

Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz)

Schriftleitung:

I. MÜLLER (Neuchâtel und Fribourg) und J. G. ZÖTL (Graz)

Vorwort

Während des vergangenen Jahrzehnts wurden in der Hydrogeologie der Karstgebiete bedeutende Fortschritte erzielt, was am deutlichsten darin zum Ausdruck kommt, daß die von der Höhlenforschung übernommenen Vorstellungen überprüft werden mußten. Die Begriffe Grundwasser-Reservoirs und Abfluß-Systeme werden nun auch hier als gültig betrachtet, mit all ihren Konsequenzen für die Praxis. Es hat sich als notwendig erwiesen, geeignete Untersuchungsmethoden, die oft vom klassischen hydrogeologischen Vorgehen abweichen, einzusetzen.

Aus dieser Optik muß der kombinierte Markierungsversuch des 4. SUWT, der im Einzugsgebiet der Areuse-Quelle durchgeführt wurde, betrachtet werden. Eine breitfächrig angelegte Untersuchung ist gegenwärtig dort im Gang, ermöglicht durch die finanzielle Unterstützung durch den Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaften im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms Wasserhaushalt. Ihr Ziel ist es, Natur, Menge und Möglichkeit der Erschließung der Grundwasserreserven des Areuse-Beckens genauer zu bestimmen. In diesem Zusammenhang stellt der kombinierte Markierungsversuch einen bedeutenden Beitrag zur Beantwortung der gestellten Fragen dar. Die Ergebnisse können zusammen mit den gleichzeitig registrierten Daten über das natürliche Verhalten vom Standpunkt der Hydrodynamik der Karstgebiete aus interpretiert werden. Aufgrund des Markierungsversuches können die bisherigen Vorstellungen in verschiedenen Punkten korrigiert werden, insbesondere über die genaue Rolle des bisher als undurchlässig betrachteten Argoviens sowie über den Abflußmechanismus bei Hochwasserereignissen.

Es ist uns deshalb eine Freude, den an den Untersuchungen – sei es im Feld, im Labor oder bei der Auswertung – beteiligten Institutionen unseren Dank auszudrücken.

Prof. A. Burger

Avant-propos

Durant la décennie écoulée, la science hydrogéologique des terrains calcaires a fait des progrès spectaculaires, dont la manifestation la plus remarquable est une remise en cause des schémas hérités de l'exploration spéléologique. Les notions de réservoirs d'eaux souterraines et de systèmes d'écoulement y sont maintenant acceptées avec toutes les implications pratiques qu'elles contiennent. Elles ont fait apparaître la nécessité de méthodes d'investigation appropriées qui diffèrent souvent des démarches classiques de l'hydrogéologie.

C'est dans cette optique qu'il convient de juger le multitraçage effectué dans le bassin de la source de l'Areuse. Une étude de grande envergure s'y déroule actuellement

grâce à l'appui financier du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique, dans le cadre du Programme National sur le Cycle de l'Eau. Elle a pour objectif de préciser la nature, le volume et la localisation des réserves d'eaux souterraines du bassin. Dans ce contexte, le multitraçage représente un apport très important sur les « réponses provoquées » du bassin. Ses résultats peuvent être interprétés, conjointement avec les réponses naturelles enregistrées simultanément, en termes d'hydrodynamique du réservoir karstique. Ils corrigent le schéma accepté jusqu'ici sur plusieurs points fondamentaux, en particulier sur le rôle exact de l'Argovien réputé imperméable, et sur le mécanisme des crues.

Nous sommes donc heureux d'avoir l'occasion d'exprimer notre reconnaissance à toutes les institutions qui ont apporté une contribution sur le terrain, dans les laboratoires et dans les travaux d'élaboration.

Prof. A. Burger

Inhalt:

Einleitung	8
1. Das Untersuchungsgebiet (I. MÜLLER, U. SCHOTTERER, J. G. ZÖTL)	8
1.1. Geologie	8
1.2. Geomorphologie	11
1.3. Meteorologie	12
1.4. Hydrologie, Hydrogeologie und Hydrochemie	14
1.5. Frühere Färbversuche	16
2. Untersuchung des Neuenburger Jura (I. MÜLLER, L. KIRALY, U. SCHOTTERER, U. SIEGENTHALER)	17
2.1. Einleitung	17
2.2. Beobachtungsnetz und technische Ausrüstung	17
2.3. Meteorologie und Hydrologie 1977-1979	19
2.4. Chemie und Hydrodynamik	21
2.5. Tritium- und ¹⁸ O/ ¹⁶ O-Messungen	31
2.5.1. Einleitung	31
2.5.2. Niederschläge	31
2.5.3. Langzeitrends und Wasseralter von Quellwasser	33
2.5.4. Der Bach Bied bei La Brévine als Quartärentwässerung	37
2.5.5. Komponententrennung bei Hochwasserereignissen	38
2.5.6. Reservoirgröße und -erneuerung der Areuse-Quelle	45
2.6. Bakteriologische Untersuchungen	47
3. Der kombinierte Markierungsversuch des SUWT 1979	50
3.1. Technische Organisation (I. MÜLLER, U. SIEGENTHALER)	50
3.2. Meteorologische, hydrologische und hydrochemische Bedingungen während des Versuches (I. MÜLLER)	54
3.3. Die Markierung mit Fluoreszenztracern	57
3.3.1. Ergebnisse der Fluoreszenzmessung von Direktproben (Martina ZUPAN)	57
3.3.2. Ergebnisse der Dünnschicht-chromatographischen Auswertung von Direktproben (F. P. BUB, H. HÖTZL)	65

3.3.3. Ergebnisse des Fluoreszenztracernachweises mittels Aktivkohle (F. BAUER, H. PERLEGA)	70
3.3.4. Zusammenfassung und Vergleich der durch Fluoreszenztracer gewonnenen Resultate (F. BAUER, H. HÖTZL, Martina ZUPAN)	74
3.4. Resultat des Markierungsversuches mit Salzen	77
3.4.1. Einsatz und Durchgang von Kochsalz (I. MÜLLER, W. KÄSS)	77
3.4.2. Der Einsatz von Kalisalz (W. KÄSS, I. MÜLLER)	80
3.5. Der Einsatz von Triftstoffen	81
3.5.1. Sporen (R. BENISCHKE, H. HÖTZL, H. P. LEDITZKY, V. MAURIN, P. RAMSPACHER, H. ZOJER, J. G. ZÖTL)	81
3.5.2. Die Markierung mit Phytoplankton (H. DOMBROWSKI)	87
3.6. Zusammenfassung der Resultate des kombinierten Markierungsversuchs (R. GOSPODARIĆ, I. MÜLLER, U. SCHOTTERER, U. SIEGENTHALER)	87
3.6.1. Festgestellte und bestätigte unterirdische Wasserverbindungen ..	88
3.6.2. Fließgeschwindigkeiten des Karstwassers (vgl. Tab. 25)	89
3.6.3. Hydrogeologische Schlußfolgerungen	90
4. Gegenüberstellung der hydrogeologischen Resultate der natürlichen und künstlichen Tracer (L. KIRÁLY, I. MÜLLER, U. SCHOTTERER, U. SIEGENTHALER).	92
Literatur	95
Résumé	97
Danksagung	100
Verzeichnis der Autoren und Mitarbeiter	100

Einleitung

Der Gedanke, den in Zeitabständen von vier bis sechs Jahren ablaufenden internationalen Symposien über die Anwendung von Markierungsstoffen zur Verfolgung unterirdischer Wässer die hydrologische Bearbeitung von Musterlandschaften vorangehen zu lassen und die Ergebnisse dann in den Mittelpunkt der Tagungsdiskussionen zu stellen, hat sich bewährt. Diese Untersuchungen waren über den ihnen von Anbeginn zgedachten Zweck hinaus eine Schule der Kooperation von Institutionen und Individuen und eine beispielgebende Entwicklung der Bearbeitung hydrographischer Einheiten im gesamthydrologischen Konzept.

Die Vorbereitung des Symposiums in Bern 1981 ging im Vergleich zu den vorangegangenen Veranstaltungen in Graz, Freiburg und Ljubljana wieder einen Schritt weiter. Die hydrologischen Studien – und damit der Einsatz von Markierungsstoffen – erfaßten drei völlig verschiedene Gebiete mit jeweils völlig individuellen hydrologischen Gegebenheiten: das Muotagebiet in der Zentralschweiz, die besondere Problematik der Wiesenbewässerung im Langetental und die Verhältnisse im Neuenburger Jura. Die Ergebnisse der Untersuchungen im Muotagebiet und im Langetental werden im nächsten Band dieser Zeitschrift publiziert.

Der Faltenjura hat eine hydrogeologisch und karsthydrologisch von anderen Karstgebieten abweichende Problematik. Die hier bereits vorliegenden intensiven Studien des Centre d'Hydrogéologie an der Universität von Neuchâtel unter der Leitung von Professor A. BURGER gaben einen besonderen Anreiz, die bereits vorliegenden Detailkenntnisse durch einen systematischen Einsatz von Markierungsmitteln zu ergänzen.

1. Das Untersuchungsgebiet (I. MÜLLER, U. SCHOTTERER, J. G. ZÖTL)

1.1. Geologie

F. LOTZE (1971) behandelt den Neuenburger Jura im Rahmen der nördlichen Randzonen des „alpinotypen alpidischen Mitteleuropas“, obwohl sein Bau wahrscheinlich nur in den höheren Stockwerken alpinotyp ist und seine epirogene Vorgeschichte eher der des nördlichen Alpenvorlandes entspricht (p. 358).

Eine Übersicht über die Geologie des Untersuchungsgebietes gibt Fig. 1 nach J.-P. TRIPET (1972).¹⁾ Die stratigraphischen Elemente des Untersuchungsgebietes sind (vgl. Fig. 2):

- Quartär: Moränen und alluviale Ablagerungen.
- Tertiär: Marine Molasse und obere Süßwassermolasse in der Synklinale von Les Verrières; im Gebiet von La Brévine sind diese Ablagerungen nicht gut bekannt.
- Kreide: Mächtigkeit etwa 150 bis 300 m, enthält Urgon-Kalk, oolithische und mergelige Kalke.
- Malm: Mächtigkeit bis 600 m, enthält zwei wichtige lithologische Einheiten: die oberen 350 m bestehen aus kompakten, dickbankigen Kalken, die aufgrund ihres gut ausgebildeten Kluftsystems wasserführend sind. Die darunterliegenden Argovien-Mergel sind weitgehend wasserundurchlässig.
- Dogger: Mächtigkeit 200 m. Wechselnde Serien von Mergel und Kalk.

¹⁾ Vgl. A. BUXTORF & P. CHRIST: Geologische Karte der Schweiz, 1 : 200.000, Blatt 1 (1944), sowie Detailkarten des BRGM (1968) bzw. J. FAVRE (1911), A. J. LLOYD (1958a, b, 1964), C. MÜHLETHALER (1930, 1931), E. RICKENBACH (1925) und L. ROLLIER & J. FAVRE (1910).

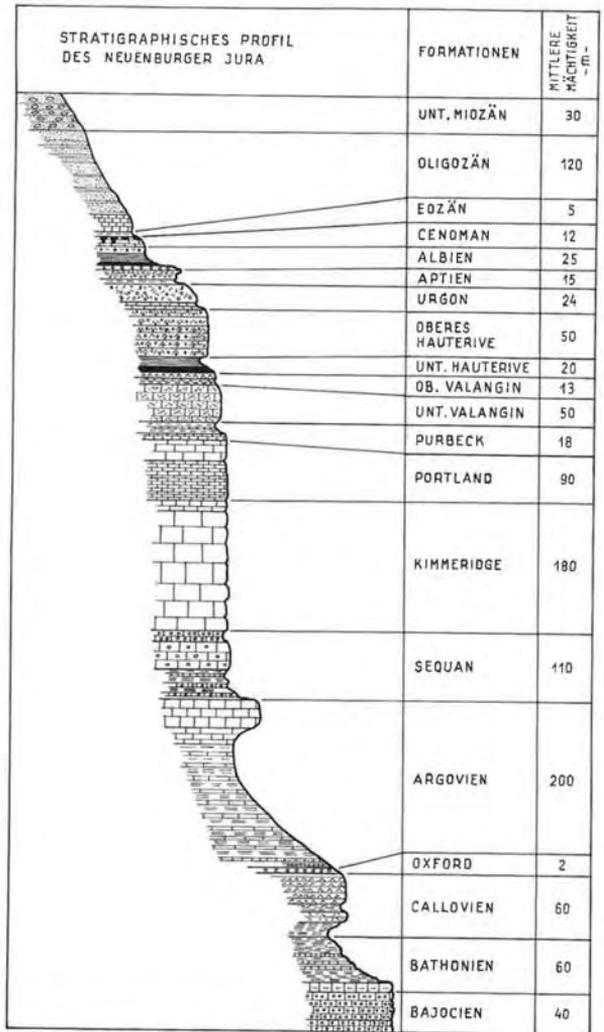


Fig. 2: Stratigraphisches Profil des Neuenburger Jura (nach L. KIRALY, 1973).

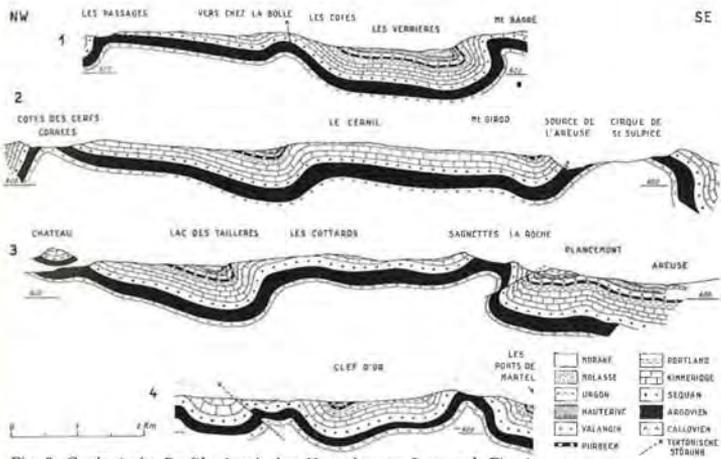


Fig. 3: Geologische Profile durch den Neuenburger Jura, vgl. Fig. 1.

In seinem tektonischen Aufbau zeigt das dem Faltenjura angehörende Arbeitsgebiet die typische Kombination von Falten und Überschiebungen. Einen vielfach sehr instruktiven Einblick in die Jurafalten erlauben die als „Klusen“ bezeichneten Quertäler. M. A. KOENIG (1967, p. 116) weist darauf hin, daß – wenn die Antiklinalkerne aus weichen Schichten, die hangenden Lagen aber aus härterem Gestein bestehen – die Ein- und Ausgänge dieser Quertäler meist enge Schluchten sind, während sich in den weicheren Kerngebieten die Täler stark (oft nahezu kreisförmig) erweitern. Die Jurafaltung begann nach H. LINIGER (1953) im Helvet und Torton, die erste Hauptphase mit den großen Überschiebungen ereignete sich an der Wende Torton/Sarmat. Eine zweite Hauptphase wird zum Ende des Pons vermutet. Die geologischen Profile in Fig. 3 zeigen die gut ausgeprägten Kofferfalten (vgl. Fig. 1).

1.2. Geomorphologie

Die großen Züge der Geomorphologie werden durch das Phänomen der ausgedehnten unterirdisch entwässerten Karstwannen geprägt, die in den Synklinalen des tektonischen Faltenbaues liegen. Vegetation und Agrarwirtschaft betonen dieses Phänomen: In den Wannen liegen die quartären Ablagerungen, die Wiesen und Felder tragen, die karge Verwitterungskurve der umgebenden Höhen ist von Wäldern bedeckt, nicht selten gelichtet durch unbedeckten Karst mit Karrenfeldern. Typische Karsterscheinungen wie Dolinen, Ponore und Schwinden folgen den Hauptrichtungen der Kluftsysteme (D. JAMIER & B. MATHEY, 1977). Ein Inventar von wichtigen Karstphänomenen wie Höhlen und Schächten wurde von Speläologen erstellt (R. GIGON, 1976). Die Karte von Schwinden und Dolinen (Fig. 4) basiert auf Forschungsergebnissen von Höhlenforschern (R. GIGON, persönl. Mitteilung). Die Hauptrichtungen der Verkarstung sind die Achsen der Synklinalen (40° – 50° N) und Achsen parallel zur Hauptstoßrichtung (σ_1) der Tektonik 130° – 140° N (L. KIRALY & G. SIMIONI, 1971).

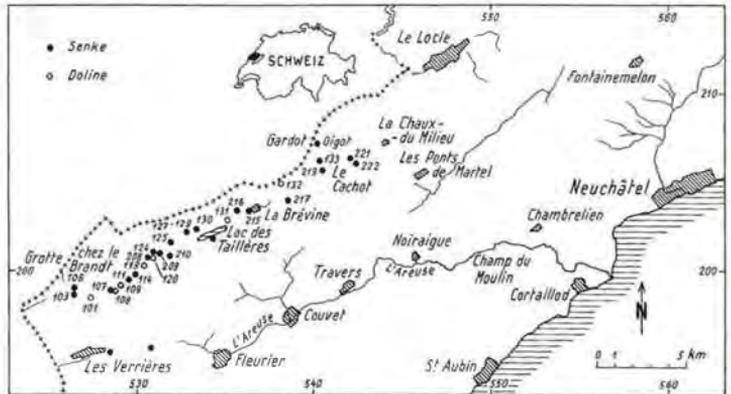


Fig. 4: Lage der Schwinden (Senken) und Dolinen im Untersuchungsgebiet.

Postglaziale Ablagerungen bilden zum Teil ausgedehnte Torfmoore, die die wichtigsten oberflächlichen Wasserspeicher darstellen, aus denen aggressive Wässer (Huminsäure) in die Schwinden abfließen. Die bekanntesten Schwinden sind La Brévine (Fig. 4, Nr. 215, mehrere 100 l/s Schluckvermögen), Lac des Taillères (bis 700 l/s) und Les Verrières, wo das versinkende Wasser im letzten Jahrhundert eine Mühle antrieb. Nur wenige Prozent des Niederschlags finden einen oberflächlichen Abfluß aus dem Einzugsgebiet.

1.3. Meteorologie

Die Niederschlagsverhältnisse im langjährigen Mittel (1901–1940, H. UTTINGER in A. BURGER, 1959) im Untersuchungsgebiet und seinen Randbereichen zeigt die nachfolgende Tab.:

Tab. 1: Niederschlagshöhen im Neuenburger Jura (Stationen s. Fig. 5).

Station	Monat (mm)												Jahr (mm)
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	
St. Sulpice bei Fleurier	120	109	124	128	131	140	135	134	119	127	128	152	1547
Couvét	93	83	98	101	110	119	119	121	109	107	104	117	1281
La Brévine	110	95	109	116	126	135	134	131	123	118	116	133	1446
Les Ponts-de-Martel	98	87	101	111	125	128	131	133	121	122	111	121	1389
Neuenburg (Neuchâtel)	70	66	75	73	83	100	97	101	89	84	85	90	1013

Zwischen November und April ist das Gebiet größtenteils mit Schnee bedeckt. Die in der Schneedecke gespeicherte Wassermenge beträgt zur Zeit der maximalen Schneehöhe 8–10% des mittleren Jahresniederschlags für die Periode 1959–1969 (mit Ausnahme des extrem schneearmen Winters 1963/64). Die Schneeschmelze äußert sich im Hydrogramm der Areuse-Quelle mit charakteristischen Maxima gegen Mitternacht und Minima gegen Mittag (Fig. 6). Der Sommer ist durch häufige Gewitter mit Niederschlagsmaxima bis etwa 80 mm/Tag gekennzeichnet. Im Herbst sind so-

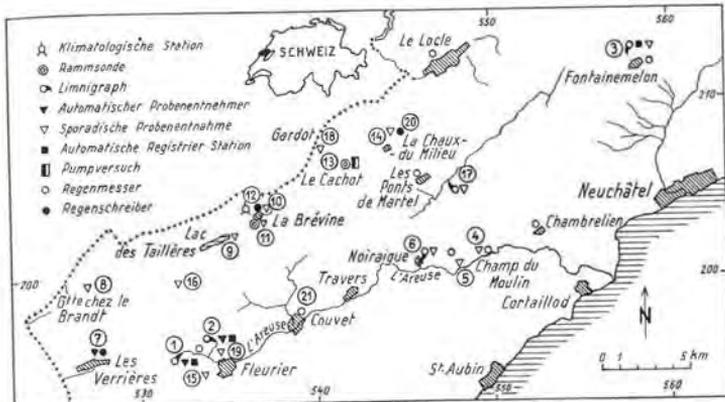


Fig. 5: Lage der meteorologisch-hydrologischen Stationen (1977-1980).

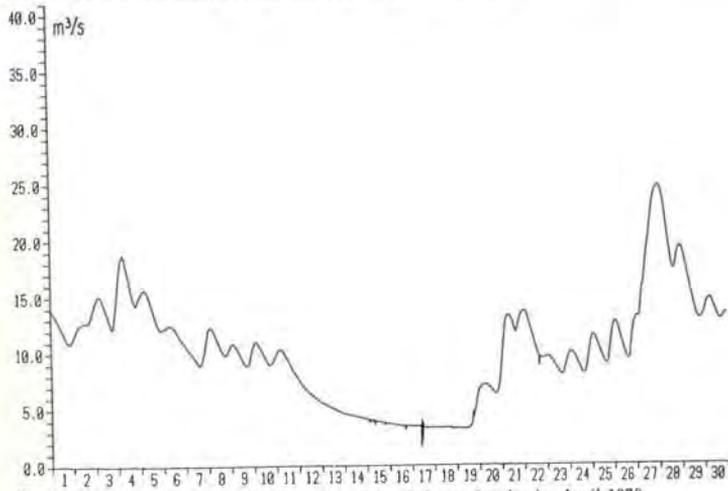


Fig. 6: Schüttung der Areuse-Quelle während der Schneeschmelze im April 1978.

wohl extreme Trockenperioden als auch ausgesprochen nasse Monate möglich.

Das Jahresmittel der Temperatur in La Brévine (Periode 1904-1953) beträgt $4,8^{\circ}\text{C}$ und liegt besonders im Winter wesentlich tiefer als in höher gelegenen Stationen in der Umgebung (A. BURGER, 1959, Seite 121). Der experimentell bestimmte Wert für die Verdunstung beträgt in Le Grand-Gardot 509 mm pro Jahr, der berechnete Wert für dieselbe Station 769 mm pro Jahr, für Les Verrières wurden 842 mm/Jahr, La Brévine 739 mm pro Jahr und La Chaux-du-Milieu 653 mm pro Jahr berechnet.

1.4. Hydrologie, Hydrogeologie und Hydrochemie

Der größte Bereich des Untersuchungsraumes gehört zum Einzugsgebiet des Flusses Areuse. Die Areuse ist ein Teil des hydrographischen Systems der Aare. Ihr Einzugsgebiet erstreckt sich über die Kalkgebiete des Jura und umfaßt 405 km². Die mittlere Schüttung in der Nähe ihrer Mündung in den Neuenburger See (Champ du Moulin) beträgt für die Periode 1923–1967 12,3 m³/s. Die größten Karstquellen in ihrem Einzugsgebiet sind die Quelle de la Doux (Fig. 5, Nr. 1), auch *Areuse-Quelle* genannt, und die Noiraigue-Quelle (Fig. 5, Nr. 6).

Das Einzugsgebiet der Areuse-Quelle erstreckt sich über das Tal von La Brévine, einem Polje von 85 km², und den östlichen Teil des Tales von Verrières (Fig. 1). Beide Täler werden von Synklinalen gebildet, die miteinander verbunden sind. Die gesamte Fläche beträgt 127 km², wobei 46 km² bewaldet sind und 81 km² aus Feldern und Wiesen bestehen. Die mittlere Höhe liegt bei 1115 m.

Das Einzugsgebiet der Noiraigue-Quelle erstreckt sich über das Tal von Les Ponts, einem synklinalen Polje. Das gesamte Einzugsgebiet beträgt 72 km², davon sind 27 km² Wälder, 28 km² Wiesen und Felder und 17 km² Torfmoore. Die mittlere Höhe beträgt 1116 m.

Da die Einspeisungsstellen des Markerversuches alle im Einzugsgebiet der Areuse-Quelle liegen, gelten die folgenden Ausführungen nur für dieses Gebiet. Die Bezeichnung Areuse bezieht sich im folgenden immer auf die Quelle.

Das Einzugsgebiet der Areuse wird im wesentlichen durch die tektonische Lage der Argovien-Mergel bestimmt, wobei in manchen Abschnitten bedeutende Unsicherheiten bestehen (L. KIRALY, 1973). Diese betreffen vor allem im Südwesten die Verlängerung der Synklinale von Les Verrières in Richtung Frankreich, im Nordosten die Begrenzung des Einzugsgebietes in Richtung Le Locle und die Abgrenzung zum Einzugsgebiet der Noiraigue (Fig. 5). Darüber hinaus besteht auf Grund der erwähnten Lage der Argovien-Mergel nur eine schmale, etwa 6 km lange Verbindung zwischen dem Grundwasserbecken von La Brévine und Les Verrières. Ein Ziel des Markierungsversuches von 1979 war es, diese Unsicherheiten zu überprüfen. Bei mehreren Tiefbohrungen (Rammsonden, Fig. 5) wurde die Durchlässigkeit nach LUGEON bestimmt. Die gefundenen Werte lagen durchwegs zwischen 5×10^{-6} und 10^{-7} m/s (J.-P. TRIPET, 1972). Diese Werte erwiesen sich bei ihrer Prüfung durch mathematische Modelle als zu niedrig; das hydrodynamische Verhalten der Areuse konnte damit nicht simuliert werden. L. KIRALY (1973) findet eine Erklärung dafür im „Skalen-Effekt“. Nimmt man an, daß im Karst die Durchlässigkeit durch ein zusammenhängendes Netz von Spalten und Kanälen bestimmt wird, so ist bei einer punktförmigen Bohrung die Wahrscheinlichkeit, dieses Netz zu treffen, sehr gering. Die mittlere Durchlässigkeit erhöht sich mit zunehmendem Volumen der betrachteten Blöcke (Fig. 7). Das Hydrogramm der Areuse konnte mit einem k-Wert von 10^{-3} m/s korrekt simuliert werden.

Das wirksame Porenvolumen des Aquifers wurde von J.-P. TRIPET (1972) zu 4,5% bestimmt.

Die Oberflächenentwässerung im Untersuchungsgebiet, dessen Quartär-Überdeckung auf 1–3 m Mächtigkeit geschätzt wird (L. MÜLLER, 1978), ist nur schwach entwickelt. Kleinere Torfmoore speisen Bäche, wie beispielsweise bei La Brévine oder Le Petit und Le Grand Cachot, die nach wenigen 100 m in Ponoren abfließen. Das größte Oberflächengewässer ist der Lac des Taillères (Fig. 5), der etwa 2 Mio. m³ faßt. Der Abfluß erfolgt in eine Schwinde und kann mit einem Höchstwert von etwa 700 l/s künstlich geregelt werden. Dadurch wird zeitweise der Trockenwetterabfluß der Areuse-Quelle beeinflusst.

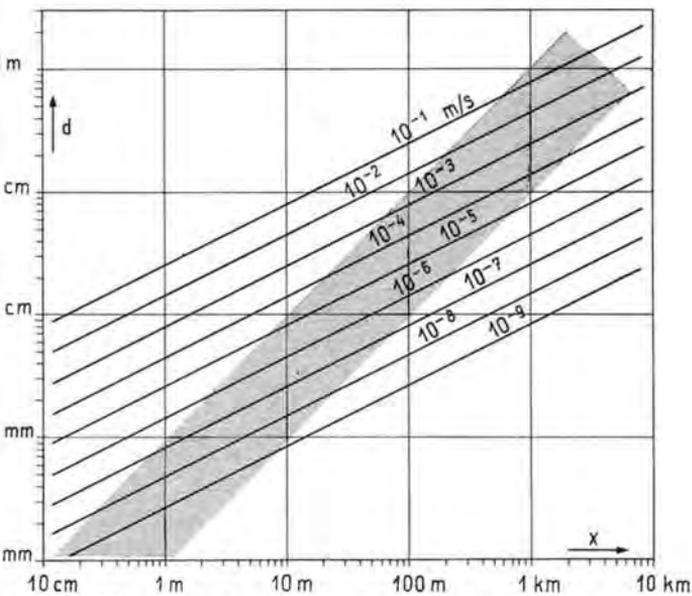


Abb. 7: Die Durchlässigkeit des Karstgebietes (schraffiert), errechnet nach den Parametern d = Durchmesser der Karstkanäle und x = Abstand der Kanäle im Karstnetz (nach L. KIRALY, 1973).

Die Areuse ist die größte Karstquelle im Neuenburger Jura. Ihre mittlere Schüttung beträgt $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Periode 1959–1969, wobei die Schwankungen außerordentlich groß sind (Extremwerte $0,3$ bzw. $40 \text{ m}^3/\text{s}$). Längere Niedrigwasserperioden treten manchmal im Herbst auf, Schüttungsspitzen während der Schneeschmelze und nach heftigen Sommergewittern. Die Quelle reagiert für ihre Größe sehr schnell auf Witterungseinflüsse: Nach einem Schüttungsanstieg von $2 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $39 \text{ m}^3/\text{s}$ innerhalb von 30 Stunden sank die Schüttung nach einer Woche wieder auf $1/10$ des Maximalwertes (Hochwasser 7./8. August 1978). Die Rezessionskurven wurden eingehend analysiert (A. BURGER, 1956, L. KIRALY und G. MOREL, 1976b, J.-P. TRIPET, 1972). Aufgrund der Analysen von J.-P. TRIPET befinden sich die Reserven wahrscheinlich in der gesättigten Zone, und das gespeicherte Volumen in der Infiltrationszone ist, damit verglichen, klein.

Erste **chemische Analysen** an Karstwässern im Neuenburger Jura wurden von BURGER (1959) durchgeführt, der Härten und elektrische Leitfähigkeit bestimmte. J. MISEREZ (1973) studierte in seiner Dissertation die Geochemie des Jura-Karstes, bei der hauptsächlich das Einzugsgebiet der Areuse betrachtet wurde. Die folgenden Angaben beziehen sich auf die Arbeit von J.-J. MISEREZ. Vollanalysen (20 Parameter) an 100 Wasserproben erlaubten es, die räumliche und zeitliche Entwicklung des Chemismus durch den ganzen Karstwasser-Zyklus zu verfolgen. Ausgehend von einer statistischen Behandlung der Daten wurden verschiedene wichtige Probleme ange-

gangen: biologische CO₂-Produktion in den oberflächlichen Bodenschichten, Lösungsintensität in Oberflächennähe und in der Tiefe sowie die thermodynamischen Gleichgewichte in den folgenden drei Systemen:

- System CaO - MgO - SrO - CO₂ - H₂O
- System Na₂O - K₂O - SiO₂ - Al₂O₃ - H₂O
- System FeO - Fe₂O₃ - CO₂ - O₂ - H₂O

Die Aggressivität des Wassers den Karbonaten gegenüber wird durch seinen CO₂-Gehalt bestimmt. Sättigungsindizes bezüglich Kalzit, Dolomit und anderen Karbonaten wurden von J.-J. MISEREZ ausführlich diskutiert. Das Verhältnis Na⁺/K⁺ wurde im Zusammenhang mit der Entwicklung der Tonminerale untersucht. Der Transport des Eisens durch den Boden und bis in den Wasserleiter wurde aufgrund thermodynamischer Gleichgewichte beschrieben. Die Rolle der Humusstoffe in der Karst-Auflösung wurde eingehend studiert.

M. POCHON & J.-P. SIMEONI (1976) untersuchten die Trübung durch Tonminerale in den Karstquellen.

1.5. Frühere Färbversuche

H. SCHARDT (1904) führte verschiedene Färbversuche durch, um insbesondere das Einzugsgebiet der Areuse-Quelle festzustellen; eine Zusammenfassung der Resultate wurde von A. BURGER (1959) gegeben. H. SCHARDT erhielt folgende Fließzeiten respektive -geschwindigkeiten von verschiedenen Einspeisestellen bis zum Austritt der Areuse (Fig. 5):

Lac des Taillères	299 h	21,4 m/h
La Brévine	189 h	45,5 m/h
Petit Cachot	66 h	197 m/h
Les Verrières	61 h	73,8 m/h

J. JEANNET führte im Juni 1925 einen Versuch durch (wiedergegeben in A. BURGER, 1959, S. 182). Dabei öffnete er die Schieber am Ausfluß des Lac des Taillères und färbte das Wasser zugleich mit Fluoreszein. Nach fünf bis sechs Stunden begann die Schüttung der Areuse-Quelle anzusteigen; die Farbe wurde in der Quelle jedoch erst nach 140 Stunden beobachtet. Die Druckwelle pflanzte sich also wesentlich schneller fort als das Wasser selber.

Im Rahmen von Studentenpraktika wurden in den vergangenen Jahren wiederholt kleine Färbversuche mit Uranin (jeweils total ca. 2-3 kg) von verschiedenen Schwinden in der Synklinale von La Brévine aus durchgeführt, zum letztenmal im Juni 1977.

Am 29. März 1979, 14 Uhr, wurden 4 kg Uranin in eine Schwinde nördlich der Kirche von La Chaux du Milieu, Koord. 544 550/207 575, Höhe 1070 m, eingespeist (Fig. 5). Der Abfluß in die Schwinde betrug 1-2 l/min, es wurde mit 10 m³ Wasser nachgespült. In der Areuse, die während eines Monats bei vierstündlicher Probenahme überwacht wurde, konnte kein Farbstoff nachgewiesen werden. Andere Quellen wurden nicht beobachtet.

Untersuchung des Neuenburger Jura

(I. MÜLLER, L. KIRALY, U. SCHOTTERER, U. SIEGENTHALER)

1. Einleitung

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms „Wasserhaushalt der Schweiz“ wurde im Frühjahr 1977 eine Studie über Karstwasser im Jura begonnen. Die beteiligten wissenschaftlichen Institute sind das Centre d'Hydrogéologie der Universität Neuenburg (Leiter Prof. A. BURGER), die Abteilung für nukleare Geophysik am Physikalischen Institut der Universität Bern (Leiter Prof. H. OESCHGER) und das Geologische Institut der Universität Fribourg (Leiter Prof. C. CARON). Die praktischen Ziele dieser Untersuchungen sind der Aufschluß, die Nutzbarmachung und der Schutz der Karstwasser im Jura. Dabei konzentriert man sich in erster Linie auf die strukturell und hydrodynamisch bedingten Reaktionen des Aquifers auf natürliche oder provozierte äußere Ereignisse, da die grundsätzlich heterogenen Eigenschaften des Karstwasserleiters nicht durch eine zwangsläufig beschränkte Anzahl von Bohrungen erfaßt werden können. Mit Hilfe von Hydrodynamik und physikalischen, chemischen und biologischen Parametern werden die folgenden Eigenschaften der Aquifere untersucht:

Wirksame Porenvolumen der verschiedenen geologischen Formationen,

totale und nutzbare Wasserreserven und ihre Erneuerung,

Permeabilität des Karstnetzes und der dazwischenliegenden, schwach durchlässigen Zonen aufgrund numerischer Modelle, Qualität des Karstwassers.

Alle meßbaren Parameter des Wassers einer Quelle werden in ständig wechselnder Weise durch meteorologische Bedingungen und die hydrogeologischen Eigenschaften der Formation beeinflußt.

Die simultane Erfassung der natürlichen Parameter, wie beispielsweise der chemischen Zusammensetzung und der Isotopenkonzentrationen, zusammen mit Ergebnissen von gezielt eingesetzten künstlichen Tracern, ermöglicht es, neue Kenntnisse über physikalische Eigenschaften des Aquifers und die in ihm ablaufenden hydrodynamischen Vorgänge zu gewinnen. Dies bedingt ein sehr aufwendiges Beobachtungsnetz mit zeitlich variablen Probenentnahmen, die den hydrodynamischen Bedingungen angepaßt werden können, und zum Teil sehr spezialisierte chemische und physikalische Meßmethoden.

Beide Voraussetzungen sind im Rahmen des Nationalen Programms durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit der eingangs erwähnten Institute geschaffen worden.

2. Beobachtungsnetz und technische Ausrüstung

Fig. 5 gibt einen Überblick über die räumliche Einteilung der Meßstationen und ihrer technischen Ausrüstung. Im Rahmen der laufenden Untersuchung wurde das bestehende Meßnetz der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (Stationen in La Trévine und La Chaux-de-Fonds) und des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft (Abflußmessung bei Areuse- und Noiraigue-Quellen) mit den folgenden Installationen erweitert:

Drei Regenschreiber (nach HELLMANN) mit guter zeitlicher Auflösung, Papiervorschub 2 cm/Stunde. In Les Verrières (Fig. 5, Nr. 7) wurde der Regenschreiber mit einem automatischen Probennehmer ausgerüstet, um chemische Analysen und Isotopenmessungen von Einzelereignissen zu ermöglichen.

- Drei automatische Registrierstationen bei den Quellen Areuse (Nr. 1), Ubena (Nr. 2) und Fontainemelon (Nr. 3) mit einem Papiervorschub von 1 cm/Stunde. Mit Hilfe von entsprechenden Sonden wurden Temperatur ($\pm 0,1^\circ \text{C}$), Leitfähigkeit ($\pm 1 \mu\text{S/cm}$) und Na^+ ($\pm 0,02 \text{ mg/l}$) gemessen. Geräte und Methode wurden bereits in den Freiburger Voralpen mit Erfolg angewendet (I. MÜLLER, 1976). Die vom Dauerschreiber registrierten Absolut-Werte für Leitfähigkeit und Natrium-Ionenaktivität sind nicht unbedingt sehr genau. So spielt die Temperatur des Quellwassers eine Rolle, weil eine ideale Thermostatisierung nicht möglich war. Die Natrium-Aktivität wurde auf einer logarithmischen Skala registriert; Eichungsfehler, die im Feld nicht zu vermeiden sind, wirken sich auf die Meßgenauigkeit stärker aus als bei einer linearen Skala. Die quantitative Auswertung wurde deshalb stets aufgrund der im Labor gemessenen Proben vorgenommen.
- Drei automatische Probennehmer mit einem Probenintervall von 4 Stunden (24 Braunglasflaschen à 600–700 ccm). An den Proben wurden die folgenden chemischen Parameter im Labor bestimmt: pH, Leitfähigkeit, Härten und folgende Ionenkonzentrationen: Ca^{++} , Mg^{++} , Sr^{++} , Na^+ , K^+ . Am Physikalischen Institut in Bern wurden zusätzlich ^3H und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ gemessen. Wöchentliche Probenentnahmen erfolgten an ungefähr zwanzig weiteren ausgewählten Stellen, wie Quellen, Piezometern, Brunnen und Oberflächengewässern. Bei dieser Gelegenheit wurden auch Temperatur und gelöster Sauerstoff gemessen.

