Beih. Ber. Naturh. Ges.	5	Keller-Festschrift	Hannover 1968

Methoden zur Erfassung von Fließvorgängen im Grundwasser als Grundlage der Ermittlung von Schutzgebieten

Von Jürgen ALBRECHT und Hans-Martin SUCKOW*)

Mit 11 Abbildungen

Zusammenfassung

Für die Bemessung der Schutzzone II von Trinkwassergewinnungsanlagen sind Kenntnisse über die Fließvorgänge im Grundwasser erforderlich.

Das Darcysche Gesetz bildet die Berechnungsgrundlage der Fließzeitermittlung. Es ist nur innerhalb des laminaren Strömungsbereiches für homogene und isotrope Grundwasserleiter anwendbar. Die Methoden zur Bestimmung hydrodynamischer Kennwerte sind vielfach zu ungenau. Feldversuche sind vorzuziehen. Die Berechnungsverfahren zur Fließzeitermittlung sind nur unter stark idealisierten Bedingungen anwendbar. Neuere Untersuchungen zur Beschreibung von Fließvorgängen berücksichtigen teilweise die Heterogenität und Anisotropie von Grundwasserleitern. Die Anwendung von Indikatorverfahren führt zu den sichersten Ergebnissen bei der Fließzeitermittlung und Schutzgebietsbestimmung. Durch verschiedene Methoden kann der Aufwand hierbei gering gehalten werden.

Inhalt

1. Einleitung
2. Fließgeschwindigkeitsermittlung nach dem Darcyschen Gesetz
3. Methoden zur Ermittlung hydrodynamischer Kennwerte
4. Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Fließzeiten
5. Methoden zur Beschreibung von Fließvorgängen in heterogenen und anisotropen Grundwasserleitern
6. Feldmethoden zur Festlegung von Schutzzonen
7. Literatur

1. Einleitung

Der stetig wachsende Grundwasserbedarf erfordert einen intensiven Schutz des Grundwassers in qualitativer und quantitativer Hinsicht. Der quantitative Schutz des Grundwasser ist gewährleistet, wenn das Gleichgewicht zwischen natürlichem Grundwasserdargebot und Grundwasserentnahme eingehalten wird. Qualitativen Beeinträchtigungen des Grundwassers muß mit besonderen Schutzmaßnah-

*) Dipl.-Geol. J. ALBRECHT, Dipl.-Ing. H.-M. SUCKOW, Institut für Geol. u. Paläontol., TU Braunschweig.

men begegnet werden. Vom DVGW wurden daher Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete herausgegeben (Richtlinien 1961). Diese Richtlinien benennen die Gefährdungsmöglichkeiten und geben Hinweise für die Einteilung und Bemessung von Schutzgebieten bei Wassergewinnungsanlagen. Danach sollen Schutzgebiete in drei Zonen gegliedert werden:

Zone I ist die unmittelbare Umgebung der Fassungsanlage; ihre Ausdehnung soll allseitig ab Wasserfassung 10 bis 50 m betragen und jede Verunreinigungsmöglichkeit ausschließen.

Zone II ist die Engere Schutzzone; ihre Ausdehnung soll ab Fassung bis zu einer Linie reichen, von der aus das Grundwasser etwa 50 Tage bis zum Eintreffen in der Fassungsanlage benötigt, mindestens 50 m.

Zone III ist die Weitere Schutzzone; ihre äußere Umgrenzung muß unter Umständen mit der Einzugsgebietsgrenze übereinstimmen.

Zur Ermittlung dieser Schutzgebietsgrenzen sind umfassende Kenntnisse über die hydrogeologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet und die Betriebsdaten der Wassergewinnungsanlage notwendig. Die Ausdehnung der Schutzzone I wird sich danach richten, ob in unmittelbarer Nähe der Fassungsanlage Deckschichten in ausreichender Mächtigkeit vorhanden sind, die einen Schutz vor Verunreinigungen bieten. Die Schutzzone III kann wohl allein auf Grund morphologisch-geologischer Gegebenheiten ermittelt werden, doch sind oft umfangreiche hydrologische Vorarbeiten notwendig.

Die in den Richtlinien des DVGW erhobene Forderung, bei Begrenzung der Schutzzone II einen Fließweg von mindestens 50 m und eine Fließzeit von 50 Tagen sicherzustellen, erfordert die Bestimmung der Grundwasserfließgeschwindigkeit und damit die Bestimmung hydrodynamischer Kennwerte.

Bei dem Versuch, die Fließvorgänge in porigen Medien zu erfassen, tauchen mannigfaltige Probleme auf. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit diesen Problemen und legt die Methoden der Fließzeitenermittlung dar, die die Grundlage für die Bemessung der Schutzzone II von Trinkwassergewinnungsanlagen bilden.

2. Fließgeschwindigkeitsermittlung nach dem Darcyschen Gesetz

Voraussetzung für die Anwendung des Darcyschen Gesetzes zur Berechnung von Fließvorgängen des Grundwassers sind homogene und isotrope Grundwasserleiter. Dann gilt für die x-Richtung in einem x-, y-, z-Koordinatensystem:

$$v_x = k_f \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \qquad (1)$$

v_x = Filtergeschwindigkeit in x-Richtung

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert

$\frac{\partial y}{\partial x}$ = hydraulischer Gradient in x-Richtung

Das Darcysche Gesetz beschreibt empirisch das makroskopische Äquivalent von zahlreichen mikroskopischen Fließsystemen, die Filtergeschwindigkeit ist somit ein statistischer Durchschnittswert aus Einzelgeschwindigkeiten. Die Abweichungen der Geschwindigkeiten einzelner Wasserteilchen vom Mittelwert sind um so größer, je heterogener die Porenräume aufgebaut sind. Für einen homogenen Grundwasserleiter läßt sich die Fließzeit zwischen zwei Punkten aus der Abstandsgeschwindigkeit ermitteln. Für die mittlere Abstandsgeschwindigkeit gilt:

$$v_x = \frac{k_f}{n} \cdot \frac{\delta y}{\delta x} \qquad n = \text{Porenvolumen} \tag{2}$$

Das Darcysche Gesetz setzt laminares Fließen voraus, wobei jedoch die Grenze der Gültigkeit weit unterhalb der Turbulenzgrenze liegt. Das ist dadurch begründet, daß keine Trägheitskräfte berücksichtigt sind, die jedoch bei den gewundenen Strombahnen der Wasserteilchen bei größeren Geschwindigkeiten nicht mehr vernachlässigt werden können. Die Gültigkeitsgrenze des Darcyschen Gesetzes liegt bei einer Reynoldzahl R_e = 1—10, die Grenze vom laminaren zum turbulenten Fließen bei R_e = 600—700 (HUBBERT, 1940).

