

# Radiohydrometrische Grundwassererkundung in Lockergesteinsaquifern

*Radiohydrometrical exploration of groundwater in porous aquifers*

W. DROST<sup>1)</sup>

## Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	33
2. Meßverfahren.....	34
3. Filtergeschwindigkeiten und Fließrichtungen.....	34
4. Hydraulische Leitfähigkeit und Dispersivität.....	37
Zusammenfassung.....	40
Literatur.....	40
Summary.....	40

## 1. Einleitung

Im Alpenvorland sind die Grundwasservorkommen in den Talfüllungen und den Schotterebenen für die Trinkwasserversorgung von großer Bedeutung. In diesen Aquifern haben die Lockergesteine wie Sand, Kies und Geröll genügend effektive Poren Hohlräume zur Aufnahme und Weiterleitung von beachtlichen Wassermassen. Auf Anregung und in Zusammenarbeit mit den für die Wasserwirtschaft und den Umweltschutz verantwortlichen Behörden wurden in einer großen Anzahl dieser Aquifer in den letzten Dekaden radiohydrometrische Einbohrlochmessungen zur Bestimmung von Parametern des Grundwasserabflusses bei Problemen der Grundwassererkundung und -erschließung, zur Bewertung von Kriterien für den Grundwasserschutz und zur Beurteilung des Untergrundes in seinen Eigenschaften als Baugrund beim Grund- und Wasserbau durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten bei mehr als 100 Projekten in Südbayern, insbesondere entlang der Talgebiete der Flüsse zwischen Bodensee und Alzplatte. Je nach Aufgabenstellung wurden dabei Daten über die lokale Grundwasserströmung oder bei hinreichend großer Stichprobenanzahl Werte zur Abschätzung des gesamten Grundwasserabflusses in einem Aquifer erarbeitet.

<sup>1)</sup> W. DROST, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Hydrologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 Oberschleißheim.

## 2. Meßverfahren

Radiohydrometrische Einbohrlochmethoden sind das Dilutionslog und das Richtungslog. Beim Dilutionslog ergibt sich aus der Tracerverdünnung im Filterrohr eines Pegels die als spezifischer Grundwasserabfluß definierte Filtergeschwindigkeit  $q$  des Grundwassers und beim Richtungslog aus der Tracerverteilung außerhalb des Filterrohres die Abflußrichtung  $R_i$  des Grundwassers (H. MOSER & W. RAUERT, 1980, IAEA, 1983, H. SCHNEIDER, 1988). Mit diesen Verfahren können Filtergeschwindigkeiten  $q > 0,001$  m/d und Fließrichtungen im Azimut von  $0-360^\circ$  bestimmt werden.

Durch die Einbohrlochmessungen ergeben sich die lokalen Fließvektoren, die in einem heterogenen Aquifer eine ortsabhängige Größe sind. Je nach der Struktur und Textur der durchflossenen Sedimente können die in einem Aquifer gemessenen, lognormal verteilten Filtergeschwindigkeiten  $q$  und normal verteilten Fließrichtungen  $R_i$  des Grundwassers über weite Bereiche streuen. Bei der Regionalisierung der Einbohrlochergebnisse nehmen die Lage und die Dichte der Grundwassermeßstellen eine Schlüsselstellung ein. Die in den Meßstellen gewonnenen Daten sollen eine Verteilungsfunktion sichern, aus der sich die hydrologischen Kenngrößen des Aquifers mit einer hinreichenden Bestimmtheit ableiten lassen.