Das gesamte Meßprogramm umfaßt etwa 25.000 Einzelwerte, die in einer Datenbank gespeichert wurden.

Die einzelnen Meßstationen sollen lokale und regionale Fließsysteme repräsentieren, die wiederum verschiedenen geologischen Formationen oder verschiedenen Fließkomponenten des Karstsystems entsprechen, um so eine Gesamtinterpretation der Hydrodynamik zu ermöglichen.

Das beschriebene Meßprogramm wurde von Oktober 1977 bis September 1979 durchgeführt. An der Areuse blieb die automatische Registrierstation bis Ende 1980 in Betrieb.

Die wichtigsten Stationen sind (siehe auch Fig. 5):

Areuse	(Nr. 1): 2 Austritte aus Malm-Synklinalen,
Ubena	(Nr. 2): Austritt eines kleineren Malm-Einzugsgebietes in der ungesättigten Zone. Diese Vorstellung mußte aufgrund der bereits vorliegenden Ergebnisse teilweise revidiert werden.
Fontainemelon	(Nr. 3): Kleinere Quellen aus der ungesättigten Zone,
Moyats	(Nr. 4): Stollenfassung im Doggerkalk,
Bossy	(Nr. 5): Hypertherme, kleinere Quellen aus dem Dogger,
Grotte chez le Brandt	(Nr. 8): Infiltrationszone; Überdeckung etwa 1–3 m Lockergestein und 10–15 m Kalk,
Lac des Taillères	(Nr. 9): See,
Le Bied de la Brévine	(Nr. 10): kleiner Bach,
Le Cachot	(Nr. 13): Tiefbohrung in einen wenig durchlässigen Block,
Gardot	(Nr. 18): Quelle aus dem Argovien-Mergel,
Couvet	(Nr. 21): Kleinere Kreidekalkquellen.

Die t
Beobac
dargest
chemis

Nach
Novem
riode c
große S
außerg
100 mm
an der
Anfang
ein reg
12. Jun
gen. A
beginn
neuten

Die l
gleich
Areuse
den n
tungs

folgt i
80 - mm
70 -
60 -
50 -
40 -
30 -
20 -
10 -
0 -

JAN
80 - mm
70 -
60 -
50 -
40 -
30 -
20 -
10 -
0 -

JAN
80 - mm
70 -
60 -
50 -
40 -
30 -
20 -
10 -
0 -
Fig.

Meteorologie und Hydrologie 1977-1979

Die täglichen Niederschlagswerte der meteorologischen Station La Brévine für die Beobachtungsperiode während des Nationalen Programms sind in Fig. 8 graphisch dargestellt. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Zeitspanne des hydrologischen Meßprogramms, das erst im Herbst 1977 begann.

Während eines trockenen, warmen Herbst begann die winterliche Schneedecke Mitte Oktober. Der Jahreswechsel 1977/78 ist durch eine ausgeprägte Schneeschmelzperiode charakterisiert. Das Tal von La Brévine war überschwemmt, was sich durch hohe Schüttungen in der Areuse-Quelle äußerte. Der Sommer 1978 wurde durch ein ungewöhnliches Ereignis bestimmt: Zwischen dem 7. und 9. August fielen über 40 mm Niederschlag. Das nachfolgende Hochwasser (Schüttungsspitze über $40 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Areuse-Quelle) wurde durch eine extreme Trockenperiode abgelöst, die bis Ende Dezember anhielt. Nach einem Winter mit mittlerer Schneebedeckung folgte im meteorologischen Frühling ein Hagelgewitter von außerordentlicher Heftigkeit am 1. Juni 1979 über dem Gebiet von La Brévine verursachte große Überschwemmungen. Außer kleineren Niederschlagsereignissen blieben der Sommer und der Herbst trocken. Ab Mitte November 1979 charakterisierten starke Regenfälle den Winterbeginn.

Hydrogramme der Quelle Areuse sind in den Figuren 9 und 10 dargestellt. Wenn man diese Schüttungen mit den Niederschlägen in Fig. 8, so zeigt sich, daß die Areuse-Quelle sehr rasch auf meteorologische Ereignisse reagiert. Etwa 8-10 Stunden nach dem Einsetzen von starken Niederschlägen ist in der Regel das Schüttungsmaximum erreicht, der Abfall auf die mittlere Schüttung von etwa $5 \text{ m}^3/\text{s}$ erfolgt in wenigen Tagen.

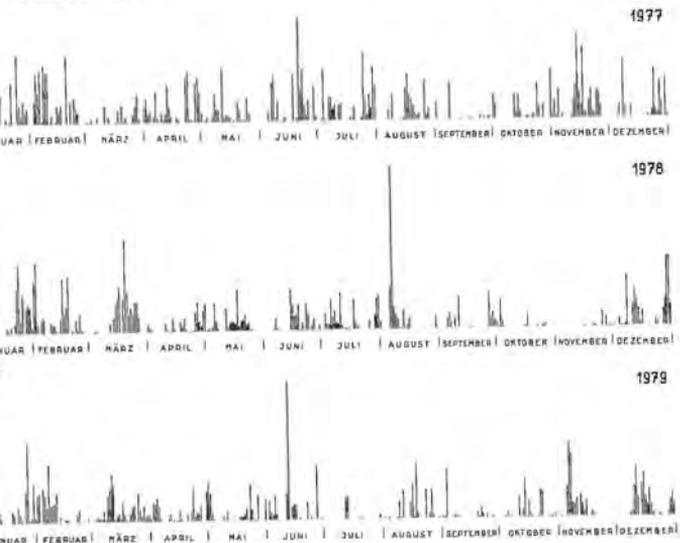


Fig. 8: Die täglichen Niederschlagshöhen der Station La Brévine 1977-1979.

Im Gegensatz dazu reagiert die Ubena-Quelle mit einer gewissen Trägheit: Erst wenn eine bestimmte Niederschlagsmenge erreicht wird, beginnt die Schüttung zu steigen, die Reaktionen sind aber dann wesentlich heftiger (vgl. Kapitel 3).

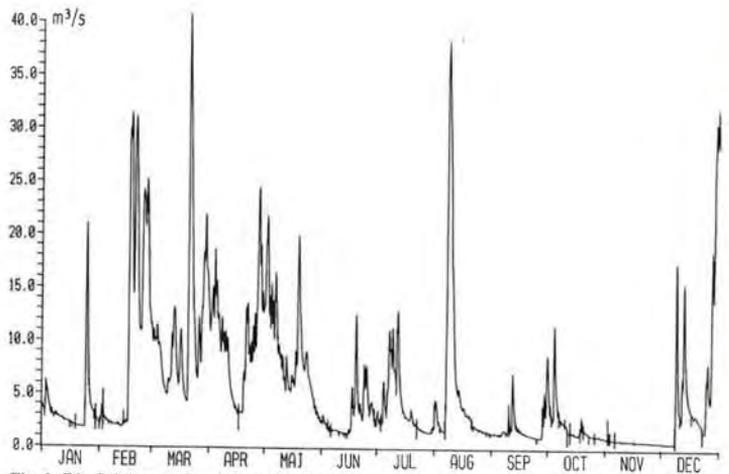


Fig. 9: Die Schüttung der Areuse-Quelle 1978.

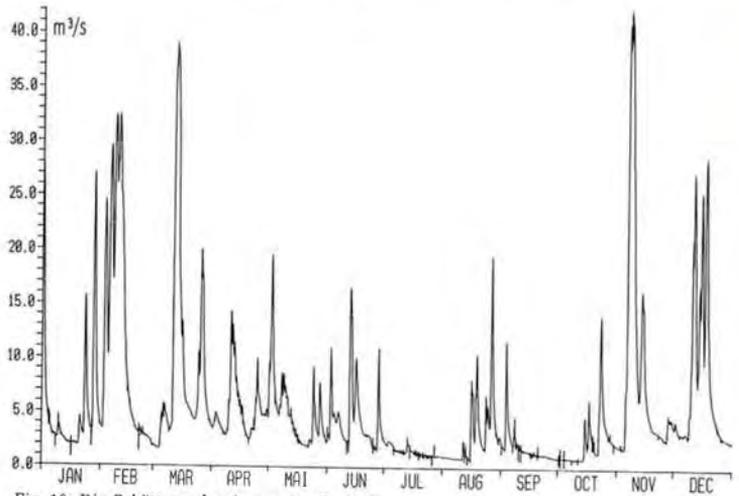


Fig. 10: Die Schüttung der Areuse-Quelle 1979.

2.4. Chemie und Hydrodynamik

Jedes Karstsystem ist durch eine ausgeprägte Heterogenität der Durchlässigkeit charakterisiert. Der Input in dieses System ist ebenfalls heterogen: Ein Teil des Niederschlags wird in den Ponoren gesammelt und erreicht das Karstnetz schnell, ein anderer Teil versickert diffus. Zum Verständnis dieser Verhältnisse verhelfen das Hydrogramm und die Schwankungen der physikalischen und chemischen Parameter des Wassers am Quellaustritt. Schematisch läßt sich der Karst als ein System von wenig durchlässigen Blöcken verstehen, das durch ein organisiertes Netz von Kanälen entwässert wird (Fig. 11).

Bei Niederschlag oder Schneeschmelze steigt der Wasserspiegel in den Kanälen schneller als in den Blöcken, die so durch frisches Infiltrat gespeist werden. Gleichzeitig erreicht die Schüttung der Quelle die höchsten Werte. Nach Beendigung des Niederschlags entleert sich das Netz sehr rasch, die Schüttung fällt ab, und der Wasserspiegel im Netz wird niedriger als in den Blöcken, was eine Umkehr der Fließrichtung bewirkt: Wasser aus den Blöcken fließt nun ins Karstnetz, und die Schüttungskurve wird flacher. Das Hydrogramm der Areuse (Fig. 9, 10) demonstriert diesen Mechanismus eindrucklich. Die diesem Modell entsprechenden schnell und langsam fließenden Komponenten des Wassers haben selbstverständlich großen Einfluß auf die physikalischen und chemischen Parameter. Die chemischen Gleichgewichte von infiltriertem Wasser und umgebendem Gestein in Abhängigkeit von benetzter Oberfläche und Verweilzeit wurden aus hydrogeologischer Sicht bereits diskutiert (L. KIRALY und I. MÜLLER, 1979).

Der mit Dauerschreibern registrierte Jahresverlauf von Temperatur, Leitfähigkeit und der Natriumionenaktivität an der Areuse (Fig. 12–15) reflektiert die Heterogenität der Infiltrationsbedingungen und der Durchlässigkeit im Karst. Die Verdünnung wird durch die raschfließenden Komponenten während Hochwasserperioden verursacht, während bei Trockenperioden die Blöcke mineralisiertes Wasser liefern. Der Beprobungsplan wurde so organisiert, daß für jedes wichtige hydrodynamische Ereignis Meßergebnisse zur Verfügung standen.

Die physikalischen und chemischen Parameter des Wassers als natürliche Tracer wurden zur Analyse des Hydrogramms der Areuse-Quelle eingesetzt, um die bisher

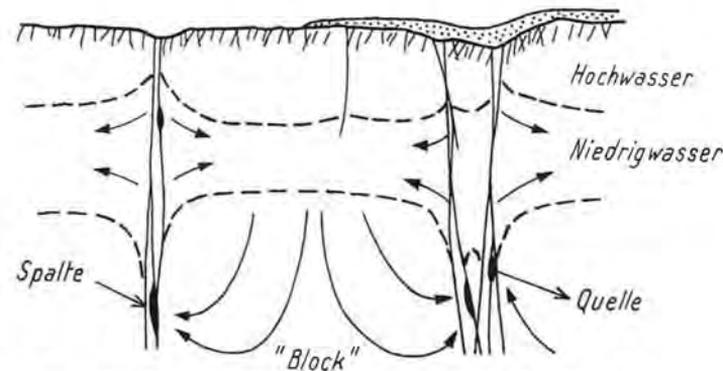


Fig. 11: Schema der unterirdischen Karstwasserzirkulation (nach A. BURGER, 1979).

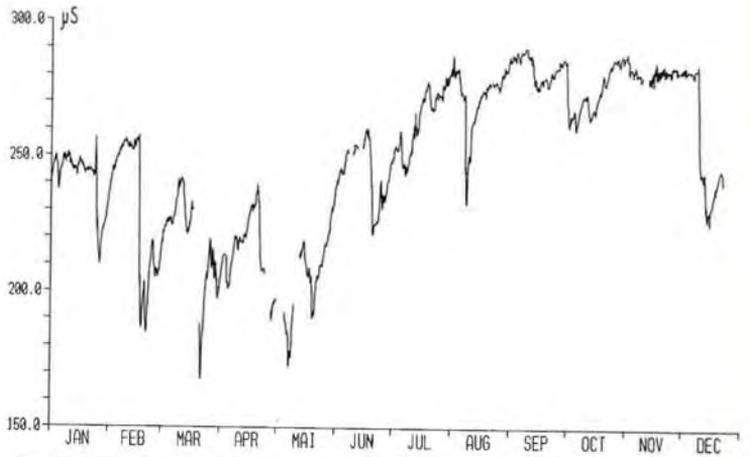


Fig. 12: Ganglinien der Leitfähigkeit der Areuse-Quelle im Jahre 1978.

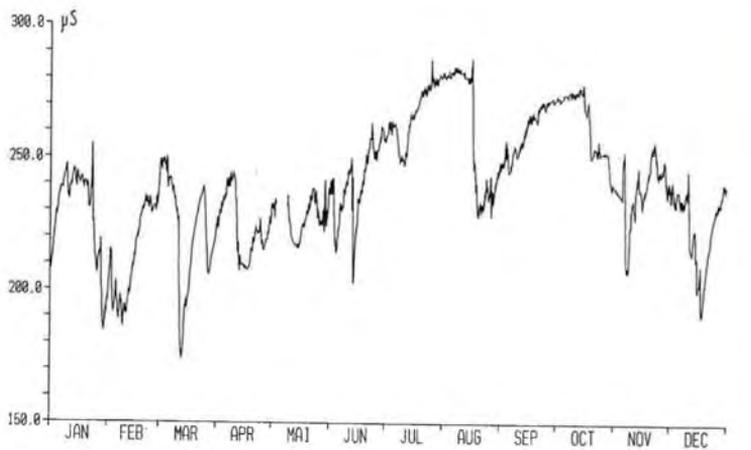
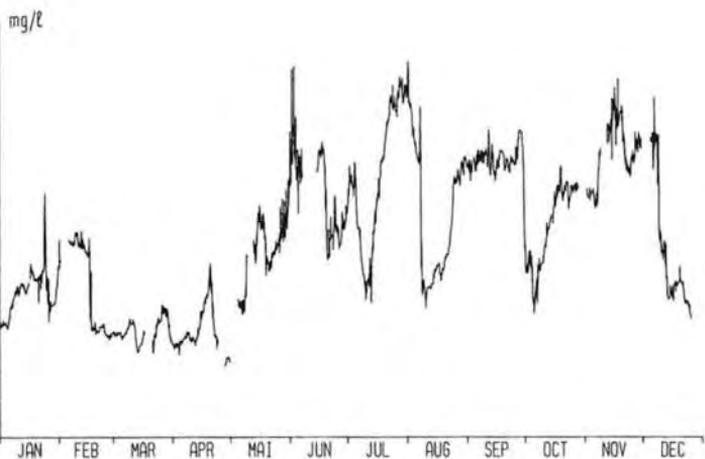
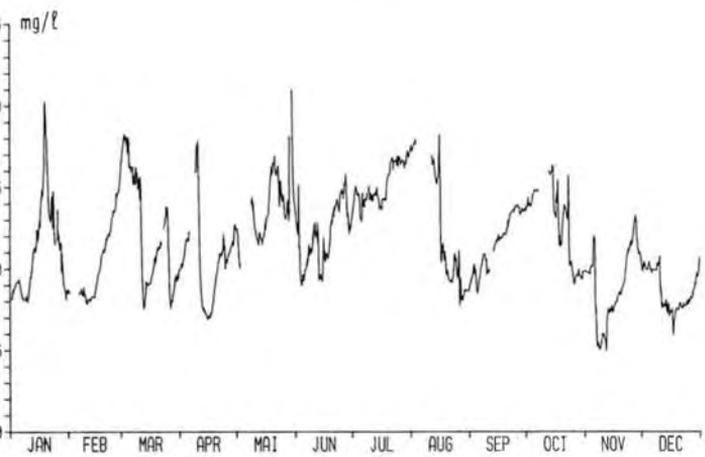


Fig. 13: Ganglinien der Leitfähigkeit der Areuse-Quelle im Jahre 1979.



g. 14: Natriumaktivität der Areuse-Quelle im Jahre 1978.



g. 15: Natriumaktivität der Areuse-Quelle im Jahre 1979.

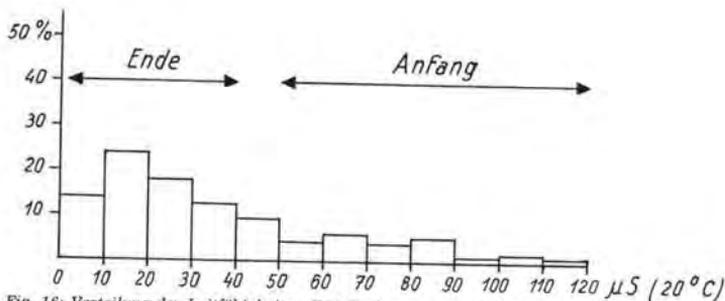


Fig. 16: Verteilung der Leitfähigkeiten (200 Proben aus ca. 15 Ereignissen).

angewendete klassische Methode der logarithmischen Analyse von Auslaufkurven zu ergänzen (A. BURGER, 1956, H. SCHÖLLER, 1967, J. FORKASIEWICZ & H. PALOC, 1967). Dies ermöglicht es, die Identität des Wassers (Frischwasser oder älteres Reservoirwasser) im Verlauf einer Hochwasserwelle zu bestimmen.

Der Chemismus der Niederschläge wurde an etwa 200 Proben untersucht, wobei die Einzelereignisse auch noch zeitlich unterteilt wurden. Wie Fig. 16 zeigt, ist der Anteil an gelösten Stoffen in der Anfangsphase eines Niederschlags wesentlich höher, entsprechend einem sehr wirksamen Auswaschen atmosphärischer Schwebestoffe. Für die Inputkonzentration der Leitfähigkeit wurde für Niederschläge ≤ 10 mm $40 \mu\text{S}/\text{cm}$ und für alle übrigen $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ gewählt. Im Natrium ließ sich meßtechnisch keine Unterscheidung machen, dieser Wert beträgt $0,1 \text{ mg}/\text{l}$. Für Magnesium sind die Inputwerte vernachlässigbar.

Weihnachtstauwetter Dezember 1977/Jänner 1978:

Die außerordentlich starke Erwärmung mit Regenfällen zwischen 23. und 27. Dezember 1977 brachte die gesamte Schneedecke im Einzugsgebiet der Areuse zum

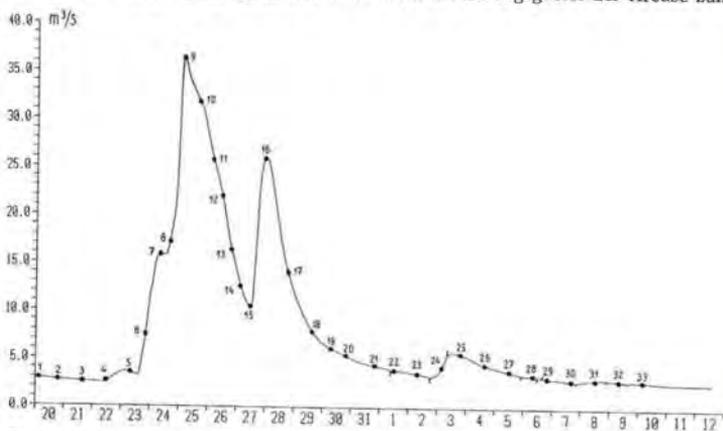


Fig. 17: Schüttung der Areuse-Quelle vom 20. Dezember 1977 bis 12. Jänner 1978 mit Häufigkeit der Beprobung.

schmelzen (siehe Tabelle 2). Die folgende Hochwasserperiode mit der Auslaufkurve vom 10. Jänner 1978 wurde aufgrund der günstigen Inputbedingungen mit ^3H und $\delta^{18}\text{O}$ ausgewertet (vergl. Kapitel 2.5.). Die Veränderung der gelösten Stoffe, ausgedrückt in Leitfähigkeit und Natriumionenkonzentration, wurde mit diesen beiden im Wasser-molekül eingebauten natürlichen Tracern im selben Zeitraum verglichen. Fig. 17 zeigt das Hydrogramm der Areuse-Quelle. Proben, die im Labor untersucht wurden, sind mit den Nummern 1–33 bezeichnet.

Tab. 2: Tägliche meteorologische Angaben der Stationen La Chaux-de-Fonds (= CF, 1060 m Sh) und La Brévine (= Br, 1060 m Sh).

Datum	CF Lufttemperatur (Mittelw.) ° C	Br Lufttemperatur (Mittelw.) ° C	CF Niederschlag (mm)	Br Niederschlag (mm)	CF Schneehöhe (cm)	Br Schneehöhe (cm)
20. 12. 77	5,0	-14,6			11	38
21. 12.	4,3	- 7,3	4,4	1,0	11	38
22. 12.	3,5	0,6	0,2		10	37
23. 12.	4,7	2,9	10,3	4,0	10	37
24. 12.	8,3	6,4	22,9	24,8	7	35
25. 12.	1,7	2,0	4,0	3,4		10
26. 12.	-0,4	- 1,2	1,6	2,0		
27. 12.	3,0	2,8	16,2	18,5	2	
28. 12.	-1,6	- 1,2	9,6	8,6	22	22
29. 12.	-3,6	- 6,0			22	21
30. 12.	-2,4	- 2,0	13,7	20,6	37	36
31. 12.	-3,6	- 2,5	5,8	1,8	38	35
01. 01. 78	-2,3	- 5,3			34	33
02. 01.	0,7	- 5,9	4,5	4,8	33	29
03. 01.	-0,4	- 0,1	5,6	8,2	27	26
04. 01.	-2,8	- 2,4	8,1	8,1	32	39
05. 01.	-7,2	- 9,3		1,2	31	36
06. 01.	-4,9	-19,3			30	35
07. 01.	1,2	-18,3			29	35
08. 01.	-1,5	-12,1			27	35
09. 01.	-0,6	-11,5			26	35
10. 01.	-0,2	- 1,2	2,3	1,0	26	30
11. 01.	-1,2	- 2,0	9,1	10,4	33	26
12. 01.	-4,0	- 3,9	3,1	2,0	39	28
13. 01.	-2,9	- 2,0			37	28
14. 01.	-3,1	- 3,7			36	25
15. 01.	-3,2	- 5,1			36	28
16. 01.	-1,2	- 9,6			36	28
17. 01.	-2,3	-10,9	0,3		35	28
18. 01.	-1,7	- 5,3	1,3	2,5	35	31
19. 01.	-2,4	- 1,9	0,8	1,2	35	29
20. 01.	-2,1	- 3,0	2,0	3,6	38	34
21. 01.	-3,4	- 3,1			38	34
22. 01.	-2,7	- 5,0	4,3	5,6	42	38
23. 01.	-2,2	- 1,5	13,2	23,2	49	47

Für dieselbe Periode zeigen Fig. 18, 19 die Ergebnisse der Dauerschreiber für Leitfähigkeit und Natriumionenkonzentration. Die Meßdaten widerspiegeln eine deutliche Verdünnung des Quellwassers durch frisches Infiltrat. Zu Beginn des Hochwassers nimmt jedoch die Gesamtmineralisation zu. Eine mögliche Erklärung dieses „Pion-Effekts“ ist das Ausfließen von unter dem Quellniveau liegendem, stark mineralisiertem älterem Wasser infolge des starken Anstiegs des hydraulischen Druckes. Danach beginnt – noch im ansteigenden Teil des Hydrogramms – die Verdünnung.

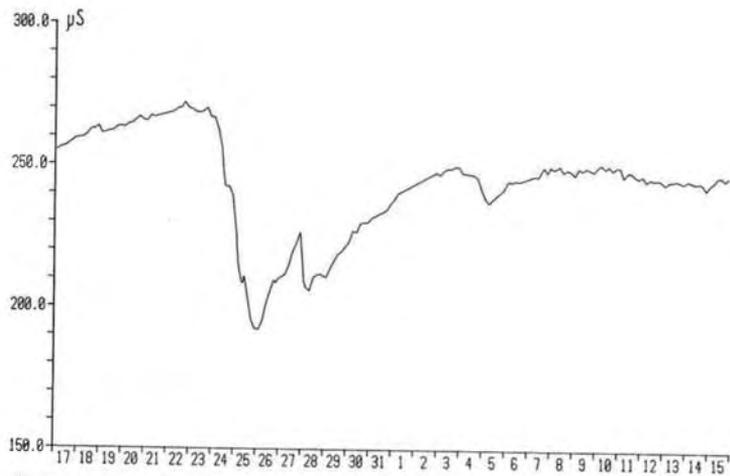


Fig. 18: Ergebnisse des Dauerschreibers für die Leitfähigkeit der Areuse-Quelle für die Tauwetterperiode Dezember-Jänner 1977/78.



Fig. 19: Ergebnisse des Dauerschreibers für die Natriumionenaktivität der Areuse-Quelle Dezember-Jänner 1977/78.

Die Fig. 20 und 21 zeigen den ganzen chemischen Kreislauf während des beschriebenen Ereignisses:

Die Proben 1–4 charakterisieren Niedrigwasser. Proben 5 und 6 geben den Pistoneffekt wieder (Dauer etwa 8–10 Stunden), mit der Probe Nr. 7 beginnt die Verdünnung. Sie wird auch noch nach dem Schüttungsmaximum ($36 \text{ m}^3/\text{s}$) größer, die maximale Verdünnung wird in der Auslaufkurve bei Probe Nr. 11 erreicht (siehe Tritiumverlauf in Kap. 2.5.), und zwar etwa 1 Tag nach dem Schüttungsmaximum. Das entspricht einer mittleren Fließgeschwindigkeit des Frischwassers von 400 m/h , wenn man den Input-Schwerpunkt in das Gebiet von La Brévine legt.

Die Proben 12–15 zeigen ansteigende Mineralisierung, während die Schüttung weiter abnimmt. Eine nochmalige Verdünnung erfolgt mit dem neuerlichen Schüttungsanstieg am 27. 12., auch hier zeigt sich der maximale Anteil des Frischwassers etwa einen Tag nach dem Schüttungsmaximum (Probe Nr. 17). Danach nimmt die Schüttung ohne nennenswerten weiteren Schmelzwassereinfluß ab, und die Mineralisierung nähert sich den ursprünglichen Werten. Ein qualitativ ähnlicher Verlauf der Zusammenhänge ^{18}O -Schüttung bzw. Leitfähigkeit-Schüttung wurde für eine Quelle im Hochgebirgskarst der Berner Alpen gefunden, dort allerdings für den Jahresgang der Schüttung, welcher durch die Schneeschmelze dominiert wird (U. SCHOTTERER et al., 1979).

Der mittleren Verdünnung des Quellwassers in der Periode zwischen 21. Dez. 1977 und 7. Jänner 1978 entspricht für die Natrium-Konzentration etwa 30% Frischwas-

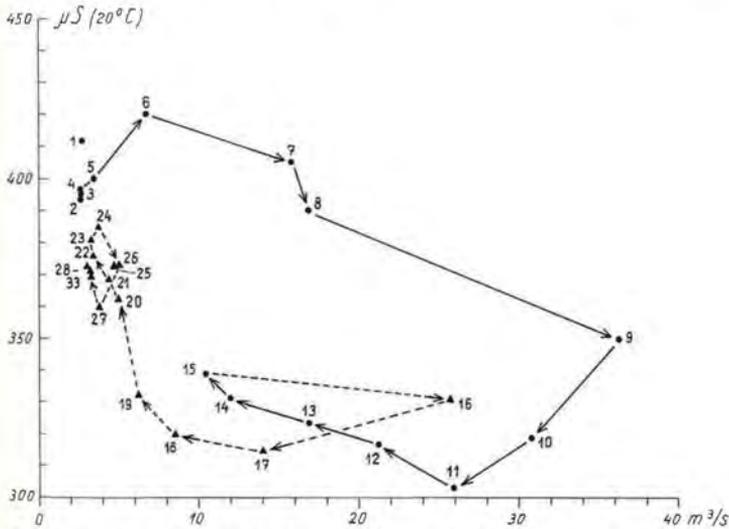


Fig. 20: Korrelationsdiagramm Leitfähigkeit/Schüttung der Areuse-Quelle vom 20. Dezember 1977 bis 10. Jänner 1978. Punkte = Probenentnahme (siehe Fig. 17) erster Teil der Durchgangskurve 1–15, Dreiecke = Probenentnahme zweiter Teil der Durchgangskurve 16–33.

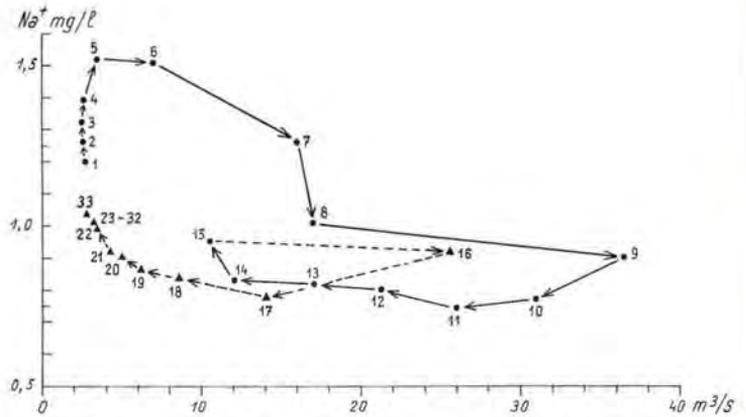
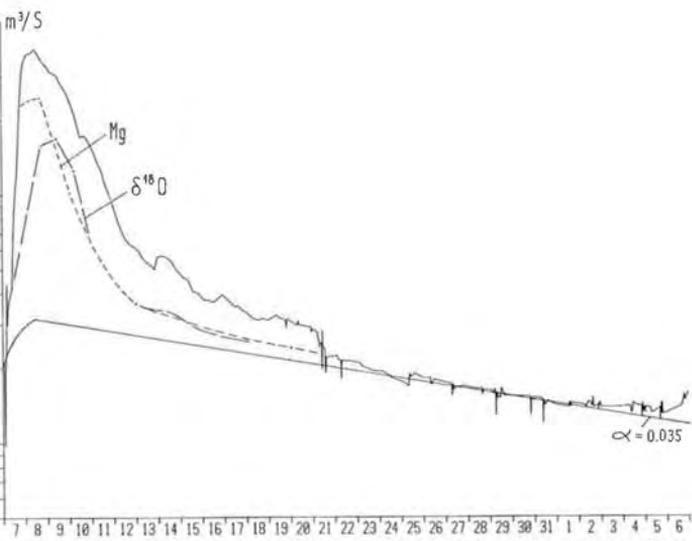


Fig. 21: Korrelationsdiagramm Natriumgehalt/Schüttung im Zeitablauf wie Fig. 20.

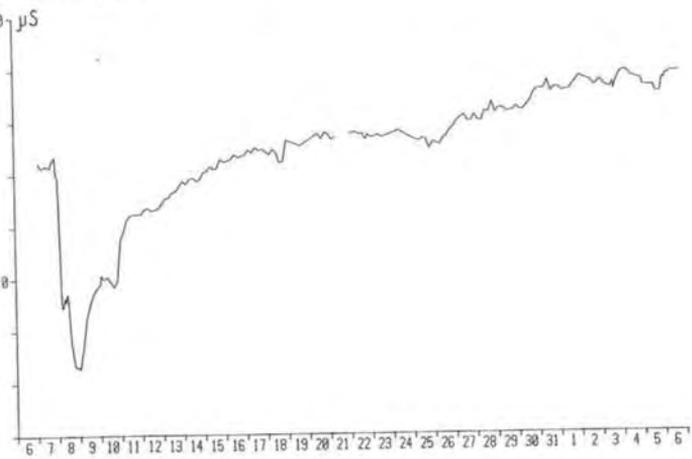
seranteil (gewichtet mit der Schüttung), der maximalen Verdünnung etwa 50%. Diese Werte sind durchaus mit den aus den Isotopendaten gewonnenen Werten vergleichbar (Kapitel 2.5.). Dieselbe Auswertung mit den Leitfähigkeitswerten ergibt wesentlich geringere Frischwasseranteile (14% im Mittel, 20–25% als Maximum). Dieser Unterschied kann mit der fortschreitenden Auflösung von Kalkstein durch das Frischwasser erklärt werden. Der Vergleich des Kurvenverlaufs der Dauerschreiber für Na^+ und Leitfähigkeit (siehe Fig. 18, 19) zeigt deutlich die unterschiedliche Geschwindigkeit, mit der die Systeme Natrium und Karbonat nach erfolgter Verdünnung wieder ins Gleichgewicht gelangen. Das wesentlich langsamer reagierende Natrium kann in diesem Fall durchaus mit den Isotopen vergleichbare Resultate liefern und demzufolge als konservativer Tracer gelten.

Wir haben schon darauf hingewiesen, daß man die Schüttungskurve einer Karstquelle in Komponenten zerlegen kann, und zwar in eine „Direktabflußkomponente“ (rasche Infiltration und rascher Abfluß aus den Karstkanälen) und in eine „Basisabflußkomponente“ (Anteil, der von den wenig durchlässigen Blöcken kommt). In den meisten Fällen bestimmt man die Komponenten durch die sogenannte „exponentielle Zerlegung“ (H. SCHÖLLER, 1967; J. FORKASIEWICZ und H. PALOC, 1967). Man nimmt in dieser Methode an, daß der annäherungsweise exponentielle Teil der Rezessionskurve der Basisabflußkomponente gleich ist. Diese Zerlegungsmethode ist theoretisch nicht ganz einwandfrei (siehe: E. BERKALOFF, 1967; L. KIRALY und B. MOREL, 1976b), aber sie gibt eine größenordnungsmäßig gute Schätzung der Basisabflußkomponente an. Wir möchten hier an einem konkreten Beispiel zeigen, daß diese Methode mit den chemischen und isotopischen Beobachtungen nicht im Widerspruch steht.

Auf Fig. 22 ist eine einzelne Hochwasserwelle der Areuse-Quelle dargestellt. In den halblogarithmischen Koordinaten erscheint die Basisabflußkomponente als eine Gerade, und die Differenz zwischen Basisabflußkurve und Schüttungskurve gibt die Direktabflußkomponente an. Man sieht, daß der maximale Direktabfluß mehr als 90% der Schüttung ausmacht (an der Spitze der Schüttungskurve). Die Fig. 23 und 24 zei-



22: Komponenten-Trennungen des Hochwassers der Areuse im August 1978. α = Rezessionskoeffizient.



23: Veränderung der Leitfähigkeit während des Hochwasserereignisses August–September 1978 (vgl. Fig. 22, Dauerschreiber).

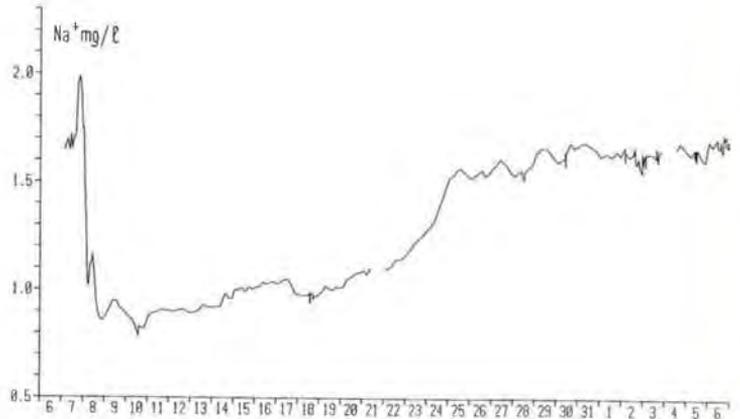


Fig. 24: Veränderung des Na^+ -Gehaltes während des Hochwasserereignisses August-September 1978 (vgl. Fig. 22, Dauerschreiber).

gen dazu die Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit und des Na^+ -Ions. Klar sieht man den Verdünnungseffekt während des Hochwassers und die Zunahme der Mineralisation während des Abstieges der Schüttung. Ab 26. August stabilisiert sich die Schüttung wieder, und die Schüttungskurve verhält sich annäherungsweise wie eine Exponentielle. Das bedeutet, daß wir nur noch die Basisabflußkomponente haben, und die chemische Zusammensetzung bestätigt, daß das Wasser nur noch von den wenig durchlässigen Blöcken kommen kann.

Bei diesen Gegebenheiten ist die Versuchung groß, den Verdünnungseffekt noch weiter auszunutzen und die Schüttungskurve in eine Frischwasserkomponente und in eine Altwasserkomponente zu zerlegen. Für diese Zerlegung haben wir den Verdünnungseffekt von Mg^{++} und von $\delta^{18}\text{O}$ benutzt. Die Resultate sind auf Fig. 22 dargestellt, und man stellt mit Überraschung fest, daß auch die Direktabflußkomponente eine ziemlich große Menge altes Wasser enthält! Man kann dies so verstehen, daß **dieses alte Wasser schon vorher in den Karstgängen war** (also bevor die Hochwasserwelle kam) **und nicht während des Hochwassers von den wenig durchlässigen Blöcken gekommen ist**. Das bedeutet aber, daß man Frischwasserkomponente nicht mit Direktabflußkomponente und Altwasserkomponente nicht mit Basisabflußkomponente gleichsetzen darf. Direktabfluß und Basisabfluß sind hydraulische Begriffe, die nicht mit Mischungsvorgängen verwechselt werden dürfen. Die rein chemische oder isotopische Zerlegung der Schüttungskurve gestattet es nicht, den Basisabfluß und den Direktabfluß eindeutig zu bestimmen. Umgekehrt kann die hydraulische Zerlegung ihrerseits keine eindeutige Auskunft über Frischwasserkomponente und Altwasserkomponente einer Karstquelle geben. Beide Methoden geben verschiedene Informationen über das System, die jedoch nicht im Widerspruch stehen, sondern sich gegenseitig ergänzen.

