

Ergebnisse bei der Markierung von Tiefenwässern in Erdölfeldern

Von E. DOLAK (Wien)

1. Einleitung

Die Markierung von Tiefenwässern ist schwieriger als von Grundwässern. Die meist gering durchlässigen Porenspeicher absorbieren bei dem Transport über größere Distanz eine Vielzahl von Spurstoffen an den Mineraloberflächen.

E. T. HECH (1954) berichtet, daß zahlreiche Tracer bereits nach wenigen Metern völlig an das Gestein angelagert wurden, so insbesondere Ammoniumchlorid, Borsäure und Fluorescein.

Grundsätzlich sind deshalb, sofern nicht geradezu ideale petrographische Bedingungen vorliegen, sehr spezielle Anforderungen an die Art des Tracers und an die Methodik zu stellen.

Markierungsarbeiten in Tiefen zwischen 500 bis 2000 m mittels Tiefbohrungen dienen naturgemäß in erster Linie den unmittelbaren betrieblichen Problemstellungen der Erdölgewinnung.

Es ergibt sich jedoch aus diesen, in Anbetracht der wirtschaftlichen Bedeutung oft mit großem Aufwand vollzogenen Untersuchungen auch ein Einblick in bemerkenswerte hydrogeologische Problemstellungen.

Weiters ergeben sich Informationen, welche für akute technische Probleme die hierzu unerläßlichen hydrogeologischen Aussagen betreffs des Verhaltens der Tiefenwässer umgrenzen.

Hier sei insbesondere auf die Injektion von radioaktiven Abfällen in 500 bis 1600 m tief liegende Wassersande in den USA und der UdSSR verwiesen. Während feste radioaktive Abfälle wie Laborglas, Papier, Zellstoff, Behälter und Kleidung in Bunkern oder Halden deponiert werden oder Großbohrungen von 7 bis 10 m Tiefe der Aufnahme der mit Zement vermengten hochaktiven Abfälle dienen, müssen große Mengen flüssiger oder suspendierter Abfälle in Tiefbohrungen von 300 m (USA) bis 1600 m (UdSSR) injiziert werden. Bentonit, Zement oder Wasser dienen als Trägermedien.

In den USA und der UdSSR übernehmen Erdölfirmen diese Arbeit. Die Kosten sind bei großen Leistungsreaktoren auf diese Weise geringer als das Stauen der Abfälle in Behältern und das Versenken, etwa in Bergwerken. Exakte hydrogeologische Kenntnisse sind allerdings unerläßlich. Die Injektionsmenge beträgt oft tausende m³.

Den enormen Vorräten der Tiefschichten an Brack- und Salzwasser kommt in ariden Gebieten in kurzer Zukunft praktischer Nutzen zu, um so mehr, als die Entsalzung dieser Wässer kaum mehr vor wirtschaftlichen Schranken steht.

Die Gewinnung thermischer Energie, auch in nichtvulkanischen Gebieten, die Speicherung von Erdgas in Strukturen, die Mineralgewinnung aus Tiefsolen und die Entnahme von Millionen m³ Wasser aus tiefen Schichten lassen es wünschenswert erscheinen, über das hydrogeologische Verhalten dieser Tiefenwässer alle zugänglichen Informationen zu sammeln.

Zur Zeit stehen drei Möglichkeiten des Studiums über das hydrogeologische Verhalten der Tiefenwässer offen:

1. Theoretische, hydrodynamische Ausarbeitungen.
2. Tracerversuche in Erdölsonden.
3. Untersuchungen im Grenzbereich Frischwasser/Mineralwasser, also insbesondere Untersuchungen an Quellen.

Der Punkt 2 kann in Untersuchungen an Einzelsonden sowie in Versuche mit Fernmarkierungen untergeteilt werden.

2. Tracer für Tiefenwässer

2.1. Partikel

In Porenlagerstätten werden Partikel über 10⁻² Mikron auf kürzeste Distanz abgefiltert.

Partikel können auch in den üblichen Kluftgesteinen der Tiefe nur kürzeste Distanzen durchwandern. Ihre Anwendung hat sich als spezielle Maßnahme jedoch dort bewährt, wo durch die Größe verschiedenartiger Körper Rückschlüsse auf die Kluftweite gezogen werden sollten. Aus dem Studium von Sandsperren wird abgeleitet, daß ein Fließen von Suspensionen nur in Klüften über dem 3- bis 5fachen Partikeldurchmesser möglich ist.

Holzkohlenstaub mit fixierten Tracern, staubartig zermahlene und mit Isotopen aufgeladene Ionenaustauscherharze haben sich bei Arbeiten in Bohrungen des Wiener Beckens bewährt.

Die gelegentliche Anwendung der Bakterie *Serratia indica* als Tracer ist bekannt (I. G. ORMEROD, 1964).

Die Anwendung in Tiefenwässern von Bakterien als Tracer scheidet insoweit aus, als über deren Ausbreitung im Gestein widersprechende Aussagen, teilweise Berichte über rapide Verbreitung vorliegen.

2.2. Farbe und Chemikalien

Die Anwendung von Uranin kann bei dem petrographischen Charakter der Porenspeicher des Wiener Beckens unter 1000 m Teufe nur über kürzeste Distanz, d. h. über wenige Meter, Erfolg versprechen.

Im Labor für chemische Sondenbehandlung der ÖMV-AG wurden entsprechende Versuche mehrmals durchgeführt.

Durch eine mit losem Sand aus dem 8. T. H. MATZEN gefüllte Kolonne von 1,5 m Länge und einem Querschnitt von 2,5 cm ließ man Mischwasser (Wasser aus dem 16. T. H. MATZEN und aus dem 8. T. H. MATZEN 1 : 1) mit 0,05 g Uranin pro l durchfließen. Die Konzentration war deshalb so gering gewählt worden, weil dabei an kontinuierliche Zugabe des Indikators gedacht war und man die Kosten so niedrig als möglich halten wollte.

Bei einer Fließgeschwindigkeit von etwa 1 cm/Stunde und einer Flutmenge von etwa 3 cm³ Porenvolumen konnte Uranin am Ende der Säule (bei einer unteren Nachweisgrenze von 7 γ /l) nicht mehr festgestellt werden.

Die Grenzflächenspannung Wasser—Öl zeigt bei Uraninzusatz zu Flutwasser kein eindeutiges Verhalten.

Reines Flutwasser/Öl	16,6 dyn/cm
Flutwasser + 2.10 ⁻⁴ ‰ Uranin/Öl	13,2 dyn/cm
Flutwasser + 5.10 ⁻⁴ ‰ Uranin/Öl	17,4 dyn/cm
Flutwasser + 10.10 ⁻⁴ ‰ Uranin/Öl	12,8 dyn/cm

Im allgemeinen nimmt die Grenzflächenspannung mit steigender Konzentration eines Netzmittels ab, oder sie bleibt konstant, wenn die Substanz wirkungslos ist. Ein ähnlich sprunghaftes Verhalten wie bei Uranin konnte noch nicht beobachtet werden. Jedenfalls ist aber der Einfluß auf die Grenzflächenspannung überhaupt ein viel zu geringer, um irgendwelche Wirkung in Erdölfeldern erwarten zu können.

So zeigt etwa ein durchschnittliches Netzmittel bei einer ähnlichen Konzentrationsreihe eine Senkung der Grenzflächenspannung von rund 12 dyn/cm auf 2 bis 3 dyn/cm, bei gleicher Wasser- und Ölzusammensetzung.

Es ist bekannt, daß diese Adsorption nicht unter allen petrographischen Bedingungen auftritt (W. KÄSS, 1966) (7), doch ist diese in feinsporigen, tonhaltigen und tiefliegenden Sanden des Wiener Beckens äußerst ausgeprägt.

Bei sehr sorgsamem Untersuchungen bei der Beseitigung radioaktiver Abwässer in 1600 m tiefen Sonden in der UdSSR zeigte sich generell eine sehr starke Adsorption. Die Isotopenfront rückte mit $\frac{1}{1000}$ bis $\frac{1}{100}$ der Fließgeschwindigkeit der Injektionswasser vor.

Die Adsorption von Tracern scheint in Porenspeichern tiefer Lagen eher die Regel als die Ausnahme zu sein.

Rhodamin B wird von R. R. WRIGHT (1963) als nahezu gleich empfindlicher, jedoch für die Fauna des Wassers völlig unschädlicher Spurstoff hervorgehoben.

Phenol wurde sowohl im Grundwasser wie in Tiefenwässern erfolgreich verwendet, wobei Phenol bis 1 : 4 · 10⁸ nachweisbar war. Auch Ammoniumthiocyanat hat sich als kaum adsorbierter Tracer bewährt.

Für Dextrose liegt nach W. PASSLER (1958) die Nachweisgrenze bei etwa 10 mg/m^3 . Es wird empfohlen, etwa 100 g Dextrose je m^3 zur Injektion zu verwenden. Die Kosten betragen in diesem Falle $0,75 \text{ öS/m}^3$.

Bis zu einer Durchlässigkeit von 20 md wird, wie B. DANIELS und P. C. MAYER (1957) berichten, durch Sande keine Dextrose absorbiert, bei Permeabilitäten unter 20 md nur wenig. Die beiden genannten Autoren berichteten über Versuche an Sanden mit einer spezifischen Oberfläche von ca. $0,12 \text{ m}^2/\text{g}$ und konnten feststellen, daß der Anteil an adsorbierter Dextrose um so größer ist, je geringer die Durchfließgeschwindigkeit des mit Traubenzucker markierten Einpreßwassers ist.

Die Nachweisgrenze für Dextrose wird für die leicht und schnell durchzuführende qualitative Probe nach Molisch mit 10 g pro m^3 Salzwasser und für die quantitative Probe mit 10 mg/m^3 angegeben.

Eine Erdölgesellschaft benützt für die Markierung der Einpreßwässer die sogenannte Hydroablaue, die bei der Herstellung von Traubenzucker als Nebenprodukt anfällt und 42% Dextrose enthält. Eine ähnliche Ablaue könnte eventuell wesentlich billiger erhältlich sein.

2. 3. Radioaktive Tracer

Die Anwendung von Tritium ist hinlänglich bekannt. In den folgenden Abschnitten werden spezielle Ergebnisse an Tiefenwässern beschrieben.

Anderere, kaum absorbierende Spurstoffe findet man unter den EDTA-Verbindungen von $^{114\text{m}}\text{In}$, ^{51}Cr , ^{46}Sc .

Beispielsweise hat der Gammastrahler ^{51}Cr -EDTA die günstige HWZ von 28 Tagen und wird in Bodenformationen kaum adsorbiert.

^{131}J oder ^{82}Br in Äthyl- oder Methylverbindungen unterliegen ebenfalls kaum der Adsorption.

^{60}Co kann als Tracer mit langer Halbwertszeit in Form von $\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6$ weitgehend adsorptionsfrei angewandt werden.

