

BEITRAEGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ - HYDROLOGIE	Bd. 28 II	S. 423 - 434	Bern, 1982
--	-----------	--------------	------------

## ANWENDUNG DER MARKIERUNGSTECHNIK ZUR UNTERSUCHUNG DER ENT-WAESSERUNGSFUNKTION EINES ERZGANGES

---

Günter Ackermann<sup>+</sup>, Alfred Blinde<sup>++</sup>, Ernst Fabian<sup>+++</sup> und  
Heinz Hötzl<sup>+</sup>

<sup>+</sup>Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe

<sup>++</sup>Institut für Boden- und Felsmechanik der Universität Karlsruhe

<sup>+++</sup>Schluchseewerk AG., Freiburg /Breisgau

Abstract: INVESTIGATIONS ON THE DRAINAGE FUNCTION OF AN ORE  
LODE BY MEANS OF TRACER TECHNIQUES

In the area of a planned storage reservoir in the Southern Black Forest the exposed granite is crossed by a cavernous ore vein. In order to assess the tightness of the lode crossing the barrage site, its permeability and its influence on the neighbouring rocks had to be investigated.

To detect the hydrogeologic conditions tracer tests were carried out with fluorescent dyes in this area which is well-developed through shafts, tunnels and many boreholes. In connection with artificial groundwater lowerings the drainage function of the ore lode could be detected and the effects of experimental sealing measures could be observed and assessed.

### 1. Einleitung

Die Markierungstechnik hat sich in der Hydrogeologie vor allem bei hohen Durchlässigkeiten des Untergrundes und großen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers als eine erfolgreiche und

auch kostengünstige Untersuchungsmethode erwiesen. Die Methode wird daher dort, wo solche hydraulischen Verhältnisse gegeben sind, nämlich im Karst oder auch bei groben Porenaquiferen, in zunehmendem Maße eingesetzt.

In Grundwasserleitern mit geringen Durchlässigkeiten, wie in feinkörnigen Porenaquiferen, vor allem aber im Kluftgrundwasserleiter, hat die Markierungstechnik noch keine so große Anwendung gefunden. Nachteilig machen sich hier die meist sehr geringen Fließgeschwindigkeiten bemerkbar, die eine großräumige Untersuchung, z.B. im Hinblick auf die Abgrenzung eines Einzugsgebietes, unmöglich machen. Schon bei relativ geringen Entfernungen kann es zu Verweilzeiten im Untergrund von mehreren Monaten bis zu einem Jahr und mehr kommen. Die bei praktischen Problemen leider vielfach kurzfristig zu erstellenden Beurteilungen schließen solche Langzeitversuche von vornherein aus. Auch hat die Unterschätzung der geringen Abstandsgeschwindigkeit verschiedentlich zu negativen Versuchsergebnissen geführt und damit die Bereitschaft, diese Methode im Kluftaquifer einzusetzen, gemindert.

Auf der anderen Seite sind aber bereits zahlreiche Beispiele publiziert, bei denen auch unter diesen eingeschränkten hydraulischen Bedingungen die Tracermethode erfolgreich zur Lösung der offenen Fragen beigetragen hat. Unser Bericht über Untersuchungen in einem Granitbereich mit einem durchsetzenden Erzgang soll ein weiterer Beitrag dazu sein und die Möglichkeit des sinnvollen Einsatzes der Markierungstechnik im Kluftgrundwasserleiter gerade auch bei praktischen Fragestellungen aufzeigen.

## 2. Problemstellung

Die Kraftwerksgesellschaft Schluchseewerk AG plant im südlichen Schwarzwald im Rahmen ihrer Werksgruppe Hotzenwald den Bau des Jahresspeichers Lindau. Der im Tal des Schwarzenbaches, wenige Kilometer südöstlich von Todtmoos, geplante Stausee soll bei einem Nutzinhalt von etwa 70 Mio  $m^3$  eine Fläche von 310 ha bedecken. Als Sperrenbauwerk ist ein Steinschüttdeamm mit Oberflächendichtung vorgesehen.

