

Dipoltests zur Untersuchung des Stofftransportes in Kluftgrundwasserleitern

Dipole Tests for the Investigation of Transport Processes in Fissured Aquifers

T. HIMMELSBACH¹⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	131
2. Erläuterungen zum Versuchsgebiet	132
2.1. Hydrogeologische Verhältnisse.....	132
2.2. Der Versuchsstollen Lindau.....	134
3. Versuchseinrichtungen.....	135
3.1. Randbedingungen.....	135
3.2. Technische Einrichtungen.....	135
4. Hydraulische Voruntersuchungen.....	137
4.1. Tests unter konstanten P-Q-Bedingungen	137
4.2. Hydraulische Interferenztests	139
5. Dipolversuche.....	140
5.1. Theoretische Grundlagen.....	140
5.2. Ergebnisse der Dipolversuche	143
5.3. Diskussion der Versuchsergebnisse.....	146
Zusammenfassung	147
Literatur.....	148
Summary	148
Dank	149
Appendix.....	149

1. Einleitung

Für die quantitative Beschreibung des Ausbreitungs- und Retardierungsverhaltens von Schadstoffen in geklüfteten Festgesteinen sind die hydraulischen Eigenschaften von bevorzugten Klüften und Störungszonen von entscheidender Bedeutung. Unter normalen Feldbedingungen bleibt die Dynamik der unterirdischen Abfluß- und Speichervorgänge im Gebirge der Untersuchung weitgehend verborgen. Die

¹⁾ Dipl.-Geol. T. HIMMELSBACH, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, D-7500 Karlsruhe.

erhaltbaren Informationen beschränken sich zumeist nur auf wenige Aufschluß- und Beprobungspunkte in Form von Quellen und Bohrungen. In Kluftgrundwasserleitern ändern sich die Fließwege aufgrund des hohen Inhomogenitätsgrades des Trennflächengefüges aber bereits auf wenigen Metern. Bei einer Bewertung des Ausbreitungsverhaltens von Schadstoffen in einer großmaßstäblichen und über alle Diskontinuitäten mittelnden Betrachtungsweise geht daher der Einfluß der einzelnen Diskontinuitäts-elemente, zum Beispiel von Störungen oder von Kluftscharen, zumeist unter, wobei es häufig zu einer Mißinterpretation der Ausbreitungs- und Transportvorgänge kommen kann. Modellhafte Überlegungen zeigen jedoch, daß gerade die verschiedenen Diskontinuitäten in ihrer unterschiedlichen Ausdehnung, räumlichen Vernetzung und hydraulischen Wertigkeit für stark voneinander abweichende mittlere Verweilzeiten des Wassers in einzelnen Teilbereichen verantwortlich sind.

Der erforderliche, hohe technische Aufwand schränkt die experimentelle Überprüfung derartiger Überlegungen weitgehend ein. Durch einen günstigen Umstand konnte ein für diese Fragestellungen fast ideales Untersuchungsgebiet im südlichen Schwarzwald nun für entsprechende Versuche genutzt werden. Im Rahmen der Planungen für eine Talsperre war ein die Sperrenstelle querender Erzgang im Detail in seiner hydrogeologischen Wirksamkeit untersucht worden (A. BLINDE et al., 1982). Hierbei war parallel zu dem wasserwegigen Erzgang ein Sondierstollen angelegt und von diesem der Erzgang durch verschiedene Fächerbohrungen erkundet worden. Diese technischen Gegebenheiten ermöglichten die Durchführung von verschiedenen hydraulischen Dipoltests (D. S. WEBSTER et al., 1970), um damit sowohl die hydraulisch relevanten Eigenschaften eines Störungs- und Kluftsystems als auch das Stoffausbreitungsverhalten in einem Kluftaquifer unter in situ-Bedingungen zu untersuchen.

2. Erläuterungen zum Versuchsgebiet

2.1. Hydrogeologische Verhältnisse

Das Untersuchungsgebiet „Lindau“ befindet sich im Tal des Schwarzenbaches ca. 5 km südöstlich von Todtmoos (Fig. 1). Der Bereich des Testgebietes wird vom Albtalgranit eingenommen. Es handelt sich hierbei um einen Intrusionskörper, der von verschiedenen Gangscharen durchschlagen wird. Neben einer Vielzahl von 135° streichenden Quarz- und Granitporphyrgängen treten auch einzelne Vererzungen auf, die an hydrothermale Spaltenfüllungen gebunden sind.

Für die Untersuchungen konnte der Erzgang Hermann genutzt werden, der, wie weiter unten noch erläutert wird, durch verschiedene technische Maßnahmen gut erschlossen ist. Er streicht generell 5°–10° und besteht im wesentlichen aus Quarz, etwas Fluorid und Baryt sowie sekundärem Quarz. Der nur spärlich vorkommende Fluorid wurde teilweise gelöst, und die resultierenden Hohlräume wurden partiell durch subsequente Quarzkristallisation wieder ausgefüllt. Das Einfallen des Ganges geht mit zunehmender Teufe von einem oberflächennahen Wert von 75° E in ein nahezu saigeres Einfallen über. Der Hermann-Gang besitzt eine Mächtigkeit von im Mittel ca. 1 m, die im streichenden Verlauf sowie auch mit der Teufe zwischen nur wenigen Dezimetern bis über 2 m variieren kann. Die mächtigeren

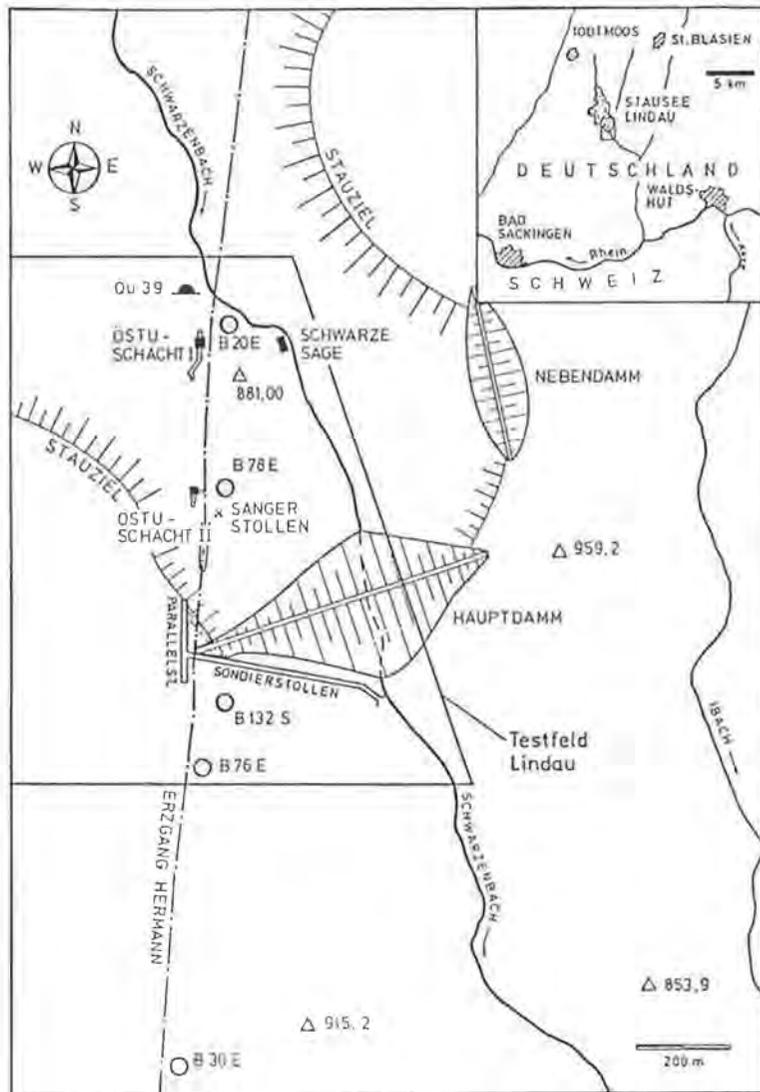


Fig. 1: Lageplan des Untersuchungsgebietes Lindau mit geplanter Sperrenstelle für den Stausee Lindau. Der obertägige Verlauf des Erzganges Hermann ist gestrichelt eingezeichnet.