Das Isotop ^{35}S kann noch unter Trinkwasserkonzentrationen gut nachgewiesen werden und zeigt ebenfalls kaum Adsorption. Die HWZ beträgt 87 Tage.

Wo sich Adsorptionsvorgänge nicht störend auswirken, bewährte sich ^{24}Na , ^{140}La , ^{46}Sc .

Als Gastracer finden ^{133}Xe , ^{85}Kr sowie ^{14}CH Verwendung. K. LJUNGBEREN (1964) gibt bezüglich der Anwendung radioaktiver Tracer zahlreiche weitere Hinweise.

Bezüglich der Adsorption von radioaktiven Tracern sind den Berichten über die Beseitigung von Reaktorabfällen weitere Daten zu entnehmen. J. BROWN-CIAEA (1957) berichtet: Ruthenium 103 und Strontium 89 wurden über 60 m Sandstein völlig beseitigt, Cesium 137 bewegte sich mit $1/1000$ der Strömungsgeschwindigkeit von Injektionswasser, Strontium 90 zehnmal schneller.

Neben der Bindung im Gitter der Alumosilikate tritt eine starke Adsorption an der Oberfläche der Bodenkolloide auf. Letztere scheinen neben Schwermetallen wie Cu, Ti, Mn auch Jod und Brom zu sorbieren.

^{109}Ru , ^{99}Tc und ^3H zeigten keine Adsorption. Es konnte dies über 15 Meilen Sandmigration nachgewiesen werden.

Auf die Möglichkeit der Verwendung stabiler Isotope zu Markierungszwecken wurde gelegentlich hingewiesen.

Die Anwendung radioaktiver Tracer in Tiefenwässern beinhaltet bei Fernmarkierungen stets ein gewisses Risiko. Austragung im Schwall oder Austritt an unerwarteten Lokationen haben in der Erdölförderung in den USA in einigen Fällen zu finanziell sehr belastendem Abstellen von Ölsonden geführt.

Tabelle 1 zeigt höchstzulässige Konzentrationen für einzelne Nuklide auf.

Tabelle 1: Höchstzulässige Konzentration einzelner Nuklide (Basic Safety Standards for Radiation Protection, I.A.E.A. 1962, Safety Series No. 9).

Nuklid	Höchstzulässige Konzentration in pC/cm ³	
	im Wasser	in der Luft
^3_1H	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$
$^{14}_6\text{C}$ (CO ₂)	$8 \cdot 10^{-4}$	10^{-7}
$^{35}_{16}\text{S}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-9}$
$^{51}_{24}\text{Cr}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-7}$
$^{133}_{54}\text{Xe}$	-	$3 \cdot 10^{-7}$
$^{46}_{21}\text{Sc}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-8}$
$^{85}_{36}\text{Kr}$	-	$3 \cdot 10^{-7}$
$^{131}_{53}\text{J}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-10}$

2. 4. Aktivierungsanalytisch nachweisbare Tracer

Wie hinlänglich bekannt, sind neben anderen Elementen Dysprosium, Gold, Iridium, Scandium oder Lanthan gut geeignet.

In Zusammenarbeit mit der Österreichischen Studiengesellschaft für Atomenergie wurde eine Neutronen-aktivierungsanalytische spezielle Tracermethode für Gold entwickelt und in der Praxis an etwa 50 Sonden erprobt.

Die Vorversuche wurden an Bohrkernen aus Öllagerstätten des Wiener Beckens ausgeführt (13. u. 16. Torton). Die Kernproben wurden aus Bohrkernen herausgebohrt und mittels Kunstharzes in Aluminium-

patronen eingekittet. Sie hatten eine durchschnittliche Länge von 6,5 cm und einen durchschnittlichen Durchmesser von 2,63 cm. Bei allen fünf Proben wurde zunächst die natürliche Wassersättigung der Schicht wieder eingestellt. Durch die präparierten Kerne wurden mittels Vakuum ungefähr 2 Porenvolumen (2 n) einer Emulsion, bestehend aus 1 g Harz + 5 cm³ abs. Alkohol mit 46 Sc und 100 cm³ Dieselkraftstoff geflutet. Diese Kernstücke wurden in Öl gelegt und ungefähr 24 Stunden einer Temperatur von 60° ausgesetzt. Nach dem Auskühlen erfolgte ein neuerliches Durchfluten der Kernstücke mit Öl und Wasser. Die Abnahme der Radioaktivität wurde hierbei gemessen.

Das für die zweite Flutung verwendete Öl war in allen Fällen eine Mischung von Destillationsprodukten mit einer Viskosität von ungefähr 4,3 cp bei 20° C und einer Dichte von 0,860 g/cm³ bei 20° C. Das verwendete Wasser war immer ein gestelltes Salzwasser (16.100 mg NaCl/l) mit einem pH-Wert, der dem Sondenwasser des 16. Tortons unter Lagerstättenbedingungen annähernd entspricht. Als Harz wurde „Deresit RP 120“ verwendet. Das radioaktive Sc⁴⁶ war als ScBr in abs. Alkohol gelöst.

Die Ergebnisse zeigen, daß mittels Harzsuspension ⁴⁶Sc gut am Gestein haftbar und durch Öl- und Wasserfluten allmählich wieder auschwemmbar ist.

Hierauf wurden die Versuche im analogen Sinne mit Gold wiederholt (AuHCl₄).

Proben des durch das Markierungsdepot strömenden Wassers wurden zur Trockene eingedampft, mit Nitriersäure aufgeschlossen, abermals zur Trockene eingedampft, mit Königswasser aufgenommen, nochmals zur Trockene eingedampft und nach abermaligem Aufnehmen mit verdünnter Salzsäure mit Essigester extrahiert.

Dieser Extrakt wurde nunmehr in Quarzampullen eingefüllt, hierin zur Trockene eingedampft und anschließend aktiviert.

Der Neutronfluß betrug 10¹³ cm²/sec, die Bestrahlungsdauer 6 Stunden, die Abklingdauer 3 Tage.

Nach chemischer Aufbereitung wurde der Niederschlag abgefiltert und die Impulse des charakteristischen Peaks von 0,411 MeV als Zählerintegral bestimmt.

20 g Gold sind mittels dieses Verfahrens in etwa 4,5·10⁶ m³ Wasser nachweisbar.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß bei der Fixierung von Gold als Film die Menge des zugesetzten Harzes das Ausmaß der Krustierung und Austragung steuern wird und selbstverständlich weit variierbar ist.

In der Praxis hat sich ein Gemisch von 3000 l Wasser oder Dieselöl, 5 kg Phenolharz, 20 l Alkohol und 20 g Gold bewährt.

Auf Grund des im Harz vorhandenen überschüssigen Formaldehydes, der großen Verdünnung und des in der Lösung enthaltenen Harzes bleibt das Gold kolloidal in Lösung.

Es scheint ratsam, den Anteil an Harz in feinkörnigen Trägern bis auf $\frac{1}{10}$ zu senken.

Durch Verpumpen von HF kann überdies das Adsorptionsvermögen jedes Sandes sehr wesentlich erhöht werden. 10% HCl + 3% HF können in der Praxis verwendet werden.

2. 5. Die Kosten

Der Aufwand für derartige Arbeiten sei kurz aufgezeigt: Wir bezahlten für 0,1 Curie Tritium öS 300.—, für die Analyse einer Feldprobe (5 Laborwerte) öS 260.—.

Falls 0,1 Ci verwendet werden und 5 Feldproben genommen werden, betragen die Kosten für eine Tritiummarkierung in Tiefbohrungen öS 1600.—.

Aus 33 Markierungsarbeiten mit Gold errechneten sich als Durchschnittswert:

Trägerflüssigkeit	öS 1825,—
(Säure, Öl, Harz, Alkohol)	
AuHCl ₄	öS 1635,—
Aktivier.-Analyse	öS 1700,—
	<u>öS 5160,—</u>

Da im Durchschnitt mehrere (3 bis 8) Aktivierungsanalysen je Markierung ausgeführt wurden, erhöhten sich die Kosten einer Markierung mit Gold auf öS 10.000.—.

Vergleichsweise lagen die Kosten von Isotopenmarkierungen in Tiefbohrungen bei öS 2500,— je Arbeit.

Es ist selbstverständlich, daß alle Markierungen im Rahmen anderweitiger Tätigkeiten an der Sonde eingeblendet wurden, so daß operative Kosten wegfielen.

2. 6. Physikalische Vorarbeiten: Druckwellenanalysen

Es kann in Tiefenschichten in der Regel nicht unterstellt werden, daß ein bestimmtes Intervall, etwa in 2000 m Teufe und 10 m mächtig, mit hinlänglicher Sicherheit der Aussage mit Nachbarsonden hydrodynamisch kommuniziert. Tiefendruckmessungen, Druckaufbaukurven, insbesondere die Erregung von Druckwellen und deren Registrieren, vermögen in Stunden oder einigen Tagen zu entscheiden, unter welchen Prämissen ein Markierungsplan für Tiefenschichten erstellt, wo und etwa wann bemustert werden soll. Die letztere Methode wird sogar oft in der Lage sein, Markierungen, welche lediglich den Nachweis der Kommunikation dienen soll, zu erübrigen.

2. 7. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann betreffs der Eignung der Tracer hervorgehoben werden, daß die günstigen Bedingungen der Grundwassermarkierung in Tiefen unter 500 m in der Regel umgestoßen sind. Neben

Adsorption wirkt sich der Umstand äußerst störend aus, daß über das Auftreten des Tracers meist weitestehende zeitliche Unklarheit besteht.

Insbesondere fällt ins Gewicht, daß der reichliche anorganische und organische Gehalt der Wässer bei den Nachweisreaktionen zu Trugschlüssen führt. „Dextrose“ bei extremer Verfeinerung der Nachweismethodik plötzlich überall zu finden ist ein diesbezüglicher Fall der Praxis.

In Tiefenwässern ergaben sich auch bei Tritiumanalysen gewisse Unklarheiten. Obwohl diese Wässer in Anbetracht ihres geologischen Alters niemals Tritium enthalten konnten, ergab sich bei den Kontrollproben aus nicht markierten Sonden („Leerwerte“) in manchen Schichten eine, durch mehrfache Rückfragen und Kontrollen bestätigte Aktivität dieser Wässer bis ca. $40 \cdot 10^{-11} \text{Ci}$.

3. Problemstellungen und Methodik

3.1. Vertikale Kommunikation

Fig. 1 zeigt den Förderverlauf der Sonde Ma 331. Es ist ersichtlich, daß trotz mehrerer Wasserisolationen stets neue Einbrüche von Salzwasser die Ölförderung der Sonde beeinträchtigen.