Geologisch wird der Untergrund des Stauraumes im wesentlichen vom karbonischen Albtalgranit und von Gneisanatexiten der Todtmooser Gneismasse aufgebaut. Oberflächennah wird das Gebiet von quartären Lockersedimenten eingenommen. Im wesentlichen steht würmeiszeitliche Grundmoräne mit Mächtigkeiten von bis zu 10 m an. Erwähnenswert ist eine quartäre *in situ* Zergrusung des Albtalgranits. Das völlig aufgelockerte Material wird als "Berglesand" bezeichnet. Durch einzelne Bohrungen sind Berglesandmächtigkeiten bis zu 36 m bekannt.

Im näheren Bereich der Sperrenstelle wird der Granit von mehreren bis über 100 m mächtigen WNW-SSE streichenden Granitporphyrgängen sowie von einem nahezu rechtwinkelig zur Dammachse angeordneten Erzgang durchsetzt. Das Gangmaterial dieses sogenannten Erzganges Hermann besteht im wesentlichen aus Quarz, grünlichem Flußspat sowie untergeordnet Beiglanz und Kupferkies. Auf die zuletzt genannten Minerale war im letzten Jahrhundert ein Bergbau umgegangen. Ein altes Stollensystem sowie mehrere Pingen zeugen noch davon. Bei den ersten Untersuchungen, gerade im Hinblick auf den alten Bergbau, wurde eine besondere Wasserwegigkeit und Durchlässigkeit des Erzganges festgestellt. Sie geht einerseits auf eine gangparallele Zerklüftung der unmittelbaren Begleitzone, vor allem aber auf die hohe Kavernösität des bis zu 2 m breiten Erzganges selbst zurück. Diese ist verursacht durch eine sekundäre Lösung der Flußspäte. Die dadurch entstandenen Hohlräume wurden nur teilweise durch jüngeren Quarz verfüllt.

Im Zusammenhang mit den schräg zum Erzgang angeordneten ebenfalls stärker geklüfteten Granitporphyrgängen bestand die Gefahr einer Um- bzw. Unterläufigkeit der Sperrenstelle. Da über die Vorflut des bis zu 1,7 km in den Stauraum hineinragenden Erzganges nichts bekannt war, stand nicht nur die Dichtheit der in Aussicht genommenen Sperrenstelle, sondern die Dichtheit des gesamten Stauraumes zur Diskussion. Für eine gesicherte hydrogeologische Beurteilung dieser Frage waren daher die hydraulische Tiefenwirkung und die zugehörige Vorflut des Erzganges, der Mechanismus der unterirdischen Entwässerung sowie das hydraulische Zusammenwirken von Erzgang und Granitporphyrgängen abzuklären.

### 3. Untersuchungsprogramm

#### 3.1 Allgemeine hydrogeologische und geotechnische Untersuchungen

Im Laufe der nun über mehr als 20 Jahre gehenden Planung wurden verschiedene Untersuchungen vorgenommen, um die Dichtigkeit und Tragfähigkeit der in Aussicht genommenen Sperrenstelle zu prüfen. Zur genauen Erfassung der Untergrundverhältnisse wurden zunächst umfangreiche Sondierungen durchgeführt. Allein auf den Erzgang wurden 83 Bohrungen mit zusammen 5.800 Bohrmetern abgeteuft. Zusätzlich wurden zwei bis zu 85 m tiefe Schächte bergmännisch aufgefahren sowie unter der Dammaufstandsfläche ein 660 m langer Stollen vorgetrieben, der auch später zu Kontrollzwecken verwendet werden soll (Fig. 1). Von einem parallel zum Erzgang angelegten Stollenast (Parallelstollen) wurden noch weitere Bohrungen auf dem Gang angesetzt, um die Verteilung und Veränderung der Wasserdrücke zu untersuchen. Begleitend wurden über die zuletzt genannten Bohrungen sogenannte Ablaufversuche durchgeführt.

Im Bereich der Verschneidung von Dammachse und Erzgang wurden erste Injektionsversuche ausgeführt. Hierbei wurde von der Oberfläche bzw. von Bohrnischen in einem Schacht über schräg angeordnete Bohrfächer Zement abgepreßt. Der dort bereits primär relativ dichte Gangabschnitt konnte durch diese ersten Injektionsmaßnahmen weiter abgedichtet werden, so daß beiderseits der Abdichtungszone Druckunterschiede von 3 bar und mehr auftreten.

