

Hydrogeologische Untersuchungen im Karst des hinteren Muotatales (Schweiz)

Schriftleitung:

A. BÖGLI (Zürich) und T. HARUM (Graz)

Inhalt:

	Seite
Einleitung (A. BÖGLI)	128
1. Einführung in das Untersuchungsgebiet (A. BÖGLI)	129
1.1. Lage und Begrenzung	129
1.2. Geologische Verhältnisse	130
1.2.1. Stratigraphie und Hydrogeologie	130
1.2.2. Tektonik	133
1.3. Geomorphologie	135
1.4. Klima	137
2. Bisherige hydrographische Untersuchungen (A. BÖGLI)	138
2.1. Ober- und unterirdische Entwässerung	138
2.2. Markierungsversuche bis 1977	140
2.2.1. Das Hölloch-System	140
2.2.2. Glattalp und Charetalp	142
3. Vorarbeiten und Langzeituntersuchungen 1978 bis 1979	146
3.1. Abflußdaten (A. BÖGLI)	146
3.1.1. Die Limnigraphen	146
3.1.2. Beziehung von Niederschlag und Abfluß	148
3.2. Physikalisch-chemische Langzeituntersuchungen (A. BÖGLI)	150
3.3. Ergebnisse von Messungen des Gehalts an Deuterium, Sauerstoff-18 und Tritium in Wasserproben (H. MOSER, W. STICHLER, D. RANK, V. RAJ- NER)	155
3.3.1. Einleitung	155
3.3.2. Grundsätzliches zur hydrologischen Interpretation von ^2H -, ^3H - und ^{18}O -Gehalten im Grund- und Oberflächenwasser	155
3.3.3. Ergebnisse der Übersichtsbeprobungen (August, September, Oktober 1978)	156
3.3.3.1. Gebiet Balm – Fugglen	156
3.3.3.2. Gebiet oberhalb Zwingsbrügg	158
3.3.3.3. Gebiet Seeberg	158
3.3.3.4. Höher liegende Teile des Untersuchungsgebietes	160
3.3.4. Ergebnisse der halbmonatlichen Beprobungen im Jahr 1979	162
3.3.4.1. Jahresmittelwerte der ^2H - und ^3H -Gehalte	162
3.3.4.2. Jahreszeitliche Schwankungen	164
3.3.4.3. Abschätzung von Verweilzeiten aus den Schwankungen der ^2H -Gehalte im Jahresgang, den mittleren ^3H -Gehalten und dem Abfall des ^3H -Gehalts während des Jahres 1979	167

3.3.4.4. Bestimmung der Anteile von direkt und verzögert abfließendem Wasser	169
3.3.4.5. Abschätzung des Anteils an direkt abfließendem Wasser am 30. 11. 1979 mit Hilfe der ³ H-Gehalte	170
3.3.5. Schlußbemerkung	171
3.4. Hydrogeologische Untersuchungen im Bereich des Wasserberges (H. HÖTZL, W. KRAUS, V. MAURIN)	171
3.4.1. Schichtaufbau und Lagerung	171
3.4.2. Tektonik	172
3.4.3. Hydrogeologische Verhältnisse	174
3.4.3.1. Verkarstung und Durchlässigkeit	174
3.4.3.2. Quellen	175
3.4.3.3. Hydrochemie	176
4. Kombiniertes Markierungsversuch 1979 bis 1980	185
4.1. Problemstellung und Zielsetzung (A. BÖGLI, H. HÖTZL, V. MAURIN)	185
4.2. Auswahl der Markierungsmittel (H. HÖTZL, V. MAURIN)	186
4.3. Eingabestellen und Einspeisungsbedingungen (A. BÖGLI)	188
4.3.1. Meteorologische und hydrologische Verhältnisse vor und während der Einspeisungen	188
4.3.2. Eingabestellen	188
4.4. Beobachtungsstellen und Probenahme	191
4.4.1. Die Quellen im Hürital (H. HÖTZL, V. MAURIN)	191
4.4.2. Die Quellen in Balm - Fugglen (A. BÖGLI)	192
4.4.3. Die Beprobungsstellen oberhalb der Zwingsbrücke (A. BÖGLI)	195
4.4.4. Die Beprobungsstellen im Seeberg (A. BÖGLI)	196
4.4.5. Die Probenahme (A. BÖGLI)	196
4.5. Methoden und Analysenergebnisse	198
4.5.1. Die Markierung mit Fluoreszenztracern, Nachweismethoden und Ergebnisse (H. BEHRENS, H. HÖTZL, V. MAURIN)	198
4.5.1.1. Spektralfluorimetrische Direktmessung	199
4.5.1.2. Aktivkohlemethode	199
4.5.1.3. Dünnschichtchromatographie	201
4.5.1.4. Markierung mit Uranin AP	201
4.5.1.5. Markierung mit Eosin FB	205
4.5.1.6. Markierung mit Rhodamin B	211
4.5.1.7. Markierung mit Amidorhodamin G extra	214
4.5.1.8. Markierung mit Tinopal ABP	220
4.5.2. Die Markierung mit Salzen	220
4.5.2.1. Lithiumchlorid (H. BEHRENS)	220
4.5.2.2. Natriumchlorid (A. BÖGLI, Ch. LEIBUNDGUT, H. ZOJER)	223
4.5.3. Die Markierung mit Detergentia (W. KÄSS)	225
4.5.4. Die Markierung mit Triftstoffen	225
4.5.4.1. Lycopodiumsporen (H. HÖTZL, V. MAURIN, H. ZOJER, J. G. ZÖTL)	225
4.5.4.2. Fluoreszierende Lycopodiumsporen (W. KÄSS)	235
4.5.4.3. Phytoplankton	236
5. Zusammenfassende Wertung der Ergebnisse (A. BÖGLI, H. HÖTZL, V. MAURIN, H. MOSER)	236
5.1. Neue karsthydrologische Erkenntnisse	236

5.1.1. Aussagen aus den Ergebnissen des kombinierten Markierungsversuches	237
5.1.2. Aussagen aus den Ergebnissen der Isotopengehaltsmessungen	249
5.1.3. Allgemeine karsthydrologische Ergebnisse	250
5.2. Neue markierungstechnische Erkenntnisse	256
Zusammenfassung	259
Literatur	260
Summary	262
Résumé	263
Dank	264
Verzeichnis der Autoren und Mitarbeiter	264

Einleitung (A. BÖGLI)

Nach dem dritten internationalen Symposium über die Verfolgung unterirdischer Wässer SUWT (Symposium for Underground Water Tracing) in Ljubljana/Bled 1976 wurden drei schweizerische Landschaften als Forschungsobjekte für die nächste Fachtagung vorgesehen. Für die vorausgegangenen Symposien waren karsthydrogeologische Probleme aufgegriffen worden, nicht zuletzt, weil der schnelle Wasserdurchsatz verhältnismäßig frühzeitig Resultate zu liefern imstande ist und weil die weiten unterirdischen Wasserwege auch den Einsatz von Triftstoffen erlauben. Das ermöglicht aufschlußreiche Kombinationen von Tracern (Multitracing). Nach den Markierungsarbeiten an den Donauschwänden im Jura der Schwäbischen Alb und im Ursprungsgebiet der Ljubljana im klassischen Karst von Slowenien lag es nahe, sich andersgearteten Karstlandschaften zuzuwenden. Ausgewählt wurden der grüne Karst des Neuenburger Juras (Steir. Beitr. z. Hydrogeologie 32, 1980, S. 5 – 100) und der hochalpine Karst der schweizerischen Kalkalpen. Das hintere Muotatal (Kanton Schwyz) bot sich hier als besonders lohnendes Objekt an. Das obere Einzugsgebiet der Muota, bergwärts des Ortes Muotathal, ist ein aus mehreren Teildecken aufgebautes Karstgebirge mit einer lithologisch sehr differenzierten Geologie. Wegen der großen Ausdehnung wurden daraus zur intensiveren Bearbeitung das Höllochgebiet (Bödmeren-Twärenen) und der Wasserberg mit seinem Hinterland vorgesehen. Besonders vorteilhaft war das Vorliegen detaillierter morphologischer, geologischer und hydrographischer Untersuchungen (A. BÖGLI, 1953, 1960b, 1968a und b, 1970, 1973; R. HANTKE, 1961; W. HAUSWIRTH, 1913), die eine gute Ausgangslage boten. Dazu kommt das gut erforschte Hölloch (Arbeitsgemeinschaft Höllochforschung, AGH), das mit der vermessenen Länge von 142 km einen ausgezeichneten Einblick in die Entwicklung des Endokarstes und damit der unterirdischen Entwässerung dieser Gegend seit dem Spättertiär gewährt. Durch seine Vielfalt bietet dieses Tal gute Möglichkeiten des Vergleichs, der Weiterentwicklung und Prüfung von Tracing- und Analysemethoden. Von diesen Untersuchungen wurden weitere Fakten zum besseren Verständnis der Landschaft erwartet – und diese Erwartungen sind vollumfänglich erfüllt worden.

Das Projekt Muotatal ist ein hervorragendes Beispiel internationaler wissenschaftlicher Kooperation von Universitäts- und anderen Instituten dreier Länder (Deutschland, Österreich, Schweiz). Dazu kommen weitere Institutionen, ohne die das geplante Programm nicht im gewünschten Rahmen hätte verwirklicht werden können, u. a. die Landeshydrologie Bern, welche uns mit der Einrichtung und Betreuung des Limnigraphennetzes eine wertvolle Arbeitsgrundlage verschaffte, das Bundesamt für Militärflugwesen Bern, das über den Militärhelikopterflugdienst 3500 Liter Wasser über 1200 m Höhendifferenz zur ausgetrockneten Eingabestelle IIIa schaffte, die Stiftung für wissenschaftliche Forschung der Universität Zürich, die Deutsche Forschungsgemeinschaft Bonn-Bad Godesberg, die auch schon am Juraprojekt beteiligt war, die Arbeitsgemeinschaft Höllochforschung AGH, die während drei Wochen den Probensammeldienst im Muotatal rund um die Uhr besorgte, die Elektrizitätswerke des Bezirkes Schwyz EBS, die den meteorologischen Dienst betreuten, und nicht zuletzt die Bevölkerung und die Gemeindebehörden des Muotatales, die uns durch ihre Geduld und ihr Verständnis die Arbeit sehr erleichterten. Ihnen allen danken wir herzlich für ihre Unterstützung.

1. Einführung in das Untersuchungsgebiet (A. BÖGLI)

1.1. Lage und Begrenzung¹⁾

Das Muotatal liegt in der Zentralschweiz (Fig. 1) und quert nahezu die ganzen nördlichen Kalkalpen. Die Zufahrt erfolgt über Basel-Luzern-Schwyz oder über Zürich-Schwyz. Von der Bahnstation Schwyz besteht eine Autobusverbindung nach Muotathal-Bisisthal. Das Tal reicht von der Mulde von Schwyz ostwärts bis an die

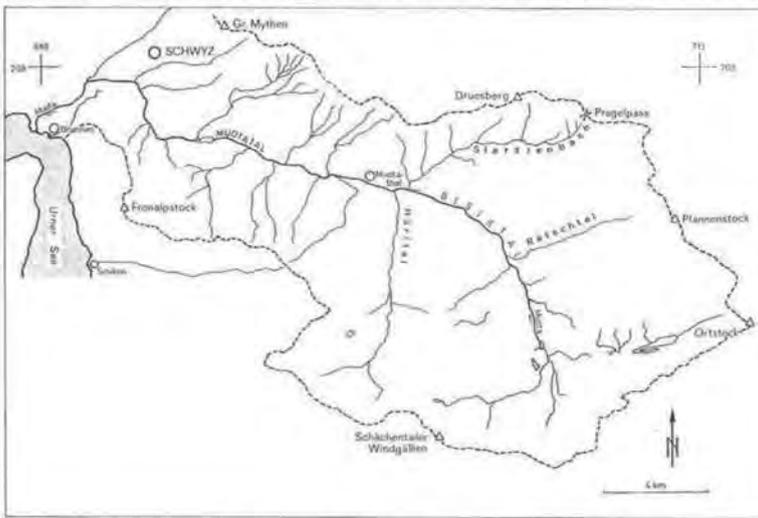


Fig. 1: Übersichtskarte des Einzugsgebietes der Muota. Strichliert = Wasserscheide.

Grenze der Klausenpaßfurche. Der hintere Teil, das Untersuchungsgebiet, liegt ganz in der Axendecke s. l., die den Raum südlich der Linie Pragelpaß-Hinterthal-Goldplank-Riemenstaldertal-Urnersee einnimmt. Hier befinden sich auch das bedeutendste zusammenhängende Karstgebiet, die größten Karrenfelder und die ausgedehntesten Waldkarstareale der Schweiz. Die Zentren sind Bödmeren-Twärenen-Silberen, die Charetalp, die Glattalp und die Chaiserstockkette. Davon wurden der Bereich über dem Hölloch (mit 142 km vermessener Länge die zweitlängste Höhle der Welt) im NE der Muota, der Wasserberg und das anschließende Gebiet von Galtenäbnet im SW und das Hürital im S dieses Flusses zur näheren Untersuchung herangezogen. Der vordere Teil der Muota durchquert die Säntis-Drusbergdecke, mündet in einer ausgeprägten Stufenmündung in das Becken von Schwyz und fließt dann im rechten Winkel zur bisherigen Richtung gegen Westen nach Brunnen und zum Vierwaldstättersee.

¹⁾ Die in den Figuren nicht vorkommenden Eigennamen sind der Landeskarte der Schweiz 1 : 50.000, Blatt 236 und 246 und 1 : 100.000, Blatt 33 und 38, zu entnehmen.

1.2. Geologische Verhältnisse

Das Untersuchungsgebiet umfaßt die Stirnregion der Axendecke s. l. bis an den Rand der südlich anschließenden Kulmination im Rätsthal.

1.2.1. Stratigraphie und Hydrogeologie

In einer nahezu lückenlosen Schichtfolge vom Malm (Quintnerkalk) bis zur unteren Oberkreide (Turon, Seewerkalk) hat sich ein kompliziertes unterirdisches Gewässersystem entwickelt. Die Schichtfolge weist im Untersuchungsgebiet nur am Übergang vom oberen Schrattenkalk zum Gault eine Schichtlücke auf. Diese ist aber weniger für die Karsthydrographie als für die Morphologie von Bedeutung. Während dieser Zeit trat mehr örtlich als regional eine Festlandsperiode mit Abtrag und Verkarstung auf. Betroffen wurden vor allem der obere Schrattenkalk und in gewissen Gebieten auch noch die Echinodermbreccien des untersten Gault: Paläokarst. Die Karrenlöcher wurden bei der späteren Transgression durch Einlagerungen von Grünsanden plombiert. Bisher wurden jedoch keine fossilen plombierten Höhlen, somit auch keine direkten Hinweise auf eine unterirdische Entwässerung in jener Zeit, gefunden, wenn man nicht das Fehlen von Flußrinnen aus der damaligen Zeit als solche ansehen will.

Die Durchlässigkeit der Gesteine vom unteren Öhrlikalk bis zum Seewerkalk umfaßt eine ganze Skala der Möglichkeiten, doch liegt es in der Natur der Sache, daß man diese nicht zahlenmäßig fassen kann. Deshalb begnüge ich mich damit, die Gesteine drei verschiedenen Gruppen zuzuordnen (Tafel 1, Fig. 2).

1. Gruppe: Karsthydrographisch voll wirksame unterirdische Entwässerung, also extrem große Durchlässigkeit. In diesen Wasserwegen kann das Wasser potentiell mit großer Geschwindigkeit fließen, d. h., daß es schnell auf die Veränderungen des Wasserangebotes bzw. des Druckes reagiert. Dieser Gruppe gehören an: Seewerkalk, Echinodermbreccien des untersten Gault sowie des obersten Hauterivien-Kieselkalkes, der Schrattenkalk mit den Orbitolinenschichten und die Valanginienkalke s. l., inbegriffen die Öhrlikalke. Sie sind gekennzeichnet durch das Fehlen oberirdischer Abflüsse auch bei Starkregen und durch zahlreiche Karren, Dolinen und Ponore.

Je mergeliger der Kalk, um so geringer die Verkarstungsfähigkeit bzw. um so langsamer die Reaktion des Wassers auf Druckänderungen. Vom unteren Öhrlikalk bis zum Seewerkalk (Mächtigkeit 675 m) gehören 371 m oder 55% dieser Gruppe an. Dazu kommen aus dem Malm noch weitere 320 m Quintnerkalk und 60 m etwas mergeliger Schiltkalk, so daß von den 1485 m des Gesamtprofiles 751 m oder 51% dieser Gruppe zugehören. Die größte karsthydrographische Bedeutung kommt dem Schrattenkalkkomplex von 152 m zu. Der mächtige Quintnerkalkkomplex (inkl. Schiltkalk) von 380 m ist im Untersuchungsgebiet von geringerer Bedeutung, weil diese Schichten schnell abtauchen und von 400 m undurchlässigen Zementsteinschichten und 30 m unterem Öhrlimergel bedeckt sind. Die Markierungsversuche haben jedoch gezeigt, daß diese undurchlässigen Schichten offenbar aus bisher nicht bekannten tektonischen Gründen keine Barriere darstellen.

2. Gruppe: Beschränkt durchlässige Gesteine. Dieser mittleren Gruppe werden vermindert karsthydrographisch wirksame unterirdische Gerinne und die Spaltenentwässerung zugeordnet. Hier reagieren die Gewässer langsamer und daher verspätet auf Änderungen im Wasserangebot bzw. des Druckes. Bei Starkregen und/oder Schneeschmelze bilden sich an der Oberfläche längere Bäche. Dieser Gruppe gehören an: Hauterivienkieselkalke und die untersten 25 m der Zementsteinschichten.

Der Kieselkalk (140 m mächtig) ist häufig ein Sandkalk, oft verunreinigt durch Nadeln von Kieselschwämmen, oder er weist Kieselknollen auf. Eine – gemessen an

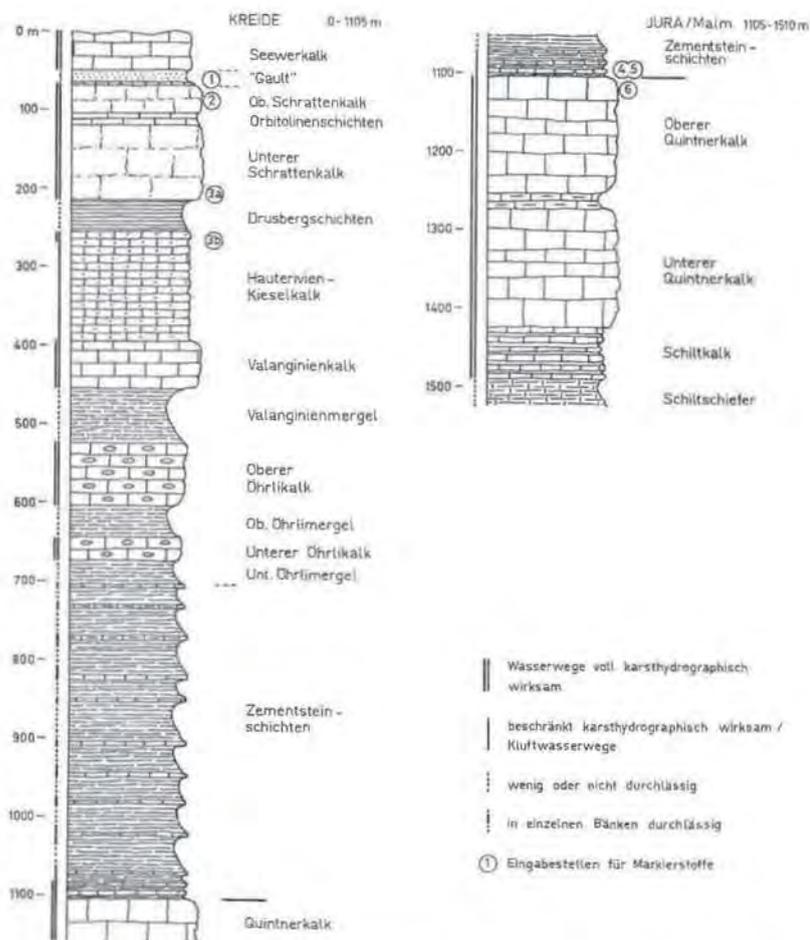


Fig. 2: Geologisches Sammelprofil (nach W. HAUSWIRTH, 1943; J. OBERHOLZER, 1933; R. HANTKE, 1961).

Gruppe 1 – beschränkte karsthydrographische unterirdische Entwässerung ist zu beobachten, besonders im Liegenden der Echinodermenbreccien des obersten Hauterivien. Der Anteil der Spaltenentwässerung dürfte aber überwiegen. Dieses Verhalten ist einerseits eine Folge der geringeren Lösungsfähigkeit des Gesteins (Sandkalk), andererseits des Gehaltes an Quarzsand im Kieselkalk (untere Kreide), der als unlöslicher Rückstand die Spalten teilweise kolmatiert. An der Oberfläche treten nur ört-

Tab. 1: Areale des Muotatales.

Areal	Abgrenzung	Hydrogeologischer Charakter	Eingabestellen 4.SUWTandere	Bearbeiter Hydrologie	Flächen km ²
I	Im NW der Linle Chaiserstock – Hinterthal – Starzlenbach – Prägelpaß	verkarstet: Gibel, Fallenfluh im N der Muota extrem: Chaiserstockkette sehr verschieden: Fronalpstockgebiet unverkarstet: undurchlässig: Klingentobel/Tbergereg, Bettbach (Illgau), Wandfuß Drusbergkette S-Seite; durchlässig: Alluvionen, Gehängeschutt	-	- z. Zt. keine	77,7
II	Zwischen Starzlenbach und Muota (Einzugsgebiet Hölloch 22 km ²)	vorwiegend extrem verkarstet: nackter Karst, Waldkarst	I II	+ 4. SUWT	27,9
III	Rätschtal – Charetalp – Glattalpfirst N-Seite	Charetalp extrem verkarstet (24 km ²) Rest unverkarstet (Zementsteinschichten)	-	+ Französ. Forscher	29,8
IV	Glattalp	N-Seite und E undurchlässig, sonst wenig bis extrem verkarstet (SW-Ecke)	-	+ EBS (EW Bezirk Schwyz)	18,6
V	Im E des Grates Schwarzstock–Seestock–Geißstock (bis IV)	Ruosalp z. T. undurchlässig, Glatten extrem, Rest unterschiedl. verkarstet	-	- keine	23,5
VI	Zwischen Chaiserstockkette u. Areal V, Areal VII umschließend. W-Teil = Hürital	extrem (Quintnerkalk) bis schwach oder nicht verkarstet (untere Zementsteinschichten)	IV V VI	- 4. SUWT	33,4
VII	Wasserberg	extrem (Seewerkalk, Schrattekalk) bis schwach (Kieselkalk) verkarstet	IIIa IIIb	- 4. SUWT	11,4
Totales Einzugsgebiet der Muota im Muotatal (Areale I–VII)					221,9
davon für 4. SUWT voll bearbeitet (Areale II, VI, VII, mit 39% Fels bzw. nacktem Karst)					72,3
durch andere mit beschränkter Zielsetzung bearbeitet (inkl. Areal II)					48,4

lich Korrosionslöcher und Schlucklöcher (kleine Ponore) auf, die nur ausnahmsweise den Charakter kleiner Dolinen aufweisen. In den untersten 25 m der Zementsteinschichten herrscht eine enger gescharte Wechsellagerung von mergeligen Kalkbänken und Mergelschiefern vor, so daß sich unter dem Einfluß der unmittelbaren Nachbarschaft des stark durchlässigen liegenden Quintnerkalkes und unter Beteiligung von Querklüften (Spalten) eine örtliche karsthydrographisch wirksame Entwässerung entwickelt hat; solche Bereiche wurden als zur 1. Gruppe zugehörig kartiert. Diese Erscheinung ist ausgeprägt zu finden auf der Glattalp (außerhalb des Untersuchungsgebietes), etwas weniger gut entwickelt auf Galtenäbnet und hinter dem Matenstock beim Schatzsätz (Areal VI, Tab. 1 und Fig. 3). Zwischen den Kalkbänken

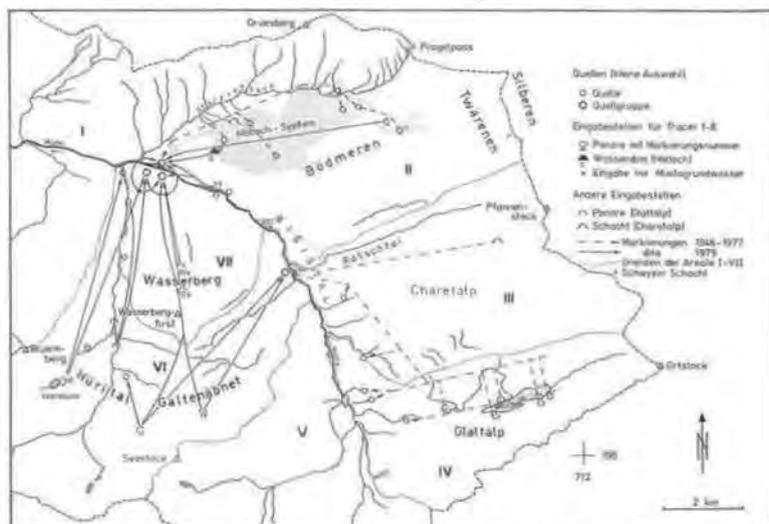


Fig. 3: Hydrographische Karte zu den Arealen (I, II...) des hinteren Muotatales (s. Tab. 1).

herrscht jedoch eine oberirdische Entwässerung. Die reihenförmig angeordneten Schlucklöcher vermögen ein größeres Wasserangebot, z. B. bei Starkregen oder großer Schneeschmelze, nicht immer voll zu schlucken. Außer den Schlucklochreihen bilden sich an den Kalkbänken schlecht ausgebildete Karren. An der Gesamtmächtigkeit nimmt diese 2. Gruppe mit 165 m bzw. 11% teil.

3. Gruppe: Schlecht durchlässige bis undurchlässige Gesteine. Hierher gehören die Mergelschiefer und Mergel der Kreide mit 569 m Mächtigkeit bzw. mit 38% des Gesamtprofils. Der größte zusammenhängende Komplex besteht aus den unteren Öhrliemergeln und den Zementsteinschichten mit 405 m (auf Galtenäbnet 500 m) Mächtigkeit bzw. 27%. In letzteren sind Streifen und Flächen eingeschaltet, die der 2. Gruppe angehören, doch zu schmal oder zu klein sind, um kartiert werden zu können.

1.2.2. Tektonik

Von den helvetischen Decken treten in der Muotatalachse auf (Fig. 4): die Säntis-Drusbergdecke (Drusberg ist ein Gipfel unmittelbar nördlich des Untersuchungsge-

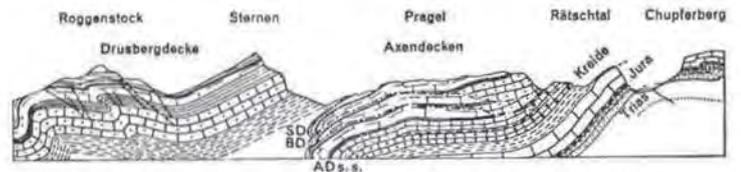


Fig. 4: Schematischer Querschnitt durch die helvetischen Decken im Muotatal (nach R. HANTKE, 1961). SD = Silberdecke, BD = Bächistockdecke, AD s. s. = Axendecke im engeren Sinn = basale Axendecke.

bietes) und die Axendecke (nach dem Axen am Urnersee benannt). Nach den heutigen Auffassungen sind diese Decken auf Schwerkgleitung gegen NW zurückzuführen, wobei sich besonders die Axendecke zu einer Stockwerkdecke entwickelte (R. HANTKE, 1961, S. 14). Nach J. OBERHOLZER (1910, 1933) besteht diese aus 4 Teildecken - Toralpedeckel, Obere und Untere Silberdecke, Bächistockdecke - und der basalen Axendecke. Letztere umfaßt im Untersuchungsgebiet den gesamten Anteil am Malmkalk und an den Zementsteinschichten sowie die unmittelbar anschließende Öhrli- und Valanginien-Serie.

In Fig. 5 und 6 sind die Gleitflächen gut verfolgbar. Sie queren in spitzem Winkel die Schichtflächen. Die Toralpedeckel fehlt hier. Bemerkenswert sind die später entstandenen Brüche, die, aus Beobachtungen an der Oberfläche und im Hölloch zu

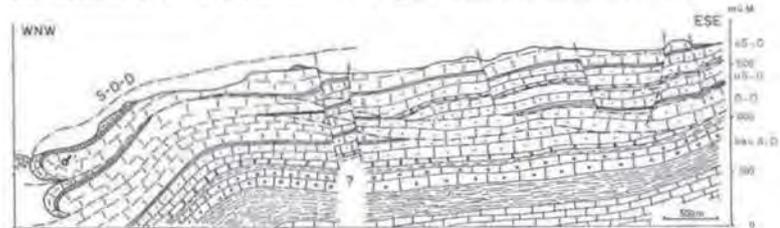


Fig. 5: Geologisches Transversalprofil Stalden - Gschwend - Toralp. δ = Schleichender Brunnen, S-D-D = Säntis-Drusberg-Decke, oS-D = obere Silberdecke, uS-D = untere Silberdecke, B-D = Bächistockdecke, bas. A-D = basale Axendecke (Signaturen s. Fig. 2).

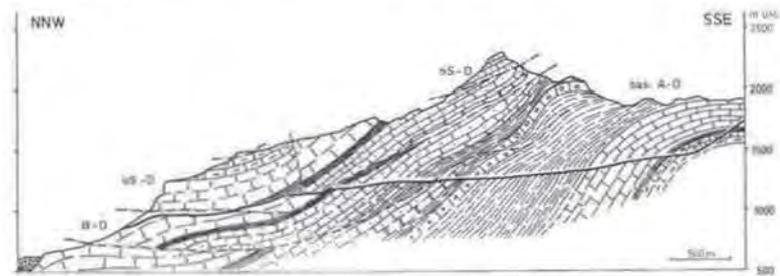


Fig. 6: Geologisches Querprofil durch Wasserberg und Hürital (nach W. HAUSWIRTH, 1913). Deckenbezeichnungen wie in Fig. 5, Signaturen s. Fig. 2.

schließen, z. T. noch im Quartär aktiv waren. Gleitflächen haben sich auch auf Schichtflächen entwickelt, von denen die eine im Spätwürm – wenn nicht sogar noch später – aktiv gewesen ist (Verschiebung um ca. 25 cm), wie Untersuchungen im Höllloch gezeigt haben. In Fig. 6 (Hürital) treten die großen Brüche weniger hervor, weil sie nahezu parallel zur Talachse verlaufen. In der Stirnregion der Teildecken fehlen bis auf kleine Reste die Sedimente, die älter als der Schrattekalk sind. Infolgedessen berühren sich bei Hinterthal die Kalke (bis 99% CaCO₃) der drei Teildecken, so daß eine karsthydrogeologisch wichtige Mächtigkeit von über 300 m entsteht.

1.3. Geomorphologie

Die Kalke und die Kombination der korrosiven Wirkung des Wassers und der erosiven der Gletscher bestimmen physiognomisch das Bild der Hochfläche, während die tiefen Taleinschnitte die übliche alpine Talbildung in den Sedimentdecken erkennen lassen.

Der *nackte Karst*, der Hochkarst der 1. Gesteinsgruppe, zeigt dominant Karrenfelder mit postglazialen Karren in schönster Ausbildung, mit Karrendolinen und Schächten (A. BÖGLI, 1951, 1960a, 1964b, 1968b, 1971).

Grundlage hierzu sind die meist dickbankigen Schratte- und Seewerkalke und die Quintnerkalke. Erst bei näherem Zusehen erkennt man, daß die Karrenfelder am Ende der würmzeitlichen Vereisung ausgedehnte Rundhöckerfluren gewesen sind (Fig. 7). Dieser Zustand herrschte vor dem Klimaoptimum im Gebiete des heutigen



Fig. 7: Nackter Karst auf den Töwarenen (2000 m ü. M.), zugleich Rundhöckerflur (Foto: A. BÖGLI).

Waldkarstes (silvaner Karst, siehe Fig. 8 – Mittelgrund). Die damals einsetzende lückenhaltige Bewaldung schuf humusreiche Böden mit CO₂-reicher Bodenluft und entsprechend hoher Korrosion (A. BÖGLI, 1969). Dadurch wurden innerhalb kurzer Zeit Rinnen- und Kluftkarren und die Schächte stark vergrößert und die Ableitung des



Fig. 8: Der nackte Karst im Areal II von der Twärenen aus. Oberfläche über dem Hölloch mit Waldkarst im Mittelgrund, im Dunst das Bisistal, dahinter ganz rechts der Wasserbergfirn, links anschließend Galtenäbnet (Foto: A. BÖGLI).

Wassers in den Untergrund wesentlich verstärkt. Als kleine Großformen treten allgemein der Schichttreppen- und der Schichtrippenkarst (Fig. 9) auf (A. BÖGLI, 1964b). Auf den Hochflächen südlich der Glattalp finden sich Karrentische, welche direkt in ihrem Sockel das Ausmaß der Karstdenudation seit dem letzten größeren Eisvorstoß vor 10.000 Jahren anzeigen (A. BÖGLI, 1961). Die tiefeingeschnittenen Täler, Muota- und Hürital, zeigen Härte terrassen, Systemterrassen (Reste älterer Eintiefungsphasen) und dazugehörige Talstufen, steile Flanken und darin zusätzlich die Formenwelt der Massenbewegungen: Steinschlagwände, Schutthalden, Bergstürze aus den Kalkwänden, Rutschungen in den Valanginienmergeln und in den Zementsteinschichten, sowie Sackungen in tektonisch dazu prädestinierten Schichten, z. B. am Wasserberg gegen die Muota hinunter. In den Tälern haben sich meist Schwemmebenen gebildet, deren Schotterkörper als Grundwasserspeicher und -leiter wirken. Die Oberfläche des Grundwasserkörpers ist das Vorfluterniveau des unterirdischen Karstwassers. Es bestimmt damit nicht nur die Zone größter Korrosion und damit die Höhlenniveaus (A. BÖGLI, 1966, 1968a), sondern auch die Höhenlage vieler Austrittsstellen der unterirdischen Karstwässer, z. B. die der Quellgruppe um den „Schleichenden Brunnen“ herum für das Höllochwasser. Dieses stammt von 10 km² nacktem Hochkarst und 12 km² silvanem Karst und weist eine Abflußmenge von ca. 2000 mm/a aus.



Fig. 9: Schichttreppenkarst in den Märenbergen (Glattalgebiet), das Zusammenwirken glazialer Formung und Karstentwicklung. Der Weg des Wassers in die Tiefe ist durch die steilstehenden Klüfte und Störungen vorgezeichnet (Foto: A. BÖGLI).

1.4. Klima

Die nördlichen Kalkalpen sind den regenbringenden Winden aus W bis N stark ausgesetzt. Mit seinem Talschluß von 2400 m ü M mittlerer Kammhöhe fängt das gegen W und NW offene Muotatal die feuchten Winde schon 10 km vor dem nördlichen Alpenhauptkamm ab. Entsprechend erreichen die Niederschläge in den Tallagen fast 2000 mm, in den Hochlagen 3000 mm und mehr (Fig. 10).

Diese großen Niederschlagsmengen erhalten durch den Hochgebirgskarst, der 80 bis 90% der Oberfläche einnimmt, ein zusätzliches hydrographisches Gewicht. Etwa ein Drittel davon ist nackter Karst, wo der Regen schon nach wenigen Minuten im Untergrund versickert und damit der Verdunstung entzogen ist. Im Winter 1947/48 lag die Obergrenze des subnivalen Schmelzwassers durchschnittlich auf 1800 m ü M (A. BÖGLI, 1951) an der Untergrenze des nackten Karstes. Das läßt darauf schließen, daß der Hauptteil der Verdunstung in dieser Region auf die Zeit der Schneedecke und der Schneeschmelze fällt. Der tiefer anschließende Waldkarst zeigt morphologisch ähnliche Verhältnisse. Jedoch ist die Gesamtverdunstung wegen der Evaporation durch die Bewaldung infolge Interzeption – „Teil des Niederschlages, der an den Bäumen hängenbleibt, ohne den Erdboden zu erreichen“ (R. Keller, 1962, S. 43) – und wegen der Transpiration bedeutend höher. Im Muotatal bis vor die Mündung des Starzlenbaches ist daher mit einem mittleren Abfluß von mehr als 80% der Niederschläge zu rechnen. Die Niederschlagsverteilung ist gekennzeichnet durch das

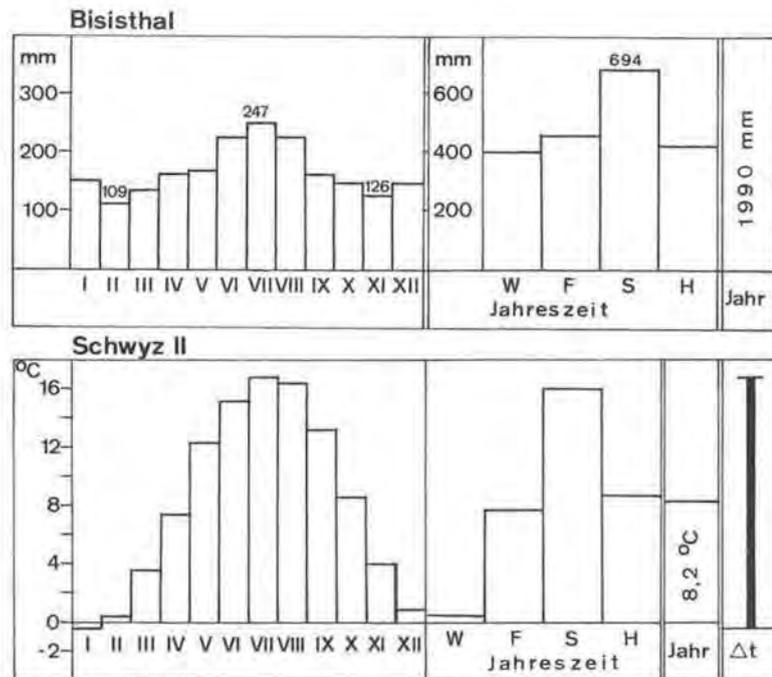


Fig. 10: Langjährige Monats- und Jahreszeitenmittel des Niederschlages (Station Bisisthal, 970 m ü M) und der Lufttemperatur (Station Schwyz, 567 m ü M) nach M. SCHWEPP (1959) und H. URRINGER (1964).

Hauptminimum im Februar, ein sekundäres Minimum im November und durch das Maximum im Juni bis August, mit der Spitze im Juli. Diese ist in Bisisthal 2,27 mal höher als das Februarminimum.

Der Jahresmittelwert der Temperatur entspricht in Schwyz – im Muotatal selbst gibt es keine offizielle meteorologische Temperaturmessstation – ungefähr den Verhältnissen im gleich hohen Alpenvorland (Fig. 10). Er ist aber um ca. 0,5° C tiefer als in den benachbarten extremen Föhntälern, z. B. im Urner Reusstal.

2. Bisherige hydrographische Untersuchungen (A. BÖGLI)

2.1. Ober- und unterirdische Entwässerung

Das Untersuchungsgebiet wird durch drei Täler gegliedert; es ist das Tal der Muota als hydrographische Achse mit der Pragelpaßfurche (Starzlenbach) auf der rechten Seite, welche das Untersuchungsgebiet begrenzt und von den undurchlässigen Valanginienmergeln der Säntis-Drusberg-Decke abtrennt, und dem Hürital (Hüribach) auf der linken (z. T. Areal VI). Dazwischen liegen die verkarsteten und daher unterirdisch entwässerten Bereiche Bödmeren – Twärenen – Silbern (Areal II) zwischen

Starzlenbach und Muota und der Wasserberg (Areal VII) zwischen Muota und Hürital. Das Areal II grenzt im SE an das Rätsthal, das als schmaler Streifen mit oberirdischer Entwässerung – steil einfallende Zementsteinschichten – dieses vom Areal III mit dem 24 km² großen Karrenfeld der Charetalp trennt (s. Tab. 1, Fig. 3).

Die in den oben genannten Karstflächen versickernden Wasser treten nur im Muotal aus, also weder im Hürital noch im Rätsthal oder im Starzental. Die Furche des Pragelpasses (Tal der Starzlen) erhält nirgends Wasser aus dem Gebiet Twärenen-Bödmern, aber der Bach könnte solches ans Höllochsystem abgeben. Ein gegen N absinkender Höhlengang, das Donnertal, unterfährt in ca. 550 m Tiefe den Starzlenbach im Gutentalboden (1275 m ü M) und greift darüber hinaus noch 400 m weit nach N unter die Säntis-Drusberg-Decke. Hier taucht der Gang bei ca. 670 m ü M unter die Karstwasserfläche, 700 m unter der Oberfläche. Die Möglichkeit einer Wasserinfiltration vom Starzlenbach her ins Höllochsystem wäre daher an sich gegeben, zumal die südliche Talseite aus einer Kalkwand (Seewerkalk) besteht. Unmittelbar darunter treten im Donnertal mehrere große Quellen auf, die ein Markierungsversuch aber als Abflüsse aus dem südlich davon gelegenen Schluchtangengebiet ausgewiesen hat (s. Abschn. 2.2.1.). Das ist ein indirekter Beweis gegen die Herkunft aus dem Starzlenbach. Ein direkter Beweis durch Markierung des Starzlenwassers konnte nicht erbracht werden. Das Donnertal ist zudem ein Beweis dafür, daß die Grundwasserfläche 5 km weit im Berginneren nur 30 m höher liegt als der Vorfluter (Schleichender Brunnen). Das entspricht einem Gefälle von 0,6% (A. BÖGLI, 1966). Im Hürital wurden die Quellgruppen im Talboden als die Austrittsstellen von Karstwasser aus den Gebieten rechts (Areal V, evtl. IV) und links (Areal VI) vermutet. Beim Markierungsversuch 1979 zeigte sich aber, daß nur von Areal V her, nicht aber von Areal IV und Areal VI eine Verbindung mit den Quellen im Tal besteht.

Die Kenntnisse über die Herkunft der Quellwässer im Muotal vor der großen Markierung Ende Juli 1979 zeigen folgenden Stand: Das Wasser aus dem Areal II tritt nur in den „Schlichenden Brunnern“ aus (Quell-Nr. 1, 2, 2a, 3 und 7a), das Wasser vom Wasserberg in 8, 9 und 14 sowie 15, 15a, 15c und 20 bzw. 20a. Die übrigen Quellen wurden als Grundwasseraufstöße gedeutet, ebenso jene oberhalb der Zwingsbrücke mit Ausnahme von Nr. 21, die als Bergsturzquelle zu gelten hat (s. Fig. 36).

In den Seebergquellen war die Beziehung zu den rechtsseitigen Karrengebieten experimentell gesichert, jene zu den linksseitigen (Gebiet von Areal VI, Galtenäbnet) durch Trübungen bei Unwettern einigermaßen wahrscheinlich gemacht (s. Abschn. 4.4.4.).

Die Untersuchung der Quellen macht auch eine Beurteilung des Entwicklungsstadiums des Karstes möglich (A. BÖGLI, 1970). Das Glattalgebiet, genauer die Abflüsse aus dem Glattalpsee (1850 m ü M) und aus dem Schafpferchboden treten an mehreren Stellen wieder ans Tageslicht. Zahlreiche Quellen von Milchbühlen bis zum Seeberg enthielten Fluoreszein, das auf der Glattalp eingegeben worden war. Der unterirdische Karst dieser Region (Areale IV und III) ist noch voll in der Entwicklung. Demgegenüber weist das Einzugsgebiet des Hölloches, das um 18% größer ist als das Glattalgebiet, nur einen einzigen bedeutenden Wasseraustritt auf, der sich dann allerdings in den Schottern auf die Einzelquellen 1, 2, 2a, 3 und 7a aufteilt. Das bedeutet eine reife unterirdische Verkarstung. Außerhalb des Areals II ist bisher keine Groöhöhle entdeckt worden, obschon in den anderen Bereichen die geologischen Verhältnisse z. T. noch günstiger sind. Der Schwyzerschacht gehört karsthydrographisch auch zum Höllochsystem, doch wurden seine 14 km in der Höllochlänge von 142 km nicht mit einbezogen. Der Nachweis gelang mit Hilfe von Fluoreszein.

Die Markierung in der Charetalp selbst reicht nicht aus, um über den Entwicklungsstand im östlichen Teil ein Urteil abgeben zu können. Durch den westlichen Teil

verlaufen die Abflüsse des Glattalpses. Deshalb gilt hier der weiter oben angegebene Befund, daß die unterirdische Verkarstung noch nicht den Reifezustand erreicht habe.

2.2. Markierungsversuche bis 1977

2.2.1. Das Hölloch-System

Der Schleichende Brunnen ist die Emergenz der unterirdischen Wässer des Areal II, u. a. des Hölloch-Systems und des Schwyzer Schachtes (s. Fig. 3).

Das Hölloch ist mit seiner enormen Größe ein Zeugnis früherer unterirdischer Karstwasserwege (A. BÖGLI, 1970, 1976a). Die ältesten Teile z. B. im Hochsystem sind, aus den Indizien zu schließen (Höhenlage, Mangel an organischem Material in Feinsedimenten, Eisengehalt über 10%), spätpliozänen Alters (A. BÖGLI, 1968a, 1968b). Markierungen dienten dazu, die Zusammenhänge im heutigen Gewässernetz abzuklären. Andere Ergebnisse wurden nicht angestrebt. Daher sind die Angaben lückenhaft und bestehen häufig nur in der Feststellung, daß eine Schwinde mit einer Quelle verbunden worden sei.

Am 28. 12. 1956 wurde im tiefsten Punkt des Schluchtanges¹⁾ um 23.00 Uhr innerhalb von 5 Minuten 1 kg Fluoreszein in die Schwinde eingegeben (Koord. 707 300 204 715). Am 29. 12. 0.40 Uhr war das Wasser nur noch schwach grün. Die Quellen im Pagodengang (707 200/204 830) blieben ungefärbt. Im Donnertal (706 800/205 300) flossen um 19.00 Uhr die drei großen Quellen leicht grün, um 23. 25 Uhr stark grün. Der Abstand von 900 m wurde vom Vorläufer in 20 Stunden überwunden. Das entspricht einer Geschwindigkeit von 45 m/h bei einem Gefälle von 16%. Das ist eine verhältnismäßig geringe Geschwindigkeit für ein solches Gefälle, was darauf schließen läßt, daß größere Becken dazwischengeschaltet sind. Im Schleichenden Brunnen wurde der Farbstoff erstmals am 6. 1. 1957, morgens um vier Uhr, offenbar beim Konzentrationspeak beobachtet. Die Muota war weit flußabwärts grün gefärbt. Fließdauer ab Donnertal 176 h, Distanz ca. 5000 m und Gefälle 32 m auf diese Distanz, bzw. 6,4‰.

Am 30. 12. 1957 wurde eine Quelle im „Stich“ (707 170/204 620) im hinteren Hoffnungsgang gefärbt, deren Wasser wenige Meter weiter unten in einer Spalte verschwand. Im Pagodengang und im Donnertal war keine Reaktion feststellbar. Am Schleichenden Brunnen erschien der Farbstoff am 7. 1. 1958, 10.15 Uhr. Die Strecke von 5,7 km wurde in 167 h durchflossen.

Im Wasserdom (703 790/203 600; Fig. 11) wurde am 24. 1. 1958, 14.23 Uhr, der Abfluß gefärbt. Im Chorgang (703 765/203 740) trifft der Vorläufer schon um 14.48 Uhr ein, die Hauptfarbfront um 14.52 Uhr. Um 15.30 Uhr ist visuell kein Farbstoff mehr zu erkennen. In der „Quelle“ wird um 23.00 Uhr noch Farbstoff beobachtet (Fig. 12). Genauere Angaben fehlen.

Von späteren Markierungen, die bei Bedarf erfolgten, ist wenig bekannt geworden. Mehrfach wurden Höhlenbäche markiert und die Zusammenhänge abgeklärt. Einer der letzten Versuche wurde 1977 durchgeführt: Markierung eines Abflusses im Schwyzer Schacht (708 365/204 425, 1665 m ü M). Man beobachtete das gefärbte Wasser im tiefer gelegenen Hölloch-System im Wasserschloß (707 400/204 620, 900 m ü M). Von hier aus fließt das Wasser zum Siphon im Schluchtgang, der Markierungsstelle vom 18. 12. 1956 und auf dem damals festgelegten Weg zum Schleichenden Brunnen.

¹⁾ Der vollständige Höhlenplan von 1970 ist in A. BÖGLI (1970) publiziert.



Fig. 11: Wasserdome im Hölloch, die Eingabestelle II für die Markierung (Bachlauf im Vordergrund; Foto: A. BOGLI).

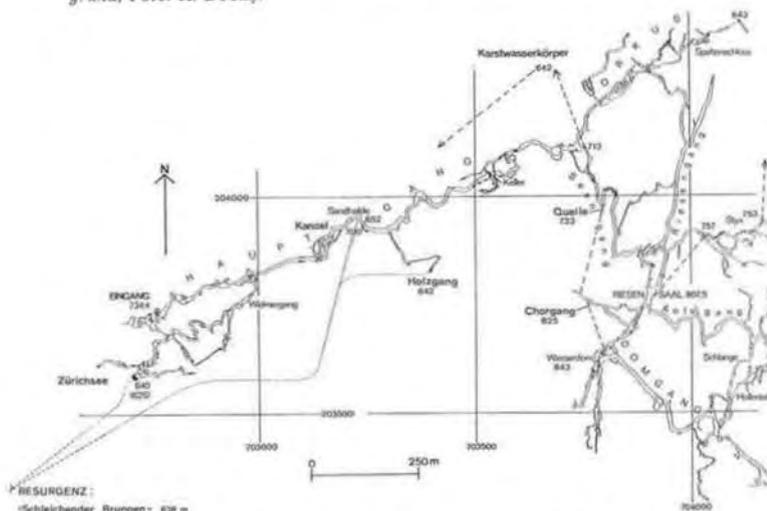


Fig. 12: Kartenausschnitt des vorderen Hölloches 1970 (Planaufnahme: AGH, Leitung A. BOGLI). Strichlierte Pfeile = allgemeine Abflußrichtung, strichlierte Linie = 1979 nachgewiesene Verbindung.

Das Hölloch zeigt, daß unter phreatischen Bedingungen nicht nur Spalten, sondern auch geschlossene Klüfte und vor allem Schichtfugen (Fig. 13 und 14) als Karstwasserwege dienen (A. BÖGLI, 1966), ganz im Gegensatz zur Lehrmeinung von O. LEHMANN (1932).

2.2.2. Glattalp und Charetalp

Außerhalb des jetzigen Untersuchungsgebietes wurden auf der Glattalp, einem Hochtal auf der rechten Seite des Muotatales (A. BÖGLI, 1973), Markierungen durchgeführt, zuerst durch die CKW (Centralschweizerische Kraftwerke), später durch die EBS (Elektrizitätswerke des Bezirkes Schwyz; A. BÖGLI, 1960b). Ziel war die Abklärung der Wasserverluste im Glattalpsee und im Schaffferchboden. 1958 wurde am tiefsten Punkt des Glattalpsees – als Karstsee ist er im Februar meist nahezu leergelaufen – eine Markierung angesetzt, um abzuklären, ob die Richliswaldquelle (Trinkwasserversorgung Muotathal) bei tiefem Stand des Glattalpsees noch einen größeren Anteil an Glattalpseewasser erhält. Es traten aber nur geringe Mengen an Fluoreszein auf, in der einen Quelle an der Grenze der Sichtbarkeit, in der anderen nur mit dem Fluoroskop nachweisbar.

In Fig. 15 und den nachfolgenden Tabellen 2, 3 und 4 sei unter Distanz der kürzeste mögliche Weg unter Berücksichtigung der geologischen und morphologischen Verhältnisse verstanden; er ist somit länger als der Abstand. Dem entspricht dann auch die Fließgeschwindigkeit.



Fig. 13: Steilstehende Verwerfung, die unter phreatischen Bedingungen einen „elliptischen“ Querschnitt erhalten hatte. Hier floß früher ein Teil des Karstgrundwassers hindurch; heute erfüllt während der Schneeschmelze und bei Starkregen der Hochwasserstrom diesen Gang völlig. Über dem Querschnitt ein Deckenkolk, der durch Mischungskorrosion entstanden ist. Hölloch, Alligatorenschlucht im Hauptgang (s. Fig. 12; Foto: A. BÖGLI).



Fig. 14: Ellipsenquerschnitt auf Schichtfuge, eine phreatische Gangform, die den größten Teil der Höllochgänge ausmacht; SAC-Gang (Foto: A. BOGLI).

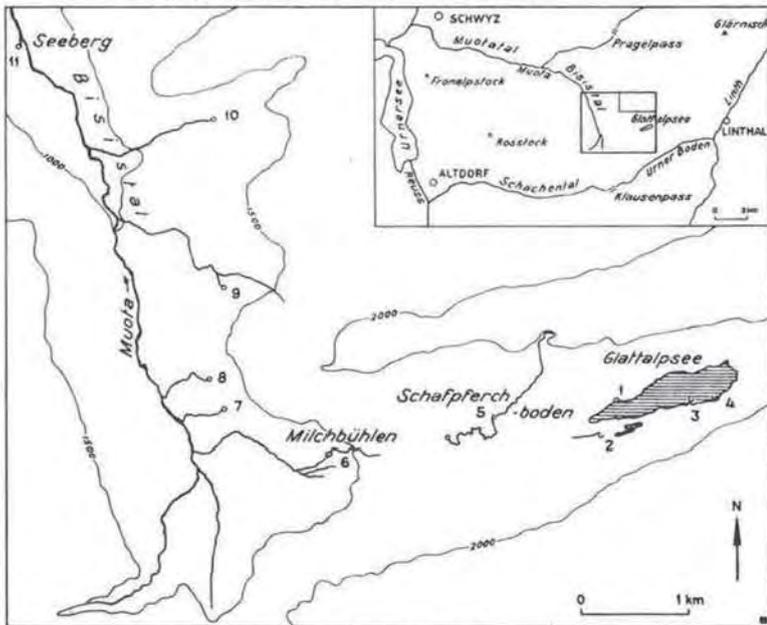


Fig. 15: Kartenskizze der Eingabestellen (Halbkreise) und beprobten Karstquellen (Kreise) zu den Markierungsversuchen Glattalp - Bisistal (Nummern s. Tab. 2).

Auf der Charetalp wurde im August 1975 durch französische Speläologengruppen (Leitung B. LOISELEUR) die Schachthöhle P13 mit 1 kg Fluoreszein beschickt, doch tauchte der Farbstoff trotz Beobachtung aller Karstquellen im Muotatal unter Verwendung von Aktivkohle nirgends auf. Die Wiederholung 1976 mit 3 kg war positiv: Nachweise in Hinterseeberg und mit Aktivkohle beim Kiessammler oberhalb des Schleichenden Brunnens. 1977 wurden zwei weitere Schwinden markiert. In der südlichen Hochtalmulde der Charetalp wurde dort, wo der Quintnerkalk flach unter die Zementsteinschichten einfällt, Rhodamin B in einen Ponor eingegeben (711 880/200 580, 1880 m ü M).

Tab. 2: Markierungsorte (1-5) und Beobachtungsstellen an Karstquellen (6-11; s. Fig. 15).

Nr.	Markierungsort	Höhe m ü M	Geologische Situation
1	Glattalpsee NW	1850	Zementsteinschichten (Z)
2	Glattalpsee SW	1852	Z
3	Glattalpsee S, tiefster Ponor im Seegrund	1832	Z unter Seebodenlehm
4	Glattalpsee SE	1845	Z unter Blockschutt
5	Schafpferchboden Karstquellen	1854	Z 20 m über Quintnerkalk (Qu)
6	Taschibach	1400	durch Schutt verdeckte Karstquelle, Doggerbasis
7	Eigeliquelle	1350	DB, Verwerfung
8	Feldmoosquelle	1360	DB, Sackungsrand
9	Höchweidquelle	1330	DB, auf großer Verwerfung
10	Richliswaldbach	1200	schuttverdeckte Karstquelle, Basis DB
11	Brünnen, Hinterseeberg	780	hydrographisch tiefster Punkt an der Grenze Qu/Z im Talboden

Tab. 3: Distanz (D), Höhendifferenz (HD) und Gefälle (%) zwischen Markierungsort und Karstquelle.

	1	2	3	4	5
6 D	2700 m	2480 m	3360 m	3580 m	1530 m
HD	450 m	452 m	432 m	445 m	454 m
%	17	18	13	12	30
7 D	3560 m	3410 m	4230 m	4440 m	2460 m
HD	500 m	502 m	482 m	495 m	504 m
%	14	15	11	11	20
8 D	3700 m	3570 m	4370 m	4580 m	2620 m
HD	490 m	492 m	472 m	485 m	494 m
%	13	14	11	11	19
9 D	3750 m	3700 m	4400 m	4600 m	2770 m
HD	520 m	522 m	502 m	515 m	544 m
%	14	14	11	11	20
10 D	4680 m	4700 m	5230 m	5420 m	3870 m
HD	650 m	652 m	632 m	645 m	654 m
%	14	14	12	12	17
11 D	6540 m	6640 m	7060 m	7200 m	5900 m
HD	1070 m	1072 m	1052 m	1065 m	1074 m
%	16	16	15	15	18

Tab. 4: Gefälle (%) und Fließgeschwindigkeit (v) auf der Strecke Markierungsort-Karstquelle.

	1	2	3	4	5
6 %	17 %	18 %	13 %	12 %	30 %
v	150 m/h	86 m/h	40 m/h	112 m/h	131 m/h
7 %	14 %	15 %	11 %	11 %	20 %
v	222 m/h	148 m/h	60 m/h	185 m/h	189 m/h
8 %	13 %	14 %	11 %	11 %	19 %
v	231 m/h	155 m/h	62 m/h	190 m/h	201 m/h
9 %	14 %	14 %	11 %	11 %	20 %
v	288 m/h	148 m/h	63 m/h	200 m/h	213 m/h
10 %	—	—	12 %	12 %	—
v	—	—	38 m/h	129 m/h	—
11 %	16 %	16 %	15 %	15 %	18 %
v	363 m/h	221 m/h	94 m/h	327 m/h	368 m/h
Markierungs- beginn	15. 7. 1947	23. 9. 1946	6. 2. 1958	27. 8. 1947	8. 7. 1954
Versuchsleiter (W: WINTERHALTER, B: BÖGLI)	W	W	B	W	B

Die Höchweidquellen und der Richliswaldbach waren trotz der hohen geologischen Wahrscheinlichkeit frei von Markierungsmitteln (Analysen durch Fluorimeter des hydrogeologischen Instituts der Universität Neuchatel, Schweiz). Auf Grund der Ergebnisse der Markierung Glattalp muß angenommen werden, daß das Wasser zuerst westwärts zur großen Verwerfung Charetalplütze - Robutzli - Stägen (Rätschtal) fließt und dann dieser nach NNW folgt. Mit Annäherung ans Rätschtal taucht der Quintnerkalk unvermittelt steil in die Tiefe. Dieser Abbiegung folgt das Wasser, erreicht in einer Tiefe von 800 bis 900 m ü M den Karstwasserkörper und fließt von da direkt zu den Seebergquellen (780 m ü M). Die Fließzeit betrug 18 Stunden, der Abstand Schwinde - Quelle 6400 m und der Höhenunterschied 1100 m. Daraus ergibt sich eine Abstandsgeschwindigkeit von 360 m/h. Folgt man aber der oben dargestellten geologisch wahrscheinlichen Strecke von 8000 m Länge, dann steigt die minimale mittlere Fließgeschwindigkeit auf 444 m/h. Zur gleichen Zeit erfolgte eine Markierung mit Uranin im P 9 bzw. Gouffre 310 am Griesset (713 780/201 540, 2315 m ü M). Auch hier trat das markierte Wasser nur in den 8200 m entfernten Seebergquellen auf. Höhendifferenz 1525 m, Fließzeit 40 Stunden, Abstandsgeschwindigkeit 205 m/h (B. LOISELEUR, 1978). Diese Untersuchungen lassen erkennen, daß die Depression der Deckenachse entlang der Verwerfung Charetalplütze - Robutzli und diese Verwerfung selbst den Abfluß in Richtung Norden kanalisieren und so die Verbindung zum Karstwasserkörper unter der Nordseite der Charetalp herstellen. Die unterirdischen Abflüsse der Glattalp dürften zum Teil dieser Linie folgen, benutzen aber auch die westlich davon gelegenen Verwerfungen, wie die Höchweidquellen und der Richliswaldbach durch Markierungen beweisen.

3. Vorarbeiten und Langzeituntersuchungen 1978 bis 1979

3.1. Abflußdaten (A. BÖGLI)

3.1.1. Die Limmigraphen

An fünf Stellen wurden die Abflußdaten graphisch erfaßt (s. Tab. 5, Tafel II, Fig. 35 und 37). Diese Daten sind naturgemäß keine Mittelwerte, sondern die aktuellen Werte des Jahres 1979.

Tab. 5: Abflußmeßstellen und dazugehörige Quellen (s. Fig. 35–37).

a) Limmigraph*	erfaßt das Wasser von
Proben-Nr.	
6a Muota	Muota oberhalb EW-Zentrale Hinterthal, Quellen Nr. 21, 21a und höhere.
13 Abfluß Schleichen- der Brunnen	Quellen Nr. 1, 2, 2a, 3, 5, 22 (alle zur Quellgruppe „Schlichende Brunnens“ mit Karst- und Muotagrundwasser in wechselnden Verhältnissen gehörig). Nr. 4 erfaßt den Abfluß der Quellen Nr. 1–3, 7, 7a. Nr. 7a weist einen hohen Anteil Talgrundwasser mit etwas Karstwasser auf, 7 ausschließlich Muotagrundwasser.
14 Guggenhürli	Quellen Nr. 8 und 9, vorwiegend Karstwasser.
16 Fugglen-Ost	Quellen Nr. 10, 11, 12, 17, Mischwässer aus Karst- und Muotagrundwasser in örtlich/zeitlich wechselnden Verhältnissen.
23 Muota (Vorder Seeberg)	Muota, inbegr. Abfluß EW-Bisisthal, Quellen Nr. 24, 25, 65 (können mehr als 50% des Abflusses ausmachen, wenn das EW-Bisisthal nicht läuft). Rätschtaler Bach und Quelle 59 (beide mengenmäßig unwesentlich).
b) Meßstelle 15*	15a, 15b (weniger als 10 l/min. und ganz anderer Chemismus), 15c (Erguß ähnlich 15a).
mit täglichem Ab- stechen der Wasser- höhe	

* Zugleich Entnahmestellen mit Kennnummer für Wasserproben

Der Limmigraph 13 erfaßt die Gesamtheit der „Schlichenden Brunnens“ – Quellen, in denen das Wasser aus dem Untergrund „herausschleicht“ und als Bach wegfließt – und die damit praktisch den ganzen unterirdischen Abfluß des Areals II, das extrem verkarstet ist, entwässern. Entsprechend reagieren die Quellen schnell und mit großen Ausschlägen. Ca. vier Stunden nach Regenbeginn beginnt jeweils der Pegel zu steigen, und 10 bis 12 Stunden danach wird der Peak erreicht. Das Verhältnis von Minimum zu Maximum betrug 1979 $0,05 \text{ m}^3/\text{s} : 13 \text{ m}^3/\text{s} = 1 : 260$. Dieses Verhältnis dürfte dadurch verschärft werden, daß bei Niedrigwasser der gesamte Erguß der Quelle 1, des eigentlichen „Schlichenden Brunnens“, in die den Quellaustritt abdämmenden Schotter einfließt und es zu keinem Überlauf kommt.

Der Limmigraph 14, Guggenhürli (Flurname für einen 50 m hohen Rundhöcker, an dessen Fuß die Quelle entspringt), ist ein Abfluß des Seenalpseeis, einem unterir-

disch entwässerten Karstsee im Hürital. Diesem Abfluß fließen kleine unterirdische Bäche aus dem Wasserberggebiet zu. Der Seenalpsee gleicht die Spitzen etwas aus. Das Minimum-Maximum-Verhältnis beträgt trotzdem noch $0,01 \text{ m}^3/\text{s} : 1,55 \text{ m}^3/\text{s} = 1 : 155$ und zeigt damit die Charakteristik einer Karstquelle.

Die Abflußkurve des Limnigraphen 16 weist ein viel flacheres Abflußspektrum auf: Minimum : Maximum = $0,01 \text{ m}^3/\text{s} : 0,91 \text{ m}^3/\text{s} = 1 : 91$. Der Karsteinfluß ist unverkennbar, doch ist er gemildert durch den Anteil an Talgrundwasser. Dieses entsteht nur zum Teil aus eingesickertem Muotawasser, zum größeren, wenn nicht zum größten Teil aus Karstwasser, das aus mehreren Spalten im Felsuntergrund in die Schotter hochquillt. Dies zeigt sich durch das Auftreten von Markierungstoffen in praktisch allen Quellen der Region Balm – Fugglen und durch die großen Konzentrationsunterschiede von Quelle zu Quelle.

Die Flußlimnigraphen 6a und 23 zeigen ein Regime, das stark durch die beiden Elektrizitätswerke beeinflusst wird. Nr. 23, der Limnigraph flußabwärts des EW Bisisthal, zeigt während des Turbinierens des Wassers aus dem Tagesausgleichsbecken Sahlisalp mit 50.000 m^3 Inhalt Spitzen von ca. $5 \text{ m}^3/\text{s}$ über dem Basisablauf der Muota. Das ist besonders deutlich im Winter zu beobachten, wenn der Abfluß ohne das Unterwasser des EW nur noch $0,2$ bis $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt. Die Maximalwerte liegen während der Schneeschmelze im Mai und Juni in den Hochlagen über 1500 m ü M bei $40 \text{ m}^3/\text{s}$ und erreichen kombiniert mit einem Warmlufteinbruch und starken Niederschlägen auch nahezu $50 \text{ m}^3/\text{s}$. 1979 brachte verglichen mit anderen Jahren keine Höchstwerte nahe dem absoluten Maximum.

