

Technik und Ergebnisse von Schichtenfärbeversuchen in Grund- und Oberflächenwässern sowie in gespeicherten Trinkwässern

Von F. DOSCH (Wien)

Als Schichtenfärbeversuche (F. DOSCH) werden Versuche zur Ermittlung von Richtung und Geschwindigkeit der Ausbreitung sowie Fortbewegung des in einer bestimmten Tiefe befindlichen und daselbst gefärbten Anteiles eines Wassers bezeichnet.

Die Ergebnisse solcher Versuche erlauben im Gegensatz zu den gewöhnlichen Färbeversuchen einen Rückschluß auf die Verteilung dieses markierten, und bei denselben hydrologischen Verhältnissen auch nachfolgender nicht markierter Anteile des Wassers, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung.

Diese beiden Sätze führen im Sinne einer Definition nur die wesentlichen Merkmale von Schichtenfärbeversuchen bzw. Schichtenmarkierungsversuchen an. Es sollen daher nach prinzipiellen theoretischen Erwägungen an Hand von drei charakteristischen Beispielen die technische Durchführung sowie die Auswertung solcher Versuche dargestellt werden.

Schichtenfärbeversuche sind naturgemäß nur in solchen Gewässern mit Erfolg durchführbar und sinnvoll, die in Richtung der drei Dimensionen des Raumes einen zusammenhängenden und darüber hinaus zur Differenzierung von Schichten ausreichend großen Körper bilden; ferner in Gewässern, denen in so vielen horizontalen und vertikalen Ebenen Proben zum qualitativen und quantitativen Nachweis des Markierungsmittels in so dichter zeitlicher Folge entnommen werden können, daß sowohl Tiefenlage und Mächtigkeit etwaiger Schichten als auch Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit des Wassers innerhalb derselben mit der erforderlichen Genauigkeit feststellbar sind.

Die Genauigkeit der Versuchsergebnisse hängt wie bei allen Markierungsversuchen zur Ermittlung der Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit eines Gewässers, gleichgültig ob Oberflächenwasser oder

Grundwasser, im wesentlichen davon ab, wie groß das Versuchsfeld im Vergleich zu dem Areal ist, auf das sich die Aussage beziehen soll; ferner, wie viele Beobachtungspunkte in diesem Feld verfügbar sind, wie oft Probenahmen erfolgen, wie groß die Menge des eingebrachten Markierungsmittels und schließlich, wie empfindlich die Methode zum Nachweis desselben ist. Sonach besteht bei einem gewöhnlichen Färbeversuch schon ein deutlicher Zusammenhang zwischen Arbeits- und Sachaufwand einerseits und Genauigkeit der Ergebnisse andererseits. Dieser Zusammenhang ist bei Schichtenfärbeversuchen eben durch die Einbeziehung der dritten Dimension mit Hilfe von Spezialsonden oder Spezial-Entnahmegeräten sowie die große Zahl der zu untersuchenden Proben noch viel deutlicher.

Die Größe des Versuchsfeldes ist deshalb von ausschlaggebender Bedeutung, weil insbesondere bei Versuchen im Grundwasser mit nicht vorhersehbaren Unregelmäßigkeiten in der Beschaffenheit des Bodens und infolgedessen mit regionär sehr differenten Bedingungen für die Richtung und die Geschwindigkeit der Fortbewegung des Grundwassers zu rechnen ist. Von der Länge resp. Kürze der Intervalle zwischen den Probenahmen hängt es wiederum ab, wie genau der Zeitpunkt vom Beginn und Ende des Durchganges des markierten Wassers an den verschiedenen Beobachtungspunkten erfaßt wird; denn die errechneten maximalen und minimalen Fließgeschwindigkeiten werden den effektiven um so näher kommen, je genauer die kürzesten und längsten Fließzeiten zwischen diesen Punkten bestimmt wurden. Auch von der eingesetzten Menge des Markierungsmittels sowie der Empfindlichkeit des Verfahrens zu dessen Nachweis wird es schließlich abhängen, ob sich größere Differenzen in dieser Hinsicht ergeben. Auch unter optimalen Bedingungen werden solche Unterschiede immer noch bestehen. Sie sind aber unverhältnismäßig groß, wenn aus einem der beiden vorerwähnten Gründe einerseits der Beginn des Durchganges mit erheblicher Verspätung, andererseits das Ende desselben viel zu früh registriert wird. Aber nicht nur in dieser Hinsicht werden sich geringere Mengen von Markierungsstoff und weniger empfindliche Nachweisverfahren ungünstig auswirken. Auch bezüglich der Verteilung des markierten Wassers werden sich Fehler ergeben, weil die Randpartien desselben, auch wenn sie einen Beobachtungspunkt berühren, daselbst nicht mehr als solche erkannt werden können und daher das Ausmaß der Verteilung unterschätzt wird. Die Genauigkeit, mit welcher der Zeitpunkt des Durchganges der höchsten Konzentration des Markierungsmittels zur Schätzung der mittleren Fließgeschwindigkeit bei irgendeinem Beobachtungspunkt erfaßt werden kann, hängt ebenfalls, wenn auch nicht im gleichen Maß, von diesen Faktoren ab.

Von erheblicher Bedeutung für die Exaktheit der Ergebnisse von manchen Markierungs- und insbesondere Schichtenmarkierungsversuchen ist auch die Genauigkeit der quantitativen Bestimmungen des

Markierungsmittels; sind sie doch dafür maßgeblich, daß z. B. angegeben werden kann, wie groß jeweils die Konzentration desselben im Brunnenwasser war, und bis wann im Pumpgut (zur Berechnung der mittleren Zuflußgeschwindigkeit) die Hälfte des Markierungsstoffes enthalten gewesen ist.

Auf diese Einzelheiten wurde der Vollständigkeit halber hingewiesen, obwohl sie in diesem Fachkreis als Binsenwahrheiten erscheinen könnten.

Nunmehr wird die Technik von Schichtenfärbeversuchen an drei Beispielen mit grundsätzlich verschiedener Fragestellung erläutert. Der Anlaß zu jedem dieser Versuche ist hier nebensächlich. Auch die Ergebnisse werden nur auszugsweise und so weit referiert, als dies für einen Rückblick auf die Planung und Durchführung der Versuche zweckmäßig ist.

Das erste Beispiel betrifft parallele Versuche in zwei Kammern eines gedeckten Trinkwasserbehälters, die mit einem Fassungsvermögen von je 150.000 m³ zwar gleich groß, jedoch mit verschiedenen technischen Einrichtungen zur Verhinderung einer thermischen Schichtung ihres Inhaltes ausgestattet sind (F. GEILHOFER, 1957, F. DOSCH, 1957); denn thermische Schichtungen erschweren die aus hygienischen Gründen angestrebte gleichmäßige Durchflutung der Kammern.

Zur Kontrolle der Wirksamkeit dieser technischen Einrichtungen wurde eine Reihe von Schichtenfärbeversuchen bei verschiedenen Füllhöhen und Durchflußmengen vorgenommen, um die Verteilung des zufließenden Wassers und schließlich die Strömungsvorgänge in den Kammern bei unterschiedlichen Betriebszuständen darzustellen.