Auf die Ergebnisse der hier angesprochenen Untersuchungen kann hier nicht im Detail eingegangen werden. Eine ausführliche Darstellung erfolgt an anderer Stelle (BLINDE, A., FABIAN, E., HÖTZL, H., 1982).

#### 3.2 Markierungsversuche

Zur Abklärung der im Rahmen der Problemstellung aufgezeigten offenen Fragen hinsichtlich der unterirdischen Entwässerung wurden parallel zu Wasserauffüll-, Wasserabpreß- und Wasserablaufversuchen gezielte Markierungen vorgenommen.

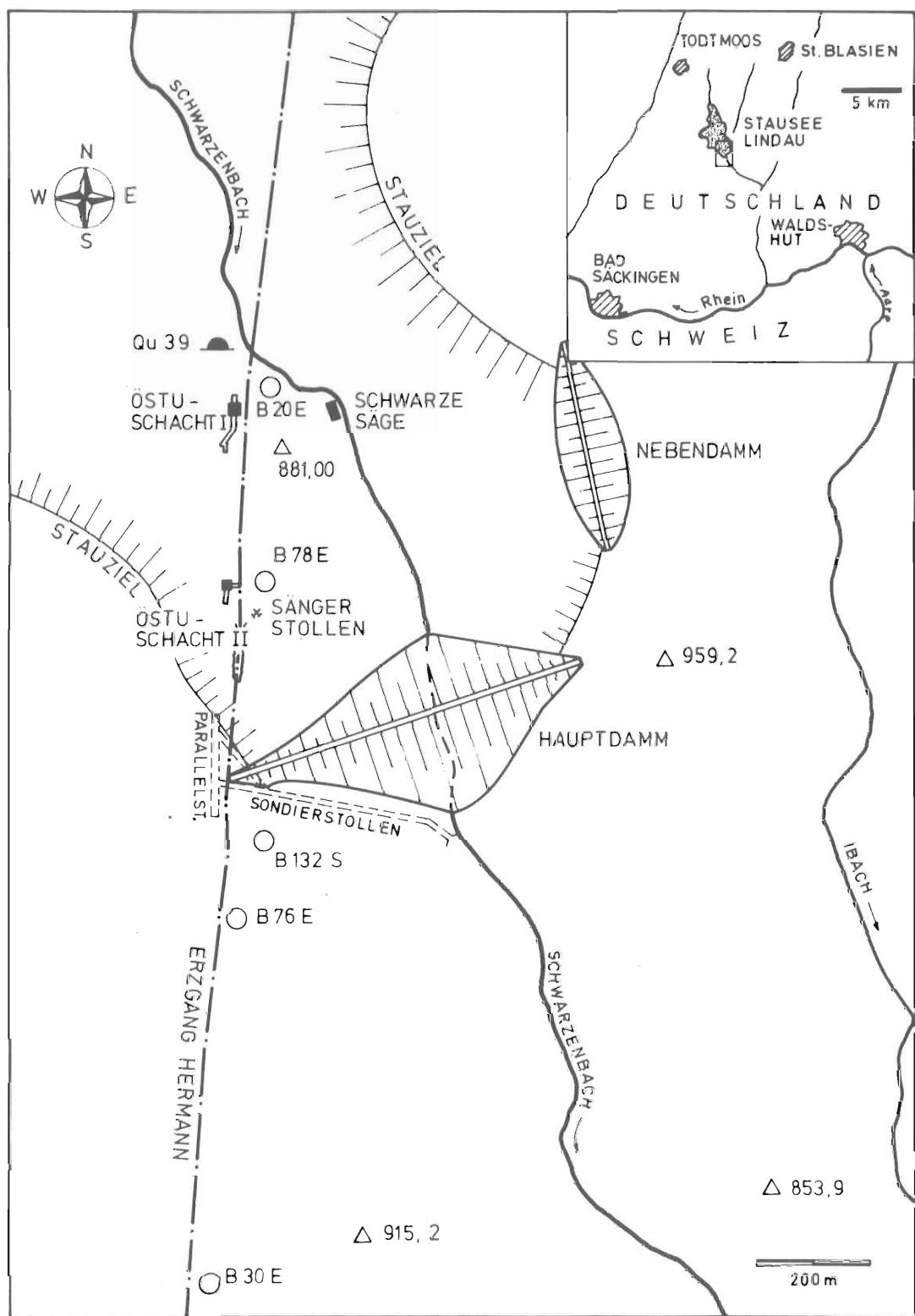


Fig. 1 Sperrenstelle des geplanten Stauseses Lindau  
Dam site of the planned storage reservoir Lindau

### 3.2.1 Markierungsversuch 1974

In einem wieder aufgefahrenen Bergbaustollen wurden Wasserfüllversuche vorgenommen. Bei Einleitungen bis zu 30 l/s über einen Zeitraum von 140 Stunden erfolgte keine Aufspiegelung. Um den Wiederaustritt des rasch abfließenden Wassers zu erfassen, speiste man noch mehrere Kilogramm Uranin ein. Beobachtet wurde nur visuell über einen Zeitraum von mehreren Monaten. Man konnte weder direkt noch indirekt über den Anstieg einer Quellschüttung den Wiederaustritt des Tracers feststellen.

Im Zuge der Beprobung für den Versuch 1978 wurde in den beiden nördlichsten Bohrungen des Parallelstollens, nur 200 m von der alten Eingabestelle entfernt, eine Uraningrundlast von etwa 0,01 mg/m<sup>3</sup> gemessen, die offenbar auf diesen ersten Versuch zurückzuführen ist.

### 3.2.2 Markierungsversuche 1978 bis 1980

Im Jahre 1978 wurde von unserer Seite mit der Vorbereitung weiterer Markierungsversuche begonnen. Neben der hydrogeologischen Detailaufnahme der Umgebung der Sperrenstelle im Maßstab 1:2.000 umfaßten diese Vorbereitungen die Auswahl geeigneter Einspeisstellen sowie den Ausbau ausgewählter Quellen für die Aktivkohlebeprbung. Insgesamt wurden 24 Quellen überlaufende Bohrlöcher und Bäche beprobt. Ein weiterer Schwerpunkt wurde auf die Beobachtung der Wässer im Sondierstollen gelegt.