Das Muotawasser wird unterhalb des Limnigraphen 23 gefaßt und in das 50.000 m^3 fassende Tagesausgleichsbecken Mettlen abgeleitet, und zwar ohne Restwasserverpflichtung. Deshalb ist unterhalb des Stauwehrs das Muotabett bis zur unteren Steinweidbrücke während des Winters normalerweise monatelang trocken, im Spätsommer und Frühherbst jedoch nur während Stunden, weniger häufig während mehrerer Tage. Zwischen der unteren Steinweidbrücke und der Zwingsbrücke tritt vor der Stirn des Bergsturzes aus der Nordseite des Wasserberges das Grundwasser in zahlreichen Quellen zutage und bildet einen ansehnlichen Bach. Dieses Wasser versickert jedoch in der Regel zwischen den Blöcken der Steilstrecke und der allfällige Rest im Kiessammler unmittelbar vor dem Becken Balm – Fugglen. Westlich der mächtigen Mauer (s. Fig. 35) tritt es im Muotabett und im Talboden an vielen Stellen wieder aus, auch im Winter, wenn während Monaten kein Wasser mehr die Muota hinunterläuft und auch die Quellen oberhalb der Zwingsbrücke zum großen Teil versiegt sind. Das weist wiederum darauf hin, daß das Grundwasser im Winter durch die dann ebenfalls spärlicher fließenden Karstwasser aufgefüllt wird. Das läßt vermuten, daß die theoretisch zu erwartende hydrogeologische Barriere beim Guggenhürli tatsächlich als Schwelle vorhanden ist. Im Muota-Limnigraphen 6a im Becken Balm-Fugglen liegt während der winterlichen Trockenzeit der gemessene Abfluß zwischen $0,1$ und $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, im Herbst zwischen $0,2$ und $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieses Wasser stammt restlos von den Quellen, die in den letzten 300 bis 400 m vor dem Limnigraphen ins Muotabett austreten. Fließt dagegen das Muotawasser in diesen Bereich hinunter, dann steigen die Wassermengen, deren Spitzen im Winter $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$, während der Hochgebirgsschneeschmelze $35 \text{ m}^3/\text{s}$ erreichen. Auch diese Zahlen stammen aus dem Jahre 1979 und liegen noch tief unter den absoluten Maxima.

Der Muota-Limnigraph 6a im Becken Balm – Fugglen wurde oberhalb des Unterwassers des EW Hinterthal errichtet. Die registrierten Werte der turbinierten Wassermengen von $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ vom Ausgleichsbecken Mettlen her zuzüglich $1 \text{ m}^3/\text{s}$ aus dem Hürital können beim EW abgerufen und zu den in 6a gemessenen Mengen zugezählt werden.

3.1.2. Beziehung von Niederschlag und Abfluß

Über die selbstverständliche Feststellung hinaus, daß der Abfluß eine Funktion des Niederschlages und der Evapotranspiration ist, stellen sich einige Fragen, die zusätzliche Ergebnisse zeitigen können. Dazu gehören z. B. die Verzögerung des Einsetzens der Zunahme des Abflusses während eines Starkregens oder das Eintreffen der Hochwasserspitzen und die Art und Weise des Anstiegens des Abflusses oder das Verhalten während der Schneeschmelze (s. Tafel II).

Im voll entwickelten nackten Karst wird das Wasser eines Starkregens im Verlaufe weniger Minuten im Erdinnern verschwinden und dem Gefälle folgend sich auf hydrographisch kürzestem Weg durch die vadoso Zone zum Karstwasserkörper hinunterbewegen. Die Oberfläche des Karstwasserkörpers ist der Vorfluter für die Zubringer. In der phreatischen Zone fließt das Wasser in einzelnen mehr oder weniger selbständigen Gerinnen und nicht als hydrogeologische Einheit wie in den Grundwasserkörpern der Talschotter der Quelle zu. Hier ist die Fließgeschwindigkeit vor allem eine Funktion des Querschnittes, des Wasserangebotes und der Reibung und damit des Druckgefälles. Es kann – es muß nicht! – ein langsames, aber ebensogut ein schnelles Fließen sein. Im Hölloch im Areal II, auf das sich die folgenden Überlegungen stützen, steigt bei starkem Hochwasser in 4 bis 5 km Abstand vom Schleichenden Brunnen der Hochwasserspiegel bis zu 180 m über den winterlichen Wasserstand hinaus, was einem mittleren Gefälle von 4,5% bis 5,5% entspricht. Dieses Gefälle wird allerdings durch Engstellen in einzelne Stufen zerlegt (A. BÖGLI, 1978, 1980). Darum steht bei Hochwasser der Wasserspiegel in der Nähe des Einganges immer noch nahezu 100 m über dem Talboden.

Unter Normalbedingungen kann man im Hölloch zahlreiche aus der phreatischen Zone aufsteigende Piezometerröhren beobachten, deren Querschnitte bis zu 50 m² groß sind. Tauchversuche führten im „Zürichsee“ (s. Fig. 12) zum Nachweis eines mittelgroßen Ganges 20 m unter der Wasseroberfläche, während beim Fjord am unteren Ende des großen Osiriganges auch in einer Tauchtiefe von 40 m kein Ende des abwärts führenden Ganges zu erkennen war. Ein vollaktives Gerinne wurde dabei nicht erreicht. Diese Piezometerröhren werden erst aktiv, wenn das hochsteigende Wasser einen höher gelegenen Abfluß erreicht oder wenn von hinten her dieser Gang in einen Hochwasserstrom einbezogen wird. Wegen der nach NW einfallenden Schratzenkalke ergibt sich im Niveau des Karstwasserkörpers ein nahezu 7 km langer und 200 bis 300 m breiter Streifen, durch den das anfallende Wasser SW-wärts zum Schleichenden Brunnen hin abfließen kann.

Bei der Überprüfung des Abflusses beim Limmigraphen 13 hat sich gezeigt, daß sich der Pegel erst Stunden nach dem Einsetzen des Niederschlages aufwärts zu bewegen beginnt. Als Beispiel sei das Unwetter vom 3. August 1979 herangezogen. Nach einer wochenlangen Trockenzeit brachte ein Gewitterregen zwischen 14.15 Uhr und 16.15 Uhr beim EW Hinterthal (Becken von Balm - Fugglen) eine Niederschlagsmenge von 26,7 mm und beim EW Bisisthal von 38,5 mm. In den Hochlagen unseres Untersuchungsgebietes (Areale II, VII, VIII) muß sie noch beträchtlich größer gewesen sein. Beim Limmigraphen 13 aber nahm der Abfluß noch bis 18.00 Uhr weiter ab, somit zwei Stunden über die Dauer des Starkregens hinaus, während die Muota schon seit 15 Uhr Hochwasser führte. Dann stieg der Pegel schnell hoch, erreichte um 22 Uhr eine Abflußhöhe von 2,33 m³/s und um 5 Uhr anderntags den Peak mit 3,16 m³/s. Danach senkte sich der Abfluß zuerst schnell und dann immer langsamer und wurde am 8. August durch ein neues Hochwasser abgelöst.

Es sei versucht, dieses Verhalten aus den bekannten Gegebenheiten im Muotatal, vor allem im Hölloch, zu klären. Der Peak dürfte in erster Linie auf den großen Niederschlag über den nackten Karrenfeldern der Twärenen (2000 ± 300 m ü M) zurück-

zuführen sein. Der Abstand von der Austrittsstelle des Schleichenden Brunnens beläuft sich auf 7 km. Daraus errechnet sich eine Abstandsgeschwindigkeit von 467 m/h. Diese übertrifft die größten Abstandsgeschwindigkeiten auf der Glattalp vom Juli 1947 und 1954 (Hochwassersituation) um ca. 100 m/h. Dort wurden die Geschwindigkeiten durch das Eintreffen des Fluoreszeins bestimmt. Die große Abstandsgeschwindigkeit macht es unwahrscheinlich, daß der Peak auf das Eintreffen des Wassers von der Twärenen her zurückzuführen ist. Die Markierung des Wassers vom 28. 12. 1956 im Schluchtgang (s. Abschn. 2.2.1.) fand bei 25 % vadosem und 75 % phreatischem Fließweg statt. Das läßt die Erklärung zu, daß der Peak auf eine Druckwelle zurückgeführt werden könnte. Solche wurden schon mehrfach gemessen und zeigten Werte zwischen 500 und 1500 m/h (A. BURGER, 1959; H. TINTANT, 1958; A. BOURGIN, 1946). Die Abstandsgeschwindigkeit von 467 m/h setzte sich dann zusammen aus der Fließgeschwindigkeit des vadosen Wassers von der Oberfläche zum Karstwasserkörper einerseits und der Geschwindigkeit der Druckwelle durch den phreatischen Bereich andererseits. Nach Tab. 4 floß das Wasser während der Hochwasserzeit (Anfang Juli) viermal schneller durch das Bergesinnere als bei Niedrigwasser. Übertragen wir die Ergebnisse vom schon erwähnten Versuch im Hölloch von 1956 auf den jetzigen Fall, dann ergeben sich die folgenden Werte: Die Strecke Twärenen - Karstwasserkörper bzw. vadose Zone beträgt ca. 2000 m, für welche die vierfache Fließgeschwindigkeit vom 1. Teil des Versuches 1956, das sind 180 m/h, eingesetzt werden. Dafür werden vom Wasser 11 Stunden benötigt. Es verbleiben für die phreatische Zone von 6000 m Länge - das Wasser fließt zuerst generell gegen NW und dann gegen SW - noch rund 4 Stunden zur Verfügung bis zum Peak, was einer Abstandsgeschwindigkeit von 1500 m/h entspricht. Das gilt nur für einen kleinen Bereich, vermutlich jenen, der als letzter zur Auswirkung kommt. Dieser Wert stimmt gut mit den anderswo gefundenen überein. Aus den Abflußkurven lassen sich die Einflüsse der Schneeschmelze gut erkennen. Sie setzten 1979 am Ende der zweiten Maiwoche ein und endeten am 23. Juni, kurz unterbrochen durch Kälte- und Regenperioden. Beim EW Bisisthal (780 m ü M) traten in der ersten Maiwoche Maximaltemperaturen von 1,6 bis 12,4° C, in der zweiten solche zwischen 10,0 und 17,6° C auf; die Minimaltemperaturen lagen bei -4,0 bis 0° C bzw. -0,4 bis 4,8° C. Damit war auf den über 1000 m höheren Berglagen keine Schneeschmelze zu erwarten. Aber schon am 13. Mai wurden 18° C/3° C gemessen und blieben bis zum 21. über 20° C (bis 26° C) Maximalwert. Mit dem 13. Mai setzte denn auch die Tagesperiodik des schmelzbedingten Abflusses ein. Sie setzt neben warmer Luft auch Sonnenschein voraus. Stärkere Abkühlung (bis 13°/0° C) oder länger dauernde Regen lassen die Tagesperiodik aussetzen. Größere Niederschläge über 20 mm traten zwischen dem 8. und 23. Juni an 8 Tagen auf (max. 48,6 mm). Trotzdem setzte die Periodik jeweils bei genügend Sonnenschein und Wärme sofort wieder ein. So abrupt sich dieser Abflusstyp einstellte, so unvermittelt endete er auch. In der Annahme, das tägliche Maximum des Schmelzwasserabflusses werde meist um 14.00 Uhr erreicht, dauerte es 10 Stunden bis zum Auftreten der Hochwasserspitze um Mitternacht. Sicherlich verschob sich der Zeitpunkt des angenommenen Maximums mit der wechselnden Bewölkung, doch blieb die Periodik erhalten. Die Werte wurden kritisch geprüft, denn es wäre auch eine Periode von 24 + 10 Stunden denkbar gewesen. Aber es konnten keine Indizien für eine so lange Periodik gefunden werden. Die Spitze kann, wie wir das schon weiter oben zeigten, nicht die Ankunft des Schmelzwassers beim Limnigraphen anzeigen, sondern sein Eintreffen im phreatischen Raum, wodurch als Druckeffekt der erhöhte Abfluß ausgelöst wurde. Ein Vergleich der Stationen 13, 14, und 16, die eine nähere Untersuchung gestatteten, ergibt in der Periodik eine große Übereinstimmung, was bei der Ähnlichkeit der Witterung, der Distanzen und der hydrogeologischen Bedin-

gungen (Karst) zu erwarten war. Die Stationen unterschieden sich jedoch im Ausmaß der induzierten Spitzen, bezogen auf den Basisabfluß, der durch die Minima festgelegt ist. Beim Linnigraphen 13 machten die Ausschläge 50 ± 10 % des Basisabflusses aus. Von den 24 Tagen wurden an fünf kleinere Spitzen und an einem höhere festgestellt. Der Mittelwert liegt bei 46%, was in Anbetracht des Basisabflusses von 3 bis $8 \text{ m}^3/\text{s}$ beträchtlich ist. Das liegt wahrscheinlich an der Einheitlichkeit des Einzugsgebietes, vor allem am Überwiegen der SW-Exposition. Der Abfluß bei der Station 14 macht nur ein Zehntel der Wasserführung der Nr. 13 aus. Die Schmelzwasserspitzen liegen jedoch zu vier Fünftel unter 20 % des Basisabflusses. Auf eine Deutung sei verzichtet, da die Nr. 14 nur einen kleinen Teil des Abflusses aus dem Einzugsgebiet abgibt. Die Nr. 16, welche das Wasser im Talboden links der Muota (Fugglen) erfaßt, zeigt durch die Reaktion auf das Schmelzwasser eine starke Beeinflussung durch Karstquellen unter den Talschottern. Dadurch werden die durch die Markierung gewonnenen Resultate voll bestätigt. Die Spitzen sind in ihrer Größe sehr verschieden und liegen zwischen 10 % und 90 % des Basisabflusses. Die Linnigraphen an der Muota, 23 und 6a, lassen die Schmelzwasserperiodik kaum erkennen; sie wird durch den Stoßbetrieb der beiden Elektrizitätswerke überdeckt.

3.2. Physikalisch-chemische Langzeituntersuchungen (A. BÖGLI)

Um die Stoffkonzentrationen im Wasser im Jahresablauf zu erfassen, wurden während des hydrographischen Jahres 1978/79 zweimal monatlich Wasserproben genommen.¹⁾ Es wurden titrimetrisch die Konzentrationen von Ca^{++} , Mg^{++} , Gesamthärte GH und Karbonathärte KH bestimmt, dazu die Temperatur und der pH-Wert. Als weiteres Ziel wurde die Beschaffung von Grundlagen für eine spätere Quantifizierung des Lösungsabtrages im Gebiet angestrebt. Die Landeshydrologie in Bern richtete zu diesem Zwecke dankeswerterweise ein Linnigraphennetz von 5 Stationen ein, um die Abflußwerte bestimmen zu können.

Ursprünglich waren 29 Probenstellen vorgesehen. Davon fielen vier wegen allzu großer Beprobungslücken aus. Ursache vor allem war das Trockenfallen im Winter und in trockenen Perioden im Sommerhalbjahr und Verschmutzung durch Fremdwasser. Ihre Analysenwerte wurden archiviert. Weitere fünf wiesen ins Gewicht fallende Lücken auf, doch wurden sie zu Vergleichen gelegentlich herangezogen. Es standen somit 20 Probenstellen mit vollständiger Analysenserie zur Verfügung.

Allen Quellwässern ist gemeinsam der relativ hohe Kalkgehalt während des Hochwinters, eine Übergangszeit mit starken Konzentrationsschwankungen im Rhythmus mit der Schneeschmelze in tiefen Lagen, tiefe Konzentration während der Schneeschmelze in den Lagen über 1500 m ü M und ein langsamer, schwankungsreicher Anstieg bis zum winterlichen hohen Wert.

Zur Analyse dieses Verhaltens (Fig 16 – 21) bietet sich das an der Oberfläche sehr gut erforschte Areal II an, in dessen Untergrund das Gangnetz des Hölloch-Systems von 142 km einen Einblick in das Verhalten des Wassers gewährt (A. BÖGLI, 1953, 1960b, 1964a, 1966, 1976a, 1978, 1980).

¹⁾ Für die Mitorganisation bei der Probenahme danken wir Herrn W. Burkhalter (AGH), für die Mitwirkung bei der Beschaffung der Langzeitproben den Herrn F. Bossard und F. Renner, für das Zeichnen der Figuren Fr. S. Ghirlanda und den Herren U. Groner und P. Stalder und für die Mithilfe beim Manuskript Fr. R. Müller.

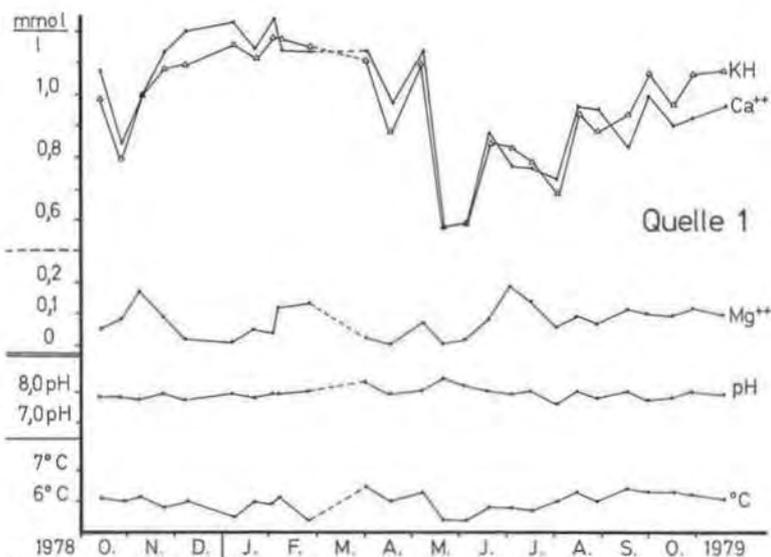


Fig. 16: Quelle 1 - Ganglinien von Wassertemperatur, pH-Wert, Karbonathärte, Ca⁺⁺ und Mg⁺⁺ im hydrologischen Jahr 1978/79 (Lage s. Fig. 35).

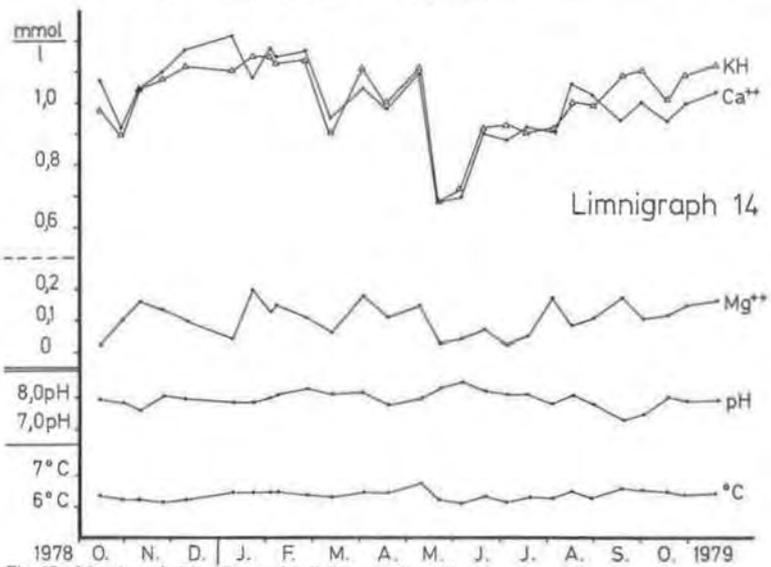


Fig. 17: Limnigraph 14 - Guggenhürli (Text s. Fig. 16).

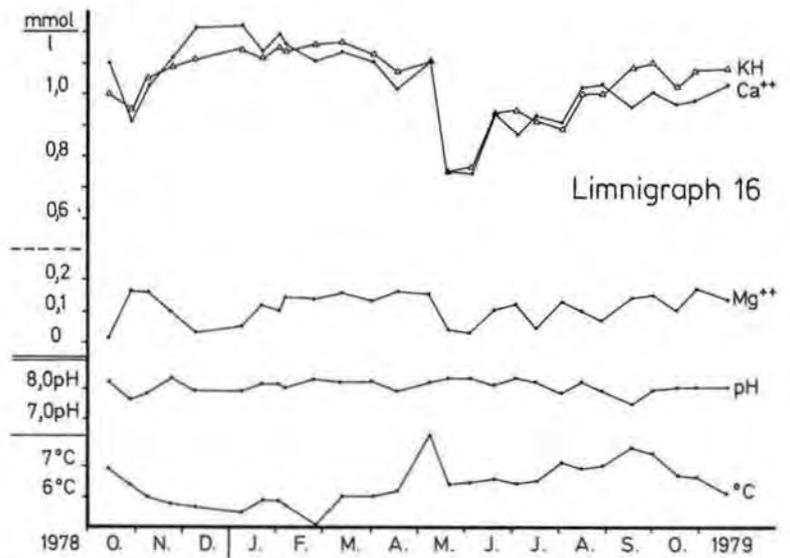


Fig. 18: Limnigraph 16 - Fugglen-Ost, gemeinsamer Abfluß von verschiedenartigen Quellen; der Konzentrationsgang während der Schneeschmelze weist auf einen starken Karstwasseranteil hin (Text s. Fig. 16).

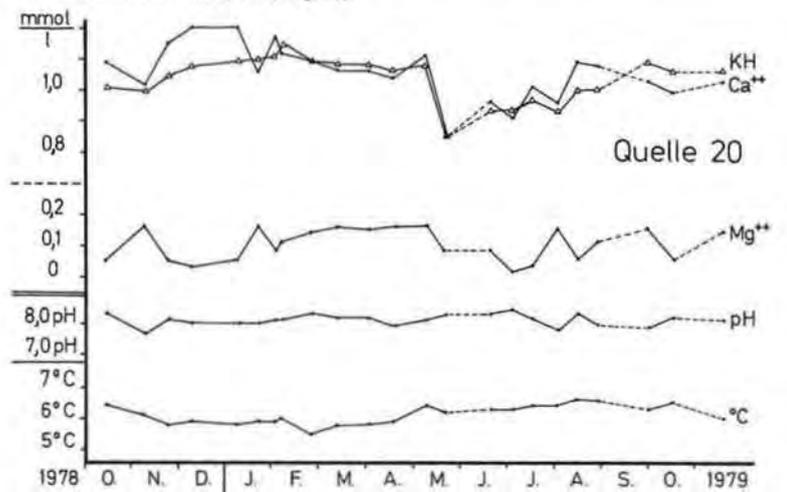


Fig. 19: Quelle 20 - Abfluß aus einer Quellgruppe am Fuße des Schutthanges des Wasserberges, Mischwasser von Talgrundwasser und Karstwasser, wobei ersteres überwiegt (Text s. Fig. 16).

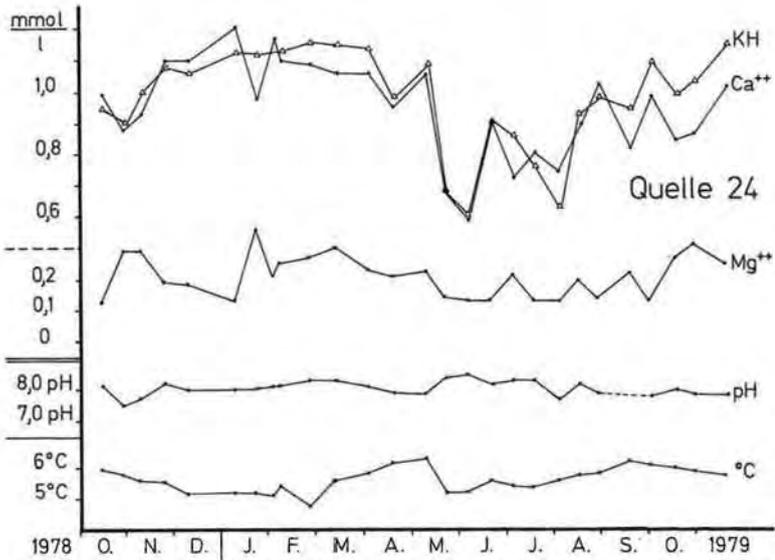


Fig. 20: Quelle 24 – Hinter Seeberg. Karstwasseraufstoß durch grobe Schotter aus dem Quintner Kalk (Text s. Fig. 16, Lage s. Fig. 37).

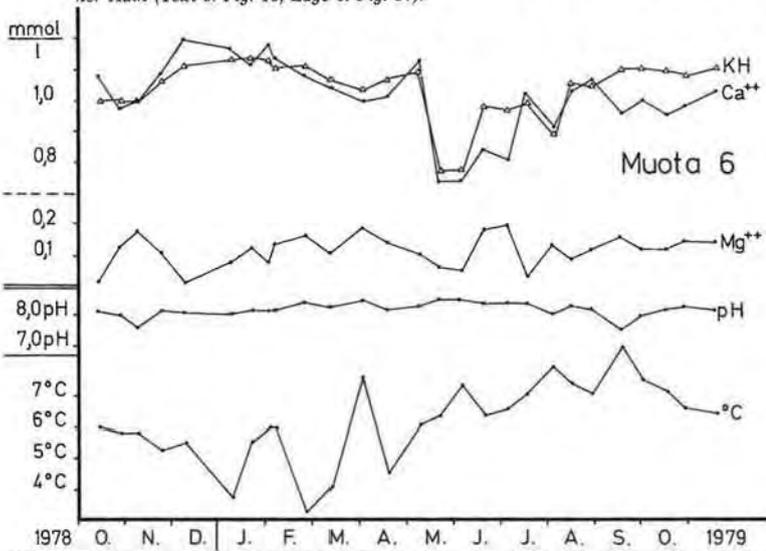


Fig. 21: Muotawasser. Es unterscheidet sich vom Karst- und Talgrundwasser nicht so sehr in den Konzentrationen als vor allem im Temperaturgang mit Ausschlägen von 3,2°C bis 8,0°C (Text s. Fig. 16).

Die Detailanalyse ergibt:

- a) Hochwinter (Dezember bis Februar): Karbonathärte auf dem Höhepunkt mit $1,15 \text{ mmol/l} = 115 \text{ ppm}$. Ursache: Der Wasserabfluß aus dem nackten Karst setzt aus; der Wasserabfluß sinkt auf sein Minimum, ebenso der Karstwasserspiegel; das Verhältnis Wasseroberfläche/Wasservolumen ist am größten und damit auch der CO_2 -Austausch zwischen Höhenluft und Wasser. Das aus dem Waldkarst ausfließende Spaltenwasser und das einsickernde Wasser aus den Waldböden, Weiden und Wiesen weist Kalkgehalte zwischen 120 und 200 ppm auf. Die Mischung dieser Wässer ist außerdem kurzfristig aggressiv und bewirkt zusätzliche Kalklösung (Mischungskorrosion).
- b) Frühjahr (März/April): Karbonathärte zwischen 95 und 100 ppm. Tauwetter in den unteren Lagen bis ca. 1200 m ü M abwechselnd mit Schneefall; bei Schneeschmelze großer Wasserandrang auf den Karstwasserwegen; das Verhältnis der freien Karstwasseroberfläche zum Wasservolumen verschlechtert sich; der CO_2 -Austausch Wasser/Höhlenluft ist behindert, weil sich wegen des hohen Wasserstandes die Siphons schließen und den sonst üblichen Luftaustausch unterbinden. Der CO_2 -Gehalt der Höhlenluft, der sonst durch den Höhlenwind auf dem Außenwert von ca. 0,035% gehalten wird, paßt sich dem Wasser an und steigt auf 0,09 bis 0,12 Vol.-%.
- c) In der Zeit der großen Schneeschmelze über 1500 m ü M erreicht der Abfluß sein Maximum, ebenso seine Geschwindigkeit; das Verhältnis freie Karstwasserfläche zum Wasservolumen kommt zu einem Minimum, konsequenterweise auch der CO_2 -Austausch zwischen Höhlenluft und Wasser. Das aus dem Waldkarst ausfließende Bereiche unter dem nackten Karst und ist daher kalkarm, kann aber wegen den vorher angegebenen Gründen kaum CO_2 aufnehmen. Der Kalkgehalt in der Quelle liegt daher wesentlich unter dem Gleichgewichtsgehalt zur Höhlenluft. Die Probenstelle 1 weist einen Kalkgehalt von 57 ppm, die Nr. 4 einen solchen von 57 ppm auf. Die Nummer 5 jedoch kommt auf 70 ppm, weil sich hier zum Karstwasser noch Grundwasser und kalkreiches Bodenwasser (Wirkung des biogenen CO_2 infolge erhöhter biologischer Aktivität in den Wiesen des Talgrundes) beimischt. Trotzdem liegt der Kalkgehalt beim Gesamtabfluß in Nr. 13 bei 60 ppm, weil das Karstwasser den Hauptteil ausmacht. Je größer der Anteil an oberflächennahem Wasser, um so höher der Kalkgehalt, z. B. 85 ppm in Nr. 20.
- d) Sommer und Frühherbst weisen eine in Wellen ansteigende Konzentration an Karbonathärte auf. Regen fördert bei hohen Temperaturen die biologische Aktivität und damit die Entstehung biogenen Kohlendioxids und zusätzlich gelösten Kalkes. Im Oktober fällt in den höheren Lagen auch schon Schnee, so daß das Angebot an kalkarmem Wasser aus dieser Region zurückgeht. Der Anteil des Wassers aus den bewachsenen Gebieten steigt, und damit der Kalkgehalt. Gegen Ende November ist der winterliche Hochstand wieder erreicht.

Im Muotatal kann man auf Grund dieser Langzeitmessungen keine merklichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Einzugsgebieten feststellen.

Im Mg^{++} -Gehalt kann zur Zeit noch keine Gesetzmäßigkeit erkannt werden. Dies hängt wahrscheinlich mit der wesentlich geringeren Lösungsfreudigkeit der Mg^{++} -Ionen im Dolomitekristallgitter zusammen (A. GERSTENHAUER & K. H. PFEFFER, 1966).

Die pH-Werte sind bemerkenswert konstant und bewegen sich nur um $8 \pm 0,5$.

Die Temperaturen der meisten Quellen liegen bei $6^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, jene der Gruppe 8, 9, 14 um 0,5 Grad höher. Das weist auf einen geringen Einfluß von der Oberfläche her. Wo oberflächennahes Wasser in wesentlichen Anteilen beigemischt wird, da ergeben sich größere Schwankungen, so bei Nr. 11 zwischen $4,5$ und $8,2^\circ\text{C}$. Bäche und Flüsse folgen dem üblichen Temperaturregime mit Schwankungen zwischen $3,3^\circ$ und 8°C .

3.3. Ergebnisse von Messungen des Gehalts an Deuterium, Sauerstoff-18 und Tritium in Wasserproben (H. MOSER, W. STICHLER, D. RANK, V. RAJNER)

3.3.1. Einleitung

Im Rahmen der vorbereitenden und begleitenden Arbeiten für den Markierungsversuch Juli 1979 (s. Kap. 4) wurden im August, September und Oktober des Jahres 1978 drei Übersichtsbeprobungen an ca. 90 Brunnen, Quellen und Oberflächenwässern des gesamten Untersuchungsgebietes (s. Tafeln I und IV, Fig. 3 und 32-37) durchgeführt. Im Jahr 1979 sind halbmonatlich Wasserproben aus ca. 25 ganzjährig zugänglichen Entnahmestellen des Untersuchungsgebietes entnommen worden. Alle diese Proben wurden auf ihren Gehalt an den Umweltisotopen Deuterium (^2H), Sauerstoff-18 (^{18}O) und Tritium (^3H) untersucht. Die ^2H - und ^{18}O -Analysen wurden im GSF-Institut für Radiohydrometrie, Neuherberg bei München, die ^3H -Analysen im Geotechnischen Institut der Bundesversuchs- und Forschungsanstalt, Wien, durchgeführt.

Die nachfolgende Diskussion bezieht sich im wesentlichen nur auf die hydrologische Deutung dieser Umweltisotopenanalysen. Die aus Zeitgründen bisher noch nicht mögliche Zusammenschau der Ergebnisse sämtlicher im Untersuchungsgebiet durchgeführter Messungen kann eine neuerliche Beurteilung der Isotopenmeßergebnisse nach sich ziehen.

3.3.2. Grundsätzliches zur hydrologischen Interpretation von ^2H -, ^3H - und ^{18}O -Gehalten im Grund- und Oberflächenwasser

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über die für das Untersuchungsgebiet verwendbaren Grundlagen der hydrologischen Interpretation von ^2H -, ^{18}O - und ^3H -Analysen gegeben. Für nähere Angaben, meßtechnische Einzelheiten und frühere karsthydrologische Anwendungen muß auf die einschlägige Literatur (z. B. J. G. ZÖTL, 1974; H. MOSER et al., 1976; H. MOSER & W. RAUERT, 1980; J. GAT, 1981) verwiesen werden.

Deuterium und Sauerstoff-18

Die hydrologische Anwendung von Messungen des Gehalts der stabilen Isotope ^2H und ^{18}O beruht auf den in natürlichen Wässern auftretenden unterschiedlichen Konzentrationen ($^2\text{H}/^1\text{H} = 90 \cdot 10^{-6}$ bis $170 \cdot 10^{-6}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 1880 \cdot 10^{-6}$ bis $2010 \cdot 10^{-6}$). Diese Schwankungen sind hauptsächlich durch Isotopenfraktionierungen bei Phasenumwandlungen (Verdunstung, Kondensation u. a.) bedingt, die durch Dampfdruckunterschiede der Moleküle $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ und H_2^{18}O gegenüber $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ hervorgerufen werden. Im natürlichen Wasserkreislauf verursacht diese Isotopenfraktionierung folgende Effekte:

- a) Höheneffekt: Mit zunehmender orographischer Höhe tritt eine Abnahme des ^2H - und ^{18}O -Gehalts der Niederschläge auf. Für ^2H beträgt diese Abnahme etwa 2 bis 3 ‰¹⁾ pro 100 m Höhenzunahme. Gründe für diesen Höheneffekt sind die mit der Höhe abnehmende Lufttemperatur, die fortschreitende Ausregnung beim Aufgleiten einer feuchten Luftmasse an einer orographischen Erhebung und die mit zunehmender Fallhöhe steigende Verdunstung der Regentropfen.
- b) Jahreszeitlicher Gang: Der Monatsmittelwert der ^2H - und ^{18}O -Gehalte der Niederschläge erreicht im Sommer ein Maximum, im Winter ein Minimum, wobei die

¹⁾ Der $\delta^2\text{H}$ - bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Wert gibt die relative ‰-Abweichung des Isotopengehalts der Wasserprobe von dem eines Standards (V-SMOW) an. Der ^2H - und ^{18}O -Gehalt von V-SMOW entspricht etwa dem des Meeresswassers. Die Meßgenauigkeit (2σ -Kriterium) beträgt 1 ‰ ^2H - bzw. 0,15 ‰ ^{18}O -‰.

- Differenz im δ -Wert in unserer Klimazone etwa 80 $\delta^2\text{H}\text{-}\%$ bzw. 11 $\delta^{18}\text{O}\text{-}\%$ beträgt. Die Monatsmittel der δ -Werte sind dabei gut mit den Monatsmittelwerten der jeweiligen Lufttemperaturen korreliert. Dagegen können zwischen aufeinanderfolgenden Einzelniederschlägen Differenzen im δ -Wert in der gleichen Größenordnung wie die jahreszeitlichen Schwankungen der Monatsmittelwerte auftreten, bedingt durch verschiedene klimatische Bedingungen während der einzelnen Niederschlagsereignisse. Gründe für diese Effekte sind Temperatur- und Feuchteunterschiede während der Bildung und Ausregnung der feuchten Luftmassen.
- c) $\delta^2\text{H}\text{-}\delta^{18}\text{O}$ -Relation: Bei Verdunstungsvorgängen tritt stets eine Anreicherung von ^2H und ^{18}O in der flüssigen Phase auf. Dabei kann eine Verschiebung des in den Niederschlägen gegebenen Verhältnisses zwischen $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Wert ($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + d$) in der Weise auftreten, daß ^{18}O stärker als ^2H angereichert wird, was eine Veränderung des Faktors 8 zu kleineren Werten zur Folge hat. d hängt von den klimatischen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet ab und hat in Mitteleuropa Werte zwischen 8 und 12.

Tritium

Tritium (^3H) ist radioaktiv und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,35 Jahren unter Aussendung niederenergetischer β -Strahlung. ^3H wird in der Atmosphäre auf natürliche Weise in geringen Konzentrationen durch die kosmische Strahlung erzeugt, oxidiert zu Wasser und gelangt so in einer Konzentration von etwa 6 TU¹⁾ in den Wasserkreislauf. Seine heutige hydrologische Anwendung beruht jedoch im wesentlichen auf der ungewollten weltweiten Markierung des Wasserkreislaufs durch die bei den Kernwaffentestserien seit 1952 frei gewordenen ^3H -Mengen. Das Jahresmittel des ^3H -Gehalts in den Niederschlägen stieg dadurch im Jahr 1963 bis auf mehr als das 1000fache des natürlichen ^3H -Gehalts an und liegt derzeit noch bei 50 bis 100 OTU. Der ^3H -Gehalt in den Niederschlägen zeigt auch jahreszeitliche Schwankungen und solche zwischen aufeinanderfolgenden Einzelniederschlägen. Diese sind im wesentlichen nicht wie bei ^2H und ^{18}O auf Isotopenfraktionierungseffekte, sondern auf den jahreszeitlich unterschiedlichen Luftmassenaustausch zwischen Stratosphäre (^3H -Reservoir) und Troposphäre zurückzuführen. Im Monatsmittel zeigt der ^3H -Jahresgang ein Maximum im späten Frühjahr und ein Minimum im Spätherbst.

3.3.3. Ergebnisse der Übersichtsbeprobungen (August, September, Oktober 1978)

3.3.3.1. Gebiet Balm – Fugglen

Die für das Gebiet Balm – Fugglen (Probenentnahmestellen 1 bis 20a, 22) ermittelten ^2H - und ^{18}O -Gehalte der Wasserproben sind im $\delta^2\text{H}\text{-}\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm der Fig. 22 dargestellt. Für die Probenentnahmen im *August* und *September* ergeben sich stark streuende δ -Werte mit relativ hohen Maximalwerten, die dem Isotopengehalt der Sommerniederschläge zuzuordnen sind. Davon abweichend sind lediglich die Proben der Entnahmestellen 10 und 11 mit sehr niedrigen δ -Werten, die möglicherweise auf eine Verzögerung zwischen Niederschlagsereignis und Abfluß hindeuten (s. auch Abschn. 3.3.4.2.d). Bei den im *Oktober* entnommenen Proben tritt dann eine weitge-

¹⁾ 1 TU entspricht einer Aktivitätskonzentration von 0,12 Bq/l und einer $^3\text{H}/^1\text{H}$ -Konzentration von 10^{-16} .

hende Homogenisierung und Abnahme der δ -Werte ein. Der mittlere ^2H -Gehalt aller Proben geht von $-79,6 \pm 5,9^1)$ $\delta^2\text{H}\text{-‰}$ (August) auf $-84,9 \pm 2,2$ $\delta^2\text{H}\text{-‰}$ (Oktober) zurück. Dies zeigt, daß nach dem Abfluß der Sommerniederschläge ein aus den Spalten in die Karsthöhlräume zufließendes Wasser (mit längerer Verweilzeit) austritt.

Die ^3H -Gehalte nehmen im Mittel von 102 ± 9 TU (August/September, 16 Werte) auf 111 ± 3 TU (Oktober, 13 Werte) zu, wobei wie bei den ^2H - und ^{18}O -Gehalten die Schwankungsbreite signifikant abnimmt (Fig. 23). Neben der bereits aus den δ -Werten abgeleiteten Durchmischung der Wässer läßt auch die Zunahme des ^3H -Gehalts auf eine höhere Verweilzeit der im Oktober abfließenden Wässer gegenüber denen im August/September schließen. Allgemein weisen die südlichen Entnahmestellen (Wasserbergseite) höhere ^3H -Werte und damit längere Verweilzeiten auf als die nördlichen (Höllchseite).

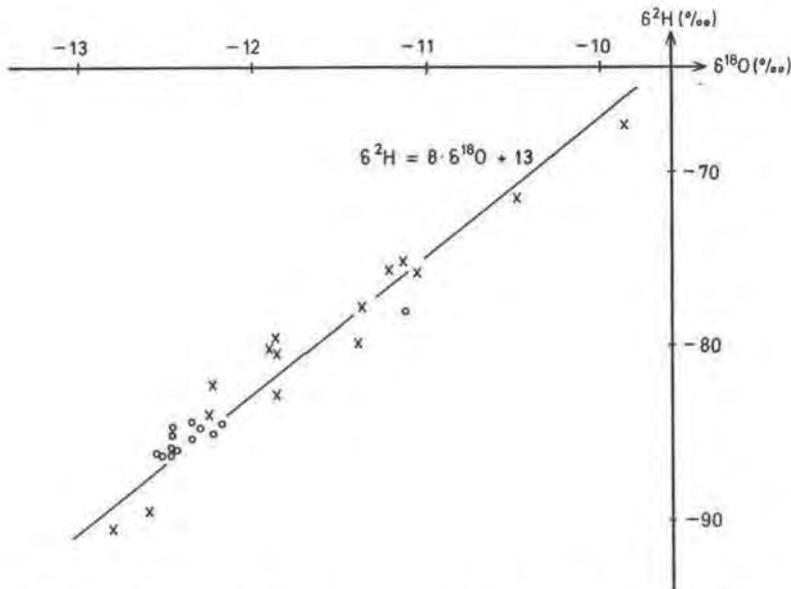


Fig. 22: $\delta^2\text{H}\text{-}\delta^{18}\text{O}$ -Relation von Wasserproben aus dem Gebiet Balm – Fugglen. Probenentnahmen im August/September 1978 (x) und Oktober 1978 (o).

¹⁾ Die angegebenen Schwankungsbreiten sind Standardabweichungen vom Mittelwert. Falls nicht alle in der Übersicht angegebenen Entnahmestellen gemessen wurden, ist die Anzahl der für die Mittelwertbildung herangezogenen Meßwerte angegeben.

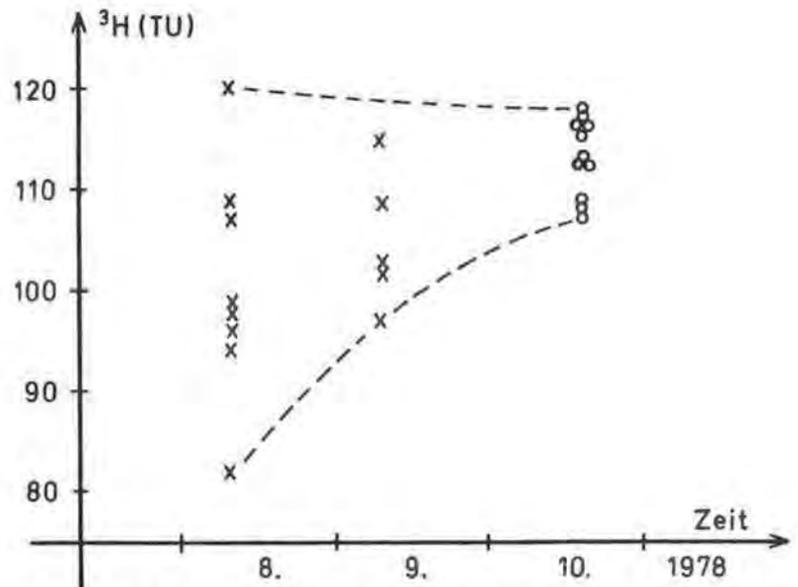


Fig. 23; ^3H -Gehalte von Wasseproben aus dem Gebiet Balm - Fugglen.

3.3.3.2. Gebiet oberhalb Zwingsbrügg

Die im Gebiet oberhalb Zwingsbrügg im Bisistal (Probenentnahmestellen 21, 32 bis 49) gemessenen ^2H - und ^{18}O -Gehalte ergaben weitgehend gleiche δ -Werte (Mittelwert $-85,3 \pm 2,3 \delta^2\text{H}\text{-}\text{‰}$), welche sich von August bis Oktober nicht verändern (Fig. 24). Die Entnahmestelle 46 macht hiervon eine Ausnahme: Ihr ^2H - und ^{18}O -Gehalt nimmt vom September zum Oktober hin stark ab, was im Gegensatz zu den übrigen Wässern dieses Gebietes auf einen direkten Einfluß und eine geringe Verweilzeit des Niederschlagswassers schließen läßt (s. auch Abschn. 3.3.4.2.e).

Die ^3H -Gehalte steigen im Mittel vom September ($110 \pm 2 \text{ TU}$, 4 Werte) zum Oktober ($116 \pm 5 \text{ TU}$, 10 Werte) geringfügig an, was auf eine leichte Zunahme der Verweilzeit der abfließenden Wässer hindeutet.

3.3.3.3. Gebiet Seeberg

Die ^2H - und ^{18}O -Gehalte der Wässer im Gebiet Seeberg (Probenentnahmestellen 24, 25, 51 bis 68) des Bisistals (Fig. 25) zeigen ein ähnliches Verhalten bezüglich ihrer Schwankungen wie im Gebiet Balm - Fugglen (Abschn. 3.3.3.1.): Von August/September bis Oktober fällt der mittlere ^2H -Gehalt von $-76,7 \pm 5,1 \delta^2\text{H}\text{-}\text{‰}$ (13 Werte) auf $-88,8 \pm 4,4 \delta^2\text{H}\text{-}\text{‰}$ (12 Werte) ab, wobei die Schwankungsbreite im Oktober größer als in Balm - Fugglen bleibt. Besonders stark ändern sich im Beobachtungszeitraum die δ -Werte der Oberflächenwasser-Entnahmestelle 60.

Die ^3H -Gehalte (Fig. 26) verhalten sich auch wie im Gebiet Balm - Fugglen (Abschn. 3.3.3.1.): Man beobachtet einen Anstieg von $99 \pm 10,5 \text{ TU}$ (13 Werte) auf 108

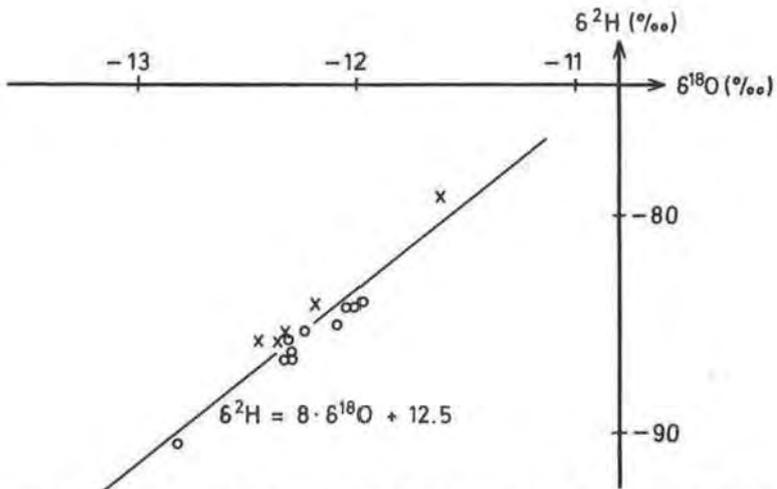


Fig. 24: $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ -Relation von Wasserproben aus dem Gebiet oberhalb Zwingsbrugg. Probenentnahme im August/September 1978 (x) und Oktober 1978 (o).

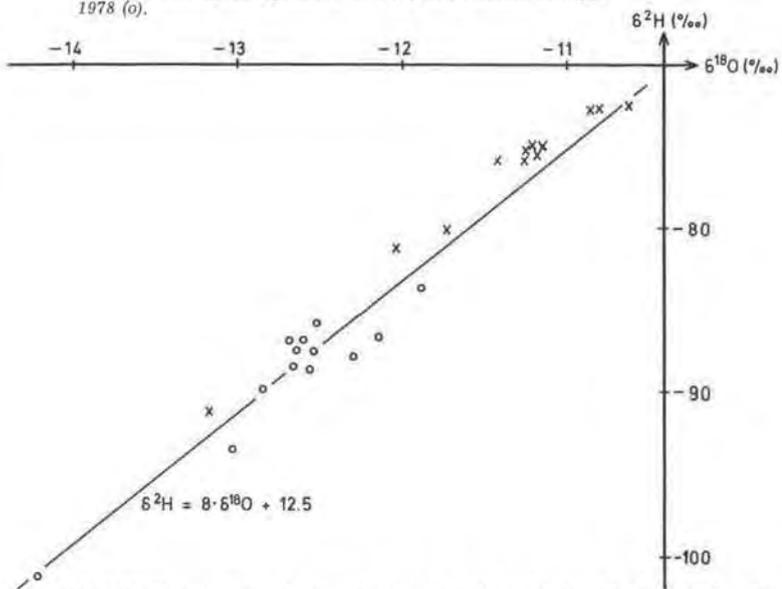


Fig. 25: $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ -Relation von Wasserproben aus dem Gebiet Seeburg. Probenentnahme im August/September 1978 (x) und Oktober 1978 (o).

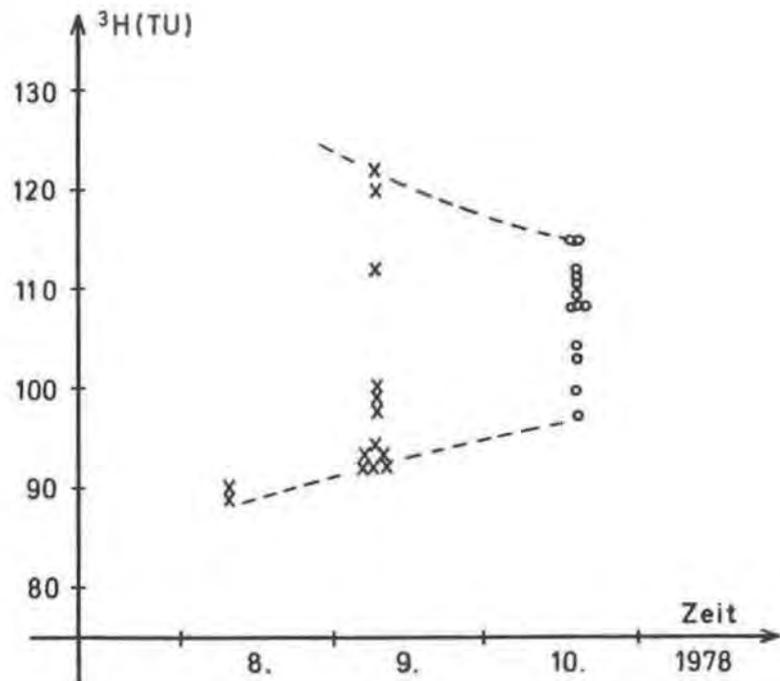


Fig. 26: ^3H -Gehalte von Wasserproben aus dem Gebiet Seeburg.

$\pm 5,5$ TU (13 Werte) bei gleichzeitiger Abnahme der Schwankungsbreite im Verlauf der Monate August bis Oktober. Hydrogeologisch ist deshalb wie im Gebiet Balm – Fugglen zu folgern, daß zum Herbst hin immer mehr durchmischt Wasser mit zunehmender Verweilzeit aus dem Karstkörper ausfließt.

3.3.3.4. Höher liegende Teile des Untersuchungsgebietes

Die im folgenden diskutierten Isotopengehalte von Wässern aus höher liegenden Gebieten sind in Tab. 6 zusammengefaßt. Diese Wässer wurden nur während der Übersichtsbeprobungen im August/September/Oktober entnommen, da die Entnahmestellen nicht ganzjährig zugänglich sind.

Insgesamt fallen die Mittelwerte der ^3H - und ^{18}O -Gehalte vom August/September zum Oktober geringfügig ab, während sich die ^3H -Gehalte leicht erhöhen. Ein direkter, kurzfristiger Einfluß von Niederschlagswasser ist demnach bei den beiden vorliegenden Beprobungen kaum anzunehmen. Die mittleren $\delta^2\text{H}$ -Gehalte zeigen größtenteils eine deutliche Abhängigkeit von der Höhenlage des Gebietes der Entnahmestellen (Fig. 27). Dieser Zusammenhang ist durch den Isotopenhöheneffekt der Niederschläge (Abschn. 3.3.2.) bedingt. Nimmt man einen Isotopenhöheneffekt von $-2,5\delta^2\text{H}\text{-‰}$ pro 100 m Höhenzunahme (s. z. B. H. MOSER & W. STICHLER, 1970) so ergeben sich die in Fig. 27 angegebenen mittleren Höhenlagen der jeweiligen Einzugsgebiete.

Tab. 6: Mittelwerte der ^2H - und ^3H -Gehalte von Wässern aus verschieden hoch gelegenen Teilen des Untersuchungsgebietes. Die zur Mittelwertbildung verwendete Anzahl der Meßwerte ist in Klammern angegeben.

Teilgebiet	Entnahmestellen (Nr.)	Höhenlage (m ü M)	August/September 1978		Oktober 1978	
			^2H -Gehalt ($\delta^2\text{H}\text{-}\text{‰}$)	^3H -Gehalt (TU)	^2H -Gehalt ($\delta^2\text{H}\text{-}\text{‰}$)	^3H -Gehalt (TU)
Huftstetli	(101 bis 104) (115 bis 119)	900–1000	$-81,2 \pm 1,6$ (5)	108 ± 3 (5)	$-84,6 \pm 0,5$ (7)	$111 \pm 4,5$ (7)
Lauwi, Wängi	105 bis 114	1400–1450	$-88,9 \pm 1,1$ (10)	111 ± 6 (10)	$-90,4 \pm 3,3$ (10)	115 ± 4 (10)
Seenalp	131 bis 137	1700–1750	$-88,7 \pm 1,0$ (5)	101 ± 3 (3)	$-89,1 \pm 0,9$ (5)	104 ± 3 (5)
Galtenäbnet	73 bis 76	2000	$-91,5 \pm 3,6$ (4)	$92 \pm 2,5$ (4)	—	—

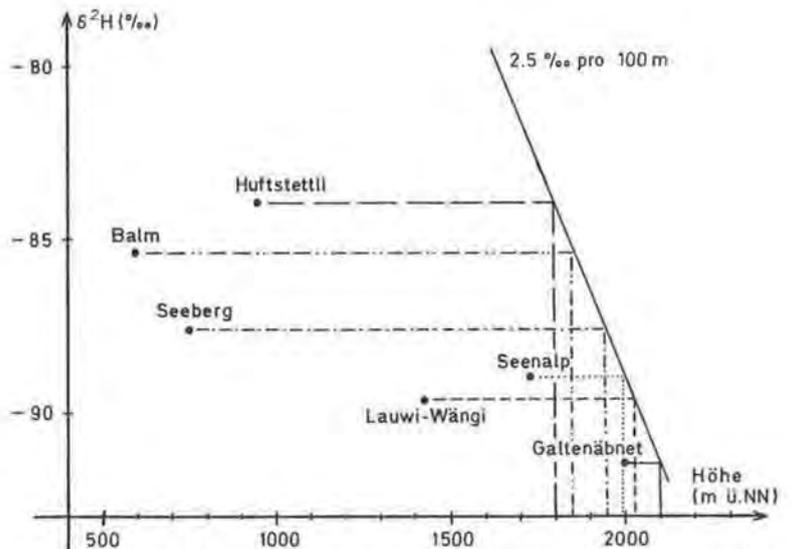


Fig. 27: Mittlere ^2H -Gehalte der einzelnen Quellgruppen (Probenentnahme im Oktober 1978) in Abhängigkeit von den mittleren Höhen der Quellaustritte. Unter den Annahmen eines Isotopenhöheneffekts von $-2,5 \text{ ‰ pro } 100 \text{ m}$ Höhenzunahme und einer mittleren Höhenlage des Einzugsgebietes der Galtenäbnetquellen von 2100 m ü. NN ergeben sich die eingetragenen mittleren Höhenlagen der übrigen Quellgruppen.

Im Gebiet Galtenäbnet zeigt das Wasser der Entnahmestelle 74 einen um 5 ‰ über dem Mittelwert liegenden $\delta^2\text{H}$ -Wert. Demnach müßte das Einzugsgebiet dieser Quelle um 150 bis 200 m niedriger als das der übrigen Quellen liegen.

3.3.4. Ergebnisse der halbmonatlichen Beprobungen im Jahr 1979

In Tafel III sind die Ergebnisse der ^2H - und ^3H -Gehalte aller im Rahmen der halbmonatlichen Beprobung im Jahr 1979 entnommenen Wasserproben dargestellt. Dabei sind jene Jahrgänge in den einzelnen Diagrammen zusammengefaßt, deren zugehörige Entnahmestellen lokal zusammengehören.

3.3.4.1. Jahresmittelwerte der ^2H - und ^3H -Gehalte

Tab. 7 zeigt die Jahresmittel der ^2H - und ^3H -Gehalte der untersuchten Wässer, soweit dies aufgrund der Anzahl der Meßwerte (bzw. der entnommenen Proben) möglich war. Im Gebiet Balm – Fugglen sind die mittleren ^2H -Gehalte weitgehend gleich. Dies läßt auf Einzugsgebiete der einzelnen Quellen in diesem Gebiet schließen, deren mittlere Höhenlagen sich kaum unterscheiden. Aus der geringen Abweichung des Mittelwerts der Entnahmestelle 16 (welche die Wässer der Entnahmestellen 10, 11, 12 und 17 enthält) muß geschlossen werden, daß Wasser mit relativ höherem ^2H -Gehalt, etwa lokal gebildetes Grundwasser, zusätzlich beigemischt ist. Die stark abweichenden Werte an den Entnahmestellen 15, 15a, 15b zeigen, daß diese Wässer eine von den übrigen Wässern im Gebiet Balm – Fugglen verschiedene Herkunft mit einem entsprechend niedrig gelegenen Einzugsgebiet besitzen. Der relativ hohe $\delta^2\text{H}$ -Wert der

Tab. 7: Ungewichtete Jahresmittelwerte der ^2H - und ^3H -Gehalte einzelner Quellen, Brunnen und Oberflächenwässer. Die zur Mittelwertbildung verwendete Anzahl der Meßwerte ist in Klammern angegeben.

Entnahmestelle Nr.	mittl. ^2H -Gehalt ($\delta^2\text{H}\text{-}\text{‰}$)	mittl. ^3H -Gehalt* (TU)
1	-89,1 \pm 8,2 (22)	91
2a	-89,9 \pm 6,9 (18)	91
4 (enthält 1, 2a)	-89,6 \pm 7,7 (24)	89
5	-89,8 \pm 6,7 (21)	91
8	-89,6 \pm 6,1 (22)	97
9	-89,3 \pm 5,5 (24)	97
10	-89,7 \pm 5,5 (16)	100
11	-89,8 \pm 5,0 (18)	101
12	-89,3 \pm 5,1 (22)	98
13 (enthält 4, 5)	-89,8 \pm 7,4 (24)	90
14 (enthält 8, 9)	-89,1 \pm 7,0 (24)	97
16 (enthält 10, 11, 12, 17)	-88,6 \pm 5,3 (24)	97
17	-90,0 \pm 6,4 (18)	96
6 (Muota)	-90,1 \pm 5,9 (24)	97
21	-90,1 \pm 3,9 (20)	98
20	-87,4 \pm 3,4 (21)	100
46	-91,0 \pm 5,3 (18)	93
19 (Muota)	-92,2 \pm 4,8 (24)	94
23 (Muota)	-92,9 \pm 6,2 (24)	94
24	-92,2 \pm 7,0 (24)	90
25	-92,5 \pm 7,3 (22)	89
15	-86,6 \pm 3,4 (24)	103
15a	-85,3 \pm 4,3 (23)	104
15b	-82,8 \pm 4,1 (20)	93

* Extrapoliert auf 24 Werte. Die mittlere Schwankungsbreite über den Beobachtungszeitraum beträgt etwa 10 TU.

Quelle 15b dürfte dabei möglicherweise durch zusätzliche Verdunstung innerhalb des lokalen Einzugsgebietes bedingt sein. Hierfür spricht auch der relativ niedrige Wert $d = 9$ in der Beziehung $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + d$ (in den übrigen Entnahmestellen ergibt sich ein Mittelwert von $d = 12,4$).

Wendet man die in Abschn. 3.3.3.4. zitierte Höhenkorrelation aufgrund des Isotopenhöheneffekts auf die Einzugsgebiete der übrigen Wässer an, so folgt z. B. für die mittlere Höhe der Einzugsgebiete der Wässer der Entnahmestellen 19 und 14 sowie die der Entnahmestellen 14 und 15 ein Unterschied von jeweils 100 m.

Die ^3H -Gehalte liegen im Bereich von 89 TU bis 104 TU, wobei bei höheren ^3H -Gehalten eine längere Verweilzeit im Karstwasserkörper bzw. Grundwasserleiter zuzuordnen ist. Im Gegensatz zu den Wässern der Entnahmestellen 15 und 15a, die eine relativ lange Verweilzeit im Untergrund besitzen, weist das Wasser der Entnahmestelle 15b aufgrund seines niedrigen ^3H -wertes eine kürzere Verweilzeit auf. Allgemein zeigen im Bereich Balm - Fugglen die Quellen der Wasserbergseite höhere ^3H -Gehalte und damit größere Verweilzeiten als die Quellen der Höllochseite. Der gegenüber den Entnahmestellen 19 und 23 höhere ^3H -Wert der Muota bei der Entnahmestelle 6 ist darauf zurückzuführen, daß bei niedriger Wasserführung (und Ableitung des Muota-Wassers zum E-Werk) das im Bachbett der Muota austretende Grundwasser den Isotopengehalt bestimmt.

3.3.4.2. Jahreszeitliche Schwankungen

Die Jahresganglinien der ^2H - und ^3H -Gehalte (s. Tafel III) sind im wesentlichen durch den Isotopen-Input einzelner Niederschlagsereignisse, insbesondere aber der Schneeschmelze bedingt. Da das Schmelzwasser im wesentlichen aus den Winterniederschlägen mit niedrigem ^2H - und ^3H -Gehalt stammt, ergeben Schmelzwasserabflüsse Minima in den Jahresganglinien der Isotopengehalte.

^2H -Gehalte von Schneeprofilen

Zur Erfassung der ^2H -Gehalte des Schmelzwasser-Inputs in den Karstwasserleiter wurden drei Schneeprofile untersucht, die am 29. 3. 1978, am 10. 3. 1979 und am 16. 5. 1979 im Gebiet der Glattalp entnommen wurden. Fig. 28 zeigt die Verteilung der ^2H -Gehalte in diesen Schneeprofilen und die jeweiligen Mittelwerte des Isotopengehalts der Schneedecke. Die Messungen ergeben, daß die Schmelzwasserkomponente des Abflusses einen $\delta^2\text{H}$ -Wert von etwa -111‰ besitzt.

Jahresgänge des ^2H - und ^3H -Gehalts einzelner Gruppen von Entnahmestellen

a) Entnahmestellen 1, 2, 2a, 3, 4, 5, 13, 22 (s. Fig. 35)

Die Jahresgänge des ^2H -Gehalts an den o. g. Entnahmestellen zeigen insgesamt etwa den gleichen Verlauf, wobei bei den Entnahmen am 12. 3., 18. 4., 21. 5. und 5. 6. Minima des ^2H -Gehalts auftreten, die durch Schneeschmelzereignisse bedingt sind. Die Entnahmestellen 1 und 4 besitzen dabei gegenüber den Entnahmestellen 2 und 2a ausgeprägtere Extremwerte, was auf einen höheren Anteil schnell abfließenden Wassers schließen läßt. Da die Entnahmestelle 4 das Wasser der Entnahmestelle 1 enthält, und beide gleich ausgeprägte Extremwerte zeigen, bestimmt der Abfluß an der Entnahmestelle 1 im wesentlichen den Gesamtabfluß bei der Entnahmestelle 4. Teilweise etwas gedämpftere Extremwerte des ^2H -Gehalts wie bei den Entnahmestellen 1 und 4 treten an den Entnahmestellen 5, 13 und 22 auf. Die Jahresgänge an den Entnahmestellen 2, 3 und 22 sind nur durch wenige Meßpunkte belegt und daher nur gering aussagekräftig.

Die durch Schneeschmelzereignisse bedingten Minima des ^3H -Gehalts treten zu gleichen Zeiten, wenn auch nicht so ausgeprägt, wie im Verlauf der ^2H -Werte auf. Die aus der ^2H -Ganglinie gezogenen hydrologischen Folgerungen werden insgesamt durch die ^3H -Gehalte bestätigt. Am 30. 11. tritt ein stark ausgeprägtes Minimum auf, das auch in anderen Entnahmestellen mit schnell abfließendem Wasser beobachtet wird. Dabei dürfte es sich um den Abfluß eines Niederschlagsereignisses mit niedrigem ^3H -Gehalt handeln (s. Abschn. 3.3.4.5.).

b) Entnahmestellen 8, 9, 14 (s. Fig. 35)

Die Jahresgänge des ^2H -Gehalts an den o. g. Entnahmestellen sind weitgehend gleich. Lediglich bei der Entnahmestelle 9 tritt im Oktober und November eine Erhöhung der ^2H -Gehalte gegenüber den Entnahmestellen 8 und 14 auf, was auf eine Mischung von lokal gebildetem Grundwasser oder auf einen Schüttungsrückgang des Karstwasserabflusses zurückgeführt werden kann. Gegenüber der Gruppe a ist der Jahresgang der ^2H -Werte gedämpfter, insbesondere sind die Schmelzwasser-Minima nicht so niedrig, was auf eine höhere Verweilzeit der Wässer hindeutet.