Als Voraussetzung für die Durchführung derartiger Versuche wurden in der Decke der beiden Behälterkammern 35 bzw. 33 Öffnungen für die Entnahme von Wasserproben angelegt, die unter Berücksichtigung der Funktion der Leitwände annähernd gleichmäßig verteilt waren. Ferner wurde speziell für Behälteruntersuchungen ein Gerät von den Technikern H. GRAF und I. NOVACEK konstruiert, das sogenannte Schichtproben-Entnahmegesetz, mit dessen Hilfe von jeder der in der Behälterdecke vorhandenen Entnahmeöffnungen Proben zwar aus beliebig vielen, bei gleichbleibender Einstellung während ein- und derselben Untersuchung jedoch aus immer den gleichen Wassertiefen gezogen werden können (Abb. 1, 2). Damit war die für einen Schichtenfärbeversuch wichtigste Voraussetzung in geradezu idealer Weise erfüllt, und es konnten bei diesen Versuchen z. B. dem in Bewegung befindlichen Wasser in jeder der beiden Kammern jeweils in drei Tiefen und sonach in einem räumlichen Netz von rund 100 Punkten Proben entnommen werden. Einzelheiten der technischen Einrichtungen der Behälterkammern sowie des Schichtprobenentnahmegesetzes können den Arbeiten von F. GEILHOFER (1957) und F. DOSCH (1957) entnommen werden.

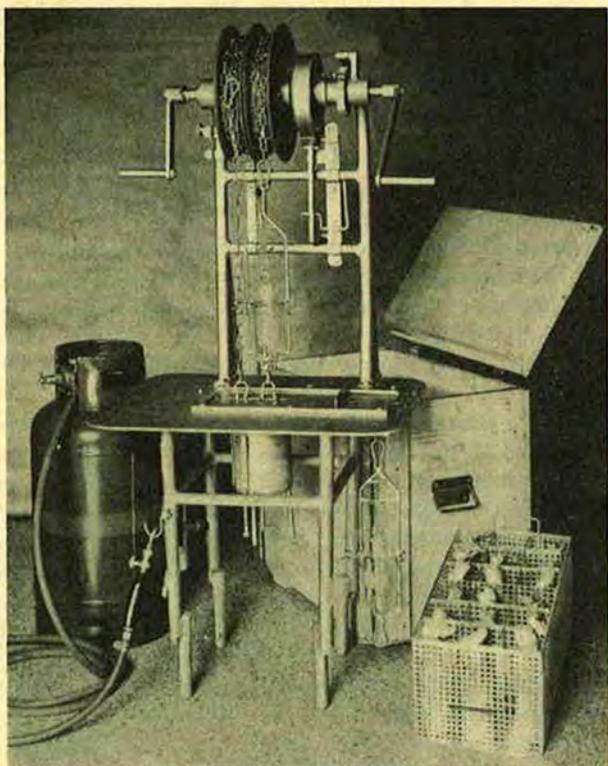


Abb. 1: Schichtproben-Entnahmegerät mit Propangas-Anlage zum Flammbieren der in das Wasser eintauchenden Teile; Transportbehälter für die Proben.

Die vorliegenden Versuche wurden bei einer Stautiefe von 8,4 m und einer Durchflußmenge von 20.000 m³ pro Tag vorgenommen. Dieser Betriebszustand bestand damals bereits seit Wochen, so daß die Temperaturverhältnisse im Inhalt der Kammern als weitgehend konstant gelten durften. Bei einer Temperatur des zufließenden Wassers von 7,2° C war an der Wasseroberfläche infolge der Wärmeabstrahlung der Decke die Temperatur nur auf 7,3° C angestiegen. Ein Schichtenfärberversuch in diesem Stadium konnte daher einen Einblick dahingehend vermitteln, wieweit die in die beiden Kammern eingebauten Leitwandssysteme unter den früher angegebenen Betriebsbedingungen geeignet sind, die Durchflutung praktisch ohne eine Behinderung durch thermische Schichtungen gleichmäßig zu gestalten und eine gleichmäßige Erneuerung des Behälterinhaltes herbeizuführen.

Jeder der beiden Versuche wurde im einzelnen so durchgeführt, daß 3150 g Uranin, gelöst in 50 l Wasser, mit Hilfe einer Druckpumpe (Installateurprüfpumpe) gleichmäßig in das Zuleitungsrohr hineingepreßt wurden, und zwar innerhalb jener Zeit (72 Minuten), in der 1000 m³ Wasser durch dieses Rohr in die Kammer fließen. Die Zugabe erfolgte unmittelbar hinter einem Schieber, wo die gesteigerte Turbulenz schon im Zuflußrohr eine gleichmäßige Einmischung gewährleistet. Der Versuch dauerte 15 Tage. Während dieses Zeitraumes wurden, zeitlich und örtlich gleichmäßig verteilt, aus jeder der beiden Kammern 880 Proben aus drei verschiedenen Tiefen gezogen, und zwar je ein Drittel aus einer Tiefe von 0,5, 4,0 und 7,9 m.

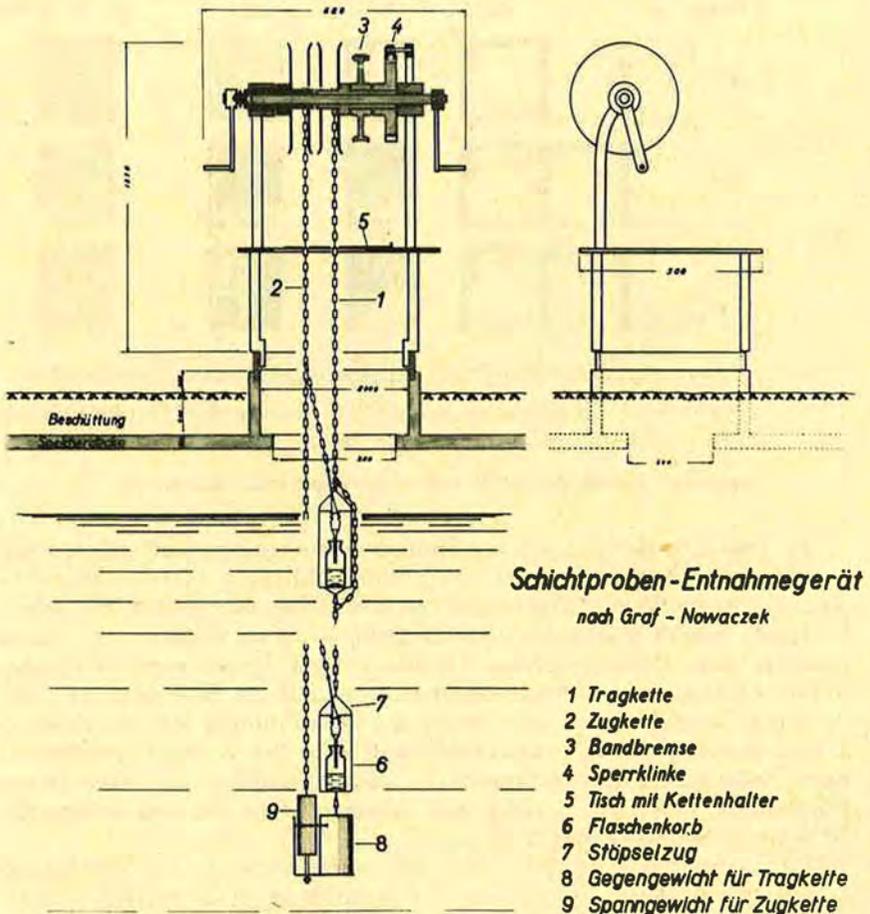


Abb. 2: Schichtproben-Entnahmegesät.