Mit dem ersten Markierungsversuch (Einspeisung Juni 1978) sollten die hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich nördlich des Sondierstollens abgeklärt werden. Zum Zeitpunkt der Eingabe sowie im ersten Monat danach waren die Bohrungen im Nordteil des Parallelstollens geöffnet und daher der Wasserspiegel zugehörigen Abschnitt des Erzganges abgesenkt. Für die Einspeisung wurden drei Bohrlöcher ausgewählt (s. Fig. 1):

- Als nördlichste Eingabestelle wurde Bohrloch B 20 E verwendet, eine Schrägbohrung, die den Erzgang in 130 m Teufe durchfährt. Es wurden 1,5 kg Uranin mit 4.000 l Wasser einschließlich Vor- und Nachspülung eingespeist.

- 400 m südlich wurden in B 78 E, das den Erzgang bei 75 m erreicht, 1,5 kg Tinopal CBS-X eingegeben. Die Spülung betrug hier insgesamt 3.500 l Wasser.
- Unmittelbar oberhalb des Sondierstollen wurden in die Vertikalbohrung B 75 E 1,5 kg Rhodamin FB mit 4.000 l Spülwasser eingebracht.

Etwa eine halbe Stunde nach Einspeisung trat aus den Bohrlöchern 9 und 10 im Nordteil des Parallelstollen Rhodamin in sehr hoher Konzentration aus (0,4 g/l). Ein sichtbarer Farbstoffausritt im Stollenbereich mußte in Kauf genommen werden, um mögliche Austritte an der Oberfläche erfassen zu können. In unmittelbarer Nähe der Bohrlöcher 9 und 10 waren Austritte des Tracers im Erzgang selbst, der vom Hauptstollen durchfahren wird, zu beobachten (Fig. 2). In diesem relativ kompakten Gangabschnitt trat Rhodamin in Haarklüften des Gangmaterials wie auch des unmittelbar angrenzenden Nebengesteins aus. Nördlich der beschriebenen Austrittsstelle konnten in den übrigen beprobten Bohrlöchern des Parallelstollen keine Rhodaminspuren nachgewiesen werden. Auch sämtliche beprobte Quellen blieben Rhodamin-negativ.