Die ^3H -Gehalte liegen gegenüber denen der Gruppe a höher. Die Jahresgänge zeigen nur geringfügige Unterschiede. Neben den Schmelzwasser-Minima am 12. 3., 18. 4. (wenig ausgeprägt) und 5. 6. tritt am 30. 11. ein stark ausgeprägtes Minimum auf (s. Abschn. 3.3.4.5.).

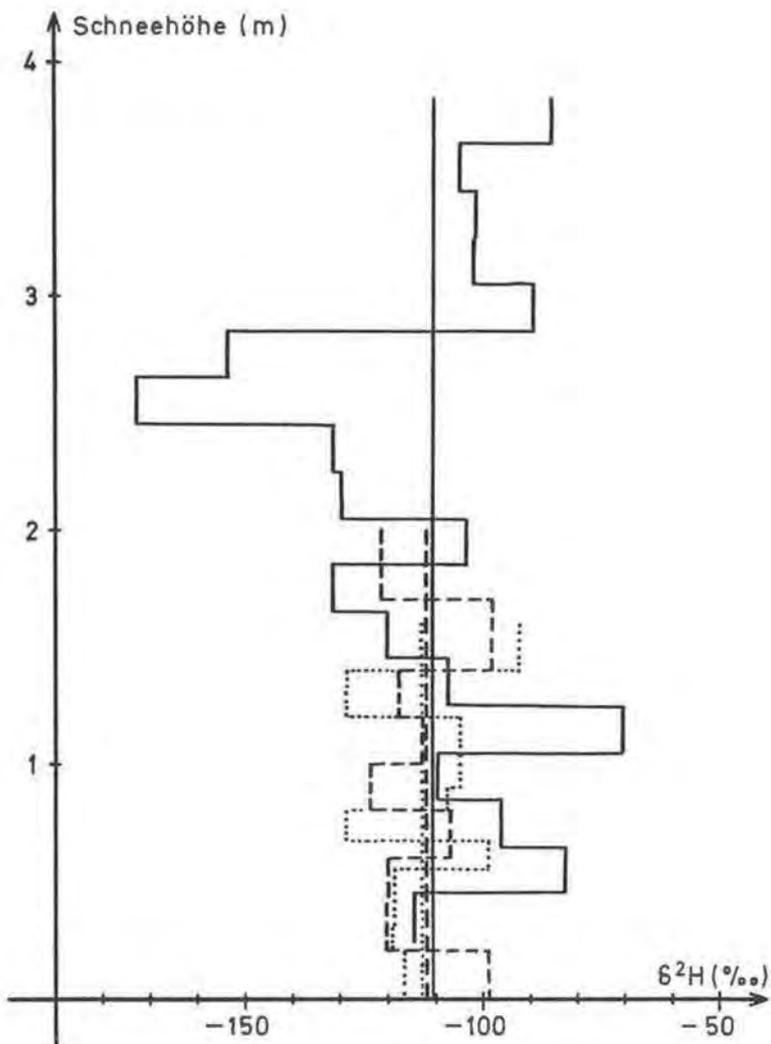


Fig. 28: ^2H -Gehalte der Schneeschichten bei 3 Profilaufnahmen im Gebiet der Glattalp (1500 – 2000 m ü M). Profilaufnahmen am 29. 3. 1978 (—); Profilaufnahmen am 10. 3. 1979 (---); Profilaufnahmen am 16. 5. 1979 (···).

c) Entnahmestellen 15, 15a, 15b, 15c (s. Fig. 35)

Die ^2H - und ^3H -Gehalte dieser Entnahmestellen zeigen einen von den Gruppen a und b weitgehend unterschiedlichen Verlauf mit einem relativ ausgeglichenen Jahresgang mit wenig ausgeprägten Extremwerten. Die ^2H -Gehalte der Entnahmestellen 15, 15a und 15c sind etwa gleich und durchlaufen im Juni ein Minimum; im Gegensatz dazu zeigen die ^2H -Gehalte der Entnahmestelle 15b ab Mai den ganzen Sommer hindurch höhere Werte als die der übrigen Entnahmestellen, was einem lokalen Niederschlagsabfluß zuzuschreiben sein dürfte. Der Jahresgang der ^2H -Werte der übrigen Entnahmestellen dieser Gruppe spricht für einen gegenüber der Schneeschmelze verzögerten Abfluß aus einem größeren Karstwasserreservoir mit längerer Verweilzeit, jedoch relativ niedrig gelegenem Einzugsgebiet gegenüber den übrigen Wässern im Gebiet Balm – Fugglen; der Schmelzwassereinfluß drückt sich in einer allgemein abfallenden Tendenz bis zum Frühsommer aus. Der Verlauf der ^3H -Gehalte bestätigt im allgemeinen diesen Befund. Die im Frühjahr und Herbst gegenüber den anderen Entnahmestellen durchwegs niedrigeren ^3H -Gehalte der Entnahmestelle 15b deuten auf einen Niederschlagsabfluß hin, der durch das lokale Einzugsgebiet der Quelle und die speziellen Abflußverhältnisse zu erklären ist (s. Abschn. 5.1.).

d) Entnahmestellen 10, 11, 12, 16, 17 (s. Fig. 35)

Der Verlauf der ^2H -Gehalte unterscheidet sich für die Entnahmestellen 10 und 11 gegenüber dem der Entnahmestellen 12, 16 und 17. Insbesondere ist in den Entnahmestellen 10 und 11 das durch Schneeschmelze bedingte Minimum am 18. 4. nur wenig ausgeprägt. Daraus läßt sich folgern, daß die Wässer der Entnahmestellen 10 und 11 eine andere Herkunft und Verweilzeit als die der Entnahmestellen 12 und 17 besitzen. Der Verlauf der ^2H -Gehalte der Entnahmestelle 16, welche das Wasser der Entnahmestellen 10 und 11 enthält, unterscheidet sich deutlich von dem der Entnahmestellen 10 und 11. Demnach enthält das Wasser der Entnahmestelle 16 nur geringe Anteile dieser Wässer.

Alle Wässer dieser Gruppe zeigen kein Schneeschmelz-Minimum des ^2H -Gehalts am 12. 3., während das Minimum am 5. 6. bei allen Entnahmestellen ausgeprägt ist. Die ersten Schmelzwässer erscheinen damit später als bei den Gruppen a) und b), was auf ein bezüglich der Ablationsperiode unterschiedliches Einzugsgebiet (z. B. durch unterschiedliche Exposition) hindeutet.

Alle diese Befunde werden auch durch den Verlauf der ^3H -Gehalte bestätigt.

e) Entnahmestellen 21, 21a, 46¹⁾ (s. Fig. 36)

Der Verlauf der ^2H -Gehalte der Entnahmestellen 21, 21a und 46 zeigt nur das Schmelzwasser-Minimum am 5. 6., wohl bedingt durch ein hoch gelegenes Einzugsgebiet dieser Wässer, in dem die Schneeschmelze erst im Frühsommer eintritt. Bei den einzelnen Entnahmestellen ist dieses Minimum verschieden ausgeprägt. Bei den Entnahmestellen 21 (und 21a, soweit Meßpunkte vorliegen) ist es abgeflacht und zeitlich ausgedehnt, während es bei der Entnahmestelle 46 stärker ausgeprägt, aber nicht so tief liegt.

Der Verlauf der ^3H -Gehalte ergibt etwa denselben Befund. Das bei anderen Gruppen auftretende Minimum am 30. 11. ist nur bei der Entnahmestelle 21a ausgeprägt (für die Entnahmestelle 20 liegt kein Meßwert vor).

¹⁾ Die Entnahmestelle 46 führt, wie nachträglich bekannt wurde, Wasser aus einer Fassung oberhalb von Oberschwarzenbach in 1100 m ü M. Das Einzugsgebiet umfaßt einen Teil der westlichen Charetal (mittlere Höhe zirka 1900 m ü M) und eines Bergsturzes (mittlere Höhe zirka 1350 m ü M).

f) Entnahmestellen 6, 19, 20, 23, 24, 25 (s. Fig. 35 und 37)

Diese Entnahmestellen erfassen neben den Quellen 24 und 25 die Muota an verschiedenen Querschnitten (6, 19, 23). In der Entnahmestelle 23 ist der Verlauf der ^2H -Gehalte gedämpft als in den Entnahmestellen 24 und 25, was auf die Mischung mit Muotawasser von oberhalb und anderen Wässern zurückzuführen ist. Die Muota-Entnahmestellen 23 und 19 sind im Verlauf ihrer ^2H -Gehalte weitgehend gleich, wobei das in anderen Quellwässern beobachtete Schmelzwasser-Minimum am 12. 3. nicht ausgeprägt erscheint. An der Muota-Entnahmestelle 6 ist zudem auch das Minimum am 18. 4. weitgehend eingeebnet, die ^2H -Gehalte sind insgesamt gegenüber den Entnahmestellen 23 und 19 höher. Hier liegt also deutlich eine durch Grundwasseraufstöße bedingte Zumischung anderer aus tiefer gelegenen Einzugsgebieten stammender Wasser vor. Bei der Entnahmestelle 20, welche eine Quelle im Gebiet Balm - Fugglen faßt, tritt die Schneeschmelze erst im Mai/Juni in Erscheinung.

Auch im ^3H -Gehalt bestehen kaum Unterschiede zwischen den Entnahmestellen 19 und 23, während die Entnahmestelle 6 abweicht. Dies drückt sich bei den Entnahmestellen 19 und 23 auch im ausgeprägten November-Minimum aus, das rasch abfließendem Niederschlagswasser zuzuschreiben ist. Die Entnahmestelle 6 hingegen dürfte zur gleichen Zeit vorwiegend Grundwasser führen (s. auch Abschn. 3.3.4.5.). Die Entnahmestellen 24 und 25 zeigen einen ähnlichen Jahresgang mit ausgeprägten Minima. Die ^3H -Gehalte liegen im Mittel etwas niedriger.

3.3.4.3. Abschätzung von Verweilzeiten aus den Schwankungen der ^2H -Gehalte im Jahresgang, den mittleren ^3H -Gehalten und dem Abfall des ^3H -Gehalts während des Jahres 1979

Unter der Voraussetzung der Gültigkeit des hydrologischen Exponentialmodells, d. h. unter der Annahme einer exponentiellen Altersverteilung der untersuchten Wasser bei vollständiger Durchmischung an der Entnahmestelle (s. z. B. U. SIEGENTHALER, 1971), kann die mittlere Verweilzeit aus der Relation von Input- und Outputfunktion bestimmt werden. Für die ^2H -Gehalte kann hierzu das Verhältnis der Amplituden im Jahresgang des ^2H -Gehalts der Niederschläge und des Abflusses an der Entnahmestelle verwendet werden. Dabei ergibt sich die mittlere Verweilzeit $\bar{\tau}$ zu

$$\bar{\tau} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{f^2} - 1} \text{ Jahre} \quad (1)$$

wobei f das Verhältnis der Amplituden der Outputfunktion und der Inputfunktion bedeutet.

Tab. 8 zeigt entsprechend ermittelte Verweilzeiten für die Wasser der betreffenden Entnahmestellen. Als Amplitude der Inputfunktion wurde die Schwankungsbreite der ^2H -Gehalte der Monatsniederschläge in Mitteleuropa (etwa 40 $\delta^2\text{H}$ -‰) eingesetzt. Als Amplitude der Outputfunktion wurde sowohl die maximale Schwankungsbreite des ^2H -Gehalts als auch eine Schwankungsbreite, welche sich ohne Berücksichtigung der durch die Schneeschmelze und durch sommerliche Niederschlagsereignisse ausgelösten Extreme im ^2H -Gehalt ergibt, verwendet. Die Einbeziehung der Extrema der ^2H -Gehalte ergibt eine minimale mittlere Verweilzeit, welche auch direkt abfließende Wasser berücksichtigt. Die Eliminierung der Extrema des ^2H -Gehalts führt zur mittleren Verweilzeit des nicht direkt abfließenden Wassers. Als Ergebnis kann festgestellt werden, daß unter Einbeziehung des direkten Abflusses die mittleren Verweilzeiten im Bereich von einem halben bis zu einem Jahr liegen. Ohne direkten Abfluß ergeben sich mittlere Verweilzeiten von 1,5 bis 2,5 Jahren.

Tab. 8: Mittlere Verweilzeiten, berechnet aus den ^2H - bzw. ^3H -Gehalten unter Verwendung des hydrologischen Exponentialmodells.

$\bar{\tau}$ = Verweilzeit des Mischwassers beider Komponenten,

$\bar{\tau}_2$ = Verweilzeit der langfristigen Komponente,

a = Maximaler Anteil des direkt abfließenden Wassers (kurzfristige Komponente).

Entnahmestelle	$\bar{\tau}$ (aus ^2H) (Jahre)	$\bar{\tau}_2$ (aus ^2H) (Jahre)	$\bar{\tau}_2$ (aus ^3H) (Jahre)	a (%)
1	0,5	1,6	1,7	70
2a				
4				
5				
13	0,7	2,1	2,2	70
8				
9				
14				
15	1,0	2,5	2,7	60
15a			1,9	
15b				
10	0,7	2,1	2,3	70
11				
12				
16				
17				
20	1,1	2,3	2,3	50
21				
46	0,6	1,8	1,9	70
24	0,5	1,4	1,6	70
25				
6	0,7	2,0	2,0	70
19				
23				

Für die Bestimmung der mittleren Verweilzeit aus den ^3H -Gehalten wurde als Inputfunktion der Verlauf der ^3H -Gehalte in den Niederschlägen an der etwa 50 km vom Untersuchungsgebiet entfernt gelegenen Niederschlagsmeßstation Meiringen verwendet¹⁾. Die mittlere Verweilzeit $\bar{\tau}$ ergibt sich dabei aus:

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} C_{in}(t-\tau) e^{-\lambda\tau} \frac{1}{\bar{\tau}} e^{-\frac{\tau}{\bar{\tau}}} d\tau \quad (2)$$

wobei $C_{out}(t)$ und $C_{in}(t)$ Output- und Inputfunktion, τ die Verweilzeit der einzelnen Abflußanteile und t die Zeitkoordinate bedeuten.

¹⁾ Für die Überlassung der Meßwerte danken wir den Herren U. SIEGENTHALER und U. SCHOTTERER, Physikalisches Institut der Universität Bern, sehr herzlich.

Als Inputfunktion wird der zeitliche Verlauf der Jahresmittelwerte in den Niederschlägen verwendet. Für das Jahr 1979 ist in Fig. 29 unter Verwendung dieser Inputfunktion der Zusammenhang zwischen c_{out} und $\bar{\tau}$ dargestellt. Tab. 8 enthält neben der Auswertung der ^3H -Gehalte auch die aus Fig. 29 unter Verwendung der ^3H -Jahresmittelwerte 1979 für die Wasser der einzelnen Entnahmestellen ermittelten Verweilzeiten. Die aus den ^3H -Messungen ermittelten Werte stimmen gut mit den aus den

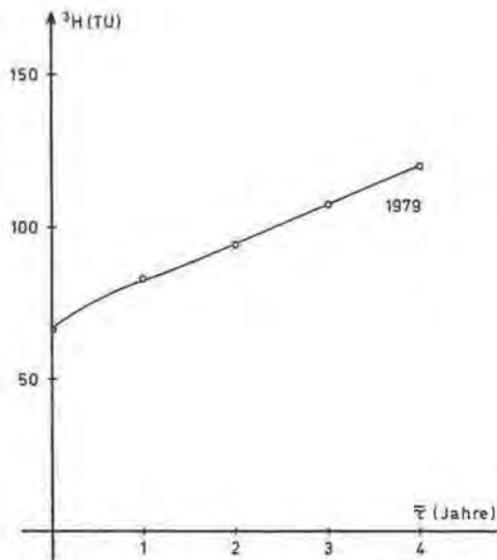


Fig. 29: Zusammenhang zwischen dem Jahresmittelwert 1979 des ^3H -Gehalts und der mittleren Verweilzeit ($\bar{\tau}$), errechnet mit dem hydrologischen Exponentialmodell unter Verwendung der ^3H -Jahresmittelwerte in den Niederschlägen von Meiringen als Inputfunktion.

^3H -Gehalten ohne Berücksichtigung des direkten Abflusses ermittelten mittleren Verweilzeiten überein. Daraus wäre zu schließen, daß, gemessen an der allgemeinen Abnahme der ^3H -Gehalte der Niederschlags-, Oberflächen- und Grundwasser während des Untersuchungszeitraumes, die direkte Abflußkomponente in ihrem ^3H -Gehalt nicht signifikant markiert ist.

3.3.4.4. Bestimmung der Anteile von direkt und verzögert abfließendem Wasser

Geht man von den in Abschn. 3.3.4.3. ermittelten Verweilzeiten von 0,4 bis 1 bzw. von 1,5 bis 2,5 Jahren aus und berücksichtigt die Tatsache, daß die im Untersuchungsgebiet durchgeführten Markierungsversuche Fließzeiten von einigen Tagen erbrachten, so läßt sich der Anteil a des direkt abfließenden Wassers mit Hilfe einer einfachen Zwei-Komponenten-Mischungsgleichung abschätzen:

$$\bar{\tau}_1 a + \bar{\tau}_2 (1-a) = \bar{\tau} \quad (3)$$

wobei für $\bar{\tau}_2$ und $\bar{\tau}$ die in Tab. 8 angegebenen Werte einzusetzen sind. $\bar{\tau}_1$ ist nach dem Ergebnis der Markierungsversuche sehr klein gegenüber $\bar{\tau}_2$ und $\bar{\tau}$ anzunehmen. Die in

Tab. 8 eingetragenen Anteile a des direkten Abflusses liegen zwischen 50% und 70%. Sie müssen, da sie aus den Extremwerten des ^3H -Gehaltes berechnet wurden, als Maximalwerte angesehen werden.

3.3.4.5. Abschätzung des Anteils an direkt abfließendem Wasser am 30. 11. 1979 mit Hilfe der ^3H -Gehalte

Für eine Bestimmung des Anteils von direkt abfließendem Niederschlagswasser können einzelne Niederschlagsereignisse, die in ihrem Isotopengehalt wesentlich vom normalen Jahresgang abweichen, herangezogen werden. Ein derartiges Ereignis trat durch einen Warmwettereinbruch (0° -Grenze bei 3500 bis 4000 m ü M), begleitet von Regenfällen, einige Tage vor der Probennahme am 30. 11. 1979 auf. Dabei wurden an der Niederschlagsmeßstation Meiringen ^3H -Gehalte von ca. 40 TU gemessen. Nimmt man demnach für den rasch abfließenden Niederschlag einen ^3H -Gehalt von 40 TU an und setzt für den Grundabfluß die ^3H -Werte vom 31. 10. (Niedrigwasser) ein, so erhält man für den 30. 11. 1979 aus einer einfachen Mischungsgleichung für die einzelnen Entnahmestellen direkt abfließende Wasseranteile zwischen 0 und 40% (Tab. 9). Die geringen Anteile bei den Entnahmestellen 10 und 11 deuten auf einen relativ hohen Grundwasseranteil dieser Quellen hin. Dies gilt auch für die Entnahmestelle 6 der

Tab. 9: Anteil a des direkt abfließenden Niederschlagswassers, berechnet aus den ^3H -Werten am 30. 11. 1979.

Entnahmestelle	a (%)
10	< 5
11	
12	20
1	40
2a	
4	
5	
13	40
8	
9	
14	0
15	
15a	
15b	<10
21	
21a	40
24	40
25	
46	10
6	10
19	30
23	

Muota, die zu diesem Zeitpunkt hauptsächlich aufstoßendes Grundwasser führt. Die Quellengruppe 15, für welche nach Tab. 8 die größte mittlere Verweilzeit errechnet wurde, weist am 30. 11. kein Minimum des ^3H -Gehalts auf.

3.3.5. Schlußbemerkung¹⁾

Die Bearbeitung des Datenmaterials ist mit den gegebenen Schlußfolgerungen noch nicht abgeschlossen. Die aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den Isotopengehalten und den hydraulischen Eigenschaften des hydrologischen Systems lassen jedoch im gegebenen Untersuchungsgebiet den Nutzen derartiger Isotopenstudien erkennen.

3.4. Hydrogeologische Untersuchungen im Bereich des Wasserberges

(H. HÖTZL, W. KRAUS, V. MAURIN)

Bei Beginn der Untersuchungen in dem für das 4. SUWT ausgewählten Testgebiet Muotatal war der Kenntnisstand über die hydrogeologischen Verhältnisse in den einzelnen Teilbereichen sehr unterschiedlich. So lagen über das Bödmeren – Twärenen (Hölloch-System) oder auch über die Charetalp und Glattalp bereits verschiedene karstmorphologische und karsthydrologische Detailstudien von A. BÜGLI (1960, 1970) vor.

Der Teilbereich zwischen Bisistal und Hürital, mit dem Wasserberg und der südlich anschließenden Galtenäbnet östlich und den Matten westlich des Mattenfirsts, war dagegen noch wenig untersucht. Um hier für die Markierungsversuche die notwendigen Informationen über Geologie, Verkarstung und oberirdischen Abfluß zu erhalten, wurden im Rahmen der Voruntersuchungen eine Luftbildauswertung sowie hydrogeologische und hydrochemische Aufnahmen ausgeführt. In diese Untersuchungen mit einbezogen wurde auch das Gebiet der Seenalp zwischen Chünzerberg und Chaiserstock westlich des Hüritales.

3.4.1. Schichtaufbau und Lagerung

Das Untersuchungsgebiet gehört, wie in Abschn. 1.2. schon hingewiesen, der Stirnregion der Axendecke s. 1. an. Sie wird von oberjurassischen bis mittelkretazischen Sedimentfolgen aufgebaut. Es herrscht ein ausgeprägtes ENE-Streichen mit unterschiedlich steilem Einfallen nach NNW vor. Im S wird der markante Höhenzug mit H \ddot{o} ch Pfaffen, Schwarz Stock, Seestock und Alpler Horn von Quintnerkalken in flacher Lagerung gebildet. Unmittelbar n \ddot{o} rdlich davon tauchen diese Kalke s-f \ddot{o} rmig steil ab, wobei der sich wieder verflachende Schenkel Teile von Galtenäbnet, den Mattner Stock sowie westlich des Hüritales den Chünzerberg aufbaut. N \ddot{o} rdlich dieser zuletzt genannten Erhebungen tauchen die Quintnerkalke endg \ddot{u} ltig mit steiler Lagerung unter. Ihre Hangendausstrichsgrenze quert das Bisistal im Bereich von Hinter Seeberg, das Hürital im Talboden von Grund.

Die morphologische Einm \ddot{u} ldung des Gebietes von Seenalp und Matten sowie Teilen von Galtenäbnet und Sulz wird im wesentlichen von den mergeligen bis kalkigen Folgen der Zementsteinschichten gebildet. Die \ddot{O} hrlikalke stehen in den untersten Felsb \ddot{a} ndern des Chaiserstock- und Wasserbergfirst-S \ddot{u} dabfalles an. Im Bereich des Mattner Firstes greifen sie entsprechend der s-f \ddot{o} rmigen Verflachung weiter nach S zur \ddot{u} ck.

¹⁾ F \ddot{u} r ihre Mitwirkung bei den Messungen danken wir Frau A. Olfmann, Frau A. Strunz und den Herren H. Lowag, G. Lust und F. Staudner. Bei der Erstellung des Manuskriptes haben Frau R. Grimm und Frau G. Huth in dankenswerter Weise geholfen.

Der Wasserbergfirst, der markanteste Grat im Untersuchungsgebiet, wird von den Mergeln und Kalken des Valanginien, vor allem aber von den Kieselkalken des Hauterivien in steiler bis mittelsteiler Lagerung aufgebaut. Die zur Muota hin abfallenden Hänge des Wasserberges und des Chaiserstockes werden schließlich von den hangenden Schrattekalken eingenommen. Jüngere kretazische Serien, wie etwa der Seewerkalk, stehen im untersuchten Teilbereich südlich der Muota nicht mehr an.

Unter den quartären Bildungen überwiegen bei den steilen, ausgesetzten Hängen und dem Charakter der Karbonatgesteine vor allem Hangschuttbildungen, z. T. auch Fels- und Bergsturzmassen. Eine größere Sackungsmasse liegt im NE des Wasserberges vor. Sie ist weitgehend im Verband abgeglichen und hat zu einer Verengung des Bisistales zwischen Herrgott und Laui geführt. Moränenablagerungen finden sich im Bereich von Seenalp, Liplisbüel und Galtenäbnet. Im Muotatal selbst sowie in einzelnen Abschnitten des Bisistales und Hürिताles bilden fluvioglaziale und holozäne Schotter die Talfüllung.

3.4.2. Tektonik

Die Axendecke ist in Form einer Digitationsdecke in einen Senkungsraum eingeglichen; dabei kam es zur Ausbildung von Tauchfalten sowie zu verschiedenen Abscherungen an lithologisch vorgezeichneten Horizonten, die zur Aufspaltung in Teildecken und Schuppen führten. Beide deckentektonischen Strukturen sind im untersuchten Abschnitt vorhanden. Auf das s-förmige Abtauchen der einzelnen Schichtserien wurde schon im vorhergehenden Abschnitt hingewiesen. Die Zerlegung der Axendecke in drei Teildecken wurde bereits von W. HAUSWIRTH (1913) beschrieben, wobei es sich um Abscherungen innerhalb der kretazischen Schichtserien handelt. Am Aufbau des Wasserberges sind die beiden unteren Teildecken beteiligt. Die auf der Karte (Tafel IV) eingetragenen Deckenschollen im Bereich von Wallis und Äbenmatt sind nach W. HAUSWIRTH nur einer weiteren Aufspaltung der mittleren Teildecke zuzuschreiben.

Neben der Verfaltung und Verschuppung hat das Gebirge eine intensive bruchhafte Deformation erfahren. Zur Erfassung der wichtigsten Störungen sowie der Hauptrichtungen der Gebirgsauflockerung wurde eine stereoskopische Luftbildauswertung vorgenommen. Die luftbildtektonische Karte (Fig. 30) zeigt in den einzelnen Teilbereichen verschieden dominante Hauptrichtungen. Offenbar in Abhängigkeit von der lithologischen Ausbildung überwiegen in den festen, starren Kalken die Querbrüche (160°- bis 170°-Richtung), während in den von mergeligen Gesteinen aufgebauten Teilbereichen die 120°-Richtung stärker zum Ausdruck kommt.

Wie die Kluftaufnahme (Kluftrosen in Tafel IV sowie Polkugeldarstellungen in Fig. 30) zeigen, ist jedoch das Bild im gesamten Untersuchungsbereich, von einzelnen Ausnahmen abgesehen, recht einheitlich. So ist auch in den inkompetenten mergeligeren Partien die 170°-Richtung durch bevorzugte Zerklüftung ausgezeichnet, die aber dort nicht zu den ausgeprägten Querbrüchen geführt hat.

Die Bedeutung der Klüfte für die Wasserwegigkeit innerhalb des Gebirges wird aus Fig. 31 deutlich. Dort sind wesentliche Gangabschnitte des Hölloches (nach einem Höhlenplan von A. BÖGLI, 1970) richtungsstatistisch ausgewertet. Durch die Lagerungsverhältnisse bedingt ist es einerseits die Streichrichtung mit den Bankungsfugen (75°-Richtung) sowie andererseits die dazu fast rechtwinklig stehende Querklüftung, denen ein großer Teil der für die Karstentwässerung wichtigen Höhlengänge folgt.

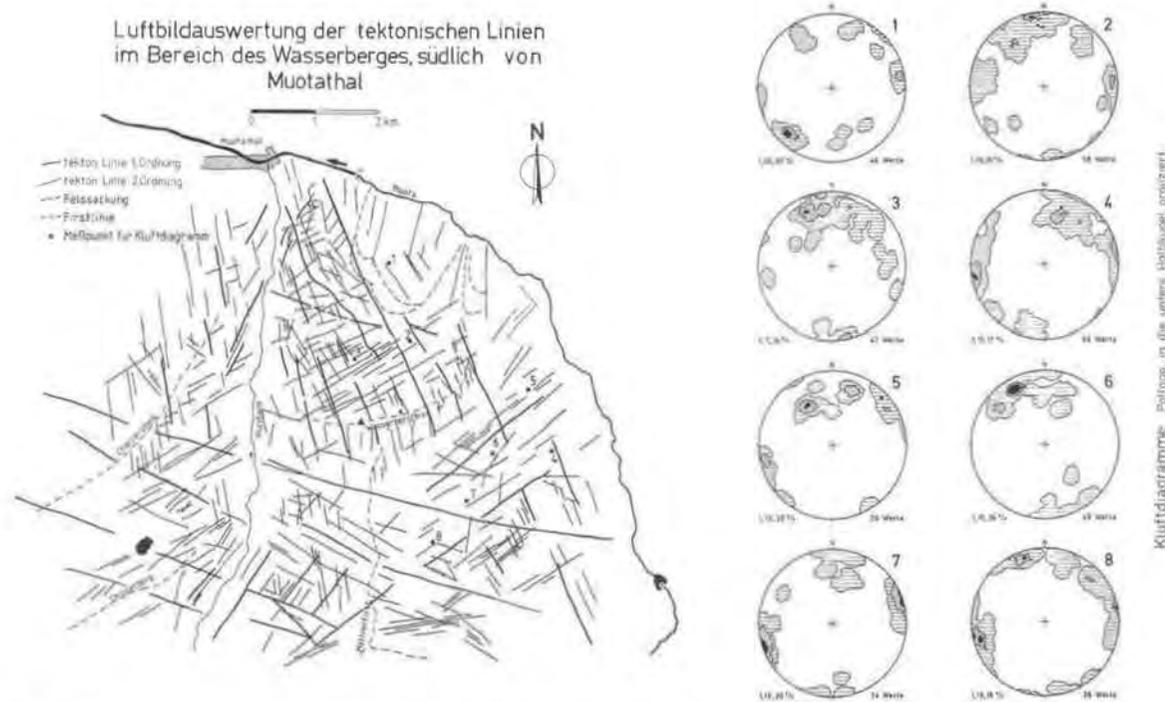


Fig. 30: Auswertung tektonischer Strukturen im Bereich des Wasserberges und der südlich anschließenden Gebiete zwischen Bisistal und Seenalp. Linke Seite: Luftbildtektonische Karte der wichtigsten Störungen und Hauptklüfte. Rechte Seite: Polkugeldarstellungen von Klüften und Schichtfugen ausgewählter Teilbereiche (Pollage in die untere Halbkugel projiziert).

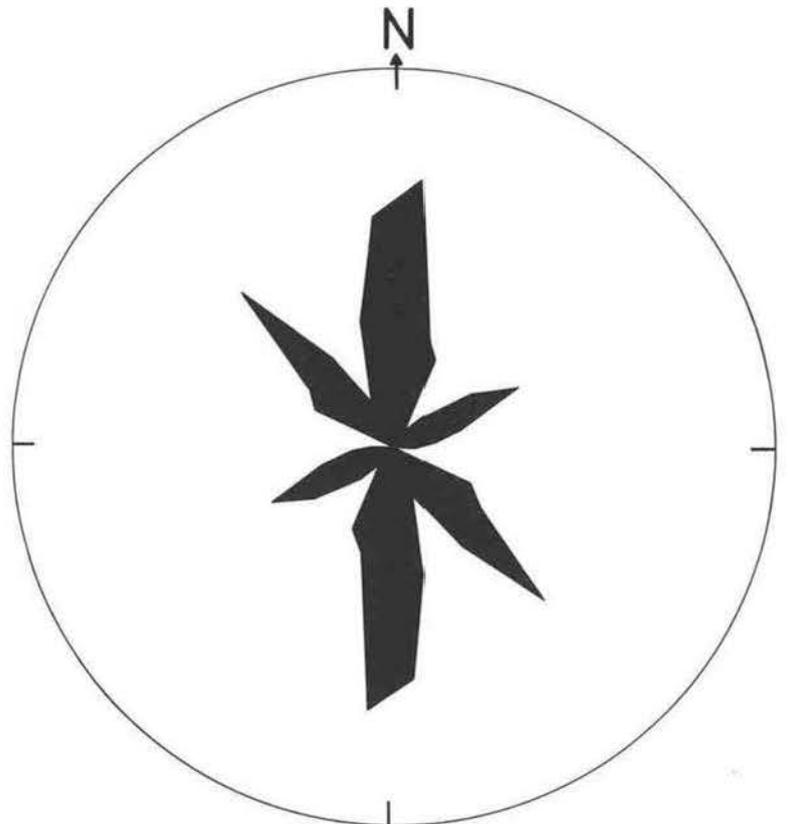


Fig. 31: Richtungsstatistische Auswertung der Höhlengänge des Hölloches, Muotatal, auf der Basis des Höhlenplanes von A. Bögli (1970). Ausgewertet wurden jeweils Gangabschnitte mit einer Länge von 100 Metern.

3.4.3. Hydrogeologische Verhältnisse

3.4.3.1. Verkarstung und Durchlässigkeit

Auf Tafel IV wurden die Festgesteine nach dem Grad ihrer Verkarstungsfähigkeit und damit unterschiedlicher Durchlässigkeit ausgeschieden. Die Quintnerkalke und die basalen kalkigen Partien der Zementsteinschichten in Galtenäbnet und im Südteil von Matten sind stark verkarstet. Die Schichtflächen sind von Karren besetzt, an entsprechend tektonisch vorgezeichneten Linien treten ganze Dolinenreihen, z. B. in den Schluchten, auf. Im Riedboden und im Hüttenboden auf Galtenäbnet sowie im Riedboden/Matten liegen zahlreiche, besonders zur Schneeschmelze aktive Schwin-

den vor, in denen die aus Schutt- bzw. Mergelbereichen kommenden Gerinne versickern.

Ähnliche Verhältnisse treten auch auf der Seenalp im Bereich Seeboden und Tannenboden auf. Das Seenalper Seeli, gespeist von mehreren Bächen aus S und W, hat keinen Oberflächenabfluß, sondern entwässert völlig in einen Schwindenbereich im Quintnerkalk an seinem Ostufer.

Im Bereich der mergeligen Partien der Zementsteinschichten sind einzelne Oberflächengerinne in den meist tiefen Hangeinschnitten entwickelt, die von Quellen an der Basis einzelner Kalkeinschaltungen sowie von Hangschuttquellen gespeist werden. Durch die häufige Einschaltung von Kalklagen und aufgrund der engen Zerklüftung ist der Charakter der Entwässerung in dieser breiten Ausstrichszone der Zementsteinschichten (Matten, Galtenäbnet, Sulz) sehr stark wechselnd.

Im Bereich des Wasserbergfirstes sind die Schichtflächen des Kieselkalkes zwar von flachen Schratzen zerfurcht, aber es herrscht bei stärkerem Wasserangebot oberflächlicher Abfluß vor. Erst in dem versumpften Bereich vor dem Chrüzgütsch trifft man auf leistungsfähigere Schwinden, teils in Grobblockschutt, teils in den verkarsteten Kalken. Die große Schratzenkalkfläche nördlich des Böllenstöckli fällt durch gewaltige Karrenfelder mit mehreren Meter tiefen Schratzen auf. Durch eine 160° bis 170° streichende Störung wird der Schratzenkalk im E abgeschnitten und gegen den Kieselkalk versetzt. Parallelen Störungen sitzen beim Chalberloch mehrere große Dolinen auf. Bei Wasserangebot, z. B. während der Schneeschmelze, fungieren diese als aktive Ponore. Auch östlich des Dräcklochs sind in dem kleinen Schratzenkalkrest bei Figgen zahlreiche Dolinen ausgebildet.

Als Wasserstauer von lokaler Bedeutung sind die Öhrlimergel, die Valanginiemergel und die Drusbergschichten anzusehen. Sie sind die Ursache für einzelne kleine Quellen, deren Abflüsse meist nach kurzem Weg in verkarstungsfähigen Kalken versickern.

3.4.3.2. Quellen

Verbreitung, Lage und Schüttung der Quellen lassen erkennen, daß das untersuchte Gebiet trotz eines differenzierten geologischen Aufbaues teilweise weiträumig unterirdisch entwässert wird. Die Hauptaustritte liegen im N des Wasserberges im Bereich Balm – Fugglen (vgl. Abschn. 4.4.2.). Die Position dieser Quellgruppe (Nr. 1 – 20a, s. Fig. 35) unmittelbar hinter der Stirn der Axendecke ist bedingt durch das Abtauchen der verkarsteten Schratzenkalke sowie durch den Einschnitt der Muota, die somit für diesen Teil der Axendecke die tiefste Vorflut bildet. Begünstigt ist die Lage der Quellen dort auch durch mehrere mit 170° streichende Störungen.

Damit vergleichbar ist die Position der zweiten großen Quellgruppe im Bereich Hinter Seeberg (Quellen 24, 25 und 59 – 68, s. Fig. 32). Dort taucht der Kern der Axendecke mit den Quintnerkalke unter das Muotaniveau ab, während im Hangenden die mergeligeren Zementsteinschichten folgen.

Im Hürital haben wir keine so ausgeprägte zentrale Entwässerung. Für die Karstgebiete beiderseits des hinteren Hüritales bildet teilweise der Talboden von Wängi die Vorflutbasis (Quellen 106 bis 111). Bedeutende Quellen treten auch an der Basis der Quintnerkalke (Quellen 112, 113 und 114) auf (s. Tafel IV). Aus den Aufschlußverhältnissen nicht ganz eindeutig zu beurteilen ist die Position der Quellen 115 bis 120. Wahrscheinlich handelt es sich um eine echte Karstentwässerung, aber auch das Ausstreichen eines alluvialen Grundwasserkörpers kann zu diesen Wasseraustritten

beitragen. Für die Quelle kurz vor der Einmündung des Hüribaches in die Muota gilt dasselbe wie für die Quellgruppe Balm – Fugglen.

Die verschiedenen Quellen auf den Hängen über den Talböden ebenso wie auf dem Wasserberg sind an Ausstriche zwischengeschalteter Mergelserien gebunden. Die meist geringe Quellschüttung weist auf die nur lokale Stauwirkung dieser ebenfalls von Störungen und Klüften zerschnittenen Mergel hin. Vielfach versickern die daraus resultierenden Gerinne schon nach kurzem Lauf in den verkarsteten Kalken, wie dies für einzelne Quellen im Bereich des Wasserberges schon ausgeführt wurde.

Zwei größere Quellen (137 und 144) liegen noch am Rande der Seenalp am Steilhang zum Hürital. Sie treten an der Basis der Moränen- bzw. Hangschuttbildungen über den Zementsteinschichten zutage.

3.4.3.3. Hydrochemie

Der Chemismus der Quellwässer ist in den Tafeln V und VI und Fig. 32 bis 34 sowie in Tab. 10 dokumentiert. Es handelt sich, wie aus dem Gesteinsaufbau zu erwarten ist, um Calcium-Hydrogenkarbonatwässer. Die Gesamtmineralisierung (Summe der Anionen = Summe der Kationen) der Wässer liegt in der Niedrigwasserabflußperiode (Oktober 1978) im allgemeinen zwischen 2,0 und 2,5 mval/l. Etwas höhere Werte zeigen nur einzelne Quellen im Bereich Hinter Seeberg (Quellen 61, 64a und 65), die eine Gesamtmineralisierung von 2,8 bis 3,2 mval/l aufweisen. Noch höher ist der Wert von Quelle 15b (4,4 mval/l), die auch sonst ein abweichendes Verhalten erkennen läßt. In den Darstellungen der Tafeln wurde, soweit möglich, die Beprobung vom 18. 10. 1978 berücksichtigt. Bei den im September bzw. August gezogenen Proben tritt infolge des noch höheren Schmelzwasseranteils eine geringere Mineralisierung auf. Sie liegt für das Entnahmedatum 10. 9. bei 1,8 bis 2,3 mval/l und für das Entnahmedatum 10. 8. noch zwischen 1,6 und 2,2 mval/l (Tab. 10).

Bei der Darstellung der hydrochemischen Kennwerte auf den Tafeln V und VI mußte aus Platzgründen für die einzelnen Quellgruppen jeweils eine repräsentative Probe ausgewählt werden. In einzelnen Fällen wurde bei nahe beieinander liegenden Quellen der gemeinsame Abfluß beprobt. Gerade bei den größeren Quellgruppen ergeben sich jedoch deutliche Unterschiede bei den chemischen und physikalischen Daten der einzelnen Quellen, die für die hydrogeologische Deutung der bestehenden Zusammenhänge nicht unwesentlich sind. Daher wurde für die drei Quellgruppen im Bisista, wo Beimischungen von rechts und links der Muota sowie von Talgrundwasser und infiltriertem Muotawasser nicht auszuschließen sind, zusätzlich graphisch die Temperatur-, Gesamthärte- und Sulfatverteilung auf detaillierten Lageplänen dargestellt (Fig. 32 – 34). Die Angaben beziehen sich auf dasselbe Beprobungsdatum wie die Angaben in den Tafeln V und VI. Zu diesem Zeitpunkt niedriger Wasserführung waren bereits viele Quellen trocken. Bei stärkerer Wasserführung in den Sommermonaten stimmt der Chemismus der Quellen infolge des höheren Schmelzwasseranteils besser überein.

In der Quellgruppe Hinter Seeberg zeigen sich gerade bei der Gesamthärte und beim Sulfat größere Abweichungen (Fig. 32). Da demgegenüber auch hier bei der sommerlichen Beprobung eine größere Übereinstimmung vorhanden war, geben die angeführten Unterschiede einen Hinweis auf die Ausbringung von Wässern mit längerer Verweildauer im Untergrund. Andererseits zeigen auch die Temperaturwerte, daß kein auf kurze Distanz zugesickertes Muotawasser vorliegt.

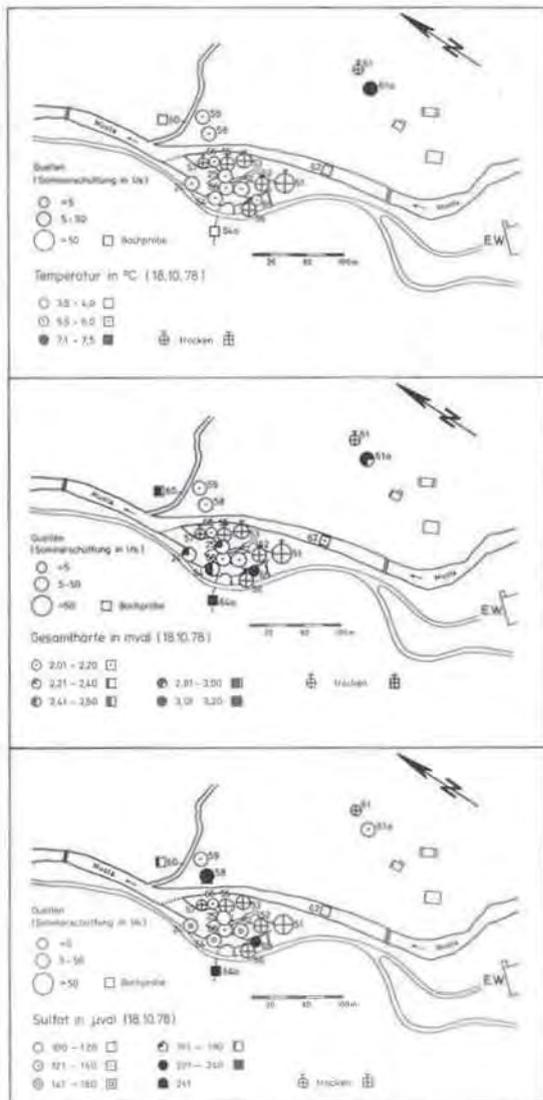


Fig. 32: Verteilung von Temperatur, Gesamthärte und Sulfat in den Wässern der Quellgruppe Hinter Seeberg, Bisistal. (Die Schüttungsangaben beziehen sich auf sommerliche Abflußverhältnisse mit Schmelzwasserführung.)

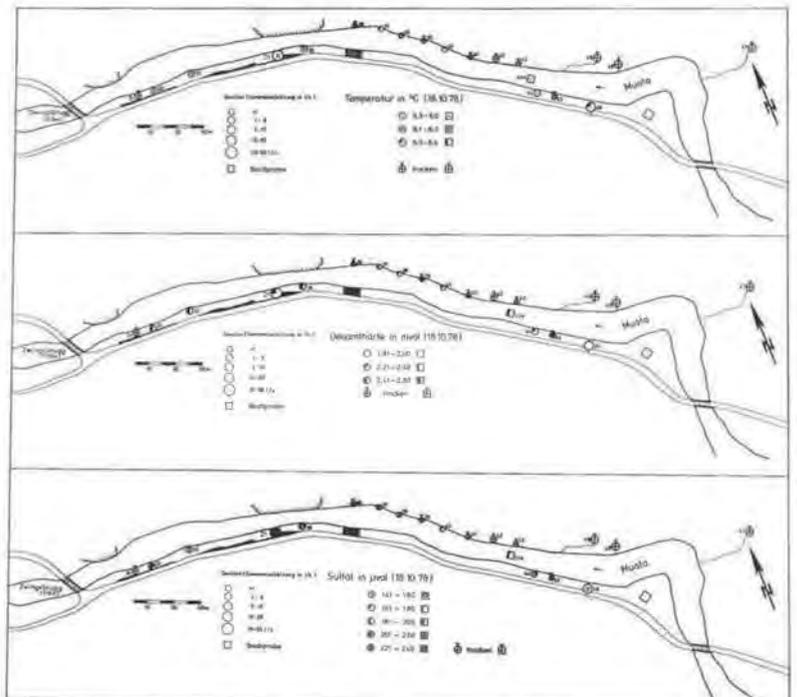


Fig. 33: Verteilung von Temperatur, Gesamthärte und Sulfat in den Wässern der Quellgruppe Steinweid - Zwingsbrugg, Bisistal. (Die Schüttungsangaben beziehen sich auf sommerliche Abflußverhältnisse mit Schmelzwasserführung.)

Bei der Quellgruppe Steinweid - Zwingsbrugg (Fig. 33) liegen weitgehend übereinstimmende Wässer vor. Eine etwas höhere Mineralisierung kommt lediglich in der Quelle 21 zum Ausdruck.

Bei der Hauptgruppe Balm - Fugglen (Fig. 34) zeigen vor allem die Temperaturen einen deutlichen Unterschied zwischen den Quellen links und recht der Muota, während demgegenüber Gesamthärte und Sulfatwerte sehr ausgeglichen sind. Einzig allein Quelle 15b weicht mit allen ihren Kennwerten von den übrigen Quellen ab. Die erhöhte Temperatur und Gesamtmineralisierung ist hier sicherlich durch das im wesentlichen kleine lokale Einzugsgebiet im Moränenbereich.

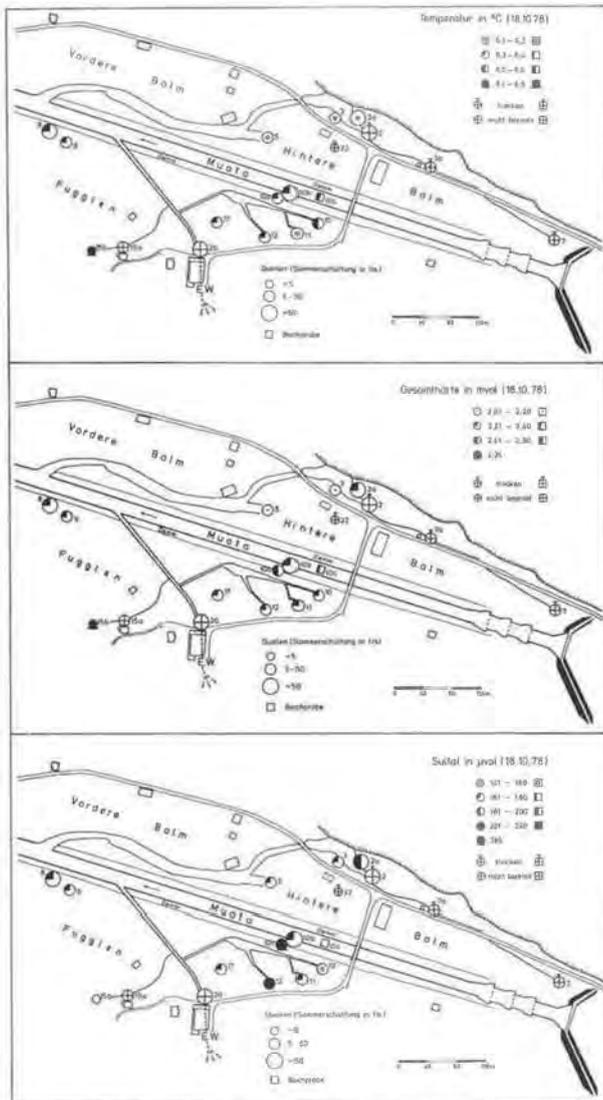


Fig. 34: Verteilung von Temperatur, Gesamthärte und Sulfat in den Wässern der Quellgruppe Balm - Fugglen. (Die Schüttungsangaben beziehen sich auf sommerliche Abflußverhältnisse mit Schmelzwasserführung.)

Tab. 10: Chemische Analysen von Wasserproben aus den Bereichen Wasserberg, Galtenäbnet, Hürtal und Bisistal (1978).

Nr. der Ent- nahme- stelle	Ent- nahme- datum	T ° C	pH- Wert	el. Leitföh. $\mu\text{S}/20^\circ\text{C}$	Gesamt- härte	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	μval/l				Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	SiO ₂ mg/l
										Fe ³⁺	Mn ²⁺	HCO ₃ ⁻						
2 a	10. 8.	6,6			1370			1350	20	25			1300	70	17	132	81	
	18. 10.	6,2		99	2290	24	5	2280	10	4	4	2130	51	36	199	9	2,08	
3	10. 9.	5,9			1690			1660	30	0		1640	50	28	104	0		
	18. 10.	6,2		102	2150	30	4	2020	130	4	2	2000	47	29	169	6	1,11	
5	10. 8.	6,6			1520			1300	220	28		1480	40	18	73	21		
	18. 10.	6,2		98	2100	9	5	1950	150	4	2	2060	47	28	164	7	1,33	
7	10. 8.	7,2			1750			1540	210	6		1720	47	12	36	13		
	10. 9.	7,2			1880			1750	130	0		1860	60	23	72	0		
7 a	10. 9.	7,2			1920			1820	100	0		1820	60	25	67	0		
8	10. 8.	6,2	7,5		1590			1520	70	27		1510	40	13	69	18		
	18. 10.	6,4		104	2320	45	4	2170	150	4	2	2080	51	24	170	8	1,91	
9	18. 10.	6,4	7,4	105	2300	43	5	2060	240	3	3	2120	51	27	177	8	0,77	
10	10. 8.	7,4	7,5		2020			1920	100	4		1900	40	16	47	0		
	18. 10.	6,6		110	2310	17	4	2210	100	4	3	2190	45	35	146	11	1,79	
10a	10. 9.	6,2	7,5		1850			1770	80	0		1760	50	30	87	0		
	18. 10.	6,4		107	2420	42	3	2050	370	3	2	2120	56	22	285	23	1,72	
10b	10. 8.	6,2	7,3		1600			1460	140	22		1560	40	12	92	24		
	18. 10.	6,3		103	2260	16	5	2070	190	3	3	2070	49	29	162	7	1,79	
10c	10. 9.	7,4			1920			1840	80	0		1820	50	23	89	0		
	18. 10.	6,6		106	2350	20	6	2080	270	3	2	2200	79	26	142	7	1,88	
11	10. 8.	7,2	7,5		2050			1850	200	11		1960	40	11	63	3		
	18. 10.	6,2		107	2350	20	5	2320	30	3	3	2170	49	30	164	5	1,58	
12	10. 8.	6,4	7,5		1710			1420	290	13		1680	40	28	82	21		
	18. 10.	6,4		106	2270	9	5	2200	70	4	2	2110	49	32	238	11	2,17	
15	10. 8.	7,2			2670			2430	240	5		2500	40	21	100	3		
15 a	18. 10.	8,1		201	4350	25	26	4320	30	3	2	4240	54	50	141	10	0,82	
17	10. 8.	6,2	7,4		1620			1580	40	42		1530	40	18	79	34		
	18. 10.	6,4		104	2370	40	5	2350	20	3	4	2120	107	40	172	7	0,91	
20	10. 9.	6,8			2040			1910	130	0		1900	50	30	144	0		

Nr. der Entnahmestelle	Entnahmedatum	T °C	pH-Wert	el. Leitfah. $\mu\text{S}/20^\circ\text{C}$	Gesamthärte	aVal/l										SiO ₂ mg/l	
						Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	HCO ₃	Cl ⁻	NO ₃	SO ₄		PO ₄
21	10. 9. 18. 10.	6,0 6,1	7,7	106	2160 2400	24	5	2040 2050	120 350	0 3	0 0	2040 2280	50 49	28 45	121 234	0 5	0 1,60
22	10. 9.	6,0			1710			1670	40	0		1650	50	19	60	0	
24	10. 8. 10. 9. 18. 10.	5,3 5,5 5,9	7,5		1490 1600 2210			1320 1580 2050	170 20 160	17 38 3		1500 1560 2120	50 60 49	9 18 36	116 111 144	23 30 5	0 0 0,91
25	10. 8. 18. 10.	5,2		93	1470 2240	12	4	1420 2040	50 200	79 4	2	1470 2020	50 45	17 30	102 108	55 7	0 1,18
32	10. 9. 18. 10.	5,9 6,1	7,4	106	2440	4	6	2390	50	3	3	2320	49	29	210	12	1,77
33	10. 9. 18. 10.	5,9 6,1	7,3	105	2480	17	5	2460	20	4	2	2300	49	31	155	11	1,51
35	10. 9. 18. 10.	6,0 6,1	7,3	105	2410	23	5	2300	110	3	1	2280	49	38	141	19	2,65
37	10. 9. 18. 10.	6,3 6,3	7,3	104	2410	23	5	2390	20	4	2	2220	47	33	149	10	1,17
38	10. 9. 18. 10.	5,9 6,2	7,3	105	2350	18	4	2310	40	3	2	2290	47	34	154	5	1,33
40	10. 9. 18. 10.	6,2 6,3	7,4	102	2400	27	4	2350	50	3	2	2200	47	28	177	8	1,12
44	18. 10.	5,9		102	2360	24	5	2340	20	3	3	2190	49	31	148	7	2,63
44a	18. 10.	6,0		102	2400	25	5	2320	80	3	2	2320	54	43	176	5	3,27
46	10. 9. 18. 10.	7,0 6,3	7,5	86	2160 1940	14	5	1980 1760	180 180	2 4	3	2120 1850	60 45	33 45	94 141	0 7	0 1,45
47	10. 9.				2190			2070	120	0		2100	50	26	116	0	
48	10. 9.				2180			2050	130	0		2090	50	31	119	0	
49	10. 9.				2200			2060	140	0		2020	50	31	139	0	
50	10. 8.				1890			1880	10	2		1740	50	19	56	0	
51	10. 9.	6,0			2010			2000	10	120		1920	50	18	324	60	
54	10. 9. 18. 10.	5,7 5,9		89	1570 2100	9	2	1540 1960	30 140	9 3	3	1520 2110	50 49	18 26	69 153	2 7	0 0,63

Nr der Entnahme-stelle	Entnahme-datum	T ° C	pH-Wert	el. Leitföh $\mu\text{S}/20^\circ\text{C}$	Gesamt-härte	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	μval/l				HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	SiO ₂ mg/l
										Fe ³⁺	Mn ²⁺								
55	10. 9.	5,7			1560			1530	30	17			1540	50	17	69	3		
56	10. 9.	5,7			1560			1540	20	7			1530	60	18	93	4		
57	10. 9.	5,6			1660			1640	20	27			1540	60	18	67	13		
58	10. 9.	5,9			1620			1580	60	1			1540	60	17	46	0		
	18. 10.	5,7		99	2100	10	3	2000	100	4	2		2140	49	26	241	7	0,73	
59	10. 9.	5,5			1570			1520	50	17			1500	60	21	92	2		
	18. 10.	5,8		102	2120	11	3	1890	230	3	1		2000	58	42	137	7	1,53	
60	10. 9.	8,3			1960			1940	20	7			1920	50	21	72	5		
	18. 10.	3,6		116	2810	18	11	2620	190	5	2		2630	47	26	177	13	6,57	
61	10. 9.	8,5			3080			2840	240	1			2950	50	31	106	0		
61a	18. 10.	7,3		131	2920	22	20	2900	20	3	2		2780	54	30	124	18	1,13	
62	10. 9.	7,3			2010			1940	70	21			1920	60	25	83	10		
	18. 10.	3,7		86	2060	6	4	2040	20	3	5		1930	56	30	104	7	1,70	
63	10. 9.				2170			2100	70	8			2120	50	29	103	0		
64	18. 10.	5,6		94	2440	20	4	2410	30	3	3		2320	54	38	155	7	1,06	
64a	18. 10.	3,9		116	3130	53	9	3090	40	3	3		2940	56	25	239	9	1,13	
65	18. 10.	5,9		132	3120	13	6	2800	320	3	4		2940	49	38	234	12	2,37	
66	18. 10.	5,7		89	2150	10	2	1950	200	3	3		2040	49	29	123	6	1,16	
68	18. 10.	5,8		89	2120	12	3	1890	230	4	2		2080	47	23	136	8	0,83	
73	10. 8.	1,4	7,5		1820			1750	70	4			1840	50	2	35	0		
74	10. 8.	11,3	7,8		2800			2580	220	5			2700	40	2	53	5		
75	10. 8.	6,3	7,8		2490			2290	200	7			2460	50	5	0	3		
76	10. 8.	2,3	7,2		2740			2600	140	6			2700	50	4	67	3		
91	10. 9.	5,4			1880			1860	20	0			1700	60	41	86	0		
92	10. 9.				2530			2500	30	0			2440	50	15	54	0		
101	10. 8.	7,3	7,1		2250			2120	130	7			2120	40	20	48	2		
102	10. 8.	6,2	7,3		2150			2010	140	4			2010	40	21	47	2		
	10. 9.				2610			2580	30	0			2410	60	25	116	0		

Nr der Entnahmestelle	Entnahmedatum	T °C	pH-Wert	el. Leitföh. $\mu\text{S}/20^\circ\text{C}$	Gesamthärte	Na ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	μval/l			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	SiO ₂ mg/l
										Fe ³⁺	Mn ²⁺							
103	10. 8.	5,6	7,3		2180			2030	150	4			2120	50	25	47	1	
	10. 9.	5,7			2320			2230	90	0			2200	60	34	125	0	
	18. 10.	5,7		100	2430	10	5	2290	140	4	2		2210	109	40	165	10	0,74
104	10. 8.	5,6	7,4		2190			1910	280	5			2040	40	21	68	3	
	10. 9.	5,7			2330			2190	140	0			2210	50	32	94	0	
	18. 10.	5,6		103	2440	13	5	2400	40	3	7		2200	54	45	187	24	1,65
105	10. 9.	5,7			2450			2200	250	0			2360	50	17	77	0	
	18. 10.	3,9		90	2440	6	3	1980	460	4	2		2400	51	31	135	7	0,63
106	10. 9.	4,8			2220			2040	180	0			2110	40	26	115	0	
	18. 10.	4,7		83	2370	14	4	2350	20	4	3		2240	47	24	164	12	5,40
107	10. 9.	4,9			2260			2130	130	0			2220	50	22	57	0	
	18. 10.	4,8		84	2250	12	4	2200	50	4	2		2230	54	27	108	9	1,90
108	10. 9.	3,9			2340			2080	160	0			2210	50	20	69	0	
	18. 10.			85	2300	7	3	2020	280	3	2		2230	56	23	118	7	0,80
109	10. 9.	5,4			2180			2000	180	0			2120	50	18	47	0	
	18. 10.	4,6		82	2330	17	5	2300	30	3	2		2160	49	24	144	11	1,85
110	10. 9.	7,4			2160			2050	110	0			2120	60	24	51	0	
	18. 10.	3,7		73	2060	16	6	2010	50	4	1		2060	47	19	84	5	0,78
111	10. 9.	5,0			2070			2010	60	0			2000	50	32	41	0	
	18. 10.	5,3		75	2220	7	6	2200	20	3	2		2180	51	36	90	5	1,07
112	10. 9.	5,2	7,2		2420			2230	190	0			2320	50	21	72	0	
	18. 10.			87	2410	7	3	2200	210	3	2		2380	47	25	140	11	1,01
113	10. 9.	3,9	7,3		2410			2170	240	0			2320	60	16	68	0	
	18. 10.	3,4		87	2430	7	3	2410	20	3	2		2310	49	23	134	8	1,07
114	10. 9.	3,9	7,1		2410			2150	260	0			2300	70	19	57	0	
	18. 10.	3,9		81	2400	4	4	2280	120	4	2		2350	56	30	133	6	1,39
115	18. 10.	5,9		107	2540	12	5	2480	60	3	2		2460	47	30	185	10	0,84
116	10. 9.	6,4	7,9		2410			2320	90	0			2300	60	30	94	0	
	18. 10.	6,2		106	2550	13	6	2540	10	3	1		2450	54	48	140	8	1,15
117	10. 9.	6,5	7,7															
	18. 10.	6,2		108	2560	12	5	2530	30	3	1		2530	47	32	187	7	0,87

Nr der Ent- nahme- stelle	Ent- nahme- datum	T ° C	pH- Wert	el. Leitföh. µS/20° C	Gesamt- härte	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	µval/l			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	SiO ₂ mg/l
										Fe ³⁺	Mn ²⁺							
118	10. 9.	6,4	7,7															
	18. 10.	6,2		107	2620	13	5	2580	40	4	3	2370	47	35	134	8	1,43	
119	10. 9.	6,5	7,6															
	18. 10.	6,2		108	2530	10	4	2310	220	3	1	2520	47	21	164	6	1,01	
131	10. 9.	2,3	7,1		1710			1690	20	0		1660	50	27	73	0		
	18. 10.	2,3		78	1940	16	3	1900	40	3	2	1920	47	29	212	5	0,83	
132	10. 9.	2,3	7,1		1690			1680	10	3		1590	50	26	71	0		
134	10. 9.	2,4	6,8		1680			1610	70	0		1630	50	19	62	0		
	18. 10.	2,4		76	2010	12	2	1870	140	3	2	2000	60	16	139	6	1,50	
136	10. 9.	7,8			1420			1400	20	0		1360	50	14	51	0		
	18. 10.	7,1		74	1570	10	3	1550	20	3	2	1470	51	19	103	7	0,78	
137	10. 9.	3,1	6,4		1680			1630	50	2		1620	50	27	94	0		
	18. 10.	3,2		74	1830	16	4	1790	40	4	2	1710	54	33	158	6	1,40	

4. Kombinerter Markierungsversuch 1979 bis 1980

4.1. Problemstellung und Zielsetzung (A. BÖGLI, H. HÖTZL, V. MAURIN)

Zwei Faktoren führten zur Auswahl des oberen Muotatales als eines der drei Testgebiete für das 4. SUWT. Und zwar einmal die Existenz eines großen anscheinend in sich geschlossenen, hochalpinen Karstgebietes mit einer gemeinsamen Entwässerung zum Vorfluter Muota und zum anderen die Tatsache, daß für den östlichen Anteil (Glattalp, Charetalp und Böldmeren) bereits eingehende Erkenntnisse vorlagen. Diese gehen in erster Linie auf jahrzehntelange Forschungen durch A. BÖGLI (1960, 1970) zurück, die sich vor allem auf den Bereich Böldmeren mit dem über 142 km langen Hölloch-System konzentrierten (s. Fig. 3.).

Noch wenig bekannt war das Gebiet des Wasserberges, des Hüritales und der Galtenäbnet. Hier wurde daher 1978 Herr W. KRAUS mit einer hydrogeologischen Aufnahme betraut (s. Tafeln IV, V und VI).

Aus den Abflußverhältnissen (s. Tafel II) und der räumlichen Verteilung der Großquellen (s. Tafel IV) konnte man schließen, daß sich die unterirdische Entwässerung auf wenige Quellbezirke konzentriert (Bereiche Balm – Fugglen, Zwingsbrugg – Steinweid und Hinter Seeberg im Bisistal sowie unteres Hürital). Im untersuchten Gebiet westlich der Muota (Wasserberg – oberes Hürital – Galtenäbnet) treten aber auch in höheren Abschnitten zahlreiche Quellen auf. Sie sind auf die Einschaltung nicht oder nur schwer verkarstungsfähiger Horizonte (Drusbergschichten, Valanginienmergel, Öhrlimergel) zurückzuführen. Im Gegensatz dazu ist im Bereich Böldmeren – dank des ausgereiften Hölloch-Systems – die Entwässerung praktisch vollends in den Untergrund verlegt.

Aus diesen Gegebenheiten resultiert auch bereits die Fragestellung für den kombinierten Markierungsversuch. Sie läßt sich in zwei Problemkreise gliedern:

1. Vergleich der Eignung der zur Verfügung stehenden Markierungsmittel unter den gegebenen Voraussetzungen und
2. eine möglichst weitgehende Abklärung der lokalen und regionalen subterranean Entwässerungsverhältnisse.

Für Punkt 1 bot der lithologisch stark differenzierte Gesteinsaufbau des Untersuchungsgebietes westlich und südlich der Muota fast ideale Vorbedingungen. Durch die Einschaltung von tonreicheren Komplexen in die Karbonatgesteine ergab sich die Frage der unterschiedlich starken Adsorption der Fluoreszenztracer. Dies galt natürlich auch für die zu erwartenden Fließstrecken in den Talalluvionen und in Moränen. Eine ähnliche Problemstellung haben wir bei den Triftstoffen (gefärbte Lycopodiumsporen und Phytoplankton). Auch hier sollte durch einen Vergleich mit den in Lösung befindlichen Tracern (Farbstoffe und Salze) das durch die Einschaltung von Kluftaquiferen (Kieselkalk und Mergel) oder grobklastischen Alluvionen wahrscheinlich ungünstig beeinflusste Triftverhalten getestet werden.