2.5. Tritium- und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Messungen

2.5.1. Einleitung

Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium (^3H) sowie die stabilen Isotope Sauerstoff-18 (^{18}O) und Deuterium (^2H) sind natürliche Tracer für den Wasserkreislauf, die bei hydrologischen Anwendungen Aussagen über Alter, Herkunft und Mischungen von Wasser ermöglichen. Gegenüber anderen Tracern, wie chemischer Zusammensetzung oder Temperatur, zeichnen sie sich dadurch aus, daß sie, im Wassermolekül eingebaut, dessen Weg weitgehend unbeeinflußt von chemischen Reaktionen, Austausch mit dem Wasserleiter etc. mitmachen (Ausnahmen sind der radioaktive Zerfall beim Tritium und bei sehr hohen Temperaturen Austausch von ^{18}O mit dem Gestein).

Erste isotohydrologische Untersuchungen an der Areuse wurden von A. BURGER et al. (1972) vorgenommen, die eine starke Dämpfung der Isotopenvariationen in der Quelle im Vergleich zu den Niederschlägen feststellten. Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms „Wasserhaushalt der Schweiz“ haben wir im Neuenburger Jura ausgedehnte $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ - und Tritium-Messungen durchgeführt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag im Einzugsgebiet der Areuse. Eine Zusammenfassung erster Resultate wurde von U. SCHOTTERER (1980) gegeben. Im folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse für die Quellen Areuse, Ubena, Moyats und Bossy sowie den Bach Bied bei La Brévine, der dort die Quartärbedeckung der näheren Umgebung entwässert, diskutiert (vgl. Fig. 5). Die Quellen sind im Abschnitt 2.2. beschrieben.

Tritium-Konzentrationen werden in Tritium-Einheiten (abgekürzt TU von „trium unit“) angegeben, wobei 1 TU einem Verhältnis $^3\text{H}/\text{H}$ von 10^{-18} entspricht. Zur Angabe von $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnissen wird die Delta-Notation benutzt, wobei $\delta^{18}\text{O}$ die relative Abweichung (in Promille) vom Standard SMOW (Standard Mean Ocean Water) bedeutet. Die Meßgenauigkeit (1 Standardabweichung) der hier wiedergegebenen Resultate beträgt für Tritium rund $\pm 4,5$ TU, für $\delta^{18}\text{O} \pm 0,07\%$.

Im übrigen wird für die Grundlagen der Isotohydrologie auf andere Arbeiten verwiesen, z. B. H. MOSER (1972), U. SIEGENTHALER (1972) und H. OESCHGER und U. SIEGENTHALER (1972).

2.5.2. Niederschläge

Als Input-Werte wurden die Isotopenkonzentrationen an Monats-Niederschlagsproben von La Brévine, Les Verrières und Chaux-du-Milieu (Nummern 7, 12, 20 in Fig. 5) bestimmt. Einzelproben standen zur Untersuchung von Hochwasserereignissen zur Verfügung. Fig. 25 gibt den Verlauf von Tritium und $\delta^{18}\text{O}$ in den Monatsproben wieder. Die Streuung zwischen den einzelnen Stationen ist im allgemeinen niedrig, was bedeutet, daß man die Werte dieser Stationen als repräsentativ für die Speisung im gesamten Einzugsgebiet annehmen darf.

In Figur 25 gut zu erkennen ist der für die Isotopenkonzentration in den Niederschlägen typische jahreszeitliche Gang, mit einem Maximum im Frühsommer (Tritium) resp. im Hochsommer ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

In Tabelle 3 sind gewichtete Mittelwerte für die hydrologischen Halbjahre und Jahre von Oktober 1977 bis August 1979 angegeben. Werte einzelner Monate fehlen aus technischen Gründen, wie Überflutung der Pluviographen oder extremer Trockenheit, und wurden durch Schätzwerte ersetzt.

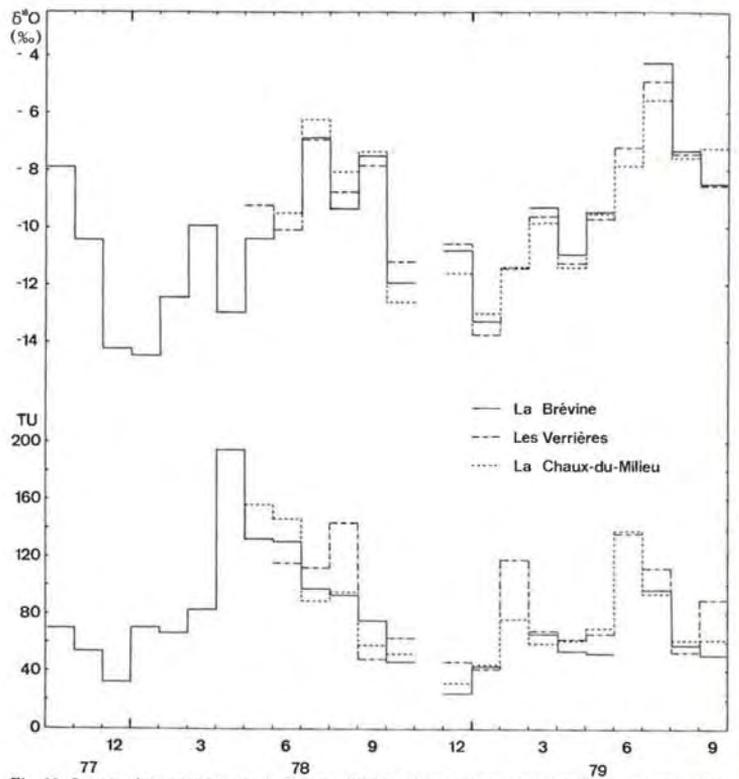


Fig. 25: Isotopenkonzentrationen in Monats-Niederschlagsproben von La Brévine, Les Verrières und Chaux-du-Milieu.

Tab. 3: Tritium- und $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte in den Niederschlägen; Grundlage ist das Monatsmittel aller jeweils gemessenen Stationen. Zwei Gewichtungen werden verglichen: Mit der Niederschlagsmenge p (gemessen in La Brévine) und mit der Schüttung Q der Areuse.

Periode	Gewicht = p	Gewicht = Q
10/77 - 3/78	64 TU -11.6‰	63 TU -11.3‰
4/78 - 9/78	121 TU -9.0‰	143 TU -10.1‰
10/78 - 3/79	57 TU -11.2‰	65 TU -11.1‰
4/79 - 9/79	82 TU -8.5‰	78 TU -8.9‰
10/77 - 9/78	87 TU -10.6‰	98 TU -11.0‰
10/78 - 9/79	68 TU -10.1‰	70 TU -10.3‰

Als Input-Konzentrationen für Altersberechnungen müssen gewichtete Mittelwerte benutzt werden. Üblich ist es, als Gewicht die Niederschlagsmenge p zu nehmen. Jedoch ist, infolge der Evapotranspiration, die tatsächliche Versickerung kleiner als der Niederschlag, und zwar besonders im Sommer. Um dies angenähert zu berücksichtigen, wurde angenommen, daß die Schüttung der Areuse (Q) unmittelbar auf den Niederschlag reagiert und deshalb die totale Monatsschüttung etwa der Speisung in diesem Monat entspricht. Auf diese Weise erhalten die Sommermonate ein geringeres Gewicht, als wenn mit der Niederschlagsmenge gewichtet wird, und es könnte erwartet werden, daß die resultierenden Jahresmittel der Isotopenkonzentrationen niedriger als die niederschlagsgewichteten Mittel sind. Tabelle 3 zeigt, daß dies für $\delta^{18}\text{O}$ zutrifft, nicht aber für Tritium. Die Unterschiede sind aber relativ gering. Niederschlagsgewichtete Input-Werte repräsentieren also im Neuenburger Jura die Jahresspeisung anscheinend recht gut.

2.5.3. Langzeittrends und Wasseralter von Quellwasser

Isotopenmessungen erlauben die Abschätzung des Alters eines Wassers. Bevor darauf näher eingegangen wird, sind einige Bemerkungen über den Begriff „Alter“ am Platz. Grund- und Quellwasser besitzt kein einheitliches Alter, sondern stellt stets ein Gemisch von Anteilen verschiedenen Alters dar.

Was bestimmt wird, ist im allgemeinen das **mittlere Alter**. Da im Karst die Verhältnisse sehr instationär sind, ist oft auch das mittlere Alter einer Karstquelle zeitlich variabel. So kann eine Quelle nach starken Regenfällen einen bedeutenden Anteil frischen Regenwassers führen, und das mittlere Alter ist dann kleiner als in einer Trockenwetterperiode. Das weiter unten ermittelte mittlere Alter der Quellen ist also ein Mittelwert über ganz verschiedene hydrologische Situationen. Ein mit Hilfe von Tritium- und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Analysen bestimmtes Alter bedeutet die Spanne zwischen dem Zeitpunkt, wo das Wasser als Niederschlag gefallen ist, und der Probenahme. Die unterirdische Verweildauer kann geringer sein, etwa wenn der Niederschlag zunächst in einer Schneedecke gespeichert wurde. Bei den untersuchten Karstquellen ist zu beachten, daß unter Umständen ein Teil des Wassers zuerst in der Quartärüberdeckung gespeichert wird und also beim Eintritt ins Karstsystem schon vorgealtert ist.

Zur Abschätzung des mittleren Alters kann man entweder die Jahresmittelwerte der Tritium-Konzentration in Quelle und Niederschlägen vergleichen oder die Dämpfung der jahreszeitlichen Variationen von ^3H und $\delta^{18}\text{O}$ betrachten. Fig. 26 zeigt den langfristigen Verlauf der Isotopenkonzentrationen in den Quellen Areuse, Bossy und Moyats, sowie Jahresmittelwerte für Tritium in den Niederschlägen. Die Resultate reichen z. T. nicht bis Ende des hydrologischen Jahres 1978/79, weil die Analysen, der großen Probenzahl wegen, noch nicht abgeschlossen sind. Tabelle 4 gibt (arithmetische) Mittelwerte sowie Standardabweichungen für die Quellen an. An sich sollten für eine Isotopenbilanz schüttungsgewichtete Mittelwerte betrachtet werden, was jedoch nicht möglich ist: An den Quellen Bossy und Moyats waren keine Schüttungsmessungen möglich, und für die Areuse, deren Schüttung stark und rasch schwankt, hätte eine prohibitiv große Zahl von Proben gemessen werden müssen, um die Berechnung von schüttungsgewichteten Jahresmitteln zu ermöglichen. Für Bossy und Moyats, deren Isotopenkonzentrationen innerhalb der Meßfehler fast konstant sind, werden deshalb die arithmetischen Mittel aller Einzelproben angegeben. Für die Areuse wurden nur Niedrigwasserproben ($Q \leq 5 \text{ m}^3/\text{s}$) berücksichtigt, aus diesen Monatsmittelwerte gebildet (in Fig. 26 eingetragen) und daraus schließlich arithmetische Jahresmittel berechnet; die mit der Monatsschüttung gewichteten Jahresmittel der Niedrigwasser-Monatswerte stimmen auf 1–3 TU resp. 0,1 ‰ mit den arithmeti-

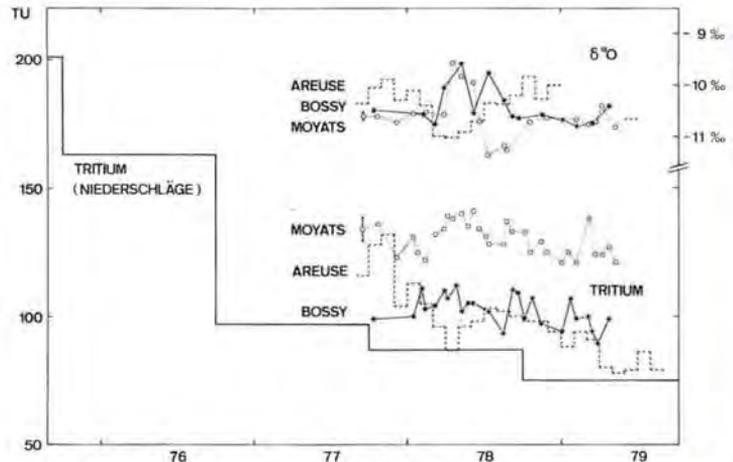


Fig. 26: ^{18}O - und Tritiumkonzentrationen in den Quellen Areuse, Bossy und Moyats. Für Areuse sind Monatsmittelwerte von Niedrigwasser-Proben dargestellt, für die anderen alle Meßwerte. Zum Vergleich sind Tritium-Jahresmittel für die Niederschläge (mit Niederschlagsmenge gewichtet) angegeben, wobei die Werte für das hydrologische Jahr 1977 und früher auf Messungen im Berner Oberland basieren.

schen Mitteln überein. Die in Tabelle 4 angegebenen Mittelwerte können also als repräsentativ für den Grundabfluß und damit für gespeichertes Reservoirwasser der Areuse betrachtet werden.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte der 3 Quellen entsprechen sowohl den niederschlags- wie den schüttungsgewichteten Mittelwerten der Niederschläge (Tabelle 3) innerhalb einiger Zehntel Promille. Ob die Unterschiede reell oder durch zufällige Probenauswahl bedingt sind, läßt sich im Moment noch nicht eindeutig feststellen.

Tab. 4: Arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen der Isotopenkonzentration in Quellen. Für Areuse sind nur Werte bei niedriger Schüttung ($\leq 5\text{m}^3/\text{s}$) berücksichtigt, vgl. Text. Die Mittelwerte für Bossy und Moyats sind arithmetische Mittel aus allen Einzeldaten.

	Tritium (TU)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Areuse		
10/77 – 9/78	105 ± 13	-10.4 ± 0.4
10/78 – 9/79	87 ± 8	
Bossy, 10/77–4/79	102 ± 6	-10.4 ± 0.4
Moyats, 9/77–5/79	130 ± 6	-10.6 ± 0.4

Die Tritium-Konzentration ist in allen 3 Quellen höher als die Jahresmittel 1978 und 1979 im Niederschlag; das bedeutet, daß alle Quellen einen Anteil Wasser aus früheren Jahren (1975/76), wo der Tritium-Gehalt der Niederschläge höher war, enthalten. Zur quantitativen Auswertung wird ein Modell der Altersverteilung benötigt. Oft verwendet wird das sogenannte Exponentialmodell, dem die Annahme zugrunde liegt, daß das Quellwasser eine repräsentative Mischung aller Alterskomponenten im

Grundwasserleiter ist; der Anteil von Wasser eines bestimmten Alters nimmt, gemäß diesem Modell, mit zunehmendem Alter exponentiell ab. Ein gut durchmisches Reservoir hat diese Altersverteilung, doch ist es nicht Voraussetzung dafür. Grundwasser in einem Aquifer ist im allgemeinen nicht gut durchmischt; die Mischung erfolgt erst in oder vor der Quelle. Für eine nähere Beschreibung siehe H. OESCHGER und U. SIEGENTHALER (1972).

Es zeigt sich, daß für die hier untersuchten Quellen aufgrund der Jahresmittelwerte nur eine grobe Altersabschätzung möglich ist, weil die Inputkonzentration nicht genügend genau bekannt ist (keine Messungen im Jura vor Herbst 1977, Gewichtung der Monatswerte unsicher, vgl. Abschnitt 2.5.2.). Für Areuse ergibt das Exponentialmodell ein mittleres Alter in der Größenordnung von 2 Jahren, für Moyats ein solches von 10–15 Jahren und für Bossy ein solches von 20–25 Jahren. Insbesondere bei Moyats und Bossy ist jedoch zu beachten, daß diese Alter mit Hilfe des Exponentialmodells geschätzt wurden und daß aus einer andern Annahme über die Altersverteilung andere Alter resultieren könnten. Der Altersunterschied zwischen Areuse und den zwei anderen Quellen kann geologisch damit begründet werden, daß die Areuse den Oberflächenkarst (Malm) entwässert, Bossy und Moyats dagegen Quellen aus dem tiefen Karst (Dogger) sind.

Eine unabhängige Altersabschätzung ist anhand der jahreszeitlichen Schwankungen der Isotopenkonzentrationen möglich. Ein Vergleich der Figuren 26 und 27 mit Fig. 25 zeigt, daß die Variationen in den Quellen im Vergleich zu den Niederschlägen stark gedämpft sind. Weder im Sommer noch im Winter treten in den Quellen so extreme Werte wie in den Niederschlägen auf, auch nicht bei Hochwasser. Das zeigt, daß älteres Reservoirwasser aus anderen Jahreszeiten stets einen bedeutenden Teil des Gesamtabflusses ausmacht, das mittlere Alter der Quellen also mindestens mehrere Monate betragen muß. Für eine quantitative Abschätzung kann man die jahreszeitlichen ^3H - und $\delta^{18}\text{O}$ -Variationen in erster Näherung als sinusförmige Variationen mit der Periode 1 Jahr betrachten. Unter der Annahme, daß die Fließverhältnisse stationär, Speisung und Schüttung also zeitlich konstant sind – für den Karst natürlich eine sehr stark vereinfachende Annahme –, ergibt das Exponentialmodell eine Dämpfung der jahreszeitlichen Amplitude in der Quelle um den Faktor (H. OESCHGER und U. SIEGENTHALER, 1972):

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi T/\tau)^2}}$$

Dabei ist τ die Periode der jahreszeitlichen Variationen, also $\tau = 1$ Jahr des Reservoirwassers und T gleich mittleres Alter.

Da die jahreszeitlichen Schwankungen in Niederschlag und Quellen von einer Sinuskurve deutlich abweichen, sind die Amplituden schlecht definiert. Der Dämpfungsfaktor f wurde deshalb als Verhältnis der Streuung (Standardabweichung σ ; $\sigma^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)$) der Werte in der Quelle zur Streuung der Niederschlagswerte berechnet.

Für die Areuse ergibt sich so für beide hydrologischen Jahre 10/77–9/78 und 10/78–9/79 eine gleich große Dämpfung von 0,29, entsprechend einem mittleren Alter von 0,5 Jahren für Tritium, und für das hydrologische Jahr 10/77–9/78 eine Dämpfung von 0,15, entsprechend einem Alter von 1,0 Jahren für $\delta^{18}\text{O}$; dabei sind nur Messungen bei Niedrigwasser (Grundabfluß) berücksichtigt. (Grundlage: Monatsmittelwerte für Niederschlag und Areuse.)

Für die Areuse wurden die Dämpfungsfaktoren auch anders berechnet, nämlich als das Verhältnis der mittleren Differenzen zwischen den 3 höchsten und den 3 tiefsten Monatswerten in der Areuse und im Niederschlag. Interessanterweise stimmen die so

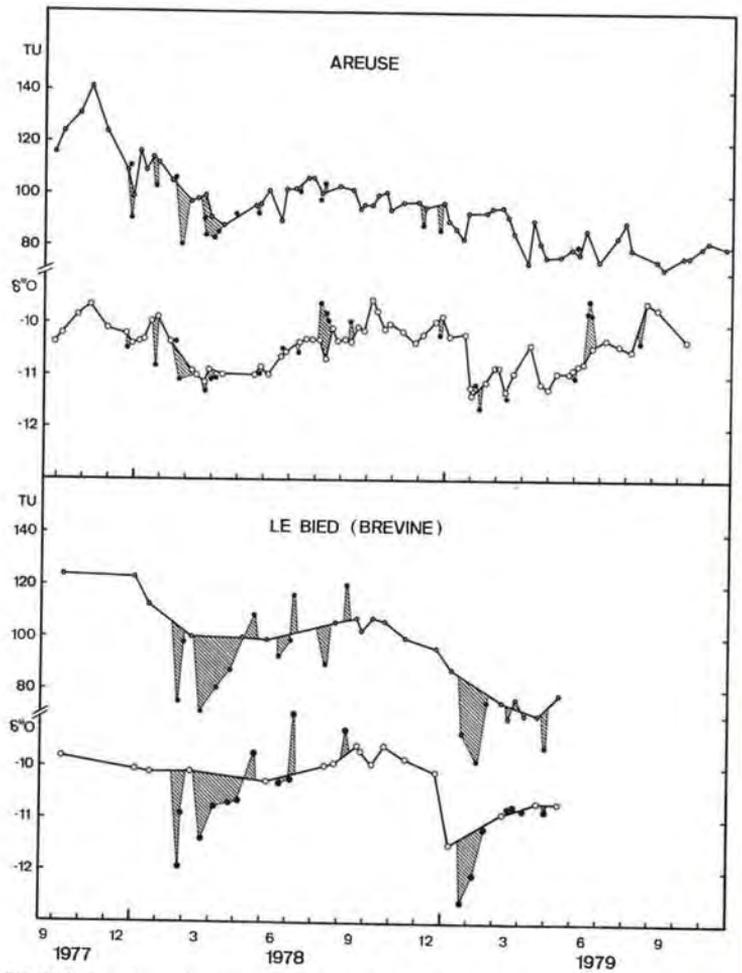


Fig. 27: Isotopenkonzentrationen im Bach Bied bei La Brévine und in der Areuse (Einzelproben). Offene Kreise: Niedrigwasser; gefüllte Kreise: Hochwasser. Schraffiert: Perioden mit starkem Frischwassereinfluß.

ermittelten Dämpfungsfaktoren mit den aus den Streuungen berechneten sehr gut überein.

Die ^{18}O -Variationen sind stärker gedämpft als die Tritium-Variationen, was vermutlich einerseits mit dem Zeitpunkt der Sommermaxima in den Niederschlägen, andererseits mit der im Sommer relativ geringen Speisung der Areuse-Quelle zusammenhängt. Das $\delta^{18}\text{O}$ -Niederschlagsmaximum (Juni–September, Fig. 25) fällt mit einer Periode verminderter Schüttung, also auch verminderter Speisung zusammen (vgl. Fig. 26), so daß die Niederschläge mit hohem $\delta^{18}\text{O}$ relativ wenig zur Speisung beitragen. Für Tritium tritt das Maximum früher als für $\delta^{18}\text{O}$ auf, mindestens zum Teil noch vor der sommerlichen Trockenperiode.

Die anhand der jahreszeitlichen Variationen geschätzten Wasseralter sind alle kleiner als die aus den Jahresmitteln berechneten. Das hängt vermutlich damit zusammen, daß die Voraussetzungen – stationäre Zu- und Abflußverhältnisse sowie Mischung gemäß Exponentialmodell – nicht zutreffen und daß die in den Quellen beobachtete Streuung zum Teil eine Folge der instationären hydrodynamischen Verhältnisse ist (variiierende Anteile aus mehreren Teilreservoirien; Frischwasser in gewissen Proben). Die aus den Dämpfungsfaktoren ermittelten Alterswerte sind also nur als untere Grenze für das mittlere Alter zu betrachten.

Eine weitere Möglichkeit, die Erneuerung im Reservoirwasser durch Regen oder Schneeschmelzwasser in einem bestimmten Zeitraum abzuschätzen, ist die folgende:

Wenn man annimmt, daß der Grundabfluß repräsentativ für Reservoirwasser ist, so ist die isotopische Veränderung während eines bestimmten Zeitraumes (bei bekanntem Input) ein Maß für die Erneuerung. Ein Zeitraum, bei dem der Unterschied in den ^3H -Konzentrationen im Niederschlag und in den Quellen genügend groß war, um vernünftige Abschätzungen zu machen, war der Winter 1977/78.

In der Areuse sank der Grundabfluß von 128 TU Ende November 1977 auf 88 TU Mitte April 1978; der mittlere Niederschlagswert in dieser Periode betrug 61 TU. Das entspricht einer Reservoirerneuerung in diesem Zeitraum ($6\frac{1}{2}$ Monate) von rund 60%. Setzt man eine exponentielle Altersvertretung voraus, so entspricht diese Erneuerung einem mittleren Alter von 7 Monaten. Da die Erneuerung aber im Sommer geringer als im Winter ist, so muß das übers ganze Jahr ermittelte mittlere Alter etwas größer sein.

Zusammengefaßt ergibt sich also für das Reservoirwasser der Areuse, repräsentiert durch den Grundabfluß, ein mittleres Alter von ca. 9 Monaten bis 2 Jahren.

2.5.4. Der Bach Bied bei La Brévine als Quartärentwässerung

Die Talmitte von La Brévine ist von Torfmooren bedeckt, die oberflächlich durch kleinere Bäche, die alle in Karstschwinden fließen, entwässert werden. Der Bied bei La Brévine ist einer der größeren solcher Bäche. Er mündet in eine große Schwinde, in welche beim Markerversuch im Mai 1979 Amidorhodamin eingespeist wurde (Nr. 215, siehe Kap. 3.1.).

In Fig. 27 sind ^3H - und ^{18}O -Konzentrationen vom Bied aufgetragen und den Werten der Areuse gegenübergestellt, wobei zwischen Niedrigwasserwerten (d. h. Grundabfluß) und Hochwasserwerten unterschieden wird (beurteilt anhand der Schüttung der Areuse). Die Grundabflußwerte variieren im Bied im allgemeinen langsam, während bei Hochwasser zum Teil starke Schwankungen vorkommen. ^{18}O und ^3H variieren parallel, sowohl beim Grundabfluß als auch, besonders ausgeprägt, bei Hochwasser. Im Bach ist der Anteil Niederschlagswasser offenbar bedeutend. Die Hochwasserwerte der Areuse weichen dagegen wesentlich schwächer von der Grundabflußlinie ab. (Von der Areuse sind vor allem Niedrigwasserproben auf Tritium gemessen worden, weshalb in Fig. 27 für 1979 keine Hochwasserwerte eingetragen sind.)

Die Grundabfluß-Konzentrationen im Bied werden, wie Fig. 27 zeigt, im allgemeinen wenig von vorangegangenen Hochwasserperioden beeinflusst. Anscheinend enthalten die Quartärformationen ein Wasserreservoir, das nur langsam erneuert wird und in Trockenwetterperioden den Bach speist. Ein Vergleich der Grundabfluß-Isotopenkonzentrationen von Areuse und Bied zeigt eine weitgehende Übereinstimmung, sowohl bezüglich Absolutwerten wie bezüglich jahreszeitlicher Schwankungen. Offensichtlich hat der Grundabfluß des Bachs (Wasser des Quartär-Reservoirs) ein mittleres Alter von der Größenordnung eines Jahres wie bei der Areuse.

Die Quartärbedeckung und die Bäche bilden also anscheinend ein System von ähnlicher Struktur wie der Karst: Es existieren Formationen von geringer Durchlässigkeit, die Speicher für älteres Wasser bilden und bei Trockenwetter die Bäche speisen, während die Bäche bei Regen oder Schneeschmelze einen raschen Abfluß von Frischwasser ermöglichen.

2.5.5. Komponententrennung bei Hochwasserereignissen

Bei einem Hochwasser z. B. nach einem Starkregen ist es klar, daß der Regen die Ursache des Schüttungsanstiegs ist, aber die Frage besteht, welcher Bruchteil des Abflusses tatsächlich Regenwasser ist. In einer konventionellen Ganglinien-Analyse wird die Ganglinie graphisch in Grundabfluß und Direkt- oder Oberflächenabfluß getrennt, wofür zahlreiche Vorschriften bestehen (siehe z. B. V. T. CHOW, 1964; vgl. auch Abschnitt 2.4.). Eine spezielle solche Vorschrift beruht darauf, daß die Schüttungskurve bei längeren Trockenperioden ungefähr exponentiell abfällt, was in einer einfach-logarithmischen Darstellung eine Gerade ergibt. Durch Rückwärts-Extrapolation kann man die Schüttungsspitze in Basisabfluß und Direktabfluß trennen. Diese Art von Hydrogramm-Analysen betrifft das hydraulische Verhalten des Aquifers. Bei einer Karstquelle entsprechen Basis- und Direktabfluß den Blöcken bzw. dem Karstnetz.

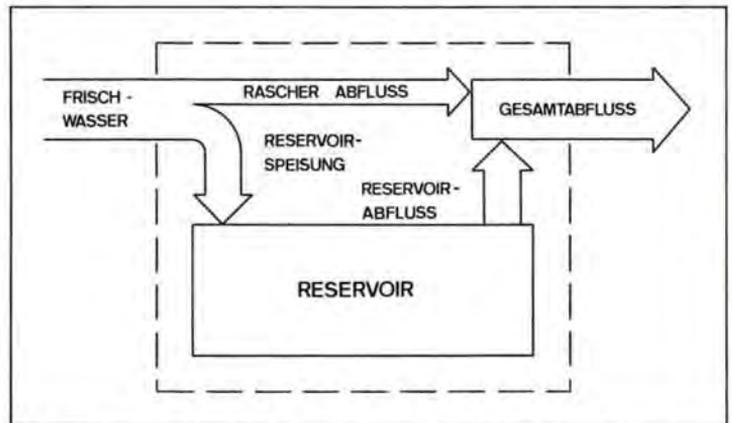


Fig. 28: Schematische Darstellung des Abflußvorganges. Frischwasser fließt zum Teil rasch ab, zum Teil speist es das Reservoir und verdrängt daraus älteres Reservoirwasser. Unter „Reservoir“ ist die gesamte gesättigte Zone zu verstehen (Karstblöcke, Karstnetz und weitere Teilaquifere).

Im Gegensatz dazu erlauben es Isotopenmessungen an Niederschlag und Quellwasser, die Anteile von älterem Reservoirwasser und frischem Niederschlagswasser im Abfluß zu bestimmen (E. CROUZET et al., 1970, J. MARTINEC et al., 1974). Voraussetzung ist, daß sich der Niederschlag vom Reservoirwasser isotopisch deutlich unterscheidet. Die zugrunde liegende Vorstellung ist in Fig. 28 schematisch dargestellt.

Nachts-Tauwetter 1977 (Fig. 29)

Am 24. Dezember 1977 fielen in La Brévine 25 mm Regen, und zugleich trat eine Erwärmung ein, so daß die knapp 40 cm dicke Schneedecke innerhalb von zwei Tagen schmolz (s. Tab. 2). In der Folge stand die ganze Ebene von La Brévine unter Wasser. Man kann also eine einheitliche, flächenmäßige Speisung annehmen; die Inputkonzentration (Schneeschmelze plus Regen) betrug ca. 43 TU. Fig. 29 zeigt, daß der Inputwert in der Areuse- und in der Ubena-Quelle auch während der Schüttungsmaxima nicht annähernd erreicht wurde. Dabei reagierte Ubena gedämpfter als Areuse. Zwischen 20. Dezember 1977 und 25. Jänner 1978 lag die mittlere Abflußkonzentration (gewichtet mit der Schüttung) in der Areuse bei 103 TU und in der Ubena bei 114 TU. Bezogen auf die Tritium-Werte vor dieser Periode (ca. 122 resp. 126 TU) ergibt sich ein Niederschlagsanteil von 25% für Areuse und 15% für Ubena; die errechneten Maximalwerte betragen 42% resp. 27%. Das heißt, daß im wesentlichen, hydraulisch stimuliert, älteres Reservoirwasser zum Abfluß gelangte und im Gesamtabfluß bei beiden Quellen stets mehr als die Hälfte ausmachte.

Die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Resultate ergeben ein ähnliches Bild wie die Tritium-Resultate und werden deshalb nicht gezeigt. Die Änderungen der chemischen Zusammensetzung wurden im Abschnitt 2.4. diskutiert.

Nachwässer August 1978 (Fig. 30)

Vom 7. bis 9. August 1978 fielen im Einzugsgebiet innerhalb 48 Stunden über 90 mm Niederschlag. In der Folge stieg die Schüttung der Areuse-Quelle von knapp 30 auf maximal 38 m^3/s an. Der mittlere $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Regens lag bei ca. -9‰ und somit höher als jener des Areuse-Grundabflusses ($-10,3$ bis $-10,4\text{‰}$); allerdings streuen die Werte der Einzelniederschläge stark, so daß kein genauer Mittelwert für den Regen angegeben werden kann. Nimmt man $-9,0\text{‰}$ für den Regen an, so beträgt der maximale Anteil Niederschlagswasser knapp 50% (am 8. August, beim Schüttungsmaximum). Die Abflußmenge in der Zeit vom 7. bis 12. August entsprach, über die Einzugsgebietsfläche gemittelt, 76 mm oder 61% der Regenmenge, die in La Brévine zwischen 7. und 10. August fiel. Aus einer ^{18}O -Bilanz ergibt sich für diese Zeitspanne ein mittlerer Frischwasseranteil von 41% (Fehlergrenze: 30%–63%, bei Annahme eines Wertintervalls von $-9,0 \pm 0,5\text{‰}$ für den Regen).

Da sich die Tritium-Konzentrationen in Niederschlag und Reservoirwasser nur wenig voneinander unterscheiden, ist eine solche Abschätzung mit Hilfe von Tritium in dieser Periode nicht möglich.

Interessant ist der Vergleich mit dem Chemismus im Hinblick auf eine allfällige Berechnung des Frischwasseranteils aufgrund einer einfachen Verdünnungsrechnung. Die Gesamthärte nahm um maximal 10% ab und stieg innerhalb von 6 Tagen auf ihren ursprünglichen Wert. Ihre Abnahme ist also wesentlich geringer, als wenn das direkt abfließende Regenwasser unverändert (d. h. mit Härte ~ 0) in die Quelle gelangen würde – ein Ergebnis, das nicht erstaunt (siehe auch Kapitel 2.4.). Die Magnesiumkonzentration (Fig. 30) nimmt jedoch im Maximum um 44% ab und steigt, wie ^{18}O , relativ langsam wieder an. Zwischen Mg^{++} - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten besteht eine gute Korrelation, und Extrapolation der Regressionsgerade auf $\text{Mg}^{++} = 0$ liefert $\delta^{18}\text{O} = -9,0\text{‰}$, in Übereinstimmung mit dem geschätzten Regenwert.

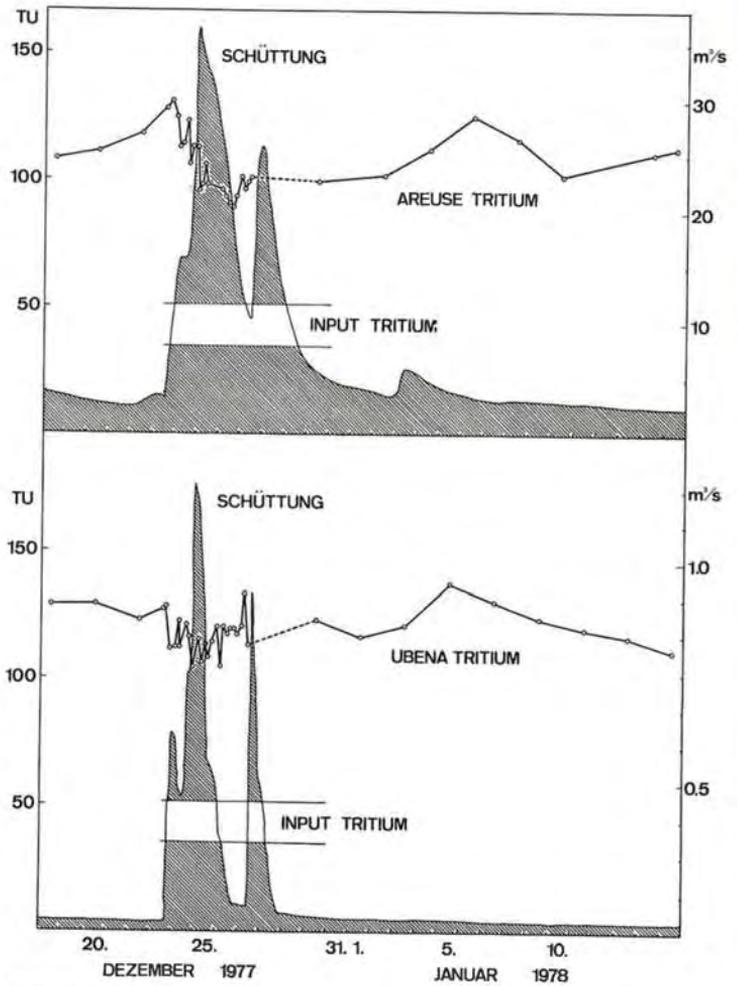


Fig. 29: Tritiumkonzentration der Quellen Areuse und Ubena sowie des Inputs (Schneedecke plus Regen) für das Weihnachtstauwetter 1977. Schraffiert: Schüttung der Areuse-Quelle.

Da der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Inputs schlecht bekannt ist und zudem in jener Periode nur eine Wasserprobe pro Tag entnommen werden konnte, ist eine detailliertere Auswertung nicht möglich. Immerhin sieht es so aus, als ob die Magnesium-Auflösung im Boden so langsam gewesen sei, daß es mehrere Wochen dauerte, bis die ursprüngliche Mg^{++} -Konzentration wieder erreicht war. Weiter ergeben auch andere Elemente, insbesondere Natrium, ähnliche Resultate bei einer Verdünnungsrechnung wie Magnesium. Man könnte deshalb vermuten, daß eine Abschätzung der Abflußkomponenten aufgrund der Mg^{++} - oder Na^+ -Konzentration möglich sei, wenigstens während einiger Tage nach einer Hochwasserspitze.

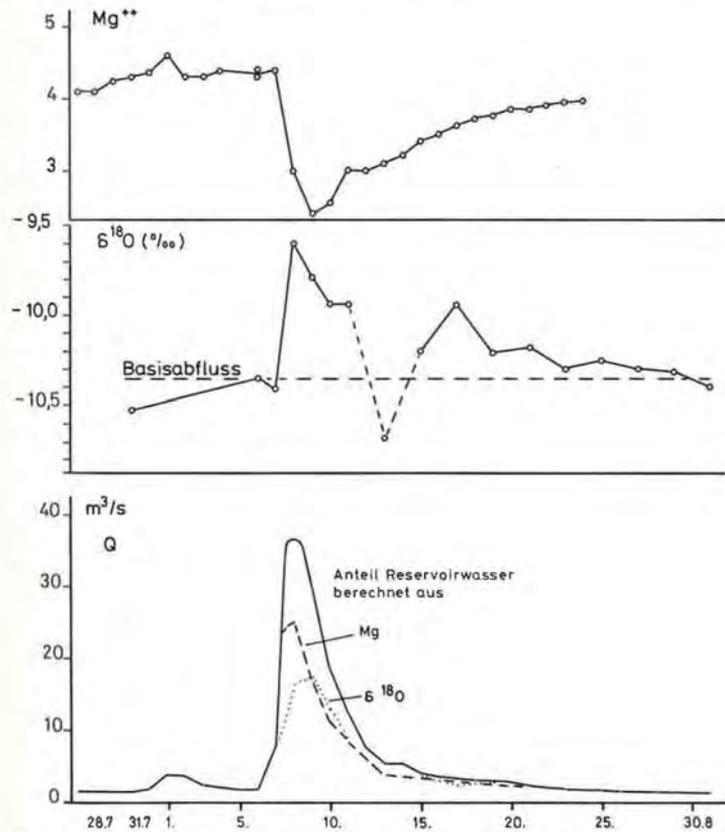


Fig. 30: Hochwasser der Areuse im August 1978. Bei der Schüttung sind die aufgrund der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (punktiert) resp. der Magnesiumkonzentration (gestrichelt) geschätzten Anteile Reservoirwasser angegeben.

