

Der Wärmehaushalt des Grundwassers und seine Nutzung

von Prof. Dr. Helmut Kobus und Dipl.-Ing. Thomas Söll, Stuttgart

1. Einleitung

Der Wärmehaushalt des Untergrunds wird geprägt vom vertikalen Wärmeeintrag aus Sonneneinstrahlung über die Bodenoberfläche einerseits und vom geothermischen Wärmestrom andererseits. Aufgrund der dämpfenden Eigenschaften des Untergrunds weist Grundwasser eine im Jahresgang weitgehend ausgeglichene Temperatur auf. Diese Eigenschaft gehört mit zu den wesentlichen Vorzügen des Grundwassers in Bezug auf dessen Nutzung für die Trinkwasserversorgung.

Durch anthropogene Einflüsse zeigen Grundwasservorkommen in weiten Bereichen Abweichungen von den natürlichen Temperaturverhältnissen. So zeigen sich beispielsweise in Ballungsgebieten deutliche Erhöhungen der Grundwassertemperaturen. Besonders ausgeprägte Temperaturanomalien treten in Verbindung mit Kühlwassereinleitungen oder Grundwasserwärmepumpenanlagen auf.

Überlegungen zur thermischen Nutzung der Grundwasserwärme müssen sich naturgemäß an den primären Belangen der Trinkwasserversorgung orientieren. Grundwasser ist nach dem Wasserhaushaltsgesetz vorrangig für die Trinkwasserversorgung reserviert, und es ist unumstritten, daß dem Schutz unserer Grundwasservorkommen und der Erhaltung unserer wertvollsten Trinkwasserressource die oberste Priorität gebührt. Eine wichtige Fragestellung der Wasserwirtschaft geht deshalb dahin, die heutigen und zukünftigen Auswirkungen anthropogener Wärmeeinträge und -entzüge quantitativ zu erfassen und durch eine sorgfältig geplante regionale Bewirtschaftung der Grundwasserwärme sicherzustellen, daß Beeinträchtigungen der Trinkwasserversorgung ausgeschlossen werden können und verschiedene thermische Nutzungen ohne nachteilige Wechselwirkungen bleiben.

Der vorliegende Beitrag gibt zunächst eine Übersicht über die verschiedenen Einflußgrößen auf das natürliche Temperaturfeld im Untergrund und zeigt quantitativ die Auswirkungen anthropogener Temperaturveränderungen auf den Wärmehaushalt oberflächennaher Grundwässer auf. Die wirksamen

Wärmetransportmechanismen werden diskutiert und Hinweise auf Abschätzungsmethoden für die räumliche Ausdehnung von Temperaturanomalien gegeben. Den Abschluß bildet ein Überblick über den gegenwärtigen Stand des Berechnungsinstrumentariums, das als Planungshilfsmittel für die regionale Nutzung der Grundwasserwärme zur Verfügung steht.

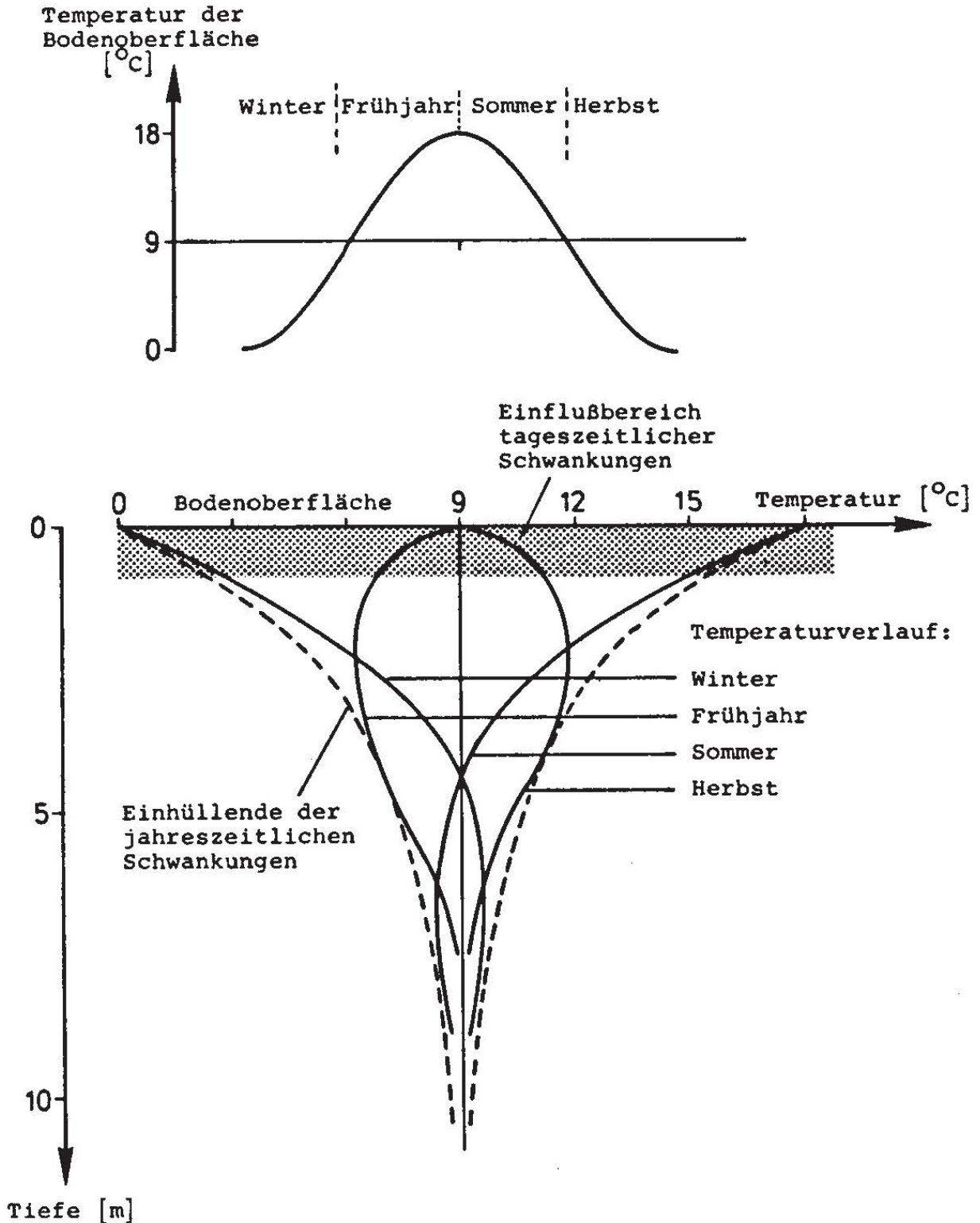


Abb. 1 Jahresgang der oberflächennahen Untergrundtemperaturen nach [3]

2. Der natürliche Wärmehaushalt des Untergrunds

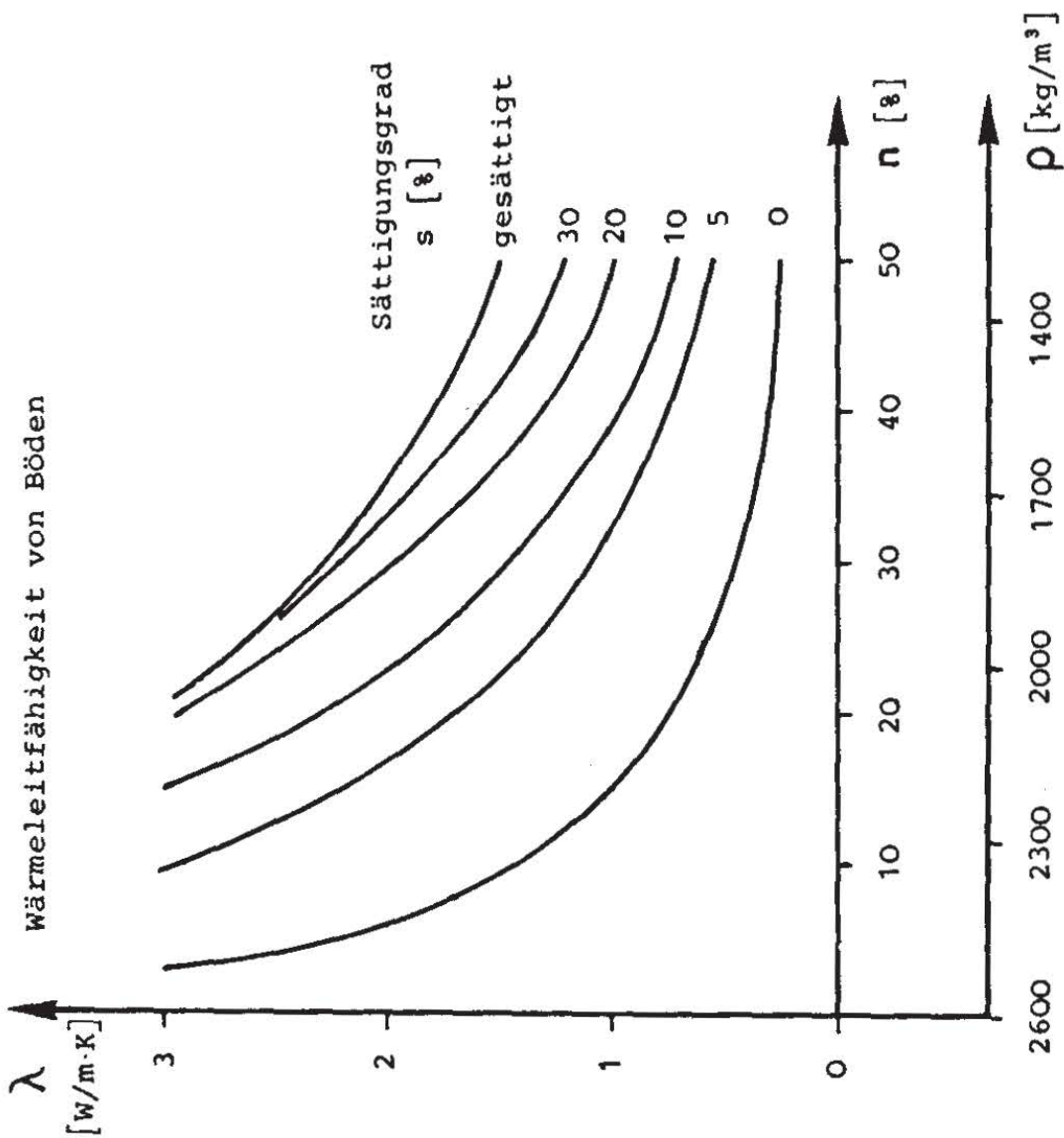
In Oberflächennähe wird die Untergrundtemperatur überwiegend vom Wärmeaustausch mit der Atmosphäre bestimmt. Dies betrifft in der Regel die obersten 10 bis 20 Meter. Der Wärmeaustausch hängt von den meteorologischen Bedingungen (Lufttemperatur, Wind, Feuchtigkeit) ab und weist einen ausgeprägten und typischen Jahresgang auf. Die letztlich hierfür maßgebende Einflußgröße ist der Anteil des solaren Energiestroms (Solarkonstante: 1350 W/m^2), der die Erdoberfläche erreicht; dieser liegt für die Bundesrepublik im Jahresmittel in der Größenordnung von 80 bis 130 W/m^2 [1]. Je nach Bewuchs und Topographie wird ein Teil dieser Wärmeenergie als Bodenstrahlung reflektiert, in Form von Verdunstungswärme abgegeben oder dem Boden als Wärme zugeführt.

Ein erheblicher Teil der mit der Verdunstung durch Evaporation (unbewachsener Boden) und Transpiration (Bewuchs) abgegebenen Wärmeenergie wird in Form des Niederschlags dem Untergrund erneut zugeführt, so daß das Temperaturfeld im Untergrund von den Niederschlagsereignissen deutlich mitgeprägt wird.

Je nach Jahreszeit ergibt eine Bilanz der Wärmeströme positive wie auch negative Zahlenwerte, die zu Schwankungen der Temperatur im Boden führen. Diese breiten sich vorwiegend über Wärmeleitung ins Erdinnere aus [3], (Abb. 1) und klingen exponentiell mit zunehmender Eindringtiefe ab. Je nach den thermischen Eigenschaften des anstehenden Bodens (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Abb. 2) werden kurzfristige Schwankungen (Tag-Nacht-Zyklus, Wettergeschehen) innerhalb von 3 bis 5 Dezimetern völlig ausgeglichen, während saisonale Temperaturveränderungen (Jahreszyklus) indessen bis in Tiefen von 10 bis 20 Metern reichen können. Unterhalb dieses Bereichs sind die Grundwassertemperaturen zumeist zeitlich konstant und weisen eine Temperatur auf, die in etwa dem Jahresmittel der Lufttemperatur des Gebiets entspricht oder geringfügig (ca. 1 bis 2 K) darüberliegt. Für Mitteleuropa kann ein Wert von etwa 10°C als repräsentativ gelten [4].