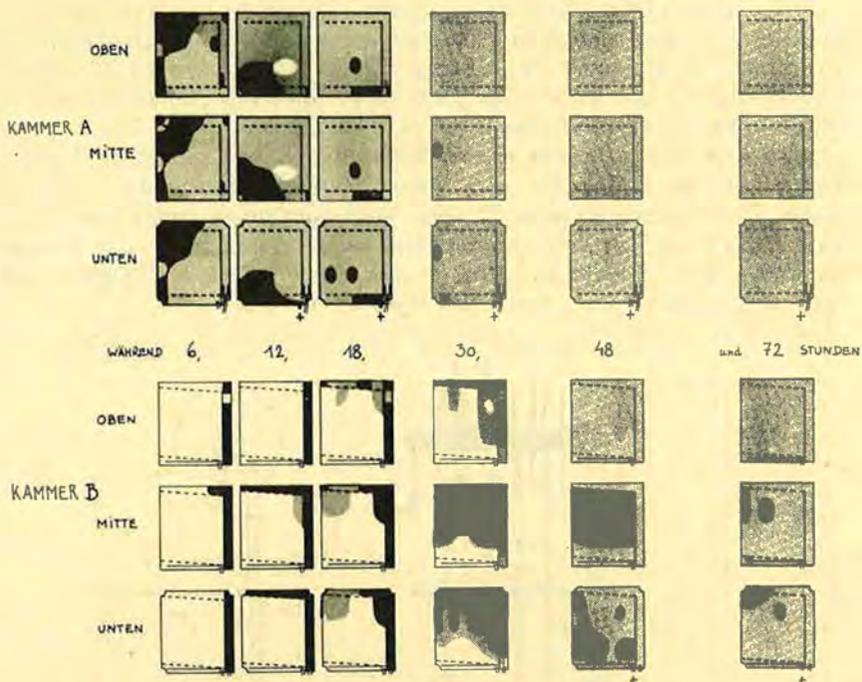


Abb. 3: Horizontale Ausbreitung des zufließenden Wassers in den Kammern;
 grau: Uraningehalt $0,1 \text{ mg/m}^3$ (= Grenze der Empfindlichkeit
 des Nachweisverfahrens) bis 25 mg/m^3 ,
 schwarz: Uraningehalt 26 mg/m^3 bis maximal 1000 mg/m^3 .

In Abb. 3, in der je nach der Tiefe der Probenahmen zwischen einer oberen, einer mittleren und einer unteren Schichte unterschieden wird, sind die wesentlichen Ergebnisse des Versuches dargestellt, die schon im Laufe von 72 Stunden auftraten. Dabei wird im Sinne einer groben quantitativen Differenzierung zwischen zwei Uraninkonzentrationen unterschieden, um nicht nur einen Hinweis auf die Richtung der Ausbreitung, sondern auch den Grad der Verdünnung des markierten Zufluß-Anteiles in den verschiedenen Tiefen des Kammerinhaltes zu vermitteln. Schon diese schematische und außerordentlich vereinfachte Darstellung läßt den Umfang der Aussage eines solchen Schichtenfärberversuches hinreichend erkennen.

Das zweite Beispiel betrifft einen Versuch zur Ermittlung der Zuströmverhältnisse im engeren Bereich eines 19 m tiefen Horizontalfilterbrunnens, dessen 12 radiär angeordneten Filterrohre zum Teil über 30 m lang sind. Im besonderen sollte der Versuch zeigen, ob

tatsächlich dieser Brunnen bei einer bestimmten Förderleistung nur Grundwasser aus größeren Tiefen fördert oder ob und in welchem Ausmaß aus geringerer Entfernung auch oberflächliche und daher möglicherweise noch ungenügend gefilterte Grundwasserschichten mitangesaugt werden können.

Für diesen Versuch wurden sogenannte Schichtensonden (F. DOSCH) niedergebracht (Abb. 4). Sie bestehen im Gegensatz zu den üblichen einfachen Beobachtungssonden (Abb. 5) aus mehreren verschiedenen langen Sondenrohren, die in unterschiedlicher Tiefe gelocht sind und wie Orgelpfeifen beieinander stehen. Da jedes dieser Sondenrohre nur aus einer bestimmten Tiefe (genauer: Schichte) Grundwasser auf-

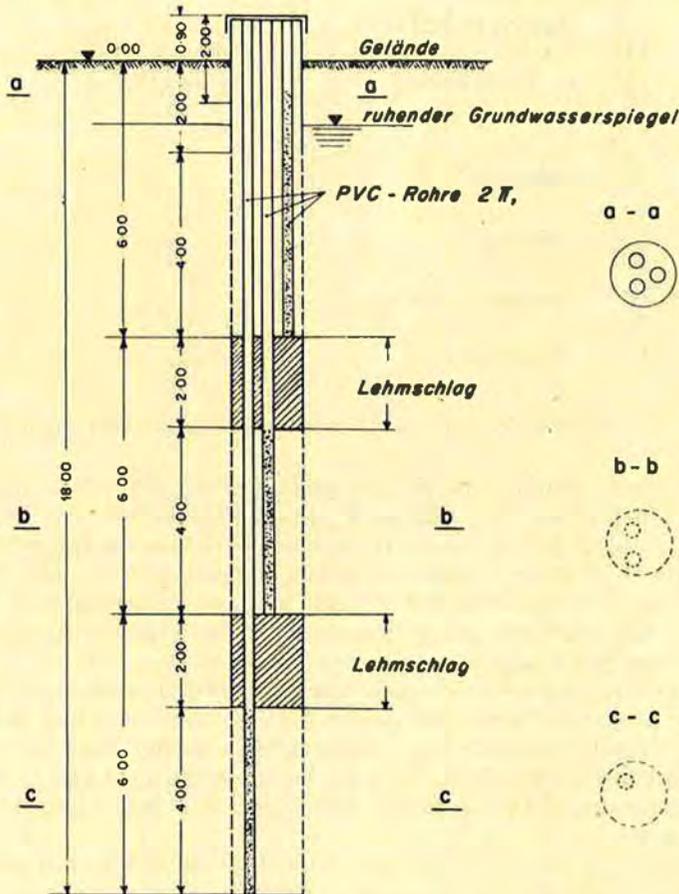


Abb. 4: Dreischichtensonde (nach F. DOSCH) für Grundwassermarkierungsversuche.

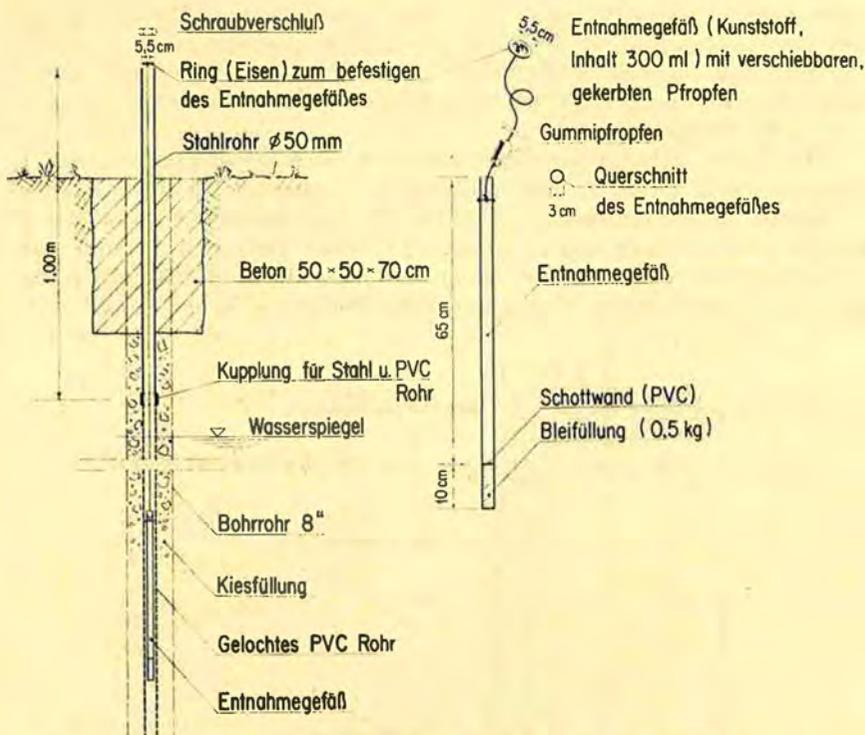


Abb. 5: Grundwassersonde aus Stahlrohr und gelochtem PVC-Rohr.

nehmen kann, können daraus gezogene Proben als solche aus eben dieser Schichte des Grundwassers gelten. Sowohl bei den einfachen Sonden als auch bei den Schichtsonden bestehen die Rohre, so weit sie in das Grundwasser eintauchen, aus Kunststoff (PVC), um Störungen bei der Untersuchung der Proben infolge Rostbeimengung auszuschalten. Lediglich der obere und über Niveau ragende Abschnitt ist aus Gründen der Festigkeit verzinktes Eisenrohr.