## 3. Filtergeschwindigkeiten und Fließrichtungen

Als typisches Beispiel für eine Verteilung von Einbohrlochdaten in einem quasiiinfiniten Lockergesteinsaquifer im Voralpenland sind in Fig. 1 und 2 die Summenkurven und Histogramme von Filtergeschwindigkeiten und die Histogramme von Fließrichtungen aus der Schotterebene im N von München dargestellt. Hier wurden im Zuge von Arbeiten für die U-Bahn, den Nordwest-Sammelkanal sowie die Nordwest-Deponie der Landeshauptstadt München im großen Umfang radiohydrometrische Erkundungen in quartären Sedimenten wie auch in tertiären Flinzsanden durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, daß in den quartären Sedimenten (Fig. 1) die Filtergeschwindigkeiten  $q$  und Fließrichtungen  $R_i$  symmetrische Verteilungen annähern und daß das Grundwasser mit Filtergeschwindigkeiten von  $0,03 < q[\text{m/d}] < 22$  in nördlicher Richtung abfließt. Bei großen Filtergeschwindigkeiten ( $q > 10$  m/d) weichen die  $q$ -Werte von der Normalverteilung ab, anscheinend überlagert Turbulenz den Grundwasserabfluß und die Linearität des Darcyschen Gesetzes ist nicht mehr gegeben. Die großen Filtergeschwindigkeiten sind an ca. 0,1–0,5 m mächtige, sandfreie bis sandarme Schichten (s. g. Rollkiese) gebunden, die in den quartären Schottern mit sandreichen Kies-schichten wechselgelagert sind. In diesen Rollkiesen kann die natürliche Fließgeschwindigkeit (Bahngeschwindigkeit) des Grundwassers in den Poren bis zu 100 m/d erreichen, ist deswegen bei der Bewertung von Schadstofftransport besonders zu beachten und vor allem bei Baugrundabdichtungen hinderlich.

Die in Fig. 2 dargestellten Ergebnisse für die tertiären Flinzsande zeigen für die Histogramme schiefe Verteilungen der gemessenen Fließrichtungen  $R_i$  und Filtergeschwindigkeiten  $q$ . Neben dem erwarteten Abfluß nach N werden Abflußkomponenten nach S nachgewiesen. Durch Separation der Abflußkomponenten nach N und S erkennt man, daß nach S sehr kleine Filtergeschwindigkeiten ( $< 0,01$  m/d) häufiger sind als nach N. Das ist offensichtlich durch Wasserhaltungen im Stadtgebiet von München bedingt. Deren Absenktichter können sich im tertiären Grundwasserstockwerk mit gespanntem