Neben einer Dämpfung erfolgt eine Phasenverschiebung des Temperaturverlaufs, die in etwa 5 Metern Tiefe ein antizyklisches Verhalten gegenüber dem Jahresgang der Lufttemperatur bewirken kann (Sommer: kalt, Winter: warm, Abb. 1).

In Regionen mit sehr großen Grundwasserneubildungsraten unterliegt die Grundwassertemperatur gegebenenfalls auch in noch größeren Tiefen natürlichen Schwankungen, die auf den Wärmeeintrag bzw. -entzug durch das infiltrierende Wasser zurückzuführen sind. Dies zeigen Untersuchungen im



Stoff/ Bodenmaterial	spezifische Volumenwärme $\rho \cdot c$ [MJ/m ³ K]
Wasser	4,187
Luft	0,0027
Quarzit	2,0 - 2,1
Quarzsand (rein, $n=0,3$)	1,4 - 2,7
sandiger, leicht lehmiger Boden (mäßig feucht)	1,4 - 1,5
sandiger, leicht lehmiger Boden (stark feucht)	1,5 - 1,8
Sandboden, lehmig	1,4 - 2,3
natürliche Grund- wasserleiter	2,0 - 3,0

λ : Wärmeleitfähigkeit

n : Porosität

ρ : Dichte

Abb. 2 Hydrothermische Bodenparameter

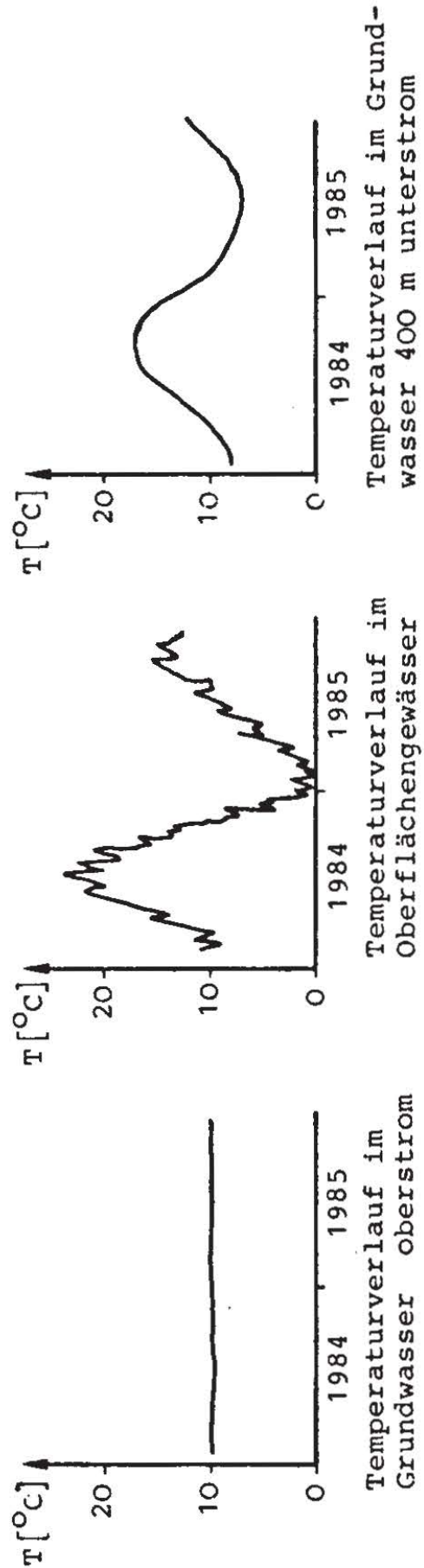
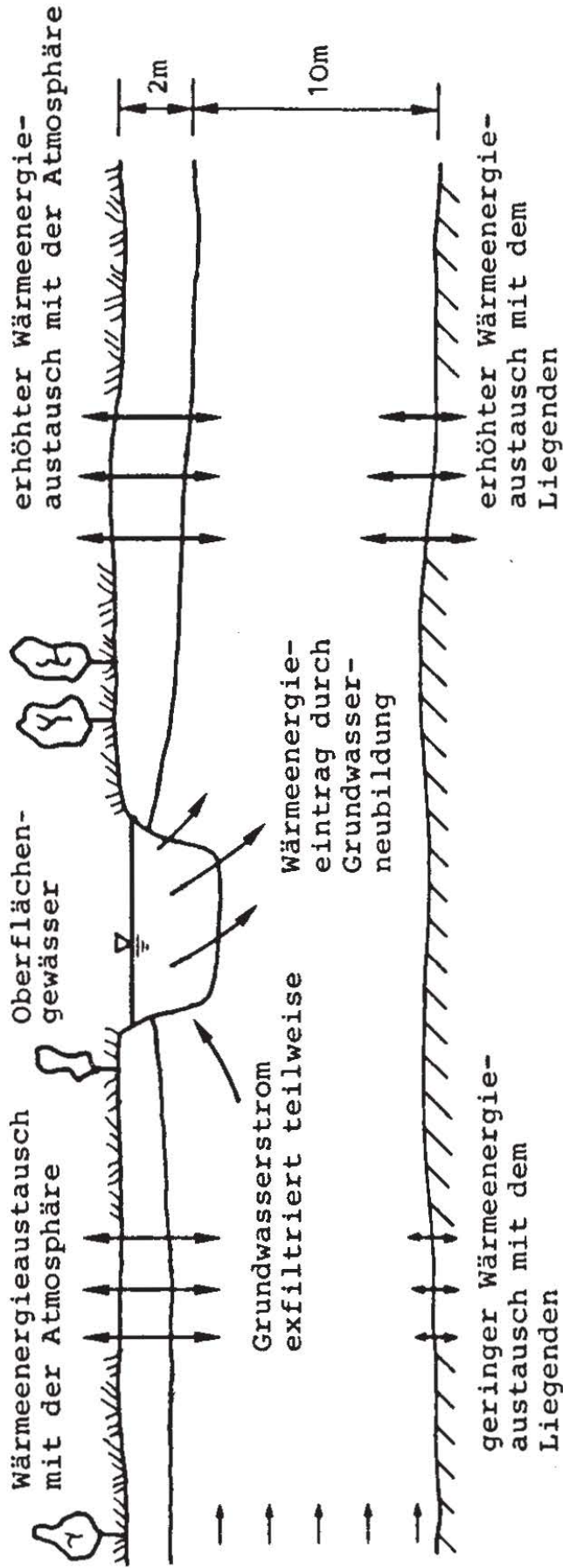


Abb. 3 Wärmeenergieeintrag in das Grundwasser durch Oberflächengewässer

unteren Emmental, wo in einem hydrothermischen Versuchsfeld Grundwassertemperaturen ober- und unterstrom eines Oberflächengewässers gemessen wurden (Abb. 3). Während oberstrom nur geringe Temperaturveränderungen zu beobachten waren, traten infolge der beträchtlichen Versickerungen von Flußwasser, das weitgehend dem Jahresgang der Lufttemperatur folgt, im unterstromigen Abschnitt im gesamten Grundwasserbereich (Mächtigkeit ca. 10 m) Temperaturschwankungen bis zu 5 K auf.

Die meßtechnische Erfassung der Grundwassertemperaturen erfordert einen geeigneten Meßstellenausbau und sorgfältig durchgeführte Messungen. Ungewollte Vertikalströmungen im Bohrloch, Störungen des Temperaturprofils durch die Messung oder Fehlereinflüsse von der Oberfläche her können die Meßergebnisse stark verfälschen. Konkrete Hinweise zum geeigneten Meßstellenausbau und zur Durchführung von Temperaturmessungen sowohl im Grundwasser als auch in der ungesättigten Bodenzone sind im einzelnen in [5] dargestellt.

3. Tiefengrundwasser und geothermische Energie

Tiefliegende Grundwässer beziehen im Gegensatz zu den oberflächennahen Bereichen ihre Wärme ausschließlich durch geothermische Energiequellen (radioaktiver Zerfall, aufsteigendes Magma). Die Größenordnung des zur Erdoberfläche hin gerichteten Wärmestroms (Abb. 4) beträgt in Mitteleuropa etwa 0,045 bis 0,14 W/m² [6] und weltweit etwa 0,02% des Sonnenenergiestroms [8]. Demzufolge steigt die Erdtemperatur um etwa 1 K je 30 Meter an (Abb. 5). Unter günstigen Bedingungen (geothermische Anomalie) kann die Erdwärme energiewirtschaftlich genutzt werden. An erster Stelle ist hierbei die direkte Nutzung heißer Quellwässer zu nennen wie sie zum Beispiel aus Island (Geysire), Italien (Römerbäder), Deutschland (Mineralbäder) bekannt sind und weltweit zum Betreiben geothermischer Kraftwerke (The Geysers – USA, Larderello - Italien, Wairakei - Neuseeland, Cerro Prieto - Mexico) herangezogen werden. Abgesehen von wenigen Stellen der Erde sind jedoch meist teure Erschließungsbohrungen in großen Tiefen (bis 3000 m) erforderlich.

In der Bundesrepublik werden in der norddeutschen Tiefebene, im Oberrheingraben und in Oberschwaben Pilotprojekte betrieben mit dem Ziel, die Nutzungswürdigkeit geothermischer Wärmeenergie aufzuzeigen. Der Energievorrat der „Urach-Anomalie“ beträgt nach [9], [10] rund 24,3 Mrd. Kilowattstunden und entspricht damit in etwa den gesamten Erdölenergievorräten im Bereich des Alpenvorlandes. Im Fall der Demonstrationsprojekte „Saulgau“ und „Bad Buchau“ [10] wird die geothermische Energie aus den Sedimenten

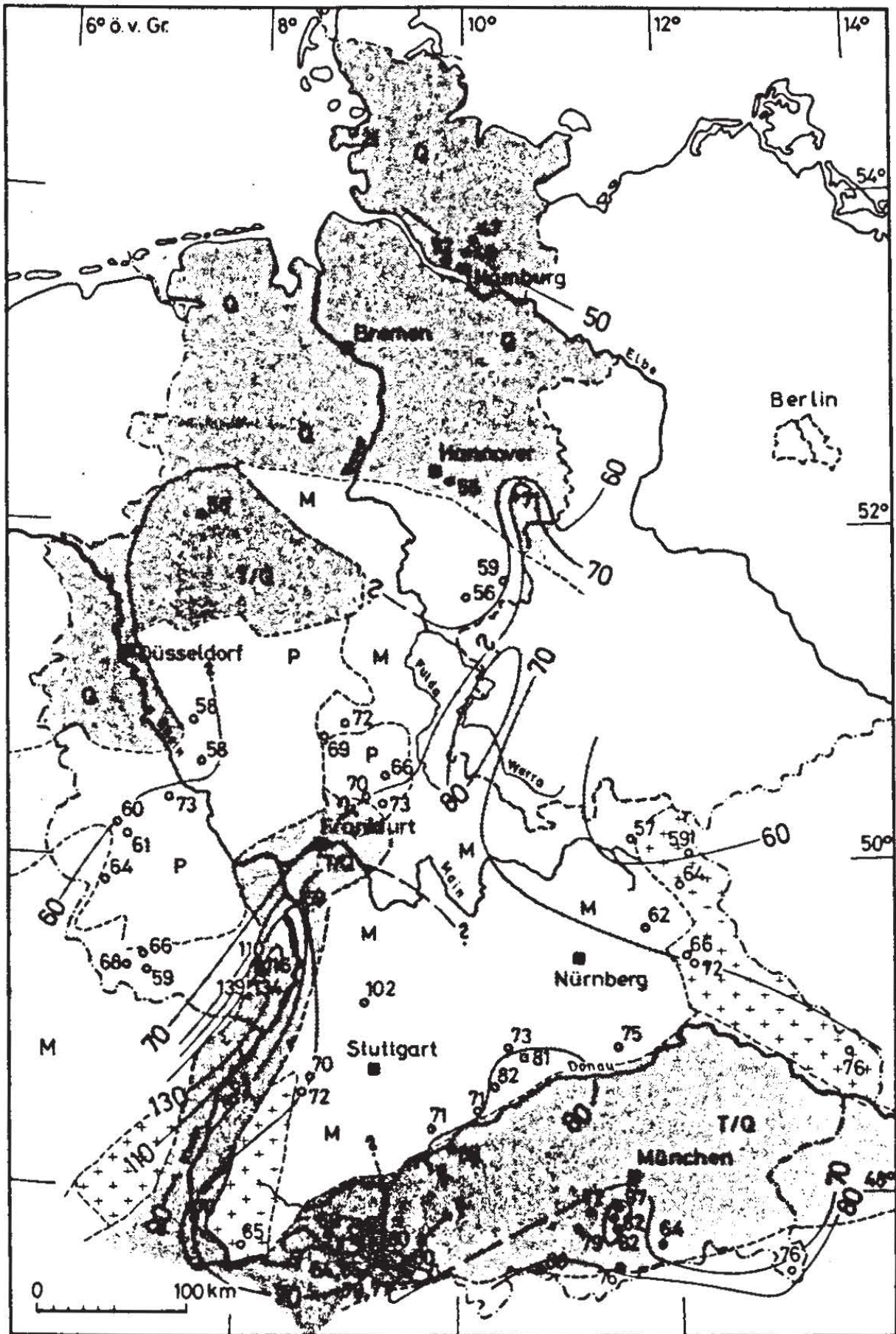


Abb. 4 Verteilung des geothermischen Erdwärmestroms (W/m^2) in Deutschland nach [6]

des Süddeutschen Molassebeckens genutzt zur Beheizung von Thermalbädern bzw. zur Fernwärmeversorgung.