Hochwasser Juni 1979

Am 12. Juni brachte ein heftiges Hagelgewitter, das sich auf die Region von La Brévine beschränkte und sich auf die Zeit von 14 bis 16 Uhr konzentrierte, 73 mm Niederschlag. Die Schüttung der Areuse begann 2 bis 3 Stunden nach Niederschlagsbeginn anzusteigen und erreichte um 3 Uhr am nächsten Morgen den Höchstwert von $17 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 31; vgl. auch Abschnitt 2.4.). Der Tagesniederschlag von La Brévine hatte ein $\delta^{18}\text{O}$ von $-7,5\%$, eine vom Boden gesammelte Hagelprobe $-8,2\%$. $\delta^{18}\text{O}$ in der Areuse stieg in der Folge von einem Basiswert von $-10,8\%$ aus an, die Konzentrationen der gelösten Stoffe nahmen ab. In Fig. 31 ist $\delta^{18}\text{O}$ für die beiden Austritte Seite La Brévine (Quelle 4) und Seite Verrières (Quelle 5, vgl. Kap. 3.1.) dargestellt, Na^+ - und Mg^{++} -Konzentration (gemessen im Labor) nur für die Seite Brévine (Quelle 4).

Zunächst zeigt sich, daß das $\delta^{18}\text{O}$ -Maximum 24 bis 48 Stunden nach dem Schüttungsmaximum auftritt. Dies ist vermutlich so zu interpretieren, daß der Schüttungsanstieg rein druckbedingt ist: Durch eine sich rasch fortpflanzende Druckwelle wird relativ altes Wasser aus dem Reservoir gepreßt, während sich das Wasser selbst wesentlich langsamer fortbewegt. Ein analoges Phänomen ist in der Hydraulik für eine Druckwelle (Schwall) in einem Gerinne bekannt (L. PRANDTL, 1965, Abschnitt 2.3.13.).

Der $\delta^{18}\text{O}$ -Anstieg ist in beiden Austritten fast identisch, jedoch fällt $\delta^{18}\text{O}$ beim Austritt Verrières langsamer ab als beim Austritt Brévine. Die Seite Verrières führt also nicht weniger Regenwasser als die Seite Brévine, wie zu vermuten wäre, da der Niederschlag ja praktisch auf das Teileinzugsgebiet La Brévine beschränkt blieb (in Les Verrières fielen am 12. Juni nur 7 mm Niederschlag).

Aus den gemessenen Resultaten lassen sich, unter der Annahme, daß das Quellwasser eine Mischung nur der zwei Komponenten Reservoirwasser und Niederschlag darstellt, direkt deren Anteile abschätzen. Der Rechnung zugrunde gelegt sind Werte von $-10,8\%$ für Reservoirwasser (= Grundabfluß) und $-7,8\%$ für Niederschlag. Die so geschätzten Anteile Frischwasser (Niederschlag) betragen maximal 43% (Seite Brévine) resp. 42% (Seite Verrières, wobei der hohe ^{18}O -Wert vom 14. Juni, 19 Uhr, nicht berücksichtigt wird. Er wurde zwar durch eine Nachmessung bestätigt, fällt aber im Vergleich sowohl mit $\delta^{18}\text{O}$ Seite Brévine wie mit der Chemie aus der Reihe). Der Anteil Frischwasser am gesamten Abfluß während der Periode vom 12. Juni, 17 Uhr, bis 15. Juni, 9 Uhr, d. h. bis vor dem neuerlichen Schüttungsanstieg, betrug 24%, berechnet aufgrund der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Seite Brévine. In Fig. 31 sind neben dem Gesamtabfluß auch die berechneten Werte für Reservoirabfluß (langgestrichelt) und Frischwasser (kurzgestrichelt) aufgetragen.

Leitfähigkeit, Mg^{++} - und Na^+ -Konzentration (vgl. Abschnitt 3.2.) nehmen parallel zum $\delta^{18}\text{O}$ -Anstieg ab; sie sind alle gut mit $\delta^{18}\text{O}$ korreliert. Eine Verdünnungsrechnung anhand der Leitfähigkeit, unter der Annahme, daß Regenwasser die Leitfähigkeit $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ habe, ergibt jedoch (für die Seite Brévine) einen scheinbaren Frischwasseranteil von im Maximum 17%, also viel zuwenig, was bedeutet, daß das rasch abfließende Frischwasser eine beträchtliche Eigenleitfähigkeit haben muß, nämlich etwa $250 \mu\text{S}/\text{cm}$. Auch die Verdünnungsrechnung mit Mg^{++} liefert zu niedrige Werte, im Maximum 22%; die Mg^{++} -Konzentration steigt nach ca. einer Woche sogar über den ursprünglichen Basisabfluß-Wert. Offensichtlich löst das versickernde Regenwasser also Ionen, unter anderem Magnesium, aus dem Untergrund auf. Dagegen stimmen die Resultate aufgrund von Natrium gut mit jenen aufgrund von

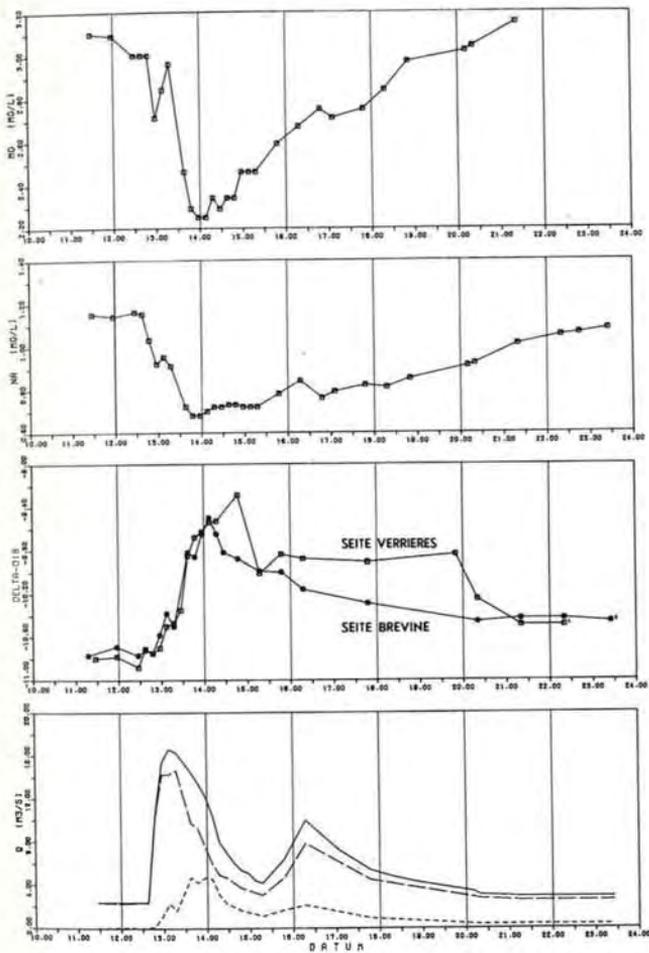


Fig. 31: Areuse-Hochwasser 12./13. Juni 1979. Im Gegensatz zu Fig. 39 beruhen die dargestellten Natriumkonzentrationen auf Labormessungen. Bei der Schüttung sind die mit Hilfe von $\delta^{18}\text{O}$ berechneten Anteile von Reservoirwasser (langgestrichelt) und Frischwasser (kurzgestrichelt) eingetragen. Quadrate im zweituntersten Diagramm = $\delta^{18}\text{O}$ Quellaustritt Seite Verrières, Kreise = $\delta^{18}\text{O}$ Quellaustritt Seite Brévine. Die Datumsangabe 12.00 bedeutet 12. Juni, 0.00 Uhr. Der 12. Juni dauert also von 12.00 bis 13.00.

$\delta^{18}\text{O}$ überein: Der maximale Anteil Regenwasser (angenommene Na^+ -Konzentration: 0,1 mg/l) errechnet sich zu 45% (aus $\delta^{18}\text{O}$: 42%) und der Gesamtbeitrag des Direktabflusses in der Periode vom 12. Juni, 17 Uhr, bis 15. Juni, 9 Uhr, zu 21% (aus $\delta^{18}\text{O}$: 22%). Beim Markierungsversuch Ende Mai 1979 wurde auch NaCl eingesetzt. Die NaCl-Tracerwelle setzte am 29. Mai ein und dauerte 60 Stunden, und die maximale Konzentration betrug nur 6 mg/l, d. h. nur ca. das Fünffache der natürlichen Grundabfluß-Konzentration (siehe Kap. 3.4.). Man darf also annehmen, daß am 11. Juni kein meßbarer Anteil vom Tracer-NaCl mehr in der Areuse-Quelle vorhanden war.

Im Zusammenhang mit dem Markierungsversuch (Kap. 3) ist der Schüttungsanstieg der Areuse nach einem Gewitter am 2. Juni 1979 von Interesse (Fig. 32). Die Tritium-Konzentration der Areuse blieb während des Hochwassers innerhalb des Meßfehlers konstant bei 80 TU; der Gewitterregen hatte dagegen 124 TU (gewichtetes Mittel Verrières und Brévine). Das bedeutet, daß nur sehr wenig Regenwasser direkt

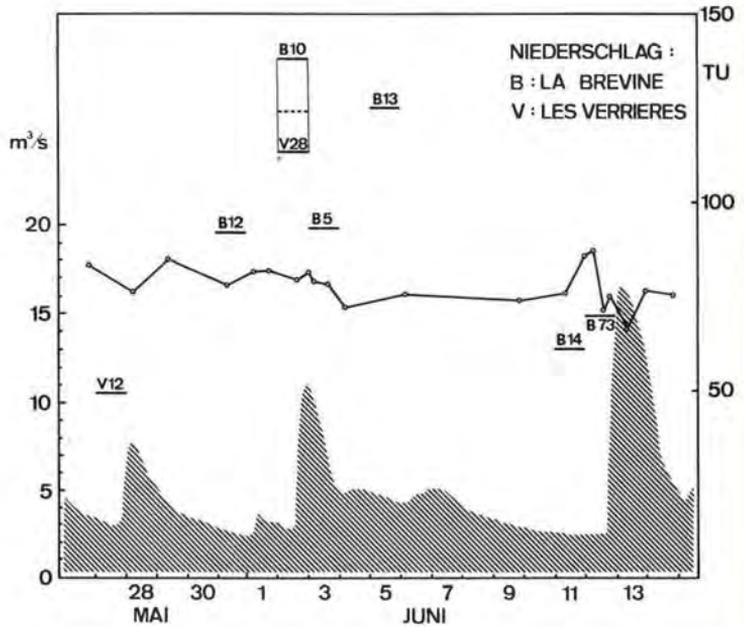


Fig. 32: Tritiumkonzentration in der Areuse im Juni 1979 (Periode des Markierungsversuches) und in Niederschlägen. Beim Schüttungsanstieg am 2./3. Juni blieb Tritium konstant, obwohl der Regen deutlich höhere Konzentration hatte. Am 11. Juni fiel in La Brévine 14 mm Regen (durch B 14 angegeben). Die Schüttung (schraffiert) reagierte kaum, aber die Tritiumkonzentration stieg vorübergehend an (Pistoneffekt).

abfloß und, unter Berücksichtigung der Tritium-Meßgenauigkeit, maximal 15% des Gesamtabflusses ausmachte. Der Gewitterregen vom 12. Juni unterschied sich in der Tritium-Konzentration nur wenig vom Areuse-Wasser, und dementsprechend blieb Tritium in der Quelle während des Hochwassers ziemlich konstant. Interessant ist aber der Tritium-Anstieg am 11. Juni. An diesem Tag fielen in La Brévine 14 mm Regen. Die Schüttung reagierte kaum, aber der kurzzeitige Tritium-Anstieg scheint darauf hinzuweisen, daß älteres Reservoirwasser zum Abfließen stimuliert wurde (Piston-Effekt).

Die Ergebnisse der drei untersuchten Ereignisse können wie folgt zusammengefaßt werden. Der Anteil rasch abfließenden Frischwassers in der Areuse betrug im Maximum je zwischen rund 40% und 50%; gemittelt über die ganze Hochwasserperiode, betrug er zwischen 20% und 40%.

Während die Schüttung innerhalb von Stunden auf einen Regen reagierte, betrug die effektive Fließzeit des Wassers 1-2 Tage (vgl. Kurven für Gesamtabfluß und Frischwasserabfluß in Fig. 31), also weniger als beim Markierversuch beobachtet (3-5 Tage). Dieser Unterschied ist in Anbetracht der unterschiedlichen Schüttungen leicht verständlich.

Es scheint, als ob - wenigstens im Jura-Karst - eine Ganglinien-Trennung auch aufgrund von Natrium-, ev. auch Magnesium-Messungen möglich sei. Zumindest ist eine qualitative Analyse in dem Sinn möglich, daß die Zeitpunkte des maximalen Frischwasseranteils bestimmt werden können, woraus sich dann die mittlere Fließdauer des Wassers ergibt. Eine quantitative Ganglientrennung scheint aufgrund der vorliegenden Resultate mit Hilfe von Natrium-Messungen möglich. Gegenüber den - an sich zuverlässigeren - Isotopenmessungen hätte das den Vorteil, daß Natrium-Analysen relativ einfach durchzuführen sind, während $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ - und Tritium-Messungen nur in wenigen, speziell ausgerüsteten Labors möglich sind. Zudem muß nicht, wie bei den Isotopenmessungen, jedesmal die Inputkonzentration bestimmt werden, da sie relativ konstant ist und in guter Näherung sogar null gesetzt werden darf. Weiter ist, wie im Neuenburger Jura gezeigt wurde, eine permanente Messung im Feld mit Hilfe einer Natrium-selektiven Elektrode möglich, so daß die arbeitsaufwendige automatische Probennahme dahinfallen könnte. Allerdings ist die Eichung der selektiven Elektroden im Feld nicht ganz unproblematisch.

Die beschriebenen und weitere Ereignisse werden noch eingehender analysiert werden, um die Änderungen des Chemismus besser zu verstehen.

2.5.6. Reservoirgröße und -erneuerung der Areuse-Quelle

Größe und Erneuerung des Reservoirs können, unter Annahme gewisser stark vereinfachender Hypothesen, folgendermaßen abgeschätzt werden. Wir gehen aus von der Beziehung: Volumen des Reservoirwassers = mittlerer Reservoirabfluß mal mittleres Alter.

Das mittlere Alter T des Reservoirwassers haben wir oben auf 0,75 bis 2 Jahre geschätzt, wobei die Spanne zum Teil von der Unsicherheit der Bestimmung herrührt, zum Teil aber auch die reale Veränderlichkeit des mittleren Alters widerspiegelt. Um das Reservoirvolumen zu bestimmen, müssen wir den mittleren Reservoirabfluß kennen. Im letzten Abschnitt zeigte sich, daß er während einiger Perioden starken Hochwassers zwischen 60% und 75% ausmachte. Im Jahresmittel muß der Anteil Reser-

voirabfluß höher sein, also rund $\frac{2}{3}$ oder mehr der gesamten Schüttung. Um eine etwas genauere Schätzung zu erhalten, nehmen wir vereinfachend an, daß das Reservoirwasser bei $Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 100%, bei $Q > 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 60% der Schüttung ausmacht, der Frischwasseranteil bei $Q > 10 \text{ m}^3/\text{s}$ also 40% beträgt. Im Jahr 1979 übertraf der mittlere Tagesabfluß an 49 Tagen $10 \text{ m}^3/\text{s}$, während welcher Zeit 49% der Jahresmenge abflossen. Das ergibt einen Anteil von $51\% + 0,6 \times 49\% = 80\%$ Reservoirabfluß für das ganze Jahr. Mit diesem Anteil und der mittleren Schüttung von $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt sich das Reservoirvolumen zu

$$V_r = Q_{\text{Res}} T = 0,9 - 2,4 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Die zwei Werte ergeben sich aus den beiden Grenzen für das mittlere Alter, sind also Fehlergrenzen für das geschätzte Volumen. Gleichmäßig auf das Einzugsgebiet von 127 km^2 verteilt, ergäbe das eine Wasserschicht von $0,7 - 1,9 \text{ m}$ Dicke, oder, mit der von J.-P. TRIPET (1972) geschätzten Porosität von $4,5\%$, eine gesättigte Zone von $160 - 500 \text{ m}$ Dicke. J.-P. TRIPET (1972) fand, daß die Trockenwetter-Ganglinie der Areuse ungefähr exponentiell abnimmt, mit einem Rezessionskoeffizienten $\alpha = 0,026/\text{Tag}$, entsprechend einer charakteristischen Auslaufzeit von 38 Tagen. Mit einem Schüttungswert $Q_0 = 1,25 \text{ m}^3/\text{s}$ erhielt er ein Volumen von $4,15 \times 10^9 \text{ m}^3$, also wesentlich weniger, als wir für das Reservoirvolumen finden. Wie lassen sich diese so verschiedenen Resultate miteinander vereinbaren?

Die beiden Angaben beziehen sich auf unterschiedliche Volumina. Wie J.-P. TRIPET vermerkt, bezieht sich seine Abschätzung auf das ausfließbare Volumen („volume écouable“). Die Synklinalen von La Brévine und Les Verrières bilden tiefe Reservoirs, wobei die undurchlässigen Schichten (Argovien) in einem großen Teil des Ein-

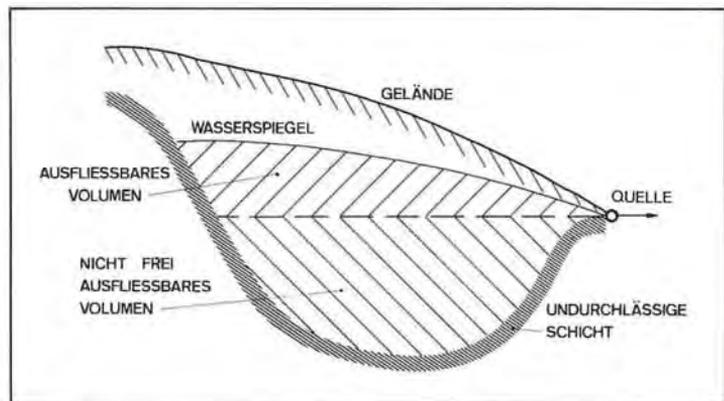


Fig. 33: Schematische Darstellung des Quellreservoirs der Areuse. Das Reservoir reicht tief unter die Ausfließhöhe (Höhe der Quelle resp. der undurchlässigen Schwelle) hinunter. Nur das Aquifervolumen oberhalb der Ausfließhöhe kann ausfließen. Wasser fließt jedoch sowohl aus dem ausfließbaren wie aus dem nicht frei ausfließbaren Volumen (hydraulisch stimuliert) ab.

zugsgebietes tiefer als die Areuse-Quelle (790 m ü. M.) liegen (vgl. Kap. 1 und die geologischen Profile, Fig. 3). Die Synklinale von La Brévine ist überdies durch die relativ hoch gelegene (ca. 980 m ü. M.) undurchlässige Schwelle von Bois de l'Halle gestaut. Das Wasser unterhalb des Quellaustrittes resp. unterhalb der Schwelle kann nicht abfließen. Dagegen kann dort das vorhandene Wasser sehr wohl an der Erneuerung und dem Abfluß teilnehmen – und tut es offensichtlich auch, wie die Auswertung der Isotopenresultate oben ergab. Diese Vorstellung ist schematisch in Fig. 33 dargestellt. Die Fließlinien gehen auch durch den nicht frei ausfließbaren Teil des Reservoirs hindurch. „Nicht ausfließbar“ bedeutet also nicht, daß dieses Wasser stagniere, aber die Wassermenge unterhalb der Quellen- resp. Schwellenhöhe steht nicht zur natürlichen Ausbeutung zur Verfügung. Unsere Ergebnisse bestätigen die Vermutung von J.-P. TRIPET (1972, S. 113), daß sich in der gesättigten Zone ein Karstnetzreservoir befindet. Unter der Annahme, daß das Reservoir der gesättigten Zone entspricht, kann eine unabhängige Abschätzung der effektiven Porosität vorgenommen werden. Das Gesteinsvolumen der gesättigten Zone ergibt sich mit Hilfe von Fig. 2.6 von J.-P. TRIPET (1972) zu etwa 14,2 km³. Zusammen mit den oben angegebenen Volumina für das Reservoirwasser erhält man eine effektive Porosität der gesättigten Zone (einschließlich Karstnetz) von zwischen 6 und 17%, also etwas mehr als der von J.-P. TRIPET angegebene Wert von 4,5%, der sich aber im wesentlichen auf die wenig durchlässigen Blöcke bezieht.

Quantitative Aussagen über die Teilreservoirs (Karstnetz und -blöcke, Quartärbedeckung etc.) werden aufgrund der weiteren Analyse der Daten, die im Rahmen des Nationalen Programms Wasserhaushalt erhalten wurden, erhofft.

2.6. Bakteriologische Untersuchungen

Im Zusammenhang mit hydrodynamischen Ereignissen wurden Mikroorganismen als natürliche Tracer interpretiert, die im Karstgrundwasser ein Oberflächensignal mit einer Lebensdauer bis etwa einem Monat repräsentieren (I. MÜLLER, 1980). Es zeigte sich, daß in bewohnten und landwirtschaftlich genutzten Gebieten (~60% des Einzugsgebietes der Areuse) alle Oberflächenwässer bakteriologisch das ganze Jahr über stark kontaminiert sind. Bei starken Niederschlägen oder Schneeschmelzen werden durch oberflächliches Fließen große Flächen abgespült, und das so bakteriologisch stark befrachtete Wasser gelangt durch Ponore sehr schnell ins Karstgrundwasser. Im Untergrund ist Selbstreinigung nur möglich, wenn keine Nährstoffe vorhanden sind und die Verweilzeit des kontaminierten Wassers genügend groß ist. Diese Bedingungen sind im Oberflächenkarst oft nicht gegeben, weil Teile des infiltrierten Wassers die Quelle nach wenigen Tagen erreichen. Spitzen in der Schüttung der Quellen Areuse oder Ubena beispielsweise fallen mit massiven Austritten von Mikroorganismen fäkalen Ursprungs zusammen. Da die Inputbedingungen nicht quantitativ erfaßt werden können, sind solche Messungen nur als qualitativer Hinweis auf Oberflächenkomponenten im Quellwasser zu werten.

Im Gegensatz dazu ist gespanntes Grundwasser des tiefen Karsts, sofern schnell fließende Oberflächenkomponenten ausgeschlossen werden können, weitgehend sauber. Tabellen 5, 6 und 7 illustrieren dies sehr deutlich: Ubena weist bei Hochwasser Bakterien fäkalen Ursprungs auf, bei Niedrigwasser überwiegen die sauberen Komponenten aus weniger durchlässigen Zonen mit längerer Verweilzeit im Untergrund. Die Quelle von Moyats entwässert Doggerkalke, die von Argovien-Mergeln überdeckt sind. Ihre bakteriologische Qualität ist wesentlich besser.

Tab. 5: Bakteriologische Belastung der Areuse-Quelle.

AREUSE		Coliforme Bakterien	Gesamtmenge der Bakterien	Enterococcus
Datum 1977	Schüttung m³/s.	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage
25. 10.	1,1	920	38.500	65
31. 10.	2,0	3.500	10.700	420
11. 11.	2,4	1.400	5.000	139
13. 12.	13,5	300	1.100	1.100
20. 12.	2,8	230	330	150
27. 12.	10,5	2.700	4.600	3.040
1978				
14. 2.	2,3	200	8.600	245
20. 2.	31,1	1.900	3.000	3.510
28. 2.	12,5	80	180	244
7. 3.	6,2	50	130	13
20. 3.	38,0	3.200	4.300	9.280
28. 3.	13,1	320	550	540
17. 4.	3,7	230	280	122
24. 4.	9,0	1.160	490	228
1. 5.	13,5	250	300	660
9. 5.	8,8	440	710	1.200
29. 5.	3,5	140	240	58
12. 6.	1,4	490	550	39
19. 6.	3,8	2.000	2.000	300
3. 7.	2,4	500	570	22
10. 7.	7,2	500	2.200	110
21. 8.	2,8	1.500	1.400	76
4. 9.	1,3	700	960	25
11. 9.	1,9	4.270	4.540	75
18. 10.	1,3	830	1.820	650
23. 10.	1,4	200	650	20
30. 10.	1,0	14.900	20.000	106
6. 11.	0,9	400	2.240	18
13. 11.	0,8	400	1.600	15
1979				
22. 1.	3,3	140	570	324
5. 2.	21,0	1.100	2.000	2.690
12. 2.	22,0	620	500	840
19. 2.	3,6	70	210	81
5. 3.	3,9	80	210	490
26. 3.	19,0	1.000	1.400	1.720
2. 4.	4,1	340	540	240
9. 4.	3,2	320	250	220
30. 4.	5,3	2.600	1.500	820
7. 5.	5,5	600	470	820
21. 5.	2,0	190	170	24

Tab. 6: Bakteriologische Belastung der Ubena-Quelle.

UBENA		Coliforme Bakterien	Gesamtmenge der Bakterien	Enterococcus
Datum 1977	Schüttung m³/s.	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage
31. 10.	—	500	1500	18
13. 12.	—	200	2200	200
20. 12.	0,03	50	450	2
27. 12.	0,2	340	900	76
1978				
3. 1.	0,03	270	880	2040
14. 2.	0,02	5	127	0
20. 2.	0,6	160	890	900
28. 2.	0,15	28	170	5
7. 3.	0,05	14	55	2
21. 3.	0,6	800	900	1640
28. 3.	0,08	27	136	18
17. 4.	0,03	120	100	0
24. 4.	0,07	70	540	3
1. 5.	—	100	330	34
9. 5.	—	140	180	40
29. 5.	0,03	50	98	3
12. 6.	0,02	21	—	0
19. 6.	0,1	1280	2160	280
3. 7.	0,02	190	250	0
10. 7.	0,03	600	1900	33
21. 8.	0,02	370	1110	6
4. 9.	0,02	170	480	6
16. 10.	0,01	400	460	17
6. 11.	0,01	72	340	1
13. 11.	0,02	140	420	2
1979				
22. 1.	0,02	380	710	82
19. 2.	0,02	210	1220	3260
5. 3.	0,03	3400	2200	400
27. 3.	0,1	1000	4800	140
2. 4.	0,02	70	320	49
9. 4.	0,03	110	330	230
21. 5.	0,03	17	47	0

Tab. 7: Bakteriologische Belastung in der Stollenfassung Moyats (s. Fig. 5).

MOYATS		Coliforme Bakterien	Gesamtmenge der Bakterien	Enterococcus
Datum 1977	Hochwasser = H Niedrigwasser = N	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage	pro 100 ml bei 37° C, 2 Tage
25. 10.	N	0	18	0
31. 10.	N	11	19	1
20. 12.	N	0	0	0
1978				
3. 1.	N	0	0	0
8. 2.	N	0	0	3
13. 2.	N	0	0	0
22. 2.	H	0	2	0
6. 3.	N	0	0	0
5. 4.	H	0	48	0
15. 4.	H	0	2	0
26. 4.	H	0	0	0
23. 5.	N	0	0	0
30. 5.	N	0	0	0
13. 6.	N	0	0	0
20. 6.	H	0	0	0
4. 7.	N	0	0	0
11. 7.	H	0	0	0
23. 8.	N	1	0	1
18. 10.	N	0	0	0
25. 10.	N	0	0	0
15. 11.	N	0	0	0
28. 11.	N	0	0	0
1979				
10. 1.	N	0	0	0
17. 1.	N	0	0	0
24. 1.	H	0	0	0
7. 2.	H	1	0	0
7. 3.	N	0	0	0
14. 3.	H	0	0	0
20. 3.	H	0	0	0
27. 3.	H	0	0	0
25. 4.	N	0	0	0

3. Der kombinierte Markierungsversuch des SUWT 1979

3.1. Technische Organisation (I. MÜLLER, U. SIEGENTHALER)

Am Samstag, dem 26. Mai 1979, zwischen 9.00 und 14.10 Uhr wurden in 7 Schwinden insgesamt 10 verschiedene Markierstoffe eingegeben. Die technischen Angaben über die Einspeisung finden sich in Tabelle 8, die Schwinden sowie die Probensammelstellen sind unten näher beschrieben. Ab 27. Mai wurden durch Mitarbeiter des Centre d'Hydrogéologie, Neuchâtel, regelmäßig Wasserproben entnommen, und zwar von den zwei Areuse-Austritten Ju 4 und Ju 5 vierstündlich bis 20. Juni 79, danach noch einmal täglich; ab 13. Juli wurde anstelle der beiden Austritte der Gesamtabfluß (Ju 1) beprobt. Von den Quellen Ju 2, Ju 3, Ju 60 und Ju 70 wurden bis 20. Juni 79

zwei Proben pro Tag, danach noch je eine alle 2 bis 4 Tage entnommen. Von Ju 71-74 wurde nur während einer Woche täglich je eine Probe entnommen. Aktivkohlesäckchen wurden an allen Beobachtungsstellen angebracht und bis Mitte Juli gewechselt, dann in größeren Abständen. Bei den Quellen Ju 2-5, Ju 60 und Ju 70 wurden Sporennetze eingehängt und bis ca. 10. Juni täglich, danach in größeren Abständen, gewechselt. Bei den zwei Areuse-Austritten Ju 4/5 wurden Netze sowohl im Quellbecken als auch im Pumpenhaus am Ausfluß der Zuleitungen für die automatischen Probennehmer eingehängt. Die regelmäßige Probennahme wurde im allgemeinen bis in den September 1979, ausgenommen für die Aktivkohle, zum Teil auch jetzt (September 1980) noch weiterläuft.¹⁾ Es folgt eine kurze Beschreibung der Schwinden (R. GIGON 1957) und der beobachteten Quellen, vgl. Fig. 34. Die angegebenen Koordinaten sind jene der Eidgenössischen Landestopographie, die in der Landeskarte der Schweiz verwendet werden.



Fig. 34: Lage der Einspeisestellen und beobachteten Quellen. Die Quellennummern 1 ff sind im Text als Ju 1 usw. bezeichnet. Diese Doppelbezeichnung kam dadurch zustande, daß ein Teil der Arbeitsgemeinschaft in zwei verschiedenen Gebieten der Schweiz (Jura, Murtal) Markierungsversuche durchführte.

Schwinden:

Schwinde Gigot: Koord. 540 275/207 125, Höhe 1075 m.

10 m tiefer Schacht, der in Moränenmaterial senkrecht bis auf den Kalk geht. Der Schacht befindet sich unterhalb eines Sägereigebäudes. Mittleres Schluckvermögen 100 l/min; führt in Trockenzeiten kein Wasser.

213, Schwinde Lac des Taillères: Koord. 534 350/202 025, Höhe 1039 m.

1 m Durchmesser und regulierbarer Abfluß des Sees. Durchmesser 3 bis 4 m, Tiefe 12,5 m. maximales Schluckvermögen 650 l/s. In Trockenzeiten kann durch Öffnen der Schieber die Schüttung der Areuse-Quelle erhöht werden; diese reagiert innerhalb von 12 bis 24 Stunden.

¹⁾ Den Quellennummern ist von einzelnen Autoren die Bezeichnung Ju (= Jura) vorgesetzt. Dies gründet sich in dem Umstand, daß gleichzeitig auch in anderen Gebieten Markierungsversuche durchgeführt wurden.

Tab. 8. Einspeisung der Markierungsstoffe am 26. Mai 1979

Markierungsstoff Art	Menge	Einspeiszeit Nr.	Einspeisestelle Name	Q(l/s)	Verantwortlich für Einspeisung
Eosin FB (Schwalbach/Taunus)	12 kg in 50 l Wasser	10:00-10:15	Gigot	≈12 Vor- und Nachspülung	W. Käss, Freiburg
NaCl	2750 kg in 9000 l Sole	13:45-14:10	Lac des Tailières (Ausfluß)	100	Ch. Leibundgut, Bern
Lycopodium-Sporen blau	10 kg	10:35-10:55	Lac des Tailières (Ausfluß)	100	H. Zojer, Graz
Lycopodium-Sporen grün	20 kg	09:45-10:40	Grand Cachot	1,3	H. Zojer, Graz
Thiopap flüssig	100 kg	10:15	Petit Cachot	≈5	Ch. Leibundgut, Bern
KCl	500 kg in 2,5 m ³ Wasser	09:00-09:05	Belle Perche, Les Verrières	2,5	F. Hribar, M. Zupan, Ljubljana
Uranin (Merck AP)	5 kg in 50 l Wasser	09:15-09:17	Belle Perche, Les Verrières	(Nachspülung 2,5 m ³)	F. Hribar, M. Zupan, Ljubljana
Amidorthodamin G extra	10 kg in 130 l Wasser	10:15-10:35	La Brevine	≈25	H. Hötzl, Karlsruhe
Phytoplankton	Suspension 1 l	10:00-10:05	Grotte chez le Brandt	≈0,3 (Nachspülung ≈1 l/s)	G. Ackermann, Karlsruhe
Rhodamin B	10 kg in 50 l Wasser	10:20-10:25	Grotte chez le Brandt	(Nachspülung ≈1 l/s)	G. Ackermann, Karlsruhe

221, *Schwinde Grand Cachot* (Schacht „La Renouillière“): Koord. 542 150/206 410, Höhe 1050 m.

Etwa 8 m tiefer Schacht, der in einen 24 m langen Höhlengang mündet; Gesamttiefe 18 m. Schüttung ca. 1 bis 15 l/s.

219, *Schwinde Petit Cachot* (Höhle Moulinet): Koord. 540 650/205 675, Höhe 1037 m.

Ein Bach (mittlere Schüttung auf 30–50 l/s geschätzt) fließt in diese Schwinde, die in einer breiten Depression liegt. Durch eine enge Öffnung fließt das Wasser in eine Höhle von ca. 2 m Höhe, 4 m Breite und 7 m Länge; daneben gibt es mehrere kleine Schlucklöcher.

Schwinde Belle Perche, Les Verrières: Koord. 527 800/195 375, Höhe 920 m. Mit Gitter überdeckter Schacht. Unregelmäßige Wasserführung, geschätzt auf 1 bis mehrere 100 l/min.

215, *Schwinde bei La Brévine*: Koord. 536 550/203 425, Höhe 1036 m. Große Schwinde, Durchmesser (geschätzt) ca. 50 m, Tiefe (geschätzt) ca. 15 m. Die Einspeisung des Amidorhodamins erfolgte in einer Hochwasserschwinde, ca. 20 m nördlich der Hauptschwinde, die 20 Stunden vor der Eingabe durch Zuleitung aktiviert wurde.

106, *Schwinde Grotte de Vers-chez-le-Brandt*: Koord. 526 425/199 000, Höhe 1160 m. Langer Höhlengang, durch einen Schacht zugänglich. Mikroseismische Untersuchungen (I. MÜLLER, 1978) wiesen eine Quartärüberdeckung von 1 bis 3 m Mächtigkeit nach. Die Entwässerung erfolgt durch einen Bach, der in kaum sichtbare Spalten im Höhlenboden versickert.

Quellen:

Ju 1, Areuse-Quelle, auch Doux-Quelle genannt: Koord. 532 220/195 975, Höhe 790 m. Weitere Angaben in Kap. 1.

Ju 2, Ubena-Quelle: Koord. 534 025/196 375, Höhe 940 m. Karstquelle aus Höhle (über 100 m begehbar), Schüttung min. 15 l/s, max. 1200 l/s. Einzugsgebiet unbekannt. Während der Arbeiten im Nationalen Programm (Kap. 2) war die Quelle mit einem Limnigraphen und kontinuierlicher Meßstation (Temperatur, Leitfähigkeit, Natrium) ausgerüstet. Diese befand sich in einem Wohnwagen, wohin das Quellwasser durch eine 150 m lange Leitung geführt wurde.

Ju 3, Quelle Pont de la Roche: Koord. 534 225/195 450, Höhe 750 m. Karstquelle aus einer Kluft. Schüttung min. 20 l/s, max. 3000 l/s. Einzugsgebiet war vor dem Markierversuch vollkommen unbekannt.

Ju 4, Areuse-Quelle, Austritt Seite La Brévine,
Ju 5, Areuse-Quelle, Austritt Seite Les Verrières:
Chemismus und Temperatur zeigen, daß das Wasser der verschiedenen Austritte, die die Areuse-Quellgruppe bilden, nicht gut durchmischt ist, entsprechend den zwei Synklinalen, die das Einzugsgebiet bilden. Etwa $\frac{2}{3}$ der Schüttung erfolgen von der Seite La Brévine, $\frac{1}{3}$ von der Seite Les Verrières. Während des Farbversuchs wurde Wasser aus den zwei Kluftsystemen durch 300 m lange Kunststoff-Schlauchleitungen in ein Pumpenhaus abgeführt, wo eine getrennte Probennahme durch automatische Probennehmer erfolgte.

Ju 60, Noiraigne-Quelle: Koord. 545 700/200 970, Höhe 750 m. Große Karstquelle, die die Täler von La Sagne und Les Ponts entwässert. Schüttung min. 0,17 m³/s, max. 14 m³/s. Das Wasser weist eine bräunliche Farbe auf, die von Humusstoffen aus den Torfmooren des Einzugsgebiets herrührt.

Ju 70, Quelle derrière le Mont: Koord. 537 150/207 950, Höhe 980 m. Große Karstquelle auf französischem Boden, die die Ortschaft Morteau mit Trinkwasser versorgt. Geschätzte Schüttung min. 0,1 m³/s, max. 6 m³/s.

Ju 71-74: Koord. 525 700/199 500 bis 526 800/201 000, Höhe 1050 m bis 1090 m. Bach, gespeist aus zahlreichen kleinen Quellen, die aus verwittertem Argovien-Mergel entspringen. Geschätzte Schüttung min. 0,1 m³/s, max. 2 m³/s.

Ju 80, Lac des Brenets: Koord. 543 000/213 000, Höhe 750 m. Der See wird durch eine Verbreiterung des Flusses Doubs gebildet, welcher als Vorfluter alle nördlich fließenden Markierungsstoffe sammelt. Es wurden Aktivkohlesäckchen eingesetzt, indem sie von einem Ausflugschiff, das täglich ca. 8 Stunden unterwegs ist, nachgeschleppt wurden.