Gangabschnitte zeigen zumeist ein nahezu saigeres Einfallen, während in Bereichen, in denen sich das Einfallen ändert, die Gangmächtigkeit deutlich abnimmt und die Mineralisation durch Gangbrekzien oder durch verkieselte Ruschelzonen ersetzt wird. A. RENK (1981) führt als mögliche Erklärungsursache für die unregelmäßig wechselnde Mächtigkeit des Erzganges Relativbewegungen mit vertikaler Komponente an einer gekrümmten Störungsfläche an, die dazu führen, daß Gangverengungen und Aufweitungen sich abwechseln. Kartierungen des Gangverlaufes an der Oberfläche (J. MELLERT, 1989; B. TROSCHE, 1990) weisen auch auf geringe laterale, vermutlich störungsbedingte Versatzbeträge des Erzganges hin. Der Erz-

gang wird beiderseits von einer bis zu 5 m breiten Störungszone im hydrothermal überprägten Nebengestein begleitet.

Die partiell hohe Durchlässigkeit des Erzganges ist auf zum Teil cm-weit geöffnete Klüfte (Bohrbefunde SCHLUCHSEEWERKE AG) sowie durch zellig-kavernöse Hohlräume (Pseudomorphosen nach Flußspat) in der sonst überwiegend aus Quarz bestehenden Füllung bedingt. Zonen extrem hoher Durchlässigkeit wechseln sich lateral mit Zonen nur geringer Durchlässigkeit ab. Zusammen mit seiner begleitenden Störungszone übt der Erzgang Hermann als Zone übergeordneter Durchlässigkeit im Vergleich zum Hauptgesteinskörper, dem weitständig geklüfteten Albtalgranit, eine Drainwirkung auf das randliche Gebirge aus, welche ein seitliches Zuströmen von Grundwasser in Richtung auf den Erzgang bewirkt. Die Drainzone erstreckt sich beiderseits des Erzganges auf eine Breite von bis zu 50 m, was durch das dichte Grundwassermeßstellennetz an der Oberfläche nachgewiesen werden kann. Das dem Erzgang aus dem randlichen Gebirge zugeflossene Wasser strömt, dem natürlichen Gradienten im Erzgang folgend, dem nächstgelegenen Vorfluter zu. Die Vorflut bilden zwei kleinere Bäche, welche im Verschneidungsbereich mit dem Erzgang im Schwarzenbach-Tal und im Höllbach-Tal verlaufen.

Um die Unterläufigkeit der geplanten Sperrenstelle zu verhindern, wurden im Rahmen einer Injektionsmaßnahme über 1100 t Zement in den Erzgang Hermann injiziert. Durch die Zementinjektion wurden zwei unterschiedliche, hydraulisch separierte Teilsysteme geschaffen (A. BLINDE et al., 1982). Südlich des Injektionschleiers ist die Entwässerung des Erzganges nach S auf den Höllbach hin gerichtet. Nördlich der Injektionsmaßnahme erfolgt die Entwässerung des Erzganges nach N auf den Schwarzenbach hin. Diese generelle Teilung in zwei unterschiedliche hydraulische Teilbereiche konnte bereits Anfang der 80er Jahre durch Markierungsversuche erfolgreich belegt werden (G. ACKERMANN et al., 1982).

2.2. Der Versuchsstollen Lindau

Der Versuchsstollen Lindau ist ein 460 m langer Erkundungsstollen, der im Bereich der Dammachse des projektierten Pumpspeichers Lindau aufgefahren wurde. An seinem Ende gabelt er sich und quert mit beiden Teilsträngen das Störungssystem des Erzganges Hermann. Im südlichen Teilstollen ist die ansonsten vollständig ausgehaltene Torkretierung des Stollens im Bereich des Erzganges unterbrochen. Der Erzgang ist hier freigelegt, da er in diesem nahezu dichten Bereich nur einen geringen Wasserzutritt in Form von Tropfwasser aufweist. Im nördlichen Teilstollen hingegen liegt der an dieser Stelle sehr stark wasserführende Erzgang hinter einer Betonverschalung. Beide Teilstollen durchörter den Erzgang und münden in einen zweiten N-S-verlaufenden, ca. 150 m langen und dem Erzgang Hermann parallel angeordneten Stollen. Von diesem Parallelstollen ausgehend sind 21 Bohrungen zumeist fächerartig auf den Erzgang angesetzt. Die Bohrungsfächer haben einen mittleren Abstand von ca. 10 m zueinander. Im Südteil des Parallelstollens weisen die Manometer der Stollenbohrungen ein hydraulisches Potential von im Mittel 65 m auf, während im nördlichen Teil lediglich ein Potential von ca. 25 m gemessen wird. Die Trennung des Erzanges in zwei unterschiedliche Druckbereiche ist das Ergebnis der ausgeführten Zementinjektionen.

Im Rahmen von hydrogeologischen, tracerhydrologischen und hydraulischen Voruntersuchungen (T. HIMMELSBACH & H. HÖTZL, 1990) konnte nachgewiesen werden, daß im mittleren Bereich des Parallelstollens durch die Stollenbohrungen

ein Abschnitt im Erzgang Hermann erschlossen wird, in dem das Grundwasser stagniert. In diesem zentralen Bereich ist das hydraulische Potential ausgeglichen, so daß ein Koppeln der einzelnen Stollenbohrungen untereinander mittels eines empfindlichen Flowmeters keinen Hinweis auf etwaige Potentialunterschiede ergibt. Nach keiner der beiden Seiten existiert ein hydraulischer Kontakt zu anderen Erzgangabschnitten.

3. Versuchseinrichtungen

3.1. Randbedingungen

Für die Dipolversuche wurde der Abschnitt des Erzganges ausgewählt, der durch den zentralen Teil des Parallelstollens erschlossen wird. Dieser Stagnationsbereich kann mittels einer Pumpe künstlich derart beeinflusst werden, daß sich in diesem Bereich in situ Migrationsversuche unter gut erfaßbaren hydraulischen Randbedingungen durchführen lassen. Betreibt man eine Pumpe zwischen zwei Bohrungen so entsteht eine Kreislaufströmung und es wird ein hydraulischer Dipol aufgebaut. Da die Pumpe aus dem Gesamtsystem weder Wasser entnimmt noch hinzufügt, entstehen schon nach relativ kurzer Pumpdauer stationäre Strömungsbedingungen, da kein Wasserzu- bzw. -abfluß über die randlichen Begrenzungen erfolgt. Der freie Wasserspiegel im Erzgang, der sich hier ca. 25 m über Stollenniveau befindet, stellt eine der hydraulischen Begrenzungen dar. Die seitlich, praktisch dichten Erzgangabschnitte und die sich generell mit der Tiefe schließenden Klüfte sowie das Nebengestein des Erzganges bilden die randlichen Begrenzungen. Die Stollenbohrungen erschließen den zu testenden Erzgangabschnitt in seiner gesamten Mächtigkeit, wobei der Wasserzutritt laut Bohrprotokollen fast ausschließlich im Erzgang erfolgt. Es wird davon ausgegangen, daß die Wasserzirkulation in erster Linie in den großen, sich vernetzenden Klüften erfolgt. Der Feinklüftungsbereich in der Gangmatrix spielt für die Wasserzirkulation nur eine sehr untergeordnete Rolle, da seine Durchlässigkeit generell etwa drei Größenordnungen niedriger liegt (Th. WITTEK, 1991). Die Hauptausbreitungsrichtung fällt im Untersuchungsgebiet mit der generell gangparallelen Klüftung des Erzganges zusammen. Aufgrund der Annahme, daß die Hauptdiskontinuitäten die Gebirgsdurchlässigkeit repräsentieren und durch unter 45° konjugierten Klüfte hinreichend vernetzt werden, wird der betrachtete Erzgangabschnitt in erster Näherung als quasihomogenes Medium betrachtet. Die gegebenen Verhältnisse können somit als ein eben-vertikales, zweidimensionales Strömungsproblem mit freiem Wasserspiegel und randlichen Begrenzungen aufgefaßt werden.

3.2. Technische Einrichtungen

Im zentralen Bereich des Parallelstollens erschließen insgesamt sechs Kernbohrungen von 66 mm Durchmesser den Erzgang auf einer Länge von ca. 40 m. Drei der Bohrungen sind in Form eines vertikal orientierten Bohrungsfächers angeordnet, der aus zwei jeweils 45° nach oben und unten abgelenkten Bohrungen mit einer horizontalen Bohrung in der Mitte besteht. Die restlichen drei Bohrungen sind Horizontalbohrungen (Fig. 2).