3. Methoden zur Ermittlung hydrodynamischer Kennwerte

Ausgangspunkt zur Ermittlung der Grundwasserfließgeschwindigkeit ist die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f und des Porenvolumens n. Bei der Bestimmung des k_f-Wertes finden zahlreiche und sehr verschiedenartige Verfahren Anwendung. HAZEN leitete aus Filterversuchen mit gleichkörnigen Sanden folgende Formel ab:

$$k_f = 0{,}0116\ d_{10}^2 \qquad \text{(m/sec)}. \tag{3}$$

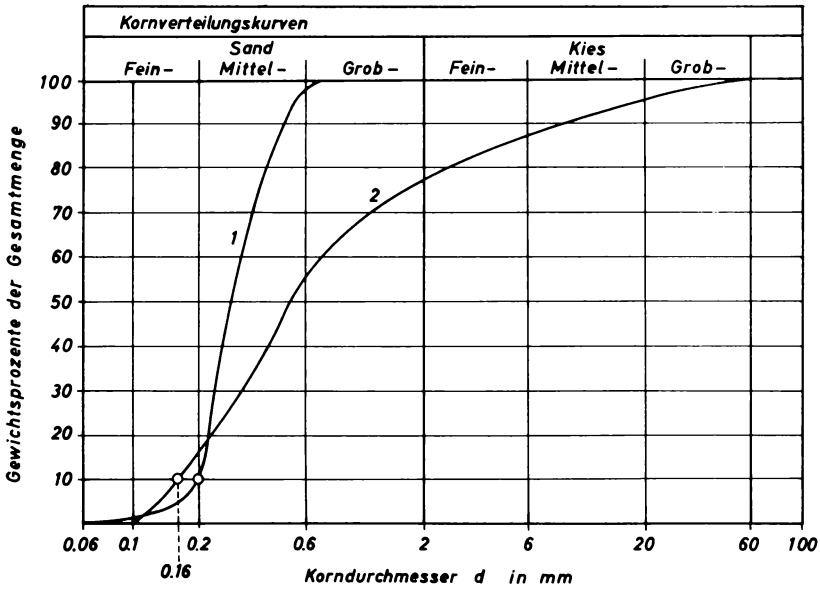
Der wirksame Korndurchmesser d_{10} ergibt sich aus der Summenkurve der Kornverteilung als der Korndurchmesser bei 10 Gewichtsprozenten einer Bodenprobe. Die Gleichung soll anwendbar sein für Sande, deren Ungleichförmigkeitsgrad 5 nicht übersteigt. Ein Beispiel zeigt die Fragwürdigkeit dieser Methode. Die beiden Körnungskurven in Abb. 1 kennzeichnen einen Mittelsand und einen kiesigen Sand.

Der Mittelsand hat einen wirksamen Korndurchmesser d_{10} = 0,2 mm und damit nach HAZEN einen höheren k_f-Wert als der kiesige Sand, für den d_{10} = 0,16 mm ermittelt wurde. Filtrierversuche zeigen die größere Durchlässigkeit des kiesigen Sandes.

SEELHEIM bezeichnet für die Durchlässigkeit wirksam die Korngröße bei 50% einer Kornverteilungssummenkurve

$$k_f = 0{,}00357\ d_{50}^2 \text{ m/sec.} \tag{4}$$

GIESSLER schlägt vor, für überschlägliche Ermittlungen den überwiegenden Anteil des Korndurchmesser einer Probe in m dem k_f-Wert in m/sec gleichzusetzen.



Kurve Nr.	:	1	2
Bodenart	:	mS, fs'	S, ki
$U = d_{60} / d_{10}$	:	0.3 / 0.2 = 1.5	0.7 / 0.16 = 4.4

Abb. 1: Kornverteilungskurven eines schwach feinsandigen Mittelsandes und eines kiesigen Sandes.

Alle drei Methoden führen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Ein Beispiel für die Erfassung von mehreren Einflußfaktoren ist die Formel von FAIR and HATCH (TODD, 1960):

$$k_f = \frac{1}{m \cdot \left[\frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \left(\frac{\alpha}{100} \cdot \sum \frac{p}{d_m} \right)^2 \right]} \qquad (5)$$

Darin bedeutet m einen Faktor, in dem der Einfluß der Lagerungsdichte zum Ausdruck kommt, n ist das Porenvolumen, α ein Faktor der Kornform, p ist der jeweilige Gewichtsanteil in Prozent, d_m das geometrische Mittel benachbarter Siebgrößen. Diese kompliziert aufgebaute Formel gilt jedoch nur für die Bodenarten, für die die Faktoren m und α empirisch ermittelt worden sind.

Schätzungen der k_f-Werte aus Untersuchungen von Bodenproben weisen oft zahlreiche Fehler auf. Diese sind bedingt durch die Bohrmethoden bei Brunnenbohrungen und unsachgemäße Probenentnahme. Häufig sind Ausspülungen der Feinanteile nicht zu vermeiden. Die meisten der verwendeten Bohrwerkzeuge ver-

mischen im Profil getrennt aufeinanderfolgende Bodenarten, so daß auch eine fortlaufende Probenentnahme keineswegs repräsentativ für den Körnungsaufbau des Grundwasserleiters ist.

Diese Einschränkungen gelten ebenso für die k_f-Ermittlungsmethoden, die bei Filtrierversuchen an Bodenproben im Labor durchgeführt werden. Hier sind u. a. die Methoden nach DARCY, KAMENSKI und THIEM zu nennen. Die Fehler, die bei Durchlässigkeitsbestimmungen an gestörten Proben entstehen, sind zurückzuführen auf die Veränderung der Probe durch die Bohrwerkzeuge, die Probenentnahme und -auswahl und den Probeneinbau in Filtriergefäße. Die Entnahme ungestörter Bodenproben ist bei nichtbindigen Bodenarten immer noch recht schwierig. Auch wenn diese Entnahme gelingt, können durch den Entnahmevorgang selbst, durch Transport und Einbau der Proben Störungen eintreten.

Die Tatsache, daß durch Filtrierversuche an Proben im Labor oft nicht einmal grobe Näherungswerte für die Durchlässigkeit ermittelt werden können, zeigt sich vor allem darin, daß infolge des richtungsabhängigen Strömungswiderstandes in einem Grundwasserleiter die natürlichen Verhältnisse im Labor schwerlich simuliert werden können. MALLET und PACQUANT stellten beispielsweise fest, daß sich der k_f-Wert bei waagerechter Fließbewegung um das bis zu 10fache gegenüber dem Wert bei senkrechter Fließbewegung erhöhen kann. Das bedeutet, auf die Ausgangsgleichung von DARCY zurückgeführt, daß hiermit eine zu kleine Fließgeschwindigkeit ermittelt und das Schutzgebiet II einer Wassergewinnungsanlage bei weitem nicht ausreichend dimensioniert würde.

Neben diesen Untersuchungen im Labor zeigen Feldversuche bei erheblichem wirtschaftlichem Aufwand oft günstigere Ergebnisse. Die Errechnung des k_f-Wertes aus dem Dauerpumpversuch nach THIEM findet verbreitete Anwendung. Der Pumpversuch wird in mehreren Stufen bis zur jeweiligen Erreichung eines stationären Zustandes gefahren. Gerade hier zeigt sich die Inhomogenität eines Grundwasserleiters darin, daß oft zu jeder Belastungsstufe des Versuchsbrunnens unterschiedliche k_f-Werte berechnet werden. Die Auswertung von Pumpversuchen ist nur unter folgenden Voraussetzungen möglich:

> Die Ausdehnung des GW-Leiters ist unendlich, er ist homogen und isotrop, seine Mächtigkeit konstant, die Spiegelsenkungen bleiben klein.