Die beiden nördlich des Sondierstollen eingespeisten Tracer Uranin und Tinopal konnten zunächst nur in den Wässern der geöffneten Bohrlöcher im Nordteil des Parallelstollen nachgewiesen werden: in den drei im äußersten Norden beprobten Bohrlöchern trat zunächst Tinopal mit Konzentrationen bis zu 100 mg/m<sup>3</sup> auf, zum ersten Mal etwa 6 Stunden nach Einspeisung. Bei einer Entfernung von ca. 220 m zwischen Einspeis- und Wiederaustrittsstelle ergibt dies eine Abstandsgeschwindigkeit von 35 m/h. Nach 4 Tagen konnte in den gleichen Bohrlöchern auch das im Rahmen dieses Versuches eingespeiste Uranin nachgewiesen werden. Die Maximalkonzentration betrug hier 17 mg/m<sup>3</sup>. Die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit ergab bei einer zurückgelegten Strecke von etwa 600 m einen Wert von 6 m/h. Die Durchgangskurven der beiden Tracer im Bohrloch 12 sind in der Fig. 3 wiedergegeben. In den weiteren unmittelbar südlich gelegenen Bohrungen des Parallelstollens konnten weder Uranin und Tinopal noch die erwähnte Uraningrundlast nachgewiesen werden.