Für die in situ Tracerversuche werden in die zwischen 4,5 m und 15,0 m langen Bohrungen kleine Kunststoffrohre (Durchmesser 12 mm) eingebaut, die an ihrem Ende einen Diffusor besitzen, welcher im Bereich der intensivsten Klüftung des Erzganges plaziert wird. Auf aufwendige Doppelpackersysteme, wie sie zum Beispiel im Felslabor Grimsel (FLG) der NAGRA verwendet werden, konnte zunächst verzichtet werden, da beim Bohren lediglich der Erzgang Hermann und dessen Klüfte wasserführend angetroffen wurden, nicht aber der angrenzende Granitkörper. Zudem sind die in den Versuchen gefahrenen Umpumpraten und -mengen im Verhältnis zu dem vorhandenen Totvolumen der nicht abgepackerten Bereiche der Stollenbohrungen um ein Vielfaches größer.

Die Injektion des Wassers erfolgt mittels einer rückstoßfrei arbeitenden und in weiten Grenzen regelbaren MOHNO-Pumpe. Die Tracerinjektion erfolgt durch einen zuschaltbaren Bypass in das Injektionswasser. Durch die eingebauten dünnen Kunststoffrohre ist gewährleistet, daß der Tracer binnen weniger Minuten in den zu testenden Erzgangbereich gelangt.

Um eine Rezirkulation von Tracer zu vermeiden, werden die Versuche als offener, symmetrischer Dipol durchgeführt. Die Injektions- bzw Entnahmerate wird durch mehrere Schieberventile und Wasseruhren auf den nahezu gleichen Wert eingestellt. Da sich das Einstellen nicht ganz exakt durchführen läßt, wird darauf geachtet, daß die Entnahmerate, zur Verbesserung des Wiedererhaltes, stets geringfügig höher ist als die Injektionsrate. Das Injektionswasser wird aus dem hydraulisch abgetrennten südlichen Stollenbereich entnommen und in einem mit Stickstoff druckbeaufschlagten Kessel zwischengelagert, von wo es in die MOHNO-Pumpe gelangt. Die Druckbeaufschlagung des Vorratskessels mit Stickstoff (3 bar) verbes-

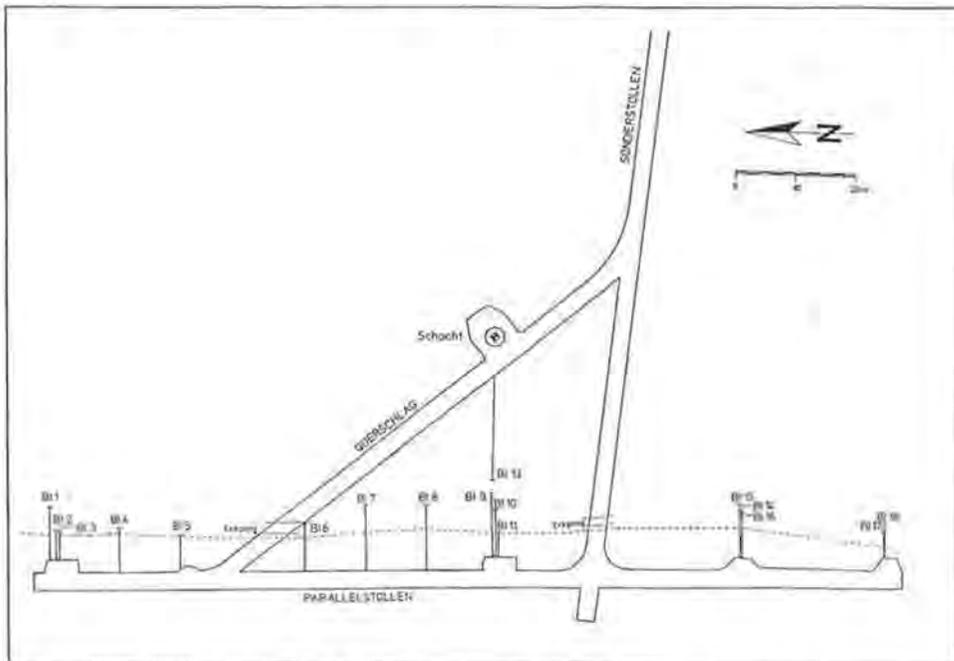




Fig. 3: Technische Einrichtungen im Parallelstollen. Von links nach rechts: Vertikaler Bohrungsfächer – Feldfluorimeter – automatische Probennehmer – Druckkessel – MOHNO-Pumpe.

sert die Gleichlauf Eigenschaften der Pumpe und soll eine hydrochemische Veränderung des Injektionswassers infolge von CO_2 - und O_2 -Infiltrationen aus der Stollenluft verhindern.

An die jeweilige Beprobungsbohrung ist ein kontinuierlich messendes Feldfluorimeter angeschlossen, in dessen Bypass sich ein automatischer Probennehmer befindet, der über Magnetventile in kurzen Zeitintervallen die Probenflaschen abfüllt. Das Feldfluorimeter dient hierbei zur Überwachung und zur Wahl des geeigneten Probenintervalles. Das kontaminierte Wasser wird anschließend in einer Abwasserleitung aus dem Versuchsabschnitt abgeleitet (Fig. 3).

4. Hydraulische Voruntersuchungen

4.1. Tests unter konstanten P-Q-Bedingungen

Für die Dipol-Tracerexperimente wurden eine Reihe von Voruntersuchungen durchgeführt, die einerseits den hydraulischen Kontakt der Bohrungen untereinander nachweisen sollten und zum anderen das Ziel verfolgten, die Transmissivitäten im getesteten Erzgangabschnitt zu bestimmen. Des weiteren sollte überprüft werden, ob sich die Klüfte während der geplanten Versuche in ihrem hydraulischen Verhalten ändern können.

Zunächst wurden die Bohrungen über die MOHNO-Pumpe miteinander verbunden und es wurde eine Kreislaufströmung erzeugt. Da hierbei noch kein Tracer eingesetzt wurde, konnten die Versuche als geschlossener Dipol gefahren werden. Die Umpumpraten wurden dabei schrittweise und in gleichbleibenden Zeitintervallen erhöht, wobei die Wassermengen und die sich einstellenden hydraulischen Drücke an den Bohrungen kontinuierlich aufgezeichnet wurden. Es stellten sich, wie erwartet, schon nach kurzer Zeit (ein bis zwei Minuten) stationäre Fließbedingungen ein. Die MOHNO-Pumpe lief bei allen Druckstufen ohne meßbare Mengenschwankungen. Die Versuche wurden für mehrere Kombinationen von Injektions- und Entnahmebohrungen durchgeführt. Trägt man die gemessenen Pump-raten gegen den sich einstellenden hydraulischen Gradienten auf, so ordnen sich die Meßwerte, für den aufsteigenden wie auch für den absteigenden Druckverlauf, fast entlang einer Linie an. Da die Meßwerte in ihrem Verlauf auch keinerlei Knick aufweisen, kann hieraus geschlossen werden, daß durch die gefahrenen Pumpraten keine Aufweitung, Erosion oder Zuspülung von Klüften erfolgte (Fig. 4) und daß auch bei hohen Pumpraten (bis 23 l/min) kein Umschlagen der Strömung von laminaren zu turbulenten Fließbedingungen erfolgte (W. KOPPELBERG, 1986).