Für den vorliegenden Versuch wurden Schichtsonden mit 3 Rohren, also Dreischichtsonden, benutzt, bei denen das kurze Rohr nur in einer Grundwassertiefe von 2 bis 6 Metern gelocht war, das mittlere nur zwischen 8 bis 12 Metern und das lange zwischen 14 und 18 Metern. Pro Beobachtungspunkt konnten daher jeweils 3 Schichtenproben gezogen werden.

Bezüglich der Herstellung von Schichtsonden sei noch erwähnt, daß vorerst ein Bohrrohr niedergebracht wird, in das dann die eigentlichen Sondenrohre eingebaut werden. Dabei wird über die Höhe eines perforierten Sondenabschnittes der Hohlraum im Bohrrohr mit Kies,

ansonsten mit Lehm ausgefüllt. Dadurch werden die einzelnen Kontrollschichten gegeneinander isoliert, und es ist ein vertikaler Austausch des Grundwassers entlang der Sondenrohre ausgeschlossen. Mit fortschreitendem Einbau derselben wird das Bohrrohr gezogen.

Für den Versuch wurden 3 kg Uranin, gelöst in 50 l Wasser, in eine einfache Sonde eingebracht, die sich genau grundwasserstromaufwärts in einer Entfernung von 110 m vom Brunnen befand. Diese Einspeisesonde tauchte nur 4 m tief in das Grundwasser ein und war über diese Länge gelocht. Sonach wurde praktisch nur die 4 m mächtige oberflächliche Grundwasserschicht markiert.

Einer Lageskizze (Abb. 6) ist die Verteilung der Beobachtungssonden im Gelände wie folgt zu entnehmen: Zwischen der Einspeisesonde und dem Brunnen befinden sich zwei Dreischichtensonden, und um den Brunnen herum eine Anzahl einfacher Sonden, die zur Ergänzung der Ergebnisse in den Versuch miteinbezogen wurden.

Für die Probenahmen aus den einfachen Sonden sowie den Dreischichtensonden wurden röhrenförmige, durch eine Blei-Einlage beschwerte Plastikgefäße (Abb. 5) benutzt, von denen in jedes der Sondenrohre eines eingehängt wurde und über Versuchsdauer darin verblieb. Die Öffnungen der Gefäße waren durch einen unterschiedlich tief eingekerbten Stöpsel so weit verengt, daß sich die Füllung nicht in den oberen Schichten schon vollzog, sondern allmählich im Laufe des Absinkens. Auf diese Weise wurden aus diesen Sonden in vertikaler Richtung sozusagen Durchschnittsproben gezogen. Auch bei den Gefäßen in den mittleren und langen Röhren der Dreischichtensonden erwies sich eine solche Drosselung als zweckmäßig, weil ansonsten die Proben in ihrer Zusammensetzung wegen Zumischung stagnierenden Wassers nicht ganz der aktuellen Zusammensetzung des Grundwassers entsprechen.

Im Laufe von 6 Monaten nach der Markierung des Grundwassers wurden aus den Dreischichtensonden und allen anderen Sonden sowie aus dem vom Brunnen geförderten Wasser (320 l/sec) insgesamt etwa 5000 Proben entnommen und in der üblichen Weise luminiszenzoptisch auf ihren Uraningehalt geprüft, wobei durch Anreicherungsverfahren eine Konzentration von 10^{-11} noch erfaßbar war.

Die wesentlichen Befunde in den charakteristischen Stadien des Versuches sind einer Reihe von Darstellungen in einem schematischen Längsschnitt des Versuchsfeldes zu entnehmen. In diesen Schnitt fallen die Einspeisesonde, zwei Dreischichtensonden, eine von den zahlreichen im Brunnenbereich vorhandenen einfachen Sonden und der Vertikal-schacht des Brunnens sowie zwei von den 12 Filterrohren desselben. Die Längen sind im Schema auf ein Fünftel der Höhen reduziert. Die Befunde sind in der Weise angegeben, daß die Uraninkonzentrationen in mg/l für die betreffenden Versuchstage dem Punkt ihres Nachweises entsprechend in das Schema eingetragen wurden.

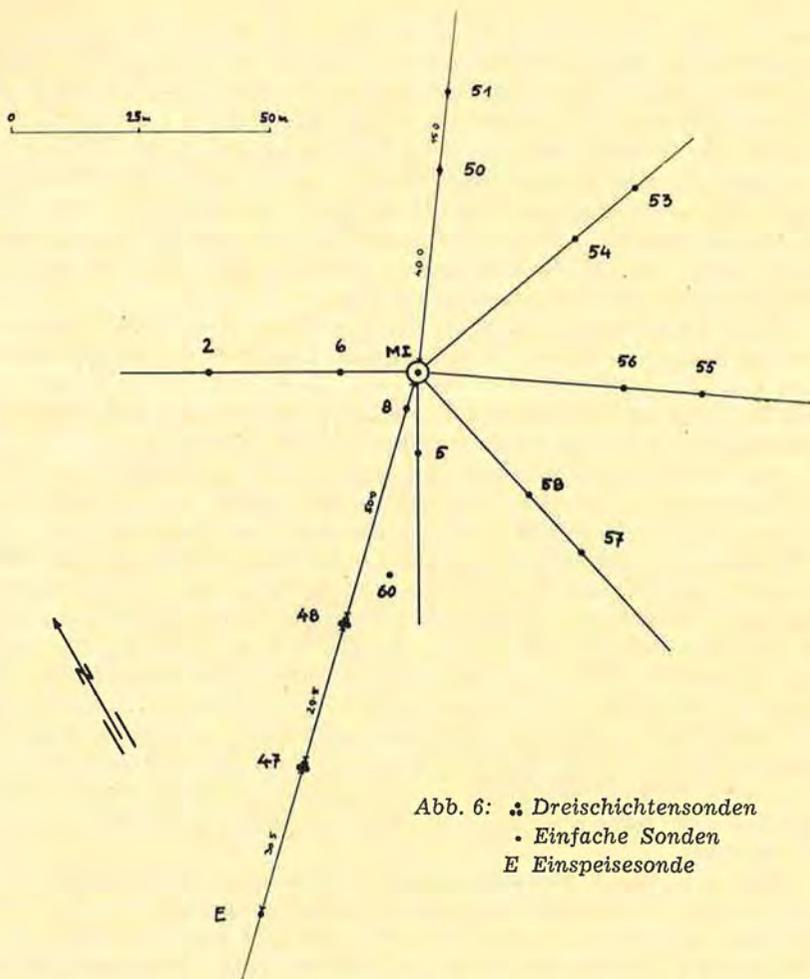


Abb. 6: \bullet Dreischichtensonden
 • Einfache Sonden
 E Einspeisesonde

Bereits am 2. Versuchstag (Abb. 7 a) war das markierte Grundwasser in den mittellangen Rohren beider und außerdem im langen Rohr der dem Brunnen näherliegenden Dreischichtensonde nachweisbar. Daraus folgt, daß zumindest ab einer Entfernung von 110 m grundwasserstromaufwärts vom Brunnen Anteile des oberflächlich anstehenden Grundwassers unter der Einwirkung des Soges der Entnahme aus ihrer ursprünglichen Fließrichtung schräg nach abwärts abgelenkt wurden und mit erheblicher Geschwindigkeit bis in eine Tiefe von 8—12 und sogar 14—18 m vordrangen. Schon am 4. Versuchstag war Uranin im Brunnenwasser nachweisbar, obwohl in Anbetracht der Förderung aus 12 Filterrohren eine etwa zehnfache Verdünnung erfolgte.