Zur Nutzung der geothermischen Wärmeenergie aus Tiefengrundwasser kommen drei technische Verfahren zur Anwendung:

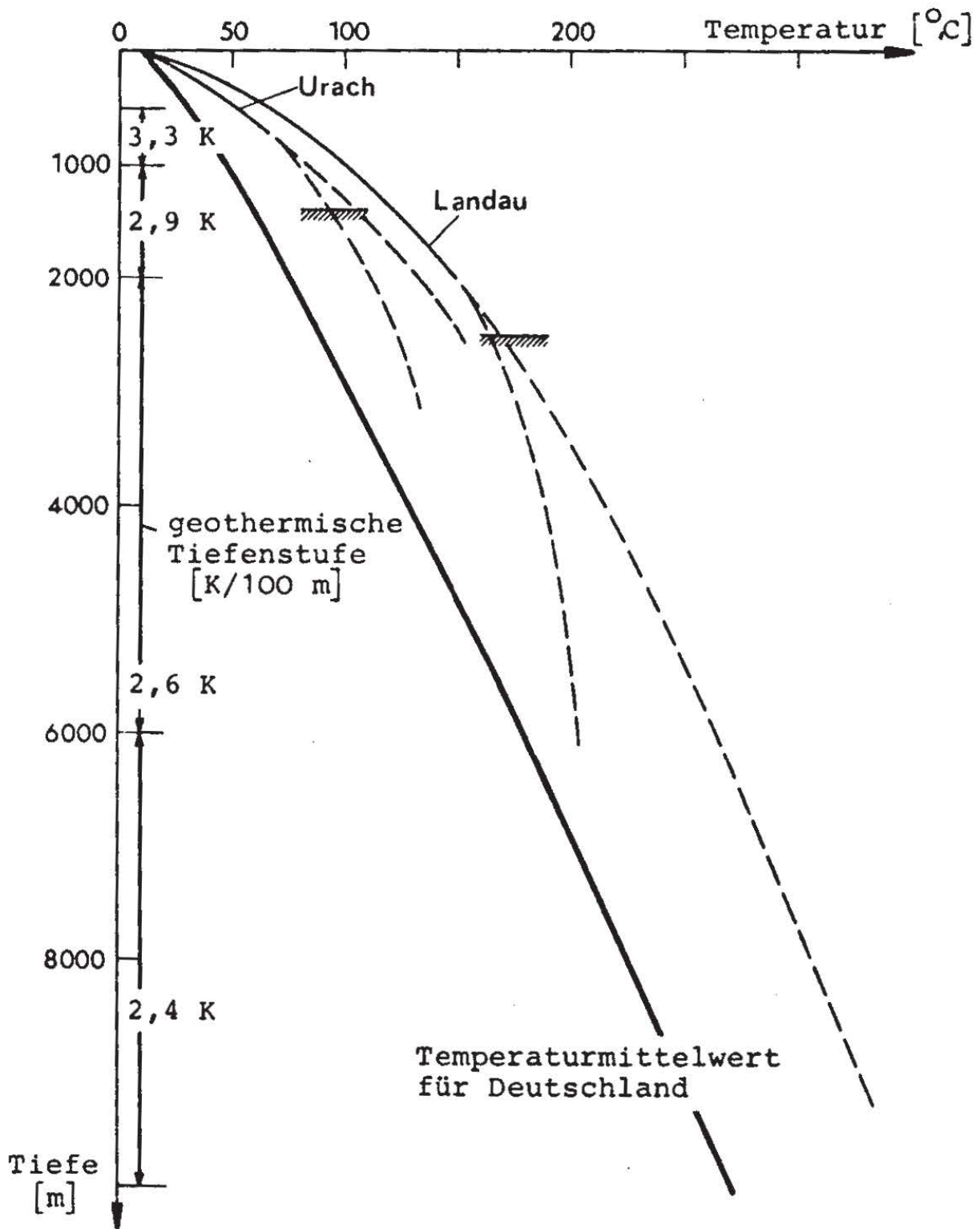


Abb. 5 Temperaturzunahme im Untergrund infolge des geothermischen Erdwärmestroms nach [6]

- Das „Doubletten“-Verfahren mit räumlich getrennter Entnahme- und Infiltrationsstelle gewährleistet zwar eine ausgeglichene Wasserbilanz, ist dafür aber mit hohen Investitionskosten verbunden, da es mindestens zwei Bohrungen erfordert.
- Beim Einbohrlochverfahren wird das aus der Tiefenbohrung geförderte heiße Wasser nach der Nutzung in ein Oberflächengewässer eingeleitet. Dieses Verfahren ist auf Tiefenwässer mit niedrigen Salzfrachten beschränkt, bei denen die Einleitung in ein Oberflächengewässer noch zulässig ist. Das Einbohrlochverfahren setzt einen großen unterirdischen Wasservorrat voraus, so daß auch bei Dauerbetrieb ausreichend Wasser mit hohem Temperaturniveau dem Entnahmebrunnen zuströmt.
- Das Hot-Dry-Rock-Verfahren ist eine häufig angewendete Variante des Einbohrlochverfahrens. Hierbei wird in einer Tiefbohrung die Wärmeenergie des heißen (trockenen) Gesteins, welches durch unterirdische Sprengladungen mit Rissen versetzt wurde, mit Hilfe einer Kühlflüssigkeit (z. B. Wasser) entzogen [10].

4. Anthropogene Wärmequellen und -senken

Anthropogene Veränderungen der oberflächennahen Grundwassertemperatur kommen durch vielfältige Ursachen zustande. Vornehmlich in industriellen Ballungsräumen und generell unter Großstädten (Abb. 6) werden infolge der Anhäufung verschiedener Wärmequellen merklich erhöhte Grundwassertemperaturen festgestellt:

Stadt	Temperaturerhöhung	Literaturhinweis
Karlsruhe	4–5 K; örtlich über 5 K	[11]
Köln	3–4 K	[12]
München	3–4 K; örtlich bis 7 K	[13]
Duisburg	6–7 K örtlich	[14]
Strasbourg	2–3 K	[15]

Zu den Ursachen dieser ungewollten Erwärmung zählt der erhöhte Strahlungsenergieumsatz infolge der Asphaltierung größerer Flächen, sowie die Bebauung und damit Versiegelung des Untergrunds mit abgeminderter Wärmeabgabe an die Atmosphäre. Des weiteren stellen Heizungskeller, Fernwärmeleitungen und das Abwasserkanalnetz jeweils örtliche Wärmequellen dar.

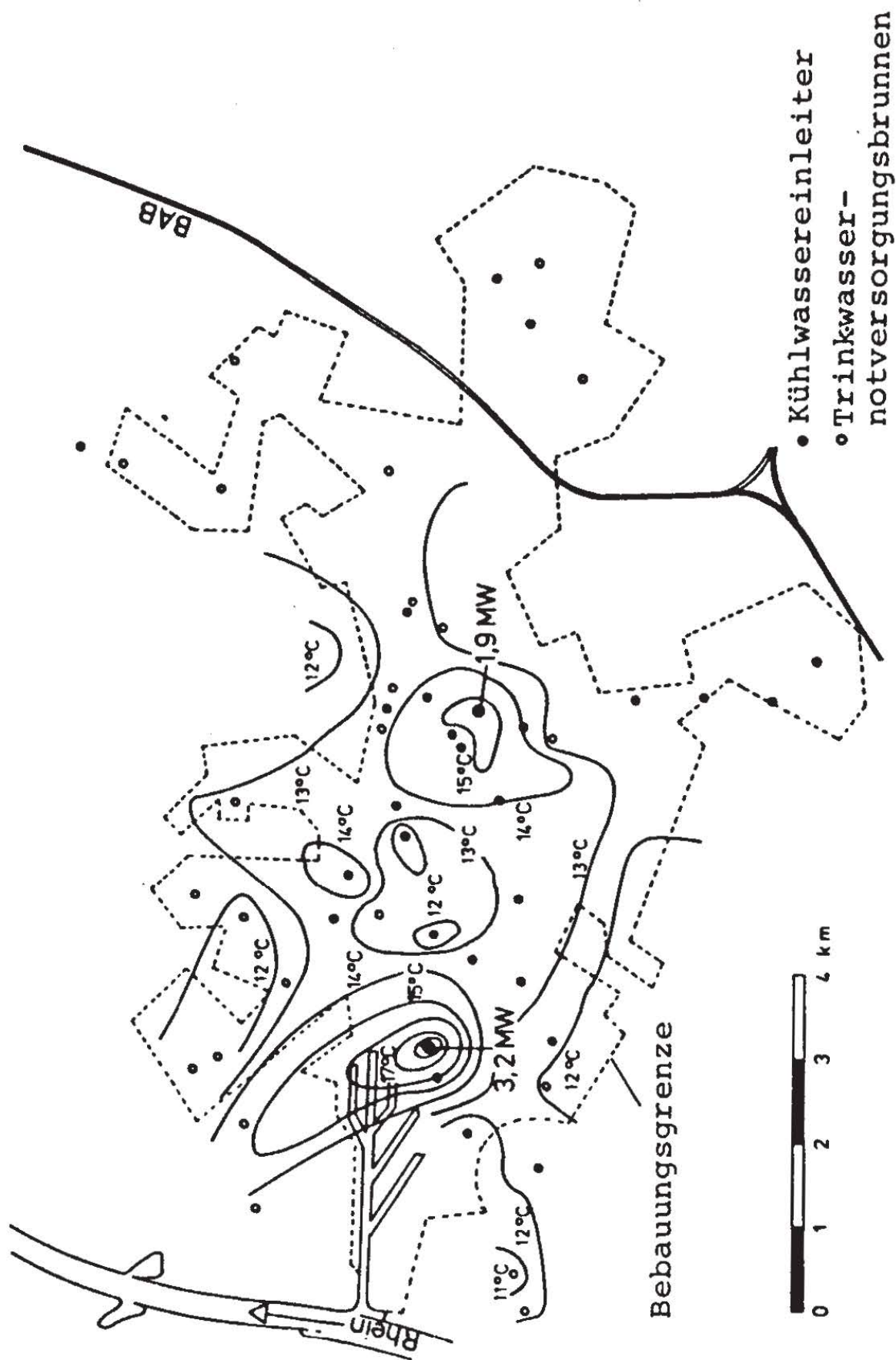


Abb. 6 Temperaturfeld unter der Stadt Karlsruhe vom 6. 10. 1976 nach [3]

Schließlich tragen zahlreiche Brauchwassereinleiter (industrielle Kühlwässer) zu einer Erhöhung der Grundwassertemperatur bei. Für den Untergrund im Raum Karlsruhe haben W. Lofi et al. [11] eine erste Wärmeenergiebilanz erstellt und die wichtigsten anthropogenen Wärmeströme quantifiziert (Abb. 7).