## Quartär

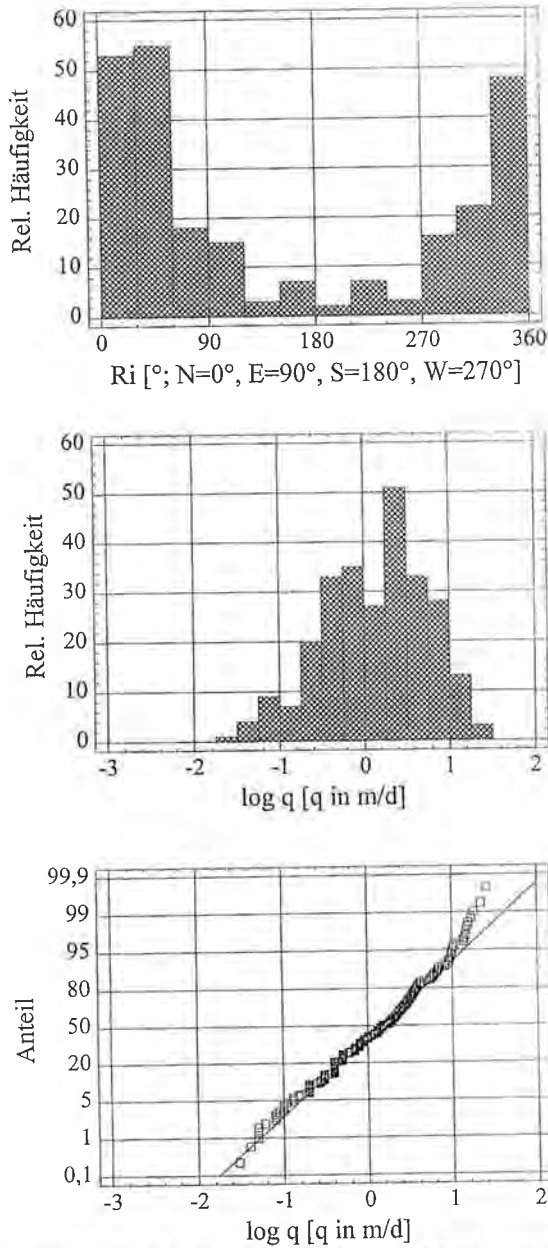


Fig. 1: Histogramme und Summenkurve von Fließrichtungen  $R_i$  und Filtergeschwindigkeiten  $q$ , die mit Einbohrlochmethoden in ca. 5 m mächtigen quartären Schottern im Münchner Norden bestimmt wurden. Größe des Untersuchungsgebietes: ca. 20 km<sup>2</sup>; Anzahl der Meßstellen: ca. 60. Histograms and cumulative normal curve of flow directions  $R_i$  and specific discharges  $q$ , both determined by single well logs in quaternary sediments in the north of Munich. Area: about 20 km<sup>2</sup>; thickness of sediments: about 5 m; number of gages: about 60.

Tertiär

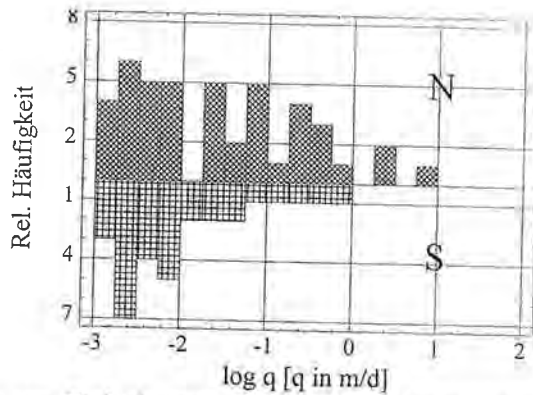
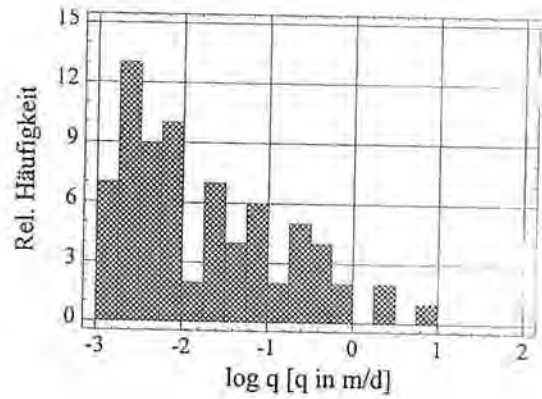
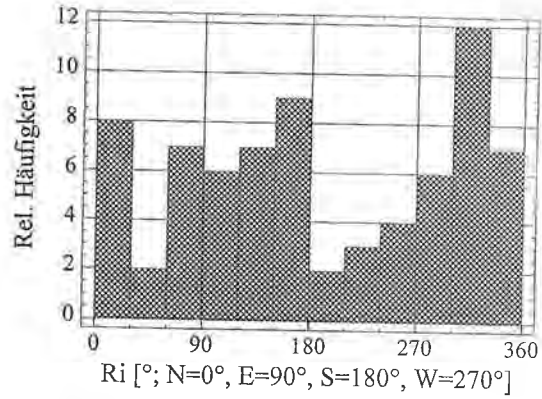


Fig. 2: Histogramme von Fließrichtungen  $R_i$  und Filtergeschwindigkeiten  $q$ , die mit Einbohrlochmethoden in tertiären Feinsanden im Münchner Norden bestimmt wurden. Größe des Untersuchungsgebietes: ca.  $20 \text{ km}^2$ ; Anzahl der Meßstellen: 22.  
 Histograms of flow directions  $R_i$  and specific discharges  $q$ , determined by single well logs in tertiary sands in the north of Munich. Area: about  $20 \text{ km}^2$ ; number of gages: 22.

Wasser kilometerweit ausbilden, so eine Richtungsumkehr des Grundwasserabflusses nach S im untersuchten Gebiet erzeugen und dadurch zu einer Störung des natürlichen Grundwasserabflusses führen. Erwartungsgemäß sind die Filtergeschwindigkeiten in den tertiären Sanden ca. zwei Größenordnungen kleiner als die in den quartären Sedimenten. Natürliche größere  $q$ -Werte (bis zu einigen m/d) treten im Tertiär an der Grenze zum Flinzmergel i. a. dort auf, wo durch erosive Umlagerungsvorgänge Mergelgerölle entstanden sind.