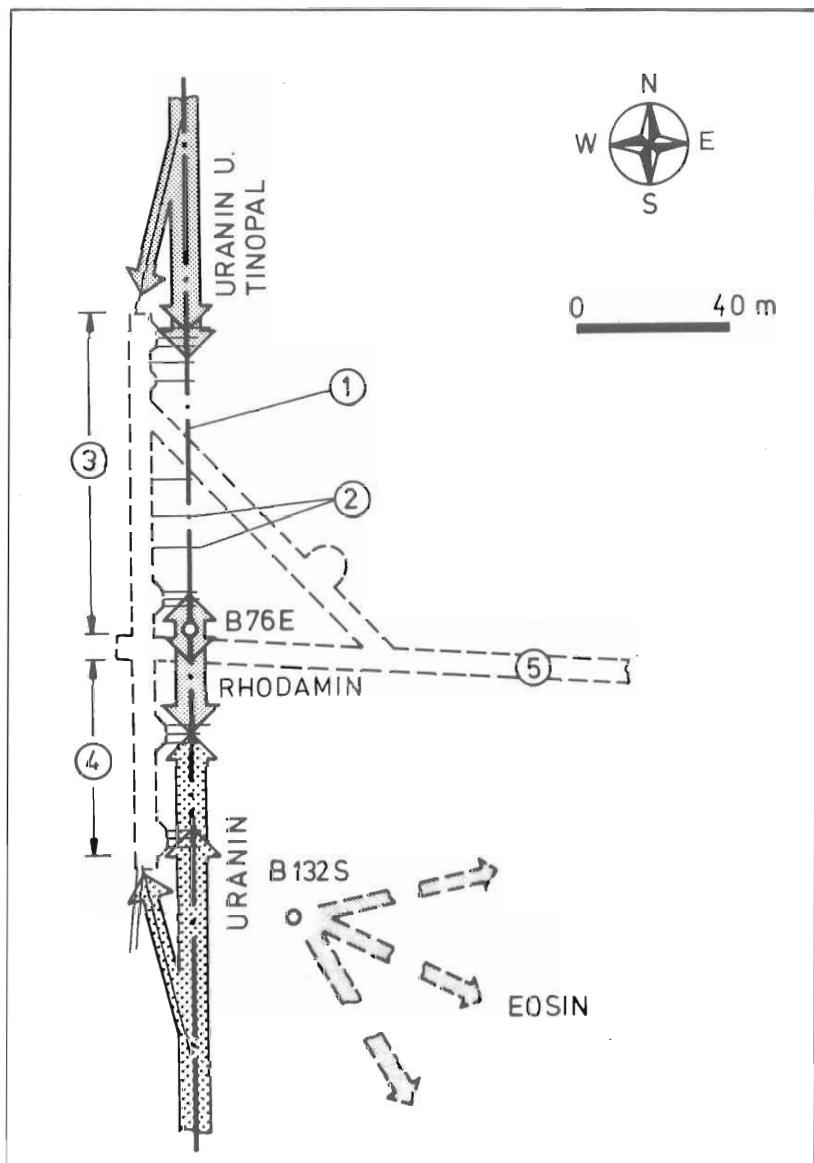


Fig.2 Tracernachweise im Sondierstollen Lindau

- 1 - Erzgang Hermann
- 2 - Schräg- und Horizontalbohrungen
- 3 - Parallelstollen Nordteil
- 4 - Parallelstollen Südteil
- 5 - Hauptstollen

Tracer detection in the sounding tunnel Lindau

- 1 - ore lode Hermann
- 2 - inclined and horizontal boreholes
- 3 - parallel tunnel (northern part)
- 4 - parallel tunnel (southern part)
- 5 - main tunnel