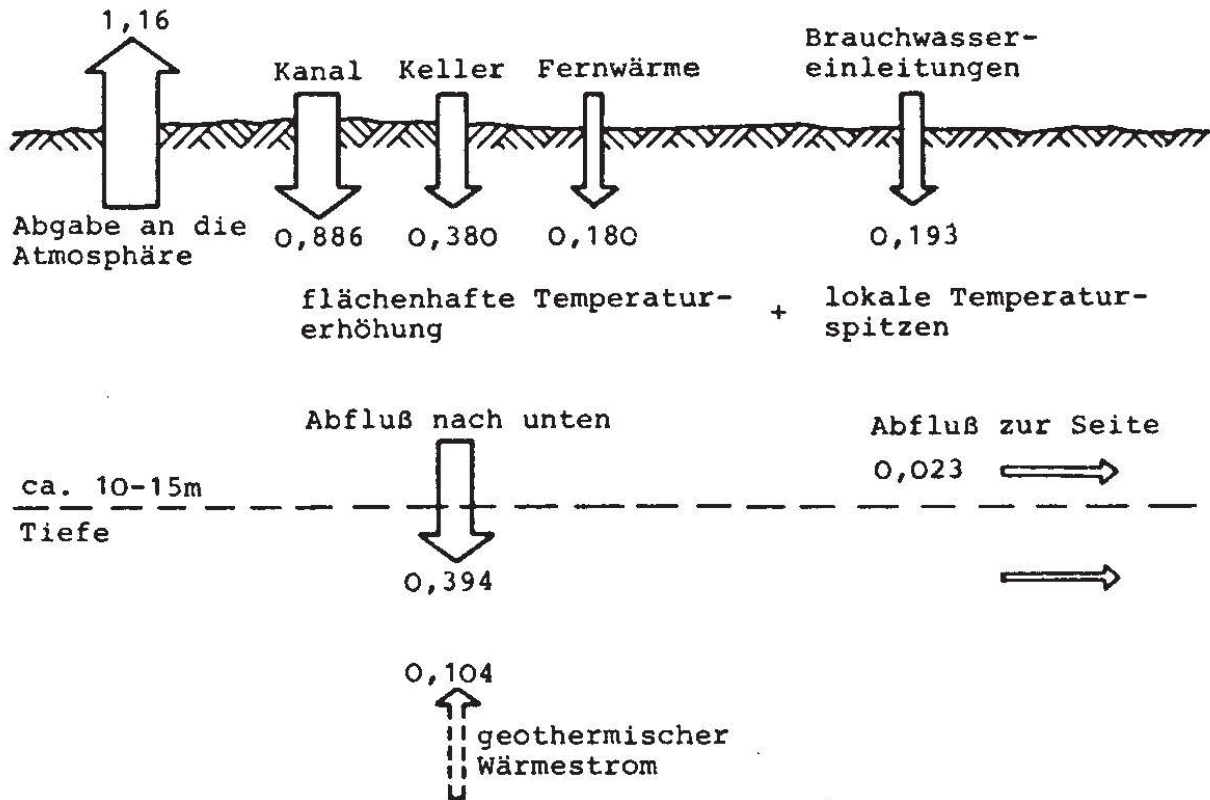


Abb. 7 Anthropogene Wärmeströme (W/m^2) unter der Stadt Karlsruhe nach [11]

Durch die anthropogenen Wärmequellen werden im Untergrund Temperaturänderungen und Wärmetransportvorgänge ausgelöst, die sich den durch eine ausgeglichene Wärmeenergiebilanz gekennzeichneten natürlichen Verhältnissen überlagern. Besonders gravierende Veränderungen ergeben sich beim Wärmeeintrag und -entzug von Direkteinleitern (Abb. 8). Die Wärmeausbreitung im Bereich dieser Wärmequellen ist zunächst von den Randbedingungen am Entstehungsort geprägt, insbesondere von der Zugabeverteilung über die Tiefe und vom Temperaturniveau. Die Hauptausbreitungsrichtung der eingeleiteten Wärmeenergie ist im wesentlichen horizontal; die natürliche Strömung und die durch die Einleitung induzierte Strömung bewirken eine horizontale Verfrachtung der Wärme durch Konvektion, Dispersion und Wärmeleitung. Gleichzeitig finden Wärmeaustauschprozesse mit den durchströmten und umgebenden Bodenzonen statt. Maßgebend wird schließlich die Wärmeabgabe durch die Deckschichten an die Atmosphäre.

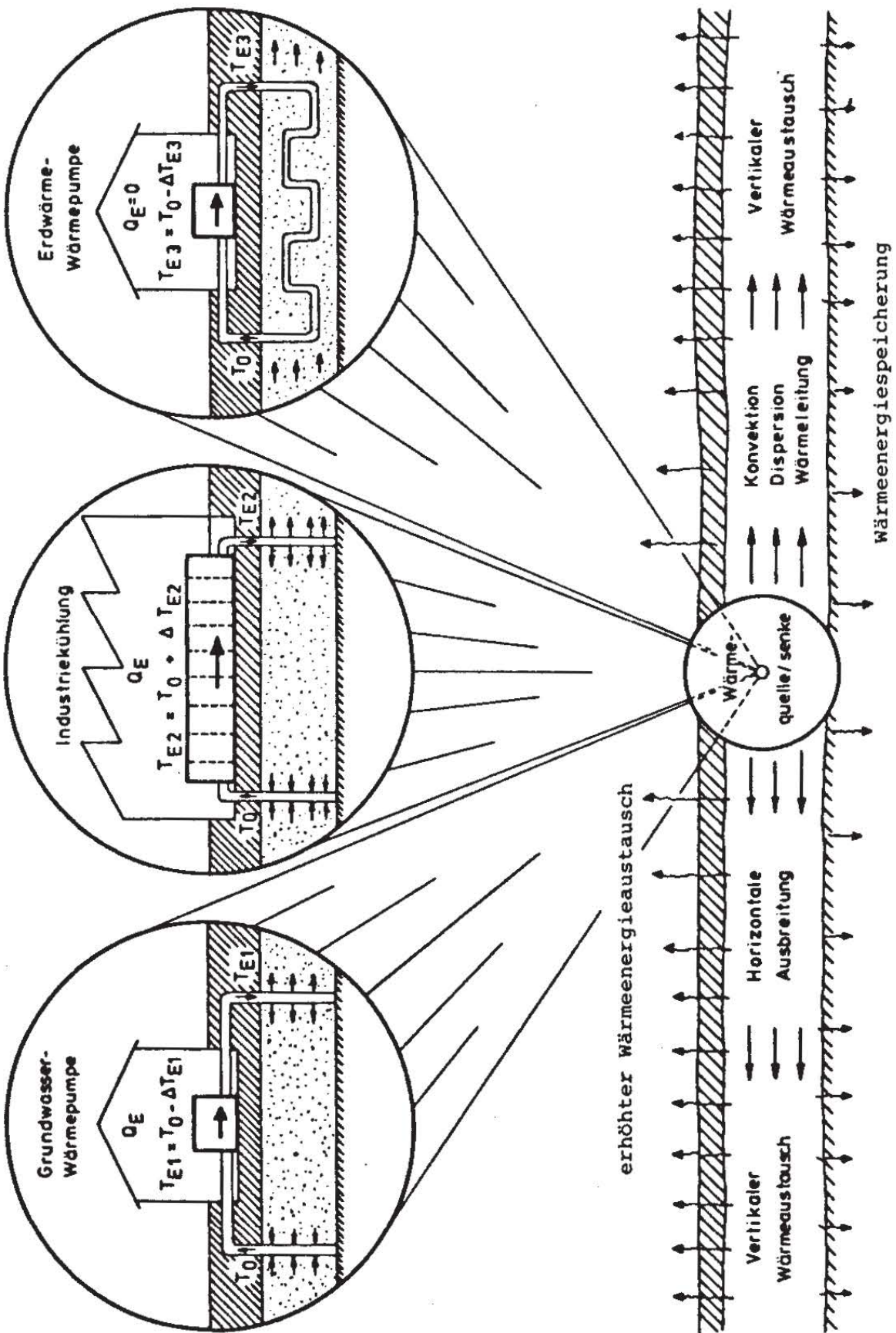


Abb. 8 Wärmeinleitung in das Grundwasser

Eine elementare Wärmeenergiebilanzbetrachtung zeigt, daß die an der Quelle zugeführte Wärme zunächst im Grundwasserleiter gespeichert wird und bei einem kontinuierlichen Input zu einer stetigen Vergrößerung der Anomalie führt. Dem wirkt limitierend die erhöhte Wärmeabgabe an die Atmosphäre entgegen, die von den vorherrschenden Temperaturgradienten zwischen Grundwasser und Bodenoberfläche und von der Größe der Austauschfläche (Ausdehnung der Anomalie) abhängt. Bei konstanter Energiezufuhr an der Wärmequelle wird daher die Temperaturanomalie so lange anwachsen, bis ein Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr und erhöhter Wärmeabgabe an die Atmosphäre erreicht ist.

Kennzeichnend für eine anthropogene Temperaturanomalie ist demzufolge eine gegenüber der ungestörten Grundwassertemperatur T_0 auftretende Temperaturdifferenz ΔT :

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

Hierbei ist die natürliche Grundwassertemperatur T_0 nicht notwendigerweise konstant, sondern kann ihrerseits Schwankungen gegenüber ihrem Jahresmittelwert \bar{T}_0 aufweisen (Abb. 9). Zur eindeutigen Charakterisierung von Temperaturanomalien werden jedoch lediglich die Abweichungen ΔT vom ungestörten Temperaturfeld zu jedem Zeitpunkt betrachtet. In [16], [17] werden eindimensionale Berechnungsverfahren zur Abschätzung der räumlichen Erstreckung anthropogener Temperaturanomalien, also der Temperaturdifferenz ΔT , vorgestellt.

5. Auswirkungen von Temperaturänderungen

Temperaturveränderungen wirken sich auf die physikalischen Eigenschaften, die Chemie und die Mikrobiologie des Grundwassers aus.

Mit steigenden Temperaturen nehmen die Dichte und die Viskosität ab. Dadurch wird die Durchlässigkeit des Untergrunds erhöht, was zu beträchtlichen Veränderungen der Strömungsverhältnisse und der Grundwasserstände führen kann.

Als Folge von Temperaturunterschieden treten Auftriebskräfte zufolge der unterschiedlichen Dichte auf, die das Nahfeld einer Warmwassereinleitung dominieren können („Aufschwimmen“ des leichteren, erwärmten Wassers). Die Frage, unter welchen Einleitungsbedingungen solche Auftriebseffekte bedeutsam sind, wurde von Mehlhorn [19] eingehend untersucht. Sie sind besonders ausgeprägt bei kleiner relativer Infiltrationsrate (Verhältnis zwischen Infiltrationsrate und natürlichem Grundwasserstrom) und großem relati-

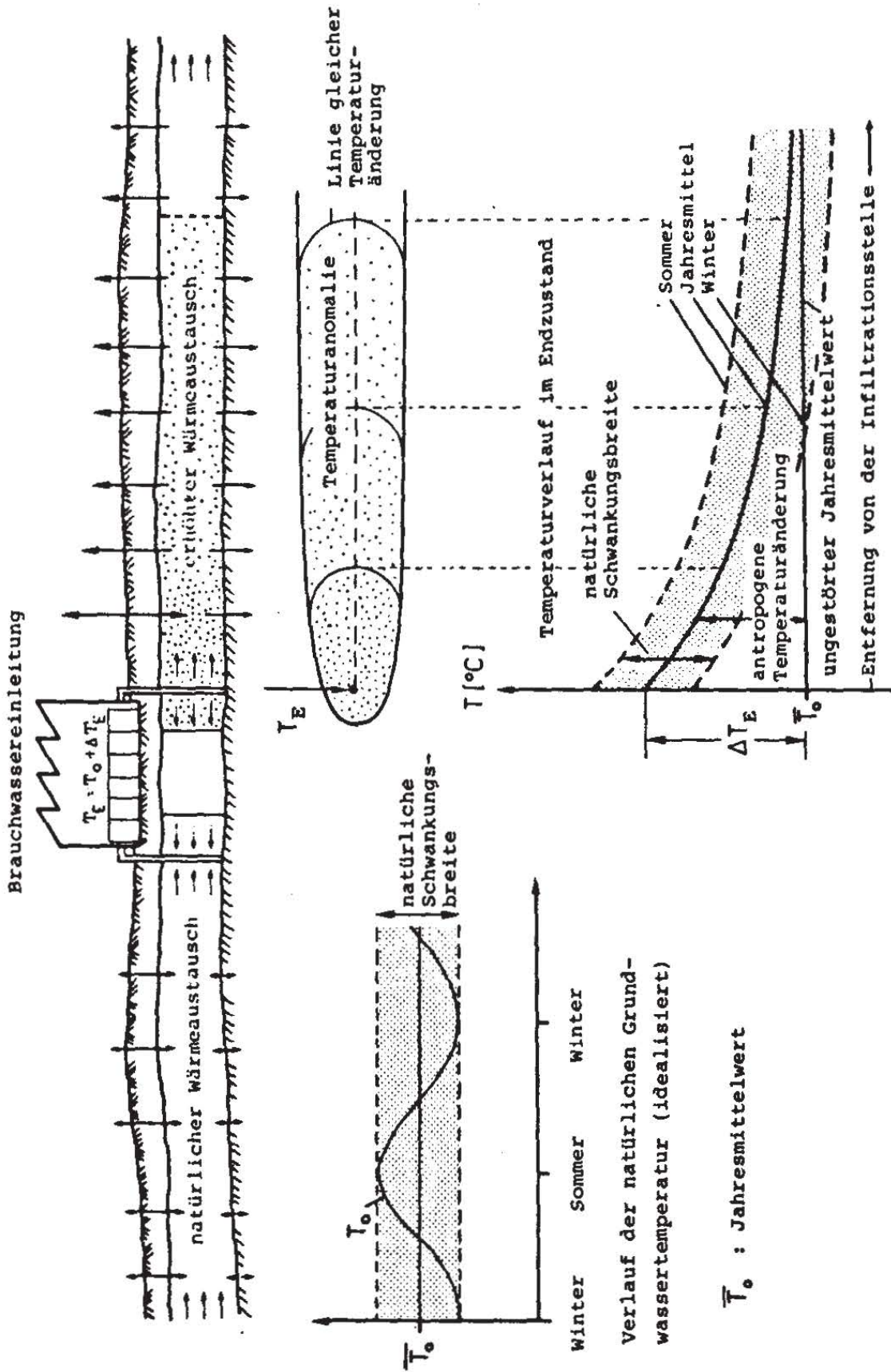


Abb. 9 Überlagerung von anthropogenen Temperaturänderungen und natürlichen Temperaturschwankungen