Im Gegensatz zu den Anteilen des markierten Grundwassers, die in die zweite und dritte Entnahmeschicht vordrangen, sind die weiterhin oberflächlich fließenden Anteile nur sehr langsam in der Richtung zum Brunnen vorgerückt (Abb. 7 b) und kamen über den 4 m im Durchmesser haltenden Vertikalschacht kaum hinaus, da weder in einer der seitlich oder stromabwärts von demselben befindlichen Sonden Uraninspuren nachweisbar waren.

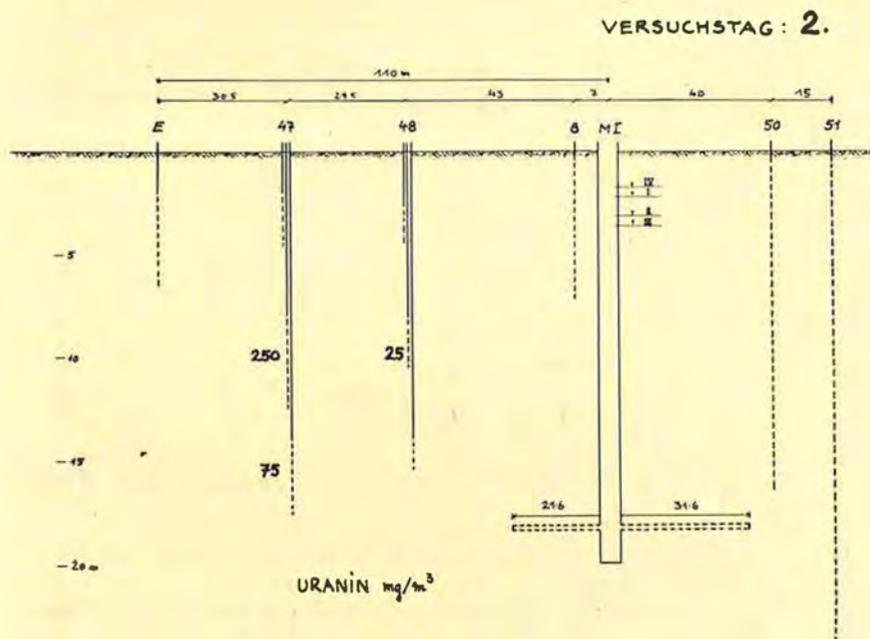


Abb. 7a.

Bis zum 50. Versuchstag trat insofern eine Umkehr im Vergleich zum Versuchsbeginn ein, als nunmehr die höheren Konzentrationen in der oberen Grundwasserschicht bestanden und auf den schräg nach abwärts führenden Fließwegen nur mehr Spuren nachweisbar waren, nachdem bereits etwa 70% des eingebrachten Farbstoffes mit dem Brunnenwasser aus dem Versuchsfeld herausbefördert worden waren.

Bis zum 100. Versuchstag (Abb. 7 c) trat keine wesentliche Änderung ein. Es war aber zu sehen, daß das am Brunnenschacht bzw. am verdichteten Bodenmaterial anstehende markierte Grundwasser allmählich, jedoch über annähernd senkrechte Bahnen, ebenfalls in den Brunnen eingesaugt wurde.

Nach 180 Tagen waren auch oberflächlich nur mehr niedrige Uraninkonzentrationen nachweisbar.

VERSUCHSTAG : 20.

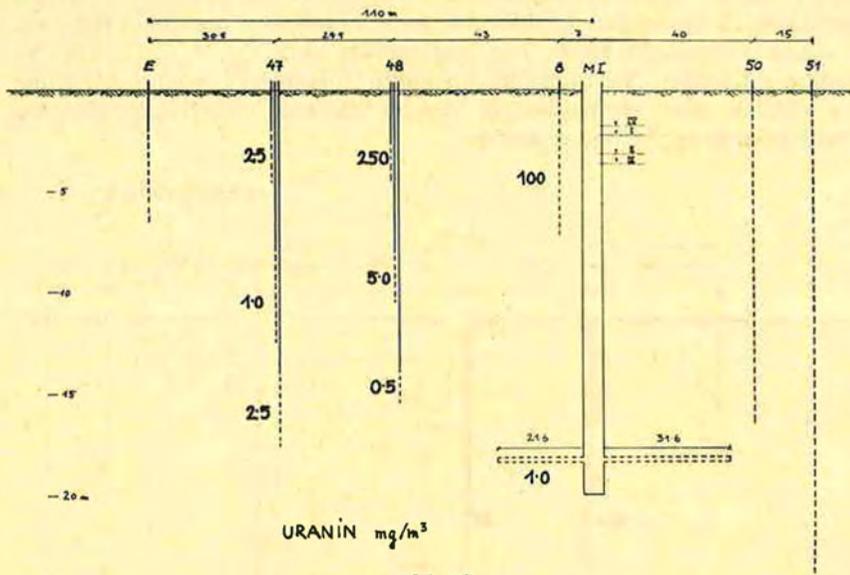


Abb. 7b.

VERSUCHSTAG : 100.

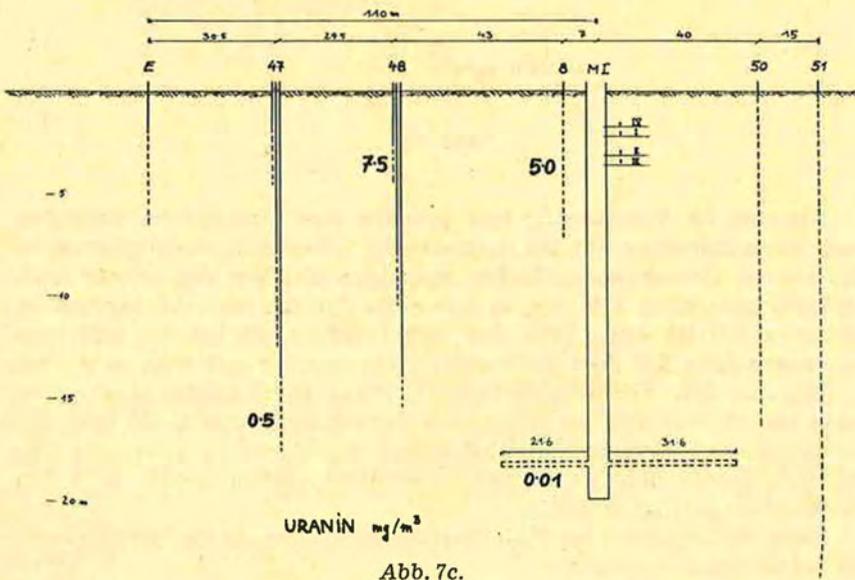


Abb. 7c.