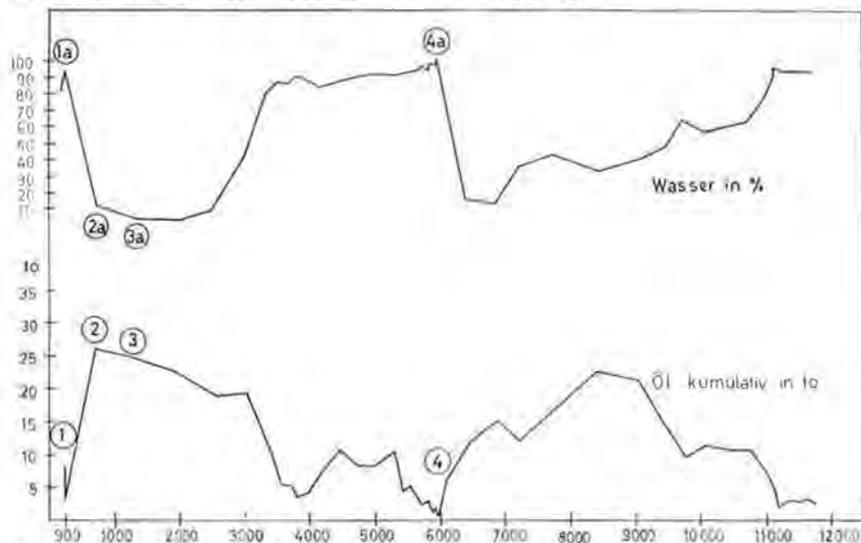


Fig. 1: Förderverlauf der Sonde Ma 331, 16. Torton — Horizont
 1 Erstperforation, 7. 5. 59, 1692—1698 m, Salzwasser
 2 2. Perforation, 15. 7. 59, 1692—1696,5 m, SW, 99—100%
 3 3. Perforation, 10. 8. 59, 1692—1696,5 m, 0,4% H₂O, 25 Tato
 4 4. Perforation, 5. 3. 62, 1680—1685 m, 14% H₂O, 11 Tato
 1a 1. Isolation, 26. 5. 59, 700 l Zement/20 atü, 31% H₂O, 24 Tato
 2a 2. Isolation, 10. 7. 59, 500 l Zement/150 atü
 3a 3. Isolation, 5. 8. 59, 800 l Zement/240 atü
 4a 4. Isolation, 1. 3. 62, 800 l Zement/85 atü

In Anbetracht der technisch ausgereiften Isolationstechnik, insbesondere jedoch von Behandlungsverfahren, die in die Matrix selbst eingreifen (Haftzemente oder flüssige Harze), müßte ein wesentlicher Störungsfaktor abseits der mit genannten Verfahren sperrbaren Wege liegen. Allgemein war bei 80% gleichartiger Fehlresultate keinerlei ersichtliches technisches Gebrechen nachweisbar.

Es schien deshalb berechtigt, einen nicht unbeträchtlichen Anteil der unbehebbarer Störungsfaktoren in der Formation zuzuschreiben, die in der Literatur noch nicht erwähnt wurden. Die Annahme einer vertikalen Wassermigration durch Ton und Mergel galt als unglaublich. Unter dieser Perspektive wurden Markierungsarbeiten zur Klärung der Ursache solcher Wassereinträge im Jahre 1962 begonnen.

Bei Verschluß einer verwässerten Förderstrecke mittels Zementation und späterer Neuperforation eines etwas höher gelegenen Intervalles wurden 1 bis 3 m³ Salzwasser mit 1 kg Uranin pro m³ unmittelbar vor der Druckzementation in die zu verschließende Perforation eingepreßt. Es zeigte sich, daß durch diese Methode unmittelbar nach Produktionsbeginn auftretende Verwässerungen aus dem Liegenden erkenntlich sind.

In das neu erschlossene Intervall wider Erwarten horizontbedingt verwässert, strömt farbloses Wasser zu.

Von 10 mit derart minimalem Aufwand durchgeführten Feldversuchen lieferten 8 eindeutige Aussagen. Bei 5 Arbeiten wurde aufgezeigt, daß die unerwartete neuerliche Verwässerung keinesfalls technisch, sondern horizontbedingt erfolgt.

Ferner wurden Versuche unternommen, durch Uraninmarkierung in der Zementbrühe der Ringraumfüllung technische Wassereinträge durch Uraningehalt im austretenden Sondenwasser zu erkennen. Bei 7 Tiefenbohrungen wurden Uraninmarkierungen mit 2 g/l im Zementmischwasser durchgeführt.

Bei allen diesen Sonden wurde die Swabbflüssigkeit (Salzwassergehalt 18 bis 70%) auf Uranin geprüft. Bei 4 Sonden konnte kein Uranin nachgewiesen werden.

Bei 2 Sonden enthielten Swabbproben Uranin, das zu Beginn einer kontinuierlichen Förderung nicht mehr nachgewiesen werden konnte.

Nur eine Sonde (Ma 367) wies bei Wassereintruch kurzfristig Uranspuren im Fördergut auf.

Diese Aussagen waren von erdöltechnischem, kaum aber von hydrogeologischem Interesse.

Bemerkenswert blieb, daß eine unerwartet hohe Zahl von Sonden eine technisch perfekte Zementisolation aufwies und dennoch Wasser erbrachte, wie die Tabelle 2 aufzeigt.

Es bestand damals jedoch noch keine Möglichkeit, Tage oder Wochen nach dem Setzen des Zementstoppels sich vollziehende Wassereinträge bezüglich ihrer Herkunft zu untersuchen. Überdies bestanden, wie sich später zeigte, zu Recht Zweifel an der Exaktheit dieser Methode der

Uraninmarkierung. Es wurde deshalb die Aktivierungsanalyse mittels Gold als Markierungsverfahren entwickelt.

Während Farbttracer wie Fluorescein oder Rhodamin, wie diese fallweise für Markierungsarbeiten in Tiefbohrungen verwendet werden, nach Verdrängen aus dem Porenraum durch 2 n bis 3 n nicht mehr nachweisbar sind, ergab sich auf Grund dieser Versuche, daß mit Phenolformaldehydharz fixiertes Gold mit großer Wahrscheinlichkeit noch nach längerer Förderdauer nachweisbar sein würde und daß die Bindung an die Formation ausreichen müsse, um ein sofortiges Abwandern des Tracers mit dem strömenden Grundwasser zu unterbinden.

Überdies war offensichtlich, daß Adsorption und Ablösung durch Variationen der Harzbeschaffenheit, des Lösungsmittels, der Mischungsverhältnisse sowie Art und Menge des Suspensionsmediums steuerbar sein müßten.

Tabelle 2: Uraninmarkierungen bei Perforationshebungen

Nr.	Sonde	Uranin kg	Perforation		Aus- sage	vertik. Wasser
			alte	neue		
1	Ma F 20	1,00	1239 —1242 1244,5—1245,5	1237,8—1240,8	?	?
2	Ma 33	1,00	1250 —1252	1244 —1246		
3	Ma 33	1,00	1244 —1246	1237 —1240	+	nein
4	Schö 2	1,00	1266 —1269	1260 —1263	+	ja
5	Pro 68	1,00	1556 —1558	1550 —1551,5	+	ja
6	Schö 206	0,25	1249 —1253	1242 —1244	+	nein
7	Schö 306	0,25	1213,5—1215,5	1208 —1211,5	?	?
8	Schö 177	2,00	1281 —1283	1276 —1278	+	nein
9	Schö 194	2,00	1254 —1258	1246 —1250	+	nein
10	Mü 103	1,00	1478 —1480	1452 —1453	+	nein

Die bereits vorliegenden Laborergebnisse erschienen genügend ermutigend, um unverzüglich mit einigen Großversuchen in Fördersonden zu beginnen und eventuell erforderliche Variationen der oben genannten Faktoren einstweilen zurückzustellen.

Feldmäßige Durchführung

Im Rahmen der zum Verschluß des verwässerten Förderbereiches erforderlichen Sondenreparatur wurde neben den üblichen Geräten, wie Seilwinde, Zementmischer und Pumpen, ein Stahlbehälter für 3000 Liter Dieselkraftstoff bereitgestellt.

Die in den Labors der Österr. Studiengesellschaft für Atomenergie bereitete Suspension von 5 kg Phenolharz, 25 Litern Äthylalkohol und 20 Gramm Gold wurde in Korbflaschen an die Sonde gebracht.

Unter hochtourigem Umzirkulieren des Dieselöls (Ansaugen, Pumdurchlauf, Einspritzen in den Tank) wurde die oben beschriebene Suspension langsam in das Dieselöl eingeschüttet.

Um einerseits die Durchmischung des Goldes mit dem Dieselöl zu kontrollieren und andererseits ein allfälliges Abfließen der Mischung an Kanälen im Zement oder an undichten Rohrverbindungen festzustellen, hat sich die Zugabe geringer Mengen eines kurzlebigen Radionuklides, etwa von 5 mC ^{140}La , in der Praxis bewährt.

Sobald alle Vorbereitungen zur Zementation des verwässerten Bereiches getroffen sind, wird das markierte Dieselöl verpumpt, ein Wasserpuffer von ca. 1000 l nachgepumpt und unmittelbar anschließend die Zementschlämme in die Sonde eingepreßt.

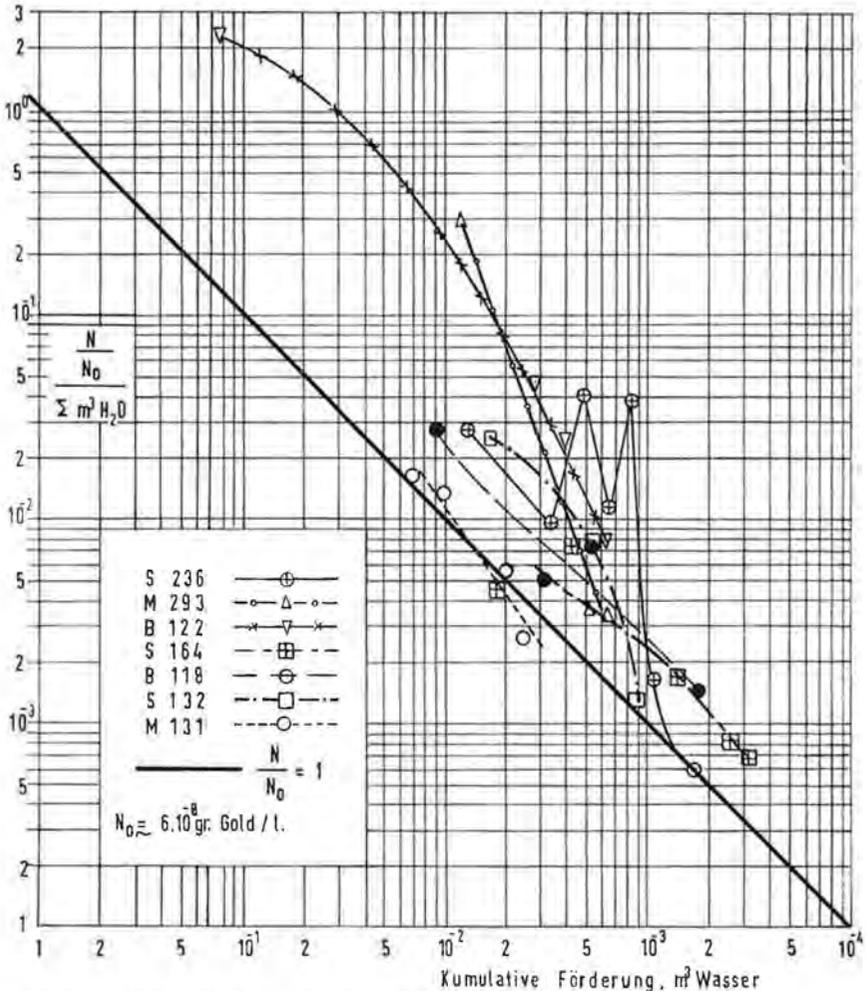


Fig. 2: Nachweis des Goldtracers in Tiefenwässern, nach Depotbildung.