Im gut erforschten Hölloch-System, in dem früher schon mehrere Markierungsversuche stattgefunden haben, konnten durch die gezielte Wahl der Einspeisepunkte Aufschlüsse über das unterschiedliche Abströmen der Tracer in der vadosen und der phreatischen Zone erwartet werden.

Im Rahmen von Punkt 2 ging es vor allem darum, die hydrogeologische Wirksamkeit der minder- oder nichtverkarstungsfähigen Einschaltungen in die gut löslichen, ausgesprochenen Karstgesteine (Seewerkalk, Schrattekalk, Öhrlikalk, Quintnerkalk) abzuklären.

Weiters sollte eruiert werden, wie weit der bedeutendste Quellbezirk des Gebietes im Bereich Balm – Fugglen außer von den bereits bekannten Zuflüssen aus dem Höl-

loch-System auch noch aus dem Wasserberg – Galtenäbnet oder evtl. auch noch aus dem Areal der Seenalpe alimentiert wird. Zur Abklärung der Porengrundwasserkomponente wurden Einspeisungen von Natriumchlorid und Detergentia in die Alluvionen des Bisstaales vorgesehen.

Mit der Eingabe der relativ großen Menge von 20 kg Uranin in den unterirdischen Abfluß des Seenalpeeis sollte der Möglichkeit Rechnung getragen werden, daß diese Schwinde bereits am Rande oder auch schon außerhalb des Einzugsgebietes des Hürtales und des oberen Muotatales liegen könnte. Daher wurde das Beobachtungsnetz auch noch nach NW erweitert (Quellen Nr. 142 und 143).

4.2. Auswahl der Markierungsmittel (H. HÖTZL, V. MAURIN)

Für die Durchführung von hydrogeologischen Markierungsversuchen stehen heute verschiedene Tracer zur Verfügung, die den besonderen Anforderungen der Untergrundpassage mehr oder weniger gut gerecht werden und sich schon vielfach in Feldversuchen bewährt haben. Allerdings gibt es keinen Tracer, der den unterschiedlichen hydrogeologischen, hygienischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen gleichermaßen gerecht wird. Nach wie vor strebt man die Erfüllung jener Forderungen an, wie sie von F. BAUER et al. (1976, S. 205 f.) im einzelnen dargelegt wurden.

Diesen Bedingungen werden derzeit noch am weitestgehenden einzelne Fluoreszenzstoffe gerecht. Sie zeichnen sich besonders durch hohe Nachweisempfindlichkeit, Unschädlichkeit und relativ einfache Handhabung im Felde sowie bei der Probenanalyse aus. Fluoreszenzstoffe zählen daher heute zu den am häufigsten eingesetzten Tracern in der Hydrogeologie. Sie haben die verschiedenen Salze, von denen früher vor allem das Natriumchlorid reichlich Verwendung fand, etwas in den Hintergrund gedrängt. Gerade das Kochsalz erfordert meist sehr große Eingabemengen, da schon in der Natur im Wasser Natrium und Chlorid in entsprechenden Schwankungsbreiten vorkommen. Durch Heranziehung von Kaliumchlorid und Lithiumchlorid konnte man hier Verbesserungen erzielen und auch die Nachweisempfindlichkeit erhöhen.

Neben diesen im Wasser löslichen Stoffen werden nach wie vor Triftstoffe eingesetzt. Ihre Anwendung setzt eine gute Wasserwegigkeit voraus, die durch entsprechende Hohlraumweiten die Passage der Triftkörper zuläßt. Mit Erfolg wird im Karst gerade bei kombinierten Markierungsversuchen die Sporentrift praktiziert, wenn auch infolge der aufwendigen Sporenauszählung diese Methode aus wirtschaftlichen Gründen immer mehr ins Hintertreffen gelangt. Von Interesse ist auch die Triftung von Keimen, lassen sich damit gegebenenfalls doch Aussagen hinsichtlich der Reinigungskraft des Untergrundes erzielen. Leider haben wir über diese Markierungstechnik aber noch wenig Erfahrungen. Dies liegt zum einen an der besonders hohen Kontaminationsgefahr, zum anderen aber auch an der in der Hydrogeologie und Hydrologie fremden bakteriologischen Untersuchungsmethodik.

Neben solchen allgemeinen Gesichtspunkten hängt die Auswahl von Markierungstoffen für den einzelnen Versuch von der jeweiligen speziellen Fragestellung ab. Im vorstehenden Abschnitt 4.1. wurde dargelegt, daß es neben dem direkten Vergleich der Markierungstoffe durch Paralleleinsatz ein wesentliches Ziel des Versuches sein sollte, die verschiedenen unterirdischen Teileinzugsgebiete der Quellgruppe Balm – Fugglen abzuklären. Ein derart ausgedehntes Einzugsgebiet setzt natürlich mehrere gleichzeitige Markierungen voraus, um so über die Abflußverhältnisse unter einheitlichen hydrologischen Bedingungen Auskunft geben zu können.

Um diesen angesprochenen Fragen einigermaßen gerecht zu werden, wurden unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Gegebenheiten acht Eingabestellen ausge-

wählt. Sie werden im nachfolgenden Abschnitt 4.3.2. im einzelnen aufgeführt und näher beschrieben. Zusammen mit den beabsichtigten Vergleichstesten benötigte man insgesamt 13 verschiedene Markierungsmittel. Es war daher nicht möglich, sich auf eine Gruppe zu beschränken, sondern man mußte mehr oder minder die gesamte Palette der bekannten Tracer (mit Ausnahme der radioaktiven) heranziehen. Es war daher weniger eine Frage der Auswahl, als vielmehr der optimalen Zuordnung zu den einzelnen Eingabestellen, um so einerseits den jeweiligen lokalen Verhältnissen Rechnung zu tragen und andererseits eine gegenseitige Beeinträchtigung der Markierungsstoffe möglichst auszuschließen.

Hauptträger des kombinierten Versuches sollten die Fluoreszenztracer sein. Es wurden fünf, in ihren spektralen Eigenschaften sich ergänzende Stoffe, nämlich Uranin AP, Eosin FB, Rhodamin B, Amidorhodamin G extra und Tinopal ABP, für die Anwendungsbeispiele in mehr oder weniger großer Zahl vorliegen (vgl. z. B. F. BAUER et al., 1976.; F. BAUER et al., 1980), eingesetzt. Uranin als nachweisempfindlichster Fluoreszenztracer wurde für die Eingabestelle VI (= E VI) westlich des Hüritales vorgesehen, von wo man unterirdische Abflüsse mit entsprechender Verdünnung bis weit nach W und NW in Erwägung ziehen mußte.

Um nun eine gegenseitige Störung bei der Probenauswertung infolge ähnlicher Emissionsspektren weitgehend auszuschalten, sollte Eosin in entgegengesetzter Richtung nordöstlich der Muota (E I) eingesetzt werden. Gleiches gilt für die Stoffe Rhodamin und Amidorhodamin. Beide wurden zwar für die Markierung des Bereiches südlich der Muota verwendet (E IV und E V), doch war aus der räumlichen Entfernung und den unterschiedlichen geologischen Positionen der vorgesehenen Beschickungsstellen anzunehmen, daß beim Auftreten dieser Stoffe in denselben Quellen die Hauptdurchgänge sich zeitlich nicht überlagern würden.

Für kombinierte Markierungsversuche in Karstgebieten eignen sich verschieden angefarbte Sporen besonders gut, da man damit mehrere vollkommen gleichwertige Tracer zur Verfügung hat. Beim Versuch im Muotatal wurde angestrebt, die dafür vorgesehenen Eingabestellen in Abhängigkeit von der Fragestellung so zu konzentrieren, daß nur relativ wenige Austritte zu beobachten waren, um damit die personal- und zeitintensive Probenentnahme und -auswertung möglichst einzuschränken. Rot gefärbte Sporen wurden mit Uranin in die Schwinde westlich des Hüribaches (E VI) eingebracht. Damit sollte abgeklärt werden, ob gegebenenfalls der unterirdische Abfluß ausschließlich über den Karst oder teilweise über den alluvialen Schotterkörper des Hüribaches (Abfilterung der Sporen) zu den Quellen gelangt.

Blau gefärbte Sporen wurden gemeinsam mit Phytoplankton im Bereich des Wasserberges eingesetzt. Neben Fragen der örtlichen Entwässerung sollte damit nochmals die Vergleichbarkeit dieser beiden Triftstoffe getestet werden. Die Verwendung von Phytoplankton hat bei Versuchen in anderen Gebieten z. T. von den übrigen Tracern abweichende Ergebnisse geliefert (H. BATSCHE et al., 1970.; F. BAUER et al., 1980).

Ohne den Beprobungsumfang zu erhöhen, konnte eine weitere Sporeneingabe im Wasserdorn des Hölloches (E II) durchgeführt werden. Sie sollte an ältere Färbversuche anbinden, die dort im Rahmen früherer speleologischer Forschungen vorgenommen wurden. Durch den Einsatz von fluoreszierend gefärbten Sporen sollte zugleich eine Vereinfachung der Probenauswertung unter einem UV-Mikroskop getestet werden. Zum Vergleich wurden nach herkömmlicher Methode (M. DECHANT, 1967) grün gefärbte Sporen gleichzeitig in E II eingegeben.

Die dritte Hauptgruppe der Markierungsstoffe bilden die Salze. Im Rahmen des Versuches im Muotatal kamen Lithiumchlorid und Natriumchlorid zum Einsatz (E IV). Das Lithiumchlorid wurde parallel mit Tinopal eingespeist. Die Eignung dieses

Fluoreszenzstoffes, der im Rahmen der Versuche zum 4. SUWT zur Verbesserung der Eingabetechnik erstmals in vorgelöster Form eingesetzt wurde, sollte mit der gleichzeitigen Eingabe von Lithiumchlorid überprüft werden.

Natriumchloridlösung wurde zur Markierung des im Bachbett versickernden Muotawasseres unterhalb der Zwingsbrücke (E VII) im Bisistal herangezogen. Zusammen mit der weiter oberstromig erfolgten Eingabe von Detergentia (E VIII) sollte damit abgeklärt werden, wie weit Talgrundwasser an der Schüttung der Quellen im Bereich Balm - Fugglen beteiligt ist.

Eine Zusammenstellung der eingesetzten Markierungsstoffe einschließlich der verwendeten Mengen ist in Tab. 11 gegeben. Im nachfolgenden Abschnitt 4.3. werden die Eingabestellen sowie die Vorbereitung und die Durchführung der Einspeisungen im Detail beschrieben.

4.3. Eingabestellen und Einspeisungsbedingungen (A. BÖGLI)

4.3.1. Meteorologische und hydrologische Verhältnisse vor und während der Einspeisungen

Die ungewöhnlichen meteorologischen Bedingungen in den Monaten Mai, Juni und Juli 1979 führten zu einem früheren Abschluß der Schneeschmelze unter 1800 m ü M. Im Juli fielen nur 31 % des langjährigen Monatsmittels an Niederschlägen. Von dieser Trockenheit wurde besonders die zweite Monatshälfte betroffen. Vom 15. bis zum 31. 7. fielen beim EW Bisisthal (790 m ü M) nur 29,2 mm Regen, davon 15,4 mm am 29. 7., beim EW Hinterthal (645 m ü M) sogar nur 18,0 mm (9,8 mm am 29. 7.). Der Regen vom 29. 7. hatte keinen Einfluß auf die Wasserführung. Im EW Bisisthal betrug das Mittel der täglichen Temperatur-Maxima im gleichen Zeitraum 20,8°C, jenes der Minima 9,9°C. Die wenigen Bäche waren Ende Juli zum größten Teil versiegt. Deshalb mußten die vorgesehenen Eingabestellen I (Unteres Roggenloch), III (Wasserberg) und IV (Hüttenboden/Galtenäbnet) verlegt werden, desgleichen Nr. V von Schafsaß nach Riedboden/Matten.

4.3.2. Eingabestellen

Als Eingabestellen (= E) wurden Standorte ausgewählt (s. Fig. 3, Tab. 11), die entweder vorausgegangene Markierungen mit sehr beschränkter Zielsetzung ergänzen würden (E I und E II), unbekannte karsthydrographische Beziehungen aufdecken (E III, IV, V, VI) oder den vermuteten Grundwasserstrom bestätigen sollten (E VII, VIII).

Eingabestelle I, Oberes Roggenloch:

Das Obere Roggenloch (1570 m ü M), das als Ersatz für das trockengefallene Untere Roggenloch diente, ist eine geschlossene Karsthohlform am unteren Ende eines kleinen Blindtales. Auf der Nordseite treten mehrere Schwinden auf, und auf der Süd- und der Westseite gibt es einige kleine Quellen. Der kleine Bach im NE war schon 100 m vor Erreichen der Hohlform völlig versickert. Die Quellen lieferten so wenig Wasser, daß davon beim westlichsten Ponor nur 0,2 l/s zur Verfügung standen. Deshalb wurde ein Behelfsbassin von 1,8 m³ aufgestellt und am Vortag gefüllt. Diese Wasserreserve unterstützte mit 0,2 l/s zusätzlich die Einspeisung des Markierungsmittels. In einem 240-Liter-Faß wurden 10 kg Eosin gelöst und am 31. 7. von 11.00 bis 11.55 Uhr eingespeist. Während weiterer 20 Minuten wurde mit zusätzlich 0,2 l/s nachgespült.

Eingabestelle II, Hölloch/Wasserdom:

Im Hölloch ist der Wasserdom (830 m ü M), ein unterirdischer Hohlraum mit den Ausmaßen L : B : H = 45 m : 15 m : 25 m, als Eingabestelle ausgewählt worden. Ein

Tab. 11: Übersicht über die Einspeisungen 1979.

Eingabestellen Nr. Ort	Höhe m ü M	Leitung	Tracer	Menge	Einspeisung Datum u. Zeit	Lö- sung	Dauer- abfluß	Abfluß in l/s			
								Vor-	Zwischen- Spülung	Nach-	
I Ober, Roggen- loch	1570	J. G. ZÖTL	Eosin FB	10 kg	31. 7./11.00-11.55	0,1	0,2	0,2		0,2	
II Hölloch/ Wasserdom	830	A. WILDBERGER	Lycopodium- sporen, grün	5 kg	31. 7./10.45-11.15		2,0				
			Sporen, orange- fluoreszierend	3,4 kg	31. 7./11.20-11.30		2,0				
IIIa Wasserberg 400 m oberhalb Chal- berlochhütte	1710	H. HÖTZL	Phytoplankton	2 l	31. 7./11.05-11.10			}	0,35	0,35	0,35
			Lycopodium- sporen, blau	15 kg	31. 7./11.25-11.30						
IIIb Wasserberg, N- Fuß des Wasserb.- Firstes	1810	H. HÖTZL	Rhodamin B	10 kg	31. 7./13.15-14.30	0,1	0,3				
IV Riedboden/Gal- tenäbnet	1935	H. BERRENS	Tinopal ABP	99 kg	31. 7./10.50-11.20		0,5				
			LiCl	50%ig 100 kg	31. 7./10.50-11.05		0,5				
V Riedboden/Mat- ten	1990	G. ACKERMANN	Amidorhodamin G extra	15 kg	31. 7./10.56-11.14	0,1	1	0,2	0,3	0,3	
VI Seenalpeeli Vorversuch Hauptversuch	1719	G. ACKERMANN	Uranin A	1 kg	29. 7./11.30-11.45		8				
		H. ZOJER	Uranin A Lycopodium- sporen, rot	20 kg 10 kg	31. 7./10.15-11.15 31. 7./10.00-11.10		5 5				
VII Unterhalb Zwingsbrügg, Muota	720	J. KOVESDI	Salzsole (NaCl)	5100 kg NaCl	31. 7./11.00-12.00		50				
VIII Bisistal: Riedplätz/ Mettlen	770	W. KASS	Alkylbenzol- sulfonat	200 kg 50%ig	1. 8./18.22-18.40		500				

Wasserfall aus der Decke liefert das nötige Markierungswasser. Am 31. 7. 1979, in der Zeit von 10.45 bis 11.30 Uhr, wurde der Abfluß (2 l/s) mit grünen (5 kg) und orange-fluoreszierenden (braunen) Lycopodiumsporen (3,4 kg) markiert. Letztere erwiesen sich als merklich leichter benetzbar und zeigten größere Sinkgeschwindigkeit als die grünen. Der Abstand vom „Schleichenden Brunnen“, der Resurgenz des gesamten Hölloch-Systems, beträgt 1,4 km; die wahre Fließlänge überschreitet 3 km, was sich aus den tektonischen Bedingungen und dem Auftreten von gefärbten Sporen im Seengang ableiten läßt.

Eingabestellen IIIa und IIIb, Wasserberg:

IIIa: Der Wasserberg litt Ende Juli 1979 besonders unter Wassermangel. Die vorgesehene Einspeisungsstelle III ist ein unbegehbarer Schacht, worin noch Anfang Juli 30 Liter Wasser pro Sekunde ohne Rückstau verschwanden. Schon am 20. 7. war der Bach trocken. Da auf diese Schluckstelle nicht verzichtet werden konnte, stellte man uns dankenswerterweise einen Armeehelikopter zur Verfügung, der in 13 Flügen 3500 Liter Wasser in Fässern sowie anderes schweres Material von 630 auf 1710 m ü M hinaufflog. Das Einspeisungsprogramm wurde gekürzt. An dieser Eingabestelle, nun als IIIa bezeichnet, beschränkten wir uns auf die Eingabe von Phytoplankton und blauen Lycopodiumsporen. Am 31. 7. 1979 wurde von 10.30 bis 13.10 Uhr durchgehend mit durchschnittlich 0,3 bis 0,4 l/s gespült und von 11.05 bis 11.30 Uhr die Markierungsmittel eingegeben. Zuerst wurde das Phytoplankton 2-1-Suspension) und dann die Sporen (15 kg) eingebracht. Letztere wurden mit 200 l Wasser angerührt und diese Aufschwemmung vorsichtig, ohne die Abflußmenge zu erhöhen, der Spülung beigegeben.

IIIb: H. HÖTZL konnte am Vortag unterhalb eines Lawinenkegels am Nordfuß des Wasserbergfirstes auf 1810 m ü M einen Schmelzwasserbach mit 0,3 l/s Wasserführung ausmachen, der nach kurzem Laufe in einer Spalte verschwand. Hier wurden am 31. 7. 1979 von 13.15 bis 14.30 Uhr 10 kg Rhodamin B, vorgelöst in 200 l Wasser, eingespeist.

Eingabestelle IV, Riedboden/Galtenäbnet:

Der ursprünglich vorgesehene Einspeisungsort SSE vom Wasserbergfirst, Hüttenboden (1805 m ü M) auf Galtenäbnet, war hoffnungslos ausgetrocknet. Er wurde ersetzt durch einen Ponor auf dem Riedboden (1935 m ü M), am SW-Ende von Galtenäbnet. Hier verschwand ein Schmelzwasserbach von 0,5 l/s Wasserführung in einer Spalte im Quintnerkalk an der Grenze zu den hangenden Zementsteinschichten. Am 31. 7. 1979 von 10.50 bis 11.20 Uhr wurden 99 kg 50%ige Tinopallösung und 100 kg Lithiumchlorid eingespeist.

Eingabestelle V, Riedboden/Matten:

Aus einer breiten, flachen, teilweise noch schneebedeckten Mulde in den Zementsteinschichten floß am 31. 7. 1979 ca. 1 l/s Schneeschmelzwasser in eine Verwerfung (1990 m ü M), die zum liegenden Quintnerkalk hinunterführt. Diese Verwerfung wurde z. T. ausgeräumt und von 10.30 bis 10.56 Uhr durch zusätzliche 0,2 bis 0,3 Liter Wasser pro Sekunde durchgespült. Dann wurden von 10.56 bis 11.14 Uhr 15 kg Amidorhodamin G extra, in 60 l Wasser aufgelöst, zugesetzt. Von 11.14 bis 11.50 Uhr wurde mit 0,3 l/s der Arbeitsplatz von Farbstoffresten gereinigt.

Eingabestelle VI, Seenalpseeli:

Am Ostrand des Seenalpseelis (1719 m ü M) befindet sich eine größere Schwinde, 1000 m davon entfernt und 150 m tiefer treten in Richtung des vermuteten Abflusses

einige Quellen auf, und einige weitere befinden sich im Talgrund 500 m tiefer. Sie könnten durch die vorgesehene Markierung stärker betroffen werden. Ein Vorversuch war daher angebracht. Am 29. 7. 1979, 11.30 bis 11.35 Uhr, wurde 1 kg Uranin gelöst und in die Schwinde geschüttet. Die Wasserführung betrug 8 l/s. Nachdem innerhalb von 48 Stunden kein sichtbarer Farbaustritt zu beobachten war, begann der Hauptversuch. Die späteren Detailuntersuchungen bestätigten, daß die oben angeführten Quellen nicht mit der Schwinde am Seenalpsee zusammenhängen.

Hauptversuch: Am 31. 7. 1979 wurden von 10.00 Uhr bis 11.10 Uhr weitere 20 kg Uranin und von 10.15 bis 11.15 Uhr noch 10 kg rote Lycopodiumsporen eingespeist. Die Wasserführung war seit dem 29. 7. 1979 auf 5 l/s gesunken, und das Wasser verteilte sich auf zwei punktuelle Schluckstellen.

Eingabestelle VII, Muotabett unterhalb Zwingsbrugg:

Am 31. 7. 1979, 11.00 bis 12.00 Uhr, wurden aus einem Tankwagen 17.000 Liter konzentrierte 30%ige Salzsole (5100 kg NaCl) wenige Meter unterhalb der Zwingsbrücke direkt in die Muota geleitet (720 m ü M). Das Wasser floß z. T. bis zum Klesammler am Fuße der Steilstrecke beim „Herrgottsstutz“. Dort versickerte der noch beträchtliche Rest vollständig. Ziel dieser Markierung war die Feststellung, welche Quellen im Bereiche von Balm – Fugglen (Quellnummern 1 bis 20a) von versickerndem Muotawasser bzw. Talgrundwasser betroffen werden.

Eingabestelle VIII, Riedplätz/Mettlenbrücke:

Am 1. 8. 1979 wurde gegen Abend eine Markierung mit 200 kg Alkylbenzolsulfonat im Muotabett bei der Mettlenbrücke (770 m ü M) vorbereitet. Früher als erwartet kam vom Stauwehr her ein Wasserschwall von ca. 500 l/s, der das breite, 50%ige Material vor der völligen Auflösung mit sich riß. Die Frontwelle, begleitet von einem meterhohen Schaumwall, erreichte gegen 21 Uhr die obere Steinweidbrücke, soll aber noch vor der unteren Brücke versickert sein. Das Unwetter vom 3. August (Niederschlag in 2 Stunden 33 mm) brachte einen durchgehenden Hochwasserabfluß, der mit Detergentiaschaumflocken gekrönt war.

4.4. Beobachtungsstellen und Probennahme

Die Beobachtungsstellen können in vier Gruppen eingeteilt werden. Die Gruppe Hürital wurde vom Geologischen Institut der Universität Karlsruhe betreut, die anderen drei Bereiche Balm – Fugglen (Nr. 1 – 20a, 22), Zwingsbrugg (Nr. 21, 21a, 46, 49), Seeberg (Nr. 23, 24, 25, 59, 62, 65) aber von der AGH (Arbeitsgemeinschaft Hölllochforschung). Dazu wurden von der Schweizerischen Landeshydrologie fünf Limnigraphen (Nr. 6a, 13, 14, 16 und 23) und die Meßstelle Nr. 15 eingerichtet und unterhalten. Wir sind diesem Amt für die Hilfe zu großem Dank verpflichtet. Diese Nummern sind Probennahmestellen einerseits für den Markierungsversuch, andererseits für die Langzeituntersuchungen zur Bestimmung des Gehaltes an Ca^{++} , Mg^{++} und HCO_3^- , des pH-Wertes, der Leitfähigkeit und der Temperatur.

4.4.1. Die Quellen im Hürital (H. HÖTZL, V. MAURIN)

Das S-N-verlaufende Hürital trennt den Wasserberg im E von dem gleich aufgebauten Chaiserstock im W (s. Tafel IV). Mit den beiden in den südlichen Einzugsbereichen (Seenalp-Gebiet und Galtenäbnel) gelegenen Eingabestellen V und VI sollte geprüft werden, wie weit die unterirdische Entwässerung großräumig erfolgt, oder ob für diese verkarsteten Bereiche der bei Hinterthal in die Muota einmündende Hüribach den zugehörigen Vorfluter darstellt. Dazu wurde eine Reihe von Quellen im mittleren und im unteren Abschnitt des Hüritales in die Beobachtung einbezogen.

In Betracht kamen zunächst Quellen des flachen Talbodens von Wängi (ca. 1450 m ü M) unterhalb der Mittsten Hütten. Dort treten sowohl links als auch rechts des Hüribaches aus den Schutthalden Karstwässer zutage. Von diesen Austritten (vgl. Abschn. 3.4.3.2. und Tab. 10) wurde die Quelle Nr. 108 in die Beobachtung für den Markierungsversuch mit einbezogen. Das gleiche gilt für die Quelle Nr. 107a am nördlichen Ende des Talbodens von Wängi nahe den Vordersten Hütten.

Die Quellen Nr. 113 und 114 treten etwas nördlicher auf der rechten Talflanke im Lauwi an der Basis der Quintnerkalke aus (ca. 150 m über dem Hüribach). Ihre Schüttungen sind sehr ungleichmäßig, sie sprechen relativ rasch auf Niederschläge an.

Weiter nach N wurden auf der linken Talflanke die Quellen Nr. 137 (1560 m ü M), Nr. 138 (1350 m ü M) und Nr. 144 (1460 m ü M) beobachtet. Diese Wasseraustritte wurden bereits im Rahmen des Vorversuches beim Seenalpseeli als mögliche Wiederaustritte kontrolliert; das Ergebnis war jedoch negativ.

Die Quelle Nr. 140 liegt wieder auf der rechten Talseite und ist für die Ansiedlung Liplisbüel gefaßt. Eine weiter hangaufwärts gelegene Quelle bei Zingel wurde nur durch Beprobung des abfließenden Gerinnes laufend auf Markierungsstoffe untersucht (Nr. 141).

Bei Liplisbüel (1194 m ü M) wird auch das Restwasser des Hüribaches gefaßt, so daß bei mittlerer und niedriger Wasserführung sein Wasser vollständig über das EW Hinterthal (Fugglen) abgeleitet wird. Aber bereits oberhalb, im „Grund“, an der Kantongrenze Uri/Schwyz, versickert das Bachwasser in größerem Ausmaße in den Alluvionen. Auf halbem Weg zwischen Liplisbüel und dem Muotatal treten auf ca. 950 m ü M wieder größere Quellen aus, von denen die Nummern 115 und 120 mitbeobachtet wurden. Sie liegen direkt neben dem Bachbett. Nach einem Hochwasser während des Versuches, das mit größeren Ausräumungen und Schotterablagerungen verbunden war, lag nur noch ein gemeinsamer Austritt vor. Das Wasser kommt wahrscheinlich aus den Schrattekalken.

Für die Beobachtung beim Markierungsversuch konnte davon ausgegangen werden, daß, wenn es zu Wiederaustritten von den in den Eingabestellen V und VI eingesetzten Tracern in Quellen des Hüritales kommen sollte, dies sehr kurzfristig erfolgen würde. Daher war eine intensive Beprobung zunächst nur über die ersten drei Wochen vorgesehen. In der Zeit vom 31. 7. bis 8. 8. 1979 wurden täglich zweimal Direkt-, Sporen- und Aktivkohleproben entnommen, vom 9. 8. bis 17. 8. täglich einmal. Danach konnte die Beprobung aufgrund der bis dahin vorliegenden Ergebnisse eingestellt werden.

4.4.2. Die Quellen in Balm – Fugglen (A. BÖGLI)

Balm – Fugglen (Fig. 35) ist ein nahezu geschlossenes, glazial übertieftes Becken, das mit groben, schlecht sortierten Wildbachablagerungen gefüllt ist. Seine Oberfläche liegt bei 640 ± 5 m ü M. Seit 1910 ist der einstige Wildbach gebändigt und fließt seither als Muotafluß zwischen hohen Dämmen. Unmittelbar vor der Einmündung des Starzlenbaches verengt sich die Talbreite auf ein Fünftel, weil dort die Stirn der Axendecke mit ihren durchlässigen, doch morphologisch harten Schrattekalken steil unter die Valanginienmergel der Säntis-Drusberg-Decke eintaucht. Diese Stelle bestimmt die Höhe des Vorflutniveaus im Becken. Vor dem Bau des EW Hinterthal lag es beim „Schleichenden Brunnen“ (Quell-Nr. 1, 2, 2a und 3) bei 638 ± 1 m ü M und stieg während der Hochwässer auf 639 m. In der Mitte der Talsohle lag der Grundwasserspiegel kaum tiefer, zeigte aber um die Quelle Nr. 17 eine Aufwölbung. Die meisten Quellen liegen randlich. Unmittelbar aus dem Schrattekalk treten die Nr. 1, 8 und 9 aus, während 2, 2a, 3 und 7a dem Schuttfuß der Schrattekalkwand und 20a

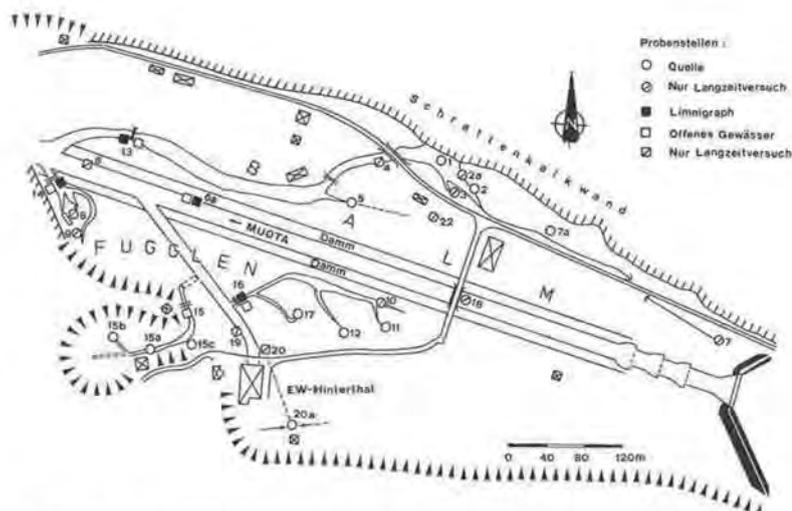


Fig. 35: Lageskizze der Quellen und Beprobungsstellen im Bereich Balm-Fugglen. 1 = Schleichender Brunnen.

bzw. 20 jenem des Wasserberghanges im S entspringen. 15a und 15c sind Quellen, die unter einer diesem Hang vorgelagerten Moräne hervortreten. Quelle 15b hat im wesentlichen ein lokales Einzugsgebiet, das die Austrittsstelle nur um knapp 50 m überragt. Im Talboden selbst entspringen die Nr. 5, 22 und 7 rechts der Muota und 10, 11, 12 und 17 links davon, während die Quelle Nr. 18 bei der Brücke im Muotabett hervorquillt. Aus offenen Gerinnen stammen die Proben 4, 6, bzw. 6a, 13, 14, 15, 16 und 19.

Der Talboden rechts der Muota, Balm:

Die Nr. 1 ist der „Schleichende Brunnen“. Sie ist eine „falsche Vaucusequelle“ – eine aufsteigende Quelle zwischen Kalk und Talschotter – der Hauptabfluß des Höllloch-Systems. Hier tritt das Wasser von 22 km² Hochgebirgskarst mit nacktem und silvanem Karst aus. Die Austrittsstelle liegt viel tiefer als der Grundwasserspiegel des Talgrundes. Um den Anteil von Talgrundwasser in den Proben möglichst klein zu halten, wurde ein Schlauch versenkt und vor der Öffnung in etwa 1,5 m Tiefe verankert. Das austretende Wasser wurde hier abgesogen und die Proben 100 m weiter unterhalb entnommen. Nr. 4 wurde nur für den Langzeitversuch eingerichtet und erfährt das Wasser der Nr. 1, 2, 2a, 3, 7 und 7a, sowie von nicht beprobten, praktisch unzugänglichen Quellen im Bachbett unter der Straßenbrücke. Davon weist Nr. 1 den höchsten Anteil an Karstwasser, Nr. 7 den höchsten an Talgrundwasser auf. Nr. 5 ist ein Grundwasserabfluß, z. T. Drainagewasser, das u. a. von Nr. 22 stammt. Nr. 13 erfährt den gesamten Abfluß von Balm (Nr. 1, 2, 2a, 3, 4, 5, 7, 7a und 22) und ist eine Mischung von Karst-, Grund- und Meteorwasser. Der Anteil an Karstwasser überwiegt beträchtlich. Nr. 13 ist zugleich Limnigraphenstation. Die Extreme des Abflusses liegen bei 0,05 und 13 m³/s (s. Tafel II). Die Abflußmenge ist etwas größer als die Was-

serspende des Hölloch-Systems. Die Nummern 2, 2a und 3 fließen nicht immer, 7, 7a und 22 sogar recht selten. Die Nummern 4, 7 und 22 wurden nur für den Langzeitversuch beprobt.

Muotabett:

Die Limnigraphenstation 6a erfaßt das Muotawasser oberhalb der Einmündung des Unterwassers vom EW Hinterthal. Die Wasserführung zeigt extrem große Schwankungen, weil bei Mettlen das Muotawasser in das Ausgleichsbecken für dieses EW abgezweigt wird. Bei niedrigem Mittelwasser fällt deshalb das Muotabett unterhalb der Stauanlage trocken, erhält dann oberhalb der Zwingsbrücke wieder Quellwasser, das aber spätestens im Kiessammler ganz versickert. Unterhalb dieses Sammlers tritt auf einer Strecke von 500 m wieder Talgrundwasser ins Flußbett aus, z. T. bis zu einem Meter über der Sohle. Auf den letzten 200 m vor dem Limnigraphen 6a ist viel Karstwasser beigemischt. Die Extreme der Wasserführung liegen bei 0,1 und 35 m³/s.

Die Quelle Nr. 18 erfaßt die Grundwasseraufstöße bei der Brücke zum EW. Sie wurde nur für die Langzeituntersuchungen beprobt und zwar nur während der Zeiten, wo kein Muotawasser von oben direkt zufließt. Nr. 6 wurde für die Langzeituntersuchung beprobt, dann aber durch 6a ersetzt.

Der Talboden links der Muota, Fugglen:

Der Bereich umfaßt die Karstwasseraustritte beim *Guggenhürli*, und zwar Nr. 8 und 9 und den Limnigraphen Nr. 14. Die Wasserführung schwankt hier im gleichen Rhythmus wie bei Nr. 13, doch mit stark gedämpften Ausschlägen mit den Extremen 0,01 und 1,55 m³/s.

Die Quellgruppe *Fugglen-Ost* (10, 11, 12 und 17) wird durch den Limnigraphen Nr. 16 erfaßt. Die Abflußextreme sind 0,01 und 0,88 m³/s. Hier ist die Nr. 17 bemerkenswert: das Wasser hat Feinmaterial aus dem Untergrund herausgeschwemmt und um den Quelltrichter herum als flache Kuppe abgelagert. An ihrem Scheitelpunkt liegt der Quellwasserspiegel ca. einen Meter über jenem der benachbarten Quellen. Im Winter fließt kein Wasser. Es kann daraus und aus dem Auftreten von Markierungsmitteln während des großen Versuches auf einen kräftigen Karstwasserzufluß aus dem Untergrund geschlossen werden. Die Nr. 10 fließt während des höheren Mittelwassers und bei Hochwasser. Meist liegt ihr Wasserspiegel merklich höher als jener der nur durch einen Damm getrennten Muota. Das Auftreten von Uranin, durch visuelle Erfassung gesichert, läßt auch hier auf einen unter den Schottern liegenden Karstwasseraustritt schließen.

Die Quellgruppe *Fugglen-West* wird durch Wasser gespeist, das unter Moränenhügeln am Fuße der südlichen Berghänge hervorquillt (15a und 15c). Es dürfte sich um Mischwasser mit einem großen Karstwasseranteil handeln. Extreme des Abflusses sind bei der Pegelstation Nr. 15 0,05 und 0,23 m³/s. Ein Sonderfall ist die Quelle Nr. 15b, die völlig aus dem Rahmen fällt. Ihr geringer, nie austrocknender Erguß von wenigen Litern pro Minute wird durch das Flachmoor stabilisiert, an dessen Rande die Quelle liegt. Die Gehalte an gelöstem Kalk liegen zwischen 1,45 und 2,35 mmol/l, während die 40 m entfernte Nr. 15a Gehalte zwischen 0,8 und 1,5 mmol/l aufweist. Die Temperaturen schwanken zwischen 5,0 und 9,9°C bei 15c, bei 15a zwischen 5,0 und 7,4°C. Das Einzugsgebiet von 15b umfaßt steile Heuwiesen auf einem mageren Boden über einer geringmächtigen Moränenunterlage. Das Anstehende ist Schratzenkalk, der an vielen Stellen nackt zutage tritt. Alles spricht aber dafür, daß es sich im wesentlichen um Hangwasser und oberflächennahes Grundwasser handelt. Das Auftreten von Uranin und Rhodamin im August 1979 in Einzelschüben unmittelbar

nach stärkeren Regenfällen läßt jedoch auch Zusicckerungen aus dem Schrattenkalk bei Hochwasser erkennen.

Das Wasser aus Nr. 20 bzw. 20a: 20a ist die Sammelstelle für mehrere kleinere Wasseraustritte am Rande des blockigen Gehängeschuttkegels. Von dort wird es unterirdisch dem Unterwasser des EW Hinterthal zugeleitet. Nachträglich hat sich herausgestellt, daß dieser Leitung noch Kühlwasser des EW zugeführt wird, so daß die Nr. 20 nicht ganz dem Wasser von 20a entspricht. Die Proben für die Langzeituntersuchung wurden der Nr. 20 entnommen, jene für die Markierung aber Nr. 20a, wodurch eine Verfälschung der Resultate vermieden werden konnte.

4.4.3. Die Beprobungsstellen oberhalb der Zwingsbrücke (A. BÖGLI)

Von den zahllosen Quellen, die 500 m von der Zwingsbrücke (Fig. 36) an aufwärts zu finden sind, konnten nur zwei dauernd untersucht werden, die Nr. 21 und 46. Die Nr. 21a, ein Grundwasseraustritt im Muotabett, ist häufig überschwemmt, und Nr. 49 ist im Sommer gelegentlich, im Winterhalbjahr dauernd trocken.

Die Nr. 21 entstammt dem linksseitigen Bergrutschmaterial und wird nur bei größerem Hochwasser von der Muota erreicht. Das Wasser ist praktisch frei von Schwebstoffen. Nr. 21a hat sich für den Langzeitversuch wegen der immer wieder möglichen Zumischung von Muotawasser wenig geeignet, und die Resultate der Markierungen wurden aus dem gleichen Grunde durch Kontamination verfälscht. Das Wasser von Nr. 46 stammt aus einer Wasserleitung, die reines Karstwasser von den Richliswaldquellen (Ober-Schwarzenbach) enthält. Das Wasser der Nr. 49 fließt aus dem mächtigen Schuttfuß der Kalkwände der rechten Talseite,

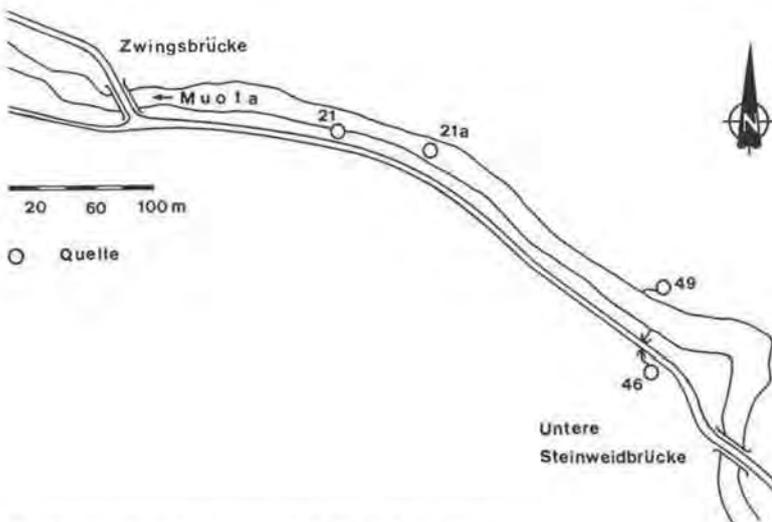


Fig. 36: Lageskizze der Quellen oberhalb der Zwingsbrücke.

dem Hauptversuch waren ungewollt so hoch, daß sie noch 13 km flußabwärts einige Aufregung verursachten.

Amidorhodamin aus E V konnte in der Quellgruppe 113/114 wegen seiner roten Farbe schon von weitem erkannt werden.

Insgesamt wurden im Muotatal zwischen dem 30. 7. und dem 29. 11. 1979 und vom 23. 4. bis zum 19. 7. 1980 die Wasserentnahmestellen 87mal beprobt, im Frühjahr 1980 aber nur noch an 15 Probenstellen und nur mit Aktivkohle. Über den Probenplan orientiert Fig. 38.

4.5. Methoden und Analysenergebnisse

4.5.1. Die Markierung mit Fluoreszenztracern, Nachweismethoden und Ergebnisse (H. BEHRENS, H. HÖTZL, V. MAURIN)

Bei den Markierungsversuchen im Muotatal wurden die in Tab. 12 aufgeführten Fluoreszenzfarbstoffe eingesetzt, die aufgrund zahlreicher Erfahrungen und Bewährungen ihren festen Platz als Markierungsmittel für hydrogeologische Untersuchungen gefunden haben.

Tab. 12: Verwendete Fluoreszenzfarbstoffe.

Farbstoff	Colour-Index Nr.	Verwendete Handelsform
Uranin	45 350	Uranin AP
Eosin	45 380	Eosin FB
Amidorhodamin G	45 220	Amidorhodamin G extra
Rhodamin B	45 170	Rhodamin FB

Außerdem wurde als weiterer Fluoreszenztracer nach den positiven Erfahrungen bei den Markierungsversuchen 1975 im Bereich der Ljubjanica (F. BAUER et al., 1976) wiederum ein optischer Aufheller verwendet. Im Gegensatz zu dem damals benutzten pulverförmigen „Tinopal CBS-X“ stand diesmal ein flüssiges Tinopal-Präparat („Tinopal ABP flüssig“) zur Verfügung. Dieses Präparat bereitete allerdings wegen seiner relativ geringen Fluoreszenzintensität und wegen einer schlechten Reproduzierbarkeit der Meßwerte Probleme (Details in den Einzelberichten), so daß zumindest für die Direktmessung keine exakten Meßwerte mitgeteilt werden können.

Die Auswahl der einzelnen Fluoreszenztracer für die verschiedenen Eingabestellen erfolgte vor allem aufgrund der spektralen Eigenschaften der Farbstoffe, um so entsprechend den bislang vorliegenden Kenntnissen und den zu erwartenden Fließzeiten eine möglichst geringe gegenseitige Beeinträchtigung des Tracernachweises zu erreichen. Um einerseits möglichst sichere Untersuchungsergebnisse zu erhalten, aber auch, um andererseits weitere Erkenntnisse über die Tracereigenschaften unter den gegebenen Einsatzbedingungen zu gewinnen, wurden Fluoreszenztracer gemeinsam mit weiteren Markierungsstoffen eingegeben (s. Abschn. 4.2.).

Am Nachweis der Fluoreszenztracer waren beteiligt:

- das Geologische Institut der Universität Karlsruhe sowohl mit der spektralfluorimetrischen Direktmessung als auch mit einer an diesem Institut entwickelten dünn-schichtchromatographischen Trenn- und Nachweismethode (F. P. BÜB et al., 1979) sowie mit der bewährten Aktivkohlemethode zur integrierenden Probenahme,
- das GSF-Institut für Radiohydrometrie (Neuherberg/München) mit spektralfluorimetrischen Direktmessungen an entnommenen Wasserproben.

Durch die Beteiligung verschiedener Institute bzw. den Einsatz unterschiedlicher Meßmethoden wurden über die hydrogeologischen Versuchsergebnisse hinaus weitere Informationen über die Reproduzierbarkeit bzw. die Aussagekraft der verschiedenen Meßverfahren erwartet.

4.5.1.1. Spektralfluorimetrische Direktmessung

Die Direktmessung erfolgte an Einzelproben, die in PE-Flaschen abgefüllt und vor Licht geschützt in die beteiligten Labors versandt wurden. Als Meßverfahren wurde das „Synchron-Scan-Verfahren“ (H. BEHRENS, 1971, 1973) angewandt, bei dem Monochromatoren eines Spektralfluorimeters gleichzeitig in konstantem Abstand durch die interessierenden Spektralbereiche gefahren werden ($\Delta \lambda = 20 - 25$ nm bei den Fluoreszenzfarbstoffen, $\Delta \lambda = 65 - 70$ nm bei Tinopal). Die so erreichbaren Nachweisgrenzen werden von den verschiedenen Labors etwas unterschiedlich angegeben und reichen von $0,002 - 0,005$ mg/m³ für Uranin bis $0,01 - 0,1$ mg/m³ für Eosin. Obwohl mit dem „Synchron-Scan-Verfahren“ ein verbessertes spektrales Auflösungsvermögen und die Reduzierung des Backgroundsignals erreicht werden, erzielt auch diese Methode bei gleichzeitigem Vorliegen mehrerer Fluoreszenztracer nicht immer eine ausreichende Trennung. In solchen Fällen wurden zusätzlich einfache Probenbehandlungsverfahren angewandt, um störende Einzelkomponenten zu unterdrücken. Solche Verfahren nutzen z. B. die unterschiedliche pH-Abhängigkeit der Fluoreszenz oder das unterschiedliche Adsorptionsverhalten der einzelnen Fluoreszenztracer aus (Einzelheiten dazu im Beitrag von H. BEHRENS, 4. SUWT 1981).

4.5.1.2. Aktivkohlemethode

Der Einsatz von Aktivkohlefiltern zur Beobachtung und Auswertung von Grundwassermarkierungen wird seit Jahren mit Erfolg praktiziert (H. BATSCHKE et al., 1967, 1970; R. GOSPODARIĆ & P. HABIĆ, 1976; I. MÜLLER & J. G. ZÖTL, 1980). Die Methode ermöglicht mit besonders hoher Empfindlichkeit den qualitativen Nachweis von Fluoreszenzstoffen sowie die Beobachtung des Tracerdurchganges. Trotz des Nachteils, damit die tatsächliche Konzentration der Fluoreszenzstoffe im Wasser nicht bestimmen zu können, kann dieses Verfahren selbständig oder auch zur Ergänzung von Direktmessungen mit Vorteil eingesetzt werden.

Beim kombinierten Markierungsversuch im Muotatal wurden mit dem Einsatz der Aktivkohlemethode folgende Ziele angestrebt:

1. Überprüfung der Genauigkeit im Vergleich zur Direktmessung durch parallele Beobachtung,
2. kontinuierliche Beobachtung abseits gelegener, weniger gut zugänglicher Quellen und
3. Langzeitbeobachtung der wichtigsten Quellen über den Winter hinweg bis zur nächsten Schneeschmelze.

Kontinuierliche Beobachtungen sowie Langzeituntersuchungen schwer zugänglicher Quellen lassen sich durch die Aktivkohlemethode wesentlich kostengünstiger durchführen, als dies vergleichsweise mit der Direktmessung von fortlaufend entnommenen Einzelproben möglich ist.

Über das Grundsätzliche der Aktivkohlemethode sowie über besondere anwendungsspezifische Probleme vom Einhängen der Kohlefilter über die Elution bis zur Messung der Fluoreszenzstoffe im Eluat wurde gerade im Rahmen der von der Internationalen Arbeitsgemeinschaft durchgeführten Vergleichsuntersuchungen schon mehrfach berichtet (vgl. die o. a. Literatur). In bezug auf die Methodik sei hier besonders auf die Arbeiten von F. BAUER (1967, 1972), W. PERLEGA (1976) und F. BAUER & W. PERLEGA (1980) hingewiesen. Nachfolgend wird daher nur kurz, soweit es zum all-

gemeinen Verständnis und zur Reproduzierbarkeit erforderlich ist, auf den Verfahrensgang eingegangen, und die laborspezifischen Besonderheiten werden beschrieben.

Als Aktivkohlefilter wurden Nylon-Gaze-Beutel (Maschenweite 0,67 mm) verwendet, die mit 8 g aktivierter, 1,5 mm-gekörnter Aktivkohle gefüllt waren. Die Einhängedauer in den Quellen und Gerinnen war unterschiedlich. In den Hauptquellen betrug sie am Beginn des Versuches im allgemeinen einen Tag, wurde später auf zwei Tage und schließlich auf eine Woche gestreckt. Für die Langzeitbeobachtung über den Winter waren die Filter einen Monat und z. T. länger eingehängt. Die genaue Einhängedauer geht jeweils aus der Länge der horizontalen Streckenabschnitte in den Durchgangskurven der Figuren 43,46, 50 und 52 hervor.

Die Elution der Fluoreszenzstoffe wurde mit einer 80-vol-%igen N-N-Dimethylformamid-Lösung (DMF-Lösung) vorgenommen. Dieses Eluens erlaubt die Rückgewinnung aller im Versuch verwendeten Tracer (Uranin, Eosin, Amidorhodamin G, Rhodamin B und Tinopal). Die Aufnahme der Fluoreszenzspektren erfolgte mittels eines mit zwei Gittermonochromatoren ausgerüsteten Fluorimeters (Typ Fluoripoint der Fa. BAIRD ATOMIC) nach der Methode H. BEHRENS (1973). Das Emissionsspektrum wurde hierbei im Bereich von 350 bis 450 nm (Tinopal) mit einer um 65 nm kleineren und im Bereich von 500 bis 600 nm (Uranin, Eosin, Amidorhodamin G und Rhodamin B) nur mit einer um 25 nm geringeren Anregungswellenlänge aufgenommen.

Die spektralen Eigenschaften der verwendeten Fluoreszenzstoffe sind, wie schon für die Direktmessung angeführt, z. T. sehr ähnlich. Gegenüber den im Wasser gelösten Tracern ergeben sich im DMF-Eluat die in Tab. 13 aufgeführten Emissionsmaxima.

Tab. 13: Verschiebung der Emissionsmaxima von Fluoreszenzstoffen in 80-vol.-%-N-N-Dimethylformamid-Eluat gegenüber der Lösung im Wasser.

Fluoreszenzstoffe	Emissionsmaxima (in nm) bei Lösung im Wasser	Lösung im DMF
Uranin (Merck AP)	515	530
Eosin FB	535	550
Amidorhodamin G extra	552	555-560
Rhodamin B	575	575-582
Tinopal flüssig	428	432

Bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer Farbstoffe in einer Probe ergeben sich daher Identifikationsprobleme, die vor allem bei Eosin-Amidorhodamin-, bei Amidorhodamin-Rhodamin- sowie bei Uranin-Eosin-Gemischen zu Schwierigkeiten führen können.

Unter Ausnützung der unterschiedlichen pH-Abhängigkeit wurde zur gezielten Ansprache der Fluoreszenzstoffe das Spektrum dreimal aufgenommen, und zwar im angesäuerten Eluat (pH < 4), im schwach sauren (pH 6,5) und im ammoniakalischen Eluat (pH > 8). Uranin und Rhodamin wurden im Spektrum des ammoniakalischen Eluats, Eosin im schwach sauren und Amidorhodamin im stark sauren Eluat erfaßt. Wenn damit zwar keineswegs ein allen möglichen Farbkombinationen gerecht werdendes Verfahren vorlag, so konnten doch die meisten im Versuch realisierten Mischungen von Fluoreszenzstoffen quantifiziert werden, wie dies auch die Parallelmarkierung mit anderen Tracern bestätigte. Probleme ergaben sich bei hohen Eosinkonzentrationen für die Quantifizierung des Uraningehaltes, da unter diesen Bedingungen auch im alkalischen Milieu der Uraninpeak von dem des Eosins überlagert

wird. Auf das Vorhandensein von Uranin kann dann nur aus der damit verbundenen Peakverschiebung geschlossen werden.

4.5.1.3. Dünnschichtchromatographie

Um beliebige Farbstoffkombinationen auch im Kohleeluat bestimmen zu können, wurde zusätzlich versucht, neben der fluorimetrischen auch eine dünnschichtchromatographische Auswertung aller Aktivkohleproben vorzunehmen. Diese Methode wurde für den Nachweis von Fluoreszenzstoffen in direkt gezogenen Wasserproben bereits mit Erfolg eingesetzt (F. P. BUB et al., 1979; F. P. BUB & H. HÖTZL, 1980).

Bei der Auswertung von mit DMF angesetzten Eluaten aus der Aktivkohle ergaben sich jedoch Schwierigkeiten. Offenbar werden durch das DMF aus der Kohle bestimmte organische Verbindungen gelöst, die dann bei der Entwicklung der DC-Platten eine fluoreszierende Schleppspur hinterlassen. Durch die damit verbundene Anhebung des Background-Signals wird beim Abfahren der Chromatogramme in Laufrichtung die Nachweisempfindlichkeit vor allem für Stoffe mit kleinen Rf-Werten, wie Uranin oder Amidorhodamin G, um ein bis zwei Zehnerpotenzen vermindert. Das bei Direktproben mit Erfolg praktizierte, zeitsparende Verfahren des Abfahrens von DC-Platten quer zur Laufrichtung ist überhaupt nicht anwendbar, da das Fluoreszenzsignal für den vorgegebenen Rf-Wert auch von der Schleppspur stammen kann.

Um diese Störungen auszuschalten, wurden nun verschiedene Eluier- und Laufmittel getestet. Bei veränderter Zusammensetzung des Laufmittels (für Auswertung von Direktproben hat sich ein Gemisch von Propanol-[1]/Essigsäureäthylester/Amoniaklösung [25%] [6/2/2] bewährt) konnten Verbesserungen für jeweils einen Farbstoff bei gleichzeitiger Abschwächung der übrigen erzielt werden. Da der entsprechende zeitliche Mehraufwand bei mehrfachem Ansetzen und Entwickeln von Chromatogrammen bei nur geringfügigen Vorteilen gegenüber der normalen spektralfluorimetrischen Auswertung nicht gerechtfertigt ist, wurden vor allem noch Versuche mit anderen Lösungen zur Elution der Farbstoffe vorgenommen.

Erste Versuche mit Isopropylalkohol zeigten bei gleichen, für Uranin und Eosin sogar verbesserten Elutionseigenschaften gegenüber dem DMF das weitgehende Wegbleiben der störenden Schleppspur.

Leider mußten diese Untersuchungen aus technischen Gründen längere Zeit zurückgestellt werden, so daß derzeit noch keine endgültigen Ergebnisse vorliegen. Im nachfolgenden Abschnitt wird daher nur auf spektralfluorimetrische Direkt- und Aktivkohleuntersuchungen eingegangen. Über den Abschluß der dünnschichtchromatographischen Vergleichsuntersuchungen soll dann an anderer Stelle berichtet werden.

4.5.1.4. Markierung mit Uranin AP

Die Uranineingabe erfolgte gemeinsam mit den rot gefärbten Lycopodiumsporen in die Schwinde des Seenalper Seelis (E VI) am Südwestrand des Untersuchungsgebietes in einer Höhe von 1719 m ü M. Infolge des nicht ganz auszuschließenden Wiederaustrittes eines Teiles dieses Seeabflusses in einer nahen, etwas tiefer gelegenen Quelle wurde, wie in Abschnitt 4.3.2. erläutert, ein Vorversuch mit 1 kg Uranin am 29. 7. 1979 um 11.30 Uhr durchgeführt. Nachdem es innerhalb der nachfolgenden 48 Stunden in den nahegelegenen Quellen zu keinem sichtbaren Farbaustritt kam, wurde am 31. 7. zwischen 11.00 und 13.00 Uhr die Haupteinspeisung mit 20 kg Uranin und 10 kg rot gefärbten Sporen vorgenommen.

Das Uranin trat ausschließlich im Muotatal zutage. Hauptaustritte bildeten die großen Quellen im Bereich Balm - Fugglen. Die Farbstoffdurchgänge setzten in zwei

Wellen, entsprechend der zeitlichen Eingabedifferenz von Vorversuch und Hauptversuch, ein. Bereits der auf den Vorversuch mit 1 kg Uranin zurückgehende Durchgang führte im ganzen Quellbezirk zu sichtbaren Farbaustritten.

In der quantitativen Auswertung konnte der Ersteinsatz des Uraninaustrittes nur noch auf der rechten Muotaseite durch negative Proben eingengt werden. Da die Nullprobenserie erst am 31. 7. zwischen 10.00 und 11.00 Uhr, unmittelbar vor dem Beginn der Haupteingabe, gezogen wurde, enthielten die zu dieser Zeit auf der linken Muotaseite entnommenen Proben bereits das Uranin des Vorversuches. Der erfaßte Durchgang dürfte kurz vor der Probennahme eingesetzt haben.

Die vom Uranin betroffenen Quellen sind in Tab. 14 mit den wichtigsten Kennwerten der Farbmarkierung zusammengestellt. Die Lage der Quellen ist Fig. 39 zu entnehmen. Darüber hinaus haben noch die im Bett des Hüribaches, kurz vor seiner Einmündung in die Muota, an der Grenze Schrättenkalk zur Talfüllung aufstoßenden Quellen (s. Tafel IV) ebenfalls sichtbar auf den Uranindurchgang angesprochen.

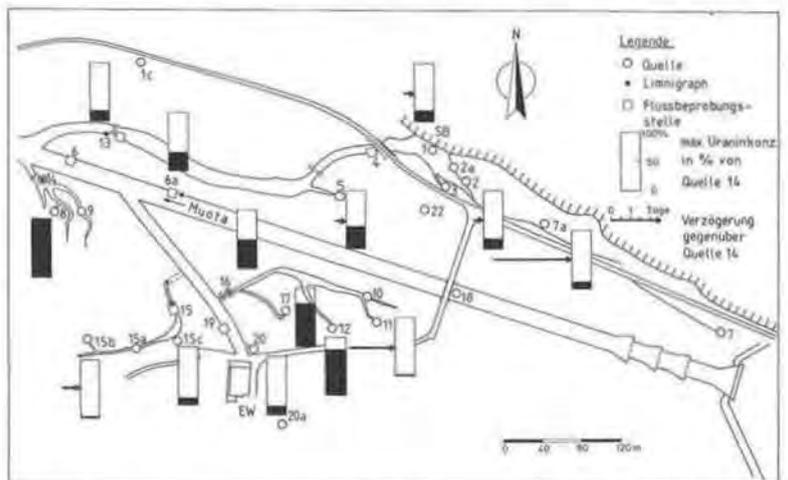


Fig. 39: Quantitativ erfaßte Uraninaustritte in der Quellengruppe Balm-Fugglen. Die Konzentration ist in Prozenten der Maximalkonzentration (Quelle 14 = 100%) angegeben. Die zeitliche Verzögerung des Austrittes gegenüber Quelle 14 ist durch die entsprechende Pfeillänge gekennzeichnet.

Bei einer fast gleichen Entfernung der wichtigsten Quellen vom Eingabeort (ca. 5,8 km) resultieren sowohl für die Erstaustritte als auch für den Maximaldurchgang selbst unter Berücksichtigung des großen Höhenunterschiedes (etwa 1080 m) enorm hohe Abstandsgeschwindigkeiten, die den Charakter eines ausgereiften Karstentwässerungssystems unterstreichen.

Im Hinblick auf die Abflußrichtung fällt auf, daß die direkte Verbindungslinie keiner geologischen Vorzeichnung entspricht. Offenbar folgt die unterirdische Entwässerung im Bereich der liegenden Axendecke, in der sich auch die Eingabestelle befindet, zunächst dem axialen Abtauchen gegen ENE. Im Hürital bzw. östlich davon dürften die Wässer schließlich von tiefgreifenden offenen Querklüften nach N abge-

Tab. 14: Kennwerte der mit Uranin A registrierten Tracerdurchgänge.

Beobach- tungsstelle	Entfernung von der Eingabest. in km	Höhendiff. zur Eingabest. in m	Nachweis- methode D = Direktn. A = Aktivk.		Zeitpunkt (1979)			Abstandsgeschwindigkeit für		Maximale Konzentr. des Tracers in mg/m ³	Aus- bringung in % der Eingabe
					des ersten Nachweises	der maximalen Konzentration	l. Nachweis in m/h	max. Konzentr. in m/h			
1	5,95	1081	+D	+A	2. 8. 6.15	3. 8. 0.05	140	98	29,7		
2	5,95	1077	+D	+A	2. 8. 12.45	3. 8. 21.00	123	73	19,1		
2a	5,95	1077		+A	11. 9.*	11. 9.*			n. b.		
5	5,90	1081	+D	+A	2. 8. 12.20	3. 8. 8.25	123	87	58,8		
6a	5,85	1082	+D	+A	2. 8. 6.25	3. 8. 0.15	138	97	46,6	15,6	
7a	5,95	1076	+D	+A	4. 8. 4.30*	4. 8. 4.30*			15,9		
11	5,75	1079	+D	+A	3. 8. 0.40	4. 8. 9.25	95	63	0,13		
12	5,75	1079	+D	+A	2. 8. 7.15	3. 8. 0.35	133	95	96,0		
13	5,80	1082	+D	+A	2. 8. 12.35	3. 8. 0.20	120	97	27,3	24,0	
14	5,90	1082	+D	+A	2. 8. 1.20	3. 8. 1.10	153	95	155,0	17,6	
15	5,65	1079		+A	1. 10.*	1. 10.*			n. b.		
15b	5,60	1078	+D	+A	2. 8. 18.35	3. 8. 17.40	103	73	0,30		
15c	5,60	1079	+D	+A	2. 8. 7.52	3. 8. 21.30	128	70	18,8	2,2	
16	5,70	1080	+D	+A	2. 8. 7.55	3. 8. 0.45	130	94	75,7	3,0	
17	5,70	1079	+D	+A	2. 8. 8.05	2. 8. 19.00	130	103	101,0		
20a	5,65	1078	+D	+A	2. 8. 7.57	3. 8. 9.57	130	81	23,1		

untersuchte Beobachtungsstellen mit negativem Befund: 21, 107, 108, 115, 120, 137, 138, 142, 143, 144.

* Proben erst ab diesem Zeitpunkt

lenkt werden und dabei auf tektonischen Linien in die höheren Anteile der Axendecke aufsteigen.

Generell zeigt sich in der davon betroffenen Quellgruppe eine Verschiebung der Erst- und Maximalsätze im Bereich Balm - Fugglen in Richtung SW nach NE, die für die beiden Hauptaustritte (Quellen 14 und 1/2) bei einer Entfernung von 400 m 4 bis 6 Stunden beträgt (Fig. 39). Noch größere zeitliche Verschiebungen ergeben sich bei den am Rande des betroffenen Bereiches liegenden Quellen 7a und 11, bei denen ihre periphere Lage auch durch die wesentlich geringeren Farbstoffkonzentrationen unterstrichen wird. Ähnliche Reaktionen zeigt auch die Quelle 15b, die nahe dem Hauptaustritt (Quelle 14) liegt und daher eher intensiver auf den Farbstoffdurchgang hätte ansprechen müssen. Aus dem gegenteiligen Verhalten kann auf ein oberflächennahes lokales Einzugsgebiet geschlossen werden.

Für die Hauptquellen sind die Durchgangskurven der Direktbeobachtung in Fig. 40, 41 und 42 sowie die Ergebnisse der Aktivkohlebeobachtung in Fig. 43 dargestellt. Sieht man von dem durch die Einspeisungen bedingten Doppelpeak am Anfang ab, so sind die Kurven erstaunlich einheitlich ausgebildet und dem Idealbild eines Abflusses angenähert. Im Hinblick auf die Niederschlagstätigkeit ist bemerkenswert, daß selbst das starke Gewitter vom 3. 8. 1979 mit Niederschlagshöhen von 30 mm in zwei Stunden sich nicht sichtbar auswirkte. Das gleiche gilt für die späteren, ebenfalls mit Hochwässern verbundenen Starkregen.

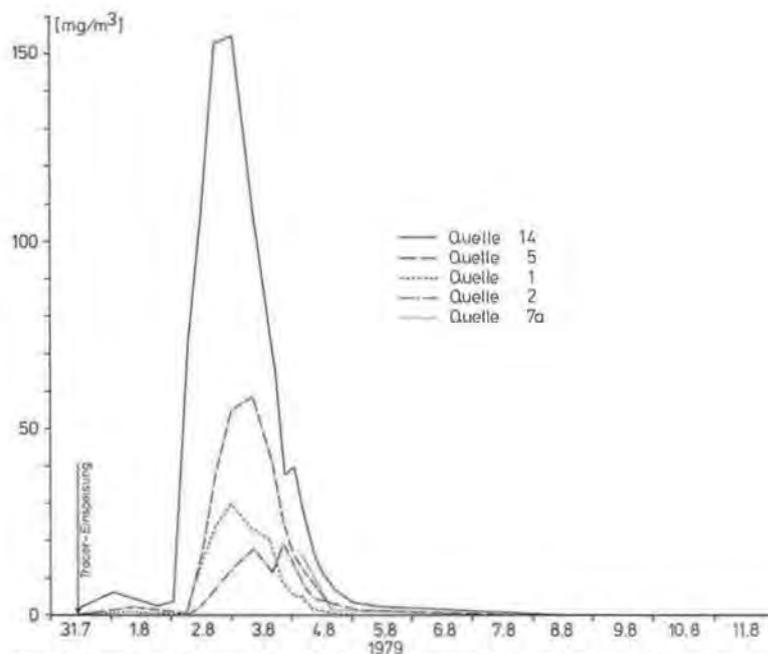


Fig. 40: Durchgangskurven von Uranin in den Quellen von Balm und Guggenhürl im Vergleich zur Quelle 14 (Ergebnisse der spektralfuorimetrischen Direktmessung).