In Abb. 8 sind an Stelle der Uraninkonzentrationen die Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers ab der Einspeisesonde bis zu den verschiedenen Beobachtungssonden angegeben. Die Differenzierung in eine maximale, mittlere und minimale ergibt sich jeweils aus der Entfernung und der Dauer bis zum ersten positiven Uraninbefund, dem Eintreffen der beobachteten höchsten Konzentration¹ und der Dauer bis zum letzten positiven Befund daselbst.

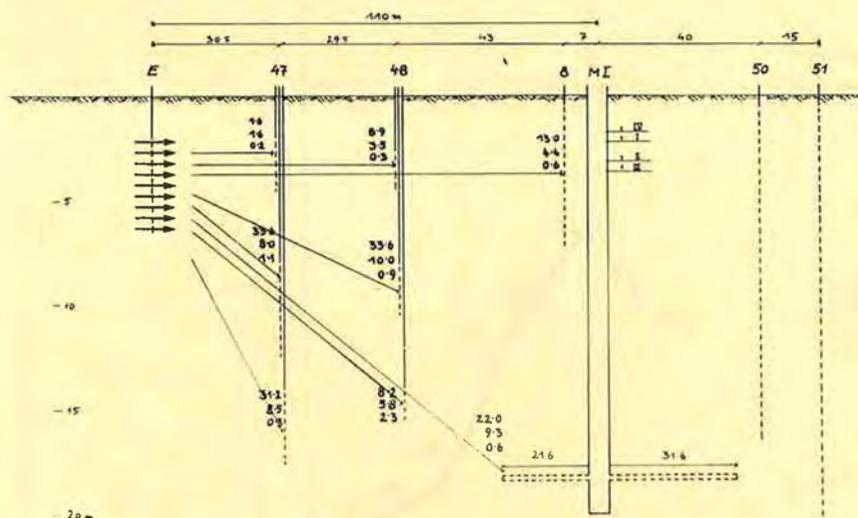


Abb. 8: Maximale, mittlere und minimale Grundwasser-Fließgeschwindigkeiten in m/d.

Ein Überblick der Darstellung zeigt, daß sich jene Anteile des markierten Grundwassers mit der höchsten Geschwindigkeit fortbewegt haben, die auf kürzestem Wege in den Brunnen eingesaugt wurden. Daß diese Anteile auch quantitativ die größeren waren, ist aus den Änderungen der Uraninkonzentrationen im gefördertem Wasser zu schließen.

Um den Ablauf der Uraninausscheidung zu veranschaulichen, wurden in einem Koordinatensystem mit logarithmisch geteilten Achsen

¹ Da nur beim Brunnen die Dauer des Durchganges von 50% des Uranins bestimmt werden konnte, nicht aber des Durchganges von 50% der Anteile desselben bei den verschiedenen Sonden, wurden die Zeiten bis zum Auftreten der höchsten Konzentrationen zur Errechnung der mittleren Zuflußgeschwindigkeiten herangezogen. Aus diesem Grund liegen die Werte an der oberen Grenze.

(Abb. 9) einerseits die Versuchstage und andererseits die Farbstoffmengen in Prozent der eingebrachten Uraninmenge eingetragen, die bis zu den betreffenden Versuchstagen gemäß den Ergebnissen fortlaufender quantitativer Bestimmungen bei der konstanten Fördermenge von 320 l/sec im Pumpgut enthalten waren.

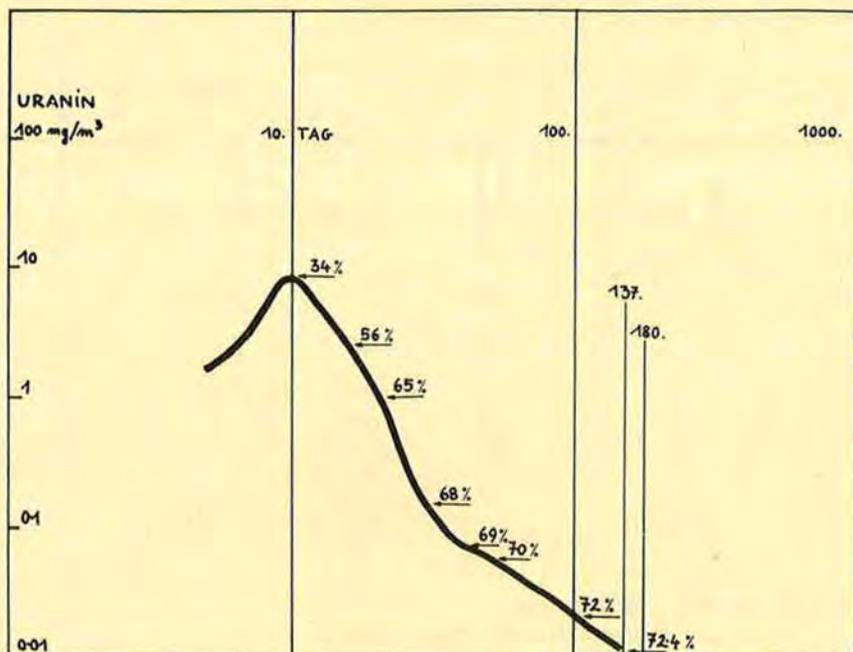


Abb. 9: Uraningehalt (mg/m^3) des geförderten Wassers und Ablauf der Uraninausscheidung (Prozent der eingebrachten Menge bis zu den einzelnen Versuchstagen).

Der Verlauf der Ganglinie zeigt, daß tatsächlich im frühen Stadium des Versuches, als nur über die schräg in die Tiefe führenden Fließwege das markierte Wasser eingesaugt wurde, der Farbstoffgehalt im Brunnen weitaus größer war als später, nachdem sich der Zugang aus dieser Richtung erschöpft hatte und die langsamere ankommenden oberflächlichen Schichten allmählich abgebaut wurden.

Dieses zweite Beispiel eines Schichtenfärbeversuches zeigt die Möglichkeiten auf, die sich in experimenteller Hinsicht aus der Anwendung von Schichtensonden in Verbindung mit einer großen Zahl von quantitativen Uraninbestimmungen bei Untersuchungen im Grundwasser ergeben.

Als drittes Beispiel sei ein Schichtenmarkierungsversuch angeführt, der aus bestimmten Gründen zeigen sollte, ob das Grundwasser den etwa quer zu seiner Fließrichtung verlaufenden Donau-Oder-Kanal unterströmt oder, ob zumindest die oberflächlichen Schichten denselben den Kanal durchqueren.

Das Becken II des Kanals, bei dem der Versuch stattfand, ist bis 130 m breit.