Nach Perforation eines höheren Sandes werden im Falle eines neuerlichen Wassereinbruches Proben entnommen und der Aktivierungsanalyse zugeführt.

Es wurden, um eventuelle sondennahe Undichtigkeiten zu erkennen, überdies stets zusätzlich radioaktive markierte Kunstharzsuspensionen mitinjiziert.

Ergebnisse

Fig. 2 zeigt den Goldgehalt der bei neuerlichen Wassereinbrüchen genommenen Wasserproben. In Fig. 2 wurden ausnahmslos Sonden aufgenommen, deren technischer Zustand mittels aller Überprüfungen als einwandfrei ermittelt wurde.

Die in Fig. 2 graphisch ausgewiesenen Daten lassen erkennen, daß das gesetzte Golddepot und damit das Wasser über Ton und Mergelbänke kommunizierte.

Fig. 3 zeigt Kluftscharen im Aufschluß einer Sandgrube bei Eisenstadt. Es ist anzunehmen, daß ein auch nur annähernd ähnlich ausgebildeter Gesteinskomplex bei geringster hydrodynamischer oder mechanischer Belastung zur Reaktivierung seiner Kluftscharen neigen dürfte.

Durch die zuletzt beschriebene Tracertechnik konnten geringst dimensionierte, jedoch hydrodynamisch potente, vertikale Verbindungswege zweifelsfrei nachgewiesen werden.

3. 2. Laterale Wasserbewegung

Den Methoden zur Untersuchung der Bewegung von Tiefenwässern in einer durch Ton oder Mergel begrenzten Schicht kommt in der Erdölgewinnung zumeist im Rahmen von sekundären Entölungsverfahren, dem sogenannten Wasserfluten, Bedeutung zu.

Wiederum gilt, daß die hierbei gesammelten Erfahrungen auch auf andere Gebiete, wie künstliche, tiefe Gasspeicher, Abwässer radioaktiver oder industrieller Art, der Mineralgewinnung aus Tiefsolen und der chemischen Mineralgewinnung Nutzen bringen werden.

Die Fließgeschwindigkeit

Diesbezüglich seien zunächst Daten aus der Hydrogeologie des Grundwassers zusammengefaßt.

So beschreibt F. W. SCHÜBEL (1936) in Sanden von 0,2 mm bis 0,5 mm Korngröße bei einem Gefälle der Schicht von 1,33‰ eine natürliche Strömungsgeschwindigkeit von durchschnittlich 5 m/Tag. In der gleichen Arbeit gibt der Verfasser andere Beobachtungen wieder: THIEN 3,5 m/d, KISSKALT, KNORR 10 bis 19 m/d, KLUT 3 bis 10 m/d, GROSS 0,5 bis 5 m/d. Alle diese Angaben beziehen sich auf Strömungen im porösen Sediment.

K. KISSKALT (1941) stellte ebenfalls Beobachtungen über das Fließen von Grundwasser an. Markierungsversuche mit NaCl in Schotterböden

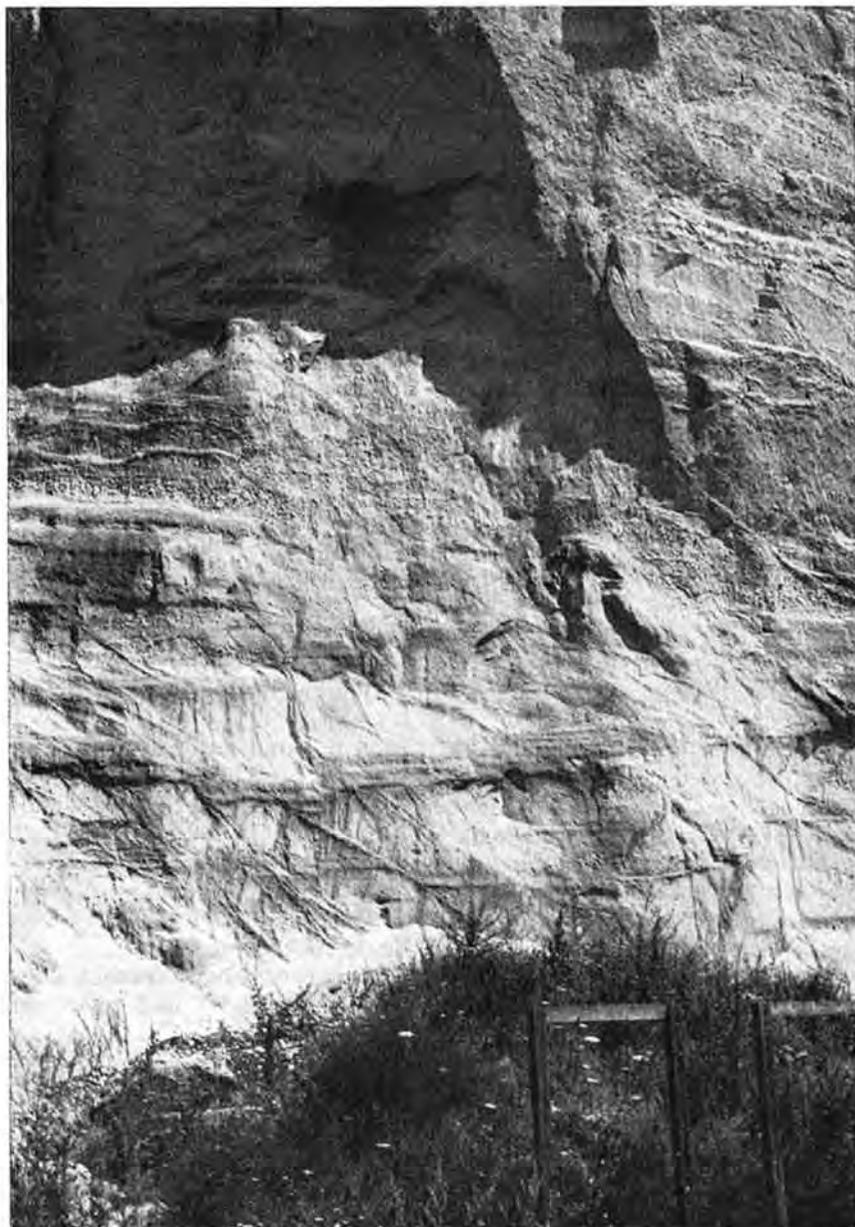


Fig. 3: *Verfüllte Kluftscharen, verhärtete und undurchlässige Lagen durchziehend. Lokaler Wasseraustritt an einem Schnittpunkt. Sandgrube bei Eisenstadt, Burgenland.*

ergaben, daß sich trotz einer Schichtmächtigkeit von 12 m Fließstränge von nur 1 m² über beachtliche Distanz ausbildeten. Nur 1/3 des Porenraumes wurde vom Markierungsstoff erfaßt. Ohne erkennbare Ursache änderten diese Grundwasserströme zeitweise ihre Richtung. K. KISSKALT bezeichnet ein Fließen von 3 m bis 5 m je Tag in Sanden als bereits hoch, erwähnt jedoch Beobachtungen von 70 m je Tag, so daß sich obiger Durchschnitt ergibt. In Schottern ohne wesentliches Gefälle sind 30 m bis 65 m je Tag durchschnittlich.

E. KANZ (1960) erwähnt in Sand-Schotter-Kies-Schichten Fließraten von 112 m/Tag.

M. P. BELIKOV (1961) beschreibt Versuche des Berliner Wasserwirtschaftsinstituts (DDR) in Porphyrtuffstein Thüringens. Durch eine Einbring- und drei Nachweissonden (Δ — 40 m) konnten in 30 m Tiefe Fließgeschwindigkeiten von 440 m/d, 505 m/d und 590 m/d, in 8 m Tiefe solche von 168 m/d und 154 m/d nachgewiesen werden.

Der Nachweis mittels 131 J läßt kaum Zweifel an der einwandfreien Bestimmung dieser enormen Fließraten zu, die durch keine künstlich geschaffene Druckdifferenz beeinflußt wurden. Man erinnert sich jedoch der Versuche von K. KISSKALT (1941) über partielles Fließen.

Es erscheint im Falle derart extremer Fließraten als wahrscheinlich, daß einzelne, bevorzugte und nur gering dimensionierte Fließwege den Markierungsstoff erfassen, während sich das gesamte Grundwasser keineswegs in derart rapider Bewegung befindet.

Beobachtungen anderer Autoren dürften ebenfalls nur unter diesen Umständen erklärbar sein.

Die Fließgeschwindigkeit in Schichten um und unter 1000 m liegt trotz der durch das „Wasserfluten“, also die Injektion von tausenden m³ Wasser, in dieser Schicht geschaffenen künstlichen Druckgradienten wesentlich unter diesen Daten.

Ein Bericht der ÖMV-AG vom 7. August 1957 (DH/tu) zeigte an Kernen des 8. Tortons von Matzen bei Lagerstättendepressionen Fließgeschwindigkeiten von etwa 2,4 m/d. Die Durchlässigkeit dieser Proben lag zwischen 500 md und 1500 md, die Teufe bei 1250 m.

F. G. MILLER (1941) berichtet nach zahlreichen Laborversuchen über bessere Entölungswerte bei „relativ hohen Fließraten“, und zwar von 1,50 m/d.

I. ALEKSEEW (1962) berichtet, daß mittels Tritiummarkierungen in einer unter Wassertrieb stehenden Öllagerstätte neben der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit von 2 m/Tag auch Strömungen von 10 bis 30 m/Tag vereinzelt erkennbar waren. W. KÄSS (1966) beschreibt Geschwindigkeiten im Verhältnis 5 : 1.

Alle zuletzt genannten Daten beziehen sich auf Porenspeicher unter künstlich geschaffenen Druckgradienten (Entölung). Die Fernmarkierung in solchen Trägern steht in Feldern des Wiener Beckens im Stadium der Vorbereitung.

Die natürlichen Migrationsgeschwindigkeiten der Wässer in 900 bis 3000 m Tiefe ohne Entnahme und Injektion sind noch um Potenzen geringer.