Aus diesen unter konstanten P-Q-Bedingungen durchgeführten Versuchen lassen sich, unter der zunächst vereinfachenden Annahme quasihomogen-isotroper Randbedingungen, die Transmissivitäten für die einzelnen Bohrungen (USBR, 1963) wie auch für einzelne Erzgangabschnitte (R. DEWIEST, 1965, D. WEBSTER et al., 1970) abschätzen. Auf die Angabe von k_f -Werten sollte bei solchen Abschätzungen ver-

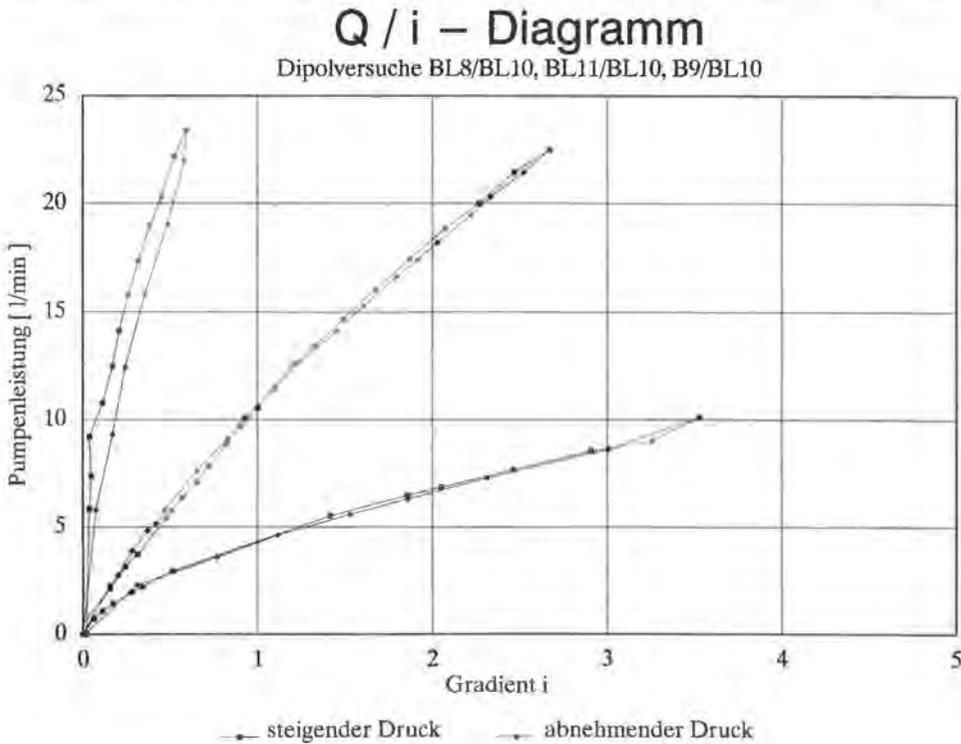


Fig. 4: Q/i-Diagramm für Hydrauliktests unter konstanten P-Q-Bedingungen.

zichtet werden, da die Transmissivität als integrierender Parameter über alle Diskontinuitäten die Durchlässigkeit eines geklüfteten Gebirgsbereiches besser charakterisiert als der k_f -Wert. Der k_f -Wert sollte daher hydraulischen Betrachtungen einer einzelnen Kluft vorbehalten bleiben.

4.2. Hydraulische Interferenztests

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden für verschiedene Bohrlochkombinationen Puls-Tests durchgeführt, während derer für ein kurzes Zeitintervall (10–20 Sek.) das Auslaufventil der Testbohrung geöffnet wurde. Die sich einstellenden Drücke wurden simultan am beprobten Bohrloch wie auch an den benachbarten Bohrungen gemessen. Die Druckänderungen wurden dimensionslos auf H/H_0 normiert und linear gegen die Zeit aufgetragen. Dieser Versuch hat den prinzipiellen Vorteil, daß Inhomogenitäten hinsichtlich der Druckausbreitung aufgrund eines eingeschränkten hydraulischen Kontaktes, sei es durch erniedrigte Transmissivitäten, durch sich schließende Klüfte oder durch nachlassende Vernetzung diskreter Kluftscharen, deutlich in Erscheinung treten. Stehen zwei benachbarte Bohrungen in einem guten hydraulischen Kontakt zueinander, so zeigt das Druckänderungsverhalten der Nachbarbohrung ein zwar gedämpftes, aber nur wenig phasenverschobenes Drucksignal. Ist das nicht der Fall, so liefert eine Nachbarbohrung prinzipiell ein stark gedämpftes und zudem deutlich phasenverschobenes Druckänderungssignal (Fig. 5).

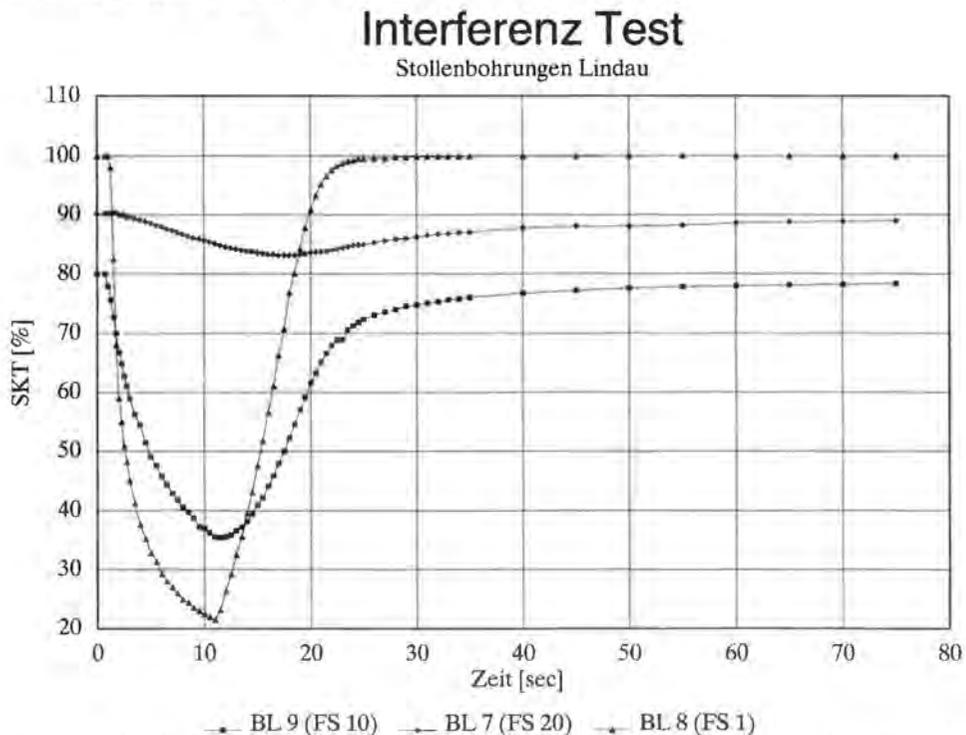


Fig. 5: Hydraulische Interferenztests – zur besseren Unterscheidung gestaffelt und mit Verstärkungsfaktoren (FS) dargestellt.

Mit diesem Test kann somit eine erste Information über den Grad der hydraulischen Kopplung einzelner Erzgangabschnitte erhalten werden. Unter der Annahme, daß die Fließbewegung des Wassers zunächst nur entlang größerer Klüfte erfolgt, kann hieraus eine erste Abschätzung über die Größenordnung der lateralen Erstreckung einer diskreten Klufte getroffen werden.

5. Dipolversuche

Im zentralen Erzgangabschnitt wurden Dipol-Tracerexperimente für verschiedene Kombinationen von Injektions- und Beprobungsbohrungen durchgeführt. Die Distanzen bei diesen Versuchen variierten zwischen 10 und 21 m.

5.1. Theoretische Grundlagen

Theoretische Abhandlungen über den hydraulischen Dipol finden sich bereits bei M. MUSKAT (1949), der sich mit der Materie im Hinblick auf die sekundäre Ölförderung beschäftigte. Eine analytische Betrachtung des symmetrischen Dipol-Tracerexperimentes wird von D. S. WEBSTER (1970) geliefert. Der hydraulische Dipol im Zusammenhang mit den Migrationsexperimenten im Felslabor Grimsel der NAGRA für den allgemeinen Fall (ungleiche Injektions- und Entnahmeraten) wird von F. HERZOG (1990) behandelt.

Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen symmetrischen hydraulischen Dipol in einem stagnierenden Fließfeld. Eine aufgeprägte Kreislaufströmung im gesteteten Erzgangabschnitt hat somit keine Trennstromlinie. Das entstehende Fließfeld nimmt daher den gesamten zur Verfügung stehenden Hohlraumanteil in der Gangmatrix in Anspruch. Stets unter der vereinfachenden Annahme von homogen-isotropen Randbedingungen betrachtet, sind die Potentiallinien Kreise um die Injektions- bzw. Entnahmebohrung. Die Stromlinien verlaufen dann folglich entlang von Kreisen, deren Mittelpunkte auf der Symmetrieachse bei $L/2$ liegen (Fig. 6). Ein Wasserteilchen, das die Injektionsbohrung unter dem Winkel φ ($\varphi(\text{rad}) \in [0 \rightarrow \pi]$) verläßt, tritt aus Symmetriegründen unter dem gleichen Winkel in die Beprobungsbohrung wieder ein. Betrachtet man zwei beliebige benachbarte Stromlinien, die unter dem Winkel φ_1 und φ_2 die Injektionsbohrung verlassen, so läßt sich unter Berücksichtigung der Aquifermächtigkeit (m) und des Porenanteils (ε) eine Stromröhre definieren, die zwischen den beiden Stromlinien liegt. Die Zeit (τ_a), die benötigt wird, diese Stromröhre zu füllen, entspricht gleichzeitig der Erstankunftszeit (τ_a) eines Wasserteilchens in der Beprobungsbohrung, das die Injektionsbohrung zum Zeitpunkt $t = 0$ verlassen hat. Die Laufzeit (τ_a) eines Wasserteilchens entlang einer beliebigen Stromröhre ($\varphi > 0$) wird von D. S. WEBSTER (1970) analytisch beschrieben zu

$$\tau_a = \varepsilon m \frac{\pi L^2}{q_0} \left[\frac{1 - \varphi \cot \varphi}{\sin^2 \varphi} \right] \quad (1)$$

Dieser Ausdruck ist jedoch für $\varphi = 0$, also für die kürzeste Distanz (L) zwischen Injektions- und Entnahmebohrung, nicht definiert.