3.2. Meteorologische, hydrologische und hydrochemische Bedingungen während des Versuches (I. MÜLLER)

Die Niederschlagsverhältnisse während des Markierversuches sind in der Tabelle 9 dargestellt, und die Schüttungen der Quellen Areuse und Ubena zeigen Fig. 35 und 36.

Die Einspeisungszeit am 26. Mai zwischen 10:00 und 12:15 Uhr fällt in eine Auslaufkurve der Areuse (Schüttungsmaximum von 8,5 m³/s am 24. Mai um 22:00 Uhr, verursacht durch 19 mm Niederschlag in La Brévine und 11 mm im Gebiet von Les Verrières). Das nächste Schüttungsmaximum (12,5 mm Niederschlag) vom 28. Mai, 02:00 Uhr, erschien vor dem Erstauftreten der Tracer (28. Mai abends). Die darauffolgenden nächsten drei Tage waren niederschlagsfrei. Ein lokales Gewitter im Gebiet von Les Verrières brachte 27,9 mm Niederschlag am 2. Juni zwischen 11:00 und 13:00 Uhr, der Schüttungsanstieg in der Areuse-Quelle erfolgte 2 Stunden später. Am 12. Juni brachte ein heftiges Hagelgewitter der Region von La Brévine 73 mm. Um den Ponor von La Brévine stand der Wasserspiegel 4-5 m hoch. Durch den heftigen

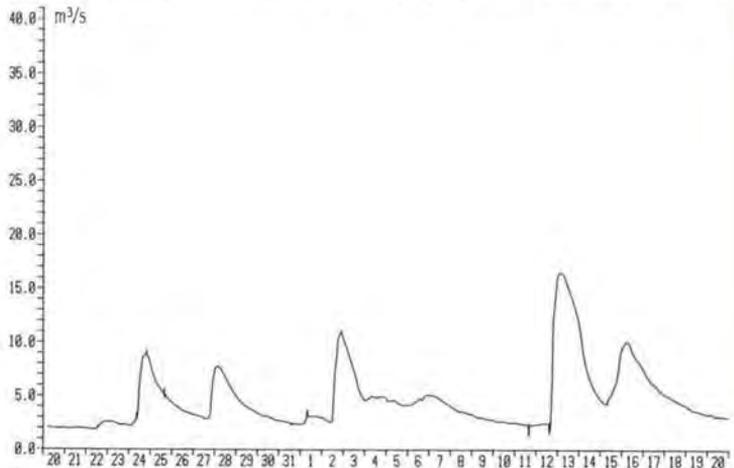


Fig. 35: Schüttung der Areuse-Quelle vom 20. Mai bis 20. Juni 1979. Einspeisedatum: 26. Mai 1979.

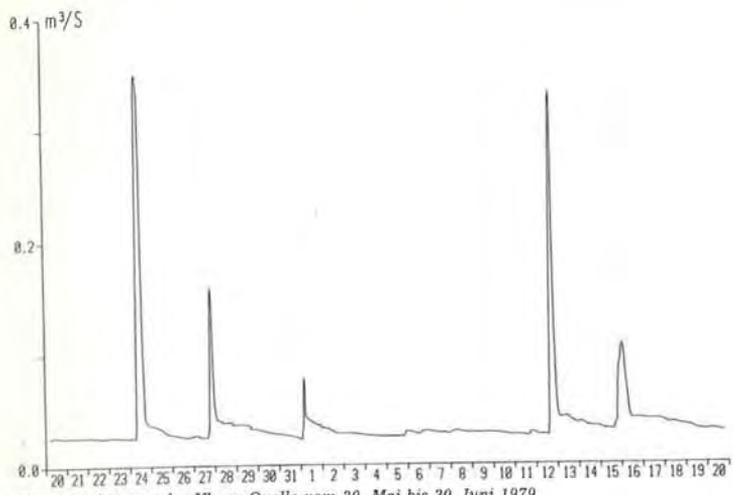


Fig. 36: Schüttung der Ubena-Quelle vom 20. Mai bis 20. Juni 1979.

Hagelschlag wurde der Boden stark erodiert, als Folge davon war das abfließende Wasser mit toniger Suspension befrachtet und das Wasser der Areuse-Quellen braun gefärbt (ein sehr seltenes Ereignis).

Die Einflüsse dieser Witterungsverhältnisse auf verschiedene Parameter der Quellwässer der Areuse (Temperatur, Leitfähigkeit und Natriumion-Aktivität) zeigen die Fig. 37-39. Besonders das Hagelgewitter vom 12. Juni zeichnet sich in allen Kurven sehr deutlich ab.



Fig. 37: Temperatur der Areuse-Quelle vom 20. Mai bis 20. Juni 1979.



Fig. 38: Leitfähigkeit der Areuse-Quelle vom 20. Mai bis 20. Juni 1979.

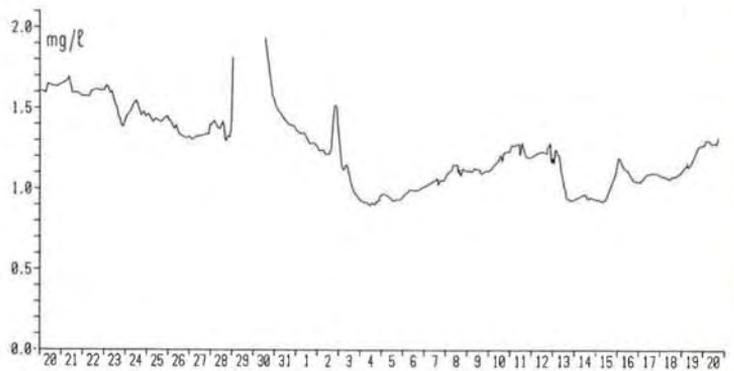


Fig. 39: Natriumionenaktivität der Areuse-Quelle vom 20. Mai bis 20. Juni 1979.

9: Tägliche Niederschlagshöhen (in mm) Mai und Juni 1979, gemessen in den Stationen La Brévine, Les Verrières und La Chaux-du-Milieu.

	La Brévine	Les Verrières	La Chaux-du-Milieu	Juni	La Brévine	Les Verrières	La Chaux-du-Milieu
	3,7	3,3	2,6	1	8,0	3,2	0,4
	21,8	9,5	18,0	2	10,3	27,9	
	1,2	0,5	0,2	3		6,6	
	2,5	0,2	2,4	4		1,8	0,1
		0,4	0,1	5	13,1	5,0	4,6
				6	3,4	2,4	1,8
				7	0,3		1,5
				8			
	0,6	0,1		9			3,0
				10			
	1,0	1,2	1,8	11	14,0	3,3	7,3
	1,1	3,3	1,7	12	73,6	6,7	31,3
				13		0,8	0,7
				14	1,6	1,8	1,3
				15	15,7	18,3	10,9
				16	2,4	3,5	4,3
			0,2	17	1,7	0,8	4,2
	1,3	2,2	2,9	18	1,0	0,3	1,4
	2,0	2,9	2,0	19			
	2,6	2,5	2,8	20			
				21			
	7,6	8,5	7,1	22	8,7	8,8	14,3
		6,7	4,3	23			
	19,3	11,4	19,0	24	2,2	2,9	2,8
			0,3	25			
	0,2		0,1	26			
	12,7	11,6	12,8	27	27,2	24,0	12,7
				28			*)
				29			*)
				30	0,1		*)
		11,5	6,0				

Technische Störung

3. Die Markierung mit Fluoreszenztracern

3.1. Ergebnisse der Fluoreszenzmessung von Direktproben (Martina ZUPAN)

3.1.1. Die Einteilung der Fluoreszenztracer und ihre Vorbereitung für die Einspeisung

Beim Markierungsversuch im Neuenburger Jura sind die Fluoreszenzfarbstoffe Eosin, Rhodamin B und auch der optischen Aufheller Tinopal verwendet worden. Die Suspension der Farbstoffe im Wasser wurde an den Einspeisungsstellen zubereitet, Tinopal hat schon der Produzent als Lösung geliefert (Tabelle 10).

Tab. 10: Art und Menge der Fluoreszenztracer, Wasservolumen für die Suspensionszubereitung, Einspeisestelle (Ponor) und der Durchfluß bei der Einspeisungszeit.

Farbstoff	Menge (kg)	Wasservolumen (l)	Ponor	Durchfluß (l/s)
Uranin AP	5	50	Les Verrières	2,5
Eosin FB	12	50	Gigot	12,0
Amidorhodamin	10	150	La Brèvine	4,0
Rhodamin B	10	50	G. chez le Brandt	0,3
Tinopal	100		Petit Cachot	5,0

Die Farbstoffe sind in Übereinstimmung mit dem Programm des kombinierten Markierungsversuches angeordnet worden. Dabei wurden die hydrogeologischen Verhältnisse und die bisherigen Markierungsversuche berücksichtigt. Die Farbstoffe an den Ponoren waren so verteilt, daß ungünstige Mischungen der Farbstoffe, welche mit der direkten Meßmethode nicht bestimmt werden können, in den Quellen nicht vorkommen sollten. Zur gegenseitigen Beeinflussung bzw. Überlagerung kommt es gewöhnlich bei den Gemischen Uranin-Eosin, Eosin-Amidorhodamin und Amidorhodamin-Rhodamin. Trotz durchdachter Disposition sind Amidorhodamin und Rhodamin im Wasser der Quellen Ju 4 und Ju 5 gleichzeitig zum Vorschein gekommen.

3.3.1.2. Nachweis der Fluoreszenztracer

An den Quellen Ju 1, Ju 2, Ju 3, Ju 4, Ju 60, Ju 70, Ju 71, Ju 72, Ju 73 und Ju 74 sind 625 Wasserproben entnommen worden (Tabelle 11). In allen diesen Proben sind Fluoreszenzfarbstoffe und optische Aufheller am Fluoreszenzspektrometer Perkin Elmer 204 gemessen worden. Die Proben wurden nach dem Verfahren von H. BEHRENS (1971, 1973) analysiert. Dieses Verfahren ist mit Erfolg bei den Probemessungen bei den Markierungsversuchen in Slowenien im Rahmen des 3. SUWT angewandt worden (H. BEHRENS, Martina ZUPAN, M. ZUPAN 1976).

Tab. 11: Zahl der analysierten Proben aus den einzelnen Quellen (s. Fig. 34).

Quelle	Zahl der Proben	Quelle	Zahl der Proben
Ju 1	47	Ju 70	42
Ju 2	71	Ju 71	7
Ju 3	67	Ju 72	7
Ju 4	158	Ju 73	7
Ju 5	158	Ju 74	1
Ju 60	60		

Das Vorkommen des Rhodamins wurde mittels Aktivkohle zuerst in den Proben aus den Quellen Ju 4 und Ju 5 nachgewiesen. In den Wasserproben wurde die Trennung des Amidorhodamins und Rhodamins mit dem Trennverfahren von J. ROCHAT et al. (1975) angewandt.

Die Spektralanangaben für die angewandten Fluoreszenztracer und die Nachweisgrenzen am Fluoreszenzspektrometer Perkin Elmer 204 sind in der Tabelle 12 angeführt. Für den optischen Aufheller Tinopal sind keine Angaben angeführt worden, da sich die maximalen Anregungs- und Emissionswellenlängen mit der Konzentration verändern. Die Werte für Rhodamin gelten für den Nachweis im Chloroformextrakt.

Tab. 12: Spektrale Daten und die Nachweisgrenzen der Fluoreszenztracer.

Fluoreszenztracer	Anregungsmaximum (nm)	Emissionsmaximum (nm)	Nachweisgrenze (ppb)
Uranin AP	492	515	0,005
Eosin FB	515	535	0,1
Amidorhodamin G extra	535	552	0,008
Rhodamin B	554	575	0,05
Timopal	-	-	-

3.3.1.3. Durch Analysen der Fluoreszenztracer erhaltene Ergebnisse

In den analysierten Wasserproben aus den Quellen sind die Farbstoffe Uranin, Amidorhodamin und Rhodamin nachgewiesen worden. In keiner Probe ist das Eosin festgestellt worden, der optische Aufheller dagegen war fast in allen Wasserproben in größerer oder kleinerer Konzentration anwesend.

Die Ergebnisse der Analysen für die einzelnen Farbstoffe sind in den folgenden Kapiteln beschrieben. In der Tabelle 13 sind die Angaben für den ersten Tracernachweis, die Erscheinungszeit des Tracermaximums und die maximale Konzentration des Farbstoffes in den Quellen gezeigt. Die Kurven auf der Fig. 40 zeigen den zeitlichen Durchgangsverlauf der Fluoreszenzfarbstoffkonzentration in den Quellen Ju 4 und Ju 5.

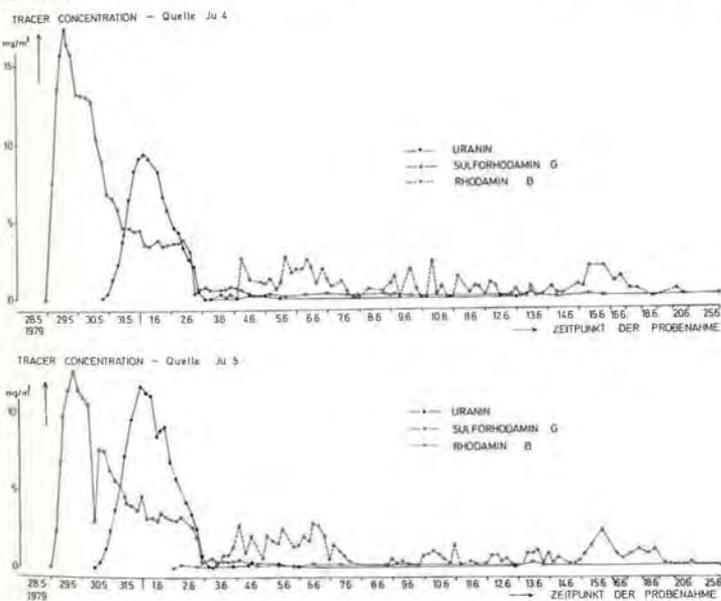


Fig. 40: Durchgang der Fluoreszenzfarbstoffe in den Areuse-Austritten Ju 4 und Ju 5.

Die Proben der Quelle Ju 1 für Direktmessung wurden erst nach der abgeschlossenen Probenentnahme in den Quellen Ju 4 und Ju 5 genommen und gemessen, das heißt ab 13. Juli 1979. Die Uranin-Konzentration war in diesen Proben schon unter der Nachweisgrenze, die Spuren von Amidorhodamin aber waren bis Ende August, in einzelnen Proben auch bis Oktober festzustellen.

Tab. 13: Angaben über das Auftreten der Fluoreszenztracer in den Quellen.

Fluoreszenztracer	Quelle	Zeit bis zum ersten Tracer-nachweis (h)	Zeit bis zum Durchgang des Tracermaximums (h)	Konz. im Tracermax. (mg/m ³)
Uranin	Ju 4	106	139	9,3
	Ju 5	98	135	11,6
Amidorhodamin G extra	Ju 4	66*)	77	16,4
	Ju 5	62	81	12,6
Rhodamin	Ju 4	196	212	2,6
	Ju 5	180	208	2,7

*) Eine Probe fehlt, und der Farbstoff ist wahrscheinlich 4 oder mehr Stunden früher aufgetreten.

Ergebnisse mit Uranin

Mit dem in die Schwinde Les Verrières eingespeisten Uranin ist die Verbindung mit der Quelle Areuse Ju 4 und Ju 5 bewiesen worden. In der Tabelle 13 sind die Angaben für den Nachweis dieses Tracers in diesen zwei Quellen angeführt. In den Proben der übrigen Quellen war Uranin nur unter der Nachweisgrenze, also unter 0,005 mg/m³, vorhanden. Der zeitliche Verlauf der Durchgangskurve (Fig. 40) zeigt, daß nach dem Hauptmaximum am 1. Juni 1979 noch eine kleinere Erhöhung der Konzentration am 4. Juni auftritt, was wahrscheinlich mit der Zunahme des Durchflusses in beiden Quellen in den Tagen 2. und 3. Juni 1979 verbunden ist.

Ergebnisse mit Amidorhodamin

Amidorhodamin wurde in die Schwinde La Brévine eingespeist. Dieser Farbstoff ist ebenso wie Uranin in den Quellen Areuse (Tabelle 13) nachgewiesen worden. Spuren des Amidorhodamins wurden auch in den Quellen Ju 70 (9. und 23. Juli 1979) und Ju 2 (16. Juli 1979) festgestellt, doch in so niedrigen Konzentrationen an der Grenze der Bestimmbarkeit, daß wir sie nicht als ein positives Ergebnis berücksichtigen können. Den zeitlichen Verlauf der Durchgangskurve des Amidorhodamins in den Quellen Ju 4 und Ju 5 zeigt Fig. 40.

Ergebnisse mit Rhodamin.

Rhodamin wurde in die Grotte chez le Brandt eingespeist und ist in den Quellen Ju 4 und Ju 5 zusammen mit Amidorhodamin und Uranin zum Vorschein gekommen. Die Konzentrationen des Uranins und Amidorhodamins waren zur Erscheinungszeit des Rhodamins schon niedrig, doch war das Signal des Amidorhodamins noch so stark, daß es zur Überlagerung mit Rhodamin gekommen ist. Die Anwesenheit des Rhodamins neben Amidorhodamin könnte sich in einigen Proben in der Verbreitung des unteren Teiles des Signals zeigen, doch die Anwesenheit des Uranins hat dies verhindert. Der Unterschied des Signals für gleiche Konzentrationen des Amidorhodamins und Rhodamins bei der Anwesenheit und Abwesenheit des Uranins ist in den Fig. 41, 42 dargestellt.

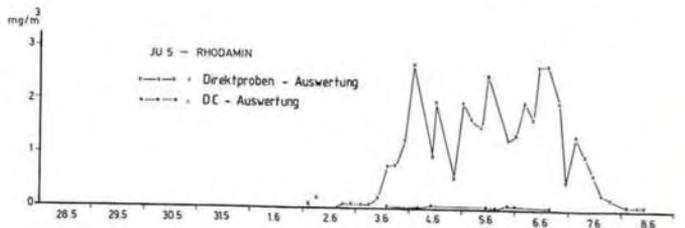
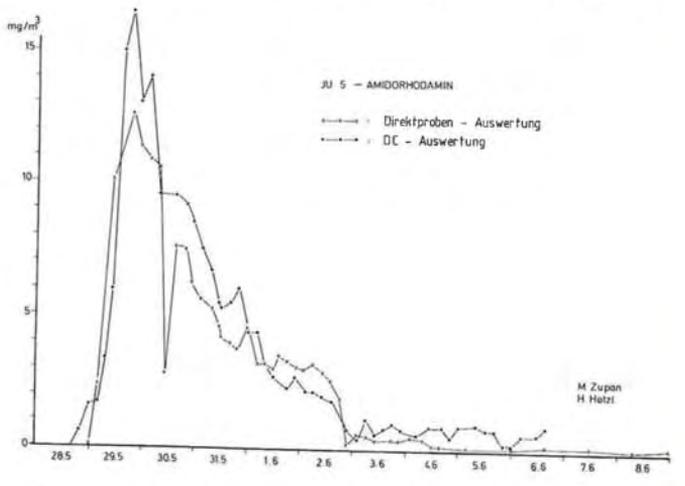
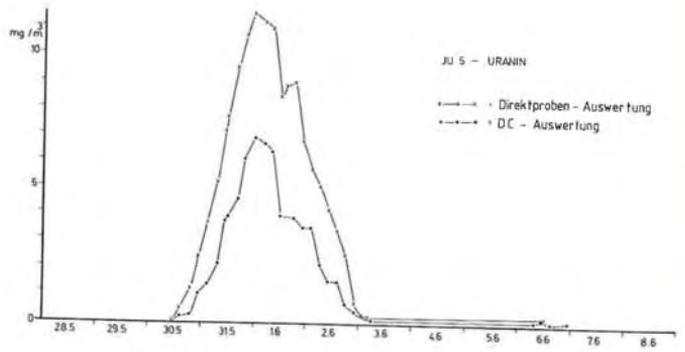


Fig. 42: Beeinflussung der Messungen von Rhodamin durch die Uraninkonzentration bei der Quelle Ju 5.

Nach dem Nachweis des Rhodamins in den Aktivkohleproben haben wir Rhodamin auch in den Wasserproben nach vorhergehender Trennung des Amidorhodamins und Rhodamins nach folgendem Verfahren nachgewiesen.

Der pH-Wert wurde auf 4,5–5 eingestellt, 15 ml der Probe wurden mit 15 ml Chloroform 3 Minuten lang im Schüttler extrahiert, beide Phasen getrennt und im Chloroformextrakt die Rhodaminkonzentration bestimmt.

In Fig. 40 ist zu sehen, daß die Konzentration des Rhodamins sehr variiert, wofür mehrere Ursachen in Betracht kommen. Rhodamin ist erst nach ungefähr einem halben Jahr nach der Probenentnahme analysiert worden. Es ist möglich, daß in einigen Proben der Farbstoff zerfallen ist, wie wir dies ähnlich beim Markierungsversuch des 3. SUWT für Uranin festgestellt haben (H. BEHRENS, MARTINA ZUPAN, M. ZUPAN, 1976). Der Zerfall des Farbstoffes ist wahrscheinlich von der Art der Wasserpollution und der Art der im Wasser lebenden Mikroorganismen abhängig, ist also für jedes Wasser spezifisch. Ein anderer Grund kann auch die schlechtere Wiederholung des analytischen Verfahrens bzw. des Trennverfahrens der Farbstoffe sein.

Die erhaltenen Werte der Konzentrationen bzw. der zeitliche Verlauf der Durchgangskurve des Rhodamins in den Quellen Ju 4 und Ju 5 sind bei der Berechnung des Beitrages zu den einzelnen Quellen in ihrer Genauigkeit beeinträchtigt. Jedenfalls sind sie aber ein Beweis, daß eine hydrologische Verbindung zwischen dem Höhlenbach in der Grotte chez le Brandt und den Quellen Ju 4 und Ju 5 besteht.

Ergebnisse mit Tinopal

Tinopal wurde in die Schwinde Petit Cachot eingespeist. Wir können leider **nicht mit Sicherheit behaupten, daß der injizierte optische Aufheller in den Quellen zutage getreten ist**. Größere Konzentrationen des optischen Aufhellers wurden in den Wasserproben der Quellen Ju 60, Ju 71, Ju 72, Ju 4 und Ju 5 gemessen.

Die größten und am längsten dauernden Konzentrationen mit einer bedeutend konstanten Emissionswellenlänge (428–430 nm) haben wir in den zwischen 28. Mai und 21. Juni 1979 entnommenen Proben der Quelle Ju 60 aufgezeichnet. In den übrigen Proben verändern sich die maximalen Emissionswellenlängen viel mehr.

Tab. 14: Bereiche der maximalen Emissionswellenlängen in den Wasserproben bei einer Anregungswellenlänge von 320 nm.

Quelle	Emissionswellenlänge (nm)
Ju 4	420–425
Ju 5	418–425
Ju 2	410–420
Ju 3	415–430
Ju 60	425–430
Ju 70	418–430

In der Tabelle 14 sind die Bereiche der maximalen Emissionswellenlängen für die Proben der einzelnen Quellen bei der Anregungswellenlänge von 320 nm angeführt. Vergrößerte Konzentrationen des optischen Aufhellers treten oft bei vergrößertem Durchfluß in der Quelle auf, so daß nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann, ob in den Proben der eingespeiste Aufheller oder der optische Aufheller der verunreinigten Gewässer aus den besiedelten Orten vorhanden ist. Aufgrund des zeitlichen Verlaufs der Durchgangskurve und der ziemlich konstanten maximalen Emissionswellenlänge können wir die Möglichkeit zulassen, daß das in die Schwinde Petit Cachot eingespeiste Tinopal in der Quelle Ju 60 zutage tritt (Fig. 43).

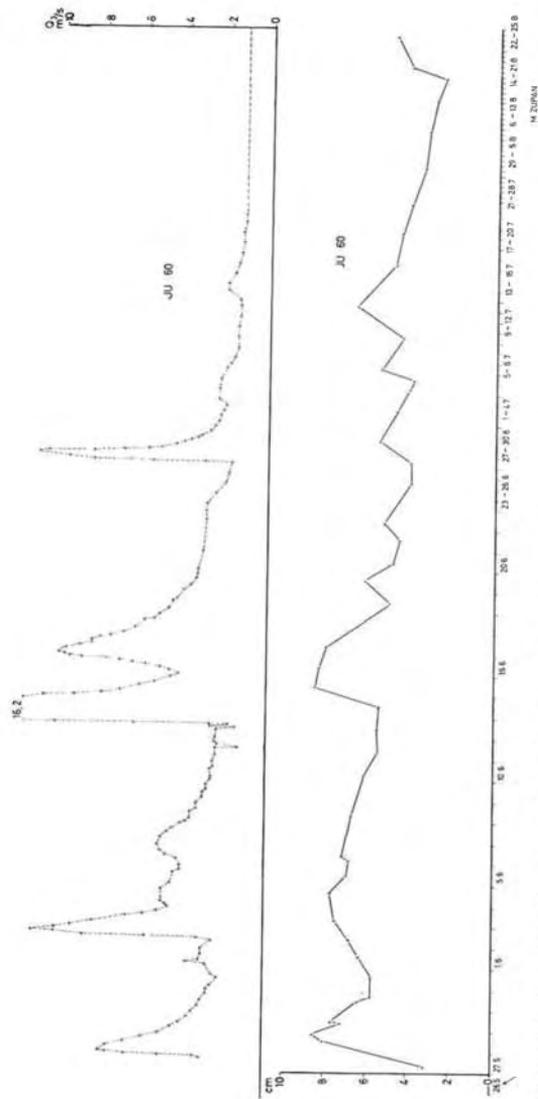


Fig. 43: Schüttungskurve der Noiraigue-Quelle (Ju 60) und Signalhöhenkurve vom Tinopal (Einspeisung am 26. Mai 1979 in die Schweinde Petit Cachot). Tinopal: Anregungswellenlänge = 320 nm, Emissionswellenlänge = 428-430 nm.

3.3.1.4. Berechnung des Outputs der Fluoreszenzfarbstoffe

Die Berechnung der wiederausgebrachten Fluoreszenzfarbstoffe wurde für jene Tracer gemacht, deren Auftreten in den Quellen gesichert ist, das heißt für Uranin, Amidorhodamin und Rhodamin in den Quellen Ju 4 und Ju 5. Bei der Berechnung sind die Resultate der Direktmessung (Abschnitt 3.3.1.) und die Durchflüsse in der Entnahmestelle Ju 1 berücksichtigt. Nach J.-P. TRIPET (1972) kommen etwa zwei Drittel der Areuse-Schüttung aus der Synklinale von La Brévine und ein Drittel aus der Synklinale von Les Verrières. Dementsprechend wurde angenommen, daß der Austritt (Ju) 4 zwei Drittel, der Austritt (Ju) 5 ein Drittel der Gesamtschüttung repräsentiert (vgl. Fig. 34). Die Berechnung der Fluoreszenzfarbstoffmenge wurde im Hydrometeoroloski zavod SRS, Ljubljana, von D. KODELE gemacht.

Für die Integration von der gesamten Wassermenge wurden die interpolierten Werte von Durchflüssen in den Zeitintervallen, in welchen die Proben genommen wurden, berücksichtigt. Es wurde mit einer linearen Interpolation gerechnet. Die berechnete Menge der wiederausgebrachten Farbstoffe ist in der Tabelle 15 dargestellt.

Tab. 15: Die wiederausgebrachten Fluoreszenzfarbstoffmengen in den Quellen Ju 4 und Ju 5.

Farbstoff	Die Menge der wiederausgebrachten Farbstoffe in den Quellen (kg)		
	Ju 4	Ju 5	zusammen
Uranin	2,8	1,9	4,7
Amidorhodamin	7,5	2,8	10,3
Rhodamin	4,0	3,9	7,9

Die berechneten Werte der Outputmenge der Fluoreszenzfarbstoffe sind wahrscheinlich zu hoch. Die Ursache ist unserer Meinung nach ein Fehler bei der Aufgliederung der Wassermengen der beiden Quellen Ju 4 und Ju 5.

Die Einzeldaten für Probenentnahmen und Farbstoffkonzentrationen liegen tabellarisch im Archiv von Zveza vodnik skupnosti-hidrologija, Ljubljana, auf.

3.3.2. Ergebnisse der Dünnschicht-chromatographischen Auswertung von Direktproben (F. P. BUB, H. HÖTZL)

3.3.2.1. Untersuchungsumfang und Methodik

Der gleichzeitige Einsatz von verschiedenen Fluoreszenzstoffen im Rahmen eines kombinierten Markierungsversuches kann, wie schon mehrfach berichtet (W. KASS, 1976, H. BEHRENS, 1973, u. a.), zu einer Störung bzw. Beeinträchtigung des fluorimetrischen Direktnachweises der einzelnen Tracer führen. Schwierigkeiten bei der Bestimmung einzelner Fluoreszenzstoffe treten vor allem dann auf, wenn Stoffe mit nah beieinanderliegenden Emissionsspektren in stark unterschiedlichen Konzentrationen in einer Probe vorliegen.

Eine bessere Identifikation der schwächer konzentrierten Komponente kann über eine vorgeschaltete chemische Trennung erreicht werden. J. ROCHAT et al. (1975) sowie H. BEHRENS et al. (1976) haben auf chromatographische Trennverfahren hingewiesen. Die mögliche Separation der für hydrogeologische Markierungen am häufigsten verwendeten Farbstoffe Uranin, Eosin, Amidorhodamin und Rhodamin sowie des optischen Aufhellers Tinopal mittels der Dünnschicht-Chromatographie (DC) ist von F. P. BUB, H. HÖTZL, K. WISSER (1979) zunächst im Labor untersucht worden. Die dort beschriebenen Ergebnisse wurden vor allem an Probenlösungen gewonnen,

die im mittelharten Leitungswasser angesetzt waren. Der kombinierte Markierungsversuch 1979 im Einzugsgebiet der Areuse bot Gelegenheit, die Dünnschicht-chromatographische Methode an natürlichen, z. T. verschieden stark belasteten Wässern zu testen.

Die DC-Auswertung erfolgte an insgesamt 180 Proben aus den Quellen Ju 3, Ju 4 und Ju 5 (s. Tabelle 16). Die Bearbeitung dieser Proben konnte leider erst im Februar und März 1980, das ist ca. 9 Monate nach der Entnahme, vorgenommen werden. Die Aufbewahrung erfolgte zwar in braunen Polyäthylenflaschen, doch wurden die Proben bereits vorher zur Bestimmung des Natriums und Kaliums herangezogen. Aufgrund des damit verbundenen Licht- und Luftzutrittes, vor allem aber aufgrund der hohen organischen Belastung dieser Wässer kam es zum teilweisen Abbau einzelner Farbstoffe. Zum besseren Vergleich der DC-Ergebnisse wurde daher auch diese Probenserie im Anschluß an die DC-Untersuchung einer fluorimetrischen Direktmessung unterzogen (vgl. Fig. 44).

Tab. 16: Übersicht über die mittels der Dünnschichtchromatographie ausgewerteten Proben.

Quell-Nr.	Quellenbezeichnung	untersuchter Beprobungszeitraum	Zahl der Wasserproben
Ju 3	Pont la Roche	28. 5. 12.30-27. 6. 10.00	44
Ju 4	Areuse, westl. Quellast	25. 5. 20.30- 6. 6. 23.00	68
Ju 5	Areuse, östl. Quellast	25. 5. 20.30- 6. 6. 23.00	68

Beim Dünnschicht-chromatographischen Verfahren erfolgt die Trennung der zu separierenden Fluoreszenzstoffe auf einer mit einem Adsorbens beschichteten Platte. Die Platte wird nach Aufbringung der Probenlösung und nachfolgendem Trocknen in eine Entwicklungskammer mit einem geeigneten Eluens eingetaucht, wobei das Laufmittel die Platte entsprechend der Kapillarwirkung von unten nach oben durchströmt. Die einzelnen Farbstoffe bzw. Stoffkomponenten legen hierbei in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Adsorbens und Eluens unterschiedlich weite Wegstrecken zurück und werden so voneinander getrennt. Die Substanzflecken der einzelnen Stoffe werden dann mittels eines Densitometers quantitativ ausgewertet. Eine genaue Beschreibung dieses Verfahrens wurde bereits von F. P. BUB, H. HÖTZL, K. WISSER (1979) gegeben.

Die Proben des kombinierten Markierungsversuches im Einzugsgebiet der Areuse wurden entsprechend den nachfolgenden Angaben analysiert und ausgewertet: Von jeder Probe wurden 2 µl auf DC-Fertigplatten Kieselgel 60 (Schichtdicke 0,25 mm) der Fa. Merck aufgetragen; z. T. erfolgte eine Anreicherung um den Faktor 10 durch wiederholtes Auftragen von 2 µl nach jeweiliger Trocknung bis zu einer Gesamtmenge von 20 µl pro Startpunkt. Die so mit den Probenlösungen behandelten Platten werden dann 60 Minuten lang mit einem Gemisch von Propanol-(1)/Essigsäureäthylester/Ammoniaklösung (25%) (6/2/2) entwickelt. Die Auswertung der Chromatogramme mittels des Densitometers erfolgte quer zur Laufrichtung, getrennt für die einzelnen Farbstoffe entsprechend ihren spezifischen Rf-Werten (Quotient zwischen der Wanderstrecke der Einzelkomponente und der Lösungsmittelfront).

Als Densitometer gelangte ein Chromatogramm-Spektralphotometer KM 3 der Firma Zeiss zum Einsatz. Angeregt wurde mit einer Hg-Lampe, wobei für die Optimierung der Anregung leider nur die Monochromatfilter M 365 (für Tinopal und Amidorhodamin), M 436 (Uranin und Eosin) und M 546 (Rhodamin) zur Verfügung standen. Zur Erfassung der stoffspezifischen Emission diente ein Prismenmonochromator.

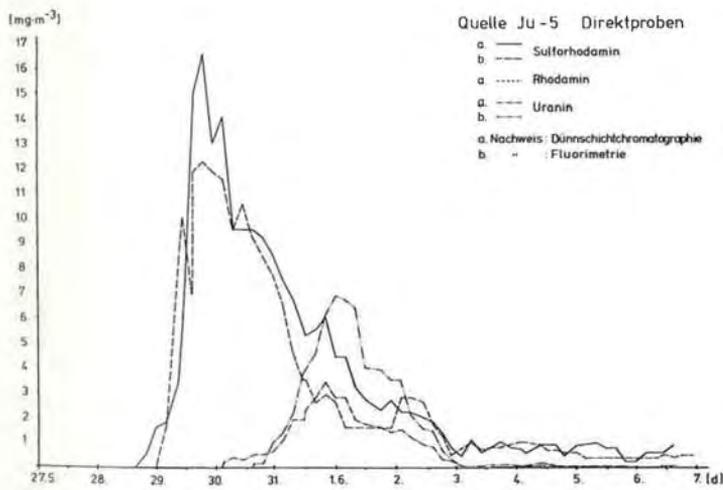
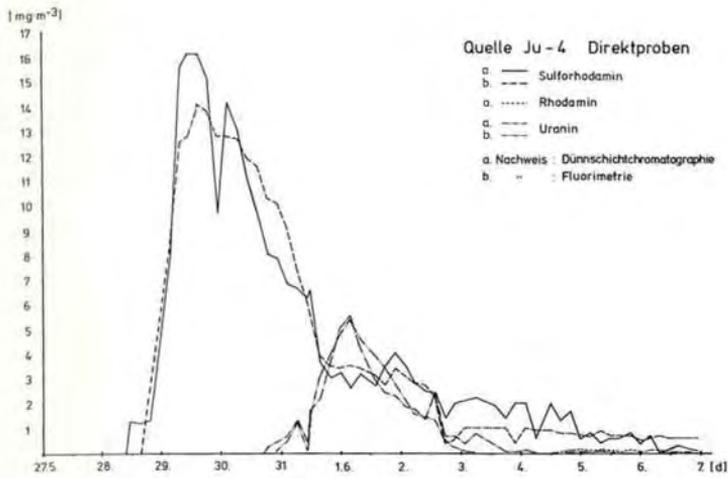


Fig. 44: Vergleich der Durchgangskurven von Fluoreszenztracern in den Areuse-Austritten Ju 4 und Ju 5, gemessen mittels der Dünnschichtchromatographie und Fluorimetrie.

Für in Leitungswasser angesetzte Probenlösungen wurden die in der Tabelle 17 aufgeführten Nachweisempfindlichkeiten erreicht. Beim Eosin wird die Nachweisempfindlichkeit durch eine vom Laufmittel abhängige Trennung in drei Fraktionen beeinträchtigt. Eine Verbesserung kann für das Uranin, Eosin und Amidorhodamin bei der DC-Auswertung durch eine Optimierung der stoffspezifischen Anregungswellenlänge erreicht werden. Durch organische Belastung der Wässer wird bei der DC-Auswertung die Nachweisempfindlichkeit stark reduziert, da sich Schleppfahnen in der Laufspur ausbilden, die den allgemeinen Fluoreszenzuntergrund deutlich anheben.

Tab. 17: Erreichte Nachweisgrenzen für die einzelnen Fluoreszenzstoffe.

Fluoreszenzstoffe	Nachweisgrenzen in mg/m ³	
	Dünnschicht-chromatographie	fluorimetrischer Direktnachweis
Uranin	0,02	0,005
Eosin FB	0,25	0,01
Amidorhodamin G extra	0,02	0,005
Rhodamin B	0,005	0,005
Tinopal ABP flüssig	1,0	10,0

3.3.2.2. Ergebnisse der Dünnschicht-chromatographischen Analyse

Eindeutig positive Durchgänge der Farbstoffe Rhodamin, Amidorhodamin und Uranin konnten in den beiden Quellaustritten der Areuse, Quelle Ju 4 und Ju 5, nachgewiesen werden. Der Durchgang des Amidorhodamins setzte als erster am 28. Mai ein; am 30. Mai folgte das Uranin und drei Tage später das Rhodamin. Der Durchgang aller drei Farbstoffe hielt über den von den untersuchten Proben (letzte Probe vom 6. Juni) erfaßten Zeitraum hinaus an. Die genauen Zeiten für den Beginn und für das Maximum der einzelnen Durchgänge sowie die daraus errechneten Abstandsgeschwindigkeiten sind in der Tabelle 18 enthalten. Der Durchgangsverlauf ist in der Fig. 44 dargestellt.