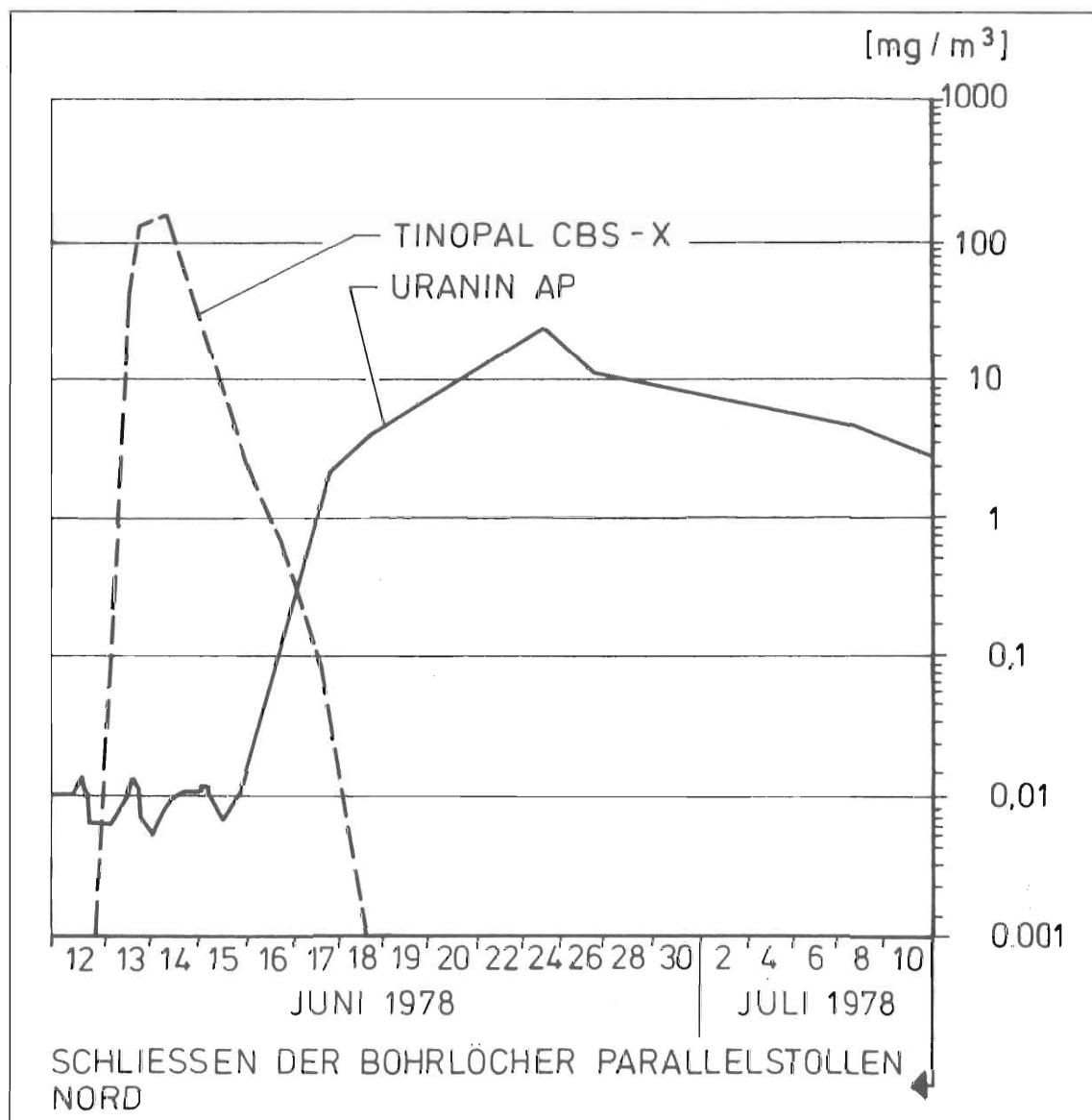


Fig. 3 Tracerdurchgangskurven von Bohrloch 12 Sondierstollen  
Lindau

Curves of tracer concentration in borehole 12 sounding  
tunnel Lindau

Nach dem erneuten Schließen der Bohrlöcher im Nordteil - einen Monat nach Einspeisung - konnten geringe Uraninspuren in einer Quelle nördlich der Eingabestelle nachgewiesen werden (Qu. 39). Damit war die überraschende Tatsache belegt, daß der Erzgang im natürlich belassenen Zustand entgegengesetzt zur Fließrichtung des Schwarzenbachs nach Norden entwässert. Eine Querentwässerung über die stärker zerrütteten Granitporphyrgänge konnte aufgrund der 2,5-jährigen ständigen Aktivkohlebeprobung ausgeschlossen werden.

Ein weiterer Markierungsversuch sollte die unterirdische Entwässerung des Erzganges im Bereich südlich des Sondierstollens abklären. Da aus dem ersten Versuch bekannt war, dass die Wässer des nördlichen Bereichs das Gebiet südlich des Sondierstollens nicht erreichen, wurde im September 1978 erneut Uranin AP verwendet. Als Einspeisstelle wurde das etwa 150 m südlich des Sondierstollen gelegene Bohrloch B 76 E ausgewählt (Erzgang in 168 - 196 m Teufe). Mit einer Gesamtspülung von 6.000 l Wasser wurden 2,0 kg des Tracers eingegeben.

Zum Zeitpunkt der Einspeisung waren sämtliche Bohrlöcher des Parallelstollen geschlossen. Die Tropfwassermenge im südlichen Stollenteil betrug insgesamt etwa 0,5 l/s. Uraninspuren waren darin ab der vierten Woche nach der Einspeisung durchgehend zu beobachten. Erst ein Jahr später konnten höhere Uraningehalte in sämtlichen Wässern der nunmehr im Rahmen eines Wasserablaufversuches im Südteil geöffneten Bohrlöcher festgestellt werden.

Drei in Streichrichtung des Parallelstollen niedergebrachte Bohrungen auf einen weiter südlich gelegenen Granitporphyrgang enthielten in ihren Wässern nur sporadisch Uranin. Der Markierungsversuch zeigte, dass das Drainagesystem Erzgang auch südlich des Sondierstollens nach Norden entwässert. Südlich der Eingabestelle B 76 E besteht allerdings eine indirekt über den Markierungsversuch nachgewiesene Wasserscheide: die südlich davon gelegene artesisch überlaufende Erzgangbohrung (B 30 E) blieb Uranin-negativ.