E. V. PINNEKER (1967) berichtet Werte von $2 \cdot 10^{-4}$ bis $2,7 \cdot 10^{-5}$ Meter/Tag.

Kluftlagerstätten

Feldmäßige Beobachtungen der Fließgeschwindigkeit wurden im Bereich der Erdöllagerstätten des Wiener Beckens zunächst im Flyschgestein von Neusiedl an der Zaya vorgenommen. Diese Lagerstätten liegen im klüftigen Glaukonitsandstein, dessen Mächtigkeit in der Kulmination bis zu 100 m, an den Flanken zum Teil nur 10 m beträgt. Als durchschnittliche Mächtigkeit ergeben sich 30 m. Eine Kluftporosität von etwa 1% bildet permeable Leitwege in dem mit Millidarcy nur gering durchlässigen Gestein. Die Tiefe der Oberkante des Trägers liegt um 1000 m. Zur weiteren Entölung wird in Injektionssonden Süßwasser eingepreßt. Die Tabelle 3 zeigt die Resultate von Markierungen auf.

Wie ersichtlich, konnte mittels Färbungen über durchschnittlich 248 m Distanz eine Fließgeschwindigkeit von durchschnittlich 14,1 m/Tag ermittelt werden. Aus der Zahlenreihe 9 in Tabelle 3 ist die Dauer des Austritts ersichtlich. Die Sonden fördern im Durchschnitt 35 m³ Wasser je Tag.

In diese Formation, deren Schichtwasser 15.500 mg Chlor je Liter aufwies, wurde jahrelang Süßwasser mit 50 mgCl/l eingepreßt, welchem damit auch die Rolle eines kontinuierlich eingepreßten Tracers zukommt.

Obwohl bei der genannten Fließrate von 14,1 m/Tag die Fließzeit von der Injektions- zur Produktionssonde nur durchschnittlich 17,6 Tage betrug, ergab sich, wie aus Tabelle 4 ersichtlich, nach einer durchschnittlichen Einpreßdauer von 1418 Tagen nur eine partielle, oft sogar unbedeutende Reduktion der Salinität des Austrittswassers. Im Durchschnitt betrug diese nach mehr als 80facher Fließzeit für den Tracer nur 0,5, d. h. 50% des austretenden Schichtwassers halten noch den vollen Salzgehalt des Tiefenwassers.

Die fast 80fache Fließzeit vermochte nicht zu dominierendem Austritt von Süßwasser zu führen, obwohl Farbe in 17 Tagen (eine Fließzeit) durchbrach.

Hierdurch schien die Existenz hochpermeabler Strömungsbahnen aufgezeigt, deren Querschnitt und Leitfähigkeit jedoch im Verhältnis zur gesamten Gesteinsmasse gering ist. Es ermöglichen diese Bahnen jedoch das rasche Vordringen von Wasser über große Distanz und führen damit zur Beobachtung von Strömungsgeschwindigkeiten, die von der gesamten Wasserbewegung nachweisbar um Potenzen unterschritten werden.

Tabelle 3: Markierungsergebnisse im Flysch des Ölfeldes Neusiedl im Wiener Becken

Lfd. Nr.	Injektions-sonde	Austritts-sonde	Markierungsstoff	Menge gr	Fließzeit Tage	Enfr.Inj.-Sonde—Austr.-Sonde,m	Fließgeschw., m/Tag	Dauer des Nachweises, Tage	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Hau 9	St. U. 44	Uranin	460	48	135,0	2,8	1	
					64	92,5	1,4	1	
2	St. U. 53	238	Uranin	1.425	10	190,0	19,0	1	
					281	120,0	12,0	3	
3	180	102	Uranin	1.425	26	187,5	7,2	1	
					220	110,0	10,0	2	
					9	300,0	33,4	4	
4	50	St. U. 102	Uranin	1.250	8	115,0	14,4	1	
					103	105,0	21,0	15	
					118	265,0	33,1	1	
					8	250,0	31,2	1	
5	67	St. U. 43	Uranin	1.250	42	360,0	8,6	2	
					55	265,0	4,8	1	
					77	147,5	6,4	35	
6	50	103	Uranin	1.000	46	105,0	2,3	3	
					118	265,0	10,6	1	
					25	265,0	10,6	1	
7	67	77	Uranin	1.000	12	147,5	12,3	70	
					19	275,0	14,5	4	
8	Hau 43	Hau 53	Uranin	3.000	3	125,0	41,7	68	
					69	23	120,0	5,2	49
9	St. U. 250	St. U. 61	Phenol	1.000	6	715,0	119,0	2	
					24	11	588,0	53,5	2
					130	5	520,0	104,0	14
					186	5	130,0	26,0	4
					234	5	105,0	21,0	11
					245	5	330,0	66,0	8
					130	5	520,0	104,0	1
10	250	130	Glukose	5.000	5	130,0	26,0	1	
					5	105,0	21,0	1	
					5	330,0	66,0	1	
					5	330,0	66,0	1	
					5	105,0	21,0	1	
11	67	37	Uranin	500	6	130,0	21,7	1	
					39	4	275,0	68,8	6
					60	5	345,0	69,0	47
12	85	37	Phenol	2.000	14	305,0	21,8	7	
					39	2	335,0	167,5	29
					40	18	540,0	30,0	3
					95	2	215,0	107,5	29
13	114	39	K-rhod.	4.000	45	280,0	6,2	3	
					60	18	190,0	10,6	67
					70	41	208,0	5,1	12
					92	34	250,0	7,4	6
					95	35	235,0	6,7	7
					284	21	325,0	15,5	17
					39	35	395,0	11,3	7
14	48	40	K-rhod.	4.000	34	190,0	5,6	3	
					70	43	345,0	8,0	3
					130	13	295,0	22,7	1
15	246	234	Uranin	4.220	2	240,0	120,0	4	
					155	41	202,0	4,9	4

Zu Tabelle 3:

1	2	3	4	5	6	7	8	9
17	St. U. 40	St. U. 28	Uranin	4.000	4	132,5	33,2	38
		39			4	215,0	53,8	24
		60			7	245,0	35,0	4
		155			2	248,0	124,0	5
18	101	188	Uranin	5.000	9	135,0	15,0	52
		Durchschnitt:			17,6	248,7	14,1	12,7

Diese Erklärung verliert an Wahrscheinlichkeit, wenn man die äußerst ausgeprägte Zunahme der Permeabilität von Klüften mit deren Weite errechnet.

Die Durchlässigkeit einer Kluft beträgt:

$$K_K = \frac{10^{12} h^2 K}{12} = 8,35 \times 10^{10} h^2 K$$

worin:

K_K = Durchlässigkeit der Kluft, Darcy
 h_K = Weite der Kluft, Meter

Die Formel ist in Fig. 4 graphisch abzulesen.

Die Durchlässigkeit einer geklüfteten Schicht beträgt:

$$K_f = \frac{(K_o \times h_s) + (K_K \times h_K)}{h_s + h_K}$$

worin:

K_f = Durchlässigkeit der geklüfteten Schicht
 K_o = Durchlässigkeit der Schicht
 K_K = Durchlässigkeit der Kluft
 h_s = Mächtigkeit der Schicht
 h_K = Weite der Kluft

In Anbetracht der aus Fig. 4 ersichtlichen, sehr hohen Durchlässigkeit einer „weiten“ Kluft scheidet die Möglichkeit aus, daß im Felde Neusiedl einige Hauptklüftbahnen den raschen Vorstoß der ersten Tracerwelle (Uranin) und die Masse geringst permeabler Klüfte, das extrem langsame Vordringen des Flutwassers bedingen. Würden weite, also höchst durchlässige Klüfte bestehen, würde auch Flutwasser in großen Mengen und in kurzer Zeit durchbrechen. Dies ist nicht geschehen.

Wenn in der Ingenieurgeologie die physikalischen Daten eines Probestückes niemals auf einen Gesteinskomplex übertragen werden dürfen (Festigkeit, Wasserdurchlässigkeit), erschien es ratsam, bei Aussagen über diesen Träger bezüglich dieses eigenartigen Verhaltens, das gesamte geologische Bild des Komplexes in die Betrachtung einzubeziehen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Süßwasserinjektion in die Salzwässer des Ölfeldes „Neusiedl“ im Wiener Becken

Lfd. Nr.	Austrittssonde	Chlorgehalt mgCl/l			Flutdauer (Einpfeßbeg. bis Markierungsnachweis) Tage
		Schicht-Wasser	Austrittswasser bei Markierungsnachweis	Cl Austr.-Wasser Cl Schichtwasser	
1	2	3	4	5	6
1	St. U. 44		8400	0,541	756
2	45		6000	0,387	772
3	238		11.900	0,767	1346
4	281		6700	0,432	1346
5	102		11.600	0,748	1737
6	220		5500	0,354	1723
7	Hau 37		13.000	0,838	1721
8	St. U. 102		11.000	0,709	790
9	103		5000	0,322	787
10	118		12.500	0,806	790
11	Hau 49		4800	0,309	790
12	St. U. 43		13.000	0,838	838
13	55		4500	0,290	851
14	77		5100	0,329	819
15	103		4100	0,264	1283
16	118		12.900	0,832	1262
17	77		4200	0,270	1480
18	39		5200	0,335	1487
19	Hau 53		3036	0,195	2290
20	69		3884	0,250	2310
21	St. U. 61		7100	0,458	746
22	24		13.490	0,870	751
23	130		13.180	0,850	745
24	186		9301	0,600	745
25	234		6400	0,412	745
26	245		3692	0,238	745
27	130		1.3180	0,850	758
28	186		9301	0,600	758
29	234		6400	0,412	758
30	245		3692	0,238	758
31	37		5893	0,380	2980
32	39		9230	0,595	2978
33	60		9490	0,612	2979
34	37		5893	0,380	1008
35	39		9230	0,595	996
36	40		3763	0,242	1012
37	95		7694	0,496	996
38	39		8250	0,532	1551
39	60		9692	0,625	1524
40	70		11.502	0,742	1547
41	92		14.200	0,916	1540
42	95		7171	0,462	1541
43	284		5916	0,381	1527
44	39		9940	0,641	5348
45	40		3869	0,249	5347
46	70		12.070	0,778	5356
47	130		13 600	0,877	1162
48	234		4890	0,315	1151

Durchschnitt: 15.500 mgCl/l

Zu Tabelle 4:

1	2	3	4	5	6
49	St. U. 155	Durchschnitt: 15.500 mg Cl/l	5375	0,346	557
50	28		4718	0,304	311
51	39		7183	0,463	311
52	60		8970	0,578	314
53	155		4953	0,319	309
54	188		2698	0,174	1523
	Durchschnitt:		7856	0,506	1418

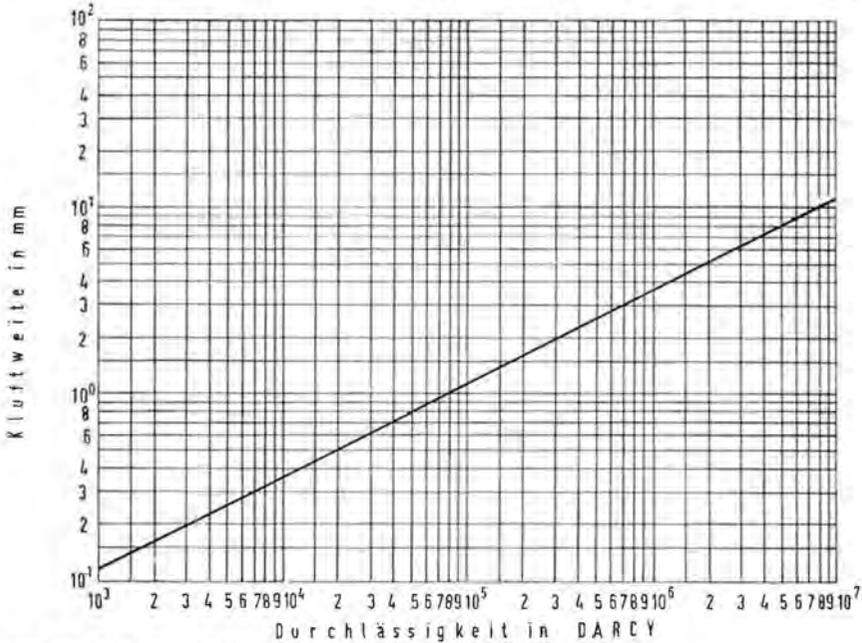


Fig. 4: Die Permeabilität einer Kluft.