Da die untersuchte Probenserie bis zum Zeitpunkt der DC-Auswertung infolge der langen Lagerungszeit z. T. Abbauvorgängen der Fluoreszenzstoffe unterworfen war, wurden zum besseren Vergleich auch diese Proben einer direktfluorimetrischen Messung unterzogen. Die Ergebnisse (Fig. 44) zeigen eine gute Vergleichbarkeit, wenn auch Abweichungen im Detail auftreten.

Das Rhodamin konnte im normalen fluorimetrischen Verfahren ohne weitere Probenpräparation infolge der Anwesenheit von Amidorhodamin nicht nachgewiesen werden (vergl. auch Martina ZUPAN in Abschn. 3.3.1.). Mit der Dünnschicht-Chromatographie konnte dagegen der Rhodamindurchgang getrennt von dem des Amidorhodamins sehr deutlich erfaßt werden. Gerade für das Rhodamin liegen in der vorhandenen Geräteausrüstung günstige Anregungsbedingungen vor, so daß eine dem fluorimetrischen Verfahren vergleichbare Nachweisempfindlichkeit erreicht wird.

Bei Uranin und z. T. auch Amidorhodamin bedarf es noch von der Geräteausstattung her einer Verbesserung der jeweils spezifischen Anregung. Infolge der dadurch bedingten verminderten Nachweisempfindlichkeit konnten in der DC-Auswertung gegenüber der fluorimetrischen Messung geringere Konzentrationswerte nicht mehr erfaßt werden. Beim Vergleich der nach den beiden verschiedenen Methoden gewonnenen Durchgangskurven zeigen die DC-Meßwerte eine stärkere Streuung. Die Ursache dafür wird hier in der vereinfachten quantitativen Auswertung der Substanzflecken auf der DC-Platte gesehen. Diese Flecken können durch ungleichmäßige Laufeigen-

schaften sowie durch Verunreinigungen bedingt sich unterschiedlich stark ausdehnen, z. T. auch ringförmige Struktur annehmen. Für eine exakte Auswertung wäre daher jeweils eine Integrationsmessung über den gesamten Substanzfleck erforderlich. Aus Rationalisierungsgründen wurden in unseren Messungen diese Ungleichmäßigkeiten vernachlässigt und die jeweilige Konzentration aus dem maximalen Fluoreszenzsignal beim einfachen Überfahren des Substanzfleckens ermittelt.

Tab. 18: Kennwerte für die Wiederausbringung der Fluoreszenzstoffe Uranin, Amidorhodamin und Rhodamin aufgrund der Dünnschicht-chromatographischen Auswertung und der direktfluorimetrischen Messung von Proben aus den Quellen Ju 4 und Ju 5.

	Quelle Ju 4		Quelle Ju 5	
	DC-Methode	Fluorimetrie	DC-Methode	Fluorimetrie
URANIN				
Erst-Auftreten	30. 5., 19.00	30. 5., 23.00	30. 5., 3.00	30. 5., 15.00
Erst-Auftreten in Stunden nach der Eingabe	105	109	89	101
Max. Abstandsgeschwindigkeit in m/h	43	41	51	45
Zeit des Durchgangsmaximums	1. 6., 4.00	1. 6., 4.00	31. 5., 20.00	31. 5., 24.00
Durchgangsmax. in Stunden nach der Eingabe	138	138	130	134
max. Konzentration in mg/m ³	5,5	5,33	3,4	6,85
mittl. Abstandsgeschwindigkeit in m/h	33	33	35	34
AMIDORHODAMIN				
Erst-Auftreten	28. 5., 12.00	29. 5., 4.00	28. 5., 16.00	28. 5., 24.00
Erst-Auftreten in Stunden nach der Eingabe	49,5	65,5	53,5	61,5
max. Abstandsgeschwindigkeit in m/h	177	134	165	144
Zeit des Durchgangsmaximums	29. 5., 11.00	29. 5., 15.00	29. 5., 19.00	29. 5., 19.00
Durchgangsmax. in Stunden nach der Eingabe	72,5	76,5	80,5	80,5
max. Konzentration in mg/m ³	16,0	14,0	16,5	12,2
mittl. Abstandsgeschwindigkeit in m/h	121	115	109	109
RHODAMIN				
Erst-Auftreten	3. 6., 18.00	—	3. 6., 14.00	—
Erst-Auftreten in Stunden nach der Eingabe	199,5	—	195,5	—
max. Abstandsgeschwindigkeit in m/h	34	—	34	—
Zeit des Durchgangsmaximums	5. 6., 8.00	—	5. 6., 20.00	—
Durchgangsmax. in Stunden nach der Eingabe	237,5	—	249,5	—
max. Konzentration in mg/m ³	0,135	—	0,045	—
mittl. Abstandsgeschwindigkeit in m/h	28	—	27	—

Eosin konnte in den Quellen Ju 4 und Ju 5 nicht nachgewiesen werden; ebenso wenig Tinopal, dessen untere Nachweisgrenze durch eine sehr ungleichmäßige Grundlast beeinträchtigt war.

In den 44 untersuchten Proben der Quelle Ju 3 konnte mit der DC-Methode keiner der eingebrachten Farbstoffe nachgewiesen werden. Lediglich für den optischen Aufheller Tinopal ergaben sich zunächst nicht eindeutige Anhaltspunkte. Generell weist das Wasser dieser Quelle eine offenbar stärkere Kontamination durch Abwässer auf, die vor allem im Emissionsbereich des Tinopals zu einem relativ hohen und stark schwankenden Untergrund führen.

Darüber hinaus wurden bei den Proben der Quelle Ju 3 die Chromatogramme durch einen bisher nicht identifizierten fluoreszierenden Stoff beeinträchtigt. Bei der Verwendung des Fließmittels Propanol-(1)/Essigsäureäthylester/Ammoniaklösung (6/2/2) bleibt dieser Stoff teils auf der Startlinie zurück, teils erzeugt er aber eine bis zum Rf-Wert von 0,5 reichende fluoreszierende Bahn mit nach oben abnehmender Intensität. Er stört damit den Nachweis von Uranin (Rf-Wert: 0,26), Amidorhodamin (Rf-Wert: 0,32) und Tinopal (Rf-Wert: 0,5).

Dieser nicht identifizierte Stoff zeigt ähnliche spektrale Eigenschaften wie das Tinopal, wenn auch mit größerer Bandbreite. Daher wurden zur optimalen Trennung dieser Verunreinigung vom Tinopal ABP flüssig, das auch andere Laufeigenschaften als Tinopal CBS-X besitzt, Versuche mit anderen Fließmitteln durchgeführt. Besonders günstig erwies sich dafür eine Mischung aus Aceton/Benzol/Essigsäureäthylester/Wasser (60/10/10/10) bei Zugabe von 1 ml Propionsäure. Die Untersuchung der Proben aus der Quelle Ju 3 mit diesem Eluens ergab dann für das Tinopal ABP flüssig einen eindeutig negativen Befund.

Insgesamt zeigte die Auswertung von Proben aus dem kombinierten Markierungsversuch die Eignung und Anwendbarkeit der Dünnschicht-chromatographischen Methode auch unter natürlichen Bedingungen. Der Vorteil dieses Verfahrens zeigt sich in dem gleichzeitigen Nachweis der beiden in ihrem Emissionsverhalten sehr ähnlichen Stoffe Rhodamin und Amidorhodamin. Deutlicher wäre ein Vorteil beim gleichzeitigen Auftreten von Eosin und Uranin sowie Eosin und Amidorhodamin geworden. Für den eindeutigen Nachweis von Tinopal machte sich die durch Abwasserkontamination bedingte erhöhte Grundlast sowie das Fehlen von längeren Nullserien bemerkbar.

3.3.3. Ergebnisse des Fluoreszenztracernachweises mittels Aktivkohle (F. BAUER, W. PERLEGA)

Die Aktivkohlemethode (F. BAUER, 1967, 1972, W. PERLEGA, 1976) wurde im Rahmen dieses Markierungsversuches eingesetzt, um allenfalls auch noch schwache, durch Direktmessung von Wasserproben nicht mehr erfaßbare Farbstoffaustritte qualitativ nachweisen zu können.

Bereits einige Monate vor Versuchsbeginn wurden die zu beobachtenden Gewässer mittels Aktivkohle zur Erfassung des natürlichen Fluoreszenzbackgrounds und allfälliger Farbstoffaustritte untersucht (Blindproben).

Nach den Einspeisungen wurden die Aktivkohlesäckchen in den zu untersuchenden Gewässern vorerst einwöchig, ab Mitte September 1979 vierzehntägig und ab Ende Jänner 1980 einmonatig exponiert und jeweils nach der Entnahme an die Bundesanstalt für Wasserhaushalt von Karstgebieten in Wien gesendet, wo die Untersuchungen auf Fluoreszenztracergehalte durchgeführt wurden.

3.3.3.1. Methodik der Aktivkohleprobenuntersuchung

Im Rahmen dieses Versuchsprogramms erfolgte die Extraktion der Aktivkohleproben vorerst routinemäßig mittels N-N-Dimethylformamid (= DMF). Hierbei wurden je 0,5 Gramm getrockneter Aktivkohle mit 6,0 ml ammoniakalischem 80 vol%igem DMF versetzt und in der Folge zeitweise geschüttelt. Nach einer 90minütigen Extraktionsdauer wurden die Proben spektralfluorimetrisch untersucht. (Siehe auch W. PERLEGA, 1976.)

Zur Aufnahme der Fluoreszenzspektren der Extrakte standen ein Spektralfluorimeter AMINCO SPF 500 Ratio und ein speziell adaptiertes Spektralfluorimeter PERKIN ELMER 204 zur Verfügung. Die Fluoreszenzspektren wurden nach der von H. BEHRENS (1971, 1973) beschriebenen Methode mit gleichzeitigem Vorschub beider Monochromatoren bei einem konstanten Abstand zwischen Anregungs- und Emissionswellenlänge aufgenommen (Wellenlängenabstand 25 nm).

Wenn in einer Aktivkohleprobe ausreichende Mengen der bei diesem Versuch verwendeten Fluoreszenztracer Tinopal flüssig, Uranin, Eosin, Amidorhodamin G oder Rhodamin B enthalten sind, können diese im nach obiger Vorschrift hergestellten ammoniakalischen DMF-Extrakt spektralfluorimetrisch nachgewiesen werden.

Liegen in einem Extrakt jedoch mehrere Fluoreszenztracer vor, so ist deren spektralfluorimetrische Identifizierung infolge gegenseitiger spektraler Überlagerungen meist nur nach Durchführung geeigneter Auftrennungen möglich (W. PERLEGA, 1976).

Tinopal wird infolge seiner spektralen Lage durch die übrigen Fluoreszenztracer in seiner Nachweisbarkeit nicht beeinträchtigt und stört auch nicht deren Nachweis. Der Tinopal-Nachweis wird jedoch in der Regel durch einen hohen natürlichen Fluoreszenzbackground bedeutend beeinträchtigt.

Eine den Nachweis anderer Fluoreszenztracer störende Uranin-Fluoreszenz kann dadurch umgangen werden, daß eine Aktivkohleprobe mit nicht ammoniakalischem 80 vol%igem DMF extrahiert wird. Im Extrakt ist dann die Uraninfluoreszenz gelöscht, während alle übrigen Fluoreszenztracer normal spektralfluorimetrisch nachweisbar sind.

Störende Uranin- und/oder Eosinfluoreszenzen können auch durch Ansäuern des Extraktes (etwa mit Schwefelsäure) gelöscht werden.

Gleichzeitig im DMF-Extrakt vorliegendes Rhodamin B und Amidorhodamin G können nach der von J. ROCHAT et al. (1975) beschriebenen und hier für die Aktivkohle-Analytik modifizierten Methode getrennt werden. Hierbei wird der DMF-Extrakt mit Chloroform ausgeschüttelt, wonach das Rhodamin B in der Chloroformphase und das Amidorhodamin G in der wäßrigen Phase nachweisbar ist.

Uranin kann neben anderen, seine Nachweisbarkeit störenden Fluoreszenztracern in einem Alkohol-KOH-Extrakt (F. BAUER, 1967) bestimmt werden. Störungen können in diesem Falle durch hohe Gehalte von Eosin und Rhodamin B auftreten (F. BAUER et al., 1976, S. 152-153).

Eosin kann bei gleichzeitigem störendem Auftreten von Amidorhodamin G bestimmt werden, nachdem das Amidorhodamin G nach der von H. BEHRENS (in: F. BAUER et al., 1976, S. 131) beschriebenen Methode durch Filtration über Kieselgel abgetrennt wurde.

Für den Nachweis von Uranin neben hohen Eosingehalten liegt derzeit noch keine befriedigende Methode vor.

Im Rahmen des Markierungsversuches im Neuenburger Jura wurden die Aktivkohleproben entsprechend den speziellen Erfordernissen unter Anwendung folgender oben beschriebener und z. T. kombinierter Extraktions- bzw. Auftrennungsmetho-

den untersucht: Uranin wurde in Alkohol-KOH-Extrakten der Kohleproben bestimmt. Rhodamin B und Amidorhodamin G wurden nach Auftrennung der DMF-Extrakte mittels Chloroform bestimmt. Die Untersuchung der Kohleproben auf Eosin erfolgte im Kieselgel-Filtrat der DMF-Extrakte. Die Messungen auf Tinopal erfolgten direkt im ammoniakalischen DMF-Extrakt.

Unter Anwendung der oben beschriebenen Nachweisverfahren und unter Berücksichtigung des natürlichen Backgrounds ergaben sich für die Kohleproben dieses Versuchsprogramms folgende Nachweisgrenzen in den Extrakten bzw. Auftrennungsprodukten:

Tinopal flüssig	100 mg/m ³
Uranin	0,1 mg/m ³
Eosin	1,0 mg/m ³
Amidorhodamin G extra	0,05 mg/m ³
Rhodamin B	0,05 mg/m ³

Diese Werte geben nur die Konzentration in den Kohleextrakten bzw. in den nach den Auftrennungen vorliegenden Lösungen an und können keinesfalls zu den in den Wasserproben mittels Direktmessung festgestellten Konzentrationen in direkte Beziehung gesetzt werden. Dies gilt auch für die in Fig. 45 angeführten Konzentrationen.

3.3.3.2. Untersuchungsergebnisse

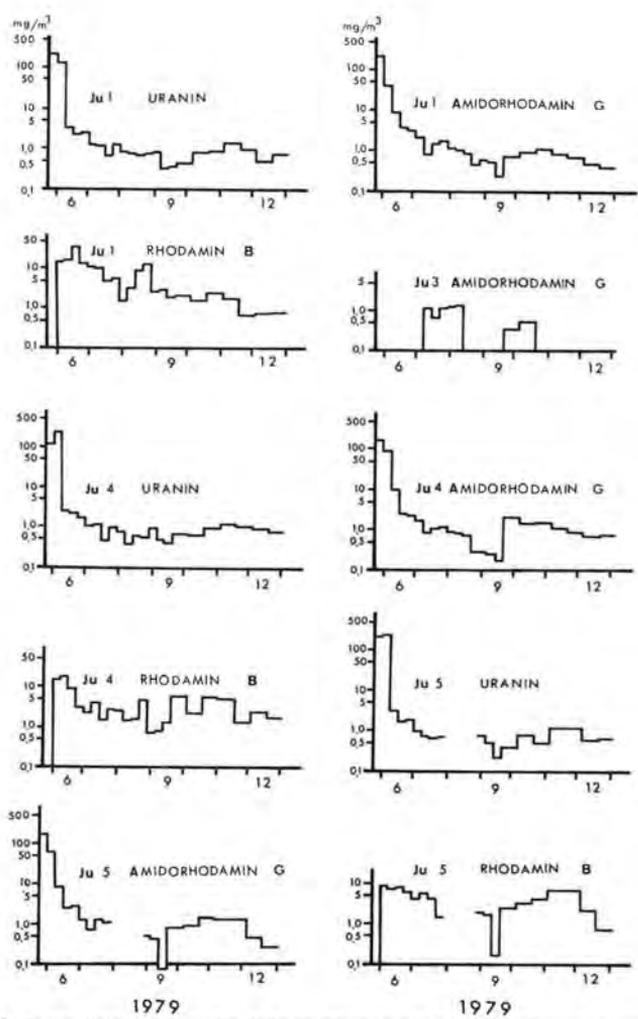
Die in den bisher bearbeiteten Beobachtungszeiträumen an den einzelnen Beobachtungsstellen mittels Aktivkohle nachgewiesenen Fluoreszenztracer sind in Tab. 19 ausgewiesen, die Gänge der eindeutigen Fluoreszenztraceraustritte sind in Fig. 45 dargestellt. Zeitliche Angaben über nachgewiesene Traceraustritte können nur für die jeweilige Expositionsdauer der Aktivkohlesäckchen im Gewässer gemacht werden.

An den Beobachtungsstellen Ju 1, Ju 4 und Ju 5 waren Uranin und Amidorhodamin G ab der ersten Versuchswoche (25. Mai–1./2. Juni 1979) und Rhodamin B ab der zweiten Versuchswoche (1./2. Juni–9. Juni 1979) nachweisbar. (Von der Beobachtungsstelle Ju 5 sind vom Zeitraum 30. Juli–27. August 1979 keine Aktivkohleproben zur Untersuchung übermittelt worden.) Diese Fluoreszenztracer konnten an den drei angegebenen Beobachtungsstellen bis zum 27. Juni 1980 (Untersuchungsstand zur Zeit der Manuskriptabfassung) mit abnehmenden Konzentrationen nachgewiesen werden.

An der Beobachtungsstelle Ju 3 war Amidorhodamin G nur in den Zeiträumen 9. Juli–12. August und 17. September–13. Oktober 1979 nachweisbar.

Die Untersuchung der Kohleproben von den Beobachtungsstellen Ju 2, Ju 3, Ju 60, Ju 70, Ju 71, Ju 72 und Ju 81 ergab mögliche Uraningehalte im Bereiche der Nachweisgrenze (in Ju 60 bereits vor Versuchsbeginn!), ohne daß jedoch für Tracerdurchgänge charakteristische Konzentrations-Zeit-Verläufe festzustellen gewesen wären. Das gleiche gilt auch für spurenhafte Tinopal-Gehalte in den Kohleproben von Ju 2. (Geringe Spuren optischer Aufheller können nach unveröffentlichten Untersuchungsergebnissen der Bundesanstalt für Wasserhaushalt von Karstgebieten allenfalls aus den Bändern, mit denen die damals verwendeten Aktivkohlesäckchen eingefüllt waren, stammen.)

Diese möglichen Spurengehalte sind somit absolut ungesichert und können keinesfalls als eindeutige Traceraustritte interpretiert werden.



45: In den Extrakten bzw. den Auftrennungsprodukten der Aktivkohleproben von Ju 1, Ju 3, Ju 4 und Ju 5 bis Ende 1979 nachgewiesene Fluoreszenztracergehalte. Die angegebenen Konzentrationen können nicht direkt zu den in den Wasserproben mittels Direktmessungen festgestellten Konzentrationen in Beziehung gesetzt werden (siehe auch die Erläuterungen im Text).

Die Untersuchung der Kohleproben von Ju 73, Ju 74 und Ju 80 gab keinerlei Hinweise auf Fluoreszenztracergehalte.

Somit waren im Rahmen des Versuchsprogramms und bisher nur die Fluoreszenztracer Uranin, Amidorhodamin G und Rhodamin B mittels Aktivkohle an Beobachtungsstellen eindeutig nachweisbar. Tinopal und Eosin konnten bisher nicht nachgewiesen werden.

Um das Abklingen der Austritte von Uranin, Amidorhodamin G und Rhodamin B noch weiter zu verfolgen und unter Umständen allfällige verzögerte Austritte von Eosin noch nachweisen zu können, werden ab 24. Jänner 1980 die Beobachtungsstellen Ju 1, Ju 2, Ju 3, Ju 4, Ju 5 und Ju 60 mit einmonatig exponierten Kohlesäckchen noch weiter beobachtet. Sollten diese eingeschränkt weitergeführten Untersuchungen neue Ergebnisse erbringen, wird darüber an geeigneter Stelle berichtet werden. Mit einem Nachweis von Tinopal flüssig kann jedoch infolge dessen geringer Nachweisempfindlichkeit nicht mehr gerechnet werden.

Tab. 19: Ergebnisse der Aktivkohleuntersuchungen.

Quelle	bearbeiteter Beobachtungszeitraum	Fluoreszenztracernachweise
Ju 1	78 11 17-80 06 27	UR, ARG, RB
Ju 2	78 11 17-80 06 27	(UR), (TIN)
Ju 2 A	79 05 25-80 04 23	(UR)
Ju 3	78 11 17-80 06 27	ARG
Ju 4	79 01 19-80 06 27	UR, ARG, RB
Ju 5	79 01 19-80 06 27	UR, ARG, RB
Ju 60	78 11 17-80 06 27	(UR) bereits vor Versuchsbeginn
Ju 70	79 02 22-80 06 27	(UR)
Ju 71	79 05 26-80 06 27	(UR)
Ju 72	79 05 26-80 06 27	(UR)
Ju 73	79 05 26-80 06 27	n. n.
Ju 74	79 05 27-79 05 29	n. n.
Ju 80	79 05 27-79 10 13	n. n.
Ju 81	79 05 27-79 07 06	(UR)

UR = Uranin, ARG = Amidorhodamin G, RB = Rhodamin B, TIN = Tinopal flüssig, n. n. = keine Fluoreszenztracer nachweisbar, () = unsichere Spurenwerte. (Siehe auch Erläuterungen im Text.)

3.3.4. Zusammenfassung und Vergleich der durch Fluoreszenztracer gewonnenen Resultate (F. BAUER, H. HÖTZL, Martina ZUPAN)

Von den eingebrachten Fluoreszenzstoffen konnte der Wiederaustritt von Uranin, Rhodamin und Amidorhodamin in den Quellen Ju 1, Ju 4 und Ju 5, das Amidorhodamin zusätzlich auch in der Quelle Ju 3 nachgewiesen werden. Die bei der Aktivkohleauswertung beobachteten unsicheren Spuren von Uranin in den Quellen Ju 2, Ju 60, Ju 70, Ju 71, Ju 72 und Ju 81 sind, soweit es sich tatsächlich um Uranin handelt, auf den Einfluß von Abwässern bzw. auf ältere vom Institut für Geologie der Universität Neuenburg an verschiedenen Stellen durchgeführte Markierungsversuche mit Uranin zurückzuführen. Eine Herleitung dieser Uraninspuren von der Eingabe bei Les Verrières kann sowohl von den topographischen als auch hydrogeologischen Gegebenheiten ausgeschlossen werden.

Vollkommen negativ verlief die Untersuchung auf Eosin. Dieser Farbstoff konnte in keinem der beprobten Wasseraustritte nachgewiesen werden.

Spuren von Tinopal wurden zunächst in den Quellen Ju 3 und Ju 60 vermutet. Beide Quellen sind durch Abwässer stark belastet. Die Dünnschicht-chromatogra-

phische Untersuchung der Proben von Ju 3 zeigte, daß es sich hierbei um einen noch nicht identifizierten fluoreszierenden Stoff mit ähnlichen spektralen Eigenschaften wie das Tinopal handelt. Sein Konzentrationsverlauf ist auffallend an die Wasserführung gebunden, wobei erhöhte Konzentrationen jeweils in der abklingenden Hochwasserwelle auftreten. Das Tinopal ABP flüssig konnte mit einem speziellen Eluens im Chromatogramm von diesem Stoff abgetrennt werden. Die Tinopalbefunde in den einzelnen Proben waren danach eindeutig negativ.

Das Fehlen eines eindeutigen Tinopalnachweises kann seine Ursachen auch in den ungünstigen Eigenschaften des erstmals verwendeten vorgelösten Tinopals ABP flüssig haben. Es weist eine wesentlich geringere Nachweisempfindlichkeit als das pulverige Tinopal CBS-X auf. Darüber hinaus erwies sich der Emissionsbereich instabil und von der jeweiligen Konzentration abhängig.

Tab. 20: Zusammenstellung des Nachweises von Fluoreszenztracern in den beprobten Quellen

F = fluorimetrische Messung von Wasserproben
 D = Dünnschicht-Chromatographie von Wasserproben
 A = Aktivkohlemethode
 - = negativer oder unsicherer Befund
 + = positiver Nachweis
 0 = keine Untersuchung mit der betreffenden Methode.

Quelle	Uranin			Rhodamin			Amidorhodamin			Tinopal			Eosin		
	F	D	A	F	D	A	F	D	A	F	D	A	F	D	A
Ju 1	0	0	+	0	0	+	0	0	+	0	0	-	0	0	-
Ju 2	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-
Ju 3	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Ju 4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
Ju 5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
Ju 60	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-
Ju 70	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-
Ju 71	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-
Ju 72	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-
Ju 73	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-
Ju 74	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-
Ju 80	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-
Ju 81	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-

Eine Auflistung der mit den einzelnen Methoden untersuchten Quellen sowie der beobachteten eindeutigen Wiederaustritte ist in der Tabelle 20 zusammengestellt. Die festgestellten Abflußrichtungen sind der Fig. 53 zu entnehmen. Die Ergebnisse der Markierung mit den Fluoreszenztracern bestätigen die bisherigen Befunde über die unterirdischen Abflußverhältnisse aus der Synklinale von Les Verrières und der Synklinale von La Brévine. Mit der Eingabe von Rhodamin in die Grotte chez le Brandt sowie dessen Nachweis in der Areuse-Quelle konnte das Einzugsgebiet weiter nach Westen abgesichert werden. Zur Abgrenzung des Einzugsgebietes nach Osten konnten die dort durchgeführten Markierungen mit Eosin und Tinopal infolge des negativen Ergebnisses keinen Beitrag leisten.

Dieser kombinierte Markierungsversuch bot wieder Gelegenheit, unterschiedliche Methoden zu vergleichen bzw. neue Verfahren zu testen. Erstmals in einem solchen Großversuch wurde zur Bestimmung der Fluoreszenztracern in den Wasserproben neben der direkten fluorimetrischen Messung auch die Dünnschicht-Chromatographie herangezogen. Darüber hinaus wurde die Ausbringung der Fluoreszenzstoffe auch mit Hilfe der schon bewährten Aktivkohlemethode überprüft.

Zur quantitativen Erfassung der Fluoreszenztracer wurden die Wasserproben zunächst fluorimetrisch untersucht. Neben der hohen Nachweisempfindlichkeit ist vor allem der einfache zeitsparende Analysenvorgang – in der Regel ohne jede weitere Probenpräparation – von Vorteil. Von Nachteil ist, daß beim gleichzeitigen Auftreten von Fluoreszenztracern mit ähnlichen spektralen Eigenschaften diese sich gegenseitig beeinflussen und dadurch die geringer konzentrierten Komponenten ohne zusätzliche Probenpräparation nicht nachweisbar sind. Bei der Dünnschicht-Chromatographie erfolgt zuerst eine chemische Trennung und erst dann nach Tracern getrennt die fluorimetrische Auswertung.

Der Vorteil dieses zuletzt genannten Verfahrens zeigte sich bei der Erfassung des Rhodamins, das in den Quellwässern zusammen mit dem höher konzentrierten Amidorhodamin auftrat. Leider konnte aus technischen Gründen die DC-Auswertung erst 9 Monate nach der Probenentnahme durchgeführt werden. In dieser Zeit hat, wie in Abschn. 3.3.2. schon angeführt, trotz Lagerung in braunen Polyäthylenflaschen eine teilweise Zersetzung des lichtempfindlichen Uranins stattgefunden. Für die quantitative Auswertung des Uranins und Amidorhodamins sind daher die Konzentrationswerte maßgeblich, wie sie in Abschn. 3.3.1. von Martina ZUPAN aufgrund des fluorimetrischen Nachweises angegeben werden. Ihre Messung erfolgte relativ kurz nach der Probenentnahme; lediglich das Rhodamin wurde erst einige Monate später mittels eines speziellen Trennverfahrens nachgewiesen.

Zum besseren Vergleich der beiden Methoden wurde daher die zweite Probenserie im Anschluß an die DC-Auswertung ebenfalls fluorimetrisch analysiert. Die große Übereinstimmung der dabei gewonnenen Meßergebnisse für das Uranin und Amidorhodamin geht aus der Fig. 44 hervor. Abweichungen treten im Detail auf; so zeigen die DC-Werte größere Schwankungen, was, wie in Abschn. 3.3.2. erläutert, auf das vereinfachte und daher etwas ungenauere Verfahren bei der Auswertung des von den einzelnen Farbstoff-Flecken ausgestrahlten Fluoreszenzsignals zurückgeführt wird. Auch spielen hier offenbar geringfügige Unterschiede im Plattenmaterial und bei den übrigen Randbedingungen eine Rolle, so daß künftig viel stärker auf vollkommen einheitliche Ausgangsbedingungen geachtet werden muß.

Auffallende Unterschiede treten beim Ersteinsatz der Tracer auf. Während die von Martina ZUPAN und die von F. P. BUB & H. HÖTZL durchgeführten fluorimetrischen Messungen übereinstimmen, zeigt die DC-Auswertung – obwohl gerade für die beiden Farbstoffe eine geringere Nachweisempfindlichkeit vorlag – einen meist mehrere Stunden vorher einsetzenden Durchgang an. Wieweit die oben angeführten Gründe dafür mit verantwortlich sind, kann noch nicht eindeutig beurteilt werden.

Die auffallend geringe Konzentration von Amidorhodamin in der von Martina ZUPAN untersuchten Probe vom 30. Mai, 11.00, aus der Quelle Ju 5, die sich auch in Wiederholungsmessungen bestätigt hat, scheint durch einen Sekundäreffekt bedingt zu sein. In der in Karlsruhe untersuchten Parallelprobe trat ein dem Durchgangsverlauf entsprechender Konzentrationswert auf.

Das Rhodamin konnte ohne Probenpräparation mittels der fluorimetrischen Direktmessung nicht erfaßt werden. Die in Abschn. 3.3.1. angeführten Konzentrationswerte wurden im Chloroformextrakt nach Abtrennen des Amidorhodamins bestimmt. Auf die Problematik dieser Meßwerte wurde bereits im genannten Abschnitt hingewiesen. Die Konzentrationsangaben weichen von denen der DC-Auswertung z. T. um mehr als eine Zehnerpotenz ab.

Als drittes Verfahren zum Nachweis der Farbstoffe wurde die Aktivkohlemethode eingesetzt. Der Verfahrensunterschied liegt hier in der Probenentnahme, wobei die gegebenenfalls im Wasser vorhandenen Fluoreszenztracer von einem Aktivkohlefilter adsorbiert werden; das Eluat der Aktivkohle selbst wird dann mittels eines Fluorime-

ters ausgewertet. Auch hier ist eine weitere Behandlung des Eluats erforderlich, wenn in diesem verschiedene Fluoreszenzstoffe enthalten sind.

Bei großen Markierungsversuchen werden heute meist beide Verfahren der Probenahme nebeneinander eingesetzt, um die jeweiligen Vorteile – Möglichkeit der weiteren quantitativen Auswertung von Direktprobenmessungen bzw. Möglichkeit der Langzeitbeprobung und höhere Nachweisempfindlichkeit bei der Aktivkohlemethode – zu nutzen.

Die Ergebnisse aus der Aktivkohleuntersuchung entsprechen hinsichtlich des positiven Nachweises von Fluoreszenzstoffen (s. Tab. 20) den Resultaten aus der Direktmessung. Das gleiche gilt für die Farbstoffdurchgänge, soweit der gewählte wöchentliche Aktivkohlewechsel einen solchen direkten Vergleich zuläßt. Durch die höhere Nachweisempfindlichkeit und den längeren Beprobungszeitraum konnte das Amidorhodamin gegenüber der Direktbeprobung noch zusätzlich in der Quelle Ju 3 nachgewiesen werden. Die fraglichen Uraninspuren in verschiedenen weiteren Quellen (vergl. Abschn. 3.3.3.) unterstreichen die hohe Empfindlichkeit dieser Methode und weisen zugleich auf die langanhaltende Kontamination des Untergrundes durch ältere Markierungsversuche hin.

3.4. Resultat des Markierversuches mit Salzen

3.4.1. Einsatz und Durchgang von Kochsalz (I. MÜLLER, W. KÄSS)

Eine konzentrierte Lösung von NaCl wurde in den Ponor vom Lac des Tailières eingegeben (Fig. 34, Tabelle 8). Unter realistischer Annahme einer etwa 90%-Sättigung (300 g/l) der angelieferten Sole entsprach die eingespeiste Menge 2700 kg NaCl oder 1062 kg Na⁺ und 1637 kg Cl⁻.

Diejenigen Proben, die am Geologischen Landesamt Baden-Württemberg in Freiburg im Breisgau gemessen wurden, wurden durch Flammenspektrometrie bestimmt. In der geochemischen Abteilung des Geologischen Instituts der Universität Neuenburg wurde das Na⁺ über Atomabsorption (AAS) gemessen. Die Resultate stimmen überein. Die Ergebnisse sind in Fig. 46 und 47 dargestellt.

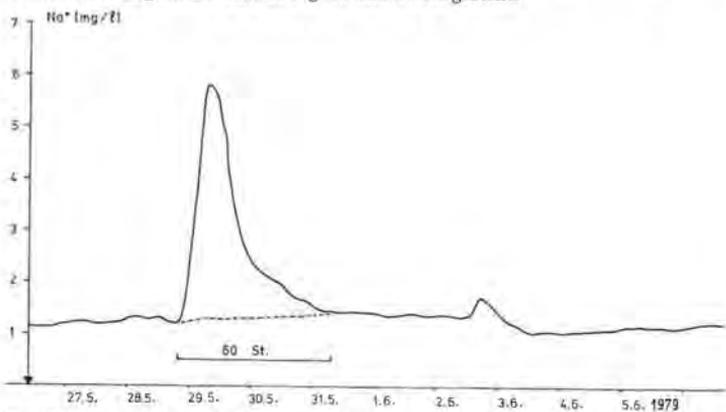


Fig. 46: Durchgangskurve des Na⁺ in Ju 3 Mai–Juni 1979 (4stündliche Probenahme und Laboranalyse). Strichlierte Linie = hypothetische Grundlast.

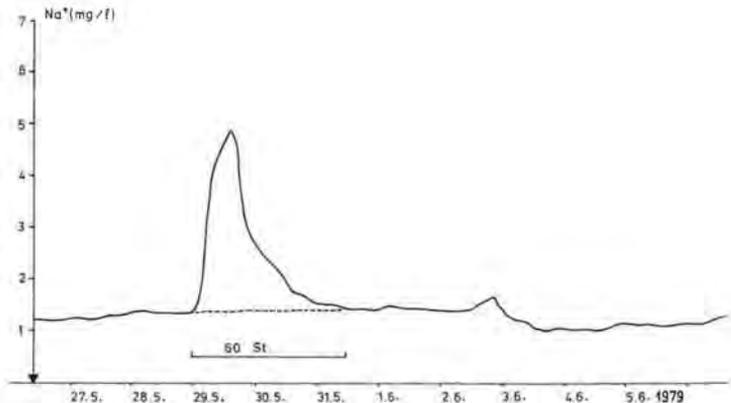


Fig. 47: Durchgangskurve des Na^+ in Ju 5 Mai–Juni 1979. Weitere Erläuterung siehe Fig. 46.

Die kontinuierliche Registrierung der Natrium-Ionenaktivität in Karstquellen mit Hilfe ionenselektiver Elektroden wurde in den Freiburger Voralpen mit Erfolg angewandt (I. MÜLLER, 1976). An der Areuse wurden folgende Meßapparaturen eingesetzt:

- Natriumspezifische Elektrode PNaY (TACUSSEL)
- Referenzelektrode RDJ/C8 (TACUSSEL)
- Ionenanalysator (ORION, 407A)
- Schreiber (EUROTHERME, CHESSEL 301).

Die Auflösung der Meßreihe beträgt $\pm 1\%$ der gemessenen Werte, wobei der Meßbereich zwischen 0,1 mg/l und 10 mg/l liegt.

Während des kombinierten Markierungsversuches wurden beide Austritte der Areuse-Quelle (Nr. Ju 4 und Nr. Ju 5 in Fig. 34) mit einer Meßeinheit ausgerüstet. Fig. 48 und 49 zeigen die automatisch aufgenommenen Durchgangskurven des Na^+ . Die daraus umgerechneten absoluten Konzentrationswerte des Natriums entsprechen den im Labor gemessenen Werten weitgehend.

Der natürliche Untergrund von Na^+ in der Areuse:

Wie in Kapitel 2.4. bereits beschrieben, schwankt die Na^+ -Konzentration in Abhängigkeit von den hydrodynamischen Verhältnissen, da bei starken Niederschlägen oder Schneeschmelze aufgrund des Frischwasseranteils eine beträchtliche Verdünnung auftritt. Typische Konzentrationen liegen in solchen Perioden zwischen 0,5–0,6 mg/l. Bei länger anhaltenden Trockenperioden steigen diese Werte bis zu einem gleichbleibenden Wert von 1,8–2,0 mg/l.

Quantitative Bilanz der NaCl-Markierung:

Das erste Auftreten des Natriums wurde in Nr. Ju 4 am 28. Mai um 20.00 Uhr, in Nr. Ju 5 am 29. Mai 0.00 Uhr registriert. Die Figuren 46 bis 49 zeigen die Restitutionskurven und die Durchgangsdauer des Tracers.

Wenn man annimmt (J.-P. TRIPET, 1972), daß $\frac{2}{3}$ der Schüttung der Areuse-Quelle aus der Synklinale von La Brévine und $\frac{1}{3}$ aus der Synklinale von Les Verrières

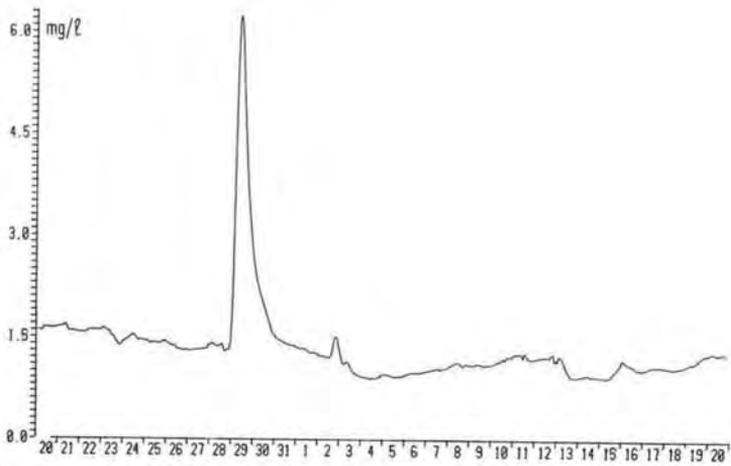


Fig. 48: Durchgangskurve des Na^+ in Ju 4 aufgezeichnet mit der ionensensitiven Elektrode (Mai-Juni 1979).