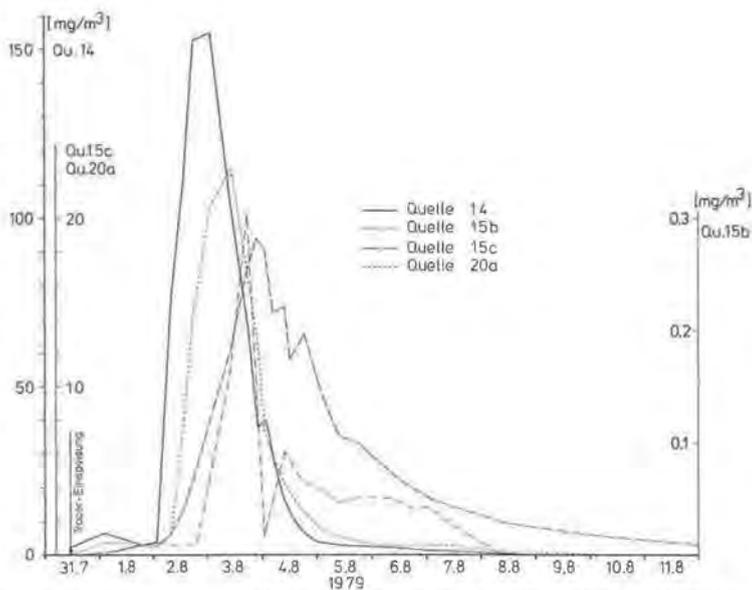


Fig. 41: Durchgangskurven von Uranin in den Quellen Fugglen-West und 20a im Vergleich zur Quelle 14 (Ergebnisse der spektralfluorimetrischen Direktmessung).

Eine Uraninausbringung ist in den Direktproben auf der rechten Muotaseite bis in den Oktober hinein nachzuweisen. Auf der linken Seite liegt sie in den Hauptquellen 12, 14 und 17 noch bis zur Beendigung der Direktbeprobung knapp über der Nachweisgrenze. Die Langzeitbeprobung mittels Aktivkohle läßt erkennen, daß die abnehmende Tendenz offenbar bis zur neuerlichen Schneeschmelze im darauffolgenden Frühjahr (Mai/Juni) anhält und dann durch das vermehrte Wasserdargebot unter die Nachweismöglichkeit absinkt. Zusätzliche Ausspülungseffekte, wie sie bei anderen Versuchen mit erhöhten Niederschlägen oder Schneeschmelzeereignissen zusammenfallen, konnten hier nicht beobachtet werden. Auch dies weist darauf hin, daß ein durchgehendes ausgereiftes Karstentwässerungssystem erfaßt wurde.

Der Vergleich zwischen Direktmessungen und Aktivkohleauswertungen zeigt eine gute Übereinstimmung. Dies gilt sowohl hinsichtlich der beobachteten Wiederaustritte, der Konzentrationen in den einzelnen Quellen als auch hinsichtlich des Durchgangsverlaufes. Infolge des unterschiedlichen Beprobungsrhythmus ergeben sich bei den „Kohle-Durchgangslinien“ etwas stärkere Schwankungen, die aber weitgehend auf die unterschiedliche Einhängedauer der Kohlefilter zurückzuführen sind.

4.5.1.5. Markierung mit Eosin FB

Zur Untersuchung der Abflußverhältnisse aus dem nördlich der Muota gelegenen Einzugsgebiet Bödmeren (Hölloch-System) wurde als Eingabestelle das Obere Roggenloch (E II) ausgewählt. Zur Markierung wurden kleine von Quellen gespeiste Zuflüsse genutzt, die am Rande der Doline in Schwinden versickern. Zur Eingabe ge-

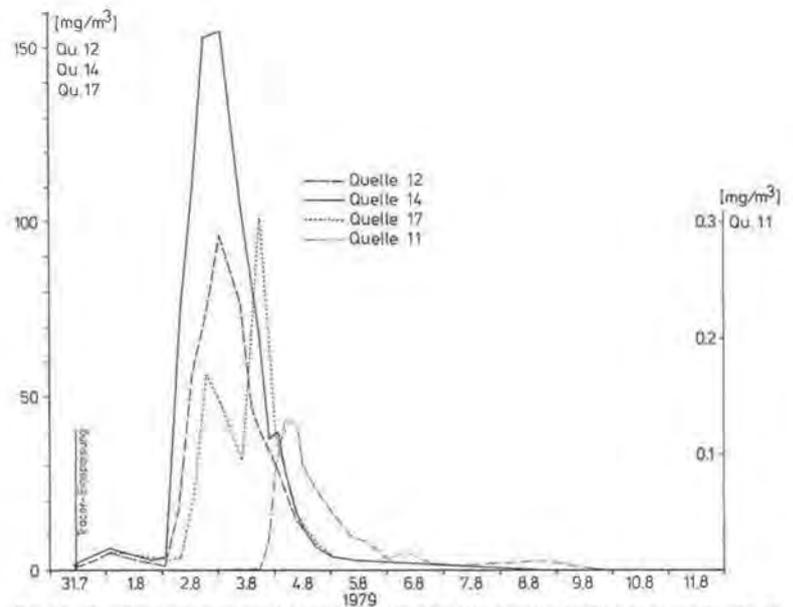


Fig. 42: Durchgangskurven von Uranin in den Quellen Fugglen-Ost im Vergleich zur Quelle 14 (Ergebnisse der spektralfluorimetrischen Direktmessung).

langten 10 kg Eosin FB, wobei man infolge der ausgeprägten Verkarstung des Untergrundes extrem kurze Laufzeiten erwartete.

Der Wiederaustritt erfolgte wie beim Uranin fast ausschließlich in der Quellgruppe Balm - Fugglen. Der Schwerpunkt der Austritte lag diesmal - der räumlichen Eingabebeziehung entsprechend - auf der Nordseite der Muota mit dem Hauptaustritt im Schleichenden Brunnen.

Die vom Eosin betroffenen Quellen sind in Tab. 15 und in Fig. 44 zusammengestellt, wobei der Nachweis in den Beprobungsstellen 2a, 6a und 11 nur mittels der Aktivkohlemethode erfolgte. Wie aus den Kennwerten in Tab. 15 sowie den Durchgangskurven (Fig. 45 und 46) hervorgeht, konnte der Erstaustritt von Eosin mehr oder minder gleichzeitig in allen betroffenen Quellen beobachtet werden. Eindrucksvoll ist der sehr konzentrierte Hauptdurchgang. Beim Erstaustritt wurde zugleich auch die höchste Konzentration gemessen. Schon vier Stunden später, bei der nächsten Probenahme, ist die Konzentration auf einen Bruchteil des Maximalwertes abgesunken. Diese extreme Durchgangsspitze überrascht um so mehr, zumal mit einer Zeit von 89 Stunden von der Eingabe bis zum ersten Wiederaustritt für die 5,7 km betragende Entfernung eine vergleichsweise lange Zeit beansprucht wurde. Die daraus resultierende Abstandsgeschwindigkeit liegt bei 64 m/h. Der Abfluß muß daher im wesentlichen in einer recht geschlossenen Gerinnestrecke ohne allzu viele Siphonabschnitte und Rückstaubereiche erfolgt sein.

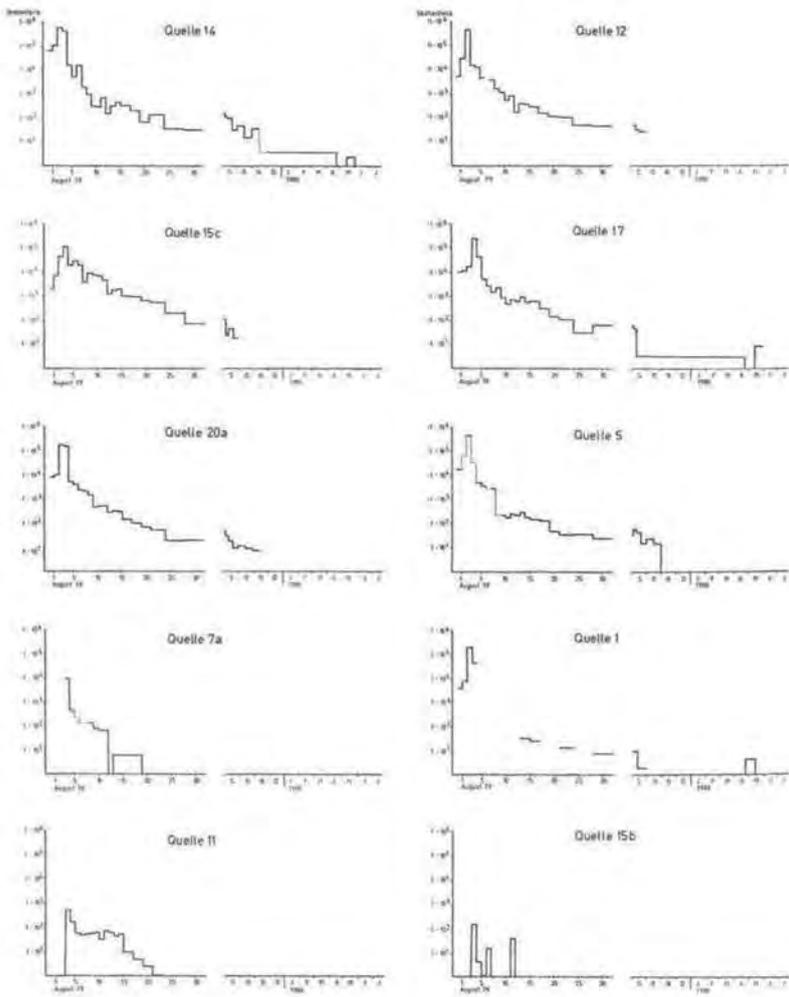


Fig. 43: Durchgangskurven von Uranin in ausgewählten Quellen des Gebietes von Balm – Fugglen aufgrund der Aktivkohleproben-Auswertung. Die Länge der horizontalen Strecken kennzeichnet die Einhängedauer. Bei mehrtägiger Einhängedauer ist das aus der Gesamtprobe berechnete Tagesmittel dargestellt.

Tab. 15: Kennwerte der mit Eosin FB registrierten Tracerdurchgänge.

Beobach- tungsstelle	Entfernung von der Eingabest. in km	Höhendiff. zur Eingabest. in m	Nachweis- methode D = Direktm. A = Aktivk.	Zeitpunkt (1979)		Abstandsgeschwindigkeit für		Maximale Konzentr. des Tracers in mg/m ³	Aus- bringung in % der Eingabe
				des ersten Nachweises	der maximalen Konzentration	1. Nachweis in m/h	max. Konzentr. in m/h		
1	5,65	932	+D +A	4. 8. 4.15	4. 8. 4.15	64	64	40,3	
2	5,65	932	+D +A	4. 8. 4.10	4. 8. 4.10	64	64	38,6	
2a	5,65	932	+A	11. 9.*	11. 9.*			n. b.	
5	5,70	936	+D +A	4. 8. 4.20	4. 8. 4.20	64	64	30,7	
6a	5,80	936	-D +A	4./5. 8.	5./6. 8.	53	43	n. b.	
7a	5,60	930	+D +A	4. 8. 4.30*	4. 8. 4.30*	63	63	1,37	
11	5,75	934	-D +A	4./5. 8.	8./9. 8.	52	28	n. b.	
12	5,75	934	+D +A	4. 8. 9.15	5. 8. 0.55	61	52	0,56	
13	5,80	937	+D +A	4. 8. 4.25	4. 8. 4.25	65	65	32,4	64,9

untersuchte Beobachtungsstellen mit negativem Befund: 14, 15, 15b, 15c, 16, 17, 20a, 21, 23, 24, 25, 46, 49, 59, 65.

* Proben erst ab diesem Zeitpunkt

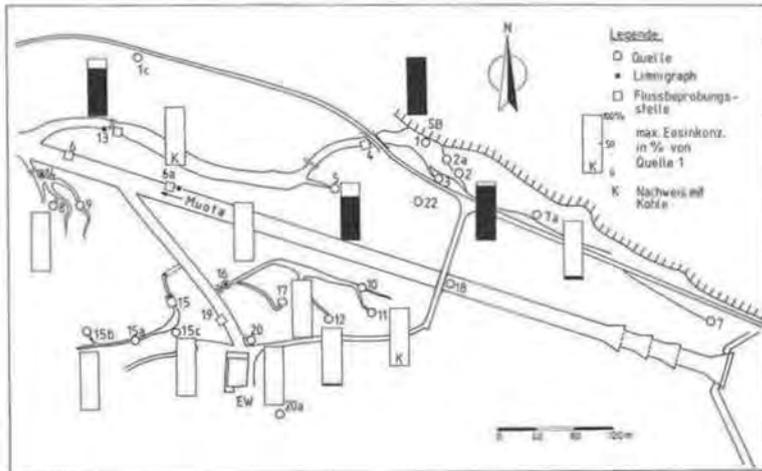


Fig. 44: Quantitativ erfaßte Eosinaustritte in der Quellengruppe Balm – Fugglen. Die Konzentration ist in Prozenten der Maximalkonzentration (Quelle 1 = 100%) angegeben.

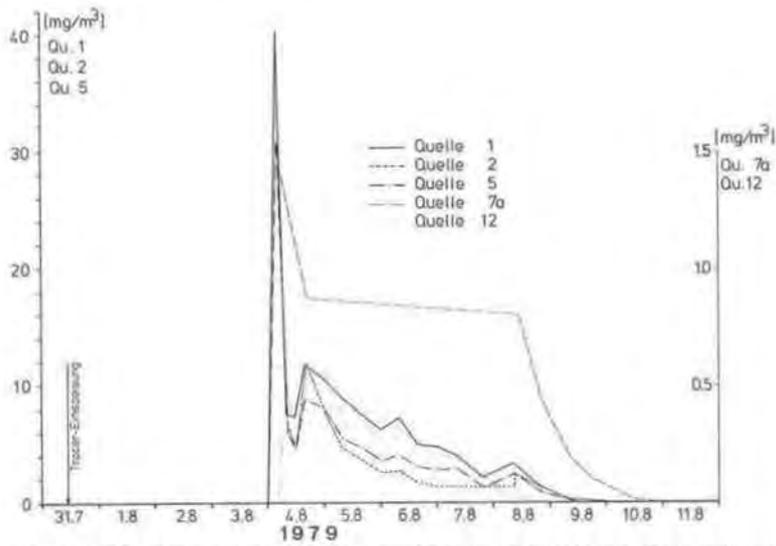


Fig. 45: Durchgangskurven von Eosin in den Quellen Balm – Fugglen (Ergebnisse der spektralfuorimetrischen Direktmessung).

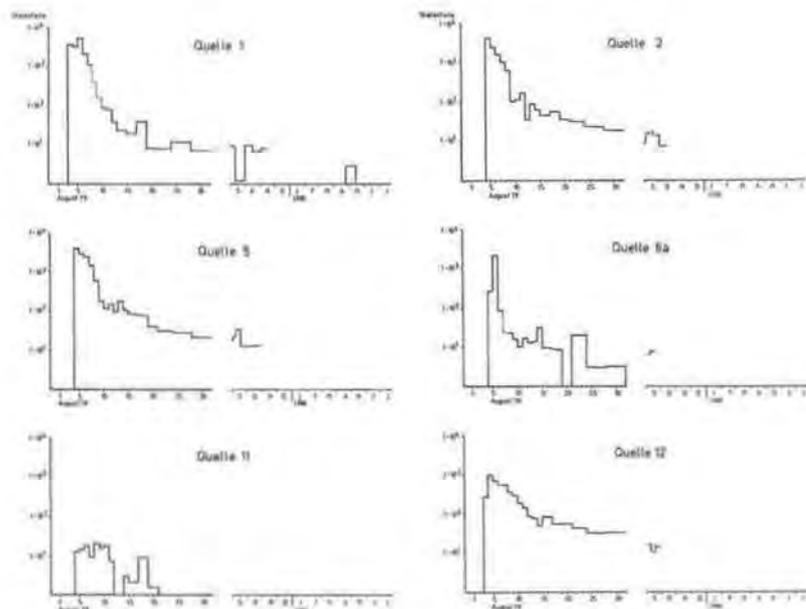


Fig. 46: Durchgangskurven von Eosin aufgrund der Aktivkohleproben-Auswertung. Die Länge der horizontalen Strecken kennzeichnet die Einhängedauer. Bei mehrtägiger Einhängedauer ist das aus der Gesamtprobe berechnete Tagesmittel dargestellt.

Der Durchgangsverlauf erholt sich einen Tag nach dem Maximum geringfügig und fällt von da an mit einer zunehmend flacheren Kurve gegen Null ab. Nachweisbar ist das Eosin in den Direktproben noch bis Anfang September 1979. In den Aktivkohleproben (Fig. 46) ist dieser extreme Durchgangsverlauf nicht so ausgeprägt. Die Kurven fallen allmählicher ab und sind mittels der Langzeitbeobachtung in den Quellen 1, 5 und 12 auch noch über die Wintermonate hin zu beobachten. Im Mai/Juni des darauffolgenden Jahres ist ein geringfügiger Anstieg in den Quellen 1 und 5 festzustellen, der als Ausspülung infolge der einsetzenden Schneeschmelze gedeutet werden kann.

Die Verteilung der Farbstoffaustritte in der Quellgruppe Balm – Fugglen ist in Fig. 44 und Tab. 15 dargestellt. Wurde beim Uranin bereits das Hindurchdrücken der unterirdischen Entwässerung unter der Muota von S nach N festgestellt, so zeigt uns das Eosin die entgegengesetzte Verbindung von N nach S an. Aus dem geringeren Umfang der Eosin-Ausbreitung kann sicherlich auf das bedeutendere Einzugsgebiet im S geschlossen werden.

Im Vergleich der beiden Nachweismethoden, Direktmessung und Aktivkohlemethode, kommen hier stärker als beim Uranin Unterschiede zutage. Zunächst ist eine höhere Empfindlichkeit der Aktivkohlemethode bei der Eosin-Bestimmung festzustellen. Dies kommt sowohl in den länger verfolgbaren Durchgängen als auch im zusätzlichen Nachweis von Eosin in der Quelle 11 zum Ausdruck. Dagegen ist die in den

Direktproben gemessene extreme Durchgangsspitze in den Kohledurchgängen nicht so deutlich erkennbar. Letzteres liegt offenbar nicht nur am logarithmischen Maßstab und den sich überlagernden Einhängenzeiten.

4.5.1.6. Markierung mit Rhodamin B

Die Eingabestelle für das Rhodamin lag unmittelbar unterhalb des Wasserbergfirstes (E III b) auf einer Höhe von 1810 m ü M. Das von einem Schneerest tagsüber abfließende Schmelzwasser versickerte in einem kleinen Felsspalt, in den auch das in Wasser vorgelöste Rhodamin (10 kg) eingebracht wurde.

Der Wiederaustritt erfolgte ausschließlich in dem schon bekannten Quellbezirk Balm – Fugglen im Muotatal. Am stärksten angesprochen hat hier die Quelle 14, gefolgt von den Quellen 17 und 12 (Fig. 47). Auch rechts der Muota sprachen die Quellen, wenn auch deutlich abgeschwächt, auf den Rhodamindurchgang an.

Anders als bei den Abflußrichtungen von Uranin und Eosin ist hier die festgestellte direkte Verbindungslinie tektonisch deutlich vorgezeichnet. Der ganze Wasserberg wird von ausgeprägten NNW-streichenden, steilen Querklüften durchzogen (vgl. Abschn. 3. 4.). Eine dieser Störungen verläuft nahe der Eingabestelle direkt auf die Quellen westlich des Schleichenden Brunnens zu. Trotz dieser direkten Wasserwegigkeit und des steilen Gefälles werden keineswegs die größten Geschwindigkeiten und Ausbringungsraten beobachtet.

Die wichtigsten Daten der Rhodamin-Durchgänge sowie die davon betroffenen Quellen sind in Tab. 16 zusammengefaßt. Die Durchgangskurven sind in Fig. 48 und 49 dargestellt. Der Durchgang dieses Tracers setzt in den betroffenen Quellen zeitlich deutlich gestaffelt ein, wobei für den Erstaustritt in Quelle 14 die kürzeste Fließzeit mit 63 Stunden zwischen Eingabe und Erstaustritt vorliegt.

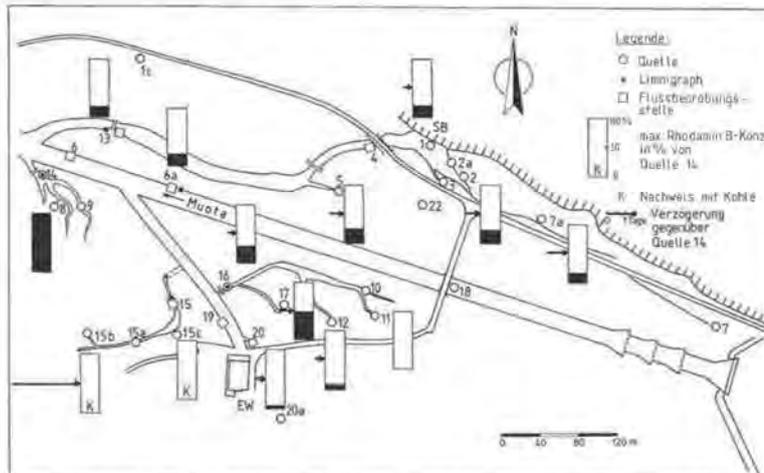


Fig. 47: Quantitativ erfaßte Rhodamin B-Austritte in der Quellengruppe Balm – Fugglen. Die Konzentration ist in Prozenten der Maximalkonzentration (Quelle 14 = 100%) angegeben. Die zeitliche Verzögerung des Austritts gegenüber Quelle 14 ist durch unterschiedliche Pfeillänge gekennzeichnet.

Tab. 16: Kennwerte der mit Rhodamin B registrierten Tracerdurchgänge.

Beobach- tungsstelle	Entfernung von der Eingabest. in km	Höhendiff. zur Eingabest. in m	Nachweis- methode D = Direktn. A = Aktivk.	Zeitpunkt (1979)		Abstandsgeschwindigkeit für		1. Nachweis in m/h	max. Konzentr. in m/h	Maximale Konzentr. des Tracers in mg/m ³	Aus- bringung in % der Eingabe
				des ersten Nachweises	der maximalen Konzentration	1. Nachweis	max. Konzentr.				
1	3,05	1168	+D +A	3. 8.	8.15	3. 8.	16.20	47	42	0,108	
2	3,05	1168	+D +A	3. 8.	17.00	3. 8.	21.10	42	40	0,139	
2a	3,05	1168	+A	11. 9.*		11. 9.*				n. b.	
5	3,00	1170	+D +A	3. 8.	8.25	4. 8.	0.20	46	38	0,154	
6a	3,05	1171	+D +A	3. 8.	0.15	3. 8.	16.40	53	42	0,129	0,21
7a	2,90	1167	+D +A	4. 8.	4.30*	4. 8.	4.30*	34	34	0,088	
12	2,90	1170	+D +A	3. 8.	9.20	4. 8.	9.15	44	33	0,501	
13	3,05	1173	+D +A	3. 8.	0.20	3. 8.	21.00	53	40	0,109	0,20
14	3,05	1173	+D +A	3. 8.	1.10	3. 8.	17.50/ 4. 8. 12.35	52	41/33	0,378/0,642	0,17
15	2,90	1170	+A	1.10.*		1.10.*				n. b.	
15b	2,90	1169	-D +A	13. 8.		17./19. 8.		~ 8	~ 7	n. b.	
15c	2,90	1170	-D +A	2./3. 8.		3./4. 8.		~ 51	~ 36	n. b.	
16	2,90	1170	+D +A	3. 8.	9.40	4. 8.	4.50	44	34	0,190	0,04
17	2,90	1170	+D +A	3. 8.	17.45	4. 8.	17.30	40	30	0,309	
20a	2,85	1169	+D +A	3. 8.	10.00	3. 8.	21.40	49	37	0,032	

untersuchte Beobachtungsstellen mit negativem Befund: 11, 21, 24, 25, 46, 49, 59, 65, 115, 120.

* Proben erst ab diesem Zeitpunkt

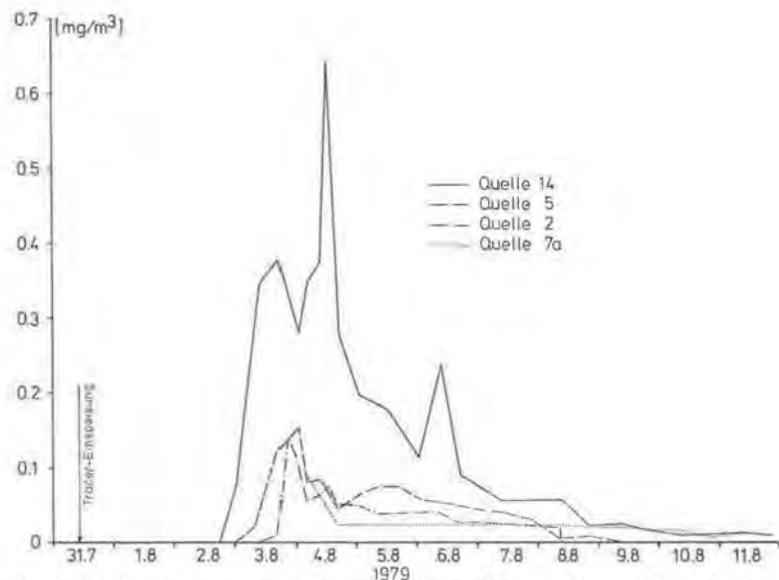


Fig. 48: Durchgangskurven von Rhodamin B in den Quellen von Balm und Guggenhörli im Vergleich zur Quelle 14 (Ergebnisse der spektralfluorimetrischen Direktmessung).

Bei den relativ geringen Konzentrationen treten im Verlauf der Durchgangskurve unregelmäßige Streuungen stärker hervor. Der in Quelle 12, 14 und 17 auftretende Doppelpeak in der Anfangsphase des Durchganges scheint signifikant zu sein. Für eine eindeutige Beurteilung, ob dafür zwei verschiedene Abflußwege oder Niederschlagsereignisse verantwortlich sind, liegen zu wenige Angaben vor. Doch scheint das Zusammenfallen des Doppelpeaks mit einem Schüttungsanstieg eher für die zweite Möglichkeit zu sprechen.

Im Vergleich der beiden Untersuchungsverfahren macht sich bei den im allgemeinen geringen Farbstoffkonzentrationen des Rhodamins der Anreicherungseffekt der Aktivkohle im Hinblick auf eine höhere Empfindlichkeit bemerkbar (Fig. 50). Mit der Direktbeprobung war das Rhodamin vielfach nur in der Zeit zwischen 3. und 8. 8. 1979 durchgehend beobachtbar. Die Auswertung der Aktivkohle zeigte dagegen einen bis in den Spätherbst anhaltenden Farbaustritt. Bei der Gegenüberstellung der entsprechenden Kurven machen sich vereinzelt Abweichungen bemerkbar. Gerade bei den geringen Konzentrationen muß eine optimale Vergleichbarkeit der Entnahmebedingungen von Probe zu Probe gewährleistet sein. In bezug auf die Durchströmbedingungen eines Kohlebeutels ist dies nicht immer realisierbar. Darauf könnten etwa Abweichungen der durch die beiden Methoden festgestellten Erstaustritte bzw. des Zeitpunktes des Maximaldurchganges zurückzuführen sein.

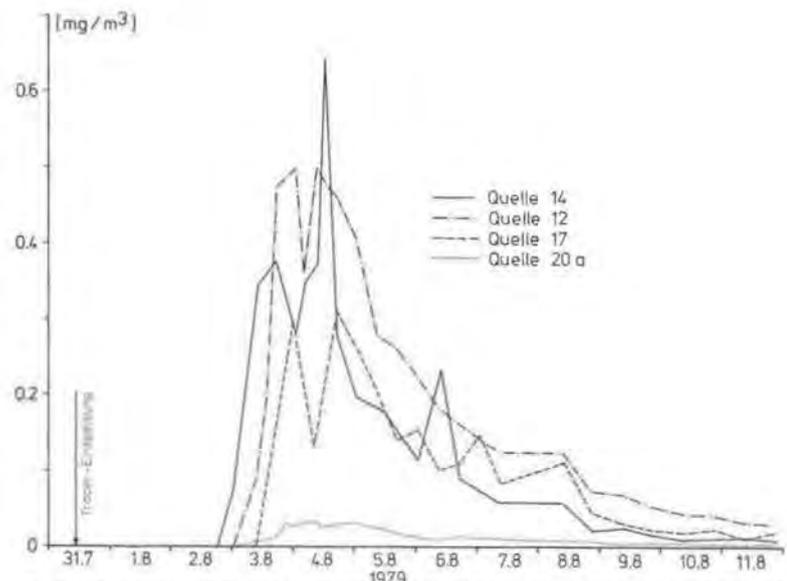


Fig. 49: Durchgangskurven von Rhodamin B in den Quellen von Fugglen im Vergleich zur Quelle 14 (Ergebnisse der spektralfluorimetrischen Direktmessung).

4.5.1.7. Markierung mit Amidorhodamin G extra

Das Amidorhodamin G extra (15 kg) wurde im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes auf dem Bergrücken zwischen Hürital im W und Bisistal im E 3 km südlich des Wasserberges eingesetzt. Als Eingabestelle wurde eine Schwinde im Bereich des Riedboden/Matten (1990 m ü M) benutzt (E V). Der Wiederaustritt erfolgte sehr stark aufgesplittert in einzelnen Quellen des Hüritales, in der Quellgruppe Seeberg im Bisistal und mit geringen Spuren auch in der Quellgruppe Balm – Fugglen (Tab. 17).

Sichtbar waren die Farbastritte in den Quellen 113 und 114 (Fig. 51 und 52). Die beiden Quellen liegen im Bereich der rechten Talflanke des Hüritales 1,4 km von der Eingabestelle entfernt und nur 509 m tiefer als diese (s. Tafel IV), geologisch noch im Bereich der Quintnerkalke. Von dort fließt das Quellwasser in einem steilen, ca. 500 m langen Gerinne bis zum Hüribach.

Das Auftreten von Amidorhodamin in den beiden Quellen 115 und 120 unterhalb der Ableitung des Hüribaches dürfte wohl auf eine sekundäre Einspeisung infolge von Versickerungen des Hüribachwassers im Bereich „Grund“ zurückzuführen sein (s. Tafel IV). Der Abschnitt zwischen dem Einlaufbauwerk für das EW Hinterthal und den Quellen 115 und 120 liegt bei niedriger und mittlerer Wasserführung trocken.

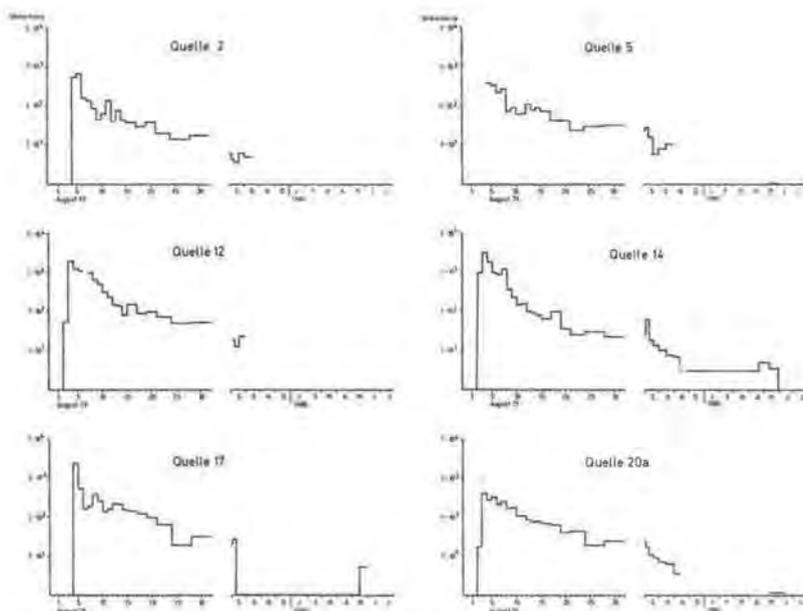


Fig. 50: Durchgangskurven von Rhodamin B in ausgewählten Quellen des Gebietes Balm – Fugglen aufgrund der Aktivkohleproben-Auswertung. Die Länge der horizontalen Strecken kennzeichnet die Einhängedauer. Bei mehrtägiger Einhängedauer ist das aus der Gesamtprobe berechnete Tagesmittel dargestellt.

Ein Teil des unterirdischen Abflusses aus dem Riedboden von Matten folgt wohl der durch das steile Abtauchen der Quintnerkalke besonders ausgeprägten tektonischen Hauptrichtung nach NE zum Bisistal. Dort, wo die Grenzfläche Quintnerkalk/Zementsteinschichten im Bereich des Hinter Seeberg das Bisistal quert, treten Karstwasseraufstöße beiderseits der Muota auf. In allen dort beprobten Quellen (Quelle 24, 25, 59 und 65) war ein deutlicher Durchgang des Amidorhodamins festzustellen (Fig. 53).

Die Quellen im Bereich Balm – Fugglen bilden eine dritte, von den anderen beiden räumlich getrennte Gruppe, in denen ebenfalls Amidorhodamin nachgewiesen werden konnte. Die dort gemessenen Konzentrationen liegen jedoch meist im unteren Grenzbereich der Meßgenauigkeit ($< 0,005 \text{ mg/m}^3$). Sollten alle diese Werte realen Spuren von Amidorhodamin entsprechen, bliebe die Frage nach Herkunft dieses Stoffes offen. Im allgemeinen zeigen Quellen mit raschen Durchgangszeiten auch höhere Konzentrationen. In einigen Quellen in Balm – Fugglen konnte Amidorhodamin trotz der großen Entfernung zur Eingabestelle schon nach sehr kurzer Zeit registriert werden, so z. B. in der Beobachtungsstelle 6a bereits 25 Stunden nach der Eingabe (daraus resultierende Abstandsgeschwindigkeit 262 m/h). Dennoch blieben die Konzentrationen auf Spuren beschränkt, und der Farbdurchgang – soweit man davon

Tab. 17: Kennwerte der mit Amidorhodamin G extra registrierten Tracerdurchgänge.

Beobach- tungsstelle	Entfernung von der Eingabest. in km	Höhendiff. zur Eingabest. in m	Nachweis- methode D = Direktn. A = Aktivk.	Zeitpunkt (1979)		Abstandsgeschwindigkeit für		Maximale Konzentr. des Tracers in mg/m ³	Aus- bringung in % der Eingabe		
				des ersten Nachweises	der maximalen Konzentration	1. Nachweis in m/h	max. Konzentr. in m/h				
1	6,50	1348	+D -A	2. 8.	0.20	4. 8.	4.15	178	74	0,067	
2	6,50	1348	+D -A	2. 8.	0.15	4. 8.	4.10	178	74	0,052	
5	6,45	1351	+D -A	2. 8.	0.30	4. 8.	16.15	175	64	0,067	
6a	6,50	1352	+D -A	1. 8.	12.20	4. 8.	16.25	262	65	0,009	0,015
7a	6,45	1347	+D -A	4. 8.	4.30	13. 8.	9.25	74	20	0,010	
13	6,50	1352	+D -A	2. 8.	18.25	4. 8.	4.25	120	74	0,061	0,018
14	6,50	1352	+D +A	6. 8.	1.25	8. 8.	10.06	49	34	0,019	0,013
23	5,20	1205	+D +A	3. 8.	21.02	6. 8.	0.25	64	39	0,085	1,14
24	5,15	1205	+D +A	3. 8.	8.40	6. 8.	0.20	75	39	0,109	
25	5,15	1205	+D +A	3. 8.	16.30*	6. 8.	16.15	67	34	0,091	
49	6,00	1265	+A	9./10. 8.		9./10. 8.		~ 24	~ 24	n. b.	
59	5,20	1205	+D +A	4. 8.	8.47	6. 8.	8.44	37	37	0,089	
65	5,15	1205	+D +A	3. 8.	20.45	4. 8.	4.10	64	59	0,242	
113	1,40	509	+D +A	1. 8.	16.30	2. 8.	9.30	50	32	285	
114	1,40	509	+D +A	1. 8.	16.45	2. 8.	9.45	50	32	269	
115	5,10	990	+D +A	3. 8.	10.45	5. 8.	10.45	72	43	1,68	
120	5,15	990	+D +A	2. 8.	17.15	5. 8.	10.45	95	44	1,62	

untersuchte Beobachtungsstellen mit negativem Befund: 11, 12, 15, 16, 17, 20a, 21, 46, 62, 107, 108, 138, 141, 142, 143, 149.

* Proben erst ab diesem Zeitpunkt

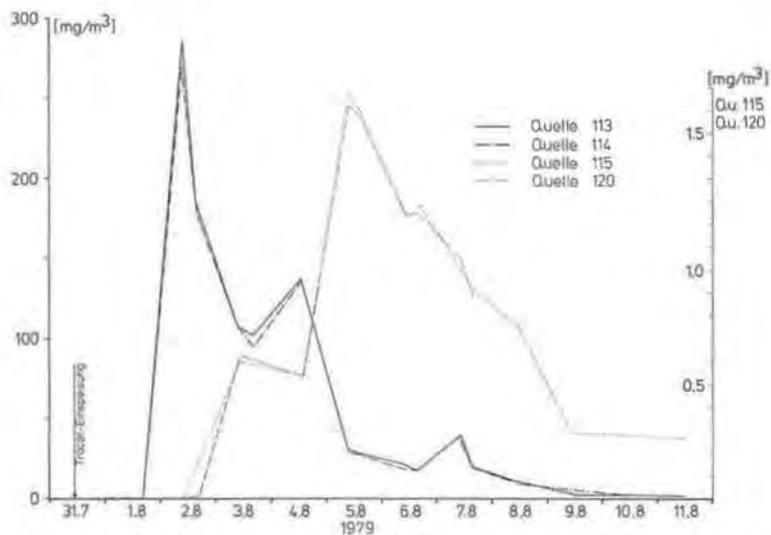


Fig. 51: Durchgangskurven von Amidorhodamin G in den Quellen des Hürtales (Ergebnisse der spektralfluorimetrischen Direktmessung).

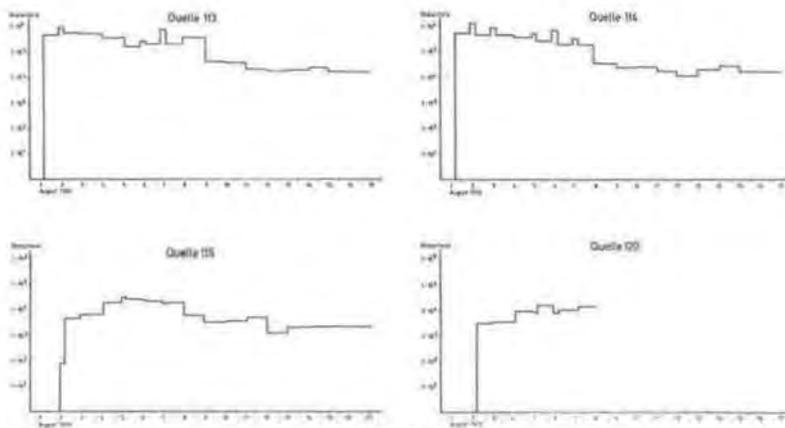


Fig. 52: Durchgangskurven von Amidorhodamin G in den Quellen des Hürtales aufgrund der Aktivkohleproben-Auswertung. Die Länge der horizontalen Strecken kennzeichnet die Einhängedauer. Bei mehrtägiger Einhängedauer ist das aus der Gesamtprobe berechnete Tagesmittel dargestellt.

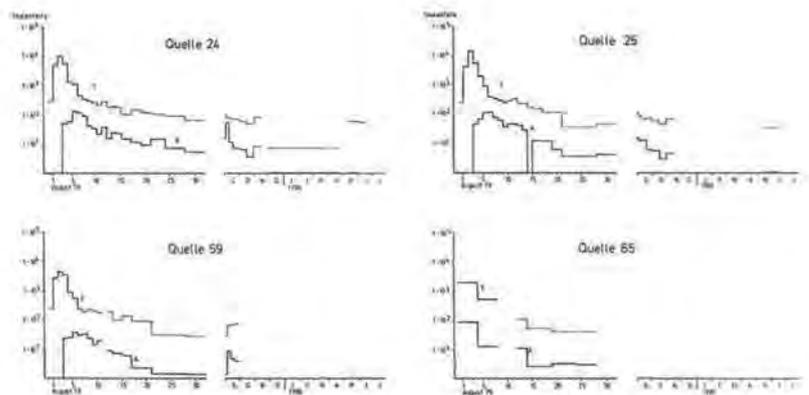


Fig. 53: Durchgangskurven von Amidorhodamin G (A) und Tinopal (T) in den Quellen des Hinter Seeberg, Bisistal, aufgrund der Aktivkohleproben-Auswertung. Die Länge der horizontalen Strecken kennzeichnet die Einhängedauer. Bei mehrtägiger Einhängedauer ist das aus der Gesamtprobe berechnete Tagesmittel dargestellt.

überhaupt sprechen kann – sinkt nach wenigen Tagen unter die Nachweisgrenze ab.

Selbst bei der Annahme einer Sekundäreinspeisung über Hüribach und EW-Beileitung durch die konzentrierten Austritte von den Quellen 113 und 114 reichen die beobachteten Zeiten dafür kaum aus. Noch am ehesten damit zu erklären ist der signifikantere Durchgang in Quelle 14, der auch zeitlich etwas später (6.8.–8.8. 1979) erfolgte. Die übrigen Amidorhodaminaustritte dieser Quellgruppe liegen übrigens alle nördlich der Muota, was im Hinblick auf die Herkunft aus dem S ebenfalls sehr bemerkenswert ist. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Durchgangskennwerte des Amidorhodamins, getrennt nach den verschiedenen Quellgruppen, findet sich in Tab. 17. Die Durchgangskurven sind für die Direktmessung in Fig. 51 und für die Aktivkohleuntersuchungen in Fig. 52 und 53 zusammengestellt. Der sehr unregelmäßige Verlauf des Durchganges in den Quellen in Balm – Fugglen weist darauf hin, daß man in diesen Konzentrationen bereits im unteren Grenzbereich der Meßgenauigkeit liegt, und einzelne dieser kleinen Schwankungen bereits im Sinne von Meßfehlern interpretiert werden müssen.

Im Vergleich der beiden Untersuchungsmethoden, Direktmessung und Aktivkohleuntersuchung, zeigen die Ergebnisse – abgesehen von den schon angeführten Quellen in Balm – Fugglen – recht gute Übereinstimmung. Dies gilt sowohl für den Hauptdurchgang in den Quellen im Hürital als auch für die Quellgruppe Seeberg im Bisistal. In den zuletzt genannten Quellen wurde mit der Aktivkohle-Langzeitbeobachtung ein nochmaliger Konzentrationsanstieg im September 1979 beobachtet. Für die Quellgruppe Balm – Fugglen konnten die dort mit der Direktmessung nachgewiesenen Spuren von Amidorhodamin in der fluorimetrischen Untersuchung der Kohleeluate infolge des gleichzeitigen Auftretens von Eosin und Rhodamin (vgl. Abschn. 4.5.1.2.) nicht festgestellt werden. Es hätte einer zusätzlichen Probenaufbereitung bedurft, auf die aber in Anbetracht der noch beabsichtigten dünn-schichtchromatographischen Messung der Eluate verzichtet wurde.

Tab. 18: Kennwerte der mit Tinopal ABP-flüssig registrierten Tracerdurchgänge.

Beobach- tungsstelle	Entfernung von der Eingabest. in km	Höhendiff. zur Eingabest. in m	Nachweis- methode D = Direktm. A = Aktiv	Zeitpunkt (1979)		Abstandsgeschwindigkeit für		Maximale Konzentr. des Tracers in Skalent.
				des ersten Nachweises	der maximalen Konzentration	1. Nachweis in m/h	max. Konzentr. in m/h	
23	4,30	1155	+A	2./3. 8.	2./3. 8.	~ 65	~ 65	7811
24	4,00	1155	+A	1./2. 8.	2./3. 8.	~ 108	~ 65	10509
25	4,00	1155	+A	1./2. 8.	2./3. 8.	~ 108	~ 65	14590
59	4,05	1155	+A	1./2. 8.	2./3. 8.	~ 108	~ 65	4500
85	4,00	1155	+A	31. 7./4. 8.	31. 7./4. 8.	~ 108	~ 65	7631

untersuchte Beobachtungsstellen mit negativem Befund: 1-21, 46, 49, 62.

4.5.1.8. Markierung mit Tinopal ABP

Die Eingabe von 99 kg 50prozentiger Tinopal-Lösung erfolgte gemeinsam mit Lithiumchlorid am Südrand des Untersuchungsgebietes in einer Schwinde des Riedbodens von Galtenäbnet (E IV, 1935 m ü M). Dieser Ponor liegt in der schon im Zusammenhang mit der Amidorhodaminmarkierung genannten NE-streichenden Zone, die sowohl durch ausgeprägte Längsklüftung als auch durch das Abtauchen des Quintnerkalkes gekennzeichnet ist. Erwartungsgemäß erfolgte der Wiederaustritt hauptsächlich in den nordöstlich davon gelegenen Quellen des Hinter Seeberg im Bisistal (785 m ü M).

Der tektonischen Vorzeichnung und dem starken Gefälle entsprechend ergeben sich sehr hohe Abstandsgeschwindigkeiten sowie ein ausgeprägter Tracerdurchgang. Tinopal konnte in allen beobachteten Quellen der Seeberggruppe (Quelle 24, 25, 59 und 65 einschließlich der Abflußmeßstelle Nr. 23) nachgewiesen werden. Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf die Aktivkohleuntersuchung, da, wie am Beginn des Abschn. 4.5.1. ausgeführt, in der Direktmessung das verwendete Tinopal nicht eindeutig identifiziert werden konnte.

Auch in der Kohlemessung machte sich der hohe Untergrund im Emissionsbereich des Tinopals nachteilig bemerkbar. So konnte nur der Hauptdurchgang in der Zeit vom 1. bis 8. 8. 1979 eindeutig vom Untergrund abgegrenzt werden. Erhöhte Fluoreszenzwerte der Langzeitbeobachtung sind dagegen nicht einwandfrei dem Tinopal zuzuordnen. Vielmehr kommt darin eine von der Einhängedauer abhängige Untergrunderhöhung zum Ausdruck.

Die Durchgangskurven des Tinopals in den genannten Quellen sind in Fig. 53 zusammengestellt. Die zugehörigen Hauptkennwerte sind in Tab. 18 aufgelistet.

Weitere eindeutige Tinopalaustritte konnten mit den angewandten Auswertungsmethoden aufgrund der recht ungünstigen Fluoreszenzeigenschaften des verwendeten Flüssig-Tinopals nicht nachgewiesen werden. Die Paralleleinspeisung von Lithiumchlorid (vgl. Abschn. 4.5.2.1.) zeigt jedoch, daß über die NNW-gerichteten Querklüfte auch Nebenabflußwege direkt zur Quellgruppe Balm - Fugglen (dort vor allem Quelle 12 und 14) vorhanden sind.

4.5.2. Die Markierung mit Salzen

4.5.2.1. Lithiumchlorid (H. BEHRENS)

Lithiumchlorid wurde gemeinsam mit Tinopal ABP am 31. 7. 1979 auf dem Riedboden von Galtenäbnet (E IV) eingespeist. Während das Tinopal bereits als Lösung angeliefert war, wurde das Lithiumchlorid am Vortag der Einspeisung am Einspeisungsort in Lösung gebracht.¹⁾

Tracereigenschaften und Meßtechnik:

Lithiumchlorid stand als reines, gut lösliches Salz zur Verfügung, das in seiner Zusammensetzung der chemischen Formel entsprach. Für quantitative Betrachtungen (z. B. Wiederausbringung aus einer Quelle usw.) muß berücksichtigt werden, daß nur ca. 16,3 Gewichtsprozent des Lithiumchlorids der eigentliche Tracer Lithium sind.

Der Nachweis erfolgte in der gleichen Weise wie bei den Versuchen 1975 im Einzugsbereich der Ljubljana (H. BEHRENS & Martina ZUPAN, 1976) durch Aufnahme von Emissionsspektren. Die Nachweisgrenze betrug 0,5 µg Lithium pro Liter Wasser.

¹⁾ Als Kuriosum sei erwähnt: Es erwies sich als besonderes Problem, das Salz bzw. die Lösung bis zur Einspeisung vor dem herandrängenden Rindvieh zu sichern, das geradezu einen wilden Appetit darauf zu verspüren schien. Dies gelang schließlich durch einen Stacheldrahtverhau, zu dem das Material aus der weiteren Umgebung gesammelt werden konnte.

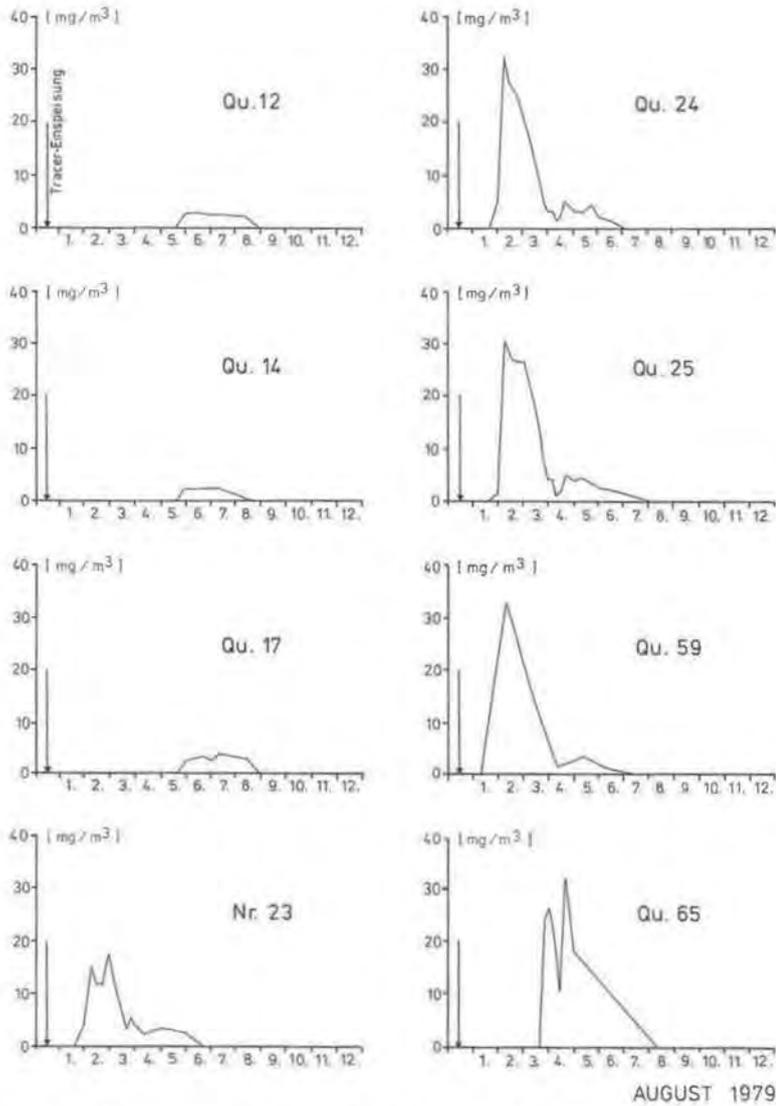


Fig. 54: Durchgangskurven von Lithium in den beobachteten Wiederaustritten.

Der Gehalt an natürlichem Lithium lag in den untersuchten Wasserproben ebenfalls bei diesem Wert oder darunter, so daß die Messung von eindeutigen Tracerdurchgängen nicht beeinträchtigt wurde.

Meßergebnisse:

Eine Übersicht über die untersuchten Proben wird in Tab. 19 gegeben. Die erhaltenen Durchgangskurven von Meßstellen mit positivem Lithiumnachweis sind in Fig. 54 dargestellt. Da für diese Beobachtungsstellen keine Schüttungswerte vorliegen, können Angaben über die quantitative Ausbringung nicht gemacht werden.

Tab. 19: Übersicht über die auf Lithium untersuchten Wasserproben.

Bezeichnung	Anzahl	Zeitraum
1	52	31. 7. - 14. 11. 1979
2	48	31. 7. - 16. 10. 1979
5	52	31. 7. - 16. 10. 1979
6a	47	31. 7. - 20. 9. 1979
7a	14	4. 8. - 28. 8. 1979
11	49	31. 7. - 20. 9. 1979
12	49	31. 7. - 20. 9. 1979
13	54	31. 7. - 14. 11. 1979
14	53	31. 7. - 14. 11. 1979
15	4	1. 10. - 14. 11. 1979
15b	47	31. 7. - 1. 10. 1979
15c	50	31. 7. - 1. 10. 1979
16	53	31. 7. - 14. 11. 1979
17	46	31. 7. - 20. 9. 1979
20a	53	31. 7. - 14. 11. 1979
21	53	31. 7. - 14. 11. 1979
21a	35	31. 7. - 5. 9. 1979
23	50	31. 7. - 1. 10. 1979
24	53	31. 7. - 14. 11. 1979
25	54	31. 7. - 14. 11. 1979
46	49	31. 7. - 14. 11. 1979
49	16	8. 8. - 28. 8. 1979
59	22	31. 7. - 1. 10. 1979
62	26	31. 7. - 1. 10. 1979
65	20	3. 8. - 28. 8. 1979
107a	23	31. 7. - 17. 8. 1979
Hölloch	5	2. 8. - 8. 8. 1979
1077 Proben		

Auf die nachgewiesene Hauptabflußrichtung von der Eingabestelle E IV zur Quellgruppe Hinter Seeberg im Bisistal (Quelle 24, 25, 59 und 65) wurde bereits im Zusammenhang mit dem in die gleiche Schwinde eingespeisten Tinopal hingewiesen. Die Abflußbahn folgt dem Streichen der Schichten, wobei an der direkten Verbindungslinie etwa auch die Ausstrichsgrenze der nach N abtauchenden Quintnerkalke liegt.

Der Weg des Lithiums zu den Quellen von Fugglen (Quelle 12, 14 und 17) im unteren Bisistal ist allein aus den Ergebnissen der Lithium-Markierung nicht eindeutig zu beantworten. Möglich wäre eine Sekundäreinspeisung durch in den Untergrund infiltriertes Muotawasser. Bei dem nur noch geringen Lithiumgehalt des Flußwassers

(vgl. Nr. 23, Beobachtungsstelle an der Muota unterhalb des Zuflusses von den Quellen Hinter Seeberg) müßte aber die Konzentration bei weiterer Verdünnung im Grundwasserkörper unter die Nachweisgrenze absinken. Endgültig ausgeschlossen werden kann die Herkunft des Lithiums in den Quellen in Fugglen über das Talgrundwasser durch die Ergebnisse der NaCl-Markierung (s. Abschn. 4.5.2.2.). So muß angenommen werden, daß das Lithium doch auf direktem Weg von der Eingabestelle zu den Quellen bei Fugglen gelangt ist. Eine solche Abflußrichtung ist auch geologisch durch die ausgeprägten NNW-streichenden Querklüfte vorgezeichnet.

4.5.2.2. Natriumchlorid (A. BÖGLI, Ch. LEIBUNDGUT, H. ZOJER)

Natriumchlorid diente als Markierungsmittel für das Talgrundwasser im Becken von Balm - Fugglen. Es wurden 13 Stellen beprobt (1, 2, 5, 6a, 11, 12, 13, 14, 15b, 15c, 16, 17 und 20). Das Geographische Institut in Bern bestimmte das Cl^- titrimetrisch, das Institut für Geothermie und Hydrogeologie am Forschungszentrum Graz die fortlaufenden Reihen von Na^+ mit einem Atomabsorptionsspektrophotometer, und das Geologische Landesamt Baden-Württemberg in Freiburg (W. KÄSS) bearbeitete mit einem Flammenphotometer Ausschnitte und Stichproben von Na^+ .

Graphisch dargestellt wurden die fortlaufenden Reihen von acht Probenstellen (Fig. 55). Die Meßergebnisse ergaben für Na^+ eine Grundlast bis zu 0,02 mmol/l und für Cl^- eine solche bis zu 0,05 mmol/l. Die Quellen 2, 5, 11, 12 zeigten deutlich frühe Peaks, abnehmend von Nr. 2 mit 0,63 mmol/l auf 0,12 mmol/l bei Nr. 12. Die Nr. 20 am Südrand des Beckens zeigte am 1. 8. 1979, 13.30 Uhr, den Beginn des Durchganges von NaCl an, der langsam bis zum 4. 8. 1979, 10 Uhr, auf 0,14 mmol/l anstieg und dann bis zum 10. 8. abklang. In der Nr. 17 überschritt die Cl^- -Konzentration die Grundlast nicht signifikant. Hier muß ein Karstwasseraustritt das Grundwasser verdrängen. Nr. 2 wies schon am 1. 8., 0.15 Uhr, einen sehr scharfen Peak von 0,63 mmol/l auf (Fig. 55) und erreichte am 4. 8., 11.50 Uhr, wieder das Grundlastniveau. Die Abstandsgeschwindigkeit ab Kiessammler (a: 350 m, Laufzeit: 12 h) betrug 29 m/h, ein sehr hoher Wert für einen Grundwasserstrom. Das läßt auf ein altes Muotabett mit einem Grundwasserträger aus Grobkies und Steinen schließen. Nur 50 m daneben, am Fuße der Schrattenkalkwand, liegt die Karstquelle Nr. 1, die geringe Einzelspuren an NaCl aufweist, einen kleinen Peak von 0,06 mmol Cl^- /l (1. 8., 18.05 Uhr) und einen von 0,075 mmol Cl^- /l (4. 8., 8.15 Uhr). Sie sind für Na^+ nur schwach angedeutet. Hier drückt das ausströmende Karstwasser das Grundwasser beiseite. Das ist ein Gegensatz zur Tatsache, daß Uranin von der anderen Talseite in der Nr. 1 auftrat. Für diesen Farbstoff muß es daher einen anderen Weg zum Schleichen Brunnen geben. Das deckt sich mit den Erfahrungen bei der Markierung mit Fluoreszenztracern. Die Quelle 15c zeigte am 3. 8., 17.42 Uhr, einen leichten Anstieg der Cl^- -Konzentration, die am 6. 8., 9.57 Uhr, mit 0,09 mmol/l ihr Maximum erreichte und am 11. 8., 21.10 Uhr, in die Grundlast auslief. 15b erwies sich auch im Salzgehalt als Sonderfall, da die Grundlast-Ausschläge bis zu 0,06 mmol/l reichten, eine anthropogene Erscheinung. Am 3. 8., 17.40 Uhr, begann dann ein realer Anstieg bis 0,15 mmol Cl^- /l (4. 8., 11.15 Uhr), der wellenförmig bis zum 12. 8. abklang.

Einer anderen Kategorie gehört die Probenstelle beim Muota-Limnigraphen 6a an. Hier war das Wasser schon am 31. 7., 18.40 Uhr, acht Stunden nach Beginn der Einspeisung, mit einer Konzentration von 0,34 mmol/l belastet. Es liegt eine direkte Verbindung unter der Kiessammlermauer hindurch zur Quelle 18 im Muotabett vor, deren Wasser zu 6a hin fließt.

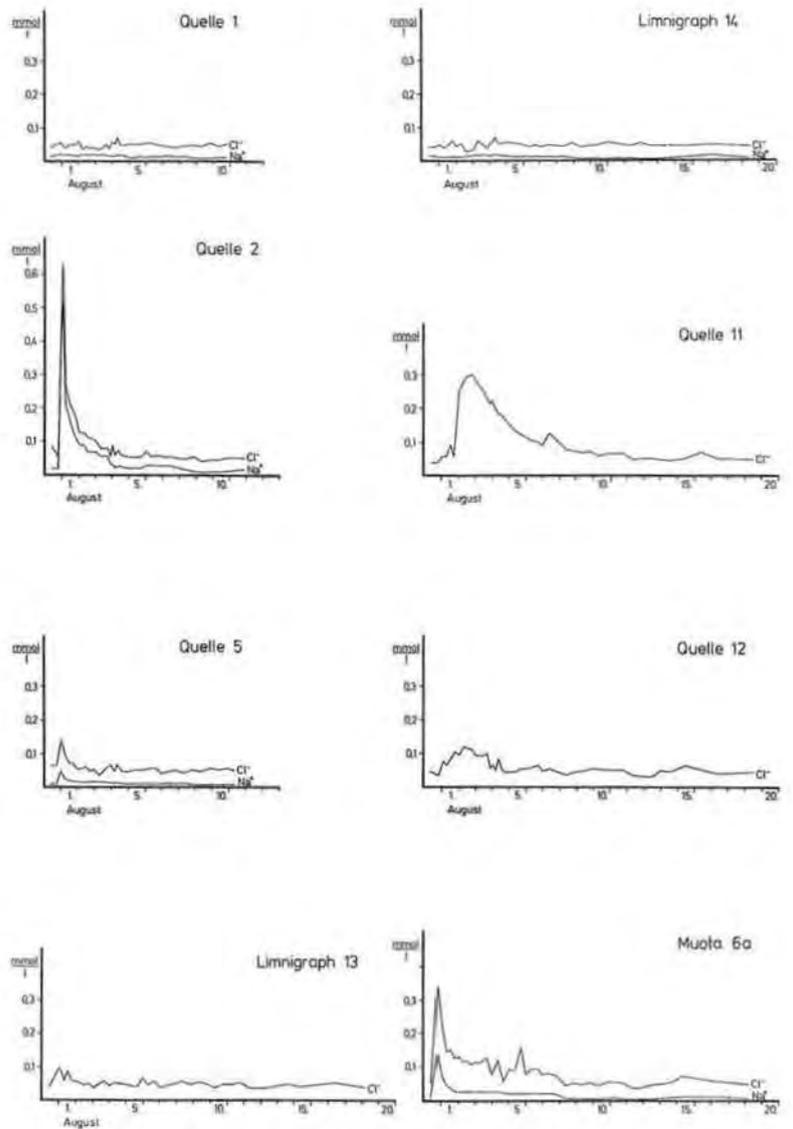


Fig. 55: Durchgangskurven von Na^+ und Cl^- in ausgewählten Probennahmestellen.

4.5.3. Die Markierung mit Detergentia (W. Käss)

Am 1. August 1979 wurden von 18.20 bis 18.40 Uhr 200 kg Alkylbenzolsulfonat Marlon 350 mit 50% Wassergehalt im trockenen Muotabett bei der Mettlenbrücke (E VIII) für die Einspeisung vorbereitet. Ein durch den Betrieb des EW Bisistal entstandener Wasserschwall von etwa 500 l/s nahm das breiige, noch nicht völlig aufgelöste Einspeisgut mit sich. Die Frontwelle, begleitet von einem meterhohen Schaumwall, erreichte gegen 21 Uhr die obere Steinweidbrücke, soll aber noch vor der unteren Brücke im Muotabett versickert sein (s. Abschn. 4.3.2.).

Es wurden 160 Wasserproben von 12 Entnahmestellen untersucht. Als Untersuchungsergebnis muß festgestellt werden, daß nur an einer einzigen Beobachtungsstelle (21a) Detergentia einwandfrei nachzuweisen waren. Dorthin ist dieser Markierungsstoff aber wahrscheinlich durch das Schwallwasser der Muota gelangt. Eine unterirdische Verbindung zwischen dem versickerten Muotawasser und einer Austrittsstelle ist offenbar wegen der zu geringen Einspeismenge bzw. wegen der zu großen Verdünnung nicht nachzuweisen.

4.5.4. Die Markierung mit Triftstoffen

4.5.4.1. Lycopodiumsporen (H. HÖTZL, V. MAURIN, H. ZOJER, J. G. ZÖTL)

Lycopodiumsporen kamen bereits bei zahlreichen hydrogeologischen Untersuchungen mit Erfolg zur Anwendung. Über Präparations- und Auswertemethoden wurde schon an anderer Stelle ausführlich berichtet (V. MAURIN & J. ZÖTL, 1959; F. BAUER, 1967; J. G. ZÖTL, 1974, u. a.). Dem Einsatz gefärbter Sporen im Rahmen des kombinierten Markierungsversuches 1979 im Muotatal lagen folgende Überlegungen zugrunde:

1. In den zu untersuchenden Teilgebieten (s. Fig. 3) Böldmeren (II), Hürital - Galtenäbnet (VI) und Wasserberg (VII) steht eine Serie von karsthydrologisch sehr unterschiedlich zu bewertenden Gesteinsfolgen an (s. Fig. 2). Diese sind außerdem durch eine intensive Einengungstektonik in Decken und Schuppen sowie durch die meist jüngere Bruchtektonik in Teilschollen zerlegt (s. Fig. 5 und 6 und Tafel IV). Weiters war zu erwarten, daß ein Teil der Markierungsmittel nicht nur Gesteinsfugen und Karstschläuche im felsigen Untergrund, sondern auch klastische Talfüllungen und Moränenmaterial passieren würde. Der gemeinsame Einsatz von Fluoreszenztracern und Sporen in Schwinden am Seenalpsee (Eingabestelle VI) und am Wasserberg (E III) sollte daher Aufschlüsse über die Grenzen der Verwendbarkeit einzelner Markierungsstoffe sowie über die hydrologische Wirksamkeit der lithologisch stark differenzierten Schichtglieder des Untergrundes bringen.
2. Die im Wasserdome des Hölloches gemeinsam eingespeisten grünen und braunen (fluoreszierenden) Sporen sollten der Überprüfung einer neuen Präparations- und Nachweismethode dienen (s. hierzu Abschn. 4.5.4.2.). Für dieses Experiment wurde daher ein unterirdisches Karstgerinne in diesem gut bekannten Höhlensystem ausgewählt.