Für sehr kleine Winkel (φ gegen 0) strebt der Rechteckklammerausdruck wie auch dessen 1. Ableitung

$$\frac{1}{1 + 2\cos^2\varphi} \rightarrow \frac{1}{3}, \text{ wenn } \varphi \rightarrow 0 \quad (2)$$

dem gleichen Grenzwert zu. Somit vereinfacht sich die Gleichung (1) zu

$$t_{s0} = \frac{1}{3} \varepsilon m \frac{\pi L^2}{q_0} \quad (3)$$

der Erstankunftszeit für ein Wasserteilchen entlang der kürzesten Verbindung zwischen Entnahme- und Beprobungsbohrung. Die Ankunftszeiten aller restlichen

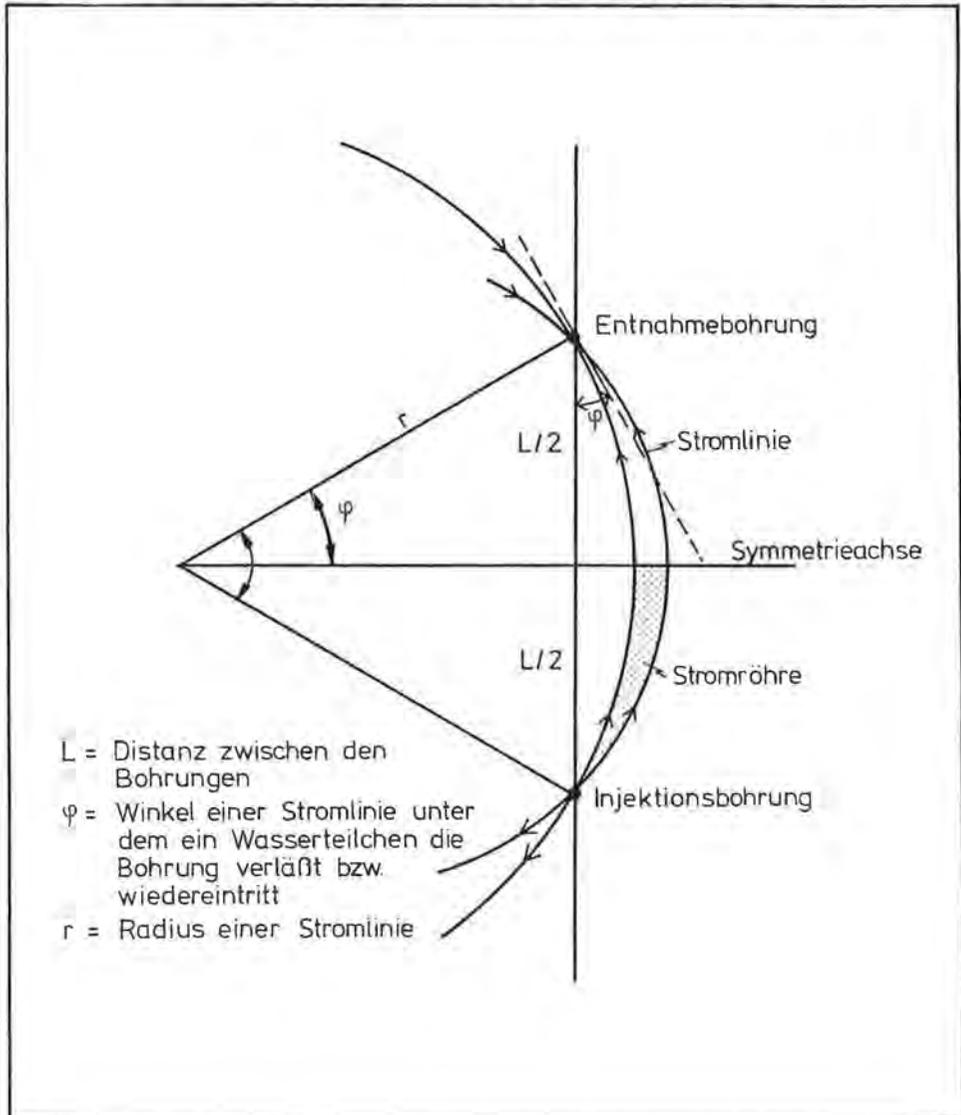


Fig. 6: Anordnung der Stromröhren bei einem symmetrischen, hydraulischen Dipol (homogen-isotroper Modellansatz).

Stromröhren (t_a) können als Verhältnis zur Erstankunftszeit (t_{a0}) geschrieben werden als

$$\frac{t_a}{t_{a0}} = 3 \left[\frac{1 - \varphi \cot \varphi}{\sin^2 \varphi} \right] \quad (4)$$

Die Gleichung (3) ist praktisch identisch mit der von F. HERZOG (1990, Gleichung 12.b) angegebenen Transitzeit, für den von ihm als Spezialfall behandelten symmetrischen Dipol. Trägt man das Verhältnis der Ankunftszeiten (t_a/t_{a0}) für beliebige Stromröhren in Abhängigkeit vom Austrittswinkel (φ) eines Wasserpartikels aus der Injektionsbohrung auf, so wird deutlich, daß ab einem Austrittswinkel $\varphi > \pi/2$ (entspricht dem „rückwärtig“ injizierten Anteil der Stromröhren) die Ankunftszeiten für diese Stromröhren mit zunehmendem Austrittswinkel (φ) sehr schnell anwachsen (Fig. 7). Ein Umformen der Gleichung (3) liefert den Parameter ε_m :

$$\varepsilon_m = \frac{3 q_0 \cdot t_{a0}}{\pi L^2} \quad (5)$$

Unter der Annahme, daß die Ausbreitung des Wassers zunächst nur entlang größerer Klüfte erfolgt, stellt der Parameter ε_m die effektive Aquifermächtigkeit dar. Unter der weiteren Voraussetzung der Gültigkeit des Darcy'schen Gesetzes ist dieser Parameter mit der hydraulisch wirksamen Klüftöffnungsweite gleichzusetzen. Kennt man die relative Klüfthäufigkeit (n) über die getestete Aquifermächtigkeit (m), so kann man hieraus eine mittlere Klüftöffnungsweite (2b) abschätzen.

Ankunftszeitenverteilung

Dipolexperiment

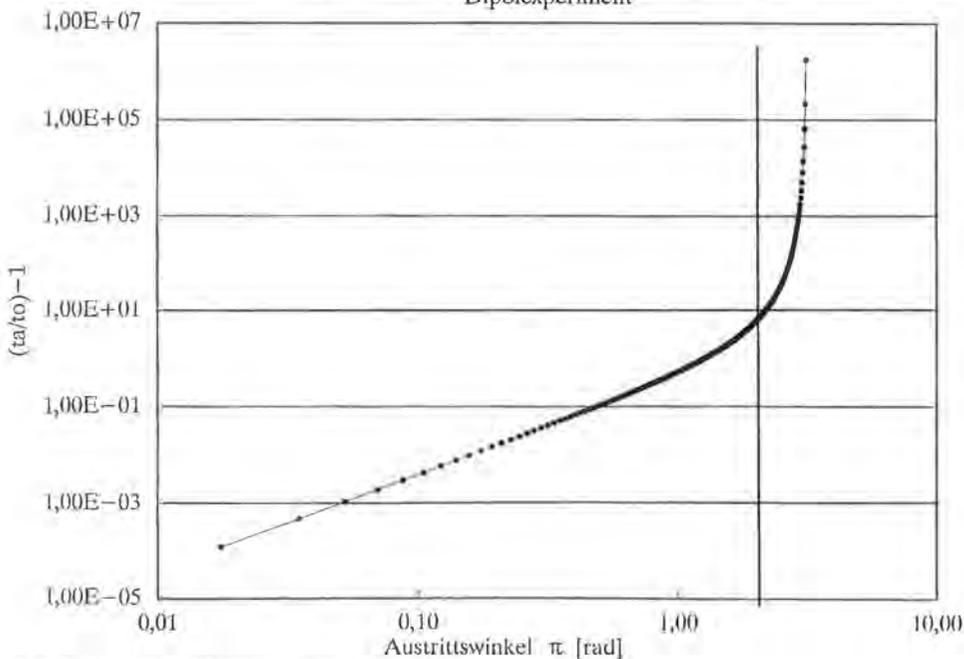


Fig. 7: Ankunftszeitenverteilung für ein Dipolexperiment.