Dies gilt auch für Methoden, die die Berechnung des k_f-Wertes bei instationärer Strömung unter Berücksichtigung des Zeitfaktors ermöglichen (LOHR, 1967, MAECKELBURG, 1965, WIEDERHOLD, 1962). LOHR beispielsweise ermittelt aus der Beziehung Spiegelabsenkung/Zeit die sog. k_f-Wert-Fläche, d. i. das Transportvermögen des Grundwasserleiters auf 1 m Breite beim Gefälle $I = 1$. Er weist ebenso wie MAECKELBURG darauf hin, daß die Anwendung solcher nur unter idealisierender Voraussetzung geltenden Berechnungsmethoden in ihren sich widersprechenden Ergebnissen oftmals die Inhomogenität des Grundwasserleiters widerspiegeln.

Eine Methode, mit der sich der heterogene Aufbau eines Porengrundwasserleiters berücksichtigen läßt, ist die Bohrlochmethode nach Hooghoudt-Ernst. Hierbei wird k_f näherungsweise aus der Steiggeschwindigkeit des Grundwassers in einem ausgeschöpften Bohrloch bestimmt. Mehrmalige Messungen der Steiggeschwindigkeit in unterschiedlichen Tiefen decken Unterschiede in der Durchlässigkeit des Untergrundes auf. Die ermittelten k_f-Werte gelten jedoch nur für die unmittelbare Umgebung der Bohrung und setzen außerdem innerhalb einer Schicht gleichmäßigen Zufluß von allen Seiten voraus.

Weitgehend sichere Ergebnisse, gerade in bezug auf die Ermittlung von Schutzzonen, gewinnt man durch Fließzeitmessungen bei Pumpversuchen in Verbindung mit Indikatoren. Diese Methode erfordert einen hohen wirtschaftlichen Aufwand. Im weiteren Umkreis der Wassergewinnungsanlage muß ein ausreichend dichtes Peilrohrnetz erstellt werden. Bereits vor Abteufung der Beobachtungsbohrungen sollten die allgemeinen hydrologischen Verhältnisse soweit ermittelt werden, daß die günstigste Lage der Peilrohre bestimmt und damit deren Anzahl gering gehalten werden kann. Die Zugabe des jeweiligen Indikators muß so erfolgen, daß der natürliche Strömungsvorgang im Grundwasser nicht beeinflußt wird.

Die Indikatormethode ermöglicht eine direkte Bestimmung des Quotienten k_f/n. Bei den anderen vorher erwähnten Methoden muß zusätzlich noch das Porenvolumen ermittelt werden. Eine direkte Messung ist nur an ungestörten Proben möglich, jedoch wegen der schwierigen Probenentnahme recht problematisch. Schätzungen des Porenvolumens sind eher möglich, da Abweichungen um den Faktor 2 die obere Fehlergrenze darstellen. Dagegen muß selbst bei relativ genauen Methoden der k_f-Wert-Ermittlung mit Fehlern der gleichen Größenordnung gerechnet werden, die im Extremfall bis zum Faktor 10 anwachsen können.

4. Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Fließzeiten

Bei bekanntem Quotient k_f/n und aus Spiegelplänen ermitteltem Gefälle I läßt sich mit den anfangs aufgeführten Einschränkungen näherungsweise die Fließgeschwindigkeit und daraus die Fließzeit bestimmen. NAHRGANG (1965) beschreibt eingehend an einem Beispiel den Rechnungsgang. Es gilt

$$\bar{v} = \frac{dx}{dt} = \frac{k_f}{n} \cdot I \qquad (6)$$

x = Fließweg
t = Fließzeit
I = Gefälle ≙ hydraulischer Gradient

Für die Fließzeit ergibt sich daraus

$$t = \int \frac{n}{k_f} \cdot \frac{1}{I} \, dx \qquad (7)$$

Die Integration kann graphisch oder numerisch erfolgen.

Im Fall des homogenen, isotropen Grundwasserleiters ist der Quotient k_f/n konstant, und die Integration muß nur noch für das Gefälle durchgeführt werden.

$$t = \frac{n}{k_f} \cdot \int \frac{1}{I} \, dx \tag{8}$$

Kann außerdem näherungsweise vorausgesetzt werden, daß der Grundwasserleiter konstante Mächtigkeit besitzt und das natürliche Gefälle sehr klein ist, dann ergibt die Kombination der Dupuitschen Formel für die Brunnenergiebigkeit mit der Gleichung für die Fließzeit im Falle eines gespannten Grundwassers einen geschlossenen Ausdruck für die Fließzeit. Die Ergiebigkeitsformel lautet:

$$Q = 2\pi \cdot m \cdot k_f \cdot \frac{y_2 - y_1}{\ln x_2 - \ln x_1} \tag{9}$$

Faßt man x_1 und y_1 als variable Größen auf, so läßt sich aus der Ergiebigkeitsformel ein Ausdruck für die Absenkungskurve herleiten:

$$y = a \cdot \ln x + b \tag{10}$$

$$\text{mit } a = \frac{Q}{2\pi \cdot m \cdot k_f}\,; \; b = y_2 - \frac{Q}{2\pi \cdot m \cdot k_f} \cdot \ln x_2$$

Mit

$$I = \frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx}\left(a \cdot \ln x + b\right) = \frac{a}{x} \tag{11}$$

ergibt sich

$$t = \frac{n}{k_f} \cdot \int \frac{x}{a} \, dx = \frac{n}{k_f} \cdot \frac{x^2}{2a} \tag{12}$$

$$t = \frac{x^2 \cdot \pi \cdot m \cdot n}{Q} \tag{13}$$

Im Falle eines freien Wasserspiegels ist die Integration nicht geschlossen durchführbar. Hier kann die Fließzeit mit den folgenden Schritten bestimmt werden. Die Beobachtung der Absenkung an zwei Peilrohren bei einem Pumpversuch mit stationärem Zufluß (Beharrungszustand) liefert die Wertepaare x_1, y_1 und x_2, y_2 (entsprechend Abb. 2).

1. Bestimmung des k_f-Wertes nach der Formel

$$k_f = \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{\ln x_2 - \ln x_1}{y_2^2 - y_1^2} \tag{14}$$

2. Berechnung von mehreren Absenkungswerten nach

$$y = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot k_f} \cdot \ln x - \frac{Q}{\pi \cdot k_f} \ln x_2 + y_2^2} \tag{15}$$

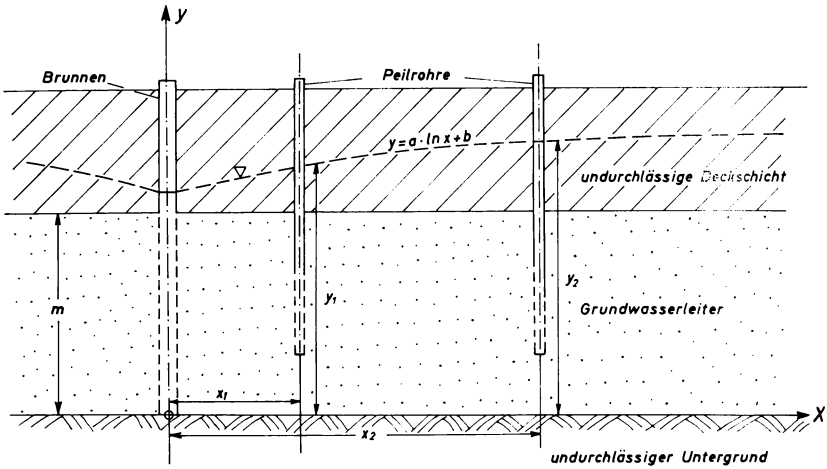


Abb. 2: Schematische Darstellung der Absenkungskurve bei gespanntem Grundwasser.