Innerhalb des erwähnten Wasserablaufversuches im Südteil des Parallelstollens wurde im Oktober 1979 ein ergänzender

Markierungsversuch durchgeführt. Durch ihn sollte die Existenz einer bereits durch Pegelmessungen bekannten unterirdischen Wasserscheide zwischen Erzgang und Schwarzenbach nachgewiesen werden. Im Rahmen von Wasserabpreßversuchen (WD-Tests) wurden in Bohrloch B 132 S, das den Erzgang nicht durchteuft, 2,0 kg Eosin FA in einer Teufe von 20 - 25 m mit verpreßt (Wasseraufnahme 9 l/min, Druck: 17 bar). Die Ergebnisse dieser Markierung zeigten, daß sich das nur 40 m vom Sondierstollen entfernt gelegene Bohrloch bereits östlich dieser Wasserscheide befindet. Trotz der künstlichen Absenkung im Erzgang konnte in den Bohrungen Parallelstollen Süd auch im Rahmen der Langzeitbeobachtung mit Aktivkohle kein Eosin nachgewiesen werden. Nach etwa einem Jahr konnte der Tracer gelegentlich - in geringen Spuren - in beprobten Quellen östlich und südlich der Eingabestelle nachgewiesen werden.

#### 4. Zusammenfassung

Im Rahmen eines umfangreichen Untersuchungsprogrammes zur Abklärung der hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich der Sperrenstelle des geplanten Stausees Lindau wurden mehrere Markierungsversuche durchgeführt. Die Versuche bestätigten die außergewöhnliche hydrogeologische Bedeutung des Erzganges Hermann und ließen die Auswirkungen erster Injektionsmaßnahmen erkennen. Generell ergab sich folgendes Bild:

- Der durch erhöhte Wasserwegigkeit ausgezeichnete Erzgang übt auf die unmittelbar benachbarten Granite und Granitporphyre eine gewisse Drainagewirkung aus.
- Die natürliche Entwässerung des Erzganges erfolgt innerhalb des untersuchten Abschnittes entgegengesetzt zur Ausrichtung des Tales von Süden nach Norden.
- Die Hauptvorflut bildet der Schwarzenbach im Kreuzungsreich mit dem Erzgang. Es besteht keine direkte Querentwässerung über die Granitporphyrgänge und dazu parallel angeordneten Klüften im Granit zum tiefer gelegenen Talabschnitt.

- Der im Bereich des Sondierstollens angetroffene dichtere Abschnitt des Erzganges konnte durch erste Zementinjektionsversuche weiter abgedichtet werden. Beidseits dieses Abschnittes besteht heute ein Druckgefälle von etwa 30 m Wassersäule.
- Bei natürlichen, nicht abgesenkten Verhältnissen sind auch im Erzgang die Abstandsgeschwindigkeiten nur gering. Die eingebrachten Tracer traten nur verzögert mit z.T. über mehrere Jahre anhaltendem Durchgangsverlauf aus. Mittels künstlicher Absenkung konnte die Wiederausbringung für die Versuchsdurchführung beschleunigt werden.

Die durchgeführten Markierungsversuche haben die bei der Anwendung dieser Technik in Kluftaquifern auftretenden Probleme verdeutlicht. Durch die geringe Wasserzirkulation in dem engen Netzwerk der Klüfte ergeben sich nicht nur bei Einbringen der Tracer in tiefere Bereiche des Grundwassers, z.B. über Bohrungen, sondern auch bei oberflächennahen Einspeisungen hohe Verweilzeiten.

Durch die geringfügige, z.T. stagnierende Wasserbewegung erfolgt nur eine allmähliche Ausschwemmung des Tracers. Damit verbunden sind geringe Konzentrationen beim Wiederaustritt sowie eine vielfach über Jahre anhaltende Kontamination des betroffenen Bereiches. Trotz dieser Schwierigkeiten kann, wie die Ergebnisse gezeigt haben, die Markierungstechnik auch bei den genannten Aquiferbedingungen mit Vorteil zur Lösung hydrogeologischer Fragen eingesetzt werden.

## 5. Literaturverzeichnis

ACKERMANN G. (1981): Geologie und Hydrogeologie der Sperrenstelle des geplanten Stautees Lindau (Hotzenwald) - unveröffentlichte Diplomarbeit, Geologisches Institut, Universität Karlsruhe.

BLINDE A., FABIAN E., HÖTZL H. (1982): In situ-investigations and sealing of a cavernous ore lode in the foundation area of a dam site - Commission Internat. Grands Barrages, Quatorzième Congrès, Q.53, r.16, Rio de Janeiro (in print).