5.2. Ergebnisse der Dipolversuche

Die Dipolexperimente 1 und 3 wurden in Bereichen des Erzganges Hermann durchgeführt, für welche die Interferenztests auf einen guten hydraulischen Kontakt zwischen Injektions- und Entnahmebohrung hinwiesen. Das Dipolexperiment 1 wurde über eine horizontale Distanz von 11,2 m durchgeführt. Eingabe- und Beprobungsbohrung waren zwei Horizontalbohrungen (BL 8, BL 10). Das dritte Experiment ging über eine vertikal angeordnete Distanz von 16,2 m und wurde zwischen zwei Schrägbohrungen (BL 9, BL 11) durchgeführt. Beide Dipol-Tracerexperimente zeichnen sich durch eine kurze Erstankunftszeit des Tracers innerhalb von 35 Minuten aus, und in beiden Fällen wurde die Maximalkonzentration innerhalb von etwa einer Stunde erreicht (Fig. 8). Die Durchgangskurven zeigen ein scharfes Konzentrationsmaximum und gehen in ihrem weiteren Verlauf, nach einem zunächst steilen Abfall der gemessenen Konzentrationen, in einen langen Auslauf über. Bei beiden Versuchen wurde der 5%-Wert der Maximalkonzentration innerhalb von weniger als acht Stunden Versuchslaufzeit bereits wieder unterschritten.

Das Dipolexperiment 4 ging über die nahezu doppelte Distanz (21,4 m) des ersten Versuches (Fig. 9). Die hydraulischen Interferenztests hatten für den zu testenden Bereich keinen so guten hydraulischen Kontakt der benutzten Horizontalbohrungen (BL 7, BL 10) zueinander ergeben. Der Ersteinsatz des Tracers erfolgte daher erst nach ca. dreieinhalb Stunden und die Maximalkonzentration wurde erst innerhalb von ca. acht Stunden nach Tracereingabe erreicht. Nach einer Versuchslaufzeit von mehr als 120 Stunden war die gemessene Konzentration erst wieder auf knapp unter 10% der Maximalkonzentration abgefallen. Der Konzentrationsverlauf des Dipolexperimentes 4 zeigt des weiteren kleine Nebenmaxima im abfallenden Konzentrationsast. Offensichtlich erfolgte die Ausbreitung des Tracers über mehrere Teilsysteme, die keinen Austausch untereinander haben.

Betrachtet man den Wiedererhalt des Tracers als Massenverhältnis im Vergleich zur eingespeisten Menge, so fällt auf, daß für die beiden ersten Experimente zwischen 43 und 48% des Tracers wiedergewonnen wurden. Das Dipolexperiment 4 zeigte hingegen lediglich einen Wiedererhalt in der Größenordnung von knapp 1,5% bis zum Zeitpunkt des Versuchsabbruches.

Die Bohrbefunde für den betrachteten Erzgangbereich weisen auf eine relativ stark schwankende Erzgangmächtigkeit (Tab. 1) und eine variierende Anzahl von

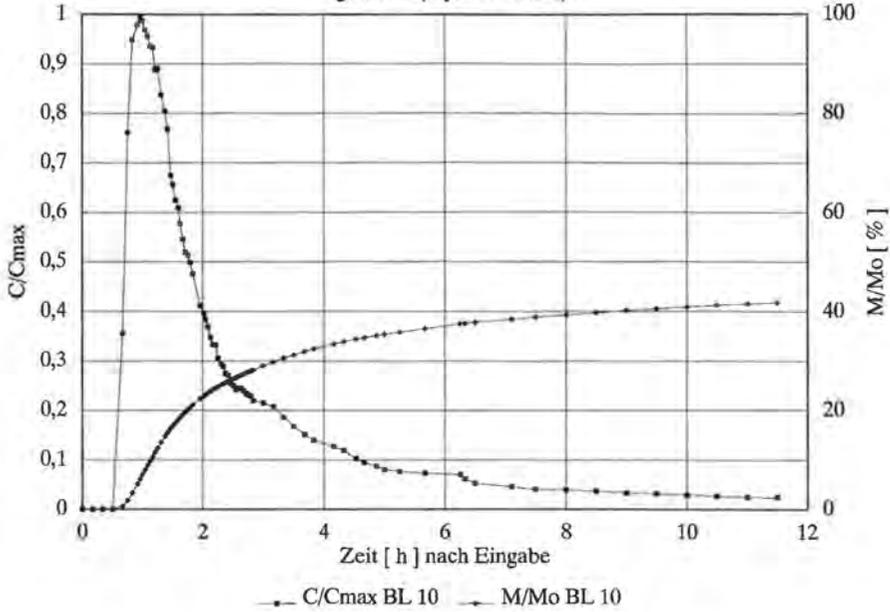
Tab. 1: Bohrbefunde aus dem Lindau-Stollen (zentraler Abschnitt des Parallelstollens).

Bohrung	Mächtigkeit [m]	Anzahl der Klüfte
BL 11	1,35	4
BL 10	2,00	5
BL 9	3,07	3
BL 8	1,05	3
BL 7	0,85	1 (?)

im Kernmaterial sichtbar offenen und mit hämatitischen Belägen versehenen Klüften hin. Für die weitere Auswertung wurde das arithmetische Mittel über die Erzgangmächtigkeit des getesteten Versuchsabschnittes zugrundegelegt.

Dipol-Versuch 1

2 gr Eosin (Injektion BL 8)



Dipol-Versuch 3

2 gr Pyranin (Injektion BL 9)

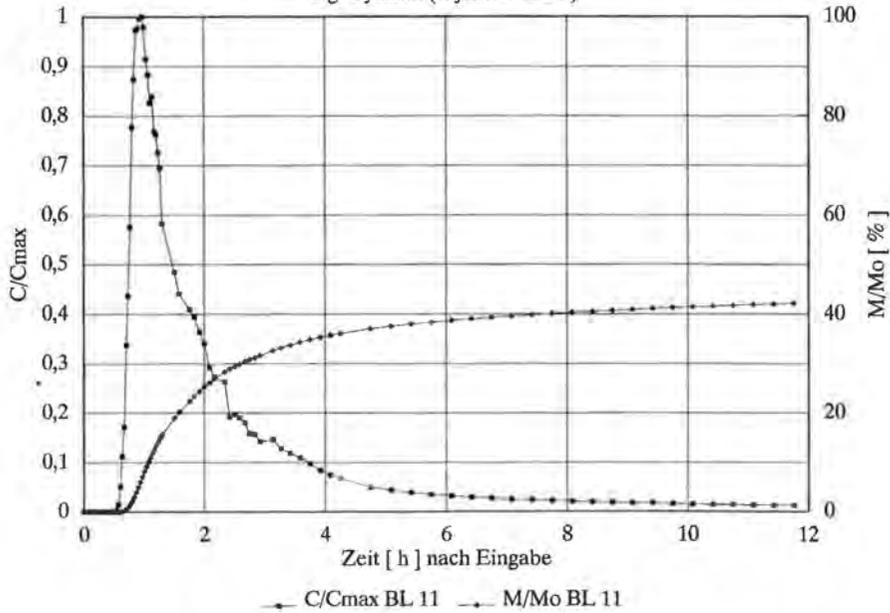


Fig. 8: Ergebnisse der Dipol-Tests 1 und 2. Dipol-Test 1 zwischen Bohrung BL 8 – BL 10. Dipol-Test 2 zwischen Bohrung BL 9 – BL 11.