4. Traceraustragung im Schwall und durch Haarrisse

Die im Abschnitt 3 beschriebenen Erkenntnisse widersprachen somit in mancher Hinsicht der herkömmlichen Gegenüberstellung mit grundsätzlichen Auffassungen, wie der vertikalen Dichtigkeit von Ton und Mergel im Gesteinsverband, auch gegenüber mäßiger hydraulischer Belastung, sowie der rechnerisch abzuleitenden Annahme, daß bei zwei grob unterschiedlichen Fließraten im Kluftgestein eine Schar hochpermeabler Klüfte die erste Tracerspitze bedinge.

Die Auffassung, daß erst geologische und hydrodynamische Daten in Koordinierung ihrer Aussagen das Bild des hydrogeologischen Verhaltens der Schicht in ihrer Gesamtheit zu definieren vermögen, trat damit in den Vordergrund (S. LOGIGAN, 1955).

Wohl sind Ton und Mergel dicht, aber vielleicht nicht im Bereich von Zehnermetern unter Belastung.

Wohl existieren enge und weite Klüfte, aber nicht in einheitlicher Erstreckung über 50 m oder gar 200 m.

Bevor diesbezügliche Annahmen ausgesprochen werden sollten, erschien es wesentlich, die Aussagen des neu entwickelten Verfahrens der Bildung von Tracerdepots in einer Serie von speziellen Kontrollversuchen im Ölfeld zu erhärten.

Die folgenden zwei Feldversuche mögen als Beispiel hervorgehoben werden.

4. 1. Austragung im Schwall

Tritium

In die Sonde Ma F 204, perforiert von 1504 bis 1517 m im Torton-sand, wurden 15 m³ einer 10⁰/₀-Salzsäure am 19. 4. 1968 eingepreßt.

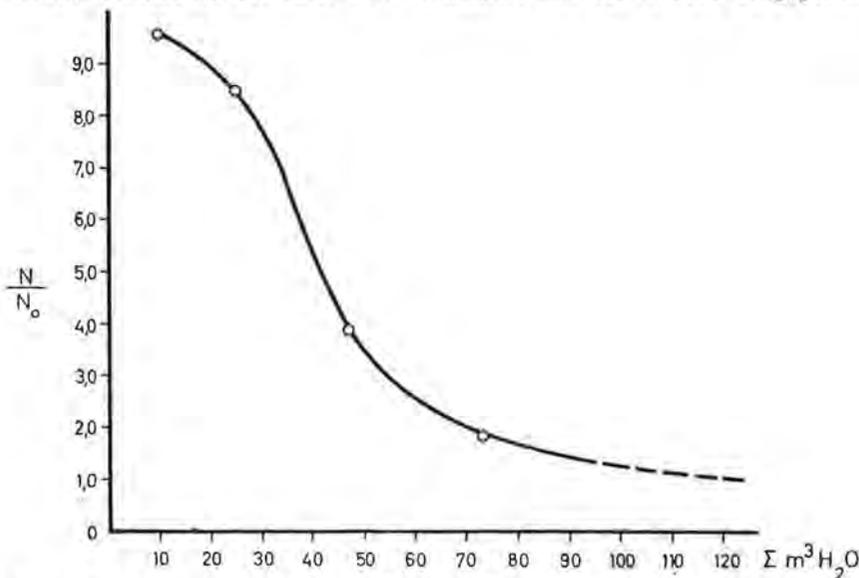


Fig. 5: Markierungseffekt an der Sonde Ma F 204

Perforation 1504—1517 m

0,1 Ci ³H in 15 m³ 10⁰/₀ HCl + 5⁰/₀ CH₃ · COOH am 19. 4. 68 eingepreßt.

Datum	Uhrzeit	Zeit in Stunden	$\Sigma \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}$	$\frac{N}{\text{Ci/ml} \times 10^{-11}}$	$\frac{N}{N_0}$
19. 4. 68	17 Uhr	3	10	222,6	9,67
19. 4. 68	23 Uhr	9	25	196,0	8,52
20. 4. 68	8 Uhr	18	47	91,2	3,97
22. 4. 68	11 Uhr	69	73	43,1	1,88
23. 4. 68	6 Uhr	88	124	16,2	—

$$N_0 = 23 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

Diesen 15 m³ HCl wurden 0,1 Curie Tritium beigemischt und die Sonde aus gleichem Bereich sofort wieder in Produktion gesetzt.

Fig. 5 ist zu entnehmen, daß Tritium bis zu 75 m³ H₂O mit der wieder ausgeförderten, abreagierten Säure nachweisbar blieb.

Die Verwendung von HCl repräsentiert eine übliche Art der Sondenbehandlung und steht mit dem Markierungszweck in keinem Zusammenhang. Das obige Experiment repräsentiert die Austragung des flüssigen Tracers im Schwall.

Das austretende Wasser überschritt die Nutzwassertoleranz nur um das Zweifache. Durch Verdünnung im Fördergut der Sammelstationen fällt dieser Wert auf einen Bruchteil, etwa 0,02 der Toleranzdosis.

Von jeder Feldprobe wurden fünf Laborproben zu 0,1 ml mit 10 ml Toluol-Szintillator hergestellt und zu je 10 Minuten im Tri-Carb-Spektrometer gemessen, die Mittelwerte und die Standardabweichung je Feldprobe errechnet.

Einer der fünf Laborproben wurde jeweils eine standardisierte Menge Tritium zugesetzt.

Der Background lag bei diesen Messungen um 23,10⁻¹¹ Curie und kann nicht wesentlich gesenkt werden. Die Depotbildung für Tritium ist ebenfalls möglich.

Gold

Fig. 6 zeigt die Austragung von Gold aus der Sonde Ma 214, Förderstrecke 1731 bis 1816 m, Helvet. 20 g Au wurden in 30 m³ verdünnter HCl in den Träger gepreßt und dieser aus dem gleichen Be-

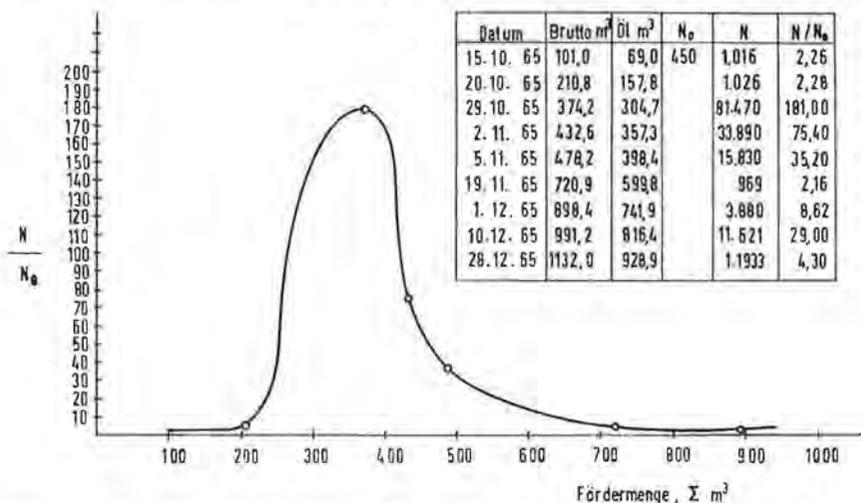


Fig. 6: Markierungseffekt an der Sonde Ma 214 nach Setzen eines Golddepots.

reich wieder in Produktion entnommen. Durch die Depot-Bildung des Phenolharzes ergibt sich die dargestellte Form der Austragung.

No repräsentiert den natürlichen Goldgehalt des Fördergutes, N den Goldgehalt der Probe. $1,10^{-9}$ g Gold in 10 ml ergeben 3880 normierte Impulszahl.

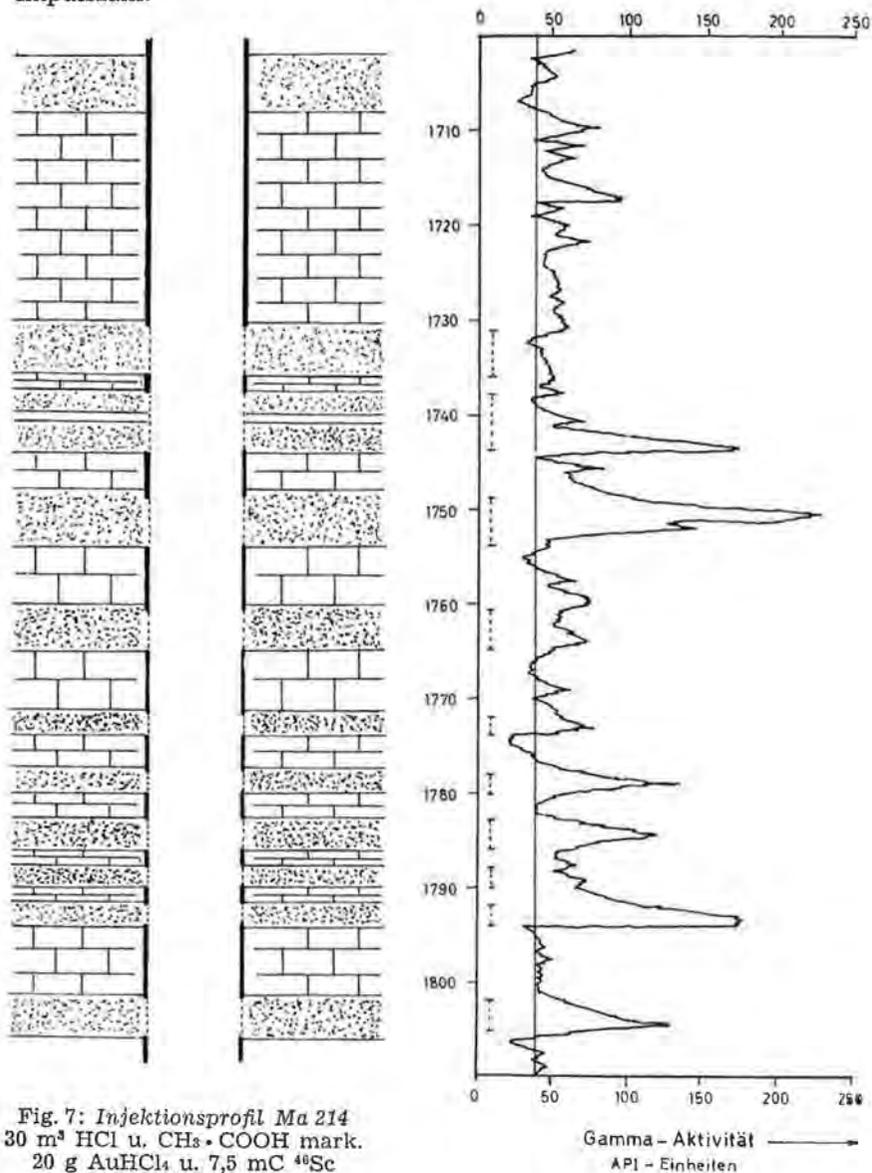


Fig. 7: Injektionsprofil Ma 214
 30 m³ HCl u. CH₃•COOH mark.
 20 g AuHCl₄ u. 7,5 mC ⁴⁶Sc