3. Berechnung des Gefälles zwischen den benachbarten Punkten (Ersatz der Absenkungskurve durch einen Polygonzug).

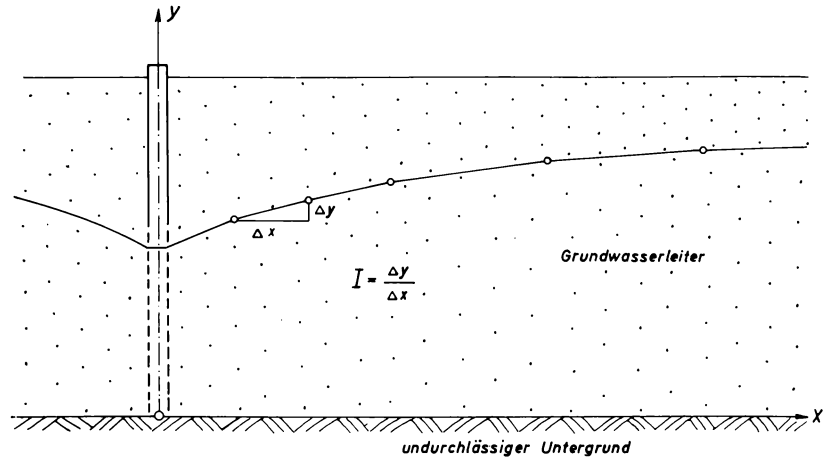


Abb. 3: Angenäherte Absenkungskurve (Polygonzug) bei freiem Grundwasser.

4. Numerische Integration

$$t = \frac{n}{k_f} \cdot \int \frac{1}{I}\, dx \tag{8}$$

Kann das natürliche Gefälle des Grundwassers nicht vernachlässigt werden, dann ist bei Voraussetzung aller oben erwähnten Vereinfachungen ein Verfahren von LANDES (1958) anwendbar.

5. Methoden zur Beschreibung von Fließvorgängen in heterogenen und anisotropen Grundwasserleitern

Mit den oben genannten Methoden lassen sich die Fließzeiten nur unter stark einschränkenden Voraussetzungen abschätzen. Für einen solchen stark idealisierten Fall ist das Feld der Äquipotentiallinien in Abb. 4 dargestellt.

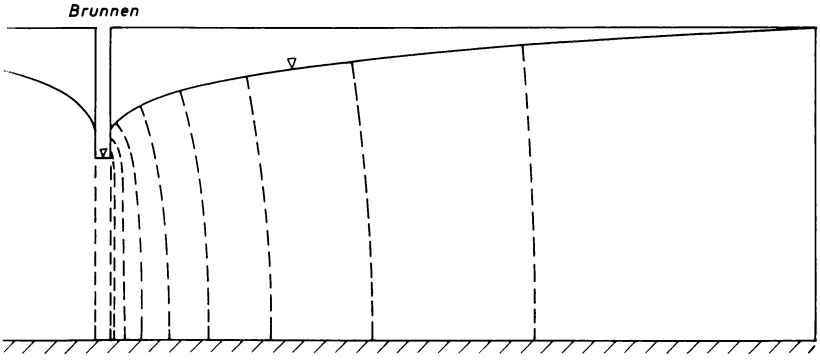


Abb. 4: Äquipotentiallinien bei einem vollkommenen Brunnen in einem homogenen und isotropen Grundwasserleiter (NAHRGANG, 1954).

In der Regel liegt jedoch ein inhomogener und anisotroper Grundwasserleiter vor. Die Fließvorgänge sind hier differenzierter.

Im Vergleich zu Abb. 4 treten in Abb. 5 starke Abweichungen von der horizontalen Fließrichtung auf. In diesem Fall führt eine Ermittlung der mittleren Fließgeschwindigkeit aus dem Pumpversuch zu Fehlbeurteilungen über das Fließverhalten.

Aus dem amerikanischen Schrifttum sind mathematische Methoden bekannt, mit denen sich bei nicht zu kompliziertem Aufbau eines Grundwasserleiters die Fließvorgänge beschreiben lassen (TODD 1960, HUBBERT 1940, FREEZE u. WITHERSPOON 1967). Sie beruhen auf numerischen Lösungen, die mit digitalen Rechenanlagen bei einem erträglichen Aufwand an Rechenzeit bewältigt werden können. Die folgenden Abbildungen zeigen Ausschnitte aus verschiedenen Beispielen, die von FREEZE u. WHITHERSPOON (1967) berechnet worden sind.

Während im Beispiel eines homogenen und isotropen Grundwasserleiters das Wasser in horizontaler Richtung fließt (Abb. 6a), findet bei einem geschichteten

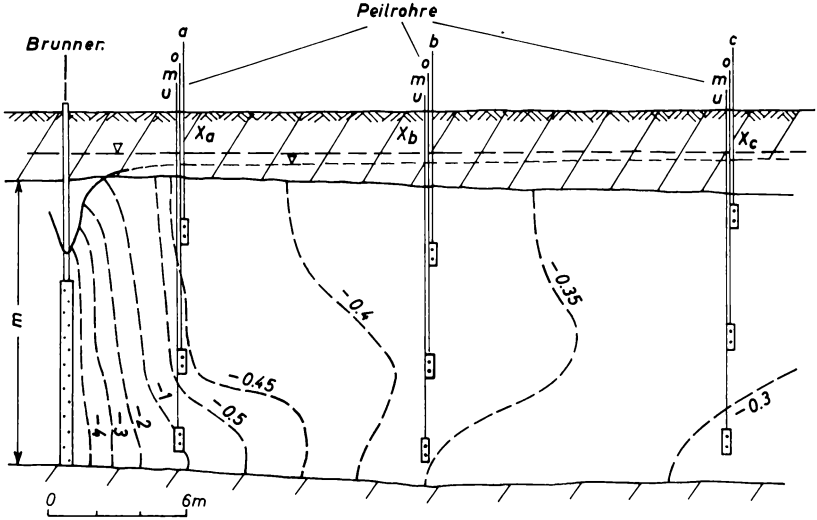


Abb. 5: Äquipotentiallinien bei einem inhomogenen Grundwasserleiter (Pumpversuch Torgau-West, ZIESCHANG, 1962).