#### 4. Hydraulische Leitfähigkeit und Dispersivität

Zur Regionalisierung der Einbohrlochdaten wird eine probabilistische Modellierung der lognormal verteilten Filtergeschwindigkeiten vorgenommen. Unter der Annahme der Stationarität und der Ergodizität wird die Variabilität der Filtergeschwindigkeiten über Mittelwert und Varianz beschrieben. So lassen sich aus Fig. 1 der Mittelwert  $\mu$  sowie die Standardabweichungen  $+\sigma$  und  $-\sigma$  ablesen, die  $\mu = 1,4$  m/d,  $-\sigma = 0,9$ ,  $+\sigma = 6,8$  und  $2\sigma = 7,7$  betragen. Auf ähnliche Weise wurden in 16 quartären Aquifern mit genügenden Datenmengen die statistischen Maßzahlen für die Filtergeschwindigkeitsverteilungen bestimmt.

Mit dem Darcyschen Gesetz kann aus dem Mittelwert für  $q$  die mittlere hydraulische Leitfähigkeit  $K$  abgeleitet werden. Zur Feldvalidierung der Ergebnisse von Dilutionslogs sind so ermittelte  $K(D)$ -Werte mit denen verglichen worden, die sich als  $K(P)$  aus Pumpversuchen ergaben. Die lineare Regression von Fig. 3 zeigt für Aquifer im Alpenvorland für  $0,002 < K$  [m/s]  $< 0,02$  einen positiven funktionalen Zusammenhang für beide Wertegruppen.

Da nach diesen Befunden Filtergeschwindigkeiten  $q$  und hydraulische Leitfähigkeiten  $K$  kompatibel sind, läßt sich die Varianz  $2\sigma$  der  $q$ -Werte zur Abschätzung der longitudinalen Dispersivität eines Aquifers (Makrodispersivität) verwenden. Als Makrodispersion wird der Ausbreitungsvorgang bezeichnet, der auf Geschwindigkeitsfluktuationen im gesamten Aquifer zurückzuführen ist. Nach einem stochastischen Ansatz von L. W. GELHAR (1986) hängt diese Dispersivität  $a$  im wesentlichen von den Variationen der  $K$ -Werte im Aquifer sowie deren räumlicher Korrelationsstruktur ab. Die longitudinale Makrodispersivität ergibt sich als das Produkt des Quadrates der Varianz der  $K$ -Werte mal der mit der Kovarianzfunktion für das räumliche Verhalten der Varianz verbundenen Korrelationslänge  $l$ , die durch Variogrammanalyse bestimmt wird (G. DE MARSILY, 1984). Für die Variogrammanalyse der Daten aus dem Münchner Norden (Fig. 1) wurde das Programm COGG verwendet, bei dem sich das Variogramm nur in Fließrichtung entwickeln läßt. Die Analyse ergibt bei einer Korrelationslänge von  $\lambda = 250$  m eine longitudinale Dispersivität von  $a = 295$  m, wobei die experimentellen Daten das exponentielle Modellvariogramm mit hinreichender Genauigkeit fitten.

Zur Validierung dieses Ansatzes für die Makrodispersivität wurden Feldergebnisse analysiert, die in Kiesen und Sanden auf der beim Zusammenfluß von Donau und Lech gebildeten Halbinsel erarbeitet worden sind. Hier wurden zur Bestimmung von Verweilzeiten Grundwassermarkierungen über verschiedene Entfernungen zu einer Brunnen-galerie durchgeführt. Die daraus abgeleiteten longitudinalen Dispersivitäten nehmen mit der Entfernung zu und nähern sich der Makrodispersivität an, die aus der Varianz der Filtergeschwindigkeiten zu  $a = 280$  m bestimmt wurde (Fig. 4). Dabei konnte das Filtergeschwindigkeitsfeld in einer Woche bestimmt werden, während die Grundwassermarkierungen Beobachtungszeiten bis zu einem Jahr erforderten.