Die Beschickung der Schwinden erfolgte nach bewährter Methode durch Aufschlämmen der trockenen Sporen in Wasser und nachheriger Einbringung mit Hilfe eines Trichters mit engmaschigem Drahtnetz und Gummischlauch. Wie geplant konnten alle Einspeisungen am Vormittag des 31. Juli 1979 durchgeführt werden, und zwar im einzelnen:

Schwinde am Ostufer des Seenalpsee (E VI)

Seehöhe: 1719 m ü M

Abfluß: am 31. 7. 1979 um 11 Uhr 5 l/s

(am 29. 7. um 11 Uhr noch 8 l/s)

Einspeismenge: 10 kg rot gefärbte Sporen

Injizierung: 10.15 Uhr bis 11.15 Uhr

Leiter: H. ZÖGER

Wasserberg (E IIIa)

Seehöhe: 1710 m ü M

Abfluß: Bei Vorbegehungen Anfang Juli 1979 verschwand an dieser Stelle ein Bach mit etwa 30 l/s.

Ende Juli war der Bach ausgetrocknet. Für die Einspeisung mußten daher 3500 l Wasser eingeflogen werden. Daraus wurden in der Zeit von 10.30 Uhr bis 13.10 Uhr der Schwinde kontinuierlich 0,3 bis 0,4 l/s Wasser zugeleitet. Die ursprünglich geplante, gemeinsame Einspeisung mit Rhodamin mußte daher aufgegeben werden (s. dazu Abschn. 4.3.1.), so daß hier nur noch Phytoplankton und Sporen zusammen eingebracht wurden.

Einspeismenge: 15 kg blau gefärbte Sporen

(in 200 l Wasser aufgeschlämmt)

Injizierung: 11.25 Uhr bis 12.30 Uhr

Leiter: H. HÖRZL

Hölloch, Wasserdom (E II)

Seehöhe: 830 m ü M

Abfluß: 2 l/s

Einspeismenge: 5 kg grün gefärbte Sporen,

3,4 kg braune (fluoreszierende) Sporen

Injizierung: grüne Sporen 10.45 Uhr bis 11.15 Uhr,

braune Sporen 11.20 Uhr bis 11.30 Uhr

Leiter: A. WILDBERGER

Die Planktonnetze für die **Beobachtung** eines eventuellen Sporendurchganges wurden im Hürital bereits am Nachmittag des 30. Juli 1979, im Bereich des Bisistales und im Hölloch am Vormittag des 31. Juli – also gleichzeitig mit den Einspeisungen der Tracer – eingesetzt. Damit war gewährleistet, daß an allen Stellen ober Tage noch „Leerproben“ gewonnen werden konnten.

Unter Kontrolle standen 22 Quellen bzw. Gerinne, und zwar im *Hürital* (s. Tafel IV) die Nummern 107, 108, 115, 137, 138 und 144, im *Bisistal/Bereich Zwingsbrügg* (s. Fig. 36) Nr. 21, *Bereich Balm – Fugglen* (s. Fig. 35) die Nummern 1, 2, 5, 6a, 7a, 11 bis 15, 15c, 16, 17 und 20a sowie im *Hölloch* die Beobachtungsstellen „Quelle“ und „Styx“ (s. Höhlenplan, Fig. 12).

Die Beprobung (s. Fig. 38) erfolgte in der Regel im Hürital in der Zeit vom 31. Juli bis 17. August 1979 täglich, im Bisistal im Bereich Balm – Fugglen vom 31. Juli bis 4. August 1979 zweimal am Tag, bis zum 15. August täglich, bis zum 21. August jeden zweiten, bis 24. August jeden dritten und bis zum 5. September 1979 jeden vierten Tag. Danach wurden hier aus den durchgehend eingehängten Netzen noch Proben am 11. 9., 20. 9., 1. 10., 16. 10. und 31. 10. 1979 gezogen. In der Zeit vom 14. bis 29. November waren an den wichtigsten Quellen nochmals Planktonnetze eingehängt (s. dazu Tab. 20–22). Im Hölloch konnte wegen der inzwischen eingetretenen Hochwassersituation jeweils nur eine Probe („Quelle“ und „Styx“) gewonnen werden.

Die **Auswertung der Planktonnetzproben** erfolgte etwa je zur Hälfte in Graz (Institut für Geothermie und Hydrogeologie) und in Karlsruhe (Lehrstuhl für Angewandte Geologie). Während in Graz nur die blau, rot oder grün gefärbten Sporen berücksich-

Tab. 20: Aufstellung von im Quellbereich Balm nachgewiesenen Durchgängen gefärbter Lycopodiumsporen. Die Planktonnetzproben wurden etwa zur Hälfte in Graz (Institut für Geothermie und Hydrogeologie) bzw. in Karlsruhe (Lehrstuhl für Angewandte Geologie) untersucht. Nur in Karlsruhe wurden auch die braunen Sporen berücksichtigt.

Tage nach der Einsp.	Datum	Quelle Nr. 1				Quelle Nr. 2				Quelle Nr. 5				Abflußmeßstelle Nr. 13								
		Ein-hängezeit	bl	ro	gr	br	Ein-hängezeit	bl	ro	gr	br	Ein-hängezeit	bl	ro	gr	br	Ein-hängezeit	bl	ro	gr	br	
1-3		alle Proben sporennegativ																				
4	4. 8. 79	0.05-16.05	—	—	38	30	0.00-16.40	—	—	—	—	0.20-16.15	—	—	39	27	0.40-16.30	—	—	—	—	
5	5. 8. 79	- 8.20	—	—	11	—	- 8.10	—	—	62	29	- 8.30	—	—	18	—	- 8.40	—	—	4	5	
6	6. 8. 79	- 0.36	—	—	2	2	- 0.50	—	—	73	—	- 0.30	—	—	7	12	- 0.05	—	—	2	—	
	6. 8. 79	-16.20	—	—	2	—	-16.10	—	—	2	2	-16.25	—	—	2	—	-16.40	—	—	4	4	
7	7. 8. 79	- 8.40	—	—	1	4	- 8.50	—	—	2	—	- 8.35	—	—	10	—	- 8.20	—	—	2	—	
8	8. 8. 79	- 8.50	—	—	—	—	- 9.15	—	—	8	29	- 8.40	1	—	—	—	- 8.20	—	—	12	10	
9	9. 8. 79	—	Probe verloren				- 9.05	—	—	5	—	- 8.40	4	—	10	29	—	Probe verloren				
10	10. 8. 79	- 9.15	Probe verloren				-10.00	5	—	6	11	9.05-	Probe verloren				8.50-	Probe verloren				
11	11. 8. 79	- 8.25	—	—	—	—	- 8.45	3	—	6	—	- 8.30	2	4	9	16	- 8.10	4	—	2	—	
12	12. 8. 79	- 8.35	—	—	—	—	- 8.45	9	1	5	23	- 8.30	3	1	6	—	- 8.10	10	9	14	19	
13	13. 8. 79	- 9.00	1	1	1	1	- 9.15	7	1	3	—	- 8.55	8	—	4	11	- 8.40	24	2	3	—	
14	14. 8. 79	-14.55	1	—	1	—	-14.25	10	5	1	12	-15.10	6	—	2	—	-15.40	12	10	6	2	
15	15. 8. 79	- 6.15	—	2	—	1	- 8.05	8	3	2	—	- 7.20	2	1	4	7	- 7.50	9	10	5	—	
17	17. 8. 79	-11.40	12	30	12	21	-10.45	2	1	1	—	-11.30	3	2	7	19	-11.00	1	4	6	4	
19	19. 8. 79	- 7.30	8	19	7	—	- 8.00	Probe verloren				- 7.15	1	2	4	—	- 6.30	12	12	27	20	
21	21. 8. 79	-10.45	2	6	1	—	-10.50	4	1	5	10	-10.40	2	1	1	—	-10.20	26	19	19	13	
24	24. 8. 79	- 9.35	—	10	1	7	- 9.50	3	3	4	—	- 9.25	1	2	1	8	- 9.00	7	2	6	—	
28	28. 8. 79	-11.00	2	3	5	—	- 9.55	10	6	15	20	-10.45	5	4	6	—	-10.20	1	2	2	—	
32	1. 9. 79	-12.45	2	5	8	19	- 9.20	1	1	1	—	-12.30	6	4	8	13	-12.00	—	—	1	—	
36	5. 9. 79	- 7.20	—	1	2	—	- 7.45	1	—	—	6	- 7.10	3	3	7	—	- 6.35	—	—	—	—	
42	11. 9. 79	- 8.55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	- 8.45	6	4	8	15	- 7.35	—	—	—	—	
53	20. 9. 79	-13.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-13.50	3	1	4	—	-13.20	—	—	—	—	
62	1. 10. 79	-15.40	Probe verloren				—	—	—	—	—	—	-16.50	4	8	13	5	-16.30	—	—	—	—
77	16. 10. 79	-13.10	Probe verloren				—	—	—	—	—	—	-13.25	4	4	6	8	-12.20	—	—	—	—
92	31. 10. 79	- 8.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	- 8.55	—	—	—	—	-13.10	—	—	—	—	
106	14. 11. 79	9.30-	Probe verloren				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	- 8.45	—	—	—	—
121	29. 11. 79	14.15	—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-14.00	—	—	—	—	
		Summe:	28	77	95	(85)	Summe:	63	22	201	(142)	Summe:	64	41	216	(180)	Summe:	106	70	115	(77)	

Tab. 21: Aufstellung von im Quellbereich Fugglen-Ost nachgewiesenen Durchgängen gefärbter Lycopodiumsporen.
Auswertende Institute siehe Tab. 20.

Tage nach der Einsp.	Datum	Quelle Nr. 12				Quelle Nr. 17				Abflußmeßstelle Nr. 16							
		Ein- hänge- zeit	bl	ro	gr	br	Ein- hänge- zeit	bl	ro	gr	br	Ein- hänge- zeit	bl	ro	gr	br	
1-2																	
3	3. 8. 79	9.20-					alle Proben sporennegativ					9.40-					
4	4. 8. 79	1.00	5	—	2		9.50-	1.15	—	—	4	1.10	—	—	—	—	
	4. 8. 79	-17.05	8	—	4	4						-17.25	—	—	—	—	
5	5. 8. 79	-9.00	6	—	—	—		-9.15	—	—	—	-4.10	1	—	—	—	
6	6. 8. 79	-1.00	2	—	1	2		-1.30	—	—	—	-1.20	—	—	—	—	
	6. 8. 79	-17.00	—	—	—	—		-17.15	—	—	—	-17.10	—	—	—	—	
7	7. 8. 79	-9.05	—	—	—	2		-9.20	—	—	—	-9.15	—	—	—	—	
8	8. 8. 79	-9.30	46	2	—	—		-9.55	7	—	—	-9.45	2	—	—	—	
9	9. 8. 79	-9.30	525	4	—	—		-10.00	43	—	—	-9.50	100	1	—	—	
10	10. 8. 79	-10.15	827	3	—	—		-10.35	26	—	—	-10.30	5	—	—	—	
11	11. 8. 79	-9.00	428	45	—	—		-9.15	13	3	—	-9.10	35	10	—	—	
12	12. 8. 79	-9.10	312	57	—	—		-9.25	11	—	—	-9.20	10	1	—	—	
13	13. 8. 79	-12.00	322	78	—	—		-11.50	8	1	—	-11.45	87	14	—	—	
14	14. 8. 79	-13.20	Probe verloren		—	—		-12.55	5	3	—	-12.40	9	2	—	—	
15	15. 8. 79	-10.55	137	116	—	—		-10.45	5	2	—	-10.40	101	80	—	—	
17	17. 8. 79	-10.15	93	84	—	—		-10.10	5	6	—	-10.05	fast kein Sediment			—	
19	19. 8. 79	-11.55	89	73	—	—		-11.45	3	8	—	keine Proben			—		
21	21. 8. 79	-9.40	96	78	—	—		-9.20	5	4	—	-9.10	2	—	—	—	
24	24. 8. 79	-13.40	82	42	—	—		-13.25	Probe verloren		—	-13.15	—	—	—	—	
28	28. 8. 79	-16.35	124	41	—	—		-16.30	2	1	—	-16.15	4	3	—	—	
32	1. 9. 79	-11.25	38	2	—	—		-10.50	—	1	1	-11.00	5	1	—	—	
36	5. 9. 79	-12.00	11	5	—	—		-11.00	4	3	—	-10.45	Probe verloren			—	
42	11. 9. 79	-11.55	19	3	—	—		-11.45	2	1	—	-11.35	7	—	—	—	
53	20. 9. 79	-12.00	4	1	—	—		-11.50	—	—	1	-11.35	1	1	—	—	
62	1. 10. 79											-11.00	2	—	—	—	
77	16. 10. 79											-14.40	3	—	—	—	
92	31. 10. 79											-11.00	1	1	—	—	
106	14. 11. 79											10.00					
121	29. 11. 79											10.45	1	—	—	—	
		Summe:	3174	634	7	(8)		Summe:	139	33	2	(43)	Summe:	376	114	—	(—)

Tab. 22: Aufstellung von im Quellbereich Fugglen-West bzw. in den Quellen Nr. 14 und 20a nachgewiesenen Durchgängen gefärbter Lycopodiumsporen. Die Meßstelle 14 (Guggenhürl) erfaßt auch noch die Abflüsse der Quellen 8 und 9. Auswertende Institute siehe Tab. 20.

Tage nach der Einsp.	Datum	Ein-hängezeit	Quelle Nr. 20a				Quelle Nr. 15c				Quelle Nr. 14						
			bl	ro	gr	br	Ein-hängezeit	bl	ro	gr	br	Ein-hängezeit	bl	ro	gr	br	
1-2			alle Proben sporennegativ														
3		9.55-					10.15-					10.20-					
4	3. 8. 79	1.10	18	—	—	—	1.20	—	—	—	1	1.30	—	—	—	—	
	4. 8. 79	-17.00	—	—	—	—	-17.20	—	Probe verloren	—	—	-17.30	3	—	—	—	
5	5. 8. 79	-9.25	1	—	—	—	-9.45	—	—	—	—	-10.00	5	—	—	—	
6	6. 8. 79	-1.05	—	—	—	—	-1.20	—	Probe verloren	—	—	-1.25	1	—	—	—	
	6. 8. 79	-16.15	—	Probe verloren	—	—	-17.10	—	—	—	3	-17.20	—	Probe verloren	—	—	
7	7. 8. 79	-9.15	—	—	—	—	-9.45	—	Probe verloren	—	—	-9.55	—	—	—	—	
8	8. 8. 79	-9.45	4	—	—	—	-10.00	5	—	—	—	-10.05	67	—	—	—	
9	9. 8. 79	-9.40	—	—	—	—	-10.00	—	Probe verloren	—	—	-10.05	2	—	—	—	
10	10. 8. 79	-9.40	23	2	—	—	-10.10	24	—	—	9	-10.15	126	5	—	—	
11	11. 8. 79	-9.20	6	—	—	—	-9.30	4	2	—	—	-9.35	87	31	—	—	
12	12. 8. 79	-9.20	—	—	—	—	-9.30	5	1	—	2	-9.35	62	2	—	—	
13	13. 8. 79	-12.15	569	109	—	—	-11.25	4	3	—	—	-11.30	89	20	—	—	
14	14. 8. 79	-12.10	—	Probe verloren	—	—	-11.30	—	4	—	5	-11.45	25	4	—	—	
15	15. 8. 79	-11.10	209	78	—	—	-10.15	2	1	—	—	-10.20	—	Probe verloren	—	—	
17	17. 8. 79	-10.30	56	12	—	—	-9.35	4	2	—	—	-9.45	27	21	—	—	
19	19. 8. 79	-12.20	4	1	—	—	-10.55	6	3	—	2	-11.05	20	6	—	—	
21	21. 8. 79	-9.50	9	4	—	—	-7.45	11	3	—	8	-7.55	22	8	—	—	
24	24. 8. 79	-14.15	17	2	—	—	-12.40	2	3	—	3	-12.45	17	5	—	—	
28	28. 8. 79	-17.20	261	112	—	—	-15.30	—	—	—	—	-15.45	394	189	—	—	
32	1. 9. 79	-11.35	8	2	—	—	-9.45	1	—	—	—	-9.35	19	2	—	—	
36	5. 9. 79	-12.15	88	21	—	—	-9.40	5	—	—	—	-9.55	47	22	—	—	
42	11. 9. 79	-14.00	3	—	—	—	-13.00	—	—	—	—	-13.30	26	1	—	—	
53	20. 9. 79	-13.00	26	10	—	—	-10.40	1	—	—	—	-11.00	45	12	—	—	
62	1. 10. 79	-11.25	—	—	—	—	-13.20	—	—	—	—	-14.30	18	5	—	—	
									Abflußmeßstelle Nr. 15								
77	16. 10. 79	-15.00	11	2	—	—	14.15-	—	—	—	—	-10.30	123	53	—	—	
92	31. 10. 79	-9.45	2	—	—	—	10.30	—	—	—	—	-10.10	—	—	—	—	
106	14. 11. 79	-11.00	6	1	—	—	10.15-	—	—	—	—	-10.30	84	38	—	—	
121	29. 11. 79	—	—	—	—	—	13.00	—	—	—	—	-13.20	13	5	—	—	
			Summe:	1321	356	—	(—)	Summe:	74	22	—	(33)	Summe:	1322	429	—	(—)

tigt wurden, wurden in Karlsruhe auch die von W. Käss im Hölloch eingesetzten fluoreszierenden Sporen ausgezählt. Im verwendeten Lichtmikroskop zeigten letztere eine braune Farbe. Sie sind daher auch unter dieser Bezeichnung in den Sporentabellen 20 bis 25 aufgeführt.

Es muß in Erinnerung gebracht werden, daß wir es bei der Sporenriftung mit einem halbquantitativen Verfahren zu tun haben. Die nachgewiesenen Sporenmengen sind nämlich abhängig von der Größe des kontrollierten Gewässers, den Strömungsverhältnissen, der Trübstofffracht, der Einhängedauer der Netze, dem Auszählverfahren u. a. mehr. Ein weiterer Nachteil dieser Methode besteht in der Gefährdung der Netze – vor allem bei längerer Einhängedauer –, was zum Verlust von Proben und Netzen führen kann. Trotzdem stellte der Einsatz von Lycopodiumsporen im Rahmen dieses kombinierten Markierungsversuches eine wertvolle Ergänzung dar.

Im einzelnen wurden folgende **Ergebnisse** erzielt: Überraschend war der negative Befund bei allen gezogenen Proben im Bereich des *Hürिताles*. Auf Grund der geologischen und morphologischen Verhältnisse dieses Gebietes wurde nämlich ein Wiederaustritt der am Seenalpsee (E VI) zusammen mit Uranin eingebrachten roten Sporen im oberen Talabschnitt (oberhalb Liplisbüel) erwartet. Da der Hüribach bei Mittel- und Niederwasser in seinem eigenen Schotterbett wieder vollkommen versickert, sollte die Doppeleinspeisung in E VI eine Überprüfung des unterschiedlichen Transportverhaltens eines Fluoreszenztracers und der Sporen ermöglichen. Die hier vorausgesetzten Verbindungen über den Wildbachschutt des Hürिताles zur großen Quellgruppe bei Hufstetli (Nr. 103, 104 und 115–120) wurde dann auch durch den Verlauf des Amidorhodaminabflusses von der Eingabestelle V bestätigt (s. Tafel IV).

Während des Versuches konnten aber im untersten Hürital – bereits im Bereich seiner Ausmündung ins Muotatal – grüngefärbte Grundwasseraustritte visuell beobachtet werden. Die unmittelbar am und im Bachbett liegenden, schwer zugänglichen Quellen waren nicht in das Beobachtungsprogramm einbezogen. Proben liegen daher nicht vor. Da diese intensive Grünfärbung aber zeitlich mit der ebenfalls mit dem freien Auge erkennbaren starken Uraninausbringung an mehreren Quellen des Bereiches Balm – Fugglen zusammenfällt, ist der Schluß berechtigt, daß es sich auch hier im untersten Hürital um eine Uraninfärbung aus dem Karstuntergrund gehandelt hat. In diesem Falle könnten hier auch rote Sporen vom Seenalpsee mitausgeschwemmt worden sein.

Im Bereich *Balm – Fugglen* wurden alle eingespeisten Sporenfarben nachgewiesen. Der Einflußbereich von den einzelnen beschickten Ponoren überschneidet sich weitgehend (Fig. 56). Dieses Bild deckt sich im wesentlichen mit dem Verhalten der Fluoreszenztracer. So konnten praktisch in allen uraninpositiven Quellwässern – soweit sie auch mit Netzen bestückt waren – rote Sporen nachgewiesen werden. Es handelt sich dabei um die Quellen Nr. 1, 2, 5, 12, 14, 15c, 17 und 20a. Dazu kommen noch registrierte Sporendurchgänge in den Sammelabflüssen Nr. 13 (Bereich Schleichender Brunnen) und Nr. 16 (Fugglen-Ost). Über die Meßstelle Nr. 14 läuft der gemeinsame Abfluß mit den Quellen 8 und 9. Es handelt sich dabei um einen ergiebigen, geschlossenen Quellbezirk (Guggenhürli, s. Fig. 35).

Auffallend sind die geringen Durchgangsgeschwindigkeiten der roten Sporen gegenüber dem ebenfalls am Seenalpsee eingesetzten Uranin. Während letzteres bei einer durchschnittlichen Entfernung von 6 km in der Luftlinie und einer Höhendifferenz von etwa 1080 m bereits zwei Tage nach der Einspeisung in den meisten Quellen auftrat (s. Abschn. 4.5.1.4.), gelang der Nachweis roter Sporen erst am achten Tag nach der Eingabe in Quelle Nr. 12, am zehnten in Nr. 14 und Nr. 20a, am elften in Nr. 5 und Nr. 15c und erst am zwölften Tag mit zunächst nur einer Spore im Schleichenden Brunnen (Nr. 2). Die größten Ausbringungen ergaben sich bei Nr. 12 mit ins-

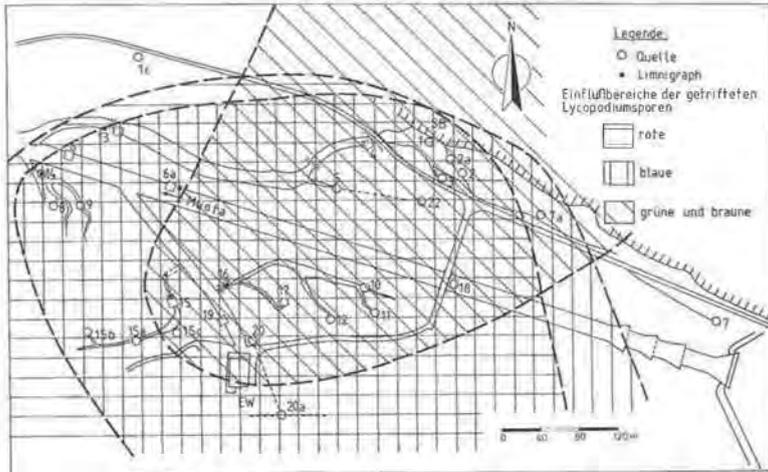


Fig. 56: Darstellung der sich überlappenden Wiederaustrittszonen der getrifteten *Lycopodium*-sporen im Bereich Balm - Fugglen.

gesamt 634 roten Sporen, bei Nr. 14 mit 429 und bei Nr. 20a mit 356. Der Waller Nr. 11, obwohl ebenfalls zum großen Quellbezirk in Fugglen-Ost gehörend, blieb ohne Ausbeute an roten Sporen. Auffallend ist, daß bei dieser Quelle auch der erste Uraninnachweis erst am fünften Tag nach der Ersteinpeisung gelang.

Was den räumlichen Nachweis betrifft, entspricht das Auftreten der blauen Sporen mit einer Ausnahme (Nr. 7a) jenem der roten. Auch hier waren die Quellen und Abflußmeßstellen Nr. 1, 2, 5, 14, 15c, 16, 17 und 20a sowie noch 7a sporenpositiv. Die in Tab. 20-22 nicht angeführte Quelle Nr. 7a wurde wegen zu starker Schwankungen der Wasserführung nur dreimal beprobt (Tab. 23).

Tab. 23.: Sporennachweis in Quelle Nr. 7a.

Datum	Sporenführung			
	blau	rot	grün	braun
10. 8. 1979	27	-	4	2
20. 8. 1979	-	-	-	-
28. 8. 1979	5	-	6	-

Ein wesentlicher Unterschied zeigte sich aber für das erste Auftreten der blauen Sporen zu den roten (Nr. 20a am 3. Tag nach der Einspeisung mit 18 blauen Sporen in einer Tagesprobe; Nr. 12, 3. Tag 5 blaue Sporen; Nr. 14, 4. Tag 3 blaue Sporen). Rechts der Muota gelang der erste Nachweis in Nr. 5 am achten Tag (eine blaue Spore) und im Schleichenden Brunnen (Nr. 2) am zehnten Tag nach der Einspeisung mit 5 blauen Sporen. Auch die Gesamtausbeute ist mit 6700 blauen Sporen am größten. Diese kürzeren Durchgangszeiten und die wesentlich höheren Ausbringraten lassen sich zwanglos erklären. Der beschickte Ponor (IIIa) liegt durchschnittlich nur 2,5 km vom Quellgebiet entfernt (Höhendifferenz etwa 1070 m). Die Einspeisemenge war mit 15 kg um 50% höher als bei den roten Sporen. Die eingangs geschilderten, ungünstigen Einspeisbedingungen bei IIIa fielen anscheinend nicht so schwer ins Gewicht,

wie ursprünglich befürchtet. Die damals trocken liegende, aber gut ausgefahrene Übergangsstrecke vom Ponor bis zum geschlossenen Karstwasserkörper konnte mit den eingeflogenen 3,5 m³ Wasser ausreichend überbrückt werden.

Vom ursprünglichen Plan, aus Vergleichsgründen auch 15 kg Rhodamin B in IIIa einzusetzen, wurde wegen des fehlenden natürlichen Abflusses Abstand genommen. Die Einspeisung erfolgte in eine 300 m südlich und 100 m höher gelegene Felskluff (IIIb), in die kontinuierlich 0,3 l/s Schmelzwasser verschwanden (s. Abschn. 4.3.2.). Die beiden Tracer (blaue Sporen und Rhodamin B) liefen aber anscheinend trotzdem über dieselbe „Abflußschiene“ den Quellen zu. Von der Rhodamineinspeisung wurden – mit Ausnahme von Nr. 11 – alle beobachteten Quellen im Bereich Balm – Fugglen betroffen.

Das gleiche gilt auch bei den blauen Sporen für alle mit Planktonnetzen besetzten Quellaustritte. Auch hier blieb nur Quelle Nr. 11 ohne Nachweis. Die höchste Zahl an blaue Sporen – sowohl in Einzelproben als auch in der Summe – konnte an den Quellen Nr. 12, 14 und 20a registriert werden.

War schon das Auftreten roter und blauer Sporen in allen beobachteten Quellen rechts der Muota überraschend, so stellte uns die gleichzeitige Ausbringung von im Hölloch-System eingespeisten grünen und braunen Sporen im Bereich Fugglen vollends vor ein karsthydrologisch anscheinend schwer zu deutendes Problem.

Im Wasserdome des Hölloches (s. Tafel IV und Fig. 12) wurde am Vormittag des 31. Juli 1979 ein Höhlengerinne mit 2 l/s Durchfluß mit 5 kg grünen und 3,4 kg braunen (fluoreszierenden) Sporen markiert. Letztere, von W. KASS beige stellt, sollten dem Versuch dienen, unter Verwendung eines UV-Mikroskops das umständliche und zeitraubende Auszählen der Sporen nach konventioneller Art zu vereinfachen (s. Abschn. 4.5.4.2.). Um zur Klärung dieser Fragestellung vergleichbare Proben zu gewinnen, wurde im Quelltümpel des Schleichenden Brunnens ein Gummischlauch unter die steil eintauchende Felswand bis in etwa 1,5 m Tiefe geschoben und verankert. Das so separierte Wasser konnte nun, 100 m bachabwärts, über einen U-förmigen Verteiler zu gleichen Teilen in zwei Planktonnetze geleitet werden. Eine Probe wurde im folgenden von W. KASS in Freiburg unter dem UV-Mikroskop ausgezählt, die andere der bisher üblichen Auswertung mit Hilfe eines normalen Lichtmikroskops zugeführt. Aber nur bei den in Karlsruhe untersuchten Proben wurden auch die braunen (fluoreszierenden) Sporen mit erfaßt (s. Tab. 20–25). Dazu ist zu bemerken, daß sich letztere mit der angewandten Methode nicht immer einwandfrei von etwa in den Planktonnetzen aufgefangenen natürlichen, ungefärbten Lycopodiumsporen unterscheiden ließen. Eine dadurch verursachte, irgendwie ins Gewicht fallende Verfälschung der Ergebnisse ist aber unwahrscheinlich.

Wesentlich hingegen ist die Feststellung, daß sich die fluoreszierenden Sporen bei der Einspeisung und während der Triftung anders verhielten als die nach alter Art präparierten grünen Sporen. So vermerkt A. WILDBERGER im Einspeiseprotokoll: Die fluoreszierenden Sporen waren merklich leichter benetzbar (beim Aufschlammern) und zeigten eine größere Sinkgeschwindigkeit als die grünen.

Bei der Auswertung der Ergebnisse sollen im folgenden die grünen und die braunen Sporen gemeinsam behandelt werden. Bei einem Vergleich der prozentuellen Ausbringung der beiden Sporenarten ist aber wegen der unterschiedlichen Einspeismengen (5 : 3,4) die Anzahl der braunen Sporen jeweils mit 1,5 zu multiplizieren. Dieses Verfahren ist natürlich nur bei einer statistisch auswertbaren Mindestsporenzahl sinnvoll.

Der Wasserdome im Hölloch liegt in einer geradlinigen Entfernung von 1,4 km zum Schleichenden Brunnen (Höhendifferenz etwa 190 m), von dem man schon früher wußte, daß er den Hauptaustritt der Höllochwässer darstellt. Die tatsächlich durch-

flossene Strecke müßte aber nach A. BÖGLI (s. Abschn. 4.3.2.) mit mindestens 3 km angesetzt werden. Dafür sprechen auch die Ergebnisse von zwei Planktonnetzproben im Hölloch selbst, die abseits der direkten Verbindung zum Schleichenden Brunnen gewonnen wurden (s. Fig. 12). Diese Netze waren dort jeweils 15 Tage eingesetzt, die Proben stark verschmutzt; sie erbrachten:

Bei „Quelle“ (Einhängezeit vom 31. 7., 9.00 Uhr bis 18. 8. 1979, 13.00 Uhr) 1940 grüne Sporen und 10 braune Sporen und bei „Styx“ (Einhängezeit vom 31. 7., 8.00 Uhr, bis 15. 8. 1979, 12.00 Uhr) 720 grüne Sporen und 29 braune Sporen. Wegen zu großer Sedimentmengen wurden bei „Quelle“ nur etwa 5% und bei „Styx“ 10% des Probenmaterials untersucht.

Bemerkenswert ist die auffallende Diskrepanz der Anzahl der grünen und der braunen Sporen. Hier drängt sich die Frage auf, ob die braunen Sporen mit ihrem abweichenden Triftverhalten nicht schon vorher teilweise abgesaigert in das untere Stockwerk und damit in die phreatische Zone abgesunken sind.

An der Oberfläche, im Gebiet von Balm – Fugglen, treten die stärksten Sporendurchgänge von der Einspeisung Wasserdorn erwartungsgemäß im Bereich des Schleichenden Brunnens auf (s. Tab. 20). In den Beobachtungsstellen 1, 2 und 5 werden am vierten und fünften Tag nach der Einspeisung überall grüne und braune Sporen ausgeschwemmt. Diese ersten positiven Proben bringen gleichzeitig auch schon das Maximum des Sporendurchganges. Man könnte dieses Ereignis mit der ersten kleinen Hochwasserwelle nach der Einspeisung in Verbindung bringen. Sie brachte in der Nacht vom 3. auf 4. August 1979 für den Gesamtabfluß des Schleichenden Brunnens (Limnigraph Nr. 13) einen Anstieg von 0,9 auf 3,1 m³/s. Dieses Ereignis wäre dann so zu interpretieren, daß die bis dahin hauptsächlich in der phreatischen Zone langsam vorgedrungene Sporenfront durch den sich im Hölloch-System auffüllenden Karstwasserkörper schlagartig herausgedrückt wurde.

Da aber gleichzeitig grüne und/oder braune Sporen – wenn auch in wesentlich geringeren Mengen – an den Quellen 12, 17 und 15c auftreten, muß man annehmen, daß sich eine vom Hölloch ausgehende phreatische Verkarstungszone unter der Muota bis weit nach SW erstreckt.

Im Gegensatz zum Einspeisungsverhältnis (5 : 3,4) von grünen zu braunen Sporen und vor allem der Planktonnetzproben im Hölloch („Quelle“ und „Styx“) überwiegen bei den Freilandquellen die braunen Sporen. Als Vergleichsbasis können natürlich nur die in Karlsruhe untersuchten Proben, bei denen beide Sporenarten ausgezählt wurden, herangezogen werden. Statistisch ergibt sich für die Gesamtausbringung folgendes Bild (Tab. 24):

Tab. 24: Vergleich der im Bereich Balm – Fugglen ausgebrachten grünen und braunen Sporen.

Quellen-Nr.	grüne Sporen	braune Sporen
1	66	85
2	104	141
5	166	180
7a	10	2
11	–	5
12	5	8
15c	–	33
17	1	48
Summe	352	502

Noch krasser wird das Mißverhältnis, wenn man den Korrekturfaktor 1,5 zugunsten der braunen Sporen anwendet. Dann ergibt sich ein Verhältnis von 352 : 753

oder etwa 1 : 2! Dies kann nur durch das unterschiedliche Triftverhalten der verschieden präparierten Sporen erklärt werden, so daß die braunen Sporen, auf einem vielleicht kürzeren Weg durch die phreatische Zone, den grünen vorauseilten. Dadurch würde auch das Überwiegen oder auch alleinige Auftreten von braunen Sporen südlich der Muota (Quellen Nr. 11, 12, 15c und 17) verständlich.

Interessant ist auch der Vergleich mit dem Ergebnis der Eosinmarkierung (Eingabestelle I, Oberes Roggenloch, 1570 m ü M, Höhendifferenz zum Schleichenden Brunnen 930 m, kürzeste Entfernung 5,665 km, 10 kg Eosin FB; s. Abschn. 4.5.1.5.). Alle vom Eosin betroffenen Quellaustritte führten auch grüne und/oder braune Sporen. Bei Quelle Nr. 11 konnte der nur mit Hilfe der Aktivkohlemethode registrierte Eosindurchgang durch 5 braune Sporen bestätigt werden. Bei Nr. 15c und 17 wäre es denkbar, daß Spuren von Eosin durch relativ höhere Uraninkonzentrationen im Labornachweis unterdrückt wurden. Dünnschichtchromatographische Messungen zeigten bei 15c einen nicht einwandfrei identifizierbaren Wert, der aber auf einen geringen Eosingehalt des Quellwassers hinweisen könnte. Über die Abschnitte, in denen die einzelnen Sporenfarben von den Einspeisungen Seenalpseeli (E VI), Wasserberg (E IIIa) und Hölloch (E II) im Quellbereich Balm - Fugglen aufgetreten sind, gibt Fig. 56 einen graphischen Überblick.

Einen noch völlig ungeklärten Fall bildet das Auftreten von braunen Sporen in der Quelle Nr. 21 am linken Muotaufer oberhalb Zwingsbrügg (s. Tafel IV und Tab. 25).

Tab. 25: Durchgang brauner Sporen in Quelle Nr. 21.

Datum	Sporenzahl	
4. 8. 1979	14	
5. 8. 1979	11	
6. 8. 1979	40	
8. 8. 1979	-	} fast kein Sediment in den Proben
10. 8. 1979	1	
12. 8. 1979	1	
14. 8. 1979	-	
19. 8. 1979	3	

Die Proben davor und danach waren sporennegativ. Der Einsatz erfolgte gleichzeitig mit dem Auftreten grüner und brauner Sporen in der Quellgruppe am Schleichenden Brunnen (s. Tab. 20). Wir haben es hier mit einem eindeutigen Sporendurchgang zu tun, der noch dadurch Gewicht erhält, daß in keiner der anderen untersuchten Beprobungsstellen, z. B. im Hürital, braune oder ungefärbte (?) Lycopodiumsporen registriert wurden. Der Höhenunterschied von 115 m bei einer horizontalen Entfernung von ca. 1 km vom Wasserdom zur Quelle 21 würde für eine Triftung der Sporen in diese Richtung völlig ausreichen.

Sporennegativ verblieben die Beobachtungsstellen 6a, 15, 107a, 108, 137, 138 und 144. Die Quellen 14 und 20a führten nur rote und blaue Sporen.

Abschließend kann festgestellt werden, daß auch beim kombinierten Markierungsversuch im Muotatal der Einsatz gefärbter Lycopodiumsporen eine wertvolle Ergänzung darstellte. Mit Hilfe der Sporendurchgänge konnten mit anderen Tracern erzielte, fragliche Werte untermauert oder bestätigt werden. Wie schon bei früheren koordinierten Untersuchungen wurden auch im Muotatal mittels der Sporentriftmethode Ergebnisse erzielt, die in räumlicher Hinsicht über die Aussagen aller anderen Tracer hinausgehen.

4.5.4.2. Fluoreszierende Lycopodiumsporen (W. KASS)

Im Wasserdrom (E II) des Hölloches (s. Fig. 11 und 12) wurden in ein Höhlengerinne (2 l/s) am 31. 7. 1979 in der Zeit von 11.20 bis 11.30 Uhr 3,4 kg im Wasser aufgeschlämmte kanadische Bärlappsporen auf die übliche Weise eingebracht (s. dazu auch Abschn. 4.5.4.1.). Diese Einspeisung diente der Erprobung von nach neuer Art präparierter und nunmehr fluoreszierender Sporen. Es sollte dadurch das Auszählverfahren mit Hilfe eines Fluoreszenzmikroskops wesentlich vereinfacht und verkürzt werden.

Die Anfärbung dieser Bärlappsporen erfolgte im Geochemischen Laboratorium des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Freiburg i. Br. Als Farbstoff wurde das in der Histologie bewährte Acridinorange verwendet. Die Anfärbetechnik kann stichwortartig wie folgt skizziert werden:

Die Sporen (3,4 kg) werden mit einer 0,5%igen Detergentiallösung (Marlon 375) zu einem Teig geknetet (Verbrauch: rd. 2,5 l Detergentiallösung).

Über Nacht quellen lassen.

Mit 1 l AcridinorangeLösung durchkneten (10 g Acridinorange für Mikroskopie, Fa. Riedel de Haën AG Nr. 32 622, in 1 l Wasser gelöst).

Zwei Stunden einwirken lassen.

Masse mit Leitungswasser zu einer gießbaren Flüssigkeit aufschwemmen. In Portionen auf einer 18-cm-Nutsche absaugen und zweimal mit jeweils rd. 0,5 l Leitungswasser nachwaschen.

Stichfeste Sporenmassen in Aluminiumschüsseln 3 Tage bei 50° C trocknen.

(Anmerkung: Die Färbemethode wurde in der Zwischenzeit verbessert. Eine eingehende Beschreibung wird beim 4. SUWT in Bern gegeben.)

Eine laufende Beprobung erfolgte bei Quelle Nr. 1 (Tab. 26); zwei Planktonnetzproben stammen aus dem Hölloch-System.

Tab. 26: Ergebnisliste der Untersuchung der Quelle Nr. 1 auf fluoreszierende Sporen im August und September 1979.

Entnahmezeit	Sporen je Probe
31. 7., 9.15 Uhr, bis 4. 8., 16.05 Uhr (19 Proben)	0
5. 8., 8.20 Uhr	18
6. 8., 0.35 Uhr	55
16.20 Uhr	144
7. 8., 8.40 Uhr	24
8. 8., 8.50 Uhr	35
11. 8., 8.35 Uhr	26
12. 8., 8.35 Uhr	1095
13. 8., 9.00 Uhr	2020
14. 8., 14.50 Uhr	840
15. 8., 6.15 Uhr	294
17. 8., 11.40 Uhr	695
19. 8., 7.30 Uhr	4100
21. 8., 10.45 Uhr	880
24. 8., 9.35 Uhr	480
28. 8., 11.00 Uhr	1500
1. 9., 12.45 Uhr	590
5. 9., 7.20 Uhr	192
11. 9., 8.55 Uhr	112

Aus dem Hölloch selbst standen zwei Langzeitproben zur Verfügung, und zwar:
 „Quelle“, Einhängszeit 31. 7., 9.00 Uhr, bis 15. 8. 1979, 13.00 Uhr: 812 fluoreszierende Sporen;
 „Styx“, Einhängszeit 31. 7., 8.00 Uhr, bis 15. 8. 1979, 12.00 Uhr: 400 fluoreszierende Sporen.

Alle aus Quelle Nr. 1 stammenden Sporen waren gequollen, zerquetscht oder geplatzt bei 3- bis 4facher Größe des normalen Durchmessers. Daher war die Fluoreszenzintensität stark gemindert. Die Sporen der beiden Entnahmestellen im Hölloch waren unversehrt und stark fluoreszierend.

Für die Untersuchung stellte die Firma ZEISS freundlicherweise ein Fluoreszenzmikroskop Standard 14 leihweise zur Verfügung. Es kann festgestellt werden, daß die Untersuchung mit dem Fluoreszenzmikroskop einen bedeutenden Zeitgewinn gegenüber der mit normalen Pigmentfarben angefärbten Sporen darstellt.

Anmerkung der Schriftleitung

Die fluoreszierend angefärbten Sporen wurden in Karlsruhe auch bei den Untersuchungen mit dem normalen Lichtmikroskop als „braune“ Sporen miterfaßt (s. Abschn. 4.5.4.1.) und in den Ergebnislisten (Tab. 20–25) ausgewiesen. Unter diesen Bedingungen wurden auch in den Parallelproben von Quelle Nr. 1 keine geplatzen, gequollenen oder sonstwie beschädigten Sporen beobachtet. Die in Freiburg bzw. in Karlsruhe registrierten Sporenzahlen differieren wesentlich. Weitere Vergleichsuntersuchungen wären daher wünschenswert.

4.5.4.3. Phytoplankton

Von Herrn Dr. H. DOMBROWSKI, Freiburg i. Br., wurde für den kombinierten Markierungsversuch im Muotatal Phytoplankton zur Verfügung gestellt. Auch die Untersuchung der Wasserproben erfolgte im Freiburger Labor (Institut für Balneologie und Klimaphysiologie, Universität Freiburg).

Das Markierungsmittel wurde in einer 2-l-Suspension angeliefert und am 31. 7. 1979 um 11.05 Uhr in eine Schwinde am Wasserberg (E IIIa) eingegeben. Danach erfolgte die Einspeisung von 15 kg blau gefärbten Lycopodiumsporen (s. hierzu Abschn. 4.3.2.). Die Injizierung dieser beiden Triftstoffe in dieselbe Schwinde sollte einen nochmaligen Vergleich ihrer Eignung als Markierungsmittel ermöglichen (H. DOMBROWSKI, 1970, 1980).

Die Eingabestelle IIIa am Wasserberg wurde gewählt, da hier einerseits aufgrund des komplizierten tektonischen und stark differenzierten lithologischen Aufbaus des Gebietes erschwerte Bedingungen für die Triftung von Festkörpern zu erwarten waren, und andererseits die zu beobachtenden Quellen auf die Bereiche Balm – Fugglen und Zwingsbrugg beschränkt werden konnten.

Die Beprobung erfolgte mit Hilfe steriler Glasampullen an den Quellen 11, 12, 14, 15c, 17, 20a, 21 und 46 (s. Fig. 38). Alle kontrollierten Stellen erbrachten positive Ergebnisse. An den Quellen 12, 14, 15c, 17 und 20a wurden auch blaue Sporen registriert. Da sich in den im Labor gezüchteten Kulturen aber bereits bei Proben 21 Stunden nach der Einspeisung (Nr. 11) sowie auch in Quellen, von denen wir heute wissen, daß sie nicht mit der Eingabestelle IIIa am Wasserberg zusammenhängen (z. B. 46), Kolonien von *Serratia marcescens* entwickelten, müssen diese Ergebnisse der Triftung von Phytoplankton beim kombinierten Markierungsversuch im Muotatal mit Vorsicht beurteilt werden.

5. Zusammenfassende Wertung der Ergebnisse

(A. BÖGLI, H. HÖTZL, V. MAURIN, H. MOSER)

5.1. Neue karsthydrologische Erkenntnisse

Der Talkessel von Balm – Fugglen am Ausgang des Bisistales bildet das maßgebende Vorflutniveau für die unterirdische Entwässerung des Bereiches Bödmeren –

Twärenen rechts und des Wasserberges links der Muota. Die bedeutendste Quellgruppe liegt zwischen der Muota und den steil abfallenden Schraffenkalkwänden in Balm. Sie wird im Volksmund als „Schleichende Brönnen“ bezeichnet und stellt, wie auch durch frühere Markierungsversuche bewiesen, die Hauptentwässerung des Hölloch-Systems dar (s. Abschn. 2.2.1.).

Weniger bekannt waren die Abflußverhältnisse aus dem Bereich Wasserberg. Der Planung (V. MAURIN, 1967) des kombinierten Markierungsversuches ging daher eine hydrogeologische Aufnahme dieses Gebietes voraus (s. Abschn. 3.4.). Sie diente vor allem der Festlegung der zweckmäßigsten Einspeisorte. Dabei wurde angestrebt, den sogenannten negativen Rahmen, d. h. jene Zonen, die nicht oder nur mehr teilweise nach Balm - Fugglen entwässern, mit zu erfassen. Damit war es aber auch notwendig, die Beobachtungen in das mittlere Bisistal (Bereich Seeberg) und das obere Hürital auszudehnen. Von der Schwinde am Seenalpseeli (Einspeisestelle VI) war ein Abfluß nach W nicht ganz auszuschließen. Beobachtbare Großquellen im Riemenstaldner Tal oder am stellabbrechenden Ostufer des Urner Sees konnten aber nicht gefunden werden. Die große Quellgruppe um Brunnen ist wohl Grundwasserauftrieben aus dem begleitenden Talgrundwasser der Muota und evtl. Abflüssen aus dem Fronalpstock zuzuschreiben. Für die Beobachtung im W und NW blieb daher nur mehr eine Quellgruppe im mittleren Muotatal (Quellen Nr. 142 und 143). Im Rahmen der Vorarbeiten wurden auch über ein Jahr hinweg Messungen der ^2H -, ^{18}O - und ^3H -Gehalte in den Wässern der vorgesehenen Beobachtungsstellen durchgeführt, um Informationen über die Höhenlage der Einzugsgebiete, über Verweilzeiten der Wässer und über Mischungsanteile von Grundwässern verschiedener Herkunft zu erhalten (s. Abschn. 3.3.).

Die Einspeisung aller Markierstoffe erfolgte am Vormittag des 31. 7. 1979. Die relative Trockenheit des Monats Juli, die die Einspeisbedingungen wesentlich beeinflusste, hielt auch noch Anfang August an. Erst ein heftiges Gewitter am Nachmittag des 3. 8. 1979 wirkte sich auf den ober- und unterirdischen Abfluß merklich aus (s. Tafel II).

Die aus den einzelnen Einspeisungen (s. Abschn. 4.3. und Tafel IV) sich ergebenden hydrogeologischen Erkenntnisse sollen im folgenden kurz gefaßt dargestellt werden. Hierbei werden auch die Ergebnisse der Isotopengehaltsuntersuchungen (Abschn. 3.3.) mit berücksichtigt.

5.1.1. Aussagen aus den Ergebnissen des kombinierten Markierungsversuches Eingabestelle Oberes Roggenloch (E I)

In E I wurde nur Eosin (10 kg) eingespeist. Hauptaustrittsstelle ist die Quellgruppe um den Schleichenden Brunnen (Nr. 1) mit den Nummern 2, 2a, 5 und 7a. Außerdem hat auch die Muota bei 6a Eosin geführt, desgleichen die Quellen 11 und 12 in Fugglen (s. Fig. 44). Über die ebenfalls eosinpositive Beobachtungsstelle an der Linnigranstation Nr. 13 wird der Gesamtabfluß der „Schleichenden Brönnen“ erfaßt.

Sehr akzentuiert war die Eosinausbringung am Schleichenden Brunnen selbst.

Tab. 27: Eosinkonzentrationen in mg/m^3 in den Quellen 1 und 2 zwischen dem 4. und dem 6. 8. 1979.

Datum:	4. 8. 1979				5. 8. 1979				6. 8. 1979				
Quelle 1; Zeit:	0.05	4.15	8.15	11.55	16.05	0.05	8.20	0.35	8.10				
Eosin in mg/m^3 :	0	40,30	7,85	7,36	11,80	10,60	8,84	6,35	7,33				
Quelle 2; Zeit:	0.00	4.10	8.55	11.55	16.40	0.40	8.10	0.50	8.00				
Eosin in mg/m^3 :	0	38,60	5,97	4,93	11,80	7,82	4,77	2,61	2,85				

Tab. 27 zeigt den parallelen Verlauf der Eosinkonzentrationen der beiden Probenstellen, wobei Nr. 2 geringere Konzentrationen aufweist. Die Ausnahme vom 4. 8. nach 16.00 Uhr läßt sich damit erklären, daß um 16.05 der Peak noch nicht erreicht war und um etwa 16.40 das Maximum eintrat. Daraus läßt sich schließen, daß der

Hauptaustritt am Fuße der Felswand liegt, verdeckt durch den blockigen Schuttkegel. Die niedrigeren Werte bei Nr. 2 gehen auf eine Zumischung von Talgrundwasser (Porengrundwasser) zurück, was auch durch den hohen Gehalt an Markierungs-NaCl (s. Abschn. 4.5.2.2.) und die Ganglinien der Isotopengehalte (s. Abschn. 3.3.4.2.) bestätigt wird.

Quelle 7a liegt oberhalb von Nr. 2 an der Grenze der Karstwasseraustritte und in deren Rückstaubereich. Sie zeigt einen maximalen Eosin Gehalt von nur 1,37 mg/m³. Die Nr. 5 ist der Ausfluß eines Drainagesystems, das bis zu der vielfach trockenengefallenen Probenstelle 22 zurückreicht und südlich des Schleichenden Brunnens liegt. Die Konzentrationskurve für Eosin zeigt hier einen ähnlichen Verlauf wie jene von Nr. 2, doch sind die Werte kleiner. Auch das Talgrundwasser wird hier zu einem wesentlichen Teil durch Karstwasser aus dem Felsuntergrund des Schotterkörpers gespeist. Die Probenstelle 5 führt immer Wasser, auch während der viele Monate andauernden winterlichen Niedrigwasserführung der Muota, wobei die Ganglinien der Isotopengehalte gegenüber Nr. 1 gedämpft sind (s. Abschn. 3.3.4.2.). Dies sind weitere Indizien für die Richtigkeit der obigen Folgerung. Außerdem fließt aus den Schottern des Talbodens in zahlreichen Aufstößen auch im Winter Wasser in der Größenordnung von 50 bis 100 l/s in das Muotabett.

Unter Normalbedingungen senkt sich die Wasseroberfläche von Nr. 1 gegen W zuerst bis Nr. 4 mit fast anderthalb Prozent und verflacht sich dann stark auf weniger als ein halbes Prozent. Quer zur Talachse, in Richtung Nr. 5, ist das Gefälle gering. Es gibt zeitweise sogar talaufwärts ein kleines Gefälle bis gegen Nr. 7a; das Ausmaß kann jedoch nicht genau bestimmt werden, da die Lage der Wasseroberfläche nicht festgelegt werden konnte. Die Wasseroberfläche hat dann die Form eines halben, schiefen Kegelmantels. Ab Spätherbst fließt bei Nr. 1 das Wasser nicht mehr oberflächlich ab, doch ist das hydrostatische Niveau im Quelltrichter gut meßbar. Das Höllochwasser tritt dann zur Gänze in den Schotterkörper über. Das Gefälle nach allen Seiten ist zu diesem Zeitpunkt wesentlich kleiner geworden, da die Wasseroberflächen sich bei Nr. 4 und 5 nur unwesentlich gesenkt haben.

Eine ähnliche Erscheinung tritt in der linksseitigen Schotterfläche in Fugglen auf, wo die Quellgruppe 16 (Nr. 10, 11, 12 und 17) eine kuppelförmige Aufwölbung der Wasseroberfläche anzeigt, mit Zentrum in Nr. 17, welche ebenfalls die kennzeichnenden Merkmale eines Karstwasseraufstoßes aufweist sowie klare Beziehungen zu den Eingabestellen IIIa, IIIb und VI mit scharfen Peaks besitzt. Die Nr. 11 liegt hier offenbar, ähnlich wie Nr. 7a, auf der oberen Seite bzw. der Rückstauseite des Karstwasseraufbruches.

Im Muotawasser (Nr. 6a) und in den Quellen Nr. 11 und 12 südlich der Muota war Eosin nur mit Hilfe von Aktivkohlen nachweisbar; Direktproben gaben keinen positiven Befund. Die Eosinspuren, im besonderen in Nr. 11 und 12, lassen vermuten, daß von N her kleine Karstgerinne unter den Talschottern durch den Schrottenkalk gegen S vorstoßen. Im übrigen sei auf die Schlußfolgerungen in Abschnitt 4.5.2.2. (Markierung mit Kochsalz) verwiesen.

Der Linnigraph 13 erfaßt alle Abflüsse aus dem Gebiet rechts der Muota, somit die Nr. 1, 2, 2a, 5 und 7a. Über diese Meßstation wurde praktisch auch der gesamte wiederausgetretene Farbstoff aus E I registriert. Rechnerisch ergibt sich dabei für die Zeit bis zum 17. 10. 1979 eine Quote von 64,9% der eingespeisten 10 kg Eosin. Der Rest dürfte einerseits mit dem Talgrundwasserstrom unkontrollierbar über die hydrogeologische Barriere (s. Abschn. 4.4.2.) hinweg talwärts abgeflossen sein, andererseits aber sich infolge von Adsorption und Abflußverzögerung (vor allem im phreatischen Bereich) zum Teil noch im Karstwassersystem des Hölloches befinden. Nach den Isotopengehaltsmessungen liegt der Anteil an direkt abfließendem Karstwasser zwischen 40% und 70% (s. Abschn. 3.3.4.4.). Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang der Nachweis von Eosin im höher liegenden Eingangsabschnitt des Höl-

loches bei der Lokalität „Kanzel“ (4. 8. 1979, 18.30 Uhr, 0,95 mg/m³; 8. 8. 1979, 13.30 Uhr, 1,58 mg/m³) sowie knapp innerhalb des Einganges (8. 8. 1979, 18.15 Uhr, 1,61 mg/m³; s. Fig. 12 und 57) nach einem Ansteigen des Karstwasserspiegels in diesem Höhlensystem.

Die Abstandsgeschwindigkeit zwischen E I und der Abflußmeßstelle 13 beträgt 65 m/h (s. Tab. 15). Dieser Wert gilt sowohl für den Erstdnachweis als auch für die gleichzeitig auftretende Maximalkonzentration. Dank des hohen Erforschungsstandes des Hölloches läßt sich aber auch die kürzestmögliche tatsächliche Fließstrecke mit etwa 7 km einschätzen. Die sich daraus ergebende Fließgeschwindigkeit beträgt 79 m/h.

Wesentlich ist noch die Feststellung, daß sowohl das Eosin als auch die im Wasserdom des Hölloches eingespeisten Sporen erst am 4. 8. 1979 – also erst nach dem Gewitterregen am Nachmittag des 3. August – in den Quellen von Balm – Fugglen aufgetreten sind.

Eingabestelle Hölloch/Wasserdom (E II)

Im Wasserdom des Hölloches wurden 5 kg grün gefärbte sowie 3,4 kg fluoreszierende braune Lycopodiumsporen eingebracht. Diese Doppelspeisung sollte einen methodischen Vergleich verschieden präparierter Sporen ermöglichen. Der Wiederaustritt wurde in dem etwa 1,4 km entfernten Bereich der „Schleichenden Brünnen“ erwartet (s. Fig. 12). Tatsächlich konnte an allen hier mit Planktonnetzen besetzten Stellen (Quellen Nr. 1, 2, 5 und 7a sowie dem gemeinsamen Abfluß 13) ein Durchgang grüner und brauner Sporen registriert werden. Alle diese Beobachtungsstellen waren auch eosinpositiv. Das erste Auftreten und gleichzeitig auch das Maximum der Ausbringung von Sporen erfolgte in den Proben am 4. und 5. 8. 1979 nach stärkeren Niederschlägen am Nachmittag des 3. August (s. Tafel II).

Wie beim Eosin überraschte auch das Auftreten von Sporen aus einer Einspeisstelle nördlich der Muota im Bereich Fugglen. Betroffen waren die Quellen Nr. 11, 12, 17 und 15c. Ohne Nachweis blieben 14 und 20a. Durch dieses Ergebnis wird die bereits durch die Eosinmarkierung erkannte Tatsache, daß Karstwasser aus dem Hölloch-System unter der Talfüllung auf die linke Muotaseite durchdrückt, bestätigt und erweitert. So konnte z.B. durch 5 braune Sporen in Nr. 11 der nur mittels Aktivkohle erfaßte Eosindurchgang in dieser Quelle untermauert werden. Grüne und braune Sporen lieferte die Quelle Nr. 12 zusammen mit Eosin, Nr. 17 (43 braune und 2 grüne) und Nr. 15c (33 braune) ohne gleichzeitigen Eosinnachweis.

Auch im Hölloch selbst waren Planktonnetze an den Punkten „Quelle“ und „Styx“ eingesetzt (s. Fig. 12 und 57). Sie erbrachten zusammen 2660 grüne und 39 braune Sporen. Ganz im Gegensatz dazu stehen die Ausbringungsquoten der grünen und braunen Sporen im Bereich Balm – Fugglen; wir haben hier ein Verhältnis 2:1 zugunsten der braunen!

Die unterschiedliche Präparation der beiden Sporenarten muß zu einem differenzierten Triftverhalten geführt haben, so daß es bald nach der gemeinsamen Einspeisung, wahrscheinlich durch Saigerung, zu einer weitgehenden Trennung der grünen und der braunen Sporen kam, die dann auf getrennten Wegen zu den Quellen transportiert wurden (s. Abschn. 4.5.4.1.). Interessant ist in diesem Zusammenhang auch, daß im Bereich Fugglen, links der Muota, die in der Mehrzahl braunen Sporen durchwegs bereits in den Proben vom 3. 8., 10 Uhr, bis 4. 8., 1 Uhr, registriert wurden, während die ersten positiven Proben um den Schleichenden Brunnen (Nr. 1, 2 und 5) erst am Nachmittag des 4. 8. oder am Morgen des 5. 8. 1979 gewonnen werden konnten (s. Tab. 20 – 22). Hier waren die Ausbringungen aber wesentlich größer, und es dominierten dabei die grünen Sporen. Diese Tatsachen sprechen ebenfalls für z. T. getrennte Karstwasserwege vom Wasserdom (E II) zu den Quellen in Balm – Fugglen. Auch hier haben wir wieder eine Bestätigung der Erkenntnisse aus der Eosinmarkierung.

Das Voraussitzen der vorwiegend braunen Sporen im südlich der Muota gelegenen Bereich Fugglen läßt sich am ehesten so erklären, daß die Separierung eines Großteils der braunen Sporen sehr bald nach der Einspeisung im Wasserdom erfolgte (s. Abschn. 4.5.4.1.). Diese sind dann in der phreatischen Zone auf kürzerem Wege unter das Talbecken von Balm – Fugglen gewandert. Bei der Druckspiegelerhöhung infolge der ergiebigen Niederschläge vom 3. 4. 1979 im gesamten Karstwassersystem wurden sie dann schlagartig über zahlreiche Karstwasseraufstöße im Talboden herausgedrückt. Die Masse der grünen Sporen hingegen triftete im Höhlensystem zunächst nach N (Richtung „Quelle“ und „Styx“) und erreichte hier wahrscheinlich den Hauptwasserweg des Eosins.

Überraschend war auch das Auftreten brauner Sporen in Quelle 21 am linken Ufer der Muota oberhalb der Zwingsbrücke. In diesem Bereich wurde kein anderer Tracer des kombinierten Markierungsversuches nachgewiesen. Die Quelle 21 lieferte in drei Proben 65 braune Sporen und 5 Nachzügler in drei weiteren Proben, doch keine einzige grüne (s. Tab. 25). Als annehmbare Erklärung könnte, wegen des Fehlens von Eosin, eine direkte Verbindung vom Wasserdom/Chorgang zu dieser Quelle in Frage kommen. Der Abstand beträgt 1,8 km, die Höhendifferenz etwa 115 m und die Fließzeit ca. 70 Stunden; das bedeutet eine Abstandsgeschwindigkeit von 26 m/h.

Dank des hohen Erforschungsstandes und der Zugänglichkeit des Hölloch-Systems konnten durch die Sporeneinspeisung im Wasserdom wesentliche Erkenntnisse über den Abflußmechanismus in einem geschlossenen Karstwassersystem gewonnen werden. Obwohl die Sporen schon am Westrande des großen Karstwasserkörpers des Böldmeren eingebracht wurden, kam es zu einer radialen Verteilung der Triftkörper (nach N: „Quelle“ und „Styx“; S: Nr. 21; SW: Balm – Fugglen). Durch das durch Zufall entdeckte unterschiedliche Schweb- und Triftverhalten der grünen und braunen (fluoreszierenden) Sporen wurden weiters differenzierte Wasserwege im vadosen und im phreatischen Bereich erkannt.

Eingabestellen am Wasserberg (E IIIa und E IIIb)

Am Wasserberg sollten ursprünglich in einen im Fels liegenden Ponor (E III) Lycopodiumsporen, Phytoplankton und Rhodamin B gemeinsam eingespeist werden. Der Versuch war in erster Linie als Vergleichstest für diese drei Tracer gedacht. Die Lage der Einspeisestelle im Zentrum des Wasserberges und der lithologisch und tektonisch sehr differenzierte Aufbau des Untergrundes schienen uns für dieses Experiment besonders geeignet. Anfang Juli 1979 schluckte die Schwinde noch einen Bach von etwa 30 l/s ohne Rückstau, aber schon am 20. 7. war das ganze Gerinne ausgetrocknet. Unter diesen Umständen wurden – um das Risiko für den Gesamtversuch zu verringern – die Eingaben der Markierungsstoffe getrennt. 10 kg Rhodamin B kamen 300 m weiter südlich, am Fuße des Wasserbergfirstes, in einer kleinen Schmelzwasserschwinde zum Einsatz (E IIIb). 15 kg blau gefärbte Sporen sowie eine 2-l-Suspension Phytoplankton konnten mit Hilfe von 3,5 m³ mittels Hubschrauber beigebrachten Wassers in die trocken liegende Schwinde III (jetzt E IIIa) eingespeist werden.

Das Phytoplankton brachte keine auswertbaren Ergebnisse (s. Abschn. 4.5.4.3.), so daß es im folgenden außer Betracht bleiben kann.

Die blauen Sporen und das Rhodamin wurden anscheinend über dasselbe NNW-verlaufende Störungssystem (s. Tafel IV) in den Bereich Balm – Fugglen transportiert und können daher auch gemeinsam besprochen werden. Blaue Sporen aus E IIIa wurden an folgenden Beobachtungsstellen registriert: Nr. 1, 2, 5, 7a, 12, 13, 14, 15c, 16, 17 und 20a; ein Rhodaminnachweis (E IIIb) erfolgte bei Nr. 1, 2, (2a), 5, 6a, 7a, 12, 13, 14, (15), (15b), (15c), 16, 17 und 20a.¹⁾

¹⁾ Bei den eingeklammerten Nummern konnte Rhodamin nur mittels Aktivkohle erfaßt werden, die Direktproben blieben negativ.

Beide Markierungsstoffe wurden also praktisch über den gesamten Bereich Balm - Fugglen verteilt (s. Fig. 47 und 56 bzw. Tab. 16 und 20 - 23). Unterschiede ergaben sich für das Erstauftreten und den Durchgangsverlauf. Während Rhodamin in den Quellen 14 und 20a sowie in der Muota (6a) und der Abflußmeßstelle 13 (!) bereits zweieinhalb Tage nach der Einspeisung erstmals durch Direktmessung nachgewiesen werden konnte, trat es in den Quellen rechts der Muota (1, 2 und 5) sowie in Fugglen-Ost (Abflußmeßstelle 16 mit den Quellen 12 und 17) erst 8 bzw. 16 Stunden später auf. Eine Sonderstellung nimmt die Quellgruppe 15 in Fugglen-West ein, auf die später noch eingegangen werden muß.

Was den Durchgangsverlauf betrifft, so ist festzustellen, daß das Rhodamin praktisch an allen Beobachtungsstellen bereits vor dem Gewitterregen am Nachmittag des 3. August nachgewiesen wurde. Bei den Quellen 14, 12 und 1 (!) sowie der Muota (6a) fällt auch noch der erste Peak in diesen Zeitraum. Die Konzentrationskurve sank bei 14, 12 und 6a mit dem niederschlagsbedingten Schüttungsanstieg am 3./4. 8. ab. Gleichzeitig aber kommt es zur Entwicklung der ersten Durchgangsspitzen bei den Nr. 2, 17 und 20a sowie bei 13. Auch ein zweiter ausgeprägter Peak bei Nr. 14 und 12 entspricht wieder (leicht zeitverschoben) spiegelbildlich einem Konzentrationstiefstand bei Quelle 17 (s. Fig. 48 und 49).