Untergrund bei sonst gleichen Bedingungen (Abb. 6b) eine Einspeisung von der schwächer durchlässigen Schicht in die unterlagernde, stärker durchlässige Schicht statt. Die Fließrichtung in der oberen Schicht ist nicht mehr horizontal. In Abb. 6c ist vereinfacht ein Fall dargestellt, in dem eine stärker durchlässige Schicht plötzlich endet. Auch hier treten vertikale Geschwindigkeitskomponenten auf. Die Ergebnisse der Berechnungen für den Fall einer schrägliegenden Kieslinse, die an den als undurchlässig gedachten Untergrund anschließt, sind in Abb. 6d dargestellt.

Die mathematischen Methoden werden besonders aufwendig, wenn außer der Heterogenität auch noch die Anisotropie des Untergrundes berücksichtigt werden muß. Es genügt dann nicht mehr, für verschiedene Stellen eines Grundwasserleiters unterschiedliche k_f-Werte zu bestimmen, sondern am jeweiligen Ort ist die Durchlässigkeit zusätzlich noch richtungsabhängig. Zur Beschreibung läßt sich mit Vorteil die Tensorschreibweise verwenden (SCHEIDEGGER, 1961).

Zusammenfassend sei für 3 verschiedene Fälle die Gleichung für die Filtergeschwindigkeit in x-Richtung angegeben:

$$v_x = k_f \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \qquad k_f = \text{konstant, Grundwasserleiter homogen und isotrop (Darcy)} \qquad (16a)$$

$$v_x = k_f\,(x, y, z) \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \qquad \text{Grundwasserleiter inhomogen und isotrop, } k_f \text{ ortsabhängig} \qquad (16b)$$

$$v_x = (k_f)\,i, j \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \qquad k_f \text{ abhängig vom Ort und von der Richtung (symmetrischer Tensor)} \qquad (16c)$$

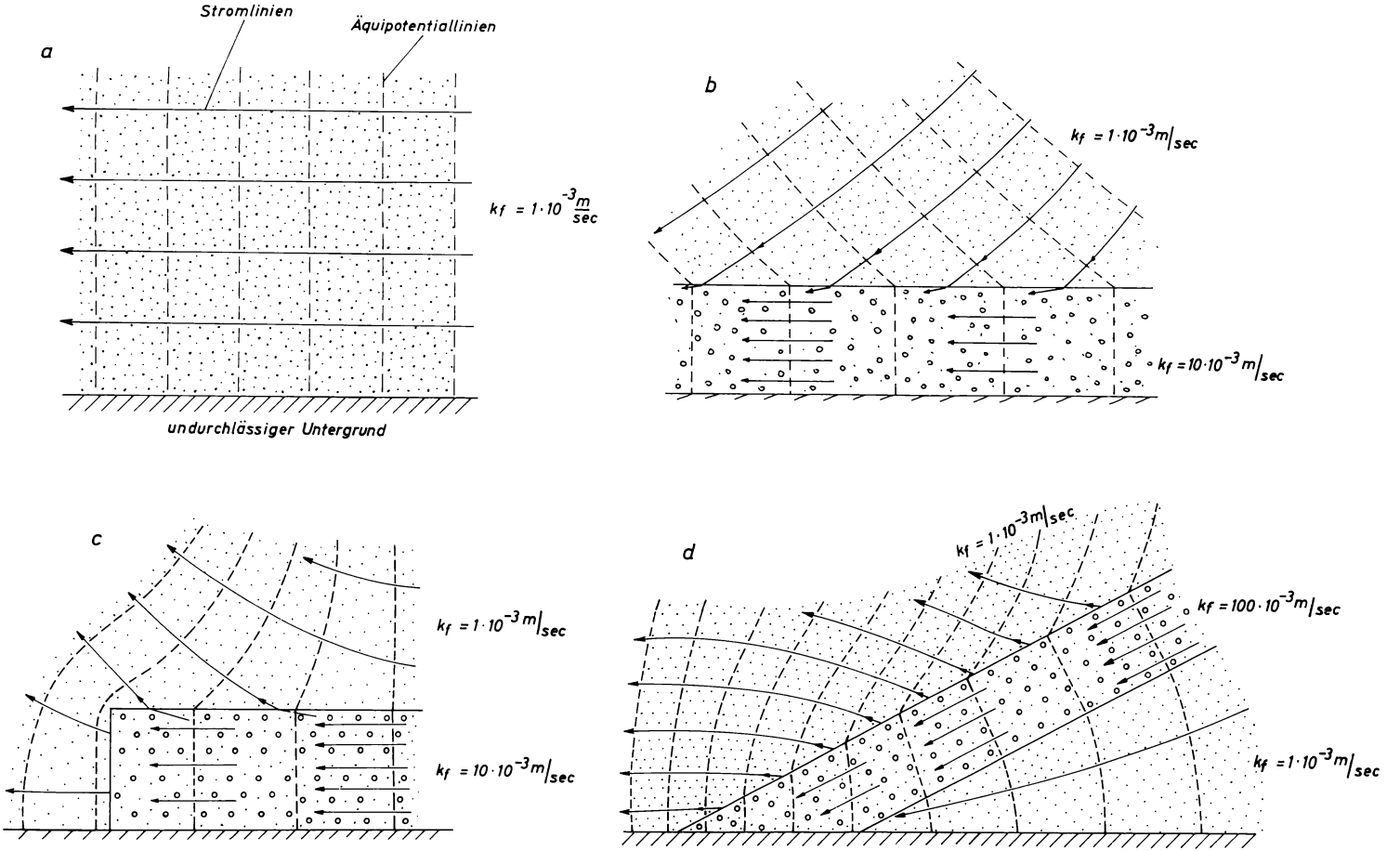


Abb. 6 a—d: Strömungsfelder in verschieden durchlässigen Grundwasserleitern.

Der Tensor der Durchlässigkeit ist vorstellbar als ein Ellipsoid, das sich an irgendeinem Punkt des Grundwasserleiters befindet und dessen Achsen sich durch die Hauptrichtungen der verschiedenen Durchlässigkeiten ausdrücken lassen. Nur die Tensor-Konzeption ermöglicht die Deutung zahlreicher Experimente, die gezeigt haben, daß Fließrichtung und Druckgradient voneinander abweichen können, denn im Fall der Anisotropie verläuft die Fließrichtung nicht senkrecht zu den Äquipotentiallinien, sondern weicht mehr oder weniger stark davon ab.

In einfachen Fällen läßt sich die Anisotropie in den mathematischen Modellen durch Maßstabsverzerrungen berücksichtigen (MAASLAND, 1957). Bei ebenen Strömungsproblemen ist die Ermittlung der Strömungsrichtung nach LIAKOPOULOS (1965) mit der sog. Durchlässigkeitsellipse möglich (Abb. 7).