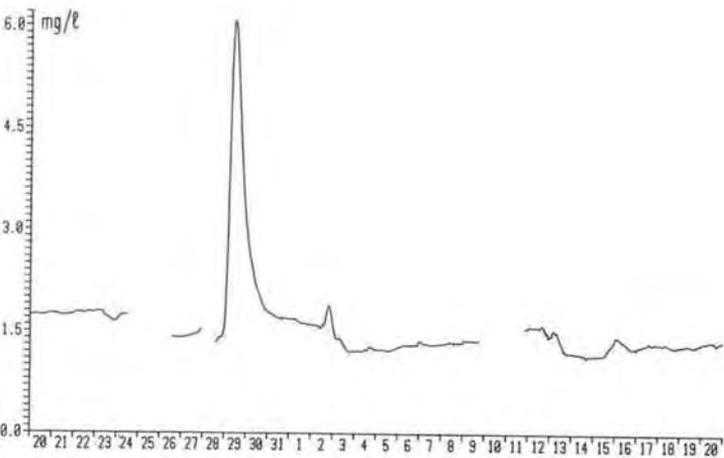


Fig. 49: Durchgangskurve des Na^+ in Ju 5, aufgezeichnet mit der ionensensitiven Elektrode (Mai-Juni 1979).

stammen, so ergeben sich für die wiederausgebrachten Na^+ -Mengen während 60 Stunden seit dem ersten Auftreten folgende Werte:

Austritt Seite La Brévine	735 kg
Austritt Seite Les Verrières	273 kg

Die Gesamtmenge von 1008 kg entspricht somit etwa 95% des eingespeisten Natriums. Ob die restlichen 5% dem leichten Anstieg am 2./3. Juni entsprechen oder ob es sich hier um einen normalerweise beobachteten Pistoneffekt am Beginn einer Schüttungsspitze handelt (siehe Kapitel 2.4.), ist nicht signifikant zu unterscheiden. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Natriumwelle ist ungefähr 100 m/Stunde.

3.4.2. Der Einsatz von Kalisalz (W. KASS, I. MÖLLER)

Als einzige Beobachtungsstellen für den Kalisalzaustritt wurden die beiden Quellaustritte in der Areuse Ju 4 (östlicher Austritt, Richtung La Brévine) und Ju 5 (westlicher Austritt, Richtung Les Verrières) untersucht. Ab 27. Mai wurden die Beobachtungsstellen mit ziemlicher Regelmäßigkeit alle 4 Stunden beprobt. Wie sich zeigte, reichte diese Probendichte völlig aus, um eine lückenlose Auswertung zu ermöglichen.

Die Untersuchung erfolgte mit dem ZEISS-Elektrolyt-Automat FL 6, der die gleichzeitige Bestimmung von Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium erlaubt. Für den vorliegenden Versuch wurde jedoch nur von der Bestimmung von Na^+ und K^+ Gebrauch gemacht. Bei der gewählten optimalen Einstellung war

	für Natrium	für Kalium
die Bestimmungsgenauigkeit	$\pm 0,02$	$\pm 0,002 \text{ mg/l}$
bei einer mittleren Grundlast von vor und nach dem Salzdurchgang.	1,20	0,550 mg/l

Auswertung der Kaliumbestimmungen:

Aus beiden Beprobungsstellen standen zwischen 25. Mai, 20.30 Uhr und 6. Juni 1979, 23.00 Uhr je 70 Werte zur Verfügung. Beim Aufzeichnen der beiden Gangkurven war zu erkennen, daß die Kaliumwerte der zwei Quellaustritte nicht mehr als in der statistischen Streuung voneinander abweichen. Daher wurde der Mittelwert der auszuwertenden Kaliumdurchgangskurve aus beiden Beobachtungsstellen zu Grunde gelegt (Fig. 50). Die Auswertung ergab folgende Daten:

Erstes Auftreten der Kaliumerhöhung: 30. Mai 1979, 8.00 Uhr; Höchste Kaliumführung: 2. Juni 1979, 18.00 Uhr mit 1,025 mg/l ; letztes Auftreten der Kaliumwelle: 3. Juni 1979, 11.00 Uhr.

Da die Kaliumgrundlast in der Quelle sehr stark schwankt (0,4 bis $\sim 1,2 \text{ mg/l}$), was teilweise auf Auswaschen von Düngemitteln im Einzugsgebiet zurückzuführen ist, kann für die Zeit des Markierungsversuchs keine quantitative Auswertung gemacht werden.

Der Zeitpunkt des 50%igen Ausbringens war am 2. Juni um 17.30 Uhr erreicht. Fast zur gleichen Zeit hatte die Areusequelle auch die stärkste Wasserführung während des Beobachtungszeitraums.

Aus dem Schwerpunkt der Kaliumdurchgangskurve läßt sich die mittlere Fließgeschwindigkeit ermitteln, nämlich Entfernung Eingabestelle–Austrittsstelle: Verweilzeit = 3400 m : 151,5 Stunden = 22,5 m/Std.



Fig. 50: K...

Anmerku
In der
Uranin f
speist w
rungsmit

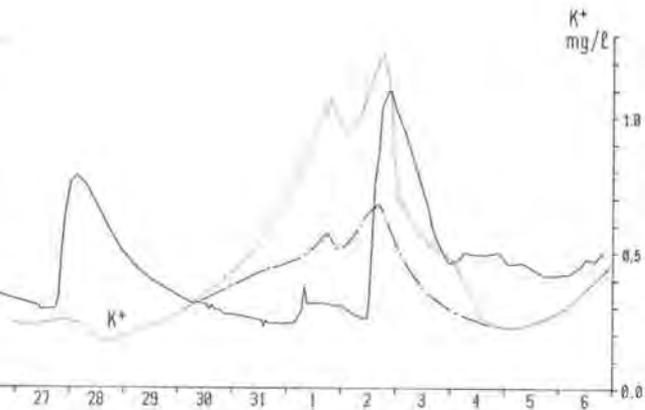
3.5. Der V. M

3.5.1. Sp

Bei der
aller geb
Lycopodi

Markie
gewandt.
tung liegt
kurz erw
markierte
Auftreten
der Areu
16 m³/s a
deren Tra

Im Unt
Stellen b



Kaliumdurchgang in der Areuse-Quelle Mai-Juni 1979. Q = Quellschüttung, punktierte Linie = K^+ -Durchgang, strichpunktiert = hypothetische Kaliumgrundlast.

ng:
 Quelle Ju 5 wurde am 30. Mai 1979 zwischen 7.00 und 11.00 Uhr das erste
 festgestellt, das gleichzeitig mit dem Kaliumsalz an derselben Stelle einge-
 wurde. Damit ist eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Markie-
 teln Kaliumchlorid und Uranin erzielt worden.

Einsatz von Triftstoffen (R. BENISCHKE, H. HÖTZL, H. P. LEDITZKY,
 MAURIN, P. RAMSPACHER, H. ZOJER, J. ZÖTL)

Sporen
 Auswahl der Markierungsstoffe mußte man, bedingt durch den Einsatz fast
 räuchlichen Tracer, verteilt auf sieben Eingabestellen, auch auf gefärbte
 um-Sporen zurückgreifen.
 rungen mit Lycopodium-Sporen werden schon seit mehr als 20 Jahren an-
 Bezüglich der Durchführung von Sporenriftversuchen und deren Auswer-
 schon eine Vielzahl von Veröffentlichungen vor. So soll an dieser Stelle nur
 ähnt werden, daß es durch die Sporenrift nicht möglich ist, das Ausmaß der
 en Wassermengen zu quantifizieren. Aussagekraft haben lediglich das erste
 von Sporen und der weitere Verlauf des Sporendurchganges. Am Beispiel
 se-Quelle, die zur Zeit des Markierungsversuches Schüttungswerte über
 aufwies, besitzt die Sporenrift den Vorteil, daß sie zum Unterschied von an-
 acern bei relativ großem Wasserangebot keine Verdünnung erfährt.
 ersuchungsgebiet des Neuenburger Jura wurden am 26. Mai 1979 an zwei
 laue bzw. grüne Sporen eingegeben. (Fig. 51.)

SPORENNACHWEIS

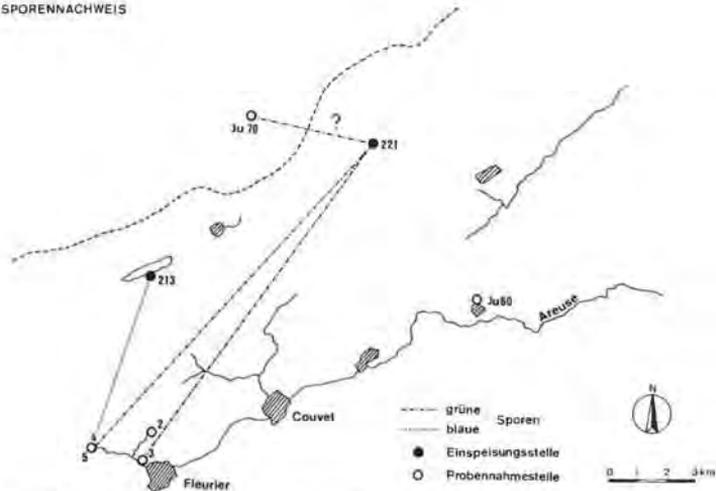


Fig. 51: Der Sporendurchgang beim kombinierten Markierungsversuch Neuenburger Jura 1979.

Die erste Sporeneinspeisung fand am Ausfluß des Lac des Tailières (Nr. 213) statt (Höhe: 1039 m). In der Zeit von 10.35 Uhr bis 10.55 Uhr wurden 10 kg blaue Lycopodium-Sporen in einen Ponor, der den Ausfluß des Sees bildet, eingegeben. Die abfließende Wassermenge betrug ungefähr 100 l/s. Die trockenen Sporen wurden in einem Kübel zu einem Brei angerührt und langsam in die Schwinde injiziert, dabei kam der Einspeisung das große Wasserangebot zugute. Die Einspeisung wurde von Grazer Studenten unter der Leitung von H. LEDITZKY durchgeführt.

Als zweite Einspeisungsstelle wurde die Schwinde Grand Cachot (Nr. 221, Schacht „La Renouillière“, H. 1050 m), ein etwa 8 m tiefer Schacht, mit 20 kg grünen Sporen beschickt. Diese Einspeisung gestaltete sich etwas schwieriger, da der Schacht ziemlich schwer zugänglich ist, außerdem mußte die unmittelbare Versickerungsstelle, ein seitlich des Schachtbodens abzweigender Höhleneingang, erst von Unrat gereinigt werden, um ein problemloses Abziehen des Wassers zu gewährleisten. Der geringe Wasserzufluß (ca. 1,3 l/s) erschwerte die Einspeisung. Auch bei dieser Einspeisung wurden die Sporen vorerst angerührt und anschließend unter Zugabe von weiterem Wasser in die Schwinde eingebracht. Die Einspeisung wurde von 9.45 Uhr bis 10.40 Uhr von R. BENISCHKE und P. RAMSPACHER unter der Leitung von H. ZOJER durchgeführt. Bei beiden Einspeisungen war keine Vor- bzw. Nachspülung notwendig.

Die Planktonnetze für die Probennahme wurden an allen dafür vorgesehenen Probennahmestellen einen Tag vor der Einspeisung am 25. Mai 1979 eingehängt. Sporenetze wurden an den Quellen Ju 2-5, Ju 60 und Ju 70 angebracht. Die ersten Proben wurden am 27. Mai entnommen. Die Planktonnetze wurden bis 9. Juni 1979 einmal täglich entleert, bis Ende Juni jeden zweiten Tag. Die weitere Beprobung wurde in unregelmäßigen Abständen (alle 3-5 Tage) bis Mitte September durchgeführt, die letzte Probe wurde am 12. September 1979 entnommen.

auf eine detaillierte Beschreibung der Probennahmestellen kann an dieser Stelle nicht werden, da diese schon unter Punkt 2.2. vorgenommen wurde.

Die Auswertung der Planktonnetzproben wurden vom Geologischen Institut der Universität Karlsruhe und vom Institut für Geothermie und Hydrogeologie am Forschungszentrum Graz durchgeführt, wobei die Proben alternierend an beide Institute geteilt wurden. Die mikroskopische Auszählung erfolgte seitens des Geologischen Instituts in Karlsruhe von Studenten, am Forschungszentrum Graz von Frau Mag. KLINGER und Frau Mag. S. PUSSWALD. Die Ergebnisse der Sporenauszählung sind in den Tabellen 21–24 zusammengefaßt, die von Karlsruhe untersuchten Proben sind mit K, die in Graz untersuchten mit G bezeichnet.

Die Auszählungen bei Ju 2 (Ubena-Quelle) fielen zur Gänze negativ aus. In der Quelle Ju 3, Pont de la Roche, traten grüne Sporen schon am 27. Mai, einen Tag nach der Einspeisung in den Schacht Grand Cachot (Nr. 221), auf. Ein Peak wurde am 28. Mai (19 grüne Sporen) erreicht, anschließend waren nur mehr 4 Proben am 30. Mai, 1. und 13. Juni) mit je einer gefundenen grünen Spore positiv. Der Nachweis von blauen Sporen verlief an Quelle Ju 3 negativ.

Auf Grund des ersten Auftretens der grünen Sporen läßt sich eine maximale Fließgeschwindigkeit von 400–500 m/h errechnen. Da in Schwinde 221 nur ein Markierungsstoff eingegeben wurde, fehlt leider ein Vergleich mit der Durchgangszeit eines anderen Tracers.

In Quelle Ju 4 oben (Areuse-Quelle, Austritt Seite La Brévine) konnten die ersten grünen Sporen vom Lac des Tailières in der Probe, die am 30. Mai um 15.30 Uhr entnommen wurde, nachgewiesen werden. Bis zum 27. August waren durchwegs alle Proben von Ju 4 oben positiv, jedoch war die Anzahl der gefundenen Sporen nie höher als 5. Bei der Station Ju 4 unten (Areuse-Quelle, Seite La Brévine, Pumpenhaus) traten ebenfalls die ersten blauen Sporen am 30. Mai auf. Zum Unterschied von Ju 4 oben konnten in den ersten beiden Proben von Ju 4 unten vom 30. und 31. Mai 119 bzw. 138 Sporen nachgewiesen werden. Die Anzahl der Sporen nahm am 2. und 3. Juni von 20 auf 11 ab, weitere Sporenauswertungen waren bis zum 10. September negativ, jedoch bewegte sich die Anzahl der gefundenen Sporen zwischen 1 und 10 Stück.

Die Ergebnisse der Sporennachforschung von Ju 5 oben (Areuse-Quelle, Seite Les Verrières) verliefen zur Gänze negativ, hingegen waren die Proben von Ju 5 unten (Pumpenhaus) ab dem 29. Mai positiv (Nachweis von blauen Sporen). Da alle Proben von Ju 5 oben (Seite Les Verrières) negativ waren, ist anzunehmen, daß die Sporen von Ju 5 unten aus dem Einzugsgebiet von Ju 4 oben (Seite La Brévine) stammen, die durch die Schlauchleitung in das Pumpenhaus zur Station Ju 5 unten gelangten (Fig. 52).

Der positive Sporennachweis in Ju 5 unten (Pumpenhaus) könnte auf die Tatsache zurückzuführen sein, daß es bei größeren Schüttungswerten der Areuse-Quelle zu einer Durchmischung der Wässer beider Einzugsgebiete noch vor dem Austritt kommt. Stärkt wird diese Annahme dadurch, daß die Areuse-Quelle am 28. Mai einen Schüttungswert von etwa 8 m³/s erreichte, gegenüber einem Niedrigwasserstand von 2–3 m³/s (vergleiche Schüttungskurve der Areuse-Quelle, Fig. 52). Demnach dürfte aber auch der Quellaustritt Ju 5 oben vom Sporendurchgang betroffen sein, der negative Sporennachweis könnte demnach auf eine ungünstige Einhängelage des Sporenplanktonnetzes zurückzuführen sein. Die im weiteren Verlauf des Versuchs gefundenen blauen Sporen in Ju 5 unten dürften ebenfalls durch spätere Hochwasser vom 2. und 3. Juni ausgeschwemmt worden sein.

Tab. 23: Ergebnisse der Sporenrift.
Beobachtungsstelle: Ju 4 unten

Datum der Probenahme	Zeit	Sporenzahl blau	Sporenzahl grün	Aus- wertung
27. 5. 79	16.00 h	—	—	G
28. 5. 79	15.00 h	—	—	K
30. 5. 79	15.00 h	119	—	G
31. 5. 79	17.00 h	138	1	K
2. 6. 79	19.00 h	20	—	K
3. 6. 79	19.00 h	11	—	G
4. 6. 79	14.00 h	2	—	K
5. 6. 79	17.00 h	—	—	G
6. 6. 79	17.00 h	—	—	K
7. 6. 79	19.00 h	—	—	K
8. 6. 79	19.00 h	—	—	G
11. 6. 79	18.00 h	—	—	K
13. 6. 79	18.00 h	2	—	K
15. 6. 79	7.00 h	3	—	G
16. 6. 79	14.00 h	1	—	K
19. 6. 79	14.00 h	1	—	G
22. 6. 79	14.00 h	—	—	G
27. 6. 79	12.00 h	1	—	G
2. 7. 79	11.00 h	1	—	K
6. 7. 79	10.00 h	—	—	G
9. 7. 79	12.00 h	1	—	K
16. 7. 79	10.00 h	—	—	K
23. 7. 79	11.00 h	—	—	G
30. 7. 79	12.00 h	—	—	K
8. 8. 79	10.00 h	—	—	G
12. 8. 79	17.00 h	2	—	K
18. 8. 79	12.00 h	—	—	G
27. 8. 79	12.00 h	3	—	K
3. 9. 79	12.00 h	—	—	G
10. 9. 79	12.00 h	1	—	K

Tab. 24: Ergebnisse der Sporenrift.
Beobachtungsstelle: Ju 5 unten.

Datum der Probenahme	Zeit	Sporenzahl blau	Sporenzahl grün	Aus- wertung
27. 5. 79	15.00 h	1	—	G
28. 5. 79	17.00 h	13	—	K
30. 5. 79	17.00 h	19	—	G
31. 5. 79	19.00 h	7	—	K
1. 6. 79	19.00 h	9	—	G
2. 6. 79	14.00 h	—	—	K
3. 6. 79	14.00 h	1	—	G
4. 6. 79	17.00 h	1	—	K
5. 6. 79	17.00 h	—	—	G
6. 6. 79	19.00 h	1	—	K
7. 6. 79	19.00 h	—	—	G
9. 6. 79	19.00 h	—	—	K
11. 6. 79	19.00 h	—	—	G
13. 6. 79	7.00	—	—	K
15. 6. 79	14.00 h	—	—	G
16. 6. 79	14.00 h	—	—	K
19. 6. 79	14.00 h	—	—	G
22. 6. 79	12.00 h	—	—	K
27. 6. 79	11.00 h	—	—	G
2. 7. 79	11.00 h	—	—	K
6. 7. 79	10.00 h	—	—	G
9. 7. 79	10.00 h	—	—	K
16. 7. 79	12.00 h	nicht bearbeitet	—	K
16. 7. 79	12.00 h	—	—	G
23. 7. 79	12.00 h	—	—	K

3.5.2. Die Markierung mit Phytoplankton. (H. DOMBROWSKI)

Das Ergebnis der Markierung mit Phytoplankton beim Jura-Markierungs-Versuch ist in kurzen Worten wiederzugeben:

Die Einspeisung erfolgte am 26. Mai 79 zwischen 10.00 und 10.05 in der „Grotte chez le Brandt“. Entnahmestellen waren die Quellen 4 und 5 sowie 71, 72 und 73. In allen fünf Entnahmestellen trat das Phytoplankton wieder aus, und zwar am raschesten in Quelle 73; hier bereits 8 Stunden nach der Eingabe. In Quelle 71 erfolgte der Wiederaustritt nach 32 Stunden und 15 Minuten und in Quelle 72 nach 33 Stunden.

Bemerkenswert ist dieser Befund bei den Quellen 71, 72 und 73 insofern, als das gleichzeitig und am gleichen Ort eingespeiste Rhodamin B bei keiner Probenahme wieder zu ermitteln war. Diese Tatsache gibt Anlaß zu sehr vorsichtiger Bewertung der dargelegten Ergebnisse mit dem Phytoplankton. Es ist nicht auszuschließen, daß der „positive“ Befund durch Kontamination des Probennehmers zustande kam. Vor einer endgültigen Äußerung über die Quellen 71, 72 und 73 ist eine Wiederholung der Untersuchung angeraten.

Die Ergebnisse in den Quellen 4 und 5 zeigen ein verlässlicheres Bild. In Quelle 4 trat das Phytoplankton erstmals nach 6 Tagen und 8 Stunden wieder aus, und in Quelle 5 erst nach 18 Tagen und 9 Stunden. Auffallend bei Quelle 5 ist, daß der erste Wiederaustritt des Phytoplanktons am 13. Juni 79 erfolgte, nachdem am Tage zuvor, am 12. Juni 79 nachmittags, ein großer Gewitterregen niedergegangen war. Dieser Erstaustritt in Quelle 5 stimmt zeitlich überein mit den kleinen Zacken in den graphischen Darstellungen der Sulforhodamin- und Uranin-Versuche. Sie dürften ebenfalls durch die große Schüttung der Areuse infolge des Gewitters zustande gekommen sein. In den folgenden sechs Tagen sind die Proben aus Quelle 5 wieder frei von Phytoplankton, um am 20. Juni 79 mit massenhaftem Auftreten wieder in Erscheinung zu treten. Bei Beendigung der Probenahmen in den Quellen 4 und 5 am 21. Juni 79 waren die Proben noch positiv, d. h., der Durchgang des Markierungsmittels Phytoplankton war noch nicht beendet.

3.6. Zusammenfassung der Resultate des kombinierten

Markierungsversuchs (R. GOSPODARIĆ, I. MÜLLER, U. SCHOTTERER, U. SIEGENTHALER)

Die Durchführung des kombinierten Markierungsversuchs im Neuenburger Teil des verkarsteten Schweizer Juras glich im allgemeinen den anderen Versuchen in Karstgebieten, die im Rahmen der „Tagungen über Verfolgung der unterirdischen Wässer“ in Graz (1966), Freiburg (1970) und Bled (1976) durchgeführt wurden. In Einzelheiten hat sich jedoch der Markierungsversuch im Jura den spezifischen hydrogeologischen Verhältnissen und den technischen Bedingungen angepaßt.

Der Entwurf des Markierungsversuchs stützte sich auf die gut bekannte Hydrogeologie und Hydrologie des Einzugsgebietes der Areuse. Bei der Auswahl und Verteilung der Markierungsstoffe auf die einzelnen Ponore versuchte man, ungünstige Farbstoffmischungen im Quellwasser möglichst zu vermeiden. Weil die älteren Markierungsdaten und die darauffolgenden Fließgeschwindigkeiten zwischen den Schwinden und Quellen nicht zuverlässig waren, wurden die Tracer im allgemeinen nach der Entfernung der Ponore von der Hauptquelle Areuse verteilt. Dieser Plan mußte vor der Einspeisung aus lokalen Gründen etwas verändert werden. Der empfindlichste Farbstoff Uranin wurde in den naheliegendsten Ponor (zu der Areuse-Quelle), das unsichere Tinopal in den entferntesten Ponor eingespeist. Die Einspeisungsstelle für Eosin war mit dem Ponor am äußersten Rand des Einzugsgebiets wegen seiner hohen Nachweisgrenze (0,1 mg/l) ebenfalls nicht optimal gewählt. Die Befürchtungen, daß

war das Einzugsgebiet dieser großen, permanent fließenden Quelle nicht bekannt. Obwohl von ihr keine hydrometrischen Angaben vorliegen, verkleinert sich so das Einzugsgebiet der Areuse-Quelle um geschätzte 10%.

Das Durchschlagen des Tracers durch die undurchlässig geltenden Schichten der Argovien-Antiklinale ist ein weiteres herausragendes Ergebnis. A. BURGER (1959) hat allerdings eine gewisse Permeabilität, durch tektonische Störungen im Argovien, nicht ausgeschlossen. Möglicherweise ist auch das Eosin durch Verwerfungen dieser Formation in den darunterliegenden Dogger gelangt.

3.6.2. Fließgeschwindigkeiten des Karstwassers (vgl. Tab. 25)

Die Fließzeiten der Tracer von den Ponoren zu den Quellen wurden nach dem Maximum der Konzentration-Zeit-Kurve ermittelt. Die angegebenen Geschwindigkeiten sind nur als untere Grenze zu verstehen und sollten in erster Linie qualitative Unterscheidungen ermöglichen, da die angenommenen Entfernungen der Luftliniendistanz Ponor-Quelle entsprechen. Das Ponorwasser läßt sich so in drei Gruppen einteilen:

1. Westliches Ponorwasser (U, KCl, Rd, Phyto) mit Fließgeschwindigkeiten von 0,4 bis 1,2 cm/s,
2. zentrales Ponorwasser (NaCl, blaue Sporen, SR) mit Fließgeschwindigkeiten von 1,3 bis 3,1 cm/s und
3. östliches Ponorwasser (Tinopal, grüne Sporen, Eosin), wo die Verbindungen mit den Quellen nicht eindeutig bewiesen sind.

Von dem westlichen Ponor (Nr. 106) fließt das Wasser entlang dem Gefälle der Synklinale in Richtung La Brévine und vereinigt sich wahrscheinlich bei der Schwelle Bois de l'Halle mit den anderen Ponorwässern. Das relativ späte Auftreten des Rhodamins (2. Juni) und sein langanhaltender Nachweis in der Quelle (bis 20. Juni direkte Messungen, bis Dezember mit Aktivkohle) deuten auf einen langen Weg und unterstützen diese Annahme. Ob eine direkte Verbindung durch Klüfte nach Südosten zur Areuse-Quelle besteht, kann nicht ausgeschlossen werden.

Der Ponor von Les Verrières liegt ungefähr in der Mitte der Synklinale, und das dort versickernde Wasser folgt der Achse dieser Struktur direkt bis zur Areuse-Quelle. Die relativ kleine Fließgeschwindigkeit ist auf das geringe Gefälle zwischen Ponor und Quelle zurückzuführen.

Tab. 25: Fließgeschwindigkeiten (cm/s) der Tracer, berechnet nach dem Peak der Konzentration-Zeit-Kurve.

Ponore und Tracer	Les Verrières		Grotte 106		Lac des Tailières		La	Petit	Grand	Gigot Eo
	U	KCl	Rd	Phyto	NaCl	bS	SR	Ti	gS	
Quelle										
Nr. 1	+		+				+			
Nr. 2	+						+	+		1,2?
Nr. 3							+		6,9	+
Nr. 4	0,9	0,7	0,8	1,2	2,5	1,3	3,1		2,8?	
Nr. 5	0,9	0,7	0,8	0,4	2,3	1,4	2,9	4,0?		
Nr. 60	+							+		
Nr. 70	+						+		0,65?	
Nr. 71	+			+						
Nr. 72	+			+						
Nr. 73				+						
Nr. 81	±									

+ = Tracerspuren, nicht zuverlässig
? = unzuverlässige Fließgeschwindigkeiten

Die zentralen Schwinden Nr. 213 und 215 entwässern durch die gut durchlässigen unterirdischen Kanäle mit Fließgeschwindigkeiten von 1,3 bis 3,1 cm/s. Die Kanäle sind mehr oder weniger parallel zu der Schichtung im Südflügel der Synklinale La Brévine gerichtet. In der Gegend von Bois de l'Halle vereinigen sich wahrscheinlich die Wässer von Lac des Taillères und La Brévine, da ja östlich von dieser Gegend das als undurchlässig geltende Argovien höher liegt als die Ponore. Die Wasseradern sind durch Quer- und Längsverwerfungen zu der Quelle Areuse, ein kleiner Teil auch zur Quelle Pont La Roche (Nr. 3) gerichtet.

Die östlichen Ponore (Grand Cachot, Petit Cachot, Gigot) sind nicht einwandfrei mit den beobachteten Quellen verbunden, daher sind auch die berechneten Fließgeschwindigkeiten als fraglich zu betrachten. Die Eosinspuren haben sich mit 1,2 cm/s in der Quelle Ubena (Nr. 2) gezeigt, die grünen Sporen sind aber in Pont la Roche (Nr. 3) mit einer Fließgeschwindigkeit von rund 6,9 cm/s zum Vorschein gekommen. Es ist interessant zu erwähnen, daß auch eine ältere Färbung aus dem Jahre 1904 ein sehr schnelles Fließen (5,5 cm/s) von Petit Cachot zu der Areuse-Quelle gezeigt hat. So wie die älteren haben auch die neueren Markierungsversuche die östliche Einzugsgebietsgrenze nicht einwandfrei bestätigt.

3.6.3. Hydrogeologische Schlußfolgerungen

Die quantitative Auswertung der künstlichen Tracer läßt sich nur bedingt auf das gesamte Einzugsgebiet übertragen, da die beobachteten Fließwege nur ein Teilgebiet in einer bestimmten hydrologischen Situation erfassen (siehe auch Kapitel 4). Die Ergiebigkeit der Areuse-Quelle überschreitet bei weitem das ganze Ponorwasser, ihre mittlere Schüttung betrug beispielsweise während des Versuches ca. 5 m³/s, während durch die eingespeisten Ponore geschätzte 0,25 m³/s flossen.

Das Verhalten der Tracer erlaubt aufgrund der hydrologischen Versuchsbedingungen Interpretationen über einen Teil des Karstnetzes:

Der Vergleich der Sulforhodamin- und Uranin-Ergebnisse in den beiden Areuse-Quellaustritten (Nr. Ju 4, Nr. Ju 5) zeigt, daß die Austritte zu Recht nach den Teileinzugsgebieten benannt sind. Sulforhodamin wurde in La Brévine eingespeist, und seine Konzentration war in Nr. Ju 4 höher als im Austritt Nr. Ju 5, während Uranin, das in Les Verrières eingespeist wurde, in Nr. Ju 5 konzentrierter als in Nr. Ju 4 erschien. Die Unterschiede in den Beiträgen von den zwei Einspeisestellen sind in den beiden Austritten allerdings mit etwa 20% nicht sehr groß.

Integriert man die abgeflossenen Tracermengen (berechnet aus Konzentration mal Schüttung) bis einschließlich 4. Juni, so sind zu diesem Zeitpunkt 94% des eingespeisten Sulforhodamins und 95% des eingespeisten Uranins abgeflossen. Dabei würde vereinfachend angenommen, daß beide Austritte gleich viel zur gesamten Quellschüttung beitragen. Innerhalb von 10 Tagen nach der Einspeisung waren also beide Tracer fast vollständig zum Abfluß gelangt.

Interessant ist der Vergleich mit der Schüttung (vgl. Fig. 35). In der Periode von der Einspeisung bis zum Erscheinen der Farbstoffe war die Schüttung relativ niedrig. Am 2. Juni stieg die Schüttung an, und die Farbstoff-Konzentrationen fielen ab. Am 13. Juni stieg die Schüttung nach einem Gewitter stark (vgl. auch Kapitel 2. und 2.5.); zugleich erhöhte sich während eines halben Tages die Sulforhodamin-Konzentration, dagegen war Uranin von da an nicht mehr nachweisbar.

Es ist lehrreich, statt nur der Konzentration auch die Farbstoff-Abflußraten (Konzentration mal Quellschüttung) zu betrachten (Fig. 54, Summe für die ganze Areuse-Quelle). Zu Beginn des Schüttungsanstieges nimmt sie bei beiden Farbstoffen für kurze Zeit zu; offensichtlich wurde in dieser Phase markiertes Wasser durch die

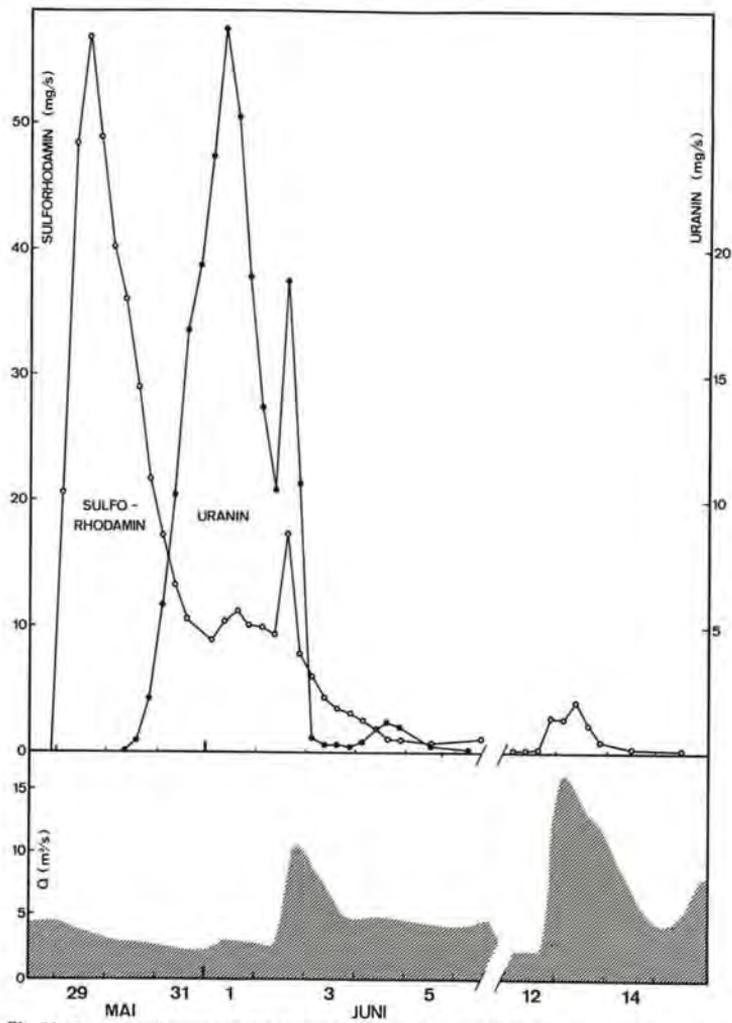


Fig. 54: Tracerabflüßmengen in der Areuse-Quelle im Mai-Juni 1979, berechnet aus Konzentration mal Schüttung, wobei die mittlere Areuse-Konzentration aus den Anteilen $^{2/3}$ Konzentration Seite La Brévine + $^{1/3}$ Konzentration Seite Les Verrières berechnet wurde. Schraffiert = Schüttung der Areuse-Quelle, volle Punkte = Probennahme von Uranin, Ringsignatur = Probennahme von Sulforhodamin.

Druckzunahme aus den Fließwegen hydraulisch herausgedrückt. Während eines Tages floß danach praktisch kein Uranin mehr ab, bis es am 4. Juni wieder erschien. Es handelt sich hier also nicht nur um eine Verdünnung, sondern das mit Uranin markierte Wasser wurde am Abfließen gehindert. Eine plausible (wenn auch nicht die einzig mögliche) Erklärung ergibt sich zwanglos aus der Modellvorstellung, daß der Aquifer aus einem Netz von gut durchlässigen Spalten und dazwischenliegenden wenig durchlässigen Blöcken besteht. Gemäß dieser Vorstellung wurde während des Hochwassers das markierte Wasser, das sich vorher entweder in Spalten oder schon in Blöcken befand, durch den herrschenden hohen Wasserspiegel in den Spalten in die Blöcke hineingepreßt und konnte erst nach dem Abfließen des Wassers aus den Spalten wieder aus den Blöcken ausfließen.

Die Sulforhodamin-Abflußrate nahm dagegen, abgesehen von der kurzen Erhöhung am 2. Juni, ziemlich gleichmäßig ab (Fig. 54). Die Konzentrationsabnahme entspricht also einer Verdünnung etwa im Verhältnis der Schüttungszunahme. Das in der Schwinde La Brévine markierte Wasser scheint also, vom Schüttungsanstieg kaum beeinflusst, weiterhin abzufließen. Das unterschiedliche Verhalten der beiden Fließwege könnte durch die tektonischen Verhältnisse bedingt sein. Andererseits mag auch der Umstand eine Rolle spielen, daß in La Brévine wesentlich weniger Regen fiel (10 mm) als in Les Verrières (28 mm), so daß der Wasserspiegelanstieg in den von La Brévine herführenden Kanälen geringer war als in jenen von Les Verrières her.

Die Konzentrationsabnahme des Uranins am 12. Juni könnte schon durch reine Verdünnung erklärt werden, ist also nicht erstaunlich. Sehr interessant ist dagegen der Konzentrationsanstieg des Sulforhodamins am 13. Juni, der in beiden Austritten beobachtet wurde, und zwar von 0,09 mg/m³ (Seite Brévine) resp. 0,04 mg/m³ (Seite Verrières) auf Maximalwerte von ca. 0,3 mg/m³. Anscheinend war markiertes Wasser irgendwo gespeichert gewesen, von wo es nicht oder nur langsam abfließen konnte, und wurde nun mit dem Schüttungsanstieg herausgespült. Die am 13. Juni abfließende Menge Sulforhodamin betrug schätzungsweise 100 g, also immerhin 1% der eingespeisten Menge.

4. Gegenüberstellung der hydrogeologischen Resultate der natürlichen und künstlichen Tracer (L. KIRALY, I. MÜLLER, U. SCHOTTERER und U. SIEGENTHALER)

Die methodischen Resultate und Betrachtungen zu den verwendeten künstlichen Tracern sind in Abschnitt 3.3.4. zusammengefaßt. Hier soll nur noch auf den grundsätzlichen Unterschied hingewiesen werden, der zwischen den Isotopen des Wassermoleküls (²H, ³H, ¹⁸O) und den dem Wasser in gelöster oder suspensierter Form beigemischten Tracern besteht. Beide Arten können als natürliche Tracer (z. B. ³H, ¹⁴C, Chemismus) vorhanden sein oder als künstliche Tracer (z. B. Fluoreszenztracer, Sporen, ³H) eingesetzt werden. Die Isotope des Wassermoleküls machen dessen Weg im Aquifer mit und sind im allgemeinen keinen Konzentrationsänderungen außer durch Transport und Mischung ausgesetzt. Ausnahmen bilden der radioaktive Zerfall des Tritiums, der aber streng gesetzmäßig verläuft und korrigiert werden kann, sowie Sauerstoff-Isotopenaustausch mit dem Gestein, der jedoch nur bei sehr hohen Temperaturen auftritt. Beigemischte Tracer können durch Sorption, Auflösung, Fällung usw. beeinflusst werden. Ein Tracer für die Wasserbewegung soll natürlich möglichst wenig durch solche Vorgänge beeinflusst werden.