Einer Skizze (Abb. 10) ist die Anordnung der Versuchssonden zu entnehmen: am Westufer die Einspeisesonde FE, gelocht über die gesamte Höhe des Grundwasserkörpers, d. i. ab 6,30—19,30 m unter Niveau. Als Beobachtungssonden acht Dreischichtensonden; zwei davon

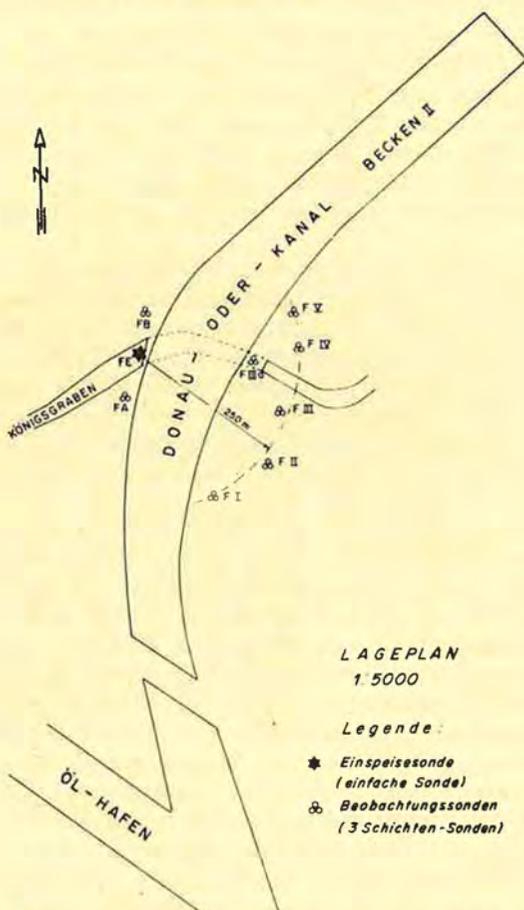


Abb. 10: Grundwassermarkierung zum Nachweis einer Unterströmung des Donau-Oder-Kanals (1964): Situationskizze.

im Abstand von je 75 m von der Einspeisesonde noch am Westufer und sechs am Ostufer, von denen fünf auf einem Bogen mit dem Radius von 250 m um den Einspeisepunkt angeordnet sind. Die sechste befindet sich nahe der Uferböschung im Verlauf des durch den Kanalbau unterbrochenen Königsgrabens.

Zur Markierung des Grundwassers wurden 20 kg Lithiumchlorid verwendet, um grundwasserstromabwärts mit Uranin geplante Versuche nicht zu stören. Weil geprüft werden sollte, ob Grundwasser in den Kanal übergeht, wurde der farblosen Lithiumchloridlösung 1 kg Rhodamin sozusagen zur Markierung des Markierungsmittels zugesetzt, um etwaige Austritte lithiumhaltigen Grundwassers unter dem Spiegel des Donau-Oder-Kanals leichter auffinden und nachweisen zu können. In Anbetracht der erheblichen Entfernungen war eine Störung späterer Versuche durch diese geringe Farbstoffmenge nicht zu befürchten.

Zwei Tage nach der Einbringung der Markierungsstoffe bildeten sich tatsächlich vor der Einspeisesonde, die vom Ufer 35 m entfernt war, im Donau-Oder-Kanal in einer Tiefe von etwa 1,5 m an mehreren Stellen gut sichtbare Wolken von rosarot gefärbtem Wasser, die offenkundig aus thermischen Gründen entlang der Böschung in die Tiefe absanken.

Schon am nächsten Tag hatte sich, wie ein Taucher feststellte, über der Sohle des etwa 3 m tiefen Kanales eine rötliche Wasserschicht von unbestimmter Mächtigkeit gebildet, die in einer Breite von etwa 100 m bis fast zur Mitte des Kanales reichte. Als die ersten Farbstoffspuren in demselben sichtbar waren, wurden Wasserproben von diesen Stellen gezogen und darin fluo-reszenzoptisch das Rhodamin und flammenphotometrisch das Lithium quantitativ nachgewiesen, wobei letzteres bis zu einer Verdünnung von $1 \cdot 10^{-8}$ noch mit Sicherheit feststellbar war.

Insgesamt wurden im Laufe von 108 Tagen 1043 Wasserproben aus den acht Dreischichtensonden und aus dem Donau-Oder-Kanal eingeholt und auf ihren Lithiumgehalt geprüft. Die Rhodamin-Untersuchungen ergeben nur für den Donau-Oder-Kanal positive Ergebnisse und waren demgegenüber von sekundärer Bedeutung. Bezüglich der Strömungsvorgänge waren schließlich, vor allem auf Grund der Verwendung von Schichten-Sonden, folgende Angaben möglich:

Bei den damaligen Wasserständen sind Anteile der 3—4 m mächtigen oberflächlichen Schichte des markierten Grundwassers ihrer natürlichen Fließrichtung folgend an verschiedenen Stellen in den Donau-Oder-Kanal ausgetreten und haben sich aus thermischen Gründen vorwiegend in der Tiefe desselben eingeschichtet und ausgebreitet. Im Gegensatz dazu sind andere Anteile dieser oberflächlichen Grundwasserschicht noch vor dem Kanal nach beiden Seiten ausgewichen, zum Teil bis zu den Sonden FA und FB seitlich vorgedrungen und zunehmend vermischt mit nicht markierten Grundwasseranteilen eben-

falls in den Kanal übergegangen. Dies ergibt sich einerseits aus den Ergebnissen der quantitativen Lithiumbestimmungen der Proben aus den beiden Schichtensonden am diesseitigen Ufer des Kanales und andererseits aus den Befunden der Proben aus dem Kanal selbst.

Im Kanal bewegte sich das markierte Wasser wohl in breiter Front, aber infolge der thermischen Stratifikation innerhalb eines der Höhe nach sehr schmalen Querschnitten, daher auch relativ schnell, zum gegenüberliegenden Ufer weiter. Dort trat es wieder in den Untergrund ein und war demnach vorwiegend in den kurzen und mittleren Rohren der sechs am jenseitigen Ufer in einem Bogen angeordneten Dreischichtensonden nachweisbar.

Im Gegensatz zu diesen oberflächlichen Anteilen des markierten Grundwassers rückten die tieferen und tiefen mit der für diesen Bereich zu erwartenden Fließgeschwindigkeit von maximal 10 m pro Tag unter der Kanalsohle hindurch ebenfalls, aber langsamer, zum gegenüberliegenden Ufer vor und waren darnach sozusagen als zweite Welle in den tiefen Bohrungen der Dreischichtensonden nachweisbar.

Aus den Unterschieden in den Lithiumkonzentrationen ist weiter zu schließen, daß im Verlaufe des ehemaligen Königsgrabens geringere Fließwiderstände resp. bevorzugte Fließwege des Grundwassers bestehen.

Ein abschließender Vergleich der drei Beispiele von Schichtfärbere-sp. -markierungsversuchen ergibt, daß wohl bei jedem die Beobachtung in Richtung der drei Dimensionen des Raumes, vor allem aber nach der Tiefe, bestimmend war. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch insofern, als bei dem ersten und zweiten Beispiel (Speicher und Horizontalfilterbrunnen) die durch bestimmte Einflüsse ausgelöste Verteilung des markierten Anteiles von nur einer Schichte, hingegen bei dem dritten (Donau-Oder-Kanal) die Verteilung eines markierten Anteiles von allen Schichten eines Grundwasserstromes innerhalb desselben verfolgt wurde.

Zusammenfassung

Prinzip und Technik von Schichtfärbere- resp. Schichtmarkierungsversuchen zur Ermittlung von Richtung und Geschwindigkeit der Fortbewegung sowie Ausbreitung des markierten Anteiles eines Wassers nicht bloß in horizontalen, sondern auch in vertikalen Richtungen innerhalb desselben werden theoretisch und an Hand von drei Beispielen praktisch erläutert. Das eine derselben zeigt die Strömungsverhältnisse in den Kammern eines gedeckten Trinkwasserbehälters auf, das zweite die Zuströmverhältnisse bei einem Horizontalfilterbrunnen im vertikalen Längsschnitt des Brunnenfeldes entlang der Hauptgrundwasserstromlinie und das dritte den Einfluß eines Wasserbeckens (Bauabschnitt des Donau-Oder-Kanales) auf die Richtung und die Geschwindigkeit des etwa senkrecht darauf anströmenden Grundwassers.