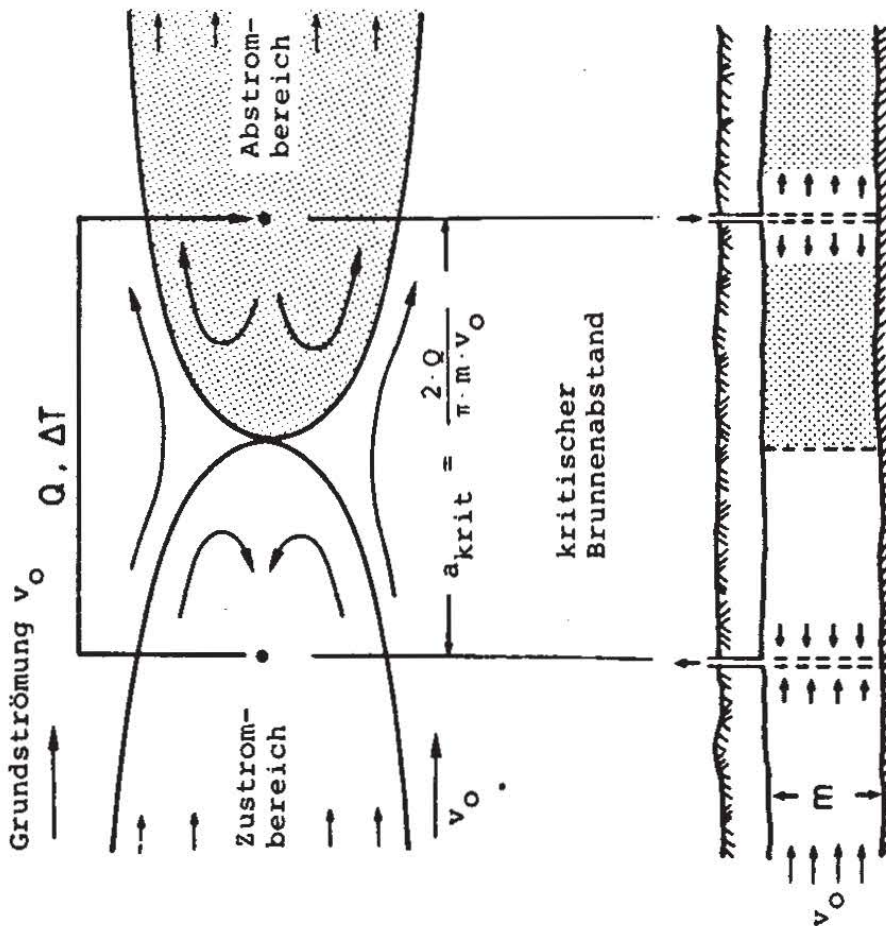
vem Auftrieb, das heißt großen Einleitungstemperaturdifferenzen ΔT_E , sowie großer Rayleigh-Zahl (Verhältnis von vertikalem Wärmetransport zufolge Auftrieb zu vertikalem Transport durch Wärmeleitung und Vermischung). Derartige dichtebedingte Schichtenströmungen wurden von Mehlhorn im Labor sowie bei Feldversuchen in den USA („Thermal-Energy-Storage“-Projekte; [20]) auch im Feld nachgewiesen. Allerdings wirkt eine geologisch bedingte Schichtenstruktur des Grundwasserleiters sowie eine ausgeprägte Anisotropie diesen Auftriebseffekten entgegen, so daß sie bei Einleitungen mit mäßigen Temperaturdifferenzen im allgemeinen nicht stark ausgeprägt sind.

Bei einer Erwärmung des Grundwassers sinkt die Löslichkeit von Gasen, einhergehend mit einer Veränderung des Redoxpotentials und einer Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts in Richtung einer Calciumcarbonat-Übersättigung (Kalkausfällung, Brunnenversinterung). Während der pH-Wert des Grundwassers unter mäßigen anthropogenen Temperaturveränderungen ($\Delta T < + 15 \text{ K}$) mit guter Näherung als konstant angesehen werden kann und sich im neutralen Bereich bewegt, wird der für die Reinigungswirkung mit wesentliche Ionenaustausch sowie die Diffusionsgeschwindigkeit durch steigende Temperaturen begünstigt.

Die Mikrobiologie des Grundwassers ist an die vorherrschenden natürlichen Temperaturverhältnisse angepaßt. Die in oberflächennahen Bereichen angebotenen Mikroorganismen sind aufgrund der dortigen saisonalen Temperaturschwankungen naturgemäß weniger temperaturempfindlich als solche in tiefen Lagen. (Den Ergebnissen eines Statusseminars der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [21] zufolge lassen sich beispielsweise im Flußwasser bei 10° und 20°C im wesentlichen dieselben Bakterienkulturen nachweisen). Bei den im Untergrund lebenden Organismen muß mit einer Veränderung im Artenbestand bei Temperaturerhöhungen von mehr als 5 K gerechnet werden. Unterhalb einer Temperatur von etwa 6 bis 7°C ist die Lebenstätigkeit der Mikroorganismen stark eingeschränkt. Allerdings lassen die bisher nur sporadisch vorliegenden Befunde über den Einfluß von Temperaturerhöhungen auf die Mikroorganismen-tätigkeit im Grundwasser [22], [23] bisher noch keine schlüssige Beurteilung zu.

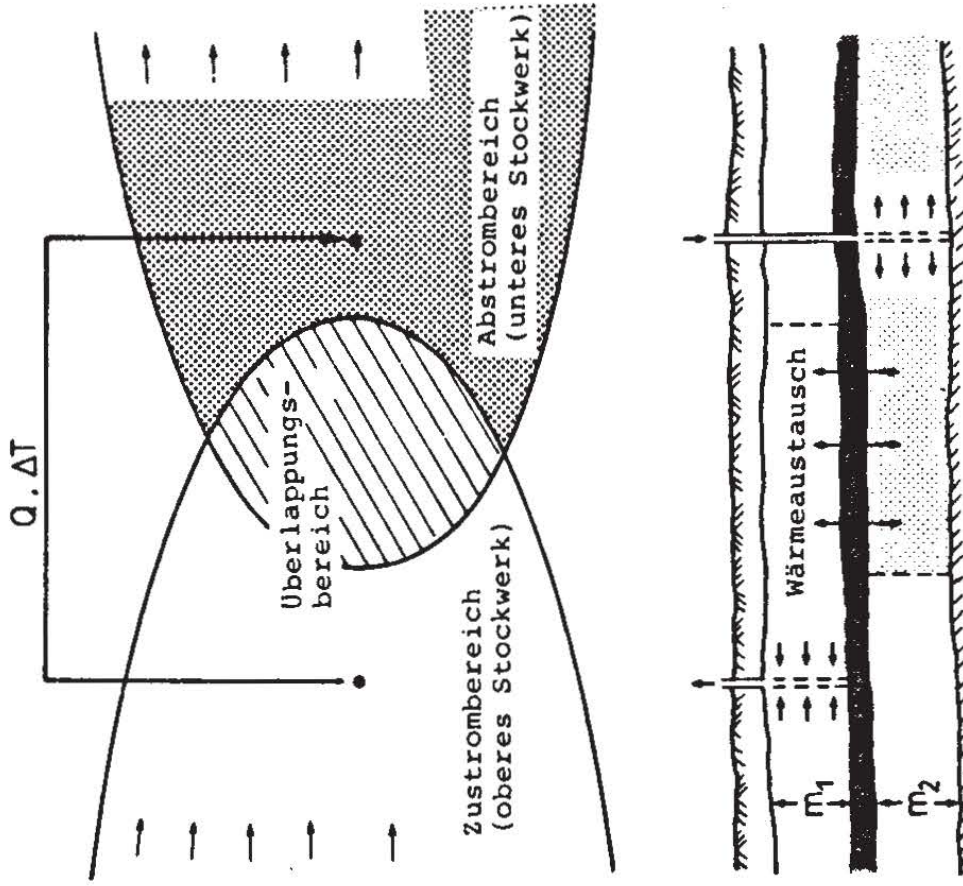
Weitgehend noch unerforscht ist auch die Wirkung von anthropogen veränderten Grundwassertemperaturen auf das Wachstum von Pflanzen und die landwirtschaftliche Produktion. In der Schweiz werden derzeit in einem interdisziplinären Forschungsprogramm auch hydrobiologische Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, eine Relation zwischen Grundwassertemperaturen, Flurabstand und Vegetation herzustellen [24].

Strömungsfeld (tiefengemittelt)



Vollkommen verfiltert

Strömungsfeld (stockwerksgemittelt)



Stockwerksartig getrennt

Abb. 10 Möglichkeiten zur Vermeidung eines hydraulischen und thermischen Kurzschlusses zwischen Entnahme- und Schluckbrunnen

6. Nutzung von Grundwasser als Kühlwasser

Bei der Nutzung der Grundwasserwärme muß in jedem Fall durch geeignete technische Maßnahmen die Betriebssicherheit der Anlagen sichergestellt sein, so daß ein Eindringen trinkwassergefährdender Stoffe in den Grundwasserleiter ausgeschlossen ist.

Aus der Sicht des Grundwasserschutzes erscheinen thermische Nutzungen des Grundwassers an sich tolerierbar, sofern die hieraus resultierenden Temperaturveränderungen sich in der Größenordnung der natürlichen Schwankungen bewegen. Unter der Voraussetzung, daß die zu erwartenden Temperaturveränderungen schon im Planungsstadium mit hinreichender Genauigkeit beurteilbar sind und im späteren Betrieb durch ein begleitendes Meßprogramm protokolliert werden, sind verschiedentlich in Deutschland befristete Erlaubnisse zur Grundwasserwärmenutzung erteilt worden.

Wenn Grundwasser zur Wärmenutzung entnommen und in einiger Entfernung in aufgewärmtem oder abgekühltem Zustand wieder infiltriert wird, dann muß durch eine geeignete Anordnung von Entnahme- und Schluckbrunnen gewährleistet werden, daß im Untergrund kein hydraulischer oder thermischer „Kurzschluß“ durch direkte Rückströmung auftritt, da hierdurch der thermische Wirkungsgrad der Nutzung herabgesetzt wird. Dies erfordert einen gewissen Mindestabstand der beiden Brunnen [25] oder/und eine stockwerkartige Trennung von Zugabe und Entnahme, wie dies in Abb. 10 dargestellt ist.

Als Beispiel für eine Nutzung von Grundwasser zu Kühlzwecken kann eine industrielle Warmwassereinleitung im Oberrheintal gelten (Abb. 11). In Ermangelung anderer geeigneter Kühlmöglichkeiten wird am Standort des Werkes Grundwasser mit Hilfe eines Entnahmebrunnens gefördert und unverschmutzt, jedoch um bis zu 12 K erwärmt, mittels eines Schluckbrunnens wieder eingeleitet. Die mittlere Jahreswärmefracht beträgt etwa 0,6 MW. Durch die Brauchwassereinleitung wird sich langfristig eine Wärmefahne in Richtung der vorherrschenden Grundströmung ausbilden und damit auf ein unterstrom gelegenes Wasserwerk zuströmen. Die zeitliche Entwicklung der Temperaturanomalie wird an mehreren Meßpegeleinrichtungen entlang des Fließweges laufend verfolgt. In Abb. 11 ist die nach dem derzeitigen Kenntnisstand zu erwartende Entwicklung der einleitungsbedingten Temperaturerhöhung entlang des Fließweges dargestellt. Die Beispielrechnung, die mit Hilfe eines vertikal-ebenen numerischen Wärmetransportmodells durchgeführt wurde, weist aus, daß die Ausbildung der Temperaturanomalie sehr langsam erfolgt, daß bis zum Erreichen eines quasistationären Endzustandes mehrere Dekaden verstreichen, und daß mit einer spürbaren Temperaturerhöhung im

Wasserwerk selbst bei Dauerbetrieb der Kühlwassereinleitung nicht zu rechnen ist.