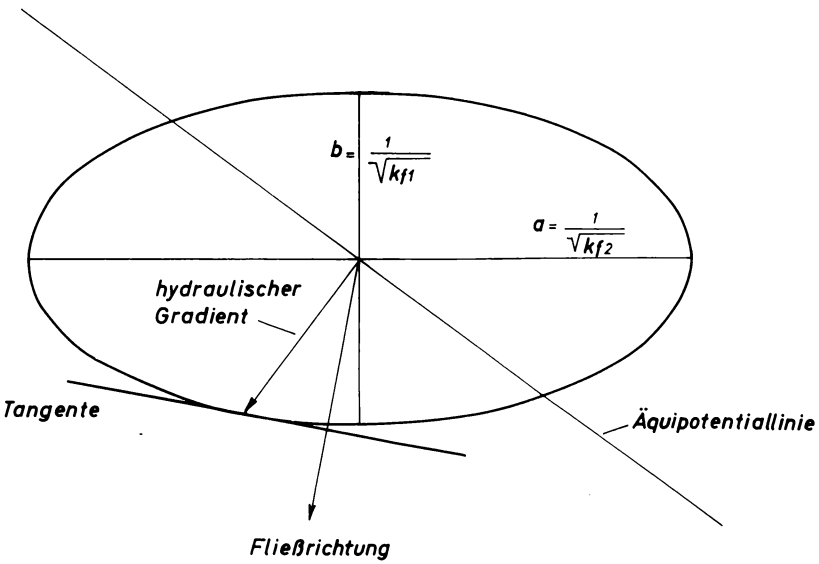


Abb. 7: Durchlässigkeitsellipse (LIAKOPOULOS, 1965).

HANTUSH (1966) schlägt eine Versuchsanordnung beim Pumpversuch vor, die es ermöglicht, die Hauptrichtungen von großräumigen Anisotropien zu ermitteln. Hierzu sind mehrere Beobachtungsrohre von mindestens 3 Richtungen radial vom Brunnen aus notwendig.

Bei komplizierten Lagerungsverhältnissen führen mathematische Ansätze oft nicht zum Ziel. Zur Beschreibung stationärer Wasserbewegungen lassen sich mit Vorteil elektrische Analogmodelle heranziehen. Diese Modelle beruhen auf der Analogie zwischen Darcyschem und Ohmschem Gesetz. Die größte Anpassungs-

fähigkeit an unterschiedliche Bedingungen besitzt von den gebräuchlichen Verfahren die Methode des Leiternetzwerkes (Abb. 8).

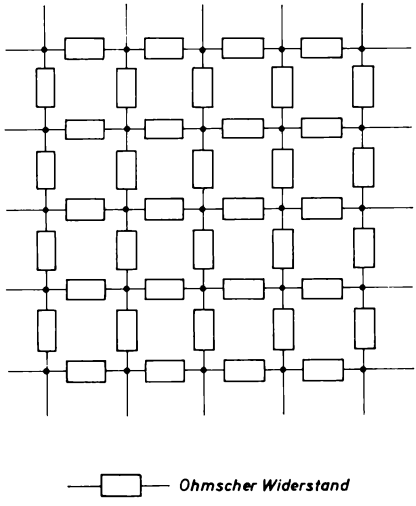


Abb. 8: Ausschnitt aus einem Leiternetzwerk.

Bei diesem Verfahren entsprechen den verschiedenen Durchlässigkeiten die elektrischen Leitfähigkeiten von Ohmschen Widerständen; die Randbedingungen werden durch die geometrische Anordnung erfaßt. Durch entsprechende Wahl der Einzelwiderstände lassen sich heterogene und anisotrope Grundwasserleiter nachbilden. Ein Beispiel für ein so ermitteltes Strömungsfeld in einem Zwei-Schichten-System ist in Abb. 9 gezeigt.

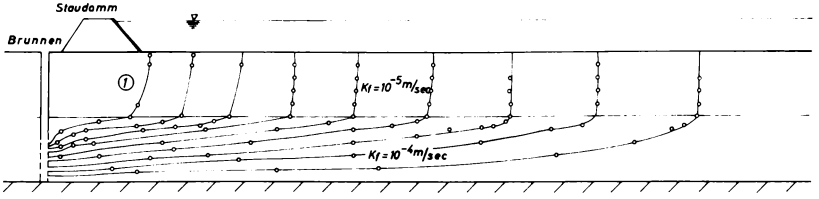


Abb. 9: Strömungsvorgang in einem 2-Schichten-System.

Der kürzeste Weg, auf dem das Wasser aus dem angestauten See in den Brunnen gelangt, führt längs der Strombahn 1. Durch schrittweise Integration läßt sich die Fließzeit genügend genau berechnen.

Kommt an der Erdoberfläche Wasser zur Versickerung, so setzt sich die gesamte Verweilzeit des Wassers zusammen aus der Verweilzeit während des Sickervorganges und der anschließenden Fließzeit im Grundwasserstrom. KELLER (1957) weist auf die besondere Bedeutung des Sickervorganges für die Reinigung des Wassers hin. Die Berechnung der Verweilzeit während des Sickervorganges kann nach BOUWER (1959) näherungsweise mit dem Darcyschen Gesetz erfolgen, wenn der Durchlässigkeitsbeiwert als Funktion der Sättigung bekannt ist. Zur genauen Beschreibung wird von ZASLAVSKY (1954) die Theorie des Fließens im ungesättigten Medium angewendet.

Über ein einfaches Berechnungsverfahren, das den Einfluß eingelagerter, schwer durchlässiger Schichten auf den Fließvorgang im homogenen Strömungsfeld erfaßt, berichtet SWARTZENDRUBER (1960). An Stelle des Durchlässigkeitsbeiwertes verwendet er den Begriff des hydraulischen Widerstandes R, der folgendermaßen definiert ist:

$$dR = \frac{dx}{F \cdot k_f(x)} \qquad \begin{array}{l} x = \text{Fließweg} \\ F = \text{durchströmter Querschnitt} \end{array} \tag{17a}$$

oder für konstantes k_f

$$R = \frac{x}{F \cdot k_f} \tag{17b}$$

Durch Einführung dieses Widerstandswertes läßt sich die Berechnung des Strömungsvorganges vereinfachen. Ein weiterer Vorteil liegt in der guten Anschaulichkeit und einer einfachen Möglichkeit zur Abschätzung der Fließzeiten bei senkrechter Durchströmung von geschichteten Grundwasserleitern.

Die sehr aufwendige Tensorkonzeption des Durchlässigkeitsbeiwertes läßt es ratsam erscheinen, nach einem anderen hydrodynamischen Kennwert zu suchen, mit dem sich der Fließvorgang besser beschreiben läßt. Mit Hilfe von Indikatoren ist es möglich, das Ergebnis des Strömungsvorganges sichtbar zu machen. Zahlreiche Untersuchungen (SCHEIDEGGER 1954, 1961, KÜHN 1962, u. a.) weisen hier einen Weg. Sie versuchen, aus der Deutung der Verteilungskurve des Indikators einen Parameter für die hydraulisch wirksame Geometrie zu gewinnen.

6. Feldmethoden zur Festlegung von Schutzzonen

Die erläuterten Methoden zur Erfassung der hydrodynamischen Vorgänge in einem porigen Leiter sind nicht unbeschränkt für die Bestimmung von Schutzzonen anwendbar. Die Voraussetzungen für die Anwendung der rechnerischen Methoden sind in der Natur über größere Räume praktisch nie gegeben. Trotzdem stellen alle Versuche, die komplizierten Vorgänge der Strömungsverhältnisse in einem Grundwasserleiter, wenn auch nur am idealisierten Teilausschnitt, zu erforschen, wertvolle Hilfsmittel bei der Festlegung von Schutzgebieten dar.