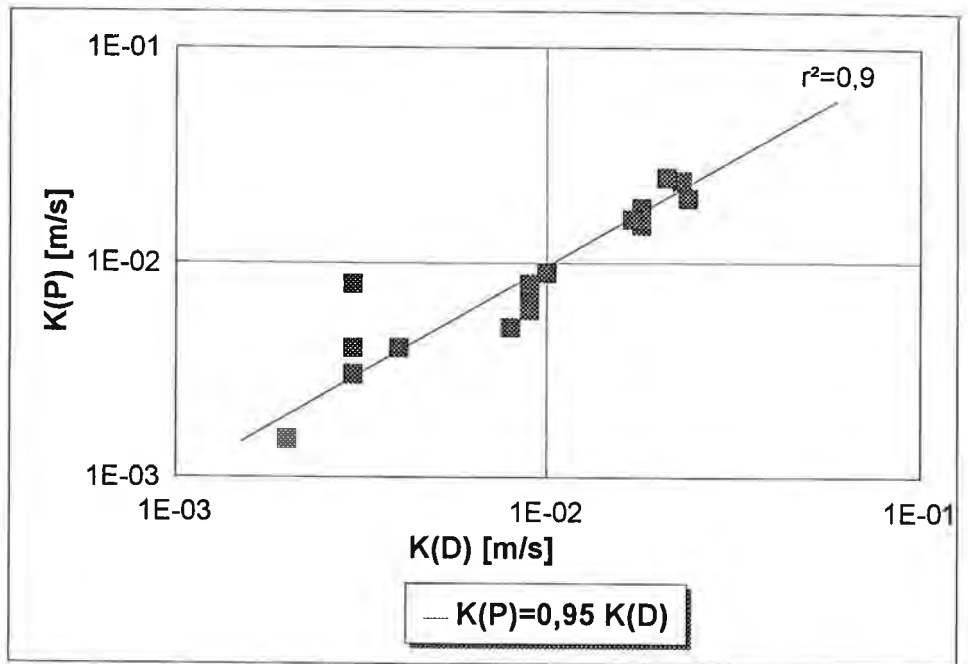


Fig. 3: Hydraulische Leitfähigkeiten  $K$  von Aquifern im Alpenvorland, als  $K(P)$  durch Pumpversuche und als  $K(D)$  durch Dilutionslogs ermittelt.  $r^2$  = Korrelationskoeffizient.  
 Hydraulic conductivities  $K$  of aquifers in the perialpine land, determined as  $K(P)$  by pumping tests and as  $K(D)$  by dilution logs.  $r^2$  = coefficient of correlation.