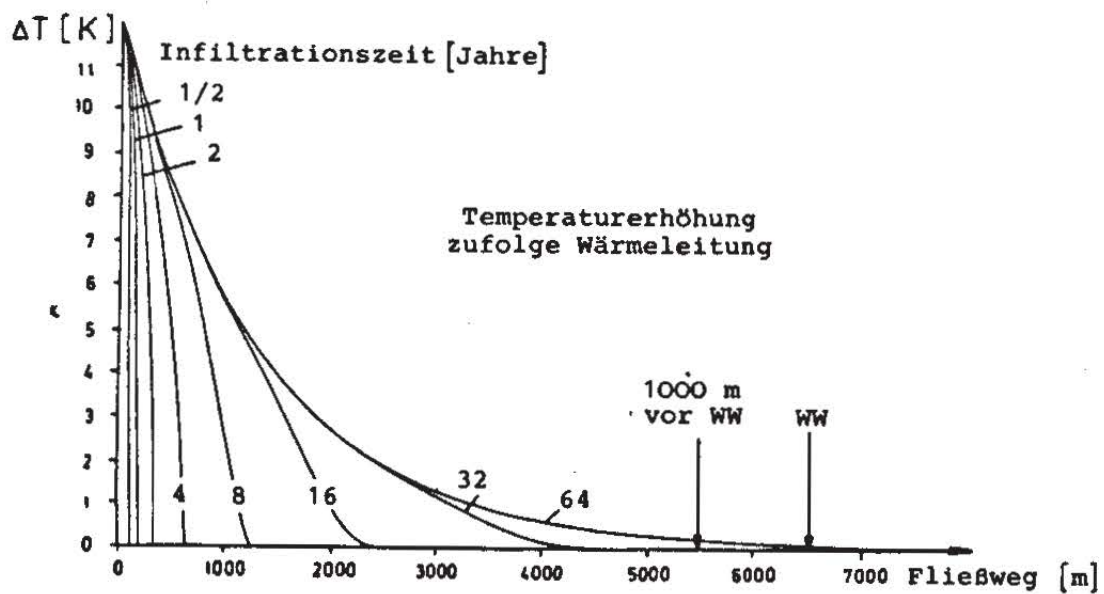
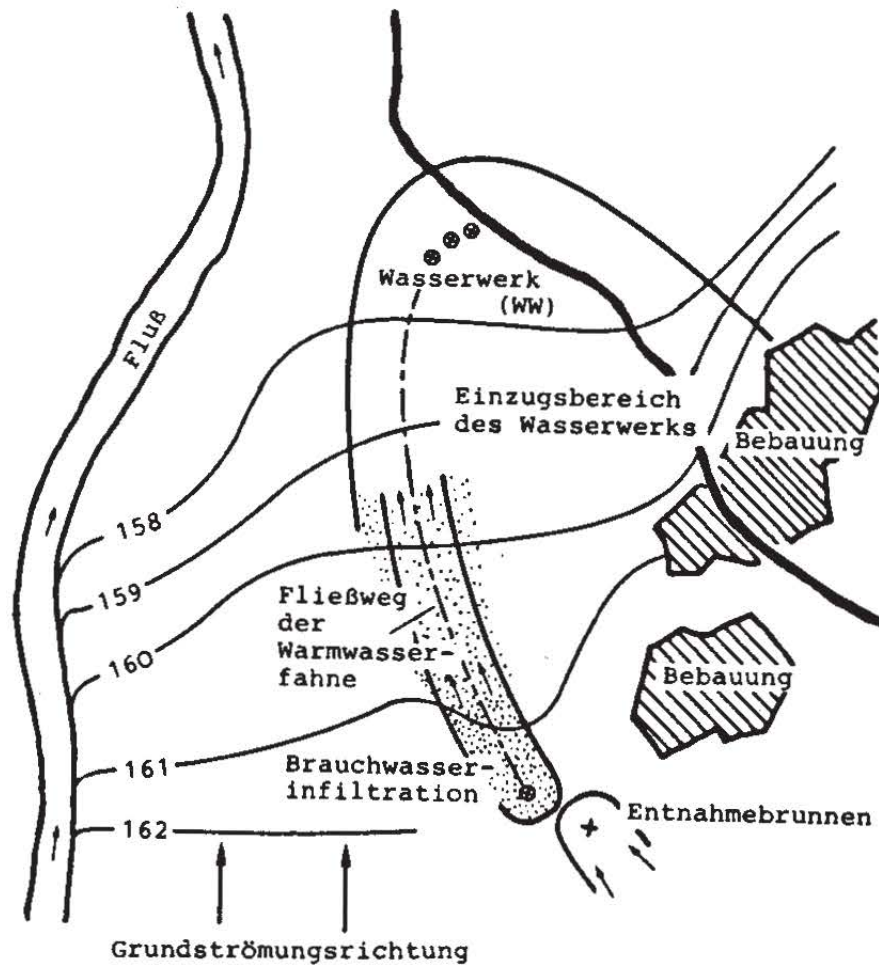


Abb. 11 Zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes bei einer Kühlwassereinleitung in das Grundwasser (Beispielrechnung)

7. Nutzung von Grundwasser für Wärmepumpen

Die Eigenschaft des Grundwassers, eine von der Jahreszeit nahezu unbeeinflusste Temperatur aufzuweisen, stellt für den Betrieb einer Grundwasserwärmepumpe einen Idealfall dar. Im Zuge der Erdölkrisen (1973 und 1978) hat das Interesse an der Nutzung der Umweltwärme insgesamt zugenommen. In Gebieten mit reichlichem Grundwasservorkommen und hohen Grundwasserständen wurden in der Bundesrepublik Deutschland deshalb schon frühzeitig Grundwasserwärmepumpen geplant und in Betrieb genommen. Allein im Münsterland wurden im Jahr 1980 nach [8] etwa 400 Einzelanlagen betrieben; noch größere Zahlen (2000 Einheiten) werden für den damaligen Zeitpunkt für Schleswig-Holstein und Niedersachsen angegeben. Für eine Neubausiedlung der „Neuen Stadt Wulfen“ wurden 1981 für 117 Wohneinheiten eine dezentrale Wärmeenergieversorgung mittels Grundwasserwärmepumpen in Betrieb genommen [26].

Zur grundlegenden Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten von Grundwasserwärme wurden in der Schweiz im mittleren Emmental seitens des Wasser- und Energiewirtschaftsamtes Bern 1980 hydrothermische Versuchsfelder eingerichtet. Dort wurden im Rahmen zweier Versickerungstests sowohl der natürliche Wärmeeintrag in das Grundwasser als auch die Ausbreitung von infiltriertem Kaltwasser gemessen [5], [24]. In Abb. 12 ist die räumliche Erstreckung der Kaltwasserfahne im Testgebiet, die Anordnung der Versuchseinrichtungen und der Temperaturverlauf des infiltrierten Kaltwassers dargestellt.

Charakteristisch für die Untergrundverhältnisse im mittleren Emmental ist der heterogene Aufbau der dortigen Grundwasserleiter. Als Folge hiervon tritt eine große Variation der horizontalen Durchlässigkeiten auf. Das infiltrierte Kaltwasser breitet sich bevorzugt in den gut durchlässigen Bereichen aus; horizontale Fließrichtungen sind dabei begünstigt (Anisotropie).

Am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart wurden zu diesen Feldversuchen numerische Modellrechnungen durchgeführt [27]. Die zeitliche Entwicklung der Temperaturanomalie läßt sich unter Annahme einer weitgehend idealisierten Schichtbänderstruktur im Aquifer sehr gut beschreiben. Das zeitliche An- und Abswellen der Temperatur an den verschiedenen Meßstellen ist durch den instationären Charakter der Infiltrationstemperatur geprägt. Die unterschiedlichen konvektiven Transportraten in den einzelnen Schichten führen zu einer starken makrodispersiven Vermischung in Strömungsrichtung. In Verbindung mit der korngerüstbedingten Dispersion und Wärmeleitung erfolgt hierdurch eine rasche Dämpfung der Temperaturschwankungen im Grundwasser mit zunehmender Fließstrecke. Die Modellrechnungen haben

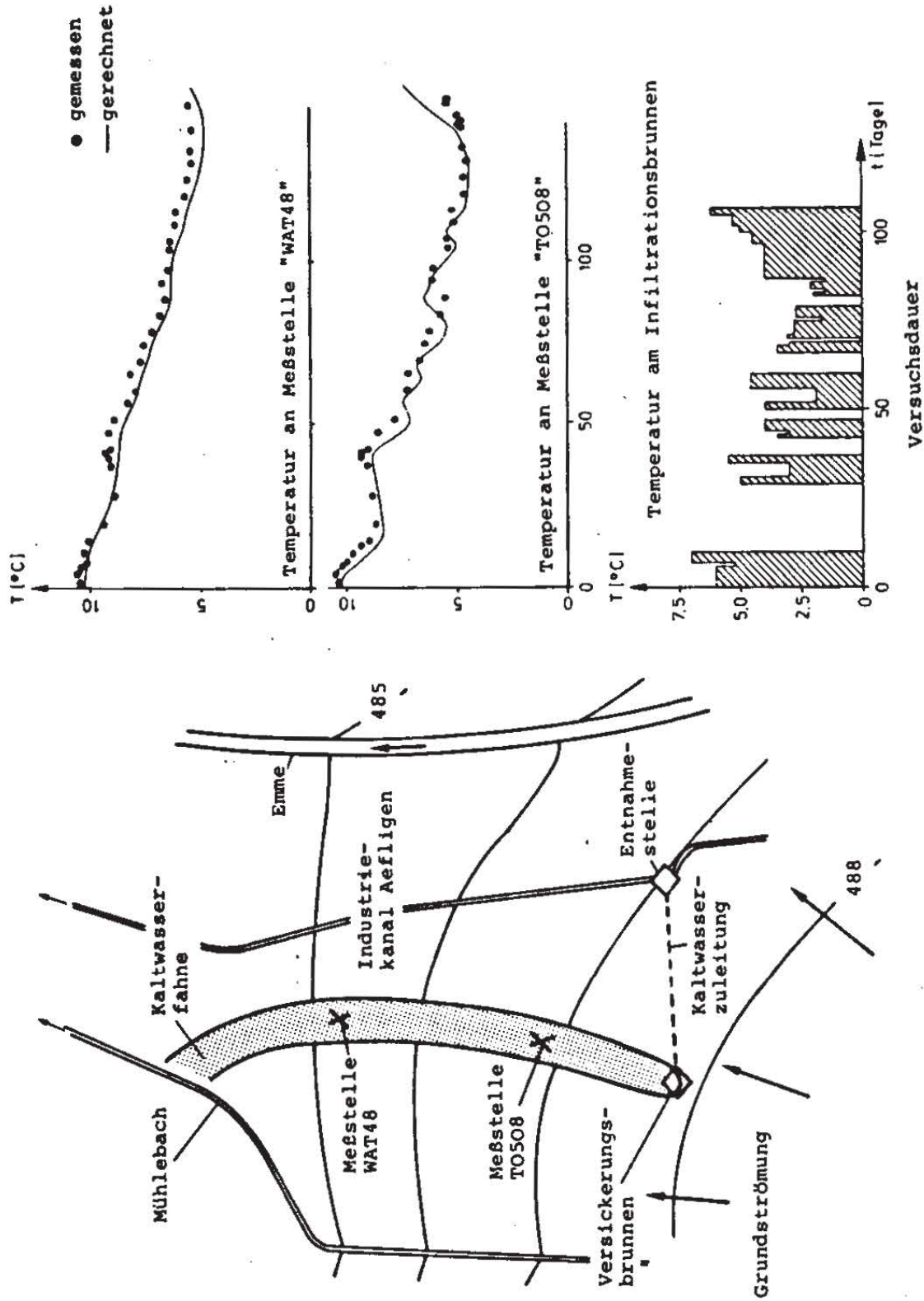


Abb. 12 Kühlwasserversickerungstest „Aeffligen II“ [24]: Vergleich von numerischen Modellrechnungen mit Temperaturmessungen im Feld

gezeigt, daß auch sehr komplexe instationäre Wärmetransportvorgänge in natürlichen Grundwasserleitern mit numerischen Modellen nachvollzogen werden können (Abb. 12), sofern gesicherte Felddaten zur Verfügung stehen.

8. Nutzung von Grundwasser zur saisonalen Speicherung von Wärmeenergie

Einer stärkeren Verbreitung von Heizungssystemen, die ihre Energie direkt aus dem solaren Wärmeenergiestrom (Sonnenkollektoren) oder der Umgebung (Luft-Wasser-Wärmepumpen) beziehen, steht der Umstand entgegen, daß der größere Energiebedarf im Winter auftritt und das größte Energieangebot im Sommer zur Verfügung steht. Der Gedanke liegt deshalb nahe, Umgebungswärme zwischenzeitlich im Untergrund zu speichern. In den USA werden deshalb seit den siebziger Jahren Feldversuche zur saisonalen Wärmespeicherung in natürlichen Aquiferen durchgeführt [20]. Die Feldexperimente hierzu gliedern sich in drei Abschnitte (Abb. 13):

- (1) Produktion der Wärmeenergie und Laden des Speichers: Bis zu 80°C erwärmtes Wasser wird in einen oberflächennahen Grundwasserleiter infiltriert. Im Interesse einer ortsfesten Speicherung des eingebrachten Wassers darf dieser nur eine sehr geringe Grundströmung ausweisen, da andernfalls eine Verfrachtung der Energie nach unterstrom erfolgt (Energieverluste).
- (2) Speicherung der Energie: Bei fehlender Grundströmung entsteht um den Schluckbrunnen durch den Ladevorgang ein radialsymmetrischer Bereich, in dem das natürliche Grundwasser durch das erwärmte Wasser verdrängt wird; gleichzeitig erfolgt ein Wärmeenergieaustausch mit dem Korngerüst des Aquifers (Wärmespeicherung).
- (3) Nutzung der Wärmeenergie durch Leeren des Speichers: Im Bedarfsfall wird das erwärmte Grundwasser durch den Einspeicherungsbrunnen wieder entnommen.