Die bei größeren Harzmengen (1 bis 3 kg oder mehr je m³) im Injektionsvolumen nach Abklingen des Tracers im Schwall dennoch bestehenden Restfilme an Porenwänden können in beschränktem Ausmaß durch 10% HCl abgelöst werden, wodurch ein neuer Schwall ausgelöst wird.

Fig. 7 zeigt, daß bei Sonde Ma 214 durch gleichzeitige Beimischung von ⁴⁶Sc in die Harzsuspension ein Injektionsprofil erstellt werden konnte, welches die Aufnahme- und Förderkapazität der Sande erkennen läßt.

4. 2. Austragung durch Haarklüfte

Perforationsverkürzung, Sonde Ma 317

In die Perforation 1255,5 m bis 1257,5 m der Sonde 317 wurden 3 m³ Salzwasser mit 0,1 Curie Tritium und 20 g Gold als Au Cl₄ eingepreßt und die Perforation mit 1500 Liter Zementbrei unter 140 atü Druck verschlossen.

Die Sonde wurde von 1247 bis 1249 m geöffnet und erbrachte ebenso wie vor der Isolation etwa 2 t Öl und 96% Wasser.

Das Wasser wurde auf Tritium und Gold (Aktivierungsanalyse) geprüft. Die Daten sind in Tabelle 5 wiedergegeben.

Die Untersuchungen zeigen, daß Wasser aus der unteren Perforation zutritt. Da Gold als krustierender Film, Tritium als Wasser eingebracht wurde, müßte letzteres im Schwall ausgetragen werden, falls breite vertikale Kanäle beständen.

Bei einer gleichartigen Markierung der Sonde Bo 81 (Perfohebung um 22 m) konnte in Wasserproben aus 376 m³ Sondenwasser weder Gold noch Tritium nachgewiesen werden. Die neuerliche Verwässerung war also lateral.

Tabelle 5: Der Nachweis von Tritium und Gold in Wasserproben der Sonde Ma 317.

Probe Datum	Wasser gefördert m ³ , Summe	Aktivität, 10 ⁻¹¹ Ci/ml	10 ⁻¹² Gramm/ml Gold
6. 10. 66	8,3	23,6	15,4
7. 10. 66	10	23,3	18,8
9. 10. 66	76	35,3	57,0
10. 10. 66	108	35,3	—
11. 10. 66	141	33,4	37,0
9. 11. 66	1008	33,7	41,6
22. 11. 66	1618	34,2	92
13. 1. 67	2984	29,1	12,2
2. 2. 67	3348	27,4	14,7
16. 2. 67	3807	22,9*	6,9*

* Diese Werte vom 16. 2. 67 sind Leerwerte (Background bzw. natürlicher Goldgehalt).

Das Ergebnis der Sonde 317 repräsentiert das Verhalten von Tracern bei vertikalen Verbindungswegen geringster Dimension. Es erscheint fraglich, ob Undichtigkeiten so geringer Dimension mit herkömmlichen Mitteln sperrbar sind.

Umfangreiche Versuche haben ergeben, daß Zementschlämme herkömmlicher Art, auch bei Verwendung von Zusätzen, in Klüfte unter 0,25 mm keinesfalls mehr eindringen können.

5. Aussagen und Folgerung

Die Untersuchungen über Kommunikation mittels Gold und Tritium zeigen auf, daß einige Meter mächtige Ton- oder Mergellagen unter relativ geringer Belastung von Tiefenwässern vertikal durchbrochen werden können.

Diese Ergebnisse widersprechen verbreiteten Ansichten im Bereich des Petroleum Engineering, bestätigen aber theoretische geotechnische Ableitungen.

Zufolge dieser Ableitungen genügen relativ geringe Änderungen im Porenwasserdruck, um vernarbte Klüfte hydrodynamisch zu reaktivieren. Selbst bei einer Weite von Bruchteilen eines Millimeters zeigt die Berechnung, daß beachtliche Mengen von Tiefenwässern durch diese reaktivierten Klüfte zu migrieren vermögen.

Die Untersuchungen über die Fließdauer der Tracerspitzen im Bereich der Klüftlagerstätte des Feldes von Neusiedl im Wiener Becken zeigen im Vergleich mit dem hier ebenfalls die Rolle eines Tracers übernehmenden Injektionswasser die Problematik der Markierungen im gering durchlässigen, jedoch immense Wassermengen enthaltenden Speichergestein auf. Die in Veröffentlichungen berichtete Tatsache, daß der Tracerfluß in Tiefenschichten oftmals das Zehnfache des rechnerischen Wertes erreicht, stimmt mit diesen unseren Beobachtungen überein.

Fig. 8 stellt Durchschnittswerte für eine Sonde, errechnet aus allen erfolgreich markierten Sonden, graphisch dar. Auf der Abszisse ist die Flutdauer, also die Zeit in Tagen ab Injektionsbeginn, an den Markierungs sondens angegeben. Auf der Ordinate ist die kumulativ im jeweiligen Zeitbereich geförderte Menge an Schichtwasser abzulesen. Die durchschnittliche Zeit bis zum Austritt des Tracers ist ebenfalls eingetragen.

Es ist ersichtlich, daß nach Durchbruch des Tracers sowohl in zeitlicher wie in mengenmäßiger Betrachtung um Potenzen größere Mengen des ursprünglichen Lagerstättenwassers austraten. Das Auftreten des Tracers stand zur Verdrängung des Schichtwassers offensichtlich in einer gänzlich untergeordneten Beziehung.

Der Umstand, daß in Aquifern genannter Eigenart Tracerteste die maximale Fließgeschwindigkeit bei großen Tracermengen einen zweiten 5- bis 15fach langsameren Peak zeigen, läßt sich durch die perma-

nente Traceranwendung (hier also Süßwasser mit 50 mgCl/l) dahingehend ergänzen, daß abseits gewisser, weit überdurchschnittlich bevorzugter Fließwege, sich der der gesamte Wasseraustausch um Potenzen langsamer vollzieht.

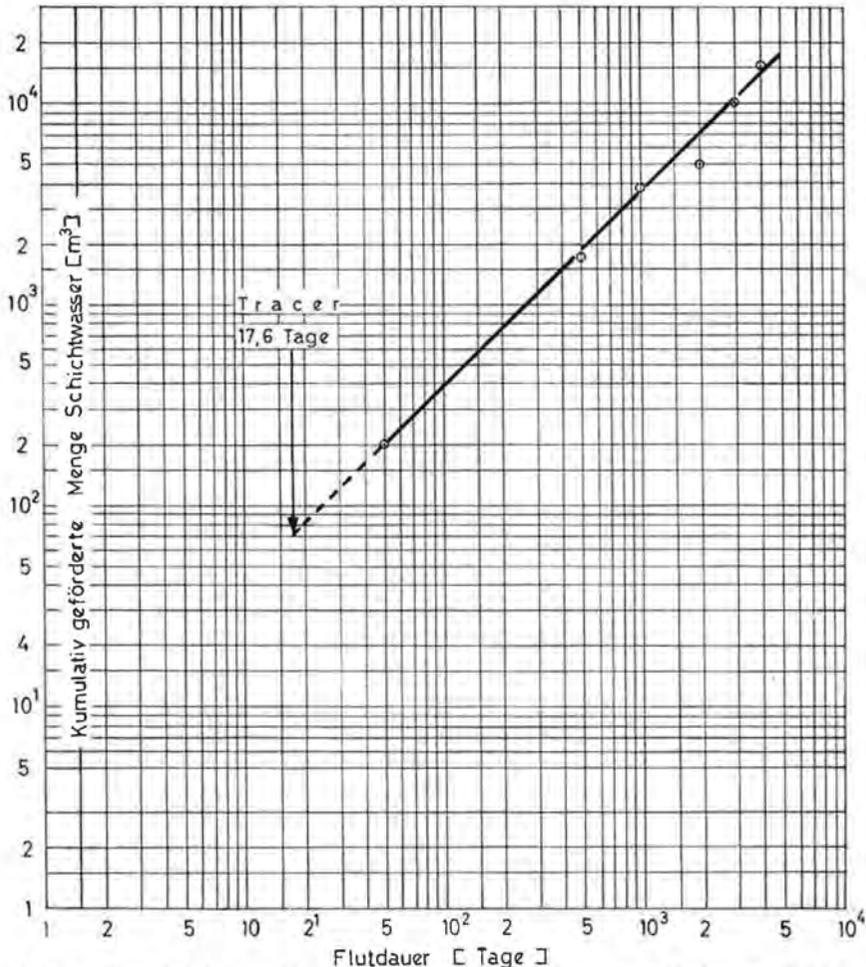


Fig. 8: Der Injektionszeit wurde die Menge des ausgeförderten Schichtwassers gegenübergestellt. Interpretation im Text.

Die Aussage der Markierungen und die rechnerische Betrachtung der Permeabilität von Klüften läßt erkennen, daß nicht nur hohe und geringe Durchlässigkeit des Gesteines den Wasserfluß lenken.

Wären einige weite Klüfte für den raschen Durchbruch des Tracer verantwortlich, so wäre deren Durchlässigkeit so beachtlich, daß Salz-

wasser der Schicht in kürzester Zeit durch eingepreßtes Süßwasser weitgehendst verdrängt worden sein müßte.