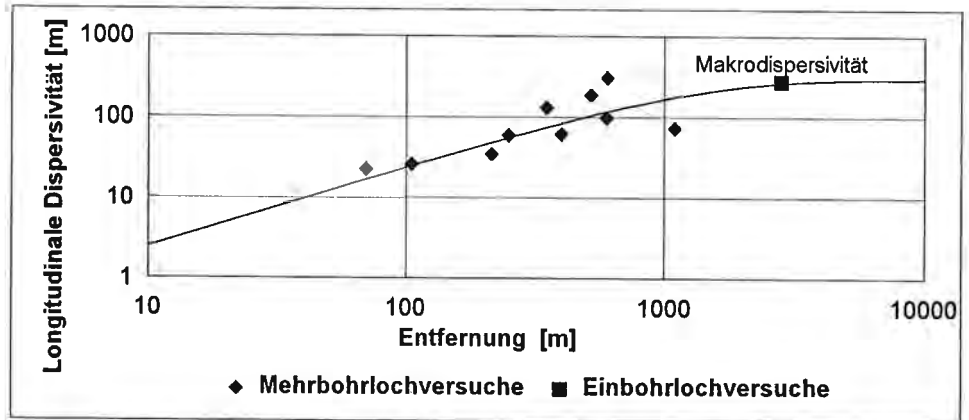


Fig. 4: Longitudinale Dispersivitäten als Ergebnis von Markierungsversuchen für verschiedene Entfernungen in quartären, ca. 5 m mächtigen Sedimenten auf der beim Zusammenfluß von Donau und Lech gebildeten Halbinsel (Fläche: ca.  $6 \text{ km}^2$ ). Aus der Variogrammanalyse von Einbohrlochdaten der Filtergeschwindigkeit  $q$  aus 15 Pegeln ergibt sich die Makrodispersivität.  
 Longitudinal dispersivities as result of groundwater tracing for different scales in quaternary sediments at the Danube-Lech-Peninsula (area: about  $6 \text{ km}^2$ ; thickness: about 5 m) and macrodispersivity determined by variogram analysis of the distribution of specific discharges (number of gages: 15).

Bei dem stochastischen Verfahren hängt die Makrodispersivität nur von der Varianz und nicht vom Betrage der Filtergeschwindigkeiten in einem Aquifer ab. Da die Varianz mit zunehmendem Maßstab wächst, ist die Makrodispersivität selbst wiederum von der Größe des Gebietes abhängig.

Nach dem Ergebnis von Fig. 5 münden so berechnete Makrodispersivitäten bei einer Entfernung von etwa 3 km auf ein Plateau mit  $a \approx 300$  m ein. Dieser konvergente Verlauf deckt sich mit Ergebnissen von L. W. GELHAR (1986), der eine ähnliche Abhängigkeit für eine Vielzahl von Aquiferen beobachtet hat.

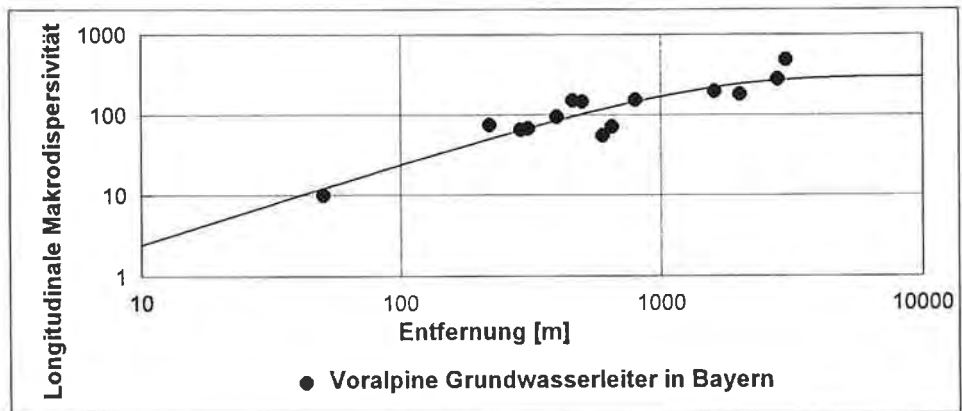


Fig. 5: Abhängigkeit von Makrodispersivitäten  $a$  von der Entfernung  $x$  für verschiedene Aquifer im Quartär des Alpenvorlandes. Die experimentellen Werte nähern die Relation  $a(x) \approx 300(1 - \exp(-x/1200))$  an.  
 Macrodispersivity-scale-relation for various aquifers in the quaternary of the perialpine land. The experimental values approximate the relation  $a(x) \approx 300(1 - \exp(-x/1200))$ .