Für insgesamt fünf solcher Zyklen wurde eine Energiebilanz erstellt und der Wirkungsgrad der Gesamtanlage bestimmt. Dieser ist definiert als das Verhältnis aller aufzuwendenden Wärmemengen beim Laden des Speichers und der wiedergewinnbaren Gesamtwärmefracht. Neben vielerlei betrieblichen Randbedingungen (relative Dauer der Lade-, Speicher- und Entnahmezyklen) tragen die hydrothermische Vermischung im Aquiferspeicher durch Wärmeleitung, Dispersion und dichtebedingte Auftriebsströmungen zwangsläufig zu Energieverlusten bei. Der in der Pilotstudie erzielte Wirkungsgrad lag im Bereich zwischen 40 und 66%.

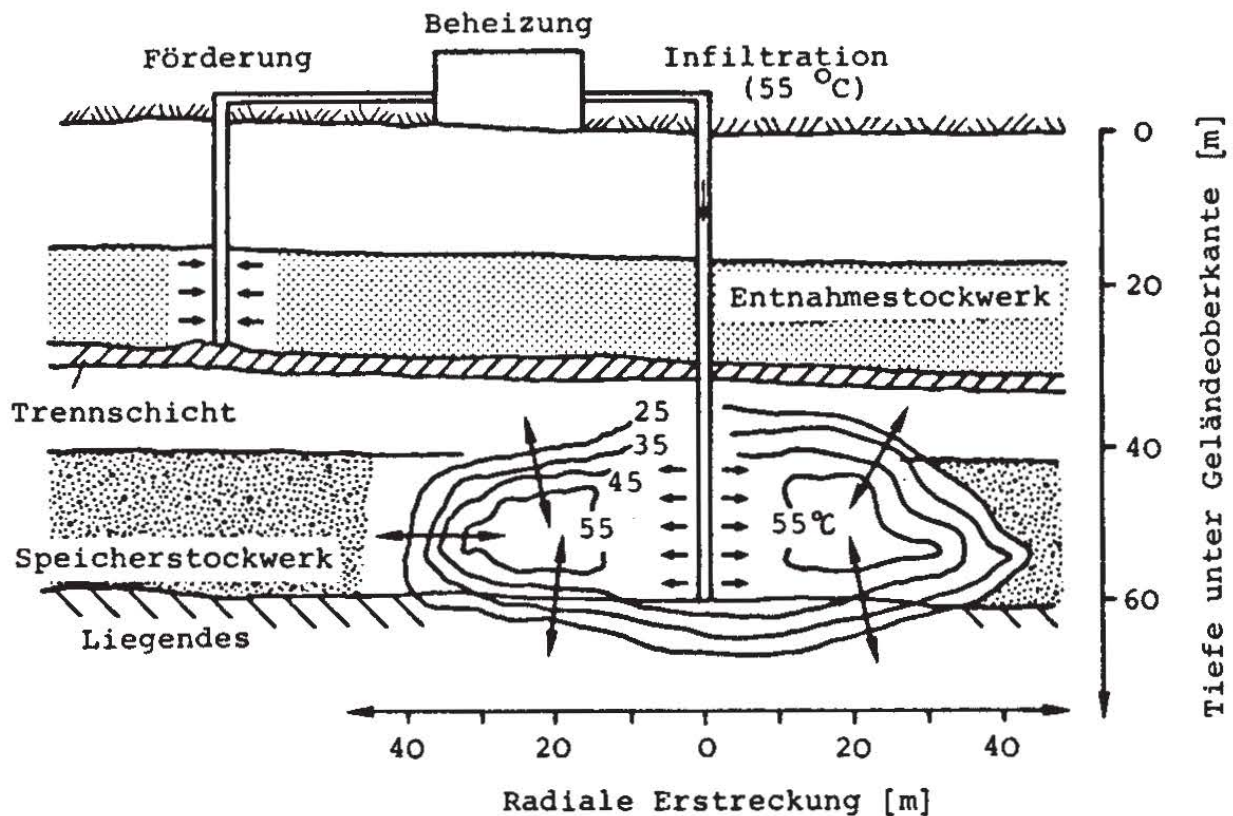


Abb. 13 Schema einer Anlage zur saisonalen Wärmeenergiespeicherung im Grundwasser nach [20]

9. Rechnerische Erfassung von Temperaturanomalien

Der Wärmeenergie-transport im Grundwasser erfolgt primär durch Konvektion, Dispersion und Wärmeleitung. Infolge der Temperaturabhängigkeit der Fluideigenschaften (Dichte und Viskosität) sind das Strömungs- und Temperaturfeld miteinander gekoppelt. Eine korrekte Erfassung der komplexen Wärmeausbreitungsprozesse und ihrer gegenseitigen Interaktionen ist wegen der Vielfalt der Einflußgrößen schwierig und erfordert im allgemeinen den Einsatz eines numerischen Transportmodells.

Vor der Durchführung komplexer Modellrechnungen ist es bei Planungsaufgaben in der Wasserwirtschaft jedoch oft erforderlich, Grenzwertabschätzungen anhand weniger Naturdaten durchzuführen. Hierbei müssen die natürlichen Gegebenheiten weitgehend idealisiert werden. Für eine erste Abschätzung kann die zu erwartende Temperaturanomalie unter stationären Einleitungsbedingungen mit Hilfe der Verweilzeitenmethode berechnet werden. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, daß die Ausbreitung des eingeleiteten Wassers und der darin enthaltenen Wärmeenergie in horizontaler Richtung primär durch den konvektiven Transport erfolgt. Maßgebend für den Transport der Wasser-

partikel ist die Abstandsgeschwindigkeit v_a , die sich aus der Filtergeschwindigkeit v_f und der effektiven Porosität n_e ergibt:

$$v_a = v_f / n_e \quad (2)$$

Dispersive Vermischungsvorgänge in Längs- und Querrichtung sowie Auftriebseffekte bleiben hierbei außer Betracht. Gegenüber dem Transport der Wasserpartikel erfolgt die Ausbreitung einer Wärmefront mit einer wesentlich geringeren Geschwindigkeit v_T :

$$v_T = v_a \cdot \frac{\rho_w c_w n_e}{\rho c_G} \quad (3)$$

Diese Verzögerung hat ihre Ursache im Wärmeaustausch zwischen Grundwasser und Korngerüst.

Neben dem horizontalen Transport der Wärmeenergie durch die Grundwasserströmung findet in der vertikalen Richtung ein Wärmeenergietransport statt, der primär geprägt ist durch den Wärmeaustausch W_D zwischen dem Grundwasser und der Atmosphäre. Unter der Annahme einer völligen Temperaturvermischung im Grundwasser und Vernachlässigung instationärer Wärmespeicherungseffekte läßt sich dieser durch folgende Beziehung in erster Näherung beschreiben.

$$W_D = \lambda_D \cdot \frac{T_o - T_D}{m_D} \cdot A \approx \lambda_o \cdot \frac{\Delta T}{m_D} \cdot A \quad (4)$$

Hierbei ist A die betrachtete Oberfläche, λ_D und m_D die Wärmeleitfähigkeit und Mächtigkeit der ungesättigten Bodenzone (siehe Abb. 14). T_D ist die Grundwassertemperatur in Höhe der Grundwasseroberfläche und T_o die Lufttemperatur. Als Lösung für den Temperaturverlauf im stationären Endzustand ergibt sich eine exponentielle Abklingfunktion in Abhängigkeit von der Verweilzeit t_a .

$$\Delta T = \Delta T_E \cdot e^{-\frac{\lambda_D \cdot t_a}{\rho_w c_w n_e m_G m_D}} \quad (5)$$

Durch Umkehrung der Gleichung (5) kann für jede vorgegebene Temperaturdifferenz ΔT bzw. Temperaturdämpfung ($\Delta T / \Delta T_E$) die zugehörige Verweilzeit t_a bestimmt werden.

Nun besteht für jedes stationäre Strömungsfeld eine eindeutige Beziehung zwischen der Verweilzeit eines Wasserteilchens und seiner zugehörigen

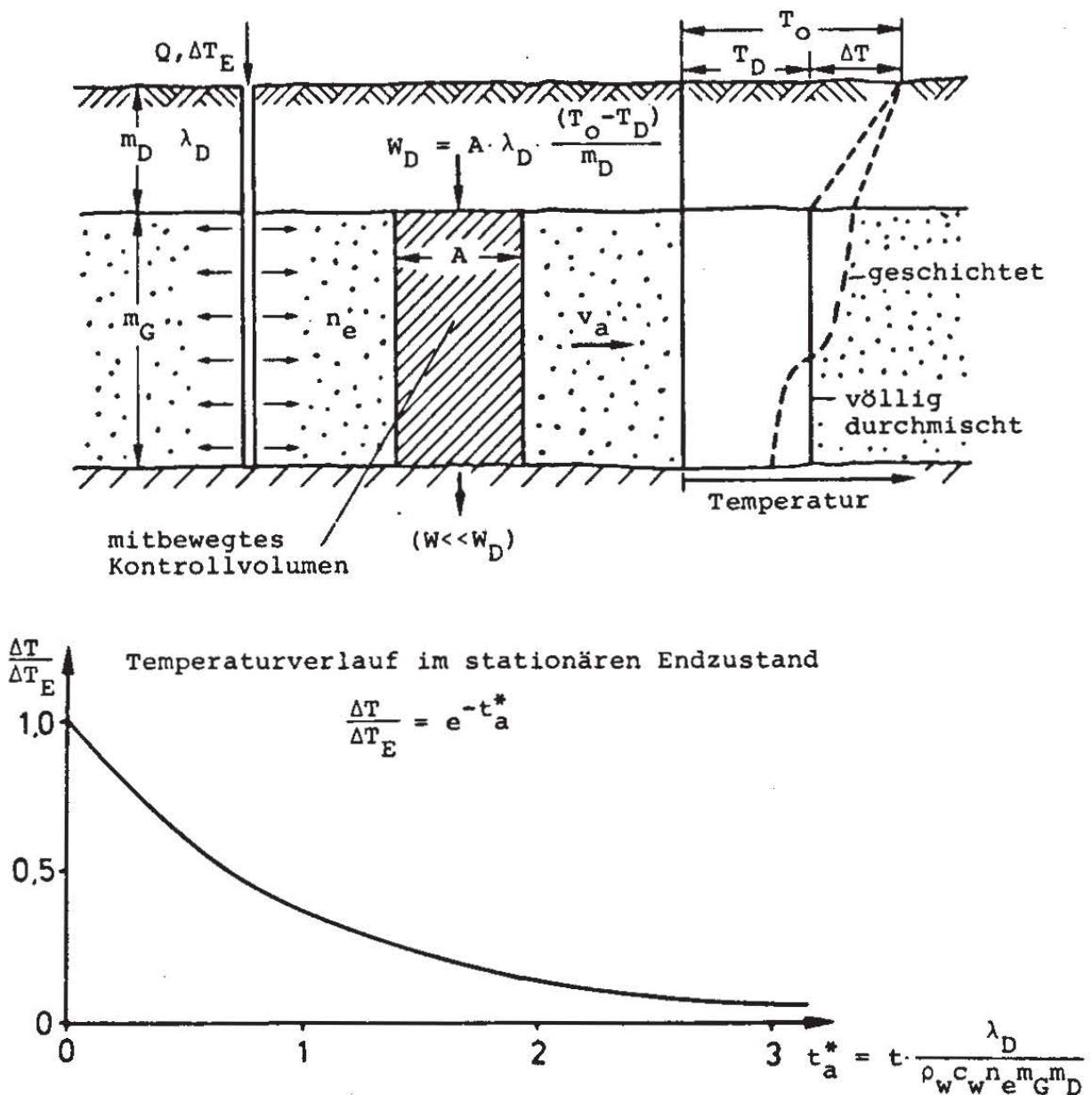


Abb. 14 Vereinfachte Berechnung von Temperaturanomalien nach der Verweilzeitenmethode

Entfernung vom Einleitungsort; Linien gleicher Verweilzeit lassen sich daher in Linien gleicher Temperaturdifferenz umrechnen und umgekehrt. Eine Orientierungshilfe zur Abschätzung der Hauptabmessungen von anthropogenen Temperaturanomalien (Reichweite in Fließrichtung, Infiltrationsbreite) wird in [18] gegeben und an konkreten Zahlenbeispielen erläutert. Darüberhinaus werden dort auch Hinweise zur rechnerischen Behandlung von Variationen der Einleitungstemperaturen und der Infiltrationsrate gegeben.