Die Notwendigkeit, bei Begrenzung der Schutzzone II einer Wassergewinnungsanlage die Fließzeit des Grundwassers zu ermitteln, zwingt zu der Anwendung von Feldmethoden in Verbindung mit rechnerischen Methoden. Hierbei können die Berechnungsverfahren bei planerischen Vorarbeiten die Ausgangsgrundlage für das weitere Vorgehen bilden.

Eine exakte Abgrenzung einer Schutzzone II ist wegen des heterogenen Aufbaues von porigen Grundwasserleitern kaum möglich. Geht man von den Ursachen der Grundwassergefährdung, nämlich der Versickerung schädlicher Stoffe und Lösungen aus, so erscheinen Indikatorverfahren in Verbindung mit Pumpversuchen als sicherste Methode, die Fließzeiten im Bereich von Fassungsanlagen zu erkunden.

Die Anwendung dieser Verfahren erfordert — wie bereits gesagt — ein ausreichendes Netz von Grundwassermeßstellen. Es empfiehlt sich, an jeder Meßstelle mehrere Filter in unterschiedlicher Tiefe einzubauen, um am durch den Indikator angezeigten Strömungsbild den Einfluß von Heterogenitäten des Untergrundes erkennen zu können (MERCADO u. HALEVY, 1966, NAHRGANG, 1966).

An Hand der Indikatorprofile von Färbversuchen beschreibt und ermittelt BEYER (1964) die unterschiedlichen Abstandsgeschwindigkeiten, die durch die Porenquerschnittsänderungen und andere wechselnde Einflußfaktoren bedingt sind. Nach Zugabe des Indikators, die ohne Beeinflussung des natürlichen Strömungsvorganges geschehen soll, findet eine allmähliche Stoffverteilung und eine Zerlegung der Indikatorlösung in einzelne Geschwindigkeiten und Richtungen unterschiedlicher Konzentration statt. Die Farbintensitätskurve (Abb. 10) zeigt die Geschwindigkeitsverteilung des Strömungsvorganges an.

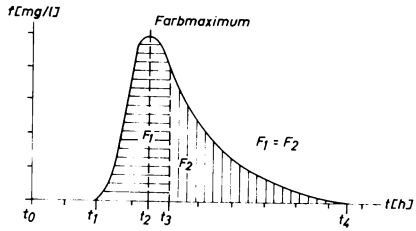


Abb. 10: Indikatorprofil (Farbintensitätskurve) eines Modellversuches (BEYER, 1964).

Die maximale Abstandsgeschwindigkeit besitzen jene Teilchen, die zum Zeitpunkt t_1 in die Wasserfassung gelangen. Der Fließzeit t_2 entspricht nach BEYER die sog. intensive Abstandsgeschwindigkeit; mit mittlerer Abstandsgeschwindigkeit bezeichnet er die Geschwindigkeit, der die Fließzeit t_3 nach Durchgang von 50% der Farbstoffsumme zugeordnet ist.

Für die Festlegung der Schutzzone II ist die Kenntnis der maximalen Abstandsgeschwindigkeit erforderlich (KELLER, 1965). Die Begrenzung der Schutzzone II wird sich also nach der Fließzeit der sog. Vorläufer, die auf den Strömungsbahnen größter Durchlässigkeit in die Fassungen gelangen, richten.

Modellversuche im Labor (BEYER, 1964) zeigen, daß die maximale Abstandsgeschwindigkeit nahezu doppelt so groß wie die mittlere Abstandsgeschwindigkeit sein kann. Gegenüber Laborversuchen, bei denen die geringe Länge der durchströmten Bodensäule sehr einfache, gleichförmige Indikatorprofile bedingt, ergeben Feldversuche stärker differenzierte Kurven mit mehreren Maxima, bei denen die einzelnen Geschwindigkeitswerte noch größere Unterschiede aufweisen (Abb. 11). Stark gegliederte Kurven weisen auf den heterogenen und anisotropen Aufbau des Grundwasserleiters hin.

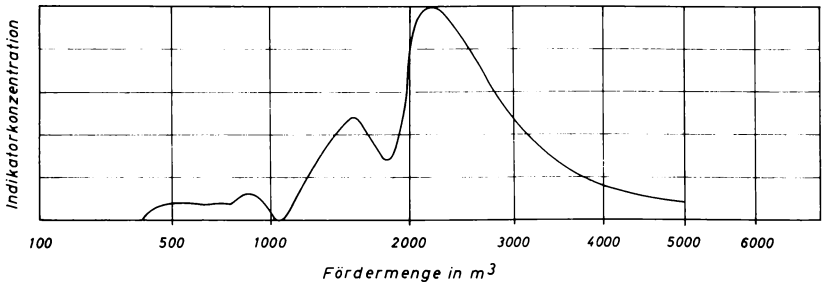


Abb. 11: Indikatorprofil eines Feldversuches (MERCADO und HALEVY, 1966).

Die Wahl des jeweils am besten geeigneten Indikators hängt vom Chemismus des Grundwassers und hygienischen Gesichtspunkten ab. Der Nachweis des Indikators an der Meßstelle muß auch in geringster Konzentration möglich sein. Bei Färbversuchen zeigt der Gebrauch von Uranin Vorteile, da dieser Farbstoff sehr resistent ist und sich leicht makroskopisch und bei größter Verdünnung (bis 1 mg Uranin auf 100 l Wasser) mit dem Fluoroskop nachweisen läßt (RADLOFF, 1966).

Bei gleichzeitiger Anwendung verschiedener Indikatoren, Salze, Farbstoffe, radioaktive Isotope, kann Fehlern infolge von Adsorptionserscheinungen im Untergrund begegnet werden.

Der hohe Aufwand, den die Indikatormethode erfordert, kann durch mehrere sinnvolle Maßnahmen verringert werden. Durch Voruntersuchungen des vertikalen und horizontalen Aufbaues des Grundwasserleiters mit Hilfe von Sondierbohrungen, die gegenüber herkömmlichen Bohrungen wirtschaftlich sehr viel günstiger sind, kann die Anzahl der notwendigen Peilrohre begrenzt und deren wirksamste Plazierung erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit, die Kosten zu senken, besteht in der Verwendung von Spül- und Rammfiltern, die als Grund-

wassermeßstellen, zumindest bei freiem Spiegel und nur einem Grundwasserstockwerk, sehr gut geeignet sind. Vergleichsmessungen zwischen Spülfilter-Peilrohren und üblichen, gemäß den Richtlinien erbauten Peilrohren zeigen auch über längere Zeiträume völlige Übereinstimmung im Verlauf des Spiegelganges.