Bemerkenswert ist der frühe Nachweis von Rhodamin in den Abflußmeßstellen 6a (Muota) und 13 (gemeinsamer Abfluß aus dem Bereich der „Schlichenden Brünnen“) am 3. 8. 1979 kurz nach 0 Uhr! Es müssen hier Karstwasserauftriebe in den Flußbetten bestehen, die sich einer direkten Beprobung entziehen. Mit Uranin waren solche am Fuße des linksseitigen Hochwasserdammes der Muota sogar visuell beobachtbar.

Aus dem hier aufgezeigten Verlauf der Rhodamindurchgänge muß geschlossen werden, daß das früher erwähnte NNW-gerichtete Hauptstörungssystem des Wasserberges bis in die westlichen Abschnitte des Bereiches Balm - Fugglen im Untergrund durchstreicht. Dieses vom Gletscher übertiefte Becken¹⁾ enthält wahrscheinlich auch Grundmoränen. Im Abschnitt Fugglen-West sowie auf dem trennenden Rücken zum untersten Hürital sind solche auch oberflächlich verbreitet (s. Tafeln I und IV). Auf der geologisch und glazialmorphologisch bedingten Felsschwelle, die vom Guggenhürli (Quellgruppe 14) sicher auch im Untergrund nach N durchzieht, hat der Gletscher dagegen blanken Fels zurückgelassen. Hier können die Karstwässer ungehindert in die jüngere, grobklastische Talfüllung übertreten oder, besonders an den Felswänden um Nr. 14 und auch entlang der Schrättenskalkwand um Nr. 1, bis an die Oberfläche aufsteigen. Die Quellgruppe Fugglen-Ost (Nr. 11, 12 und 17) wie auch 20a sowie 15c stellen Durchbrüche durch die hier mächtigeren jungquartären Sedimente dar. Der eigentliche Felshang des Wasserberg-Nordfußes ist durch Bergsturmassen und Hangschutt verkleidet.

Die Quellgruppe 15 (besonders 15a und 15b) hat ihr Einzugsgebiet vorwiegend in den oben erwähnten glazigenen Ablagerungen. Dafür sprechen auch ihre chemischen Kennwerte und die Ergebnisse der Isotopengehaltmessungen sowie das Schüttungsverhalten und der Temperaturgang (s. dazu die Abschn. 3.2., 3.3.4.2. und 3.4.3.). Karstwasser ist an der Quellschüttung nur untergeordnet beteiligt. Dies beweist u. a. der erst am 13. 8. 1979 mit Hilfe von Aktivkohle geglückte Rhodaminnachweis bei Nr. 15b.

Die errechneten Abstandsgeschwindigkeiten für den Rhodamindurchgang (s. Tab. 16) liegen bei der Quellgruppe 14 und den Abflußmeßstellen 6a (Muota) und 13

¹⁾ Karsthydrologische Überlegungen lassen annehmen, daß die Übertiefung einige Zehnermeter nicht übersteigt. Für die nächste Zeit geplante hammerschlagselastische Untersuchungen sollen diese noch offene Frage abklären.

(„Schlichende Brinnen“) für den Erstdnachweis zwischen 52 und 53 m/h, für den ersten Peak zwischen 40 und 42 m/h. Der Hauptaustritt des Schleichenden Brunnens (Nr. 1) erbrachte 47 bzw. 42 m/h. Bei den Quellen 2, 5, 12 und 16 ergaben sich Werte zwischen 46 und 42 m/h bzw. 40 und 33 m/h. Die nachgewiesene Gesamtausbringung der eingespeisten 10 kg Rhodamin B betrug weniger als 1%, wobei die höchsten Konzentrationen bei Nr. 12 bzw. 14 zu verzeichnen waren. Der Verbleib der restlichen Farbstoffmenge wird später diskutiert.

Der früheste Nachweis blau gefärbter Lycopodiumsporen von E IIIa gelang in der Quelle 12 mit 5 und in 20a mit 18 Sporen in der Nacht zum 4. 8. 1979 (Einhängezeit der Planktonnetze etwa vom 3. 8., 9 Uhr, bis 4. 8., 1 Uhr; s. Tab. 21 und 22). Die erste positive Probe bei Nr. 14 stellte sich erst am Nachmittag des 4. August mit 3 blauen Sporen ein. Dies ist insofern bemerkenswert, als Nr. 14 die Hauptaustrittsstelle für das Rhodamin darstellt. Bei den drei genannten Quellen kam es dann zu einem Nachlassen und um den 6./7. 8. zu einem völligen Aussetzen des Sporendurchganges. Dieses Bild änderte sich schlagartig nach den starken Niederschlägen am 7. und 8. August. Nun beginnt eine kontinuierliche Ausbringung blauer Sporen links der Muota. Während die Sporenzahlen in den einzelnen Tagesproben in Fugglen rasch ansteigen (9. 8.: 100 blaue Sporen in Nr. 16, 43 in Nr. 17; 10. 8.: 327 in Nr. 12, 126 in Nr. 14, 24 in Nr. 15c, 23 in Nr. 20a und 569 Sporen am 13. 8.), setzt der Durchgang im Bereich der „Schlichenden Brinnen“ nur zögernd ein und bleibt insgesamt unter 5% der Gesamtausbeute von etwa 6.700 blauen Sporen (8. 8.: 1 blaue Spore in Nr. 5; 10. 8.: 5 in Nr. 2; 13. 8.: 1 in Nr. 1).

Bei der Beurteilung des Durchganges und der hohen Gesamtausbringung blauer Sporen (im Vergleich zu allen anderen Sporenfarben) sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die beschickte Schwinde IIIa liegt vom Quellgebiet in Balm - Fugglen bei einer Höhendifferenz von etwa 1.070 m im Durchschnitt nur 2,5 km entfernt.
- Die Einspeismenge von 15 kg übertrifft die anderen Sporeneingaben bei weitem (E II insgesamt 8,4 kg grüne und braune, E VI 10 kg rote Sporen).
- Die eingangs geschilderten, ungünstigen Einspeisbedingungen bei IIIa fielen anscheinend doch nicht so schwer ins Gewicht, wie ursprünglich befürchtet. Die damals trocken liegende, aber im Schrottenkalk gut ausgefahrene Übergangsstrecke von der Bachschwinde bis zum geschlossenen Karstwasserkörper konnte mit den eingeflogenen 3,5 m³ Wasser ausreichend überbrückt werden. Die Schwinde selbst blieb aber auch noch während des ergiebigen Gewitterregens am Nachmittag des 3. 8. 1979 trocken.
- Ein kleiner Teil der Sporen muß also bereits vor diesem Gewitter bis in die phreatische Karstzone unter dem Bereich Fugglen gelangt sein und wurde dann in der Nacht zum 4. August in den Quellen 12 und 20a in Form eines ersten Peaks herausgedrückt; Nr. 14 folgte mit halbtägiger Verspätung.
- Erst die stärkeren Niederschläge nach dem 7. August mobilisierten die Hauptmasse der blauen Sporen, die nunmehr auch - vielleicht über Nebenkanäle im Nordabschnitt des Wasserberges - die Quellgruppe der „Schlichenden Brinnen“ erreichen.
- Nördlich der Muota ist der Sporendurchgang zum Ende der Beobachtungszeit (Okt./Nov. 1979) praktisch abgeklungen. Südlich des Flusses führen aber auch die letzten Proben bei Nr. 12, 14, 16 und 20a noch blaue Sporen. Größere Schwankungen in der dazwischenliegenden Zeit waren auf Niederschlagsereignisse beziehbar (s. Tafel II und Tab. 20-22).
- Die Abstandsgeschwindigkeiten (bei den Planktonnetzammelproben lassen sie sich nur größenordnungsmäßig errechnen) liegen für die Erstausbildung im Bereich Fugglen bei 23 m/h, für die Gruppe der „Schlichenden Brinnen“ bei 13 m/h.

Ein Vergleich der Markierung mit blauen Sporen (E IIIa) und mit Rhodamin (E IIIb) zeigt Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede:

- Mit Ausnahme der Muota (6a) brachten alle rhodaminpositiven Probenstellen, an denen Planktonnetze eingesetzt waren, auch blaue Sporen. Quelle 11 blieb von beiden Markierungsstoffen frei.
- Während der Farbstoff, mit Ausnahme von Nr. 15b, an allen zu diesem Zeitpunkt beobachteten Stellen bereits am 3. 8. 1979 registriert werden konnte, traten die „Vorläufer“ der Sporen in Fugglen erst einen bis zwei Tage später auf, in Balm sowie in den Quellen 15c und 17 erst am 8. August. Zu diesem Zeitpunkt setzte in Fugglen der Hauptdurchgang ein.
- Einer verhältnismäßig hohen Ausbringungsquote bei den blauen Sporen (6.700) stehen die verschwindend kleine Menge von weniger als 1% des eingespeisten Farbstoffes und die relativ geringen Anteile an direkt abfließendem Wasser, die sich aus den Isotopengehaltsmessungen an den Quellen 10, 11 und 12 ergeben (s. Abschn. 3.3.4.4.), gegenüber. Geringe Rhodaminkonzentrationen konnten aber mit Hilfe von Aktivkohle noch 11 Monate nach Versuchsbeginn (z. B. bei Nr. 12 am 14. 6. 1980) während der Hochgebirgsschneesmelze erfaßt werden.
- Man muß daher annehmen, daß ein Großteil des eingebrachten Rhodamin B von den z. T. sehr tonreichen Gesteinen des Untergrundes (Tonsteine, Tonschiefer und Mergel) adsorbiert wurde und erst langsam wieder abgegeben wird. Dies würde auch mit Erfahrungen bei Vergleichsuntersuchungen im Bründl-System bei Graz übereinstimmen (K. BUCHTELA et al., 1964).
- Ein nicht erfaßbarer Anteil des Farbstoffes könnte auch noch in Richtung unterstes Hürital (wo die Ausbringung von Uranin nur visuell beobachtet wurde) oder durch den verkarsteten Felsriegel am Westende des Beckens von Balm – Fugglen in das Talgrundwasser des mittleren Muotatales abgefließen sein.
- Für das differenzierte Verhalten der beiden Tracer sind aber sicherlich nicht nur ihre grundlegend verschiedenen spezifischen Eigenschaften (Trittkörper und Fluoreszenzfarbstoff) verantwortlich, sondern auch die unterschiedliche geologische Position der Einspeisstellen. Während die Sporen in IIIa noch im Hangenden der stauenden Drusbergschichten (s. Fig. 2 und 6) an der Basis des Unteren Schrattekalkes zur Eingabe kamen, liegt IIIb bereits in den Hauterivien-Kieselkalken im Liegenden der Drusbergschichten. Es könnte also sein, daß ein Großteil des Rhodamins über die Klüfte der nur minder verkarstungsfähigen Kieselkalke in den tiefen Karst der liegenden Bächstockdecke abgesunken ist und nur ein geringerer Anteil über die ausgeprägte NNW-Störungszone direkt in das System der Silberdecken übertrat. Dies würde, im Zusammenwirken mit Adsorptionsprozessen sowohl die geringere Ausbringung einerseits als auch die relativ hohen Abstandsgeschwindigkeiten für das nachgewiesene Rhodamin andererseits erklären. Das Abströmen der in IIIb versinkenden Wässer würde demnach über verschiedene Bahnen erfolgen.

Eingabestelle Riedboden/Galtenäbnet (E IV)

Im Riedboden auf der Galtenäbnet südlich des Wasserbergfirstes wurden unter vergleichsweise günstigen Bedingungen 99 kg 50-prozentige Tinopallösung sowie 100 kg Lithiumchlorid eingespeist. Die Schwinde befindet sich in der Grenzzone zwischen den Zementsteinschichten und den liegenden Quintnerkalken, die hier der „Basalen Axenteildecke“ angehören (s. Fig. 2 und 6). Diese gut verkarstungsfähige, etwa 300 m mächtige Karbonatgesteinsserie taucht mittelsteil nach NW unter und quert im Bereich Hinter Seeberg das Bisistal. Hier muß an der hydrogeologischen Barriere der Zementsteinschichten das in den Quintnerkalken von beiden Talseiten zufließende Karstwasser in den Vorfluter übertreten. Ausdruck dafür ist die Quell-

gruppe in Hinter Seeberg (Nr. 24, 25 und 51–68; s. Abschn. 3.4.3.). Die Quellen 24, 25 und 65 links bzw. 59 rechts der Muota standen während des Markierungsversuches unter Beobachtung. Außerdem wurden aus dem Flußwasser bei Nr. 62 oberhalb und bei Nr. 23 unterhalb dieser großen Quellgruppe Vergleichsproben entnommen (s. Fig. 37). Weiters standen alle bedeutenden Quellen im Hürital (s. Tafel IV), im Bereich Balm – Fugglen (s. Fig. 35) sowie im Bisital oberhalb der Zwingsbrücke (s. Fig. 36) unter Kontrolle.

In allen in Hinter Seeberg beobachteten Quellen konnte sowohl Lithium als auch Tinopal nachgewiesen werden, dasselbe gilt für die Muota bei der Linnigraphenstation 23 im Unterwasser. Die Kontrollmessungen des Flußwassers bei Nr. 62 blieben negativ, ein Beweis dafür, daß eine Kontamination des Untersuchungsgebietes vom Oberlauf der Muota her mit irgendwelchen beim Versuch verwendeten Tracern zu diesem Zeitpunkt nicht stattgefunden hat.

Bei der quantitativen Bestimmung der Konzentrationen der Tracer machte das in E IV zum Einsatz gekommene Tinopal ABP Schwierigkeiten. Die in Tab. 18 wiedergegebenen Werte beruhen auf Messungen von Kohleeluaten. Der Tinopaldurchgang in Hinter Seeberg war aber sehr akzentuiert und verlief parallel mit den Lithiumkurven. Die in Balm – Fugglen bestimmten Tinopalwerte sind aber wegen des hohen Untergrunds nicht eindeutig zuzuordnen und müssen deshalb unberücksichtigt bleiben. Im folgenden soll daher nur auf die Ergebnisse der Lithiumchloridmarkierung Bezug genommen werden.

Lithium wurde in den Quellen 24 und 25 erstmals in den Proben vom 2. 8. 1979, 0 Uhr, nachgewiesen, also bereits 37 Stunden nach der Einspeisung. Nach weiteren 12 Stunden folgte der Peak in diesen Meßstellen mit 33 bzw. 30 mg/m³. Bei einer Höhendifferenz von 1.155 m und einem Horizontalabstand von 4.125 m ergibt sich ein wahrer Abstand von 4.284 m. Die Abstandsgeschwindigkeiten betragen daher für den ersten Nachweis 116 m/h, für den Peak 87 m/h.

Aus den Isotopengehaltsmessungen ergeben sich hier (zusammen mit Nr. 1 und 4) die geringsten im Untersuchungsgebiet beobachteten mittleren Verweilzeiten (s. Abschn. 3.3.4.3.).

Am rechten Ufer der Muota, 50 m weiter östlich, liegt die Quelle 59, wo das Lithium eher etwas früher eintraf als bei Nr. 24 und 25. Es ist daher anzunehmen, daß die Verkarstung der Quintnerkalke bis unter die Talsohle reicht und so Karstwasser von Galtenäbnet auch an der rechten Talflanke in die Alluvionen aufsteigen kann.

Im Becken von Balm – Fugglen, 4,6 km talabwärts, trat in den Quellen 12, 14 und 17 ebenfalls Lithium aus, mit Maximalkonzentrationen von 2,2 bis 3,5 mg/m³. Beginn und Ende des Auftretens lassen auf einen gemeinsamen Wasserweg schließen (s. Fig. 54). Als Erklärung bietet sich ein Abfluß durch das Talgrundwasser unterhalb Seeberg an, eventuell kombiniert mit einem Transport durch einen Schwall Muotawasser bis in den Bereich des Kiessammlers. Dagegen aber spricht die dafür erforderliche hohe Abstandsgeschwindigkeit ab Seeberg von 48 m/h, die in einem Porengrundwasserkörper auch bei einem mittleren Gefälle von 2,5% kaum anzunehmen ist. Dagegen spricht aber auch die Lage der drei genannten positiven Probenstellen in Fugglen, da in einem solchen Fall auch die Nr. 2, 5 und 7a in Balm Lithium führen müßten – was aber nicht der Fall war. Man muß daher annehmen, daß es dem Karstwasser dank der ausgeprägten NNW-Klüftung und den NNW-Störungssystemen im Wasserberg und auch im südlich vorgelagerten Bereich von Galtenäbnet (s. Fig. 30, tektonische Luftbilddarstellung, bzw. Tafel IV) möglich ist, auch auf direktem Wege in das Becken von Balm – Fugglen abzufließen. Dies unterstreicht aber auch die außerordentliche karsthydrologische Bedeutung der Vertikalstörungen in einem lithologisch und durch den Deckenbau auch tektonisch sehr differenzierten Schichtpaket!

Eingabestelle Riedboden/Matten (E V)

Die Eingabestelle V im Riedboden in den „Matten“ hinter dem Mattner Stock liegt geologisch in einer ganz analogen Position wie E IV. Auch hier konnte über eine Felspalte das Markierungsmittel (15 kg Amidorhodamin G extra) direkt in die Quintnerkalke eingebracht werden. Der Wiederaustritt wurde in den Ausstrichszonen dieser Schichten der „Basalen Axenteildecke“ im oberen Hürital und evtl. auch im Seeberg im Bisistal erwartet.

Der Hauptaustritt erfolgte tatsächlich in den Quellen 113 und 114. Diese liegen in der Lauwi an der rechten Flanke des Hüritales nur 500 m tiefer und etwa 1,4 km von E V entfernt. Der erste Nachweis des Farbstoffes gelang bereits 30 Stunden nach der Einspeisung, so daß sich hierfür eine Abstandsgeschwindigkeit von 50 m/h ergibt. Der Peak an diesen beiden Quellen wurde schon 17 Stunden später gemessen (≈ 32 m/h). Hier konnten mit 285 mg/m^3 bei Nr. 113 und 269 mg/m^3 bei Nr. 114 auch die höchsten Konzentrationen aller Fluoreszenztracer registriert werden. Alle anderen beobachteten Quellen im oberen Hürital blieben wider Erwarten farbstoffnegativ. Das intensiv rotgefärbte Wasser von Nr. 113/114 floß in der weiteren Folge oberflächlich in das Hürital ab, wo der Bach bei Mittel- und Niederwasser im Bereich von „Grund“ in seinem eigenen Schotterbett versickert, so daß die Strecke bis nach Hufstetli, etwa 3 km weiter unterhalb, völlig trocken liegt (s. Tafel IV). Hier befindet sich an einer Steilstufe eine bedeutende Quellgruppe, von der die Nr. 115 und 120 unter Beobachtung standen. Beide Quellen führten bereits am dritten Tag nach der Einspeisung Amidorhodamin (s. Fig. 51 und Tab. 17). Die Konzentrationen lagen mit $1,68$ bzw. $1,62 \text{ mg/m}^3$ bedeutend tiefer als bei Nr. 113/114, die Abstandsgeschwindigkeiten, von E V aus gerechnet, bei 72 und 95 m/h für den Erstnachweis und 43 bzw. 44 m/h für die Durchgangsspitze. Die verhältnismäßig hohen Fließgeschwindigkeiten lassen vermuten, daß dieser Fluoreszenztracer seinen Weg von der „Wiedereinspeisung“ im Bachbett nicht oder nicht vollständig durch die junge Talfüllung des Hüritales bis zu den Quellen bei Hufstetli genommen hat. Zumindest ein Teil des Wassers könnte bereits im Bereich von „Grund“ in den Karstuntergrund abgesunken und auf diesem Wege in die Quellen 115 und 120 gelangt sein. Auch die physikalisch-chemischen Kennwerte dieser Quellen sprechen für Karstwasseraustritte.

Eine derartige über den Karst- und Kluftwasserkörper laufende Verbindung würde auch den in der Quelle 14 in Fugglen in der Zeit vom 6. 8. bis 19. 8. 1979 beobachteten kontinuierlichen Durchgang von Amidorhodamin leichter verständlich machen (s. Tafel IV). Die Farbkonzentrationen blieben hier immer sehr niedrig und erreichten am 8. August mit $0,019 \text{ mg/m}^3$ ihren Peak (Abstandsgeschwindigkeit 49 bzw. 34 m/h). Auf Amidorhodaminspuren in den Quellen in Balm muß noch zurückgekommen werden.

Der zweite, eindeutig von der Einspeisung in E V betroffene Bereich ist wiederum der große Quellbezirk in Hinter Seeberg im Bisistal. Obwohl von der Eingabestelle aus gesehen weit im E gelegen (Entfernung über 5 km, Höhendifferenz 1.200 m), waren hier alle beobachteten Quellen (Nr. 24, 25, 59 und 65) sowie die Muota bei Nr. 23 amidorhodaminpositiv. Die höchsten Konzentrationen brachten die Nr. 24 ($0,109 \text{ mg/m}^3$) und 65 ($0,242 \text{ mg/m}^3$). Die Abstandsgeschwindigkeiten liegen zwischen 64 und 75 m/h für den Erstnachweis und zwischen 34 und 59 m/h für die Durchgangsspitzen. Die Folgerungen aus den Isotopengehaltmessungen entsprechen denen bei der Eingabestelle IV.

Der Farbstoff muß – wie die Tracer von E IV – im Streichen der gut verkarsteten Quintnerkalke nach Hinter Seeberg abgefließen sein. Das heißt aber, daß die Karstwasserscheide in der Zone südlich des Wasserbergfirstes zwischen Hüri- und Bisistal

nach W verschoben ist. Dies könnte eine Folge der unterschiedlich starken Eintiefung dieser beiden Talfurchen sein.

Amidorhodamin in geringen Konzentrationen (s. Tab. 17) wurde noch in der Quelle Nr. 49a bei der Unteren Steinweidbrücke (s. Fig. 36), in allen beobachteten Quellen in Balm (Nr. 1, 2, 5 und 7a) sowie in den Abflußmeßstellen 6a und 13 registriert. In Fugglen, südlich der Muota, blieben die Beobachtungsstellen, mit Ausnahme der schon erwähnten Nr. 14, ohne Nachweis. Läßt sich die Markierung der Quelle 49 bei einer Abstandsgeschwindigkeit von nur 24 m/h noch mit einem Wiederaustritt von versickertem Muotawasser erklären, so ist dies für die Farbnachweise in Balm – falls es sich tatsächlich um reelle Werte handelt (s. Abschn. 4.5.1.7.) – bei den dort registrierten hohen Abstandsgeschwindigkeiten nicht möglich. Wir müßten dafür eine direkte S–N-Verbindung, unter den Wasserbergfirst hindurch, annehmen. Ganz von der Hand zu weisen ist diese Deutung nicht, da ja auch für den Transport des Lithiums aus E IV nach Balm – Fugglen eine solche Abflußrichtung wahrscheinlich erscheint (s. Tafel IV).

Seenalper Seeli (E VI)

Dieser kleine See (1,719 m ü M) im Gebiet der Seenalp zwischen Chaiserstock und Chinzerberg liegt bereits außerhalb des topographischen Einzugsgebietes von Balm – Fugglen. Geologisch befindet er sich in den Oberen Quintnerkalken der „Basalen Axenteildecke“ (s. Fig. 2 und 6).

Die Wiederaustritte des nur unterirdisch erfolgenden Abflusses des kleinen Gewässers wurden aus geologischen und morphologischen Gründen am ehesten im oberen Hürital erwartet, zumal mehrere größere Quellen (Nr. 112, 137, 138 und 144; s. Tafel IV) nur einige hundert Meter tiefer im linken Talhang vorhanden sind. Andererseits war aber ein Abströmen der Seewässer in Richtung N, in das mittlere Muotatal (Quellen 142 und 143), oder nach W, Richtung Urner See, nicht auszuschließen.

Bei einem unmittelbaren Wiederaustritt im nahe gelegenen Hürital konnten in den gut verkarsteten Quintnerkalken sehr kurze Durchgangszeiten und eine hohe Ausbringungsquote der Markierungsmittel erwartet werden. Hätte aber eine Abflußrichtung nach W oder N bestanden, mit möglichen Entfernungen von über 10 km, oder wäre es in diesem Karststock gar zu einer radialen Verteilung gekommen, wie wir sie aus vielen Versuchen im Ostalpinen Karst kennen (J. ZÖTL, 1961; V. MAURIN & J. ZÖTL, 1964), so mußte man mit einer starken Verdünnung der Tracer rechnen. Bei der unter diesen Umständen schwierigen Dosierungsfrage war noch ein weiteres, vorzügliches Versuchsziel zu berücksichtigen (s. Abschn. 4.1. und 4.2.). Wir nahmen nämlich mit hoher Wahrscheinlichkeit an, daß es wenigstens zu einem teilweisen Wiederaustritt der markierten Wässer im oberen Hürital kommen würde, und diese – wie dies beim Amidorhodamindurchgang aus E V tatsächlich der Fall war – in den Alluvionen des Talbodens neuerlich versickern würden. Die hier vorausgesetzten Bedingungen sollten einen Vergleichstest zwischen einem Fluoreszenztracer und einem Triftstoff bei der Passage durch einen klastischen Aquifer ermöglichen. Um die Entscheidung über die einzusetzenden Tracermengen zu erleichtern, wurde daher am 29. 7. 1979 bei E VI ein Vorversuch mit 1 kg Uranin vorgenommen. Da keine der nahegelegenen Quellen im Hürital bis zum Morgen des 31. 7. von dieser Markierung betroffen wurde, erfolgte – wie vorgesehen – zwischen 10 und 11 Uhr die Eingabe von 20 kg Uranin A und 10 kg rot gefärbter Lycopodiumsporen. Die Einspeisung fand unter denkbar günstigen Verhältnissen in eine am Ostufer des Seeleins liegende Schwinde mit einem kontinuierlichen Abfluß von etwa 5 l/s statt. Die Ergebnisse dieser Doppelmarkierung waren überraschend:

– In keiner einzigen der beobachteten Quellen im Hürital wurden Uranin oder rote

- Sporen nachgewiesen. Auch die nur auf Fluoreszenztracer kontrollierten Quellen 142 und 143 im mittleren Muotatal blieben farbstoffnegativ.
- Dagegen waren alle im Bereich Balm - Fugglen unter Beobachtung stehenden Quellen und Abflußmeßstellen uraninpositiv (s. Fig. 39).
 - Bei den Quellen 14, 1, 2, und 2a konnte die Grünfärbung des Wassers auch mit freiem Auge erkannt werden. Eine erste Meldung über „grasgrünes Wasser“ bei Nr. 14 erfolgte bereits am 31. 7. 1979 um 19.20 Uhr! Diese intensive Färbung mußte also noch von der Voreinspeisung (1 kg) am 29. 7. 1979 um 11.30 Uhr herrühren. Ein Laboratoriumsnachweis ergab sich bereits bei der ersten nach der Haupteinspeisung gezogenen Probe am 31. 7. um 11.15 Uhr mit einer Konzentration von 2,24 mg/m³.
 - Dank der großen Eingabemenge von 20 kg Uranin beim Hauptversuch setzte der dadurch verursachte Farbdurchgang mit einer schlagartigen Erhöhung der Konzentrationen ein, so daß Vor- und Haupteinspeisung sauber getrennt werden können. In Tab. 14 ist als „Erstnachweis“ dieser Zeitpunkt gewählt und darauf auch die angegebene Abstandsgeschwindigkeit bezogen. Es ist natürlich nicht auszuschließen, daß „Vorläufer“ vom Hauptversuch schon etwas früher einsetzten.
 - Durch rein visuelle Beobachtung war es möglich, eine Uraninausbringung an weiteren, nicht unter ständiger Kontrolle stehenden Punkten zu konstatieren, so z. B. an den Quellen 3 und 10 sowie einen starken Farbaustritt am Fuße des linksseitigen Hochwasserdammes der Muota oberhalb der Abflußmeßstelle 8a, was das Gesamtbild abrundet.
 - Besonders wichtig war die Beobachtung von grügefärbtem Wasser aus Grundwasseraufstößen des untersten Hüribaches, dort, wo dieser in den Talboden des Muotatales übertritt (s. Tafel IV und Fig. 57). Aufgrund dieser Beobachtung ist nicht auszuschließen, daß auch andere Markierungsstoffe an dieser Stelle ausgebracht wurden.
 - Überraschend war der Nachweis von Uranin im Hölloch. Es handelt sich dabei um Einzelproben, die beim „Zürichsee“ (0,19 mg/m³) am 2. 8. 1979 um 23 Uhr und beim „Holzgang“ (0,21 mg/m³) am 3. 8. 1979 um 11.30 Uhr gezogen wurden (s. Fig. 12 und 57). Diese Probenahme erfolgte noch vor dem Gewitterregen am Nachmittag des 3. August. Bei sommerlichen Niederwasserverhältnissen, wie sie zu diesem Zeitpunkt noch geherrscht haben, liegen die Wasserspiegel in diesen Lokalitäten 2 bis 5 m höher als der Schleichende Brunnen!
 - Die wichtigste Austrittsstelle für das Uranin ist Nr. 14: erster Nachweis von der Haupteinspeisung 2. 8. 1979, 1.20 Uhr, Abstandsgeschwindigkeit 153 m/h, Durchgangsspitze 3. 8., 1.10 Uhr, maximale Konzentration 155,0 mg/m³, Abstandsgeschwindigkeit 95 m/h, Gesamtausbringung 17,6%. An zweiter Stelle folgt bereits die Quellgruppe der „Schleichenden Brünnen“. Zum Beispiel Quelle 1: Erstnachweis 2. 8., 6.15 Uhr, Durchgangsspitze 3. 8., 0.05 Uhr mit maximaler Konzentration von 29,7 mg/m³, Abstandsgeschwindigkeiten 140 bzw. 98 m/h. Die Gesamtausbringung an der gemeinsamen Abflußmeßstelle dieser Quellgruppe (Nr. 13) beträgt 24,0%.
 - Insgesamt wurden in Balm - Fugglen bis zum 14. 11. 1979 62,4% des eingespeisten Uranins registriert (s. Tab. 14).
 - Der Hauptdurchgang des Uranins ist bis zur Beendigung der Direktbeprobung im Okt./Nov. 1979 praktisch abgeschlossen. Die Langzeitbeprobung mittels Aktivkohle läßt erkennen, daß die abnehmende Tendenz offenbar bis zur nächsten Schneeschmelze im darauffolgenden Frühjahr (Mai/Juni 1980) anhält und dann durch das vermehrte Wasserdargebot unter die Nachweismöglichkeit absinkt. Zusätzliche Ausspüleeffekte, wie sie bei anderen Versuchen mit erhöhten Niederschlä-

gen oder Schneeschmelzeereignissen zusammenfallen, konnten hier nicht beobachtet werden.

- Rote Sporen wurden ebenfalls nur in Balm – Fugglen wiedergefunden. Alle beobachteten Stellen, mit Ausnahme der Muota (6a) und der Quellen 7a und 11, waren positiv.
- Im Gegensatz zum raschen Uranindurchgang treten die ersten roten Sporen erst nach den starken Niederschlägen in der zweiten Versuchswoche auf (8. 8. bei Nr. 12, 10. 8. bei Nr. 14 und 20a, 11. 8. bei Nr. 5, 15c und 17 und erst am 12. 8. in Nr. 2 und am 13. 8. in Nr. 1). Die kräftigsten Durchgänge in Fugglen konnten bei den Quellen Nr. 12, 14 und 20a registriert werden (s. Tab. 20–22). Die maximalen Abstandsgeschwindigkeiten für die Sporen liegen bei etwa 25 m/h.

Bei der Diskussion der Ergebnisse der kombinierten Einspeisung in E VI bereiten die hier aufgezeigten Diskrepanzen erhebliche Schwierigkeiten. Der rasche und akzentuierte Uranindurchgang setzt ein ausgereiftes Karstwassersystem voraus. Die Isotopengehaltsmessungen an den Hauptaustrittsstellen des Tracers (Nr. 1, 2a, 14) ergeben die im Untersuchungsgebiet höchsten beobachteten Anteile an direkt abfließendem Wasser. Damit stimmt aber das Verhalten der roten Sporen schlecht überein. Außerdem ist die Ausbringung dieser Triftkörper relativ gering. Es taucht also die Frage auf, ob die Sporen und der Farbstoff nicht teilweise getrennte Wege gegangen sind. Möglich wäre eine für die Triftkörper filtrierend wirkende Einschaltung, an der die roten Sporen zunächst zurückgehalten und erst beim allgemeinen Anstieg des Karstwasserspiegels infolge der stärkeren Niederschläge wieder angehoben und über eine Schwelle in einen für sie passierbaren Abflußweg geschwemmt wurden. Erfahrungsgemäß eilen nämlich Triftkörper bei unbehinderten, vorwiegend gravitativ ausgebildeten Karstwasserwegen im Wasser gelösten Tracern voraus. Solche Bedingungen konnten z. B. im Bründl-System beobachtet werden (V. MAURIN & J. ZÖTL, 1959; K. BUCHTELA et al., 1964). Im phreatischen Bereich und vor allem bei hemmenden Einschaltungen tritt meist eine Umkehr des Abflußverhaltens ein.

Ein weiteres Problem ist der hydrogeologisch mögliche Weg der Markierungsmittel aus E VI nach Balm – Fugglen. Da sie im Hürital nicht auftauchten, müssen sie wohl schon nahe des Seenalpseeis in den Quintnerkalken in die Tiefe abgesunken und so unterhalb dieser Talfurche in eines der ausgeprägten NNW-Störssysteme, wie sie für den Wasserberg typisch sind, eingetreten sein. Mit dem Erreichen der kretazischen Kalke verteilen sie sich auf klufftbedingte Karstwasserwege, die zum Becken Balm–Fugglen hinführen und die auch von den Tracern aus E IIIa und auch E IIIb bzw. E IV und E V benutzt wurden. Für diese Deutung spricht auch die vorwiegend in Fugglen (besonders bei Nr. 14) erfolgte Wiederausbringung des Uranins.

Einer Erklärung bedarf noch der sehr frühe Uraninnachweis im Hölloch in einem höheren Karstwasserniveau als jenes der „Schlichenden Brünnen“. Denkbar wären eine rasche Ausbreitung des Farbstoffes in der phreatischen Zone in Richtung Hölloch und eine Hebung des kontaminierten Wassers durch eine hydrodynamische Saugwirkung an einer Engstelle des in entgegengesetzter Richtung sich darüber hinweg bewegenden Hölloch-Abflusses.

Wahrscheinlicher erscheint aber, daß eine Aufteilung des Uranins bereits im Nordteil des Wasserberges erfolgte und ein kleiner Teil des Markierungsstoffes – bei den damals herrschenden Niederwasserverhältnissen im Hölloch-System – über die Karbonathorizonte der Silberdecken direkt in den Bereich Bödmeren, nördlich der Muota, übertreten konnte (s. Fig. 57, 5 und 6). Nach dem allgemeinen Karstwasseranstieg wurden diese Wassermassen wieder aus dem Höhlensystem herausgedrückt. Die Annahme divergierender Fließrichtungen – in Abhängigkeit von den jeweiligen Was-

serständen und Druckverhältnissen in einem ausgereiften Karstwassersystem – wird auch durch die Ergebnisse der Eosinmarkierung (E I) und der Einspeisung von Sporen im Wasserdome des Hölloches (E II) gestützt.

Eingabestelle Zwingsbrugg/Muotabett (E VII)

Unterhalb der Zwingsbrücke wurden im Verlaufe einer Stunde 5.100 kg NaCl als Salzsole in die Muota eingegeben. Das Wasser versickerte talabwärts in der Steile, zu mehr als der Hälfte aber im Kiessammler selbst (s. Fig. 35), 350 m talaufwärts der Quelle 2. Diese Quelle hat am 1. 8. 1979, 0.15 Uhr mit 22,14 mg/m³ die höchste Cl⁻-Konzentration im ganzen Becken aufgewiesen.

Die Auswertung der Analysenergebnisse (s. Abschn. 4.5.2.2.) beweist die Existenz zweier Talgrundwasserströme. Der rasch abfließende Strom bewegt sich vom Kiessammler zuerst gegen NW zum rechten Talrand hin. Hier stößt er auf die Aufwölbung der Grundwasserfläche bei den Karstquellen der „Schlichenden Brünne“ (Nr. 1, 2, 3, 4) und wird an deren Ostflanke (Nr. 5) gegen die Talachse abgedrängt. Der Schlichende Brunnen, Nr. 1, weist keine Cl⁻-Konzentrationen signifikant über der Grundlast auf.

Auf der linken Muotaseite bewegt sich der andere Talgrundwasserstrom in breiter Front langsam gegen die zweite Grundwasseraufwölbung um die Quelle 17. Die Nr. 17 weist wie Nr. 1 keine Cl⁻-Konzentrationen über der Grundlast auf. Die Nr. 11 nimmt zu dieser Aufwölbung eine ähnliche Lage ein wie die Nr. 2 auf der rechten Talseite, die Cl⁻-Konzentrationen sind jedoch nur halb so groß (0,30 mmol/l gegen 0,63 mmol/l; Grundlast 0,049 ± 0,002 mmol/l). Die übrigen Tracerergebnisse bestätigen, daß sich hier unter dem Schotterkörper des Talgrundes bedeutende Karstquellen befinden müssen. Ähnlich der Situation auf der rechten Talseite wird auch hier der Talgrundwasserstrom gegen die Talachse abgedrängt, von wo er dem Ausgang des Beckens zufließt.

Unmittelbar vor der hydrogeologischen Barriere am Ausgang des Beckens Balm – Fugglen treten am linken Beckenrand die Quellen 8, 9 und 14 aus, welche Karstwasser aus den Bereichen Wasserberg und Hürital (E IIIa, E IIIb, E VI) bringen. Bezeichnenderweise enthalten sie ebenfalls kein NaCl über die Grundlast hinaus. Das Talgrundwasser wird somit auch hier vom Karstwasser abgedrängt.

Das Tal- bzw. Muotagrundwasser umfließt im Becken Balm – Fugglen drei Karstwasseraustritte, wobei in den Randzonen Vermischungen auftreten. Der Gehalt an anderen Tracern in diesem Grundwasser läßt vermuten, daß noch weitere kleine Karstwasseraustritte unter den Schottern zu finden sind.

Auffällig ist der geringe Anteil des eingegebenen NaCl, der in den Meßstellen von Balm – Fugglen nachgewiesen werden konnte. Es stellt sich damit die Frage nach dem Verbleib der Hauptmenge des Salzes. Da aufgrund der starken Karstwasseraufbrüche im Bereich der „Schlichenden Brünne“ nördlich der Muota und in Fugglen, besonders um die Quellgruppen 14 und 17, ein Absinken der Sole in den Karstuntergrund unwahrscheinlich ist, verbleibt nur die Möglichkeit des Abströmens des versalzten Wassers in den tieferen Schichten der grobklastischen Talfüllung aus dem Becken heraus talabwärts. In Quellen mit hohen Cl⁻-Werten ergeben die Isotopengehaltsmessungen i. a. relativ höhere Anteile an Talgrundwasser (z. B. Nr. 5 und 2a gegenüber Nr. 1 und 4 im Balm bzw. Nr. 10, 11 und 12 gegenüber Nr. 17 in Fugglen).

5.1.2. Aussagen aus den Ergebnissen der Isotopengehaltsmessungen¹⁾

Neben der Bestätigung hydrogeologischer Sachverhalte, die sich aus dem Markierungsversuch ergeben, erbrachten die Isotopengehaltsmessungen zusätzliche hydro-

¹⁾ Herrn W. STICHLER danken wir für eine ausführliche Diskussion der hier behandelten Fragen.

geologische Informationen über die Höhenlage der Einzugsgebiete einzelner Quellen, über die Verweilzeiten von Wässern im Untergrund und über Abflußanteile von Wässern verschiedener Herkunft.

Bezüglich der **Höhenlage** der Einzugsgebiete konnten im Gebiet von Balm – Fugglen für die Wässer der Nr. 13/14, 15 und 19 (entsprechend den Wässern Nr. 24 und 25) Unterschiede von je ca. 100 m festgestellt werden, welche mit den orographischen Verhältnissen übereinstimmen (s. Abschn. 5.1.1.). Für einzelne Quellen bzw. Quellgruppen ergeben sich die in Fig. 27 eingetragenen mittleren Höhenlagen der Einzugsgebiete. Es besteht Übereinstimmung mit den hydrogeologischen Verhältnissen und mit den Ergebnissen der Markierungsversuche.

Die errechneten mittleren **Verweilzeiten** der verschiedenen Quellwässer liegen im Bereich von 0,5 bis 1,1 Jahren (s. Tab. 3). Unter Berücksichtigung der direkt abfließenden Komponente, deren Laufzeit nach den Markierungsversuchen einige Tage beträgt, ergeben sich für die langfristige Karstwasserkomponente Verweilzeiten von 1,4 bis 2,5 Jahren, wobei die direkten Abflußanteile zwischen 10% und maximal 70% liegen. Unter der roh geschätzten Annahme eines Jahresabflusses von ca. $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ der „Schlichenden Brunnens“ und einer mittleren Verweilzeit der Wässer dieser Quellgruppe von 0,5 Jahren folgt daraus ein Karstwasservolumen von ca. $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Für den Bereich Fugglen (Nr. 14, 15 und 16) ergibt sich bei einem Jahresabfluß von ca. $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ und einer mittleren Verweilzeit von 0,8 Jahren ein Volumen von ca. $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Die relativ niedrigen, direkt abfließenden Anteile in den Quellgruppen 10/11, 15 und 20/21 deuten auf relativ hohe Anteile an Talgrundwasser und Sickerwasser aus dem Hangbereich (bei Nr. 10/11 und 20/21) bzw. auf ein Einzugsgebiet in Moränenablagerungen (bei Nr. 15) hin (s. auch Abschn. 5.1.1.).

5.1.3. Allgemeine karsthydrologische Ergebnisse

Aus der Zusammenschau der umfangreichen Untersuchungen im Einzugsgebiet des hinteren Muotatales (hydrogeologische Aufnahme, hydrochemische Langzeitbeobachtungen, Isotopengehaltsmessungen, Niederschlags- und Abflußmessungen sowie der kombinierte Markierungsversuch) lassen sich einige allgemeingültige Erkenntnisse für den bearbeiteten Bereich wie auch solche prinzipieller Natur zur Beurteilung karsthydrographischer Verhältnisse ableiten.

Das untersuchte Gebiet kann sowohl räumlich und geologisch als auch karsthydrographisch in zwei Teilbereiche untergliedert werden (s. Fig. 3 und Tab. 1). Nördlich der Muota liegt das Areal II (Bödmere – Twärenen). Die stark verkarstete Oberfläche steigt hier nach E treppenförmig an. Das gesamte Gebiet umfaßt etwa 28 km^2 ; im nordwestlichen Abschnitt befindet sich das ausgedehnte Hölloch-System. Tektonisch gesehen wird der ganze Komplex aus den oberen Teildecken der Axendecke (Obere und Untere Silberdecke, bzw. Bächistockdecke) aufgebaut (s. Fig. 5). Beim Zusammenschub wurden die stauenden Mergel- und Tonsteinschichten weitgehend abgeschert, so daß sich das Hölloch in der im Mittel 150 m mächtigen Schrätenkalkplatte der Oberen Silberdecke ungehindert entwickeln konnte. Bedingt durch das axiale Abtauchen der Axendecken nach W und dank der an der eingerollten Stirnfront dieses Deckensystems entlang des Starzlentales noch erhaltenen stauenden Gaultsandsteine und -schiefer, ist die Gesamtentwässerung dieses Karstareals auf das Becken von Balm – Fugglen fixiert.

Im W dagegen ist der Wasserberg (Areal VII, etwa 11 km^2) und der südlich anschließende Bereich von Galtenäbnet – Hürital (Areal VI) morphologisch, vor allem aber tektonisch wesentlich stärker gegliedert (s. Fig. 6). Das Ergebnis der Markierungsversuche läßt den Schluß zu, daß ca. 60% des Areals VI ebenfalls über Karst-

wasserwege in Richtung Balm – Fugglen bzw. Hinter Seeberg entwässern. Zusammen mit dem Wasserberg ergibt dies ein unterirdisches Einzugsgebiet von etwa 30 km², was fast genau jenem des Bödmeren – Twärenen entspricht.

Wesentliche Unterschiede zum Areal II, rechts der Muota, bestehen aber in der Geologie. In den Arealen VI und VII sind nämlich alle Teildecken des Axendeckensystems vertreten (s. Fig. 6). Neben den gut verkarstungsfähigen Schichtgliedern wie Schratzen-, Valanginien-, Öhrli- und Quintnerkalken sind hier aber auch die stauenden Horizonte der Drusbergschichten, Valanginien- und Öhrlimergel sowie der Zementsteinschichten (letztere mit einer Mächtigkeit von über 400 m) beteiligt. Daß es trotzdem zu keiner ausgesprochenen Stockwerksbildung im Grundwasserbereich gekommen ist, ist der starken tektonischen Beanspruchung des gesamten Schichtpaketes zuzuschreiben. Es handelt sich dabei einmal um eine Verschiebung der Teildecken und zum anderen um eine ausgeprägte, hauptsächlich NNW-orientierte Bruchtektonik (s. Fig. 30 und Tafel IV). Letztere ist vor allem für die vorwiegend nach Balm – Fugglen gerichtete unterirdische Entwässerung maßgebend. Daneben ist aber, besonders im Wasserberg und auf Galtenäbnen, ein SW-NE streichendes Kluft- und Bruchsystem entwickelt (s. Fig. 30), das wohl für die fächerartige Verteilung der einzelnen Markierungsstoffe sowie für den Übertritt des Uranins von der Einspeisungsstelle am Seenalpeeli (E VI) in den Wasserberg und in das Hölloch bestimmend war. Welche Rolle dabei der durch eine Großsackung aufgelockerten Nordostflanke des Wasserberges zukommt, wäre noch zu untersuchen.

Auf diese unterschiedlichen, geologisch bedingten Voraussetzungen in den beiden Untersuchungsbereichen links und rechts der Muota sind auch die differierenden hydrogeologischen Erscheinungsformen zurückzuführen.

Im geschlossenen Schratzenkalkkomplex des Bödmeren – Twärenen haben wir ein ausgereiftes, verzweigtes Karstsystem, dessen vadoser Anteil dank der intensiven Forschungen im Hölloch uns in einem für europäische Verhältnisse einzigartigen Ausmaße von über 140 km zugänglich ist. Der Niederwasserspiegel des phreatischen Bereiches wurde an vielen Stellen erreicht und eingemessen. Die phreatische Zone setzt sich, wie durch die Markierungsversuche nachgewiesen, im Untergrund des Muotatales bis an die Südflanke des Beckens von Balm – Fugglen fort. Nimmt man für diesen mit klastischen Ablagerungen aufgefüllten, glazial übertieften Talabschnitt die Felsoberkante in einigen Zehnermetern unter der heutigen Talsohle an, so ist damit auch eine Mindestgrenze für die Tiefenlage dieser Verkarstungszone gegeben. Mischungskorrosion und Druckfließen waren wohl für ihre Entstehung maßgebend. Welchen Anteil subglazial abfließende Gletscherschmelzwässer während der pleistozänen Kaltzeiten an der Weiterentwicklung derartiger Karstbereiche hatten, ist noch wenig untersucht. Man muß aber annehmen, daß solche Prozesse auch in anderen, ehemals vergletscherten Gebieten für die Herausbildung der rezenten Entwässerungsverhältnisse sowie der Wechselbeziehung Talgrundwasser – Karstwasser von Bedeutung sind.

Für allgemein gültige Überlegungen bezüglich des Speichervermögens eines unterirdischen Karstsystems gibt uns das weitgehend zugängliche Hölloch einen hervorragenden Einblick. Die Quellgruppe der „Schlichenden Brünne“ liegt bei etwa 638 m ü M. Der gemeinsame Abfluß schwankt zwischen 0,5 und mehr als 13 m³/s (s. Tafel II). Dazu kommt noch ein nicht genau erfaßbarer Anteil von Höllochwasser, das den Quellen in Fugglen (Nr. 11, 12, 15c und 17; s. Ergebnisse der Markierungen in E I und E II) beigemischt ist, über das Talgrundwasser abfließt oder direkt in das Muotabett übertritt. Bei Schneeschmelze oder starken ergiebigen Niederschlägen reichen diese Abflußmöglichkeiten aber nicht aus, und das Karstwasser wird im Höhlen- und Kluftsystem zurückgestaut, was im Extremfall einen zusätzlichen Austritt

aus dem Höllocheingang (734,4 m ü M) zur Folge hat. Dies bedeutet aber im vorderen Höhlenteil einen Rückstau von fast 100 m; in den hinteren, in der Luftlinie etwa 4,5 km entfernten Abschnitten wurden Wasserstandsmarken sogar 180 m über dem Niveau des Schleichenden Brunnens festgestellt.

Setzt man voraus, daß durch diese Retention eine Schrättkalkplatte von etwa $0,25 \times 4$ km Fläche im Durchschnitt 100 m hoch eingestaut wird, so ergibt dies ein betroffenes Felsvolumen von 10^8 m³. A. BÖGLI rechnet, daß die im Hölloch erforschten Gänge etwa 0,2% dieses Raumes ausmachen ($2 \cdot 10^6$ m³). Für die Gesamtheit der karsthydrographisch wirksamen Klüfte, Spalten und Gänge kann man aber sicher einen wesentlich höheren Betrag einsetzen.¹⁾

Geht man nun in diesem intensiv verkarsteten Bereich von einem mittleren Wert von 2% aus, so ergibt dies bei einem maximalen Rückstau einen zusätzlichen Speicherraum von etwa $2 \cdot 10^6$ m³ eine Wassermenge, die bei einer Erhöhung des Gesamtabflusses aus dem Hölloch um nur 5 m³/s in vier bis fünf Tagen wieder abströmen kann. Diese Anschließung des Retentionsvermögens für Hochwasserspitzen im Hölloch-System ergibt nur 4% des über die Linnigraphenstation 13 erfaßbaren Jahresabflusses (s. Abschn. 5.1.2.) und ist bei der Annahme einer direkten (kurzfristigen) Abflußquote von 70% für das Areal Böldmeren – Twärenen durchaus realistisch (s. Abschn. 3.3.4.3., Tab. 8).

Ganz anders liegen die Verhältnisse im Gebiet des Wasserberges. Ein geschlossener, gut verkarstungsfähiger Karbonatgesteinskomplex besteht hier nicht. Durch die stauenden Mergel- und Tonschiefeleinlagerungen sind die intensiver verkarsteten Teilbereiche voneinander getrennt. Die vertikal durchschlagenden Störungen erlauben dem unterirdischen Wasser aber – je nach dem Grad der Füllung des Karst- und Kluftwasserkörpers – ein Absinken in die Tiefe, in den phreatischen Bereich, oder ein Aufsteigen in die vadose Zone. Hier erfolgt dann über die in den nördlichen Abschnitten des Wasserberges stärker verbreiteten Schrättkalksteine (s. Fig. 6 und Tafel IV) ein rasches Abfließen nach Balm – Fugglen. Hochwasserspitzen werden wahrscheinlich über nur periodisch benutzte Gravitationsgerinne abgeführt. Auf diese Weise wird die Existenz differenzierter, in verschiedenen „Stockwerken“ verlaufender Wasserwege verständlich, wie sie aufgrund der Ergebnisse der Markierungsversuche angenommen werden müssen. Im Wasserbergfirst und den nördlich anschließenden Hängen dominieren die minder verkarstungsfähigen Hauterivien-Kieselkalksteine. Aber auch in diesem Bereich kommt es zur Ausbildung von Ponoren (z. B. E IIIb), Dolinen, Karren und karstkorrosiv erweiterten Störungszonen und Spalten. Zu einem wesentlichen Teil wird sich die unterirdische Wasserzirkulation aber doch in den noch wenig korrodierten Kluftsystemen abspielen.

Dieses sich aus der hydrogeologischen Aufnahme und den Ergebnissen der Markierungen abzeichnende Bild stimmt recht gut mit den Resultaten der isotopehydrologischen Untersuchungen überein (s. Abschn. 3.3.4.3.). Während sich für die Quellgruppe der „Schleichenden Brunnens“ in Balm mittlere Verweilzeiten der langfristigen Abflußkomponente von 1,6 bis 1,7 Jahren ergaben (Verweilzeit des Mischwassers aus dem kurzfristig abfließenden Anteil und der Langzeitkomponente 0,5 Jahre), erbrachten die Messungen der Hauptabflüsse aus dem Wasserberg (Quellgruppe 14 und 16 in Fugglen) wesentlich höhere Werte, und zwar für die mittleren Verweilzeiten des

¹⁾ G. STRAYLE (1970) gibt für den Bereich der Malmkalksteine der Ebinger Alb einen Speicherraum von 1,8 bis 3,3% an. Bei einem Wassererschließungsprojekt der UNESCO in Kreidekalken des Peloponnes wurde mit 2% gerechnet. Bei ähnlichen Überlegungen im Tennengebirge haben wir für den Dachsteinkalk unterhalb des Vorflutniveaus ein entwässerbares Kluftvolumen von 1,5% der Felsmasse angesetzt.

Mischwassers von 0,7 Jahren und für die langfristigen Abflußkomponenten von 2,1 bis 2,3 Jahren.

Wir haben es also in den beiden untersuchten Teilbereichen aufgrund der unterschiedlichen lithologisch/tektonischen Vorbedingungen mit stark abweichenden Karstwasserregimen zu tun. Während das ausgereifte System im Areal Böldmeren – Twärenen ein großes Retentionsvolumen zur Aufnahme von Hochwasserspitzen aufweist, ist das Langzeitspeichervermögen gering, sind die Verweilzeiten des Grundwassers im Karstsystem entsprechend kurz. Im Wasserberg hingegen ist in dem wesentlich differenzierteren Kluft- und Karstwasserkörper das Langzeitrückhaltevermögen größer. Die dennoch, wenn auch gedämpft, auftretenden Abflußspitzen (s. Tafel II) sind, wie noch gezeigt wird, zum Teil auf Einflüsse aus den südlich und südwestlich anschließenden Arealen zurückzuführen. Als wesentlichste Erkenntnis kann hier festgestellt werden, daß sich auch in einem lithologisch und damit auch hydrogeologisch so stark gegliederten Schichtstoß ein hydraulisch zusammenhängender, geschlossener Grundwasserkörper entwickeln kann. Maßgebend hierfür ist die im Wasserberg vorhandene, intensive tektonische Zerbrechung. Die vertikalen Störungen erwiesen sich für die unterirdische Wasserzirkulation als das bestimmende Element. Dieses schon bei früheren Untersuchungen in den Ostalpen, im Dinarischen Karst und auch auf der Schwäbischen Alb erkannte Prinzip wird hier auch für extreme Verhältnisse bestätigt.

Ähnlich günstige Bedingungen wie der Schrattekalkkomplex im Bereich Böldmeren – Twärenen bieten für die unter- und oberirdische Verkarstung die Quintnerkalk im Areal VI (Hürital – Galtenäbnet). Sie gehören der basalen Axendecke s.s. an und tauchen mit dieser gegen N unter die höheren Axenteildecken ein (s. Fig. 4 und 6). Aufgrund ihrer tektonischen Position und dem kleineren oberirdischen Einzugsgebiet ist die unterirdische Verkarstung aber noch nicht überall soweit vorgeschritten wie im Bereich des Höllochs im Areal II. Auf der Galtenäbnet haben wir aber von der Einspeisestelle IV bis zur großen Quellgruppe in Hinter Seeberg (Nr. 24 und 25) durchaus vergleichbare Verhältnisse: Abstandsgeschwindigkeiten für den Erstmachweis beim Lithiumchlorid 116 m/h, beim Tinopal 108 m/h; mittlere Verweilzeit für die langfristige Komponente 1,4 bis 1,6 Jahre bei einem Anteil von 70% für das rasch abfließende Wasser und damit eine mittlere Verweilzeit von 0,5 Jahren für das Mischwasser (s. Abschn. 3.3.4.3., Tab. 8).

Aufgrund des frühen Auftretens von Markierungsstoffen aus Schwinden im Quintnerkalk der basalen Axenteildecke im S in den Quellen von Balm – Fugglen (Uranin aus E VI in Nr. 1 mit einer Abstandsgeschwindigkeit von 140 m/h, in Nr. 14 mit 153 m/h; Amidorhodamin aus E V in Nr. 1 und 2 mit 178 m/h; Lithiumchlorid aus E IV in Nr. 12, 14 und 17 mit 48 m/h) muß man schließen, daß entlang von Störungszonen einzelne Wasserwege bis tief unterhalb des Wasserbergfirstes durch korrosive Prozesse karsthydrographisch wirksam wurden. Dies muß in besonderem Maße für die Verbindung vom Seenalpsee (E VI) zu den Quellgruppen 14 und 16 der Fall sein. Damit könnten auch die den Quellen in Fugglen (mit ihrem an und für sich ausgeglicheneren Schüttungsverhalten aus dem Einzugsgebiet Wasserberg) aufgesetzten Abflußspitzen erklärt werden (s. Tafel II). Das direkte Abfließen der markierten Wasser aus dem Bereich Seenalp – Galtenäbnet in den abtauchenden Quintnerkalken der basalen Axenteildecke nach N muß zunächst in relativ begrenzten, aber unter hohem Druck stehenden Karstschläuchen erfolgen, denn nur so sind die hohen Fließgeschwindigkeiten erklärlich. Für die allgemeine Beurteilung der Genese karsthydrographischer Verhältnisse ergibt sich hier also die Erkenntnis, daß bei entsprechenden lithologisch/tektonischen Vorbedingungen der Verkarstungsprozeß partiell weit unter das allgemeine Verkarstungsniveau hinabgreifen kann.

Die fächerförmige Verteilung der Markierungsstoffe im Bereich des untersten Hürtals, im Becken von Balm – Fugglen sowie in den westlichen Abschnitten des Hölloch-Systems aus den Eingabestellen IIIb, IV, V und VI (Fig. 57) erfolgt wohl über die Kreidekalke der oberen Axenteildecken, in die die Tracer über durchschlagende NNW- bzw. SW-NE-streichende Störungssysteme aufsteigen konnten (s. Fig. 30). Die bereits im Hangenden der stauenden Drusbergsschichten der Unteren Silberdecke in E IIIa eingespeisten blauen Lycopodiumsporen sind gleich in diesen höheren Verkarstungshorizont eingetreten.

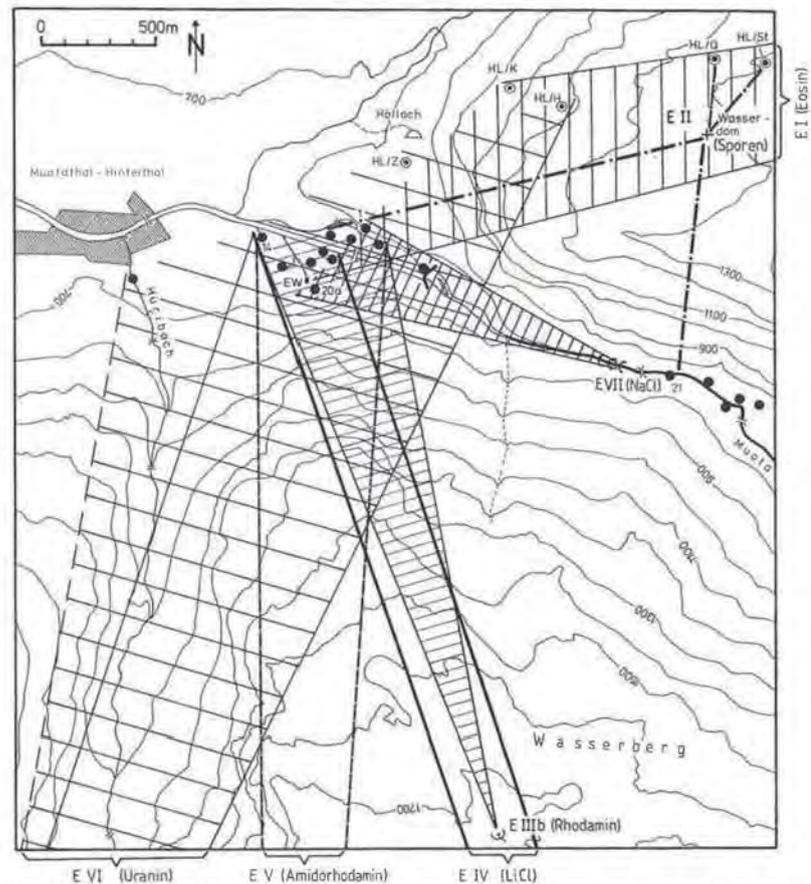


Fig. 57: Schematische Darstellung der Verteilung der wichtigsten beim kombinierten Markierungsversuch 1979 eingesetzten Tracer im Bereich unterstes Hürtal – Balm-Fugglen – Hölloch. Im Hölloch bedeutet: HL/Z = Zürichsee, HL/H = Holzgang, HL/K = Kanzel, HL/Q = Quelle, HL/St = Styx.

Wegen der während der ersten Tage des Versuches herrschenden Niederwasserverhältnisse konnte das Uranin sogar in das Hölloch-System übertreten.¹⁾ Nach einer allgemeinen Auffüllung der Karstwasserkörper in der Nacht vom 3. auf den 4. 8. 1979 wird das durch Uranin markierte Wasser wieder aus dem Hölloch-System hinausgedrückt. Der Übertritt von Karstwässern aus dem Bereich Bödmeren – Twärenen nach Fugglen (mit den Tracern aus E I und E II ab 4. 8.) erfolgte wohl durch Unterströmung.

Dank des gleichzeitigen Einsatzes einer größeren Anzahl verschiedener Markierungsstoffe, der Zugänglichkeit des Hölloch-Systems, der intensiven Beobachtungen und der günstigen Witterungsverhältnisse konnte in diesem Gebiet ein Einblick über die Auswirkungen stark schwankender Karstwasserstände auf die Verteilung der Abflußquoten bei den einzelnen Quellgruppen, aber auch über Richtungsänderungen im unterirdischen Abflußregime gewonnen werden. Derartige Einsichten dienen auch dem besseren Verständnis oft schwer deutbarer Phänomene in anderen Karstgebieten.

Das Untersuchungsgebiet im hinteren Muotatal hat schließlich noch die Möglichkeit eröffnet, hier bestehende Wechselbeziehungen zwischen den Talgrundwässern, den Oberflächengewässern und dem Karstwasser etwas näher zu studieren. Sowohl das mittlere Hürital (von Liplisbüel bis Huftstättli) als auch das Bisistal unterhalb von Seeberg liegen im Winter und während sommerlicher Niederwasserperioden meist trocken. Im hinteren Hürital haben die Ergebnisse der Markierung der Abflüsse des Seenalpeelis (E VI, Uranin und rote Sporen) gezeigt, daß der Karstwasserspiegel in den Quintnerkalken hier tief unter der Talsohle liegen muß. Auch das aus E V stammende und über die Quellen 113 und 114 mit hohen Konzentrationen abfließende Amidorhodamin versickerte mit dem übrigen Hüribachwasser ab „Grund“ im Bachbett (s. Tafel IV). Bereits 24 Stunden später setzte an den zwei bis drei Kilometer unterhalb der Versickerungsstrecke liegenden Quellen 115 und 120 ein deutlicher Amidorhodamindurchgang ein (s. Fig. 51). Man muß daher annehmen, daß zumindest teilweise eine Verbindung in Form von Karstwasserwegen besteht.

Da in diesen Quellen – wie im gesamten Hürital – kein Uranin nachgewiesen werden konnte, sind für diesen mittleren Talabschnitt getrennte Abflußbahnen, die infolge der starken lithologischen Gliederung wohl in verschiedenen Stockwerken verlaufen, anzunehmen.

Im Bisistal liegen die Verhältnisse etwas komplizierter. Durch die große Felsgleitung, durch die wesentliche Teile der Nordostflanke des Wasserberges betroffen sind, wurde eine wahrscheinlich etwa 100 m tiefer eingeschnittene Schluchtstrecke der Muota im Bereich Zwingsbrügg zugedrückt. Als Folge davon haben wir eine kräftige Aufschotterung oberhalb und eine Versteilung des Bachlaufes unterhalb. Wieweit nun das im Abschnitt Vorder Seeberg zeitweise versickernde Muotawasser direkt in den Karstuntergrund übertritt oder über das Talgrundwasser zur Speisung der Quellgruppe zwischen der Unteren Steinweidbrücke und der Zwingsbrücke (s. Fig. 33 und 36) beiträgt, ist noch ungewiß. Es wird dies sicherlich weitgehend vom jeweiligen Karst- bzw. Porengrundwasserstand abhängen. Eine eigene, zur Abklä-

¹⁾ Es ist möglich, daß dies auch für andere Tracer zutrifft, sie aber wegen zu geringer Konzentrationen nicht nachgewiesen werden konnten oder bei der einmaligen Probennahme am 2. 8. bzw. 3. 8. 1979 noch nicht eingetroffen waren. Auch für die Grundwasseraufstöße im Bett des untersten Hüribaches ist ein Austritt weiterer Markierungsstoffe nicht auszuschließen, da hier keine Beprobung stattfand und der Uranindurchgang nur visuell beobachtet wurde. Dies würde dann aber eine wesentlich weiter gespannte Auffächerung der aus den Arealen VI und VII abfließenden Wässer bedeuten (s. Fig. 57).

zung dieser Frage angesetzte Markierung des Talgrundwasserstromes mit Detergentia bei E VIII brachte leider kein auswertbares Ergebnis. Daß wir aber im Abschnitt Zwingsbrugg (im Bereich der Sackungsmasse) eine enge Wechselbeziehung zwischen Talgrundwasser und Karstwasser haben, zeigte der Nachweis von braunen Sporen aus der Eingabestelle II (Höllloch/Wasserdom) in der Quelle 21 am linken Muotauer!