Dipol-Versuch 4

10 gr Pyranin (Injektion BL 7)

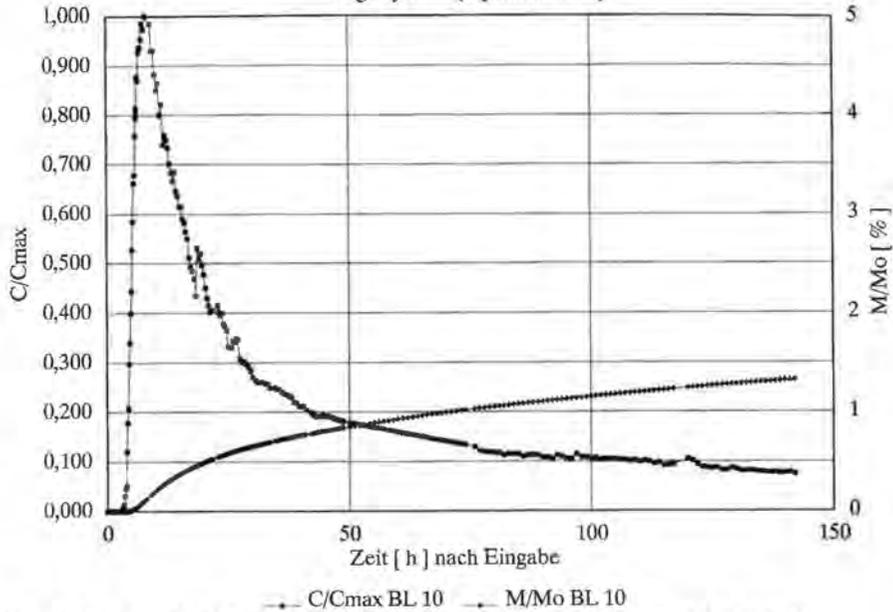


Fig. 9: Ergebnis des Dipol-Tests 4, durchgeführt zwischen Bohrung BL 7-BL 10.

Schätzt man die effektive Aquifermächtigkeit (ϵm) gemäß Gleichung (5) für den quasihomogen-isotropen Modellansatz ab, so ergeben sich Werte in der Größenordnung zwischen 0,8 und 3,4 mm. Dividiert man diese Werte noch durch die in der Beobachtungsbohrung angetroffenen offenen Klüfte im Kernmaterial, so ergibt sich eine hydraulisch wirksame, mittlere Kluftöffnungsweite ($2b$), die sich im Bereich von 0,2–0,7 mm, also im Bereich von wenigen Zehntelmillimetern, bewegt (Tab. 2).

Tab. 2: Abschätzung der effektiven Aquifermächtigkeit und der mittleren Kluftöffnungsweite aus den Dipol-Tests (q_0 = Pumprate; m = mittlere Mächtigkeit des Erzganges über die Versuchslaufstrecke; t_{a0} = Erstankunftszeit des Tracers; ϵm = effektive Aquifermächtigkeit; $2b$ = abgeschätzte mittlere Kluftöffnungsweite).

Versuch	q_0 [m ³ /s]	m (mittel) [m]	t_{a0} [s]	ϵ	ϵm ($2b$) [mm]
Dipol 1 BL 8/10 (11,20 m)	$1,26 \times 10^{-4}$	1,53	2100	0,0013	1,98 (0,66)
Dipol 3 BL 9/11 (16,20 m)	$1,10 \times 10^{-4}$	2,15	2100	0,0004	0,84 (0,22)
Dipol 4 BL 7/10 (21,40 m)	$1,27 \times 10^{-4}$	1,30	12 780	0,0026	3,38 (0,68)

Der Quotient aus der beobachteten Erstankunftszeit (t_{10}) und dem hydraulischen Gradienten (i) (aus der Potentialdifferenz zwischen den Bohrungen), multipliziert mit dem Parameter ϵ_m , liefert eine Abschätzungsmöglichkeit für die Transmissivität des getesteten Erzgangsabschnittes. Diese Transmissivität ist jedoch nur kennzeichnend für die kürzeste Verbindungslinie zwischen Injektions- und Entnahmebohrung. Vergleicht man diese, auf dem physikalischen Prinzip der Bewegung eines Wasserpartikels entlang der kürzesten Verbindungslinie beruhende, Transmissivitätsabschätzung mit den Transmissivitäten, die sich aus den Druckunterschieden an den einzelnen Bohrungen während eines Umpumpversuches errechnen lassen, so liegen beide Abschätzungen generell in der Größenordnung von $10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ (Tab. 3). Es fällt auf, daß sich jedoch für den Dipolversuch 4 Transmissivitäten ergeben, die generell eine Größenordnung höher liegen als die Werte aus den Dipolexperimenten 1 und 2.

Tab. 3: Vergleich der Transmissivitäten (T), ermittelt aus Dipol-Tracerversuchen, mit den Transmissivitäten aus den Hydrauliktests (stationäre Fließbedingungen).

Versuch	v_{max} [m/s]	Grad. i	ϵ	T Tracer [m ² /s]	T Hydr. [m ² /s]
Dipol 1 BL 8/10 (11,20 m)	$5,33 \times 10^{-3}$	1,86	0,0013	$5,69 \times 10^{-6}$	$1,36 \times 10^{-5}$
Dipol 3 BL 9/11 (16,20 m)	$7,71 \times 10^{-3}$	0,41	0,0004	$1,61 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$
Dipol 4 BL 7/10 (21,40 m)	$1,67 \times 10^{-3}$	0,04 ?	0,0026	$1,40 \times 10^{-4}$	$2,89 \times 10^{-4}$

Berücksichtigt man den geringen Wiedererhalt, der bei diesem Experiment erreicht wurde (Fig. 8), so liegt die Vermutung nahe, daß die hierbei benutzte Injektions- bzw. Entnahmebohrungen Klüftungsbereiche anschneiden, die zwar eine hohe Transmissivität besitzen, aber nicht im direkten hydraulischen Kontakt zueinander stehen. Das heißt, die Verbindung der in diesem Versuch benutzten Bohrungen erfolgte auch über den Feinklüftungsbereich des Erzganges, der eine deutlich geringere Transmissivität aufweist, aber die Masse des Tracers wurde vermutlich in Bereiche injiziert, die nicht miteinander in Verbindung stehen. Folglich muß dann auch die Tracermenge, die in diesen Erzgangsbereich injiziert wird, und damit auch der mögliche Wiedererhalt, wesentlich kleiner ausfallen als in den anderen vorhergegangenen Versuchen.

5.3. Diskussion der Versuchsergebnisse

Ungeachtet der zunächst getroffenen Modellannahme quasihomogen-isotroper Randbedingungen wird die Ausbreitung des Tracers innerhalb einer Stromröhre sowohl von der hydrodynamischen Dispersion wie auch von Diffusionsvorgängen in die Matrix beeinflusst. Unter diesem Gesichtspunkt muß man den Wiedererhalt der Tracer in den Versuchen bewerten.

Würde sich die Ausbreitung von Tracern in einer Stromröhre ohne jegliche Dispersion und ohne Diffusionsvorgänge vollziehen, also unter piston-flow Bedingungen, so wäre zum Beispiel für die Dipolversuche 1 und 2 ein Wiedererhalt von maximal ca. 75% bis zum Versuchsende zu erwarten. Dieser theoretische, maximale Wiedererhalt für einen hydraulischen Dipol unter **stagnierendem** natürlichen Fließfeld (wesentlicher Unterschied zum FLG der NAGRA!) leitet sich aus dem t_a/t_{a0} -Verhältnis (Formel 4) ab. Eine Versuchslaufzeit von 12 Stunden und eine Erstankunftszeit (t_{a0}) von 35 Minuten entspricht einem t_a/t_{a0} -Verhältnis von 20,5. Diesem t_a/t_{a0} -Verhältnis entspricht die Erstankunftszeit eines Wasserteilchens, das unter einem Winkel von 135° gegenüber der Verbindungslinie (L) die Injektionsbohrung zum Zeitpunkt $t = 0$ verlassen hat. Alle anderen Wasserteilchen, die unter einem noch größeren Winkel, also noch mehr rückwärtig gerichtet die Injektionsbohrung verließen, können zum Versuchsende ($t = 12$ h) noch nicht die Beprobungsbohrung erreicht haben. Unter der Annahme radial-symmetrischer Injektion in den Erzgang ist der Gesamtfluß, wie auch der Anteil des Tracers in die einzelnen Stromröhren, gleich verteilt. Der Wiedererhalt des Tracers wird somit vom prozentualen Anteil der Stromröhren kontrolliert, über die der Tracer bis zum Versuchsende die Beprobungsbohrung erreicht haben kann.