Für eine planvolle Bewirtschaftung der Grundwasserwärme sind numerische Modelle als Hilfsmittel unerlässlich. Deshalb wurde am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart ein horizontal-ebenes Wärmetransportmodell entwic-

kelt, das mittlerweile Anwendungsreife erlangt hat. Das Anwendungsspektrum ist speziell an Fragen ausgerichtet, die bei der Bewirtschaftung der Wärmeenergie in Porengrundwasserleitern auftreten. Dies betrifft in erster Linie die räumliche Erstreckung von Temperaturanomalien sowie die vielfältigen Fragen der gegenseitigen Beeinflussung von Schluck- und Entnahmebrunnen oder von mehreren benachbarten Anlagen [28].

Für gegebene stationäre Strömungsfelder ermöglichen die numerischen Modelle die Berechnung der Stromlinien, längs derer der dispersionsfreie konvektive Wassertransport erfolgt. Die Kenntnis der Staupunkte und des großräumigen Verlaufs der Trennstromlinien gibt dem Planer einen Überblick über anteilige Zu- und Abströmbereiche und erste Hinweise auf hydraulische und thermische Kurzschlüsse zwischen bestehenden oder neu hinzukommenden Brunnen (gegenseitige Beeinflussung).

Für eine hinsichtlich der Brunnenzahl und Brunnenanordnung optimierte Situation können in einem zweiten Schritt thermische Modellrechnungen durchgeführt werden, die dem Planer eine Übersicht über die zu erwartenden Temperaturveränderungen im Untergrund geben. Hierbei kann einerseits die Temperaturausbreitung in einem vertikal-ebenen Schnitt entlang jeder beliebigen Stromlinie des Strömungsfeldes verfolgt werden, was bei geologischen Schichtenstrukturen des Untergrundes von Interesse ist. Andererseits kann das Temperaturgeschehen horizontal-eben betrachtet werden unter Ein-schluß der Dispersion, der Wärmeleitung und der Grundwasserneubildung. Dabei werden im Grundwasserleiter zwei gekoppelte Transportebenen verwendet, so daß auch hier Stockwerke mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten berücksichtigt werden können. Der vertikale Wärmeenergieaustausch wird durch analytische Quell-Senken-Ansätze beschrieben, die sowohl den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre als auch instationäre Speichereffekte im Untergrund erfassen.

10. Wasserwirtschaftliche Aspekte der Grundwasserwärmenutzung

Die Nutzung von Grundwasserwärme muß sich stets an den vorrangigen Belangen der Trinkwasserversorgung orientieren. Als oberster Grundsatz muß gelten, daß durch Wärmezufuhr oder -entzug die heutige und künftige Trinkwasserversorgung nicht beeinträchtigt werden darf. Aus diesem Grund werden Anlagen zur Grundwasserwärmenutzung in den Zonen I bis IIIa von Wasserschutzgebieten in der Regel nicht zugelassen.

Für den Grundwasserschutz bedeutsam ist die Tatsache, daß jede Grundwasserwärmenutzung die Anlage von Brunnen erforderlich macht, welche die schützenden Deckschichten durchstoßen und somit die direkte Verletzlichkeit

des Grundwasserleiters gegen Kontaminationen erhöhen. Dieser Aspekt spricht gegen eine Vielzahl kleiner Anlagen und eher für eine überschaubare Zahl relativ großer Anlagen. Darüberhinaus muß bei grundwasserbetriebenen Wärmepumpen durch Wahl geeigneter Kältemittel sowie durch betriebstechnische Maßnahmen sichergestellt sein, daß eine direkte Grundwasserkontamination durch wassergefährdende Stoffe ausgeschlossen werden kann.

Aus energiewirtschaftlicher Sicht ist die Nutzung von Grundwasserwärme als einer regenerativen Energiequelle begrüßenswert. Wenn man jedoch aus Gründen der Wasserbeschaffenheit nur mäßige anthropogene Temperaturveränderungen zuläßt, dann ist die wirtschaftlich erzielbare Energieausbeute vergleichsweise gering und das in Anspruch genommene Grundwasservolumen entsprechend groß.

Die Grundwasservorkommen in Ballungsgebieten zeigen in der Regel großräumige Temperaturerhöhungen, die auf eine Vielzahl anthropogener Wärmequellen zurückzuführen sind. Hier kann eine Wärmenutzung durch kompensierende Maßnahmen (Wärmepumpen) in Erwägung gezogen werden, zumal diese Grundwasservorkommen wegen ihrer Beschaffenheit für die Trinkwasserversorgung häufig ohnehin nicht mehr in Betracht kommen. In solchen Regionen kann durch eine sorgfältig geplante Bewirtschaftung des Grundwassers einerseits die gespeicherte Wärme einer gezielten Nutzung zugeführt werden und andererseits die anthropogen bedingte Temperaturveränderung in tolerierbaren Grenzen gehalten werden.

Im allgemeinen gelten anthropogene Temperaturveränderungen zumindest soweit als tolerierbar, als sie sich innerhalb der Bandbreite des natürlichen Schwankungsbereichs der Grundwassertemperaturen bewegen. Darüber hinaus müssen erst noch Erfahrungen gesammelt werden. Dies wird dadurch erleichtert, daß – im Gegensatz zu stofflichen Grundwasserbelastungen – thermische Belastungen durch Wärmezugabe oder -entzug grundsätzlich reversibel sind.

Literatur

- [1] von Cube: Handbuch der Energiespartechniken, Kompendium für Lehre und Praxis, Band 1, Verlag C. F. Müller, Karlsruhe, 1983.
- [2] Kernforschungszentrum Karlsruhe: Abwärmeprojekt Oberrheingebiet, Bericht APO 2/78, Laborium für Aerosolphysik und Filtertechnik, Karlsruhe, 1978.

-
- [3] Gröber, Erk, Grigull: Wärmeübertragung, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1983.
- [4] Balke, K.: Die Abkühlung des Untergrundes beim Betrieb von Wärmepumpen, *Elektrowärme international Edition A*, **37**, A4/A5, A243–A249, Juli, September, 1979.
- [5] Werner, A. Ingenieur- und Studienbüro: Nutzung von Grundwasser für Wärmepumpen, Versickerungstest Aefligen, Bericht an das Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern, Schweiz, 1983.
- [6] Hänel, R.: Determination of Subsurface Temperature in the Federal Republic of Germany on the Basis of Heat Flow Values, *Geologisches Jahrbuch*, Hannover, 1979.
- [7] Hänel, R.: The Present Activities in the Field of Geothermal Energy in the Federal Republic of Germany (as of 1979), *Geologisches Jahrbuch*, Hannover, 1979.
- [8] Stoy, B.: Wunschenergie – Sonne, 3. überarbeitete Auflage, Energie-Verlag, 1981.
- [9] Hänel, R. (Herausgeber): The Urach Geothermal Project, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1982.
- [10] Werner, J., Strayle, G., and Villinger, E.: The Large-Scale Project in Oberschwaben-Swabian Alb for the Utilization of Geothermal Energy, enthalten in [9], 1982.
- [11] Lofi, W., Mehlhorn, H., und Kobus, H.: Betrachtungen zum Wärmehaushalt des Untergrundes im Raum Karlsruhe, Bericht Nr. 544, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, 1977.
- [12] Balke, K.: Der thermische Einfluß besiedelter Gebiete auf das Grundwasser, dargestellt am Beispiel der Stadt Köln, *Gas-Wasserfach* **115**, 117–124 (1974).
- [13] Höllein, K., Sutter, K., und Wirth, H.: Grundwassertemperatur – München, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München, Juni 1983.
- [14] Heitfeld, K.H., Krapp, L., und Weiler, A.: Temperaturanomalien im Stadtgebiet von Duisburg und deren Auswirkungen auf Baumaßnahmen der Stadtbahn, *Z. dt. geol. Ges. [Hannover]* **32**, 779–797 (1981).
- [15] Merheb, F.: Modele de Gestion des Echanges Hydrothermiques dans les Nappes Souterraines: Application a la Region de Strasbourg, Dissertation, Institut de Mechanique des Fluides de Strasbourg, Mai 1984.

-
- [16] Kobus, H.: Ausbreitung von abgekühltem Wasser in Grundwasserleitern, Berichtsband, Statusseminar „Wärmepumpen und Gewässerschutz“ des Umweltbundesamt, Erich Schmidt Verlag GmbH, Berlin, 1979.
- [17] Kobus, H., und Mehlhorn H.: Beeinflussung von Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen, Gas-Wasserfach **121**, 261–268 (1980).
- [18] Kobus, H., Söll, T., und Mehlhorn, H.: Temperaturanomalien in Porengrundwasserleitern zufolge Warm- und Kaltwassereinleitungen, Wasserwirtschaft **73**, 265–270 (1983).
- [19] Mehlhorn, H.: Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen, Dissertation Univ. Stuttgart, Mitt. des Instituts für Wasserbau, Heft 50, Eigenverlag, Stuttgart, 1982.
- [20] Tsang, C.-F., and Doughty, C.: Detailed Validation of a Liquid and Heat Flow Code against Field Performance, Eighth SPE Symposium on Reservoir Simulation, Dallas, TX, Februar 10–13, 1985.
- [21] LAWA-Schrift: Wärmepumpen und Gewässerschutz – ökologische Auswirkungen von Wärmepumpen mit Wärmeentzug aus Wasser, Berichtsband zum Statusseminar in Berlin, Erich Schmidt Verlag GmbH, Berlin, 1979.
- [22] Leiner, R.: Erfahrungen mit Uferfiltrat in Wien, Österr. Wasserwirtsch. **25**, 199–202 (1973).
- [23] CNRS-Studie: Recherche Methodologique Sur Les Hydrosystemes Pour Optimiser La Gestion Des Ressources En Eau Dans La Region Alsace, Universite Louis Pasteur, Strasbourg, September 1984.
- [24] Berdat, F., Blau, R. V.: Beeinträchtigung der Grundwassertemperatur durch Wärmeentzug und Wärmeeintrag, Pro Aqua - Pro Vita, Fachtagung III, Copyright 1988 ProAqua AG, Basel/Schweiz, 1983.
- [25] Mehlhorn, H., Spitz, K. H., und Kobus, H.: Kurzschlußströmung zwischen Schluck- und Entnahmehrunnen – kritischer Abstand und Rückstromrate, Wasser und Boden **33**, 170–174 (1981).
- [26] Hoya, K.: Vorbereitende Untersuchungen zur Grundwasserwärmenutzung in der Neuen Stadt Wulfen, Z. dt. geol. Ges. [Hannover] **132**, 733–743 (1981).
- [27] Söll, T.: Vertikal-ebene Modellierung einer Kaltwassereinleitung in das Grundwasser, Wasserwirtschaft **75**, 384–392 (1985).
- [28] Söll, T.: Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser, Mitt. des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart (i. Vorber.).

-
- [29] Bear, J.: *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1979.
- [30] Frind, E. O.: *The Principal Direction Technique for Advective – Dispersive Transport Simulation in Three Dimensions*, Proceedings, Fifth International Conference on Finite Elements in Water Resources, Burlington, Vermont, 1984.
- [31] Gillham, R. W., Sudicky, E. A., Cherry, J. A., and Frind, E. O.: *An Advective-Diffusive Concept for Solute Transport in Heterogeneous Unconsolidated Geological Deposits*, *Water Resources Res.* **20**, 369–378 (1984).
- [32] Kinzelbach, W.: *Groundwater Modelling – An Introduction with Sample Programs in BASIC*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 1986.
- [33] Konikow, L. F., Bredehöft, J. D.: *Computer Model of Two-dimensional Solute Transport and Dispersion in Groundwater*. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Book 7, United States Government Printing Office, Washington, 90 S.
- [34] Pelka, W.: *Die Berechnung von Stoff- und Wärmetransportvorgängen in gesättigt-ungesättigter Grundwasserströmung*, *Gas-Wasserfach* **126**, 192–198 (1985).
- [35] Pinder, G. F., Gray, W. G.: *Finite Element Solution in Surface and Subsurface Hydrology*, Academic Press, New York, 1977.
- [36] Sudicky, E. A.: *An Advection-Diffusion Theory of Contaminant Transport for Stratified Porous Media*, Dissertation, Dept. of Earth Sciences, University of Waterloo, Canada, 1983.
- [37] Uffink, G. J. M.: *A Random Walk Method for the Simulation of Macrodispersion in a Stratified Aquifer*, In: *Relation of Groundwater Quantity and Quality*, Proc. IUGG General Assembly, Hamburg, 1983, IAHS-Publication Nr. 146, S. 103–114.
- [38] van den Akker: *Numerical Analysis of the Stream Function in Plane Groundwater Flow*, Rijksinstituut voor drinkwatervoorziening, National Institut of Water Supply, Voorburg (Den Haag) Januar 1983.