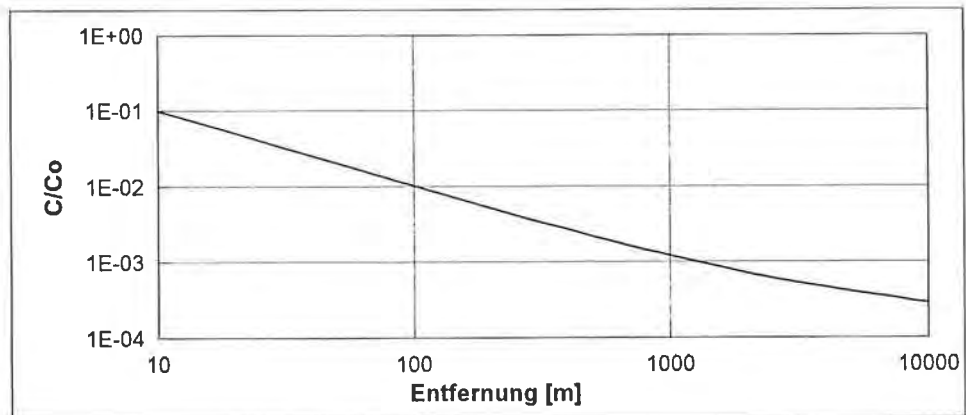


Fig. 6: Konzentrationsabfall eines konservativen Stoffes durch hydrodynamische Dispersion für verschiedene Entfernungen unter Nutzung der Dispersivitäten von Fig. 5.  $C$  = Konzentration zur Zeit  $t$ ,  $C_0$  = Konzentration zur Zeit  $t = 0$ .  
 Decrease of concentration of a conservative tracer at different distances by the dispersivities given by Fig. 5.  $C$  = concentration at time  $t$ ,  $C_0$  = concentration at time  $t = 0$ .

Aus der Abhängigkeit der Makrodispersivitäten mit der Entfernung ergibt sich bei Nutzung der Transportgleichung der Konzentrationsabfall eines punktförmig eingebrachten konservativen Stoffes für verschiedene Entfernungen. Nach der Darstellung in Fig. 6 ist der Stoff in seiner Konzentration nach einer Entfernung von 1000 m durch hydrodynamische Dispersion um drei Größenordnungen verdünnt. Dieser Mechanismus ist u. a. die Grundlage für eine i. a. einwandfreie hygienische Beschaffenheit des Grundwassers in den Lockergesteinsaquiferen, selbst wenn es auf natürliche Weise von Vorflutern infiltriert. Auch im unterirdischen Abstrom von Mülldeponien wurde nachgewiesen, daß kontaminiertes Wasser nach etwa einem Kilometer im Unterstrom der Deponie wieder die Beschaffenheit von natürlichem Grundwasser angenommen hat (H. J. EXLER, 1980).

## Zusammenfassung

Die radiohydrometrischen Einbohrlochverfahren haben sich bei der quantitativen Grundwassererkundung in Lockergesteinen als ein zuverlässiges Bestimmungsverfahren erwiesen, mit dem die Filtergeschwindigkeit und die Fließrichtung des Grundwassers auf einem Pegelfeld in kurzer Zeit ermittelt werden kann. Die Methoden reagieren dabei sehr sensitiv auf räumliche Unterschiede in Textur und Struktur der durchflossenen Sedimente und auf zeitliche Änderungen des Fließsystems im Aquifer bei wechselnden hydraulischen Randbedingungen. Aus der Varianz der Filtergeschwindigkeiten läßt sich die Dispersivität abschätzen, die von der räumlichen Ausdehnung der einzelnen Aquifere abhängt und mit der Ausdehnung größer wird.

## Literatur

- DE MARSILY, G. (1984): Spatial Variability of Properties in Porous Media – A Stochastic Approach.– In: Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media.– NATO ASI Series E, Nr. 82, 721–769, Paris.
- EXLER, H. J. (1980): Groundwater Pollution Considered as a Continuous Injection of Tracers.– In: IAEA (1980): Nuclear Techniques in Groundwater Pollution.– 83–101, Wien.
- GELHAR, L. W. (1986): Stochastic Subsurface Hydrology – From Theory to Applications.– Water Resources Research, 22, 135–145, Washington.
- IAEA (1983): Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology – 1983 Edition.– 439 S., IAEA, Wien.
- MOSER, H. & W. RAUERT (Hrsg., 1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie.– Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 8, 400 S., Berlin/Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- SCHNEIDER, H. (1988): Die Wassererschließung.– 876 S., Essen (Vulkan).

## Summary

The radiohydrometrical single well techniques have proved to be a reliable tool by which groundwater flow in a network of gages can be determined in short time. The methods are quite sensitive to changes in texture and structure of the water bearing sediments and to temporal variations which are due to alternating boundary conditions. The variance of the measured specific discharges allows estimates of aquifers dispersivity which depends on scale and increases with increasing scale.