Es läßt sich aus der Analyse der Unterlagen ableiten, daß zusätzliche Effekte, etwa sehr beengte und wenige, aber direkte Fließwege sowie indirekte verästelte Fließwege bestehen. Letztere folgen bevorzugten petrographischen Bahnen, etwa Klufftaffeln in horizontaler und vertikaler Erstreckung innerhalb des Trägers. Diese Bahnen müssen keineswegs den kürzesten Weg zwischen zwei willkürlichen Punkten (Sonden) einnehmen.

Die Fließgeschwindigkeiten zwischen zwei Punkten (Sonden) kann damit in Form einer Gauß'schen Glockenkurve zwischen Minimum und Maximum verlaufen. Das Maximum entspricht den Markierungsspitzen im Feld Neusiedl.

Die im Feld Neusiedl beobachtete Tatsache, daß nur ein verschwindend geringer Anteil des Tracers überhaupt nachweisbar austritt, ordnet sich in diese Vorstellung ein.

Nur ein minimaler Anteil des Flutwassers folgt kürzesten Verbindungswegen und wird nachgewiesen. Der Hauptanteil folgt petrographischen Bahnen, besserer Leitfähigkeit, aber längeren Wegen oder weiter Deltabildung, etwa entlang Staffeln von Kluffsystemen. Der Tracer wird, da sich derart 70 bis 88% des Flutwassers bewegen, unter jede Nachweisgrenze mit den Mengen des Schichtwassers verdünt.

Ein zweiter Tracer-Peak muß sich ergeben, wenn die Fließgeschwindigkeiten nicht der Gauß'schen Verteilung folgen, sondern durch künstliche Varia, wie sie in einem Ölfeld oftmals geschaffen werden (ungleiche Belastung, Stimulation), gestört werden.

Es sei die Frage aufgeworfen, inwieweit diese Beobachtungen für die Wasserbewegung in Tiefenschichten zu verallgemeinern sind.

Von seiten der ÖMV-AG sind nunmehr Fernmarkierungen in 1300 m tiefen Porenspeichern vorgesehen.

Einige Erfahrungen über die Verdrängung von Rohöl durch Wasser in Ölfeldern könnten überdies zur Beantwortung dieser Frage beitragen.

In Anlehnung an die geringe Entölung solcher Lagerstätten, welche trotz des Wasserflutens oft nur 20 bis 30% des vorhandenen Rohöles erreichen, ergibt sich die Frage, in welchem Ausmaß und in welcher Zeit eine völlige Wasserumwälzung in einem mächtigen und weit erstreckten Schichtpaket überhaupt stattfinden wird.

Diesbezügliche Erkenntnisse, welche nicht nur für die Erdölindustrie, sondern für zukünftige, auf hydrogeologischen Fundamenten basierende technische Aufgaben wesentlich sind, werden sich aus weiteren Markierungsarbeiten ableiten lassen. Hierzu ist in Tiefenwässern der Aufwand sehr großer Tracermengen und eine sehr langfristige Beobachtung der Austrittssonden notwendig.

Zusammenfassung

Markierungsarbeiten mit Gold (Neutronenaktivierungsanalyse) vermochten wider Erwarten die Migration großer Wassermengen durch Haarklüfte in Tonen und Mergeln an Tiefbohrungen aufzuzeigen.

Unerwartete Resultate ergaben sich auch, als im Flysch des Ölfeldes Neusiedl Farbe und Chemikalien zur Markierung über durchschnittlich 248 m verwendet wurde. Der Traceraustritt erfolgte um Potenzen früher als die weitgehende Verdrängung des Schichtwassers.

Es ist wahrscheinlich, daß zumindest in diesem Fall einer 1000 m tiefen Klufflagerstätte die Aussagen der Markierungen nur in beschränktem Ausmaß auf die Strömungsverhältnisse der Hauptmenge der Wässer interpretierbar sind.

Es ist zufolge dieser Untersuchungen zu vermuten, daß im tiefen und mächtigen Träbergestein der Nachweis von Tracern des öfteren nur die maximalen Fließgeschwindigkeiten aufzeigt, während die Wasserverdrängung im gesamten Komplex grundlegend langsamer und vielleicht auch vorwiegend auf anderen Fließbahnen verläuft, als der Nachweis des Spurstoffes zunächst annehmen läßt.

Literatur

- ALEKCEW, I. et al.: Tritium in Underground Water Studies. I.A.E.A., Wien 1962. Sammelbände: Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry.
- BELIKOV, M. P. et al.: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrotechnik. Gostoptjehisaat, Moskau 1961.
- BUTTLER, H.: Tritium als Indikator bei Einpreßwasser bei der sekundären Ölgewinnung. Erdöl und Kohle, 1953, 6, S. 376.
- CLAYTON, G. G. & J. W. WEBB: Application of Tritiated Water as a Tracer. I.A.E.A., Wien 1962. Radioisotopes in the Physical Science and Industry.
- DANIELS, J. & P. C. MAYER: Über die Verwendung von Dextrose als Indikator für Flutwasser. Erdölzeitschrift 73, 5, 1957, S. 126—128.
- EDELMANN, A.: Die Möglichkeit der chemischen Markierung von Erdölwässern, Erdöl, Zement und Spülung. Interner Bericht der ÖMV-AG, LAP, Jänner 1960.
- HECH, E. T.: Tracing Floods between Wells. Producers Monthly, 18, 9, 31, 1954.
- KANZ, E.: Über das Verschwinden von Keimen im Grundwasser des diluvialen Schotterbodens. Archiv. f. Hygiene, 144 (1960), S. 375.
- KÄSS, W.: Färbeversuche bei Flutungsmaßnahmen in Erdölfeldern. Erdöl und Kohle, 19. Dez. 1966, S. 882—886.
- KISSKALT, K.: Quantitative Bestimmungen bei der Untersuchung über die Strömung des Grundwassers mittels Färbung und Salzung. Archiv für Hygiene, 125, S. 29 (1941, München).
- KNUTTSON, G. et al.: Field and Laboratory Tests of Chromium — 51 — EDTA and Tritium Water. Radioisotopes in Hydrology, I.A.E.A., Vienna 1963.
- LJUNGGREN, K.: The Use of Radioisotopes in Industrial Tracing. I.A.E.A.
- LOGIGAN, S.: Zur Frage der Druckerhaltung in Erdöllagerstätten. Die Bergbauwissenschaften, 1955, 5. S. 146—150.
- Meeting on Radioisotope Economics, Vienna, 16—20, Marsch 1964.
- MERRITT, W. F.: Routine Measurement of Ground Water Velocity Using S³⁵, Geophysical Abstracts, Vol 5, No 12 (Dez. 1963), S. 61—62.

- MILLER, F. G.: A Laboratory Study of Water Encroachment. US-Bureau of Mines, R. I. 3595, Oct. 1941.
- ORMEROD, J. G.: Serratia indica as a Bacterial Tracer for Water Movements. J. Appl. Bacteriology, 27, 2, S. 342—349 (1964).
- PAPASPYROU, S.: Veränderung der Bodenbeschaffenheit infolge Materialverschleppung durch strömendes Grundwasser. Mitteilungen aus dem Inst. f. Bodenmechanik u. Grundbau d. TH München, 1963. (Dissertation, eingereicht 5. 4. 1963.)
- PASSLER, W.: Markierung von Einpresswasser mit Dextrose. Interner Bericht d. ÖMV-AG, LAP v. 19. 6. 1958.
- PINNEKER, E. V.: Die Bestimmung der Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit unterird. Wässer in tiefen Schichten. Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, Jahrgang 1966/67, S. 289—310.
- RAUTH, G.: Die radioaktiven und chemischen Nah- und Fernmarkierungen bei Problemen der Erdölförderung. Dipl. Arbeit a. d. Mont. Hochschule Leoben, ausgeführt bei der ÖMV-AG, November 1963.
- SCHMIED, H. & H. HAWLE: Adsorption und Desorption von ⁴⁶Sc an Kernproben. Interner Bericht d. ÖMV-AG, LAP, Mai 1964.
- SCHÜBEL, F. W.: Die hygienische Untersuchung und Beurteilung der künstlichen Grundwasseranreicherung. Archiv für Hygiene, 116, S. 321 (1936), München.
- SKIRBITZKE, H. E.: The Use of Radioisotopes in the Study of Ground Water Motion. Americ. Nuclear Soc. Trans., 5, 2 (Nov. 1962), pp 275.
- WEBER, B.: Phenol als Zusatzstoff bei der Bestimmung von Grundwasserströmen. Archiv für Hygiene, 125, S. 41 (1941), München.
- WENZEL-SCHULZE: Tritiummarkierung. Walter de Gruyter-Verlag, Berlin 1962.
- WRIGHT, R. R. & B. COLLINGS: Application of Fluorescent Tracing Techniques to Hydrologic Studies. Am. Water. Wirks. Assoc. Journ., 56, 6, pp 748—754. Symposium on the Disposal of Radioactive Wastes into the Ground. I.A.E.A., Wien, 29. Mai—2. Juni 1967.
- Verfahren zur Oberflächenverbindung von Kunstharzen mit silikat- oder quarzhältigem Material. a) Österr. Patentschrift 204.491 (15. 12. 1958); b) BRD Patent 1,179.828; c) franz. Patent 1,188.356; d) ital. Patent 581.594.
- Verfahren zur Verbesserung von Sonden. a) Österr. Patentschrift 206.844 (15. 6. 1959); b) franz. Patent 1,186.653; c) ital. Patent 581.013.
- Verfahren zum Verbringen radioaktiver Isotopen in Hohlräume einer Bodenformation. Österr. Patentschrift 233.855 (15. 10. 1963).
- Verfahren zur Feststellung von Flüssigkeitsströmungen in einer Bodenformation. Österr. Patentschrift 246.443 (15. 8. 1965).
- Verfahren zur Lokalisierung von Wassereintrüben in Bohrsonden. Österr. Patentschrift 246.673 (15. 9. 1965).

Summary

Gold has proved extremely effective as a tracer material. It was used in combination with neutron activating analysis for detection.

Work done in deep holes indicates that water sometimes migrates vertically in large volumes through clay rocks. Most cases of such vertical water channelling are almost certainly the result of disturbances, such as thin vertical cracks in the rock. Sealed cracks may be opened by relatively moderate hydrodynamical forces.

In the oil-field „Neusiedl“ in the Vienna basin, investigation with tracers showed unexpected results.

The cracked formation (fysch) let the tracer pass in an average time of 17 days. The investigation was started during a water-flood operation with fresh-water. But, after 1418 days, half of the salinity of the formation water was still found in the same producing wells.

Perhaps the main volume of the water does not follow the shortest path between the wells. Often it is only the rapid direct flow of a small part of the brine that may be detected by the tracer.

This may lead to misinterpretation of the flow velocity and flow pattern of the main volume of water, especially in the investigation of deep formations of large extension that contain high amounts of water.

Anschrift des Verfassers:

Dr. E. DOLAR, ÖMV-AG, Otto-Wagner-Platz 5,
A-1091 Wien