Unter realen Bedingungen wird die Migration des Tracers durch die hydrodynamische Dispersion und die Diffusion in die randliche Matrix beeinflusst. Beide Vorgänge beeinflussen die Tracerkonzentration in einer Stromröhre längs und normal zur Ausbreitungsrichtung.

Somit stellt die Abschätzung des effektiv, hydraulisch nutzbaren Hohlraumanteils (ϵ) eher einen unteren Grenzwert dar, da aufgrund der hydrodynamischen Dispersion einzelne Traceranteile der Hauptmasse der Tracerwolke fingerartig voraneilen können. Der hydraulisch effektiv nutzbare Porenanteil (ϵ), der somit auch den hydraulisch nutzbaren Kluftanteil (n_f) repräsentiert, ist dennoch wesentlich kleiner als das gesamte Hohlraumvolumen (n_p) des getesteten Erzgangsabschnittes. Dieses Gesamt-Hohlraumvolumen steht der Fließbewegung offensichtlich nur zu einem sehr geringen Anteil zur Verfügung. Dieser Gesamthohlraum setzt sich im vorliegenden Falle aus dem Feinklüftungsbereich sowie aus den sekundären Lösungshohlräumen („dead-end pores“) zusammen.⁴

Zusammenfassung

Dipol-Tracertests ermöglichen die Abschätzung des effektiven Hohlraumanteiles (ϵ) in einem Erzgang, der für das Fließen in einem Kluftgrundwasserleiter zur Verfügung steht. Dieser für die reine Fließbewegung zur Verfügung stehende Hohlraumanteil kann mit der hydraulisch wirksamen Kluftporosität (n_f) gleichgesetzt werden. Somit kann ein Faktor, der für mathematische Transportmodelle benötigt wird, aus dem Versuch direkt bestimmt werden. Der für den konvektiven Stofftransport zur Verfügung stehende Hohlraumanteil ist viel kleiner als der Gesamthohlraumanteil der Gangmatrix. Der Gesamthohlraumanteil wird im wesentlichen durch Diffusionsvorgänge in stagnierende, der Kluftwasserströmung verschlossene Bereiche beeinflusst. Da diese wesentlich größer sind, beeinflussen sie in starkem Maß die Wiederausbringung bei einem Tracerversuch.

Die durchgeführten Versuche belegen deutlich, daß natürliche Kluftscharen in einem Störungssystem eine nur begrenzte laterale Erstreckung besitzen. In Berei-

chen, in denen die Vernetzung einzelner Kluftscharen eingeschränkt ist, erfolgt die Ausbreitung eines Tracers nur sehr verzögert. Somit beeinflussen diese Bereiche in wesentlichem Maß die mittlere Verweilzeit des Wassers.

Durch hydraulische Interferenzttests können vorab eines Dipol-Tracerexperimentes die optimalen Versuchslaufstrecken festgelegt werden. Eine optimale Versuchslaufstrecke für einen Tracertest stellt eine Kluftschär oder Einzelkluft dar, die innerhalb des Versuchsmaßstabes einen guten hydraulischen Kontakt der gestesteten Bohrungen untereinander gewährleistet.

Literatur

- ACKERMANN, G., A. BLINDE, & H. HÖTZL (1982): Anwendung der Markierungstechnik zur Untersuchung der Entwässerungsfunktion eines Erzganges. – Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, 28/II, 423–434, Bern.
- BLINDE, A., E. FABIAN & H. HÖTZL (1982): In situ investigation and sealing of a cavernous ore load in the foundation area of a dam site. – Comm. Intern. Grand Barrages, Q 53, R 16, 289–307, Rio de Janeiro.
- DEWIESE, R. J. M. (1965): Geohydrology. – 922 p., McGraw-Hill, Book Company Inc., New York.
- HERZOG, F. (1990): Transport modelling for the Grimsel Migration Experiments: Streamtube approach, first results and predictions. – Paul Scherrer Institute, TM-41-90-18 (unveröff.), Würenlingen.
- HIMMELSBACH, T. & H. HÖTZL (1990): Hydraulic investigations in high permeable Fault and Fracture Zones of jointed Granites. – In: "International Symposium on Water Resources of Montaneous Regions, IV", Lausanne (im Druck).
- KOPPELBERG, W. (1986): Numerische und statistische Untersuchungen zur Durchlässigkeit geklüfteter geologischer Körper und ihrer Bestimmung durch Wasserdruckversuche. – Mitt. Ing.- u. Hydrogeol., 23, 299 S., Aachen.
- LOHR, A. (1969): Beitrag zur Ermittlung des KH-Wertes durch hydraulische Feldversuche. – Das Gas- und Wasserfach, 110 (14), 369–376.
- MELLERT, J. (1989): Geologische Kartierung im Gewinn Etziboden. – Unveröff. Diplomarbeit, Lehrstuhl f. Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe.
- MUSKAT, M. (1949): Physical Principles of Oil Production. – McGraw-Hill, Book Company Inc., New York.
- RENK, A. (1981): Zum Mineralgehalt des Hermannsganges (Südschwarzwald). – Interner Ber. GLA Baden-Württemberg, 61 S., Freiburg.
- TROSCHKE, B. (1990): Geologische Kartierung im Gewinn Gaishalter Moos (Südschwarzwald). – Unveröff. Diplomarbeit, Lehrstuhl f. Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe.
- WEBSTER, D. S., J. F. PROCTOR & I. W. MARINE (1970): Two-Well Tracer Test in Fractured Crystalline Rock. – USGS-Water Supply Paper, 1544-I, 1–19, Washington.
- WITTEK, Th. (1991): In situ Untersuchungen zum Durchlässigkeitsverhalten des Feinklüftungsbereiches von Albtalgranit und Erzgang Hermann und hydrochemische Analyse der Kluftwässer. – Unveröff. Diplomarbeit, Lehrstuhl f. Angewandte Geologie (in Vorb.), Universität Karlsruhe.

Summary

This paper deals with hydraulic dipole tests carried out to investigate the transport processes in a fissured aquifer. A dipole tracer test gives a first estimation about the dynamic porosity. The latter is equivalent to the fissure porosity under the assumption that the fluid migration occurs only in the hydraulically coupled fractures. The fissure porosity is essential for mathema-

tical transport modelling. The dipole experiment has therefore the principle advantage that this parameter can directly be fixed by an in-situ experiment. In addition it allows to evaluate the lateral extension of a discrete set of joints and fractures by the means of the mean transit time of tracers.

With the help of previously executed hydraulic interference tests the hydraulic interconnection of the test wells can be determined. It gives an opportunity to select the well pair showing the best conditions to run a dipole test.

Dank

Die SCHLUCHSEEWERKE AG, die als Eigentümer den Lindau-Stollen unterhält, ermöglichte durch die Bereitstellung der Strom- und Lichteinrichtungen die Durchführung der Versuche. Für die gewährte technische Unterstützung möchte ich der SCHLUCHSEEWERKE AG herzlichst danken. Der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) danke ich für die Bereitstellung von hochempfindlichen Drucksensoren. Besonderer Dank gilt insbesondere den Mitgliedern der Internationalen Arbeitsgruppe für Tracerhydrologie (ATH), die die Experimente mit fachlicher und technischer Hilfe unterstützten. Nicht zuletzt möchte ich mich aber auch bei den Diplomanden und Studenten herzlichst bedanken, die mit engagierter Mitarbeit zum Gelingen der Versuche beigetragen haben.

Appendix

Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

- t_a = Ankunftszeit eines Wasserteilchens entlang einer beliebigen Stromröhre;
- t_{a0} = Ankunftszeit eines Wasserteilchens entlang der kürzesten Verbindungs-
linie L;
- L = Distanz zwischen Injektions- und Entnahmebohrung;
- φ = Austrittswinkel, unter dem ein Wasserteilchen die Injektionsbohrung ver-
läßt;
- ε = effektiv hydraulisch nutzbarer Hohlraumanteil;
- m = Mächtigkeit des Aquifers;
- εm = effektive Aquifermächtigkeit;
- n = Anzahl der sichtbar offenen Klüfte im Kernmaterial;
- n_f = hydraulisch nutzbarer Klufanteil;
- n_p = Matrixporosität;
- 2b = Klufföffnungsweite.