Mit Hilfe der natürlichen Isotope wurde für die Areuse-Quelle ein mittleres Wasseralter von rund einem Jahr ermittelt. Andererseits traten beim Markierversuch im

Mai/Juni 1979 innerhalb von 10 Tagen zwischen 90 und 100% der eingespeisten Mengen Sulforhodamin und Uranin in der Quelle aus. Wie lassen sich diese Aussagen, die auf den ersten Blick widersprüchlich scheinen, miteinander vereinbaren?

Zur weiteren Diskussion geht man mit Vorteil von der von vielen Autoren angenommenen Vorstellung aus (Fig. 11), daß im Karstaquifer große, wenig durchlässige Felsvolumen durch ein hierarchisch angeordnetes und stark durchlässiges Drainagenetz entwässert werden (H. SCHOELLER, 1967). Diese heterogene Struktur des Permeabilitätsfeldes bestimmt, daß auch die natürliche Speisung des Aquifers eine starke räumliche Heterogenität aufweist: ein Teil der Niederschläge wird diffus in die wenig durchlässigen Blöcke einsickern und nur langsam dem Karstnetz zufließen, ein anderer Teil wird, durch schnelle Drainage in der ungesättigten Zone oder aber schon an der Oberfläche, ziemlich rasch und direkt in die Karstgänge einfließen. Wenn man von dieser Vorstellung ausgeht, kann man deduktive Schlüsse ziehen, die meistens von den Beobachtungen bestätigt werden. So wird beispielsweise bei einer Markierung absichtlich Wasser markiert, das punktförmig in einen Kanal fließt. Der Gesamtabfluß der Karstquelle besteht nur zum Teil aus solchem Netz-Wasser oder Direktabfluß, und die markierten Schwinden machen wiederum nur einen Teil aller vorhandenen Schwinden aus. Das gefärbte Quellwasser ist also nicht identisch mit dem in der Schwinde gefärbten, sondern zum Großteil anderes Wasser. Mit einem Markierungsversuch läßt sich nur ein Teilsystem untersuchen, und es wäre falsch, z. B. die raschen Durchflußzeiten auf das ganze System zu übertragen. Diese Einschränkung ist zwar selbstverständlich, aber sehr wichtig.

Die Isotope als natürliche Tracer gelangen mit dem Niederschlag in den Aquifer und markieren sowohl Netz- wie Blockwasser. Die in der Quelle beobachteten Isotopenkonzentrationen widerspiegeln also die hydrologischen Vorgänge im ganzen System. Ein mit Hilfe von Isotopenmessungen ermitteltes Wasseralter ist immer ein mittleres Alter; Quellwasser besteht im allgemeinen aus Komponenten ganz unterschiedlicher Verweilzeit. Falls z. B. eine Quelle 80% Reservoirwasser mit mittlerem Alter von einem Jahr und 20% frisches Niederschlagswasser führt, so beträgt das mittlere Alter 0,8 Jahre. Dabei ist das Wasseralter definiert als die Zeit vom Niederschlagsfall bis zur Probenahme.

Die aus einem Markierungsversuch bestimmte Fließzeit ist nicht identisch mit dem Wasseralter, weil das Bachwasser, das in der Schwinde markiert wird, schon vorgealtert sein kann. So ist das Wasser des Bied bei La Brévine, wie in Abschnitt 2.5.5. ausgeführt, in Trockenzeiten von der Größenordnung eines Jahres alt. Die Tracerfließzeiten von einigen Tagen und das mittlere Alter des Areusewassers von rund einem Jahr sind also ohne weiteres miteinander verträglich.

Im Karst sind die hydrologischen Bedingungen zeitlich sehr variabel. Aus diesem Grunde sind die Resultate eines Markierungsversuches nicht unbedingt für andere hydrologische Situationen repräsentativ. Das gilt ebenso für die Untersuchung von Abflußereignissen mit Hilfe von Isotopen oder Chemismus. Das wird durch oben erwähnte Fließzeiten für die Areuse illustriert: Die Fließzeit des Sulforhodamins (Zeit bis zum Konzentrationsmaximum) beim Markierungsversuch 1979 betrug rund 3 Tage, die Zeit bis zum Maximum des Direktabflusses am 12./13. Juni 1979, ermittelt mit Hilfe von ^{18}O , nur rund $1\frac{1}{2}$ Tage. Der Unterschied wird plausibel, wenn man berücksichtigt, daß am 12./13. Juni eine ausgeprägte Hochwassersituation herrschte, wo man größere Fließgeschwindigkeiten als bei Niedrigwasser erwarten muß.

Es ist anzunehmen, daß auch die beobachtete Tracerausbeute vom hydrodynamischen Zustand des Systems abhängt. Würde man eine Markierung kurz vor oder während eines Starkregens vornehmen, so würde gemäß der Karstnetz-Block-Vorstellung gefärbtes Wasser in Blöcke gepreßt und aus diesen zum Teil nur langsam wieder ab-

fließen. Ein solcher Versuch könnte Anhaltspunkte über die Aufenthaltsdauer in den Karstblöcken liefern.

Isotopenanalysen erlauben es, eine Abfluß-Komponententrennung in Frischwasser und altes Reservoirwasser vorzunehmen. Dabei ist unter Frischwasser rasch durchfließendes Niederschlagswasser zu verstehen, unter Reservoirwasser solches, das sich schon vor dem Regen (oder Schneeschmelze) im Aquifer befand. Die vorliegenden Resultate deuten darauf hin, daß eine solche Trennung über eine beschränkte Zeitspanne auch aufgrund von chemischen Analysen (Natrium, evtl. Magnesium) möglich ist; allerdings muß dies noch weiter untersucht werden. So hängen die verwendbaren Ionen von der Mineralzusammensetzung des Aquifers ab, sind also regional verschieden.

Für die Areuse wurde in Abschnitt 2.5.6. abgeschätzt, daß 80% des Jahresabflusses Reservoirwasser und 20% Frischwasser sind. Andererseits gab J.-P. TRUPET (1972, S. 126) an, daß vom Jahresabfluß rund $\frac{3}{4}$ via Karstnetz erfolgt und $\frac{1}{4}$ aus Blöcken stammt. Der Gegensatz zwischen den beiden Abschätzungen ist kein Widerspruch, sondern weist darauf hin, daß zwar rascher Abfluß von Frischwasser über die Kanäle des Karstnetzes erfolgt, aber Reservoirwasser nicht mit Blockwasser gleichgesetzt werden darf. Auch ein Teil des Karstnetzes, nämlich das in der gesättigten Zone liegende, dient als Reservoir, und ein Teil der Fließlinien reicht vermutlich tief unter das Ausfließniveau (Quell- resp. Schwellenhöhe) hinunter.

Bei einer Karstquelle sind mindestens vier verschiedene charakteristische Zeiten zu unterscheiden. Die **Ansprechzeit der Quellschüttung** auf einen Regen-Input ist durch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckwelle gegeben, also hydraulisch bestimmt. Sie beträgt für die Areuse-Quelle wenige Stunden. Die **Fließzeit des raschen Netz-Abflusses** ist durch die Fließgeschwindigkeit der Wassermoleküle gegeben und kann mit Hilfe von Tracern bestimmt werden. Nach der üblichen Definition des Mittelwertes ist die mittlere Fließzeit durch den Schwerpunkt der Tracer-Abflußkurve (Abflußrate in mg/s) – nicht etwa der Konzentrationskurve – gegeben. Oft wird jedoch die Zeitspanne von der Einspeisung bis zum Konzentrationsmaximum als Fließzeit angegeben. Damit werden automatisch nur die rasch fließenden Anteile berücksichtigt, nicht aber das sehr langsame Reservoirwasser. Es ist aber zu beachten, daß diese „Fließzeit“ im allgemeinen niedriger als die wahre mittlere Fließzeit des raschen Netz-Abflusses ist. Beim Markierversuch 1979 trat das Konzentrationsmaximum für Sulforhodamin (in La Brévine eingespeist) nach 3 Tagen auf, dagegen betrug die mittlere Fließzeit für den raschen Direktabfluß $4\frac{1}{2}$ Tage (berechnet für die innerhalb der ersten 10 Tage austretende Tracermenge).

Als **charakteristische Ausfließzeit** könnte man die Abfallzeit der angenähert exponentiellen Trockenwetter-Ganglinie der Quellschüttung bezeichnen; sie ist das Reziproke des Rezessionskoeffizienten. In einer „Ausfließzeit“ fällt die Quellschüttung auf den Bruchteil $1/e$ ab ($e = 2.718$ ist die Basis der natürlichen Logarithmen). Die charakteristische Ausfließzeit hängt ab von der räumlichen Verteilung von Transmissivität und Porosität, aber auch von der Verteilung des Potentials (oder Höhe des freien Wasserspiegels). Insofern als die Auslaufkurve wirklich exponentiell abfällt, ergibt sich das ausfließbare Wasservolumen (s. Abschnitt 2.5.6.) zu Ausfließzeit mal momentane Quellschüttung. J.-P. TRUPET (1972) bestimmte die charakteristische Ausfließzeit der Areuse-Quelle zu ca. 38 Tagen.

Das **mittlere Alter** (mittlere Verweilzeit) des Quellwassers ist die mittlere Fließzeit aller Komponenten, vom nur einige Tage alten Frischwasser bis zu beliebig altem Reservoirwasser. Künstliche Tracer eignen sich im allgemeinen nicht zur Ermittlung des mittleren Alters, da eine flächenmäßige Einspeisung, die der natürlichen Spei-

sung entspräche, kaum durchführbar ist. Zudem werden bei langen Fließzeiten die Tracerkonzentrationen infolge Verdünnung unmeßbar klein.

In Abschnitt 2.5. wurde das mittlere Alter des Reservoirwassers der Areuse zu 0,75 bis 2 Jahren bestimmt. Aus dem geschätzten Beitrag (20%) des Frischwassers zur Jahresschüttung ergibt sich das mittlere Alter des Gesamtabflusses zu 0,6 bis 1,6 Jahren.

Mit dem vorliegenden Bericht ist die Auswertung der Tracermessungen im Neuenburger Jura nicht abgeschlossen. Die weiteren Untersuchungen sollen die bisherigen globalen Ergebnisse über Reservoirgröße und -erneuerung verfeinern. Die Teilreservoirs sind noch nicht lokalisiert und nach Größe und Verweilzeit identifiziert. Die Abflußvorgänge werden noch zu wenig gut verstanden, insbesondere der Einfluß der Inputbedingungen, d. h. Menge und Intensität der Speisung, sowie des Zustandes des Aquifers, also der hydrologischen Vorgeschichte. Der kurzzeitige Anstieg von Ionenkonzentrationen und Tritiumgehalt („Pistoneffekt“), der oft zu Beginn des Schüttungsanstiegs bei einer Hochwasserspitze beobachtet wird und vermutlich auf herausgedrücktes altes Reservoirwasser zurückzuführen ist, verdient genauere Untersuchung. Nicht zuletzt soll vermehrt eine parallele Betrachtung der Schüttung (Hydrogramm-Analyse) und der Tracerdaten vorgenommen werden.

Literatur

- BAUER, F. (1967): Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, Jg. 1966/67, 169-178, Graz.
- BAUER, F. (1972): Weitere Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. Geolog. Jb. C2, 19-27, Hannover.
- BAUER, F. et al. (1976): Markierung unterirdischer Wässer - Untersuchungen in Slowenien 1972-1975. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 28, 7-257, Graz.
- BEHRENS, H. (1971): Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen bei ihrer Anwendung als hydrologische Markierstoffe. Geol. Bavarica, Z4, 120-131, München.
- BEHRENS, H. (1973): Eine verbesserte Nachweismethode für Fluoreszenzindikatoren und ihre Anwendung zur Feststellung von Fließwegen im Grundwasser, Z. Deutsch. Geol. Ges., 124, 535-544, Hannover.
- BEHRENS, H., ZUPAN, M., ZUPAN, M. (1976): Methodik und Ergebnisse der Direktmessung der Fluoreszenztracer. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 28, Graz.
- BERRALOFF, E. (1967): Limite de validité des formules courantes de tarissement de débit. Chronique d'Hydrogéol. 10, 31-41.
- BUB, F. P., HÖTZL, H., WISSER, K. (1979): Dünnschicht-chromatographischer Nachweis von Fluoreszenztracern bei hydrogeologischen Markierungsversuchen. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 31, 129-141, Graz.
- BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES (1968): Carte géologique de la France au 1:50'000, feuille XXXV-24, Morteau; avec notice explicative, 12 p. Service de la Carte géol. de la France, B. R. G. M., Orléans.
- BURGER, A. (1956): Interprétation mathématique de la courbe de décroissance du débit de l'Areuse (Jura neuch. Suisse). - Bull. Soc. neuch. Sci. nat., t. 79, 49-54.
- (1959): Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. - Thèse Univ. Neuchâtel, 304 p.
- BURGER, A. (1979): Recherche de critères pour la protection des eaux souterraines karstiques contre la pollution. Application au Jura suisse. Bull. Centre d'Hydrogéol. 3, 115-154.
- BURGER, A., MARCE, A., MATHIEY, B. & OLIVE, P. (1972): Tritium et oxygène-18 dans le bassin de l'Areuse et de la Serrière. - Actes du 1er Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaires, 79-87, Besançon.
- BUXTORF, A. & CHRIST, P. (1944): Carte géologique générale de la Suisse au 1:200'000, feuille 1, Neuchâtel; avec notice explicative, 27 p. Comm. géol. S. H. S. N.
- CHOW, Ven Te (Herausgeber) (1964): Handbook of applied hydrology. - McGraw-Hill, New York/usw.
- COUTAGNE, A. (1948): Les variations de débit en période non influencée par les précipitations. - La Houille Blanche, 3/5, 416-436.
- CROUZET, E., HUBERT, P., OLIVE, P., SIEWERTZ, E. & MARCE, A. (1970): Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. - J. of Hydrology, 11, 217-229.

- FAVRE, J. (1911): Description géologique des environs du Locle et de la Chaux-de-Fonds. – *Ecol. geol. Helv.* vol. 11, 369–475 (avec carte géol. au 1:25'000).
- FORKASIEWICZ, J. & PALOC, H. (1967): Le régime de tarissement de la Foux de la Vis. *Chronique d'Hydrogéol.* 10, 59–73.
- GIGON, R. (1957): Inventaire des principales dolines et pertes du synclinal de La Brévine (Jura neuchâtelois). – Rapport inédit. Bibliothèque de la Soc. Suisse de Spéléologie.
- (1976): Inventaire spéléologique de la Suisse, t. I, Canton de Neuchâtel. – *Comm. Spéol. S. H. S. N.*, Neuchâtel, 224 p.
- JAMIER, D. & MATHEY, B. (1977): Fissuration et orientation des dépressions karstiques (Jura neuchâtelois). – *Extr. Bull. Soc. neuch. Sci. nat.*, 100 p.
- KIRALY, L. (1973): Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. – *Suppl. Bull. Soc. neuch. Sci. nat.*, t. 96, 16 p.
- KIRALY, L. & MOREL, G. (1976a): Etude de la régularisation de l'Areuse par modèle mathématique. – *Bull. Centre d'Hydrogéol. Neuchâtel*, 1, 19–36.
- KIRALY, L. & MOREL, G. (1976b): Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulé par modèles mathématiques. – *Bull. Centre d'Hydrogéol. Neuchâtel*, 1, 37–60.
- KIRALY, L. & MÜLLER, I. (1979): Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst: effet sur la variation du chimisme des sources karstiques. – *Bull. Centre d'Hydrogéol. Neuchâtel*, 3, 237–285.
- KIRALY, L. & SIMEONI, G. (1971): Structure géologique et orientation des cavités karstiques: la Grotte de „Chez le Brandt" (Jura neuch.). – *Bull. Soc. neuch., Sci. nat.*, t. 94, 91–97.
- KOENIG, M. A. (1967): *Kleine Geologie der Schweiz*. Ott Verlag, Thun.
- LINIGER, H. (1953): Zur Geschichte und Geomorphologie des Nordschweizerischen Juraebirges. *Geograph. helv.*, 8, Bern.
- LLOYD, A. J. (1958 a): Lever géologique sur plan d'ensemble du Canton de Neuchâtel au 1:50'000, feuilles 851, 852, 853, 854. – Institut de Géologie, Neuchâtel, non publié.
- (1958 b): Geology of the region between Le Locle and Les Ponts-de-Martel. – Institut de Géologie, Neuchâtel, non publié, 43 p. (avec carte géol. au 1:25'000).
- (1964): Cover folding in the Sonmartel chain (Jura neuchâtelois). – *Geol. Rundschau* 53/2, 551–580 (avec carte géol. au 1:11'500).
- LOTZE, F. (1971): *Geologie Mitteleuropas*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- MANGIN, A. (1970): Méthode d'analyse des courbes de décharge et tarissement dans les aquifères karstiques. – *C. R. Acad. Sc. Paris*, 270, 1295–1297.
- MISEREZ, J. J. (1973): Géochimie des eaux du karst jurassien. – Thèse Univ. Neuchâtel.
- MOSEER, H. (1972): Verwendung des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehaltes bei hydrologischen Untersuchungen. – *Gas-Wasser-Abwasser* 52, 329–334 (Luzern).
- MUHLETHALER, C. (1930): Atlas géologique de la Suisse au 1:25'000, No 2, feuilles 276 La Chaux – 277 Les Verrières; avec notice explicative, 6 p. – *Comm. géol. S. H. S. N.*
- MÜLLER, I. (1976): L'importance d'un dispositif, in situ et en continu, pour l'observation des paramètres physiques et chimiques dans les sources karstiques. – Deuxième Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaires. *Ann. Sci. Univ. Besançon fasc. 25, 3e sér.*, 317–320.
- (1978): La variabilité des caractéristiques physico-chimiques des eaux dans la zone d'infiltration du karst jurassien et préalpin. – *Actes 6e Congrès nat. suisse spéléol.* Porrentruy, 131–137.
- (1980): Quelques aspects de la pollution bactériologique et chimique des sources karstiques du Jura neuchâtelois. – *Actes Colloque nat. pour la protection des eaux souterraines en pays calcaires*, Besançon (im Druck).
- OESCHGER, H. & SIEGENTHALER, U. (1972): Umgebungsisotope im Dienste der Hydrologie. – *GW-F-Wasser/Abwasser* 113, 501–508.
- PEBLEGA, W. (1976): Der Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen mittels Aktivkohle. *Papers* 3. SUWT, 195–201, Ljubljana.
- POCHON, M. & SIMEONI, J.-P. (1976): Nature et rôle traceur des troubles argileux dans deux sources karstiques (Jura tabulaire suisse) – *Ann. Scient. Univ. Besançon*, 25, 321–339 (2e Coll. d'Hydrologie en Pays Calcaires).
- FRANZ, L. (1965): *Strömungslehre*, 6. Auflage. – Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- RICKENBACH, E. (1925): Description géologique du Val-de-Travers entre Fleurier et Travers, du Cirque de Saint-Sulpice et de la vallée de la Brévine. – *Bull. Soc. neuch. Sci. nat.* 50, 1–76 (avec carte géol. au 1:25'000, 1 carte tectonique au 1:25'000, et une série de profils géol.).
- ROCHAT, J., ALARY, J., MOLINARI, J., CHARRIERE, R. (1975): Séparations physico-chimiques de colorants xanténiques utilisés comme traceurs. *J. Hydrology*, 26, 277–293, Amsterdam.
- ROLLIER, L. & FAVRE, J. (1910): Carte géologique des environs du Locle et de la Chaux-de-Fonds, éch. 1:25'000. – *Matér. Carte géol. Suisse, carte sp. no 59*, *Comm. géol. S. H. S. N.*

- SCHARDT, H. (1904): Origine de la source de l'Areuse (La Doux). - *Mél. géol.*, 5e fasc. Bull. Soc. neuch. Sci. nat. 32, 118-139.
- CHOLLER, H. (1967): Hydrodynamique dans le karst (écoulement et enmagasinement). - *Chronique d'hydrogéologie*, B. R. G. M. no 10, 7-21.
- CHOTTERER, U., WILBERGER, A., SIEGENTHALER, U., NABHOLZ, W. & OESCHGER, H. (1979): Isotope study in the alpine karst region of Rawil, Switzerland. *Isotope Hydrology 1978*, vol. I, International Atomic Energy Agency, 351-366, Vienna.
- CHOTTERER, U. (1980): Tritium- und ^{18}O -Variationen einiger Quellen im Schweizer Jura. - *Eclogae geol. Helv.* (Im Druck).
- SIEGENTHALER, U. (1972): Bestimmung der Verweildauer von Grundwasser im Boden und radioaktive Umweltsotopen (^{14}C , Tritium). - *Gas-Wasser-Abwasser* 52, 283-290 (Luzern).
- TRIFET, J.-P. (1972): Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). - Thèse Univ. Neuchâtel.

Résumé

INVESTIGATIONS HYDROLOGIQUES DU KARST NEUCHATELOIS A L'AIDE DE TRACEURS NATURELS ET ARTIFICIELS (JURA SUISSE)

Le 4e Symposium International sur l'utilisation des méthodes de traçage en hydrologie (SUWT) a choisi le karst du Jura neuchâtelois pour y effectuer en 1979 un multitraçage des eaux souterraines. Le choix était motivé par le fait que la région, et particulièrement le bassin de la source de l'Areuse, avaient déjà fait l'objet de nombreuses études (BURGER 1956, 1959; KIRALY 1973, 1976a, 1978b; TRIFET 1972; MISEREZ 1973). De plus, dans le cadre du Programme National sur le Cycle de l'Eau, financé par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique, une étude très approfondie y était entreprise dès 1977 par le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, par l'Institut de Physique de l'Université de Berne et par l'Institut de Géologie de l'Université de Fribourg. Etude des caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères karstiques par leurs réponses naturelles et provoquées. Grâce à ce projet de recherche, les travaux du 4e SUWT ont bénéficié d'un système d'observation et d'échantillonnage moderne et sophistiqué. Ils ont, par contre, avantageusement complété les résultats du Projet national. Cette collaboration pluridisciplinaire et internationale a permis d'étudier d'une manière très détaillée le comportement des traceurs naturels et artificiels dans le karst jurassien.

En guise d'introduction, le karst du Jura neuchâtelois est présenté sommairement dans le premier chapitre. Une carte simplifiée, géologique et hydrogéologique (TRIFET 1972) illustre la région du bassin de la source de l'Areuse et en partie celle de la Noiraigue (cf. fig. 1). Les traits essentiels de la stratigraphie sont récapitulés par la figure 2. Il s'agit d'épaisses séries de calcaires, marnocalcaires et marnes du Jurassique et du Crétacé. Deux synclinaux, celui de la Brévine et celui des Verrières, constituent le bassin versant de la source de l'Areuse. Des coupes géologiques (TRIFET 1972) illustrent (fig. 3) l'allure des synclinaux et anticlinaux à travers ce bassin.

La géomorphologie à l'échelle de la chaîne est caractérisée par un relief conforme. Les phénomènes karstiques (lapiez, dolines, bassins fermés, cavités) sont développés. La figure 4 illustre les plus importantes pertes et dolines dans le synclinal de la Brévine.

Les traits les plus importants de l'hydrologie et de l'hydrogéologie sont présentés d'après les travaux de TRIFET (1972). Le bassin de la source de l'Areuse, d'une altitude moyenne de 1115 m, s'étend sur 127 km². Le débit moyen annuel (1959-1969) de la source est de 4,7 m³/s. La porosité efficace est estimée à 4,5% et la perméabilité mesurée dans les forages est de l'ordre de 10⁻⁶ à 10⁻⁷ m/s. Les études par modèles électriques (TRIFET 1972) et par modèles mathématiques (KIRALY & MOREL 1976) ont permis de mettre en évidence un effet d'échelle très important sur la perméabilité dans le bassin de l'Areuse (KIRALY 1973, 1975), cet effet étant dû à l'existence d'un réseau karstique connexe et de faible densité drainant des blocs peu perméables, mais de volumes très importants. La simulation de quelques crues isolées de l'Areuse montre, d'autre part, qu'une partie importante de la recharge doit arriver directement, avec très peu de retard, dans le réseau karstique, soit à la suite d'un drainage rapide dans la zone non-saturée, soit à cause de l'existence de pertes concentrées des eaux superficielles (dolines, empoiseaux, etc.)

Le chimisme des eaux karstiques du Jura a été étudié par MISEREZ (1973).

Les résultats des essais de traçage du début du siècle (SCHARDT 1904) sont récapitulés d'après BURGER (1959).

Quelques résultats des recherches effectuées dans le cadre du Programme National sont présentés dans le deuxième chapitre. Le chimisme et les isotopes de l'eau, ainsi que la charge en bactéries y sont examinés en tant que traceurs naturels.

Le dispositif d'observation du karst neuchâtelois est illustré par la figure 5. Plusieurs stations de mesures automatiques fournissent des renseignements détaillés (enregistrement en continu de la température, de la conductibilité électrique et de l'activité de l'ion Na^+ , et échantillonnage automatique à quatre heures d'intervalle) sur chaque niveau du karst: zone dénoyée, zone noyée et exutoires.

Les conditions météorologiques et hydrologiques pendant la période d'observation sont résumées dans les figures 8, 9 et 10. La figure 11 illustre l'image schématique du karst et de son fonctionnement. L'hétérogénéité de l'alimentation et de la perméabilité est discutée en fonction de l'hydrogramme de la source de l'Areuse (cf. fig. 9 et 10), et du comportement des traceurs chimiques (cf. fig. 12-15). En comparaison avec les isotopes (chapitre 2.5.), ce sont le sodium et peut-être encore le magnésium qui sont les meilleurs traceurs hydrodynamiques; ils renseignent de façon quantitative sur la dilution due à l'eau arrivant rapidement dans le réseau. Quelques exemples concrets sont exposés (cf. fig. 17 à 24).

L'âge moyen des eaux et leur renouvellement sont discutés sur la base des analyses de tritium et d'oxygène 18.

Les teneurs isotopiques des précipitations sont présentées dans la figure 25. Celles des grandes sources examinées sont résumées dans les tableaux 3 et 4.

La variabilité des isotopes dans les sources par rapport à celle des précipitations est très atténuée, non seulement à long terme, mais également pour chaque événement pris isolément. A partir de différents types d'approches mathématiques et d'hypothèses sur le milieu (OESCHGER & SIEGENTHALER 1972; SCHOTTERER 1980; SIEGENTHALER 1972), l'âge moyen de l'eau dans le bassin de l'Areuse est estimé entre neuf mois et deux ans. Le «Bied», petit cours d'eau superficiel qui alimente une perte importante à la Brévine, draine des eaux à peu près du même âge (cf. fig. 27).

Les analyses isotopiques lors des crues ont permis d'estimer le pourcentage d'eau «jeune» qui participe à l'écoulement des sources karstiques (cf. fig. 29, 30, 31, 32). Pour les sources de l'Areuse et de l'Ubena, cette fraction n'est que de 20%-40%. La plus grande partie du débit est donc fournie par de l'eau «agée», mais cette proportion d'eau «agée» ne devrait pas être assimilée au «flot de base» fourni par les blocs peu perméables pendant la crue. Les effets de dilution, calculés à partir des concentrations de l'ion sodium, permettent d'établir les mêmes proportions de mélanges. Les analyses isotopiques ont mis en évidence que d'importantes réserves d'eau se trouvent dans les parties très perméables du karst.

Les analyses bactériologiques montrent que les qualités bactériologiques sont meilleures en période de basses eaux qu'en période de hautes eaux (cf. tab. 5, 6, 7). En effet, l'eau fraîchement infiltrée véhicule des charges bactériologiques considérables, qui gagnent rapidement les exutoires. Les microorganismes, indicateurs de pollution fécale, sont des traceurs naturels qui renseignent sur les connexions du réseau karstique vers la surface.

Le multitraçage du 4e Symposium International sur l'utilisation des méthodes de traçage en hydrologie est présenté dans le chapitre 3.

Les pertes, où les différents traceurs ont été injectés, et l'emplacement des sources surveillées sont indiqués sur la figure 34.

La nature et la quantité des différents traceurs injectés le 26 mai 1979 sont résumées sur le tableau 8. Les conditions météorologiques et hydrologiques, ainsi que l'évolution des paramètres physico-chimiques des eaux pendant la période du traçage, sont illustrés par les figures 35 à 39.

La figure 40 représente les courbes de restitution des traceurs mesurés par fluorométrie. Les renseignements sur la nature et la quantité des substances injectées, ainsi que les conditions d'injection, sont résumés au tableau 10. Le nombre d'échantillons analysés et les modalités des analyses sont indiqués aux tableaux 11 et 12. La restitution des différents traceurs, détectés par la fluorométrie à la source de l'Areuse (Nr. 4 et 5), est donnée au tableau 13.

L'Uranine, l'Amidorhodamine (= Sulphorhodamine) et la Rhodamine B ont été détectées à la source de l'Areuse. L'Eosine FB n'a pas été retrouvée dans les sources surveillées. Le Tinopal, en raison de la pollution anthropogène des sources karstiques, n'était pas détectable de façon interprétable (cf. fig. 43).

La détection des traceurs fluorescents par la chromatographie est une acquisition récente de la recherche (BUS, HÖTZL & WISSER, 1979), surtout utile pour la séparation des traceurs arrivés simultanément à l'exutoire. La technologie est présentée ici; sa sensibilité est comparée à celle de la fluorométrie directe (cf. tab. 17). Les résultats (cf. tab. 18) des analyses chromatographiques à la source de l'Areuse sont ensuite confrontés avec ceux de la fluorométrie. Cette nouvelle méthode de dosage offre de grandes possibilités quant à l'identification, la séparation et le dosage des substances. La détection des traceurs fluorescents par extraction et leur dosage à partir de leur piégeage par du charbon actif, ont fourni des renseignements importants. La technologie de l'extraction est présentée et la sensibilité du dosage est précisée. La figure 45 et le tableau 19

présentent les principaux résultats de la récupération des traceurs fluorescents avec cette technique dite du «charbon actif».

La liaison entre l'emposteu de la Brévine et la source du Pont-la-Roche n'a pu être établie avec certitude que sur la base des observations avec le charbon actif.

Le résumé et la discussion des résultats obtenus par les différentes méthodes de détection clôt le chapitre 3.3. sur les traceurs: fluorescents. Le tableau 20 donne un aperçu synthétique des résultats en fonction des méthodes de dosage et selon la nature des traceurs.

Le comportement des sels dissous (NaCl et KCl), leur injection et leurs dosages, sont exposés dans le chapitre 3.4. La restitution du sodium à la source de l'Areuse a été contrôlée à la fois par des analyses au laboratoire et par l'enregistrement en continu à l'aide d'une électrode ionique spécifique (cf. fig. 46-49). La totalité de la quantité de sodium injectée est pratiquement restituée. Tel ne semble pas être le cas pour le potassium, dont la variabilité naturelle dans la source empêche l'estimation quantitative de la restitution (cf. fig. 50).

Les résultats obtenus à partir de la récupération des particules en suspension sont représentés au chapitre 3.5.

Les spores de Lycopodium, artificiellement colorées (en bleu et en vert) et injectées dans les pertes, ont été récupérées par des filets appropriés. Les tableaux 21 à 24 donnent les résultats de ces investigations. La figure 51 les situe en fonction de l'hydrogramme de la source de l'Areuse. Une carte (cf. fig. 52) permet de suivre l'itinéraire schématique des spores depuis les lieux d'injection jusqu'aux exutoires.

Le «phytoplancton» (microorganismes) injecté à la Grotte de «Chez-le-Brandt», a gagné la source de l'Areuse (Nr. 4 et 5) avec des fluctuations analogues à celles de la Rhodamine B qui lui était associée. Sa présence dans les petites sources au NW de la grotte n'est pas interprétable.

Les résultats du multitraçage du 4e SUWT dans le Jura neuchâtelais sont représentés schématiquement sur la figure 53.

Le Tinopal, injecté dans la perte du Petit Cachot (Nr. 219) et l'Eosine, dans la perte de Gigot, n'ont pas pu être identifiés dans les eaux karstiques surveillées jusqu'en octobre 1980.

Le multitraçage met en évidence que les limites hydrogéologiques du bassin versant de la source de l'Areuse sont à modifier. Les marnes argoviennes ne sont pas toujours et partout imperméables. Les spores venant de la perte du Grand Cachot les ont traversées.

Les vitesses de propagation des traceurs sont données sur le tableau 25.

La restitution de l'Uranine et de la Sulphorhodamine était pratiquement complète dix jours après leur injection (cf. fig. 54). L'orage du 12 juin avait produit un effet «piston» dans la restitution de la Sulphorhodamine. Cet effet, semblable à celui des traceurs naturels, est interprété comme la remobilisation du traceur accumulé dans les parties perméables du karst.

La comparaison, d'un point de vue hydrogéologique, entre les traceurs naturels (isotopes et chimie) et les traceurs artificiels est abordée au chapitre 4. L'accent est mis sur le fait que les traceurs naturels renseignent sur la totalité des phénomènes qui régissent l'écoulement dans le karst, tandis que les traceurs artificiels n'explorent que la partie très perméable du réservoir: le réseau karstique. Leur utilisation apporte toutefois des compléments importants dans l'investigation hydrogéologique du réservoir calcaire.

Les traceurs naturels renseignent sur les proportions des mélanges entre des eaux de différentes provenances et d'âges différents. Le comportement de ces traceurs permet, simultanément avec l'analyse de l'hydrogramme, de mettre en évidence l'hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst. A l'aide des isotopes (tritium et oxygène 18), les taux de recharge et le temps de séjour moyen peuvent être calculés.

Les traceurs artificiels, par contre, permettent de préciser les limites des bassins versants, et de calculer les vitesses de transfert dans le réseau à différentes situations hydrodynamiques. A l'exutoire, on peut donc enregistrer différents temps de réaction du système karstique en fonction de l'alimentation:

- temps de réponse (temps entre le début des précipitations et l'augmentation du débit),
- temps de transfert rapide à travers les connexions du réseau (temps déterminable avec les traceurs artificiels),
- temps de vidange (vidange, en période d'étiage, des «blocs» peu perméables; c'est le temps pendant lequel le débit diminue par $1/e$, $e = 2,718$, c'est-à-dire la base du logarithme naturel),
- temps de séjour moyen de l'eau dans le réservoir (l'âge moyen de l'eau).

Danksagung

Folgenden Personen und Institutionen, die durch ihre Unterstützung die vorliegende Arbeit ermöglichten, sind wir zu Dank verpflichtet:

Prof. A. Burger und Prof. H. Oeschger für wertvolle Anregungen;

Dr. R. Stettler für die bakteriologischen Untersuchungen;
 R. Gigon für unpubliziertes Material über die Schwinden;
 P. L. Haesler für die graphische Zerlegung der Schüttungskurven;
 R. Wiedmer-Bühler, J. Rincon und K. Hänni für die Laboruntersuchungen und die Probenorganisation;
 F. Mauroux und G. Papaux für die Schreivarbeiten und Zeichnungen;
 Der Geochemischen Abteilung des Geologischen Instituts der Universität Neuenburg für chemische Analysen.
 G. Choffet, L. Mathey, die Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung (C. Binggeli und K. Stauffer), die Gemeinden von St. Sulpice, Les Verrières und La Brévine und das Bundesamt für Umweltschutz, Abt. Landeshydrologie, haben das Projekt durch technische und logistische Hilfe unterstützt.
 Die Arbeiten wurden durch den Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaften im Rahmen des Nationalen Programms „Wasserhaushalt der Schweiz“ ermöglicht.

Verzeichnis der Autoren und Mitarbeiter

- W. Hofrat Dr. F. BAUER, Bundesanstalt für Wasserhaushalt von Karstgebieten, Herrngasse 8, A-1010 Wien 1.
 R. BENISCHKE, Forschungszentrum Graz, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz.
 F. P. BUB, Gerwigstraße 25, D-7500 Karlsruhe.
 Prof. Dr. A. BURGER, Directeur du Centre d'Hydrogéologie, Université Neuchâtel 11, rue Emil Argand, CH-2000 Neuchâtel.
 Dr. H. DOMBROWSKI, Dreikönigstraße 17, D-7800 Freiburg i. Br.
 Dr. R. GOSPODARIĆ, Institut za raziskovanje kraska SAZU, Titov trg 2, YU-66230 Postojna and, CH-2000 Neuchâtel.
 Prof. Dr. H. HÖTZL, Institut für Geologie, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-7500 Karlsruhe.
 Prof. F. HRIBAR, Zveza Vodnih Skupnosti Slovenije Hidroloska služba, Vojskova 1/a, YU-61109 Ljubljana.
 Dr. W. KÄSS, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Albertstraße 5, D-7800 Freiburg i. Br.
 Dr. L. KIRALY, Centre d'Hydrogéologie, Université Neuchâtel 11, rue Emil Argand, CH-2000 Neuchâtel.
 Dr. Ch. LEIBUNDGUT, Geographisches Institut Uni Bern, Abt. Gewässerkunde, Hallerstraße 12, CH-3012 Bern.
 Dr. H. P. LEDITZKY, Forschungszentrum Graz, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz.
 Prof. Dr. V. MAURIN, Institut für Geologie, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-7500 Karlsruhe.
 Dr. I. MÜLLER, Centre d'Hydrogéologie, Université Neuchâtel 11, rue Emil Argand, CH-2000 Neuchâtel, und Institut de Géologie, Université Fribourg (Suisse).
 H. PERLEGA, Bundesanstalt für Wasserhaushalt von Karstgebieten, Herrngasse 8, A-1010 Wien 1.
 Dr. P. RAMSPACHER, Forschungszentrum Graz, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz.
 U. SCHOTTERER, Physikalisches Institut der Universität Bern, Sidlerstraße 5, CH-3012 Bern.
 Dr. U. SIEGENTHALER, Physikalisches Institut der Universität Bern, Sidlerstraße 5, CH-3012 Bern.
 Dr. H. ZOJER, Forschungszentrum Graz, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz.
 Prof. Dr. J. ZOTL, Abteilung für Hydrogeologie, Technische Universität Graz, Rechbauerstraße 12, A-8010 Graz.
 Martina ZUPAN, Zveza Vodnih Skupnosti Slovenije Hidroloska služba, Vojskova 1/a, YU-61109 Ljubljana.