Das Indikatorverfahren stellt die sicherste Methode zur Begrenzung der Schutzzone II dar. Auch bei kleinen Fassungsanlagen sollte dieses Verfahren angewendet werden, da sich weitgehende Möglichkeiten der Aufwandsminderung bieten. Vor allem bei Neuplanungen sollte in Verbindung mit dem Pumpversuch, der zur Feststellung der Ergiebigkeit und Wasserqualität erforderlich ist, zusätzlich ein Indikatorverfahren zur Festlegung der Schutzgebietsgrenzen angewendet werden. Es genügt nicht, die Schutzzone II auf Grund allgemeiner Erfahrungen oder unzulänglicher Durchlässigkeitsermittlungen unter Einkalkulierung mehrfacher Sicherheiten zu bestimmen. Die hierdurch bedingte größere Ausdehnung der Schutzzone kann für im Schutzgebiet evtl. bereits angesiedelte Industrien mit hohen Auflagen und dann unter Umständen nicht mehr vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand verbunden sein.

7. Literatur

BEYER, W.: Die Erfassung von Grundwasserfließvorgängen mittels Farbstoffen in Verbindung mit Pumpversuchen. — Z. f. angew. Geol., H. 6, 1964, S. 295—301, Berlin.

BIESKE, E.: Nold-Brunnenfilterbuch. — 1961, Stockstadt.

BOGOMOLOW, G.: Grundlagen der Hydrogeologie. — 1958, Berlin.

BOSOLD, H.: Die Festlegung der Reichweite bei kreisförmigen Fassungsanlagen und Einzelbrunnen. — WWT, H. 11, 1966, S. 377—380, Berlin.

BOUWER, H., LITTLE, W. C.: Proceedings of the Soil Science Society of America, 23, 1959, S. 91—96, Madison/Wisc.

BRIX, HEYD, GERLACH: Die Wasserversorgung. 1963, Wien.

FREEZE, R. A., & WITHERSPOON, P. A.: Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow. —: Water Resources Research, Vol. 2, No. 4, 1966 u. Vol. 3, No. 2, S. 623—634 u. 641—656 1967.

GIESSLER, A.: Erschließung des Wassers. 1955, Berlin.

GRÜNKE, A.: Die Größe des Absenkungstrichters bei Grundwasserabsenkungen mit freiem Grundwasserspiegel. — WWT, H. 12, 1966, S. 427—430, Berlin.

HANTUSH, M. S.: Analysis of Data from Pumping Tests in Anisotropic Aquifers. — J. Geophysical Research, Vol. 71, No. 2, 1966, S. 421—426, Richmond.

HUBBERT, M. K.: Theory of Groundwater Motion. — Journal of Geology 48, 1940, S. 785—944, Chicago.

KELLER, G.: Das Reinigungsvermögen im Boden und im Grundwasserleiter. — Wasser und Boden, 6, 1957, S. 189—192, Hamburg.

—: Hydrogeologischer Beitrag zur Trinkwasserschutzgebietsfrage bei porigen Grundwasserleitern. — I. A. H. Kongreß 1965, Bd. VII, 1967, S. 176—178, Hannover.

KÜHN, H.: Der hydrodynamische Kennwert des Bodens. — Z. D. Geol. Ges., 114, 1962, 1963/64, S. 153—156, Hannover.

LANDES, Th.: Beitrag zur Berechnung der engeren Schutzzone von Trinkwasserversorgungsanlagen bei sandigem und kiesigem Untergrund. — Z. f. Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau, H. 9, 1958, S. 403—410, Berlin.

LIAKOPOULOS, A. C.: Variation of the Permeability Tensor Ellipsoid in Homogeneous Anisotropic Soils. — Water Resources Research, Vol. 1, 1965, S. 135—141.

LOHR, A.: Beitrag zur Interpretation des Pumpversuches als instationärer Vorgang. — Das Gas- und Wasserfach, 108, H. 26, 1967, S. 725—733, München.

MAASLAND, M.: Soil Anisotropy and Land Drainage in Drainage of Agricultural Lands. — American Society of Agronomy, 1957, S. 216—285, Madison/Wisc.

MAECKELBURG, D.: Entstehung, Ausbreitung und Reichweite des Senkungstrichters eines Vertikalbrunnens bei freiem Grundwasserspiegel. — Die Wasserwirtschaft, 55, H. 1, 1965, S. 13—17, München.

MALLET u. PAQUANT: Erdstaudämme. 1954, Berlin.

MERCADO, A., u. HALEVY, E.: Determining the Average Porosity and Permeability of a Stratified Aquifer with the Aid of Radioactive Tracers. — Water Resources Research, Vol. 2, No. 3, 1966, S. 525—531.

MEYBOOM, P.: Current Trends in Hydrogeology. — Earth-Science Review 2, 1966, S. 345—364, Amsterdam.

MULL, R.: Untersuchungen von stationären Grund- und Sickerwasserströmungen mit einem Leiternetzwerk. — Die Wasserwirtschaft, H. 9, 1966, S. 301—305, München.

NAHRGANG, G.: Zur Theorie des vollkommenen und unvollkommenen Brunnens. — 1954, Berlin/Göttingen/Heidelberg.

—: Über die Bemessung von Schutzzonen bei Grundwasserfassungsanlagen. — Z. f. Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau, H. 3, 1965, S. 102—107, Berlin.

—: Über die Anströmung von Wasserfassungen im Lockergestein als Grundlage für Bau und Betrieb von Brunnenanlagen und für die Bemessung von Schutzzonen. — Das Gas- und Wasserfach, 107, H. 46, 1966, München.

RADLOFF, H.: Vergleichende Anwendung verschiedener hydrologischer Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines Grundwasserwerkes. — Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 10, 1966, Braunschweig.

Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete, I. Teil Schutzgebiete für Grundwasser. Deutscher Verein von Gas- u. Wasserfachmännern, 1961, Frankfurt.

SCHEIDEGGER, A. E.: Statistical Hydrodynamics in Porous Media. — J. appl. Physics, 25, 1954, S. 994—1001.

—: General Theory of Dispersion in Porous Media. — J. Geophysical Research, Vol. 66, No. 10, 1961, S. 3273—3278, Richmond.

SCHNEIDER, TRUELSEN, THIELE: Die Wassererschließung. 1952, Essen.

SWARTZENDRUBER, D.: Water Flow through a Soil Profile as Affected by the Least Permeable Layer. — J. Geophysical Research, Vol. 65, No. 12, 1960, S. 4037—4042, Richmond.

TODD, D. K.: Groundwater Hydrology, 1960, New York.

WIEDERHOLD, W.: Die raumzeitlichen Verhältnisse des Senktrichters eines Brunnens im Grundwasser mit freier Oberfläche. — Das Gas- und Wasserfach, 103, H. 18, 1962, München.

ZASLAVSKY, D.: Theory of Unsaturated Flow into a Non-uniform Soil Profile. — Soil Science, Vol. 97, 1964, Baltimore.

ZIESCHANG, J.: Geologisch-hydraulische Betrachtung der Wasserdurchlässigkeit von Lockergesteinsgrundwasserleitern. — Z. f. angew. Geol., H. 5, 1962, S. 226—233, Berlin.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover

Jahr/Year: 1968

Band/Volume: BH_5

Autor(en)/Author(s): Suckow Hans-Martin, Albrecht Jürgen

Artikel/Article: Methoden zur Erfassung von Fließvorgängen im Grundwasser als Grundlage der Ermittlung von Schutzgebieten 75-92