Fortbildungskurs 3, Wiener Mitteilungen, Wasser, Abwasser, Gewässer, Band 52, TU Wien.
- Kobus, H.; Mehlhorn, H. (1980): Beeinflussung von Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen. *Gas- und Wasserfach* 6, 261–268.
- Kobus, H.; Söll, T.; Mehlhorn, H. (1983): Temperaturanomalien in Porengrundwasserleitern infolge Warm- und Kaltwassereinleitungen. *Wasserwirtschaft* 9, 265–270.
- Lofi, W.; Mehlhorn, H.; Kobus, H. (1977): *Betrachtungen zum Wärmehaushalt des Untergrundes im Raum Karlsruhe*. Bericht 54, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.
- Mehlhorn, H. (1982): *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*. Diss., Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 50.

- Mehlhorn, H.; Kobus, H. (1979): Effects of buoyancy on the flow and temperature fields near injection wells. Proc. XVIII IAHR-Congress, Cagliari, Vol 3, 391–398.
- Mehlhorn, H.; Spitz, K.H.; Kobus, H. (1981): Kurzschlußströmung zwischen Schluck- und Entnahmebrunnen – kritischer Abstand und Rückstromrate. *Wasser und Boden* 4, 170–174.
- Merheb, F. (1984): *Modèle de Gestion des Echanges Hydrothermiques dans les Nappes Souterraines: Application à la Region de Strasbourg*. Diss., Institut de Mechanique des Fluides de Strasbourg.
- Noyer, M.-L. (1977): Simulation des Transfers Thermiques dans les Aquifères – Conditions de Validité des Solutions Analytiques. BRGM, 77 SGN 598 GTH, Orleans Cedex.
- Pelka, W. (1985): Die Berechnung von Stoff- und Wärmetransportvorgängen in gesättigungs- und ungesättigter Grundwasserströmung. *GWF Wasser Abwasser* 4, 192–198.
- Prickett, T.A.; Naymik, A.; Lonquist, G. (1981): A Random Walk Solute Transport Model for Selected Groundwater Quality Evaluations. Illinois State Water Survey, Bulletin 65.
- Sauty, J.P. (1980): An analysis of hydrodispersive transfer in aquifers. *Water Resour. Res.* 16 (1), 145–158.
- Sauty, J.P.; Gringarden, A.C.; Menjoz, A.; Landel, P.A. (1982a): Sensible energy storage in aquifers, 1. Theoretical study. *Water Resour. Res.* 18 (2), 245–252.
- Sauty, J.P.; Gringarden, A.C.; Menjoz, A.; Landel, P.A. (1982b): Sensible energy storage in aquifers, 2. Field experiments and comparison with theoretical results. *Water Resour. Res.* 18 (2), 253–265.
- Söll, T. (1987a): Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 67.
- Söll, T. (1987b): Numerische Modellierung des großräumigen Wärmetransports in Porengrundwasserleitern. Dokumentation des Wärmetransportmodells ROEHRE. Programmdokumentation 87/8 (HWV 082), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Söll, T. (1987c): Numerische Modellierung des großräumigen Wärmetransports in Porengrundwasserleitern. Dokumentation des Horizontalmodells TEMOS4. Programmdokumentation 87/9 (HWV 083), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Spiegel, M.R. (1965): *Schaum's Outline of Theory and Problems of Laplace-Transforms*. McGraw-Hill, New York.
- Tsang, C.-F.; Doughty, C. (1985): Detailed validation of a liquid and heat flow code against field performance. 8th SPE Symp. on Reservoir Simulation, Dallas/Texas.
- Voigt, H.D.; Häfner, F. (1985): Grundlagen des Stoff- und Wärmetransports im Untergrund. *Geodyn. Erkd.* 24,
- Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kanton Bern (WEA), Ingenieur- und Studienbüro A. Werner (1982/83): Nutzung von Grundwasser für Wärmepumpen, Versickerungstest Aefligen, Versuch 2 (unveröffentl.).