Literatur

- GEILHOFER, F.: Technische und hygienische Probleme und Erfahrungen beim Bau des Großraumspeichers Neusiedl am Steinfeld an der I. Wiener Hochquellenleitung. Gas/Wasser/Wärme, XI, 11, Wien 1957, pp. 267—277.
- DOSCH, F.: Technische und hygienische Probleme und Erfahrungen beim Bau des Großraumspeichers Neusiedl am Steinfeld an der I. Wiener Hochquellenleitung. Gas/Wasser/Wärme, XI, 12, Wien 1957, pp. 287—297.
- DOSCH, F.: Die Änderungen der Keimzahlen des Wassers in gedeckten Trinkwasserspeichern. Wasser und Abwasser, 1961, Verlag Winkler u. Co., Wien, pp. 278—301.

Summary

The term regional dyeing experiments denotes experiments conducted in order to determine the direction and velocity of the movement and flow of a region of water situated at a certain depth and dyed there. The results of such experiments, conducted in adequate order and in suitable hydrological conditions, allow, in contrast to ordinary dyeing experiments, conclusions as to the horizontal and vertical distribution, within the observation area, of the parts of a region of water whose depth and thickness are known.

Experiments of this kind have been conducted by the author in ground-water, surface-water and in the contents of a tank for the storage of drinking-water. Each of these experiments required a technical arrangement that allowed, in a sufficient number of places, for the collection of samples from certain and, if possible, the same depths of the water without mixing it vertically.

The collection of samples from different but, at the several observation stations, identical depths or regions of the water was made possible in the ground-water by using so-called regional sounds, in surface waters by valvedippers, and in drinking-water tanks by a special region-sample collecting device.

More detailed information on the technique of the experiments is included in the report on the results of three regional dyeing experiments, of which one was conducted with uranine in ground-water, the other with a combination of lithiumchloride and rhodamine in ground- and surface-water, and the third, again with uranine, in a drinking-water tank of the capacity of 150.000 m³.

Résumé

On entend par expériences de coloration de couches les expériences effectuées pour trouver la direction, la vitesse de propagation ainsi que le mouvement d'une part de l'eau se trouvant dans une profondeur fixée et colorée sur place. A l'encontre des expériences habituelles de coloration, les résultats de telles expériences permettent une conclusion sur la distribution des parties d'une nappe d'eau dont on connaît la profondeur et la dimension dans le cadre du terrain d'observation, en ligne horizontale et verticale.

L'auteur a effectué de telles expériences dans les eaux d'infiltration et de surface ainsi que sur le contenu de réservoirs de passage destinés à l'emmagasinage d'eau potable.

Chaque fois on s'est servi d'un dispositif technique permettant le prélèvement d'échantillons à des endroits suffisamment nombreux, dans des profondeurs d'eau fixées et en outre toujours invariables, autant que possible sans mélange en direction verticale.

Le prélèvement d'échantillons à des profondeurs différentes, mais toujours identiques, était assuré dans les expériences effectuées dans l'eau d'in-

filtration par l'emploi de sondes appelées sondes de couches; dans les eaux de surface par l'emploi de dispositifs à soupape et dans les expériences effectuées dans les réservoirs d'eau potable par un appareil spécial de prélèvement d'échantillons de couches.

Des explications détaillées concernant la technique des expériences seront incorporées dans l'exposé sur les résultats obtenus à la suite de trois expériences de coloration de couches dont l'une a été effectuée à l'uranine dans l'eau d'infiltration, la deuxième au moyen d'une combinaison de chlorure de Lithium et de Rhodamine dans l'eau d'infiltration et de surface et la troisième à l'uranine dans un réservoir d'eau potable contenant 150.000 m³.

Diskussion

G. KNUTSSON: May I ask you about the kind of soil in the area of your experiments?

F. DOSCH: It is Terrassenschotter.

G. KNUTSSON: What is the magnitude of the hydraulic gradient?

M. BOROWCZYK: 1 : 500.

G. KNUTSSON: Did you recognize some adsorption of the dyes (Uranin)?

F. DOSCH: There is no adsorption in the area where we are working.

M. BOROWCZYK: Wir haben beobachtet, daß in den meisten Löchern Vertikalströmung herrscht. Wie erfolgt die Auswertung auf dem Gelände im Moosboden, wo in den Bohrlöchern, wo Sie, Herr Dozent, gemessen haben, eine große Vertikalströmung zu finden ist, die einmal nach oben, einmal nach unten geht, so daß man in einer Bohrung zwei Richtungen findet?

F. DOSCH: Sonden, die wir für diese Zwecke benützen, sind jeweils nur über eine bestimmte Tiefe perforiert und nehmen nur aus dieser Tiefe Schichten des Grundwassers ab. Innerhalb dieser Schichten sind für uns Vertikalströmungen nicht interessant, denn wir beziehen dann die Werte, die wir bekommen, auf die Grundwassertiefe oder Schichte etwa zwischen 8 und 12 m. Deswegen haben wir drei Sonden nebeneinander stehen, eine, die in großer Tiefe, eine für die mittlere, eine für die höhere Schichte.

H. BENDER: Ich möchte eine Methode erwähnen, die von A. SCHINZEL im Jahre 1950 in der Gegend von Linz angewandt wurde, um festzustellen, ob der Einlauf zu den Horizontalfilterrohren eines Ranney-Brunnens in einer Tiefe von etwa 14 bis 16 m in streng laminarer Strömung erfolgt oder ob die Gefahr besteht, daß durch das Ansaugen des Wassers in die Horizontalfiltervortriebe Turbulenzerscheinungen auftreten, durch die höhere Grundwasserschichten Zutritt in diese Rohre finden. Die Grundwasserstromrichtung war genau bekannt. In etwa 150 m Abstand wurde eine Uraninlösung ganz langsam $\frac{1}{2}$ m unter der Grundwasseroberfläche eingespeist. In der Grundwasserstromrichtung in 60 m Abstand wurde ein 17 m langes Rohr als Schlagrohr bis auf die undurchlässige Schicht vorgetrieben, das in $\frac{1}{2}$ -m-Abständen ringsum geschlitzt war. Ein zweites solches Schlagrohr wurde grundwasserstromabwärts in 50 m Abstand vom Ranney-Brunnen geschlagen.

In diese Schlagrohre wurde ein steifer Gummischlauch eingeführt, dessen unteres Ende mit zwei aufblasbaren Gummimanschetten versehen war, die es gestatteten, in aufgeblasenem Zustand die untere Öffnung nach oben und unten innerhalb des Schlagrohres abzudichten. Dadurch war es möglich, durch Höher- und Tieferstellen des Schlauches aus verschiedenen Tiefen Proben zu entnehmen, ohne befürchten zu müssen, daß sich die einzelnen Grundwasserschichten bei der Probenentnahme vermischten.

Es erwies sich, daß das Uranin in der ersten Sonde vor dem Ranney-Brunnen nur in der obersten Schicht auftrat, womit die laminare Strömung zumindest bis dorthin bewiesen werden konnte. Im Ranney-Brunnen selbst und auch in der Sonde unterhalb des Brunnens konnte der Farbstoff in allen Schichten nachgewiesen werden, es war also zu Turbulenzerscheinungen im Grundwasserbereich trotz schwacher Förderleistung ($\frac{1}{4}$ der normalen Leistung) durch die Tätigkeit des Ranney-Brunnens gekommen.

Mit Hilfe dieser Methode war es möglich, ein klares Bild über die einzelnen Zustromverhältnisse in den verschiedenen Horizonten des Grundwassers zu gewinnen und auf diese Weise das Schutzgebiet unter Berücksichtigung der Grundwasserstromverhältnisse zu bemessen.

Die Methode von F. DOSCH ist zwar einfacher, aber in speziellen Fällen dürfte die Methode von A. SCHINZEL von größerer Aussagekraft sein.