Eindeutigere Ergebnisse brachte die Einspeisung von NaCl-Sole in der Versickerungsstrecke der Muota unterhalb der Zwingsbrücke (E VII). Eine Beeinflussung der Karstquellen in Balm – Fugglen erfolgte nur randlich sowie in Abhängigkeit von der Stärke dieser Wasseraustritte (s. Abschn. 5.1.1.). Das NaCl-markierte Wasser floß in erster Linie über den klastischen Aquifer der Talfüllung ab.

Leider wurden im Untersuchungsgebiet die natürlichen Abflußverhältnisse an den Oberflächengewässern infolge ihrer hydroelektrischen Nutzung über die EW Bisisthal und Hinterthal beträchtlich gestört (s. Tafel II). Die trotzdem erzielten Resultate geben aber wertvolle Anhaltspunkte für die nicht nur wissenschaftlich, sondern auch für Wassergewinnungsprojekte (Schutzgebietsfragen, Wasserhaushaltsberechnungen usw.) interessanten Wechselbeziehungen zwischen Karstwasser, Porengrundwasser und Oberflächengewässern. In Hinkunft sollte man bei Untersuchungen an ähnlich beschaffenen Objekten diesem Fragenkomplex vermehrte Aufmerksamkeit widmen.

5.2. Neue markierungstechnische Erkenntnisse

Grundsätzliche Überlegungen über die Anwendbarkeit künstlicher Markierungstoffe in der Hydrogeologie wurden bereits anlässlich des 3. SUWT (R. GOSPODARIĆ & J. G. ZÖTL, 1976) diskutiert. Es soll daher im folgenden nur über Erfahrungen beim kombinierten Markierungsversuch 1979 im Muotatal berichtet werden.

Erfahrungen mit Fluoreszenztracern

Bei der Auswahl der Fluoreszenztracer wurde auf die bei der Markierung von Karstwassersystemen bereits bewährten Farbstoffe Uranin, Eosin, Amidorhodamin G und Rhodamin B zurückgegriffen. Als weiterer Fluoreszenztracer wurde Tinopal eingesetzt, mit dem bei einzelnen früheren Versuchen positive Ergebnisse erzielt worden waren (F. BAUER, H. BEHRENS & M. ZUPAN, 1976). Tinopal ließ dabei aber auch gewisse Nachteile gegenüber den anderen Fluoreszenzstoffen erkennen, vor allem seine schlechte Löslichkeit in den relativ harten und kalten Karstwässern. Um hier eine Sedimentation des in dickflüssiger Suspension vorliegenden Einspeisegutes mit all den nachteiligen Folgen einer verzögerten Ausbringung und damit eines unklaren Durchgangsverlaufes zu vermeiden, wurde bei allen Versuchen zum 4. SUWT (Neuenburger Jura, Langetental und Muotatal) anstelle des pulverförmigen Tinopal CBS-X erstmals das Tinopal ABP-flüssig verwendet, über das allerdings noch keine ausreichenden Erfahrungen aus praktischen Anwendungen vorlagen.

Wie schon für die Versuche im Jura und Langetental beschrieben (I. MÜLLER & J. G. ZÖTL, 1980; Ch. LEIBUNDGUT & T. HARUM, 1981), weist dieses flüssige Tinopal eine geringe Fluoreszenzintensität sowie eine schlechte Reproduzierbarkeit der Konzentrationsbestimmungen in Wasserproben auf. Von einer weiteren Anwendung dieses Tracers muß daher bis zur Klärung der genannten Unregelmäßigkeiten bei der meßtechnischen Erfassung abgeraten werden.

Im Muotatal waren mit der Direktmessung Tinopaldurchgänge mit Konzentrationen von mehr als 10 mg/m^3 im Maximum qualitativ erkennbar. Mit der Aktivkohlemethode konnten Tracerdurchgänge mit Konzentrationen im Eluat von mehr als 1 mg/m^3 erfaßt werden. Von Nachteil erwies sich eine anscheinend hohe und im Zeitablauf stark schwankende Grundlast. Diese wurde im Rahmen der Versuche in Slowenien 1976 und im Neuenburger Jura 1979 noch im Sinne einer anthropogenen Ver-

unreinigung gedeutet. Bei den reinen Hochgebirgskarstwässern zeigte sich aber, daß diese Grundlast offenbar auf natürliche Inhaltsstoffe zurückzuführen ist, die auch in der Aktivkohle angereichert werden. Somit könnte sich der Emissionsbereich des Tinopals, der zunächst sehr günstig erschien – weil von den übrigen benutzten Fluoreszenztracern deutlich verschieden – als Nachteil nicht nur für das Tinopal, sondern auch für mögliche andere Fluoreszenztracer mit ähnlichen spektralen Eigenschaften erweisen.

Der Nachweis der Fluoreszenztracer in den Direktproben und Aktivkohleeluateten erfolgte zunächst fluorimetrisch. Angewandt wurde das Synchron-Scan-Verfahren nach H. BEHRENS (1971), das bei den ähnlichen spektralen Eigenschaften der benutzten Fluoreszenzstoffe noch eine weitgehende Trennung der einzelnen Fluoreszenzsignale ermöglicht. Bei ungleichen Konzentrationsgemischen, in denen der geringer konzentrierte Tracer vom höher konzentrierten überdeckt wird, wird durch mehrfaches Abfahren des in Frage kommenden Wellenlängenbereiches unter verschiedenen pH-Bedingungen der Lösung eine Verbesserung der Aussagemöglichkeit erreicht. Bei DMF-Eluateten aus der Aktivkohle konnten so die meisten in den Quellen des Muotatales auftretenden Farbstoffgemische identifiziert werden. Nicht trennbar waren damit Gemische von Amidorhodamin G extra und Rhodamin B. Darüber hinaus traten bei hohen Eosinkonzentrationen Schwierigkeiten bei der quantitativen Identifikation des Uranins auf; ebenso, aber in geringerem Ausmaß, bereitete der Eosinnachweis in Gegenwart sehr hoher Uraninkonzentrationen gewisse Schwierigkeiten.

Als ein weiteres Verfahren, das gerade bei solchen Überlagerungen von Fluoreszenzstoffen mit ähnlichen spektralen Eigenschaften weiterhilft, sollte die Dünnschichtchromatographie herangezogen werden. Im Rahmen der vergleichenden Versuche für das 4. SUWT im Neuenburger Jura (F. P. BUB & H. HÖTZL, 1980) zeigte die parallele dünnschichtchromatographische und fluorimetrische Auswertung von Direktproben durchaus vergleichbare Resultate. Beim Markierungsversuch im Muotatal sollte nun erstmals in einem Großversuch die Auswertung der Aktivkohleproben auch mit der Dünnschichtchromatographie durchgeführt werden. Nach ersten Erfolgen zeigte sich jedoch, daß eine exakte Erfassung der einzelnen Fluoreszenzstoffe nur bedingt möglich ist, da im Chromatogramm in Abhängigkeit von der einzelnen Probe unterschiedlich deutliche fluoreszierende Schleppspuren die Fluoreszenzsignale der Tracer stören. Diese Schleppspuren gehen offenbar auf durch das DMF gelöste organische Verbindungen zurück, die bei längerer Einhängedauer je nach Quelle angereichert werden können. Durch Veränderung des Laufmittels war es möglich, einzelne Tracer ohne diesen Störeffekt zu erfassen. Das damit verbundene, mehrfache Ansetzen von Chromatogrammen zum Nachweis verschiedener Tracer in einer Probe ist aber gegenüber der fluorimetrischen Methode mit einem wesentlich höheren Kosten- und Zeitaufwand verbunden.

Unsere Untersuchungen zielten daher auf ein anderes Lösungsmittel zur Elution der Fluoreszenzstoffe aus der Aktivkohle hin, um so die Nachteile des DMF auszuschalten. Mit Isobornylacetat konnte auch ein solches gefunden werden, das darüber hinaus z. T. verbesserte Eluierigenschaften für die gängigen Fluoreszenztracer aufweist. Durch die angeführten Schwierigkeiten sowie andere technische Verzögerungen war es jedoch nicht möglich, die Untersuchung der Muotatalproben mit der Dünnschichtchromatographie bis zur Drucklegung dieser Arbeit abzuschließen. Über die endgültigen Ergebnisse soll daher in einer späteren Publikation berichtet werden.

Erfahrungen mit Salzen

Von den für Grundwassermarkierungen geeigneten Salzen wurden Natrium- und Lithiumchlorid eingesetzt. Für die Auswahl der Einspeisepunkte waren nicht zuletzt

Transportfragen mitbestimmend. So wurden 100 kg LiCl auf Galtenäbnet (E IV), einem Bereich, der von kleineren geländegängigen Fahrzeugen erreichbar ist, eingebracht. Das bei diesem Versuch in Form einer 30%igen Sole (17.000 Liter) angelieferte NaCl konnte dagegen mit Hilfe eines Schlauches direkt aus dem Tankwagen dem Muotawasser kontinuierlich beigegeben werden (E VII).

Der Nachweis von Na^+ und Cl^- erfolgte ohne Komplikationen mit den üblichen Methoden. Die in Balm - Fugglen in einigen Quellen gemessenen Werte (s. Abschn. 4.5.2.2, und Fig. 55) waren gering, vor allem wenn man die kurze Distanz von der Versickerungsstrecke (Zwingsbrücke bis Kiessammler) berücksichtigt. Es stellt sich also auch hier - wie schon bei zahlreichen anderen Versuchen - die Frage nach dem Verbleib des Restanteiles des eingespeisten Kochsalzes. Ganz allgemein ergibt sich daraus die Folgerung, daß bei der Verwendung von NaCl (aber auch von KCl) für Markierungszwecke die Einspeismengen entsprechend hoch anzusetzen sind.

Das Lithiumchlorid wurde in E IV gemeinsam mit Tinopal eingebracht. Diese Doppelspeisung sollte einerseits einen Vergleich mit diesem mit gewissen Unsicherheiten behafteten Fluoreszenztracer ermöglichen und andererseits das regionale Versuchsziel absichern. Beide Aufgaben wurden erfüllt. In der nahe gelegenen Quellgruppe in Hinter Seeberg verliefen Durchgang und Ausbringung der beiden Markierungsstoffe etwa parallel (s. Tab. 18 und Fig. 54). In Balm - Fugglen hingegen konnte nur mehr das Lithium zweifelsfrei als Einspeisgut identifiziert werden. Die Messungen erfolgten mit einem Atomabsorptions-Spektralphotometer. Die Nachweisgrenze betrug $0,5 \text{ mg/m}^3$. Da die natürlichen Lithiumgehalte der untersuchten Wasserproben ebenfalls bei diesem Wert oder darunter lagen, war der Durchgang von Tracer-Lithium in drei Quellen in Fugglen einwandfrei nachweisbar.

Das LiCl erwies sich beim kombinierten Markierungsversuch im Muotatal als ein gut brauchbarer Tracer. Vor dem Einsatz dieses Markierungstoffes sind aber immer eingehende Erhebungen der Lithium-Grundwerte der zu untersuchenden Wässer erforderlich (H. BEHRENS & M. ZUPAN, 1976).

Erfahrungen mit Triftstoffen

Von den vielen Versuchen, unterirdische Karstwasserwege mit Hilfe von Triftkörpern zu verfolgen, wird heute nur mehr der Einsatz von gefärbten Lycopodiumsporen und von Phytoplankton praktiziert. Einige Zeit hindurch boten verschieden angefarbte Bärlappsporen die einzige Möglichkeit, in einem ausgedehnten Untersuchungsgebiet mehrere Schwenden gleichzeitig (d. h. also unter denselben hydrologischen und hydrometeorologischen Bedingungen) mit völlig gleichwertigen Markierungsmitteln zu beschicken (V. MAURIN & J. ZÖTL, 1959). Durch die moderne Entwicklung der Untersuchungsverfahren für Fluoreszenztracer wurde in der Zwischenzeit dieser Vorteil aber bei weitem wettgemacht, zumal es sich bei den Triftmethoden ja nur um halbquantitative Verfahren handelt.

Trotzdem kamen beim kombinierten Markierungsversuch 1979 drei verschiedene Sporenfarben (plus fluoreszierende) sowie Phytoplankton zum Einsatz. Das in E IIIa am Wasserberg zusammen mit blaugefärbten Sporen eingespeiste Phytoplankton lieferte aber keine auswertbaren Ergebnisse (s. Abschn. 4.5.4.3.).

Die Kombination von Triftkörpern unterschiedlicher Größe mit löslichen Tracern sollte Aufschlüsse über die Durchlässigkeit bzw. das Seihvermögen differierender Aquifertypen (klastische Ablagerungen, Kluft- und Karstwasserführer) liefern. Als Versuchsergebnis kann festgestellt werden, daß die räumliche Verteilung aller Sporenarten mit den jeweils gemeinsam oder benachbart (E IIIa und E IIIb) eingespeisten übrigen Tracern fast identisch ist. Erhebliche Unterschiede ergaben sich aber z. T. für das Erstauftreten und den Durchgangsverlauf (z. B. für rote Sporen und Uranin

aus E VI). Man muß daraus schließen, daß Sporen und Farbstoffe wenigstens teilweise – in Abhängigkeit von der schwankenden Wasserführung in den unterirdischen Karst- und Kluftwasserbahnen – verschiedene Wege gegangen sind. Auf diese Weise ermöglichte der kombinierte Einsatz von Triftkörpern und löslichen Markierungstoffen Aussagen über Beschaffenheit, Druckverhältnisse, getrennte Hochwasserläufe und dergleichen mehr im Bereich subterranean hydrographischer Verbindungen.

Wie schon bei früheren kombinierten Untersuchungen wurden auch im Muotatal mittels der Sporentrift sowohl in räumlicher als auch in qualitativer Hinsicht Ergebnisse erzielt, die über die Aussagen aller anderen Tracer hinausgehen, so z. B. die Aufdeckung unterschiedlicher Abflußrichtungen im phreatischen und im vadosen Bereich des Hölloch-Systems von der Einspeisestelle II im Wasserdom (s. Abschn. 4.5.4.1. und Fig. 57). Da Festkörper nicht wie lösliche Markierungstoffe einer laufenden Verdünnung unterliegen, kann auch durch einzelne in den Planktonnetzen aufgefangene Sporen – dort, wo andere Tracer bereits unter die Nachweisgrenze abgesunken sind oder ihre Identifizierung wegen ungünstiger Mischungsverhältnisse unsicher wird – ein einwandfreier Nachweis erzielt werden (z. B. bei den Quellen Nr. 15c und 17). Abschließend kann also festgestellt werden, daß bei umfangreicheren kombinierten Untersuchungen auch in Zukunft der Einsatz von Triftkörpern durchaus sinnvoll erscheint.

Ganz neue Aspekte brachten die von W. Käss fluoreszierend präparierten Sporen (s. Abschn. 4.5.4.2.). Diese Methode würde das heute noch sehr umständliche Auszählverfahren der Planktonnetzproben wesentlich vereinfachen. Die hier begonnenen Experimente sollten daher unbedingt weiterverfolgt werden.

Zusammenfassung

Zum 4. SUWT (Symposium for Underground Water Tracing) wurden im Teilprojekt Hinteres Muotatal Markierungen im Multitracingverfahren durchgeführt. In diesem Gebiet wählte man die Karstblöcke Bödmeren – Twärenen und Wasserberg mit Hürital und Galtenäbnet aus. Unter dem Bödmerenwald geben das 142 km lange Hölloch und der 11 km umfassende Schwyzer Schacht einen besonders guten Einblick in die vergangene und in die aktuelle Hydrogeologie.

In der Einführung werden die Grundlagen, Lage, Geologie, Hydrogeologie, Geomorphologie und Klima kurz vorgestellt. Im Kapitel 2 sind die vor 1978 erfolgten Markierungen und ihre Bedeutung genannt, und der Gegensatz zwischen dem jungen Karst der Charetalp – Glattalp mit den zahlreichen Karstquellen und dem reifen Karst Bödmeren – Twärenen, dessen 22 km² im wesentlichen durch eine einzige Quellengruppe („Schlichende Brünne“) entwässert werden, wird herausgearbeitet.

Die Vorarbeiten und Langzeituntersuchungen für das SUWT sind die Themen des 3. Kapitels. Die Jahresabflußdaten, die pH-Werte und Temperaturen sowie die Beziehungen zwischen Jahreszeit und Konzentration der Karbonate im Wasser wurden abgeklärt, und die Verzögerungen der Abflußmengen und der Konzentrationsänderungen gegenüber den meteorologischen Ereignissen erfaßt und interpretiert. Der Abschnitt 3.3. ist den Ergebnissen der Isotopenuntersuchungen ²H, ³H, ¹⁸O gewidmet, teils von weitgestreuten Einzelmessungen, teils vom Langzeitversuch im hydrographischen Jahr 1978/79. Wegen der besonderen Bedingungen im Wasserberggebiet wurde dieses geologisch und hydrogeologisch näher untersucht, besonders im Hinblick auf die Kluftnetze und die Quellen (Abschn. 3.4.).

Der kombinierte Markierungsversuch 1979 bis 1980 (Kap. 4.) sollte einerseits die lokalen und regionalen subterranean Entwässerungsverhältnisse abklären, anderer-

seits die Grundlagen zu einem Vergleich der eingesetzten Markierungsmittel unter den gegebenen Verhältnissen bieten. Es wurden fünf Fluoreszenztracer, zwei Salze, ein Alkylbenzolsulfonat (Detergentia), Lycopodiumsporen in vier Farben und Phytoplankton eingesetzt. Sie wurden auf acht Eingabestellen verteilt, fünf davon Schwinden eine im Hölloch und zwei im Muotafußbett. Beprobte wurden im Hürital 10 Quellen, im hinteren Muotatal 23 Entnahmestellen, im vorderen, bei Ried, 2 Quellen.

Beim Nachweis der Fluoreszenztracer wurde den Identifikationsproblemen bei Gemischen besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Die eingesetzten Lycopodiumsporen erwiesen sich als wertvolle Ergänzung der anderen Markierungsergebnisse. Besonders bemerkenswert ist die Feststellung, daß aus den Eingabestellen IV, V und VI nicht nur lösliche Tracer, sondern auch Sporen durch drei Teildecken der Axendecke (Anteil der schwer- bis undurchlässigen Gesteine ca. 38% der Gesamtmächtigkeit) und ihre Überschiebungsflächen hindurch zu den Quellen von Balm – Fugglen gelangten; Abstandsgeschwindigkeit 20 bis 100 m/h = voll karsthydrographisch wirksamer Wasserweg.

Literatur

- BATSCH, H. et al. (1967): Vergleichende Markierungsversuche im Mittelsteirischen Karst 1966. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **18/19**, 331–404, Graz.
- BATSCH, H. et al. (1970): Kombinierte Karstwasseruntersuchungen im Gebiet der Donauversickerung (Baden-Württemberg) in den Jahren 1967 bis 1969. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **23**, 5–165, Graz.
- BAUER, F. (1967): Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **18/19**, 169–178, Graz.
- BAUER, F. (1967): Die Durchführung und Auswertung von Sporentriftversuchen. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **18/19**, 249–266, Graz.
- BAUER, F. (1972): Weitere Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. Geol. Jb., C, **2**, 19–27, Hannover.
- BAUER, F. et al. (1976): Markierung unterirdischer Wässer – Untersuchungen in Slowenien 1972–1975. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **28**, 7–257, Graz.
- BAUER, F. et al. (1980): Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **32**, 5–100, Graz.
- BAUER, F. & PERLEGA, W. (1980): Ergebnisse des Fluoreszenztracernachweises mittels Aktivkohle. In MÜLLER, I. & ZÖTL, J. G. (Eds.): Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **32**, 70–74, Graz.
- BEHRENS, H. (1971): Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen bei ihrer Anwendung als hydrologische Markierungsstoffe. Geologica Bavarica, **64**, 120–131, München.
- BEHRENS, H. (1973): Eine verbesserte Nachweismethode für Fluoreszenzindikatoren und ihre Anwendung zur Feststellung von Fließwegen im Grundwasser. Z. Deutsche Geol. Ges., **124**, 535–544, Hannover.
- BEHRENS, H. & ZUPAN, Martina (1976): Die Markierung mit Lithium. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **28**, 172–178, Graz.
- BOGLI, A. (1951): Probleme der Karrenbildung. Geogr. Helv., **3**, 191–204.
- BOGLI, A. (1953): Hölloch Muotatal; der „Schleichende Brunnen“. Neue Zürcher Zeitung, Nr. 756, Beilage Technik, Zürich.
- BOGLI, A. (1960a): Kalklösung und Karrenbildung. Z. Geomorph., **Suppl.** 2, 4–21.
- BOGLI, A. (1960b): Karsthydrographische Untersuchungen im Muotatal. Regio Basiliensis, 68–79, Basel.
- BOGLI, A. (1961): Karrentische. Z. Geomorph., 185–193.
- BOGLI, A. (1964a): Die Kalkkorrosion, das zentrale Problem der Verkarstung. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **15/16**, 75–90, Graz.
- BOGLI, A. (1964b): Le Schichtreppenkarst, un exemple de complexe glacio-karstique. Rev. Belg. Géogr., **1/2**, 64–82.
- BOGLI, A. (1966): Karstwasserfläche und unterirdische Karstniveaus. Erdkunde, **20**, 11–19.
- BOGLI, A. (1968a): Höhlenniveaus und Höllochniveaus. 4ème Congr. Int. Spéléol., Ljubljana 1965, 23–27.

- BÖGLI, A. (1968b): Präglazial und präglaziale Verkarstung im hinteren Muotatal. *Regio Basiliensis*, 135-153, Basel.
- BÖGLI, A. (1969): CO₂-Gehalte der Luft in alpinen Karstböden und Höhlen. 5. Int. Kongr. Spéléol., 28/1-9, Stuttgart.
- BÖGLI, A. (1970): Le Hölloch et son karst. Ed. la Baconnière, Neuchâtel (Suisse), franz. und deutsche Fassung.
- BÖGLI, A. (1971): Karstdenudation - das Ausmaß des korrosiven Kalkabtrages. *Regio Basiliensis*, 12/2, 352-361, Basel.
- BÖGLI, A. (1973): Geomorphologische Karte der Glatalp. In „Atlas der Schweiz“, Blatt 9.
- BÖGLI, A. (1976a): Zauber der Höhlen. Zürich (Silva).
- BÖGLI, A. (1976b): CO₂-Gehalte der Luft und Kalkgehalte von Wässern im unterirdischen Karst. *Z. Geomorph., Suppl.* 26, 153-162.
- BÖGLI, A. (1978): Karsthydrographie und physische Spéléologie. Heidelberg (Springer-Verlag).
- BÖGLI, A. (1980): Karsthydrology and Physical Speleology. New York (Springer-Verlag).
- BOURGIN, A. (1946): La Loire et la Vernaison souterraine. *Ann. Spéléol.*, 31-44.
- BUB, F. P. & HÖTZL, H. (1980): Ergebnisse der Dünnschicht-chromatographischen Auswertung von Direktproben. In MÜLLER, I. & ZÖTL, J. G. (Eds.): Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 32, 5-100, Graz.
- BUB, F. P., HÖTZL, H. & WISSER, K. (1979): Dünnschicht-chromatographischer Nachweis von Fluoreszenztracern bei hydrologischen Markierungsversuchen. *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 31, 129-141, Graz.
- BUCHELA, K., MAHRHOFER, J., MAURIN, V., PAPADIMITROPOULOS, T. & ZÖTL, J. (1964): Vergleichende Untersuchungen an neueren Methoden zur Verfolgung unterirdischer Wässer. *Wasserwirtschaft*, 54, 260-270, Stuttgart.
- BURGER, A. (1959): Hydrogéologie du Bassin de l'Areuse. *Bull. Soc. Neuchâteloise Géogr., Suisse*.
- DECHANT, M. (1959): Das Anfärben von Lycopodiumsporen. *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 10/11, 145-149, Graz.
- DOMBROWSKI, H. (1970): Die Ergebnisse mit *Serratia marcescens*. In BATSCH, H. et al.: Kombinierte Karstwasseruntersuchungen im Gebiet der Donauversickerung (Baden-Württemberg) in den Jahren 1967-1969. *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 22, 128-134, Graz.
- DOMBROWSKI, H.: 1980: Die Markierung mit Phytoplankton. In MÜLLER, I. & ZÖTL, J. G. (Eds.): Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 32, 87, Graz.
- GAT, J. (1981): Stable Isotope Hydrology - Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. IAEA, Wien, im Druck.
- GERSTENHAUER, A. & PFEFFER, K.-H. (1966): Beiträge zur Frage der Lösungsfreudigkeit von Kalkgesteinen. *Abh. Karst- u. Höhlenkunde*, A/2.
- GOSPODARIČ, R. & HARIČ, P. (Eds., 1976): Underground Water Tracing. Investigations in Slovenia 1972-1975. Institute Karst Research, 309 p., Ljubljana.
- HANTKE, R. (1961): Tektonik der helvetischen Kalkalpen. *Vierteljahresschrift 106/1 d. Natf. Ges., Zürich*.
- HAUSWIRTH, W. (1913): Geologie der Gebirge südlich von Muotatal, Kaiserstock und Wasserberg. *Eclogae Geol. Helv.*, XII, 601-662.
- KELLER, R. (1962): Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes. Leipzig (B. G. Teubner).
- LEHMANN, O. (1932): Die Hydrographie des Karstes. Wien (Franz Deuticke).
- LEIBUNDGUT, Ch. & HARUM, T. (Schriftl., 1981): Tracerhydrologische Untersuchungen im Längental (Schweiz). *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 33, 5-123, Graz.
- LOISELEUR, B. (1978): Campagne de coloration dans les préalpes de Schwyz. *Stalactite*, 28/L, 13-21, Neuchâtel (Suisse).
- MAURIN, V. (1967): Vorbereitung und Organisation größerer Markierungsversuche zur Verfolgung unterirdischer Wässer. *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 18/19, 311-320, Graz.
- MAURIN, V. & ZÖTL, J. (1959): Die Untersuchung der Zusammenhänge unterirdischer Wässer mit besonderer Berücksichtigung der Karstverhältnisse. *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 10/11, 5-184, Graz.
- MAURIN, V. & ZÖTL, J. (1964): Karsthydrologische Untersuchungen im Toten Gebirge. *ÖWW.*, 16, 112-123, Wien.
- MOSEER, H., RAJNER, V., RANK, D. & STICHLER, W. (1976): Ergebnisse von Messungen des Gehalts an Deuterium, Sauerstoff-18 und Tritium in Wasserproben des Untersuchungsgebietes im Zeitraum 1972-1975. In: Markierung unterirdischer Wässer - Untersuchungen in Slowenien 1972 - 1975. *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 28, 88-107, Graz.
- MOSEER, H. & RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. Stuttgart/Berlin.
- MOSEER, H. & STICHLER, W. (1970): Deuterium measurements on snow samples from the Alps. *Isotope Hydrology 1970*, IAEA, 43-57, Wien.

- MÜLLER, I. & ZÖTL, J. G. (Schriftl., 1980): Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). Steir. Beitr. z. Hydrogeologie 32, 5-100, Graz.
- OBERHOLZER, J. & HEIM, A. (1910): Geologische Karte der Glarneralpen 1 : 50.000. Spez.-Karte Nr. 50, Geol. Komm. der SNG, Bern.
- OBERHOLZER, J. (1933): Geologie der Glarneralpen 1, Textband, Beitr. z. Geol. Karte der Schweiz, N.F. 28, Geol. Komm. der SNG, Bern.
- PERLEGA, W. (1976): Der Nachweis von Fluoreszenzstoffen mittels Aktivkohle. Papers 3. SUWT, 195-201, Ljubljana.
- SCHUEFF, M. (1959): Klimatologie der Schweiz: Monats-, Jahreszeiten- und Jahresmittel der Temperatur, Periode 1931 - 1960. Heft 1C, 1. Teil, Beilagen z. d. Ann. der MZA.
- SIEGENTHALER, U. (1971): Sauerstoff-18, Deuterium und Tritium im Wasserkreislauf. Beiträge zu Meßtechnik, Modellrichtung und Anwendung. Diss. Univ. Bern.
- STRAYLE, G. (1970): Karsthydrogeologische Untersuchungen auf der Ebinger Alb. Jb. geol. L. A. Bad.-Württ., 12, 109-206, Freiburg i. Breisgau.
- TINTANT, H. (1958): La grotte de Béze. „Sous le plancher“, Spéléol.-Club Dijon, 68-73, Dijon.
- UTTINGER, H. (1964): Klimatologie der Schweiz: Niederschlag, Beobachtungsreihen 1901 - 1960. Heft 5 E, 1. - 3. Teil, Beilagen z. d. Ann. d. MZA.
- ZÖTL, J. (1961): Die Hydrographie des nordostalpinen Karstes. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 12/13, 55-183, Graz.
- ZÖTL, J. G. (1974): Karsthydrogeologie. 291 S, Wien/New York (Springer-Verlag).

Summary

Hydrological research in the Muota Valley

With the occasion of the 4th SUWT (Symposium for Underground Water Tracing) in the upper Muota Valley (Swiss Limestone Alps) hydrological investigations by combined tracing experiments were carried out. In this valley the karst areas of Bödmeren-Twärenen and of the Wasserberg with Hürital and Galtenäbnet had been selected for research. The best idea of the former and the actual karst hydrology is formed by many caves, below the Bödmerenwald first of all by the Hölloch with 142 km and by the near Schwyzer Schacht with 11 km of mapped passages.

The first chapter deals with the natural bases of the upper Muota Valley, its geology, hydrology, geomorphology and climate. In the second chapter all tracings executed prior to 1978 and their results are described. Accordingly the contrast between the young karst of Charetalp and Glattalp with many karst springs and the mature karst of Bödmeren-Twärenen (22 km² of catchment area) which is drained essentially by one group of karst springs called „Schlichende Brünnen“ is proved.

The preliminary studies and long-time investigations are subjects of the third chapter. The data of discharge, temperature and pH of the waters and their carbonate concentrations are registered. The influences of seasonal changes on the carbonate concentrations in the Muota Valley are illustrated and the delay of discharge and change in concentrations relating to the meteorological occurrences are recorded and interpreted. Chapter 3.3. deals with the investigations in the natural isotopes ²H, ³H, ¹⁸O. In 3.4. the region of the Wasserberg with regard to the jointing and the springs is described.

The combined tracing experiment during 1979 and 1980 (chapter 4.) should first clear the local and regional subterranean draining conditions and secondly be the bases for a comparison of the tracers used under the actual circumstances. The tracers applied in the Muota Valley were five soluble fluorescent dyes, two salts, an alkylbenzolsulfonate, Lycopodium spores in four different colours and phytoplankton. They were injected into five sinkholes, two spots in the Muota river-bed and one spot in the Hölloch cave. In the Hürital ten springs were examined and in the Muota Valley water samples were drawn at 25 places.

Combined tracing normally effects mixtures of tracers. Fluorescent dye mixtures

cause identification problems, on one hand between uranine and eosine, on the other hand between rhodamine B and sulforhodamine G, the fluorescence peaks of which are very close. These problems are intensively investigated. Tinopal was a problem too because of its high background. The Lycopodium spores turned out to be of great importance compared to the other results.

The fact, that from the input IV, V, VI not only fluorescent dyes but also Lycopodium spores crossed three tectonical nappes (with 38% watertight or low mpermeable rocks) and their plains of dislocation is very exceptional and unusual the velocity was between 20 and 100 m/h which is typical of karst hydrographical activity, caused by open subterranean waterways.

Résumé

Investigations hydrogéologiques dans la vallée de la Muota

Un multitraçage des eaux souterraines fut effectué dans la vallée supérieure de la Muota dans le cadre du 4e SUWT (Symposium for Underground Water Tracing). Ces travaux furent réalisés dans les régions karstiques du Wasserberg, Hürital et Galtentäbnet inclus, et de Bödmeren - Twärenen. Le réseau de drainage karstique fossile et actif est particulièrement bien connu dans le domaine de la forêt de Bödmeren au-dessous de laquelle se trouvent la grotte du „Hölloch“ (longue de 142 km) et le „Schwyzer Schacht“ (long de 11 km).

Le premier chapitre regroupe les données essentielles concernant topographie, géologie, hydrogéologie, géomorphologie et climatologie de la région. Le chapitre suivant nous rappelle les résultats des traçages effectués avant 1978 et leur importance tout en traitant les contrastes entre le karst jeune de la Charetalp - Glattalp avec ses nombreuses sources karstiques et celui, déjà évolué, de la région de Bödmeren - Twärenen. Celle-ci est constituée par un bassin versant de 22 km² dont la plus grande partie des eaux conflue pour aboutir à l'unique groupe de sources karstiques des „Schlichende Brünnen“.

Les travaux préparatoires et les expériences à long terme pour le symposium sont présentés dans le troisième chapitre. Les débits annuels, l'évolution de la température et du pH ainsi que les concentrations de carbonate y sont interprétés en tenant compte des événements météorologiques.

Le sous-chapitre 3.3. est consacré aux résultats des analyses nombreuses sur les isotopes naturels de l'eau (²H, ³H, ¹⁸O) qui furent accomplies pour mettre en évidence des événements isolés ainsi que les tendances hydrologiques de l'année 1978/79. La région du Wasserberg fut l'objet d'études géologiques et hydrogéologiques détaillées, en raison de ses caractéristiques, afin d'examiner les relations entre la fracturation de ce massif et la position des sources karstiques (chapitre 3.4.).

Le multitraçage (chapitre 4.) avait pour but de déterminer les conditions locales et régionales de l'écoulement souterrain tout en comparant l'évolution des traceurs en fonction des données géologiques et hydro-météorologiques disponibles. Cinq traceurs fluorescents, deux sels, un alcybenzolsulfonate (un détergent), des spores de Lycopodium, colorées en quatre couleurs différentes, et du phytoplancton furent injectés en huit points différents, cinq dans des pertes, un dans la grotte du „Hölloch“ et deux dans le lit de la Muota. Des échantillons furent pris dans dix sources de l'Hürital, vingt-trois dans la partie supérieure de la vallée de la Muota et deux dans sa partie inférieure à Ried.

Il fut porté une attention particulière aux problèmes relatifs à l'identification de plusieurs traceurs fluorescents se retrouvant dans un même échantillon. Les spores de Lycopodium se sont avérées très précieuses pour compléter les renseignements obtenus.

nus par l'utilisation des autres traceurs. Il est particulièrement important de souligner le fait que les spores, injectées simultanément avec les traceurs solubles à partir des points IV, V et VI, traversèrent également les trois digitations de la nappe de l'Axen, bien qu'environ 38% de l'épaisseur de la série sédimentaire soient constitués de roches pratiquement imperméables. Ces spores sont parvenues, en traversant les plans de charriage, jusqu'aux sources de Balm – Fugglen avec une vitesse de déplacement de 20 à 100 m/h, ce qui correspond à un système d'écoulement karstique actif.

Dank

Folgenden Firmen und Institutionen, die nicht schon in der Einleitung erwähnt wurden, haben wir für ihre Unterstützung zu danken:

Der Association Internationale pour la Recherche Spéléologique et Scientifique sur la Charetalp (Leiter: B. Loiseleur) in Strasbourg für die Anpassung ihrer Forschungsarbeiten an das von der Arbeitsgruppe Tracer durchgeführte Programm.

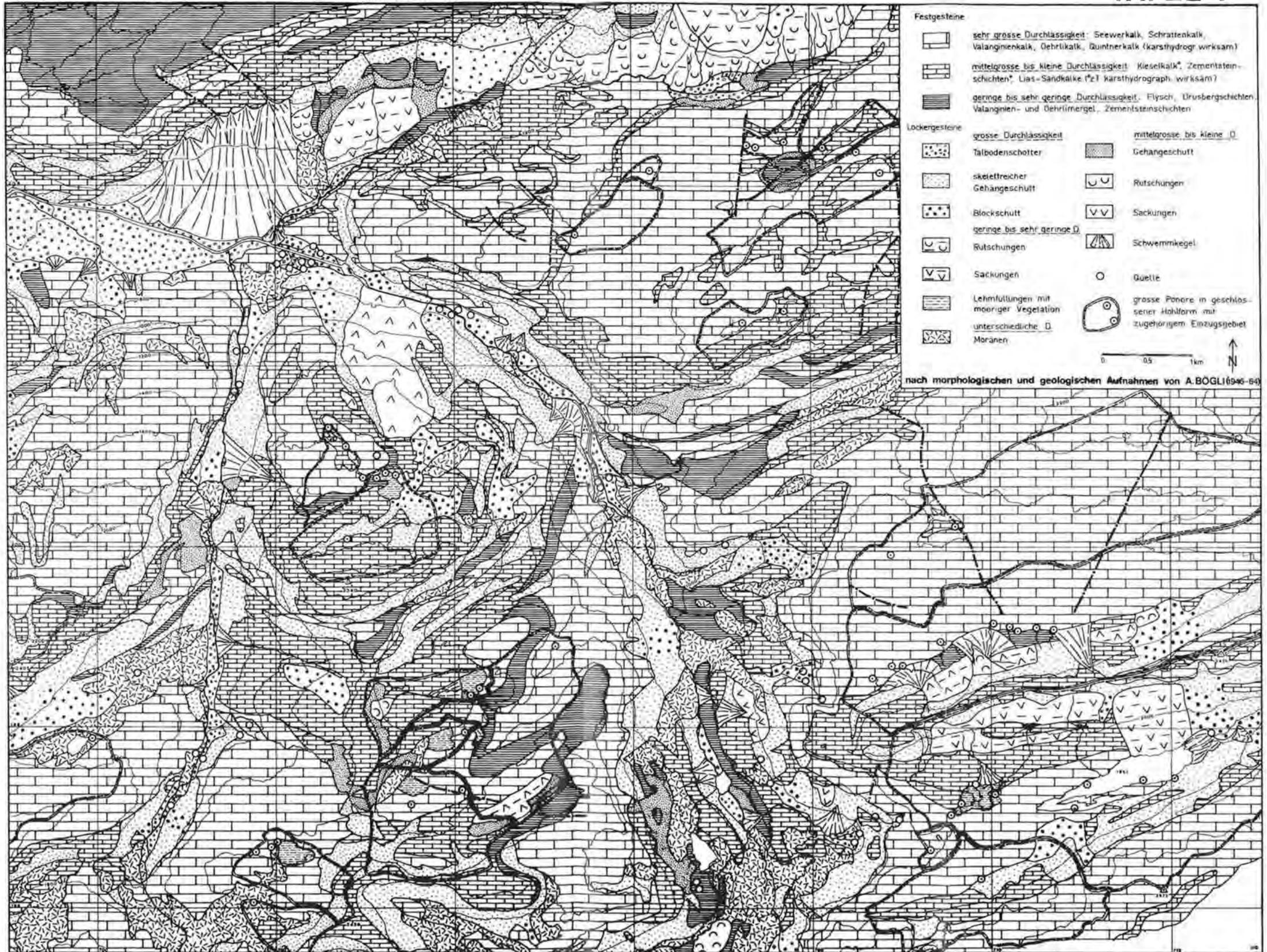
Dem Kantonalen Amt für Zivilschutz in Bern für die Bereitstellung von technischem Material.

Den chemischen Werken Hüls in Marl (BRD) und den BASF AG in Ludwigshafen für die Lieferung von Detegentia bzw. Eosin für die Markierung und der Firma Zeiss für die leihweise Überlassung eines Fluoreszenzmikroskopes.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sind wir für die Gewährung einer Sachbeihilfe zu Dank verpflichtet. Diese ermöglichte die Mitarbeit der Karlsruher Gruppe bei den Geländeversuchen im Neuenburger Jura und im Muotatal für das 4. SUWT. Zugleich konnte damit die apparative Ausstattung zur Entwicklung dünnschichtchromatographischer Untersuchungsmethoden beschafft werden.

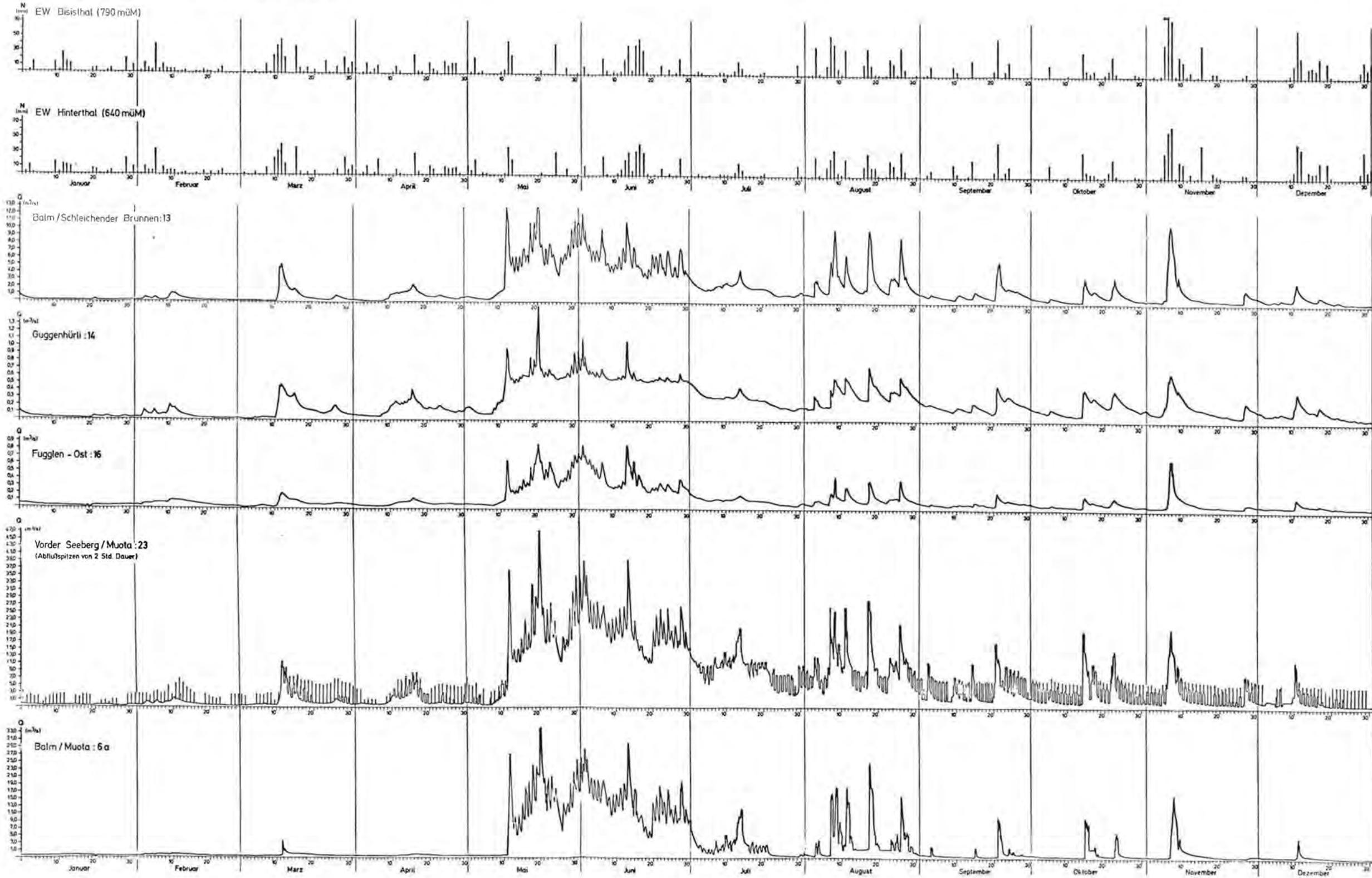
Verzeichnis der Autoren und Mitarbeiter

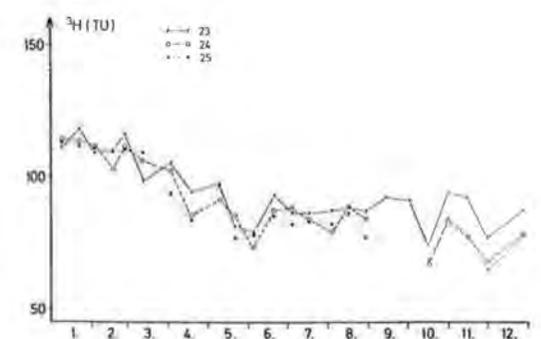
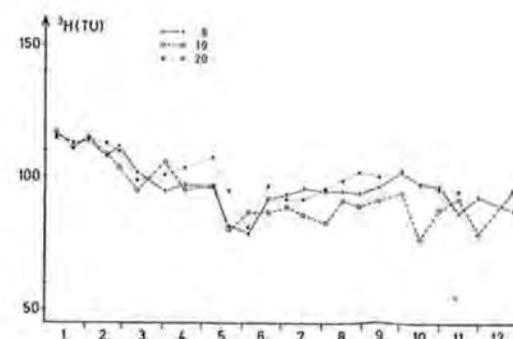
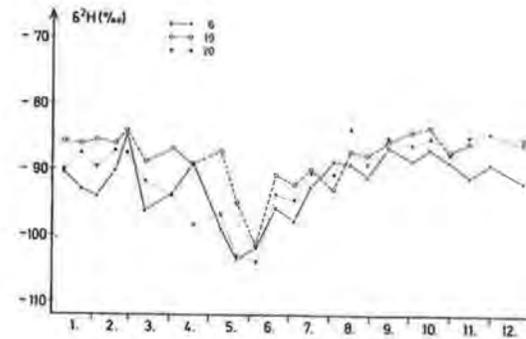
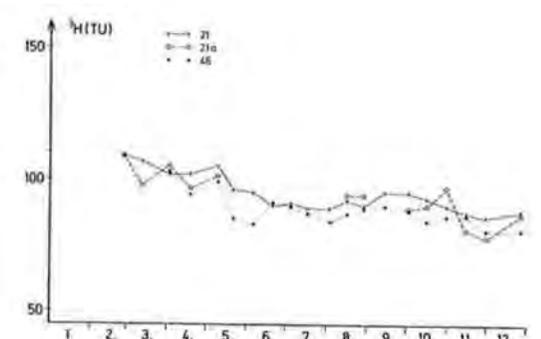
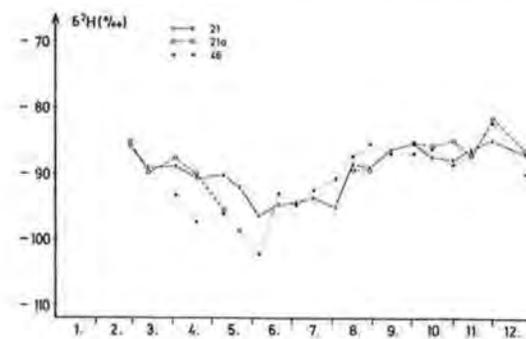
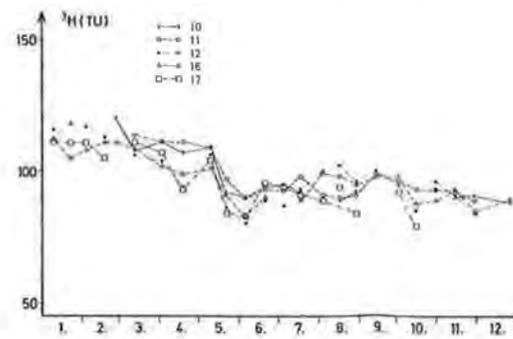
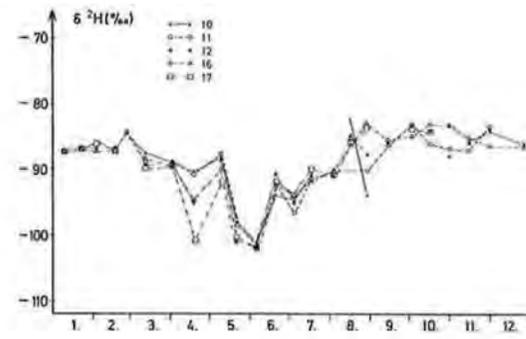
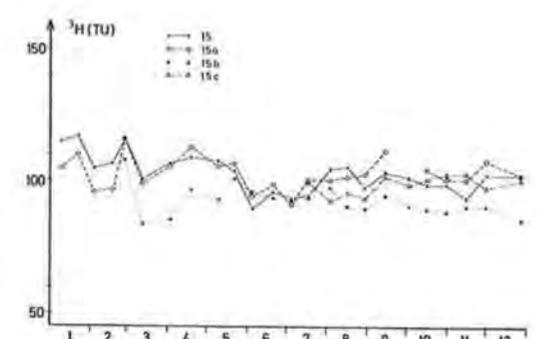
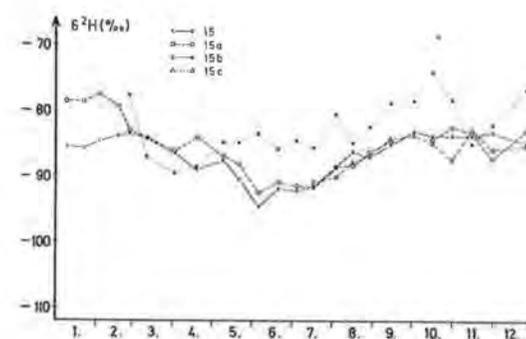
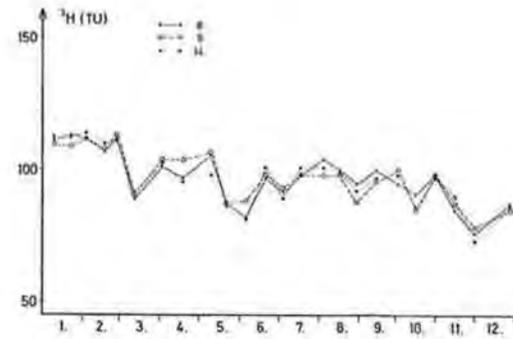
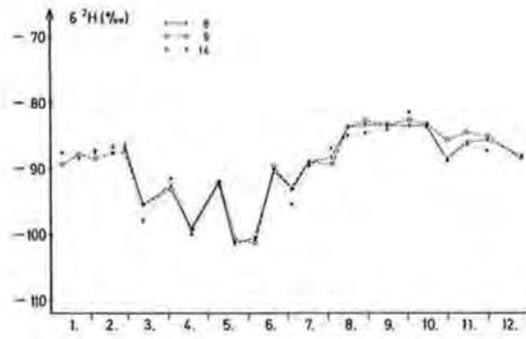
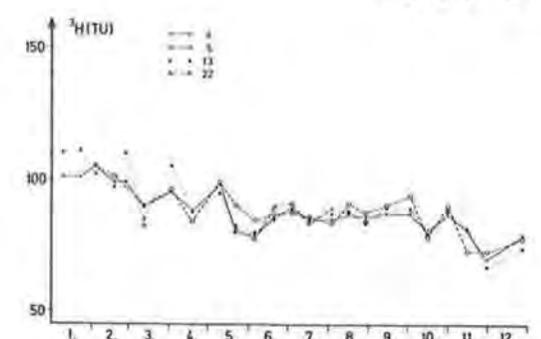
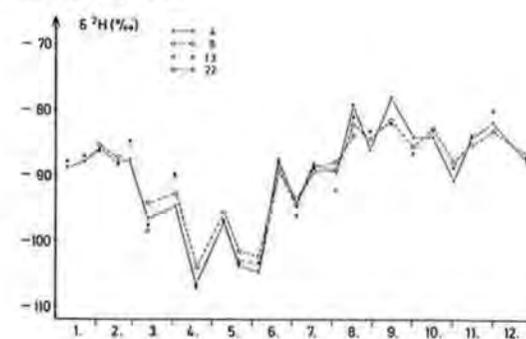
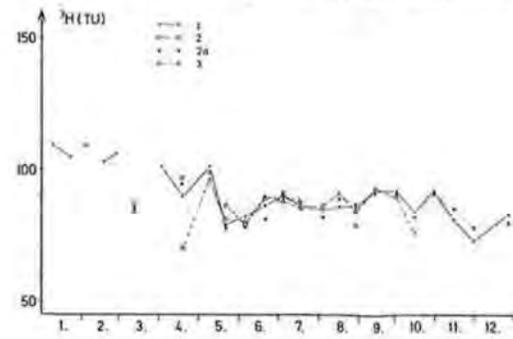
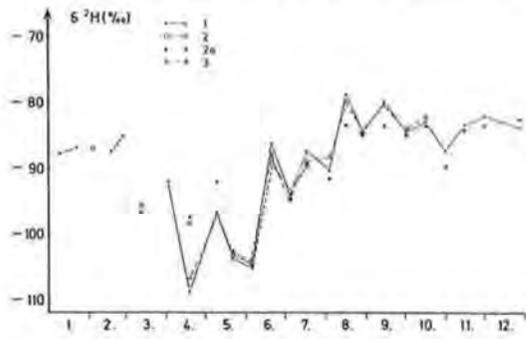
- Dipl.-Ing. H. BEHRENS, GSF-Institut für Radiohydrometrie, Ingolstädter Landstraße 1, D-8042 Neuherberg bei München.
- Prof. Dr. A. BÖGLI, Geographisches Institut, Universität Zürich, Blümlihalpstraße 10, CH-8006 Zürich.
- Dr. H. DOMBROWSKI, Dreikönigstraße 17, D-7800 Freiburg im Breisgau.
- Prof. Dr. H. HÖTZL, Institut für Geologie, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-7500 Karlsruhe.
- Dr. W. KÄSS, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Albertstraße 5, D-7800 Freiburg im Breisgau.
- Dipl.-Geol. W. KRAUS, Institut für Geologie, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-7500 Karlsruhe.
- Dr. Ch. LEIBUNDGUT, Geographisches Institut, Universität Bern, Abt. Gewässerkunde, Hallerstraße 12, CH-3012 Bern.
- Prof. Dr. V. MAURIN, Institut für Geologie, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-7500 Karlsruhe.
- Prof. Dr. H. MOSER, GSF-Institut für Radiohydrometrie, Ingolstädter Landstraße 1, D-8042 Neuherberg bei München.
- Ing. V. RAJNER, Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Geotechnisches Institut, Postfach 8, A-1031 Wien.
- Dr. D. RANK, Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Geotechnisches Institut, Postfach 8, A-1031 Wien.
- Dipl.-Phys. W. STICHLER, GSF-Institut für Radiohydrometrie, Ingolstädter Landstraße 1, D-8042 Neuherberg bei München.
- Univ.-Doz. Dr. H. ZOJER, Forschungszentrum Graz, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz.
- Prof. Dr. J. G. ZÖTL, Forschungszentrum Graz, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz.



NIEDERSCHLAGS-UND ABFLUSSKURVEN FÜR DAS JAHR 1979 IM HINTEREN MUOTATAL

(Lage der Meßstellen s. Textfiguren)





HYDROGEOLOGISCHE KARTE DES WASSERBERGES

Gezeichnet unter Benützung
von W. HAUSWIRTH 1913

-  gut verkarstungsfähige Gesteine
Schraffenkalk, Quinterkalk
-  minder verkarstungsfähige Gest.
Kieselkalk, Valangenkalk, Öhrlikalk
-  nicht verkarstungsfähige Gesteine
Drusbergschichten, Valangenergel, Öhrliermergel, Zementsteinschichten

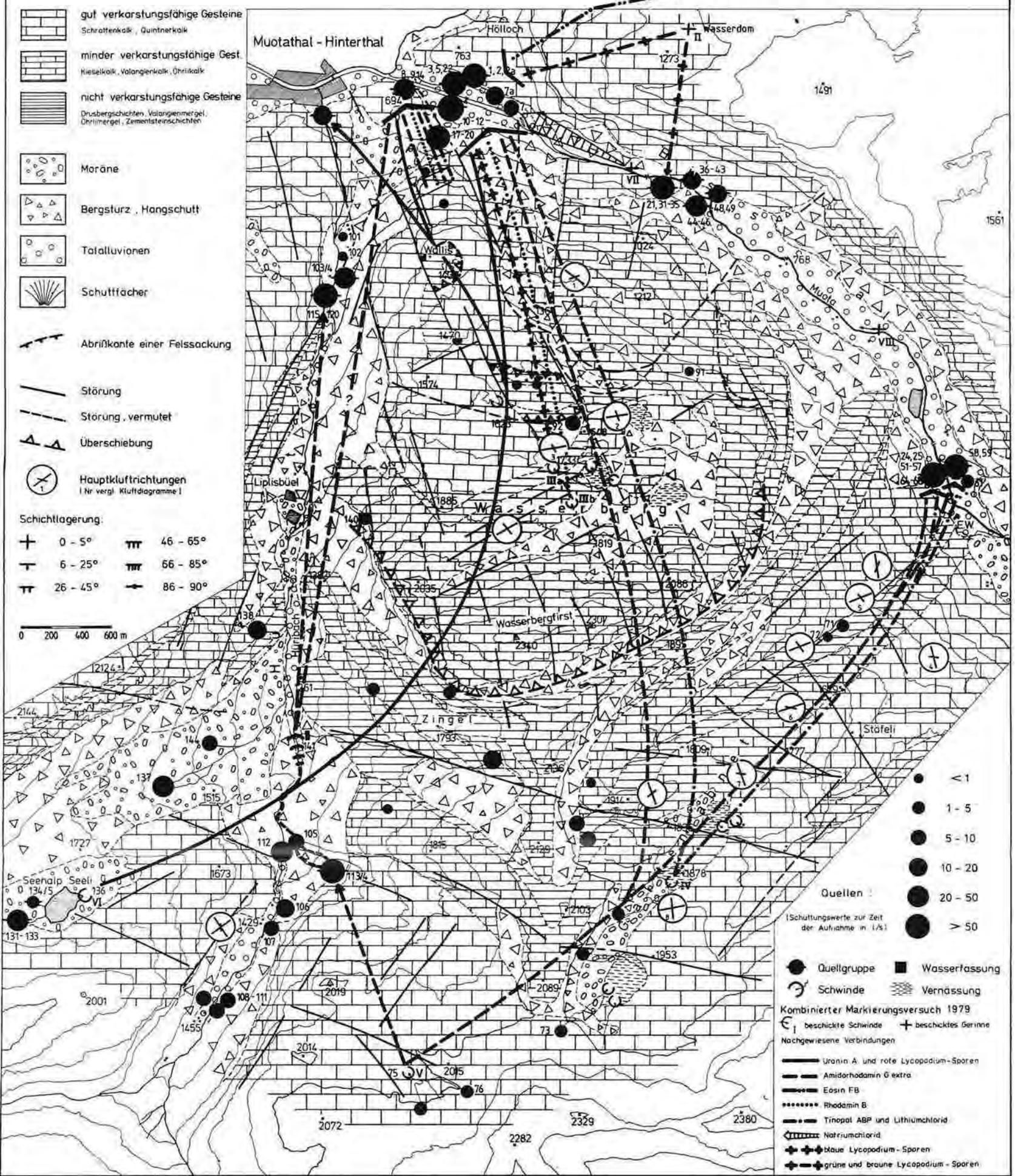
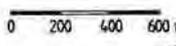
-  Moräne
-  Bergsturz, Hangschutt
-  Talalluvionen
-  Schuttfächer

-  Abrißkante einer Felsackung
-  Störung
-  Störung, vermutet
-  Überschiebung

-  Hauptklufttrichtungen
(Nr. vergl. Kluftdiagramme I)

Schichtlagerung.

	0 - 5°		46 - 65°
	6 - 25°		66 - 85°
	26 - 45°		86 - 90°



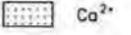
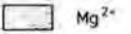
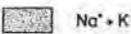
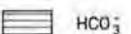
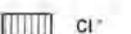
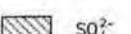
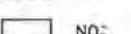
-  < 1
 -  1 - 5
 -  5 - 10
 -  10 - 20
 -  20 - 50
 -  > 50
- Quellen:
(Schüttungswerte zur Zeit der Aufnahme in l/s)

-  Quellgruppe
 -  Wasserrfassung
 -  Schwinde
 -  Vernässung
- Kombinierter Markierungsversuch 1979
-  beschickte Schwinde
 -  beschicktes Gerinne
- Nachgewiesene Verbindungen
-  Uranin A und rote Lycopodium-Sporen
 -  Amidorhodamin G extra
 -  Eosin FB
 - Rhodamin B
 - Tinopal ABP und Lithiumchlorid
 - Natriumchlorid
 - blaue Lycopodium-Sporen
 - grüne und braune Lycopodium-Sporen

HYDROCHEMISCHE KARTE DES WASSERBERGS MUOTATAL

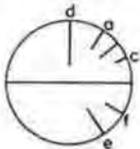
Teil I: Gesamtionenverteilung

Ionenanteile >1 mval%

-  Ca²⁺
-  Mg²⁺
-  Na⁺ + K⁺
-  HCO₃⁻
-  Cl⁻
-  SO₄²⁻
-  NO₃⁻

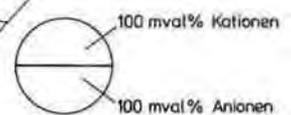
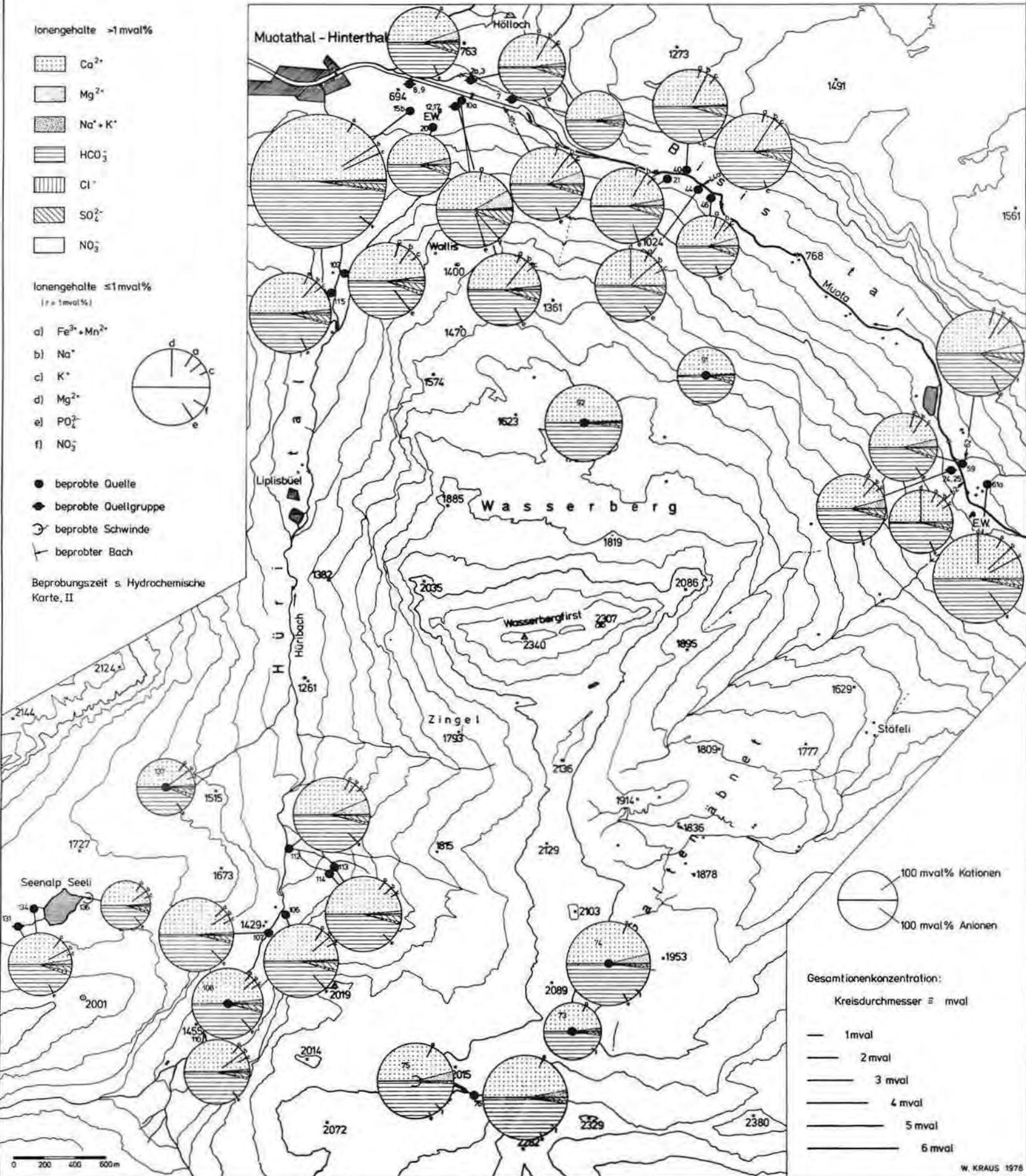
Ionenanteile ≤1 mval%
(r = 1 mval%)

- a) Fe³⁺ + Mn²⁺
- b) Na⁺
- c) K⁺
- d) Mg²⁺
- e) PO₄³⁻
- f) NO₃⁻



-  beprobte Quelle
-  beprobte Quellgruppe
-  beprobte Schwinde
-  beprobter Bach

Beprobungszeit s. Hydrochemische Karte, II

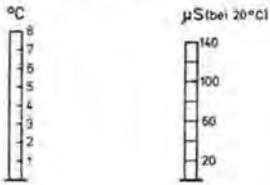


- Gesamtionenkonzentration:
Kreisdurchmesser = mval
-  1 mval
 -  2 mval
 -  3 mval
 -  4 mval
 -  5 mval
 -  6 mval

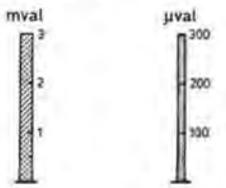
HYDROCHEMISCHE KARTE DES WASSERBERGS MUOTATAL

Teil II : Temperatur, Leitfähigkeit, Gesamthärte, Sulfat

Temperatur Leitfähigkeit



Gesamthärte Sulfat



- am 18.10.1978 beprobte Quelle
- am 18.10.1978 beprobte Quellgruppe zT Mittelwerte
- am 18.10.1978 beprobter Bach
- am 10.9.1978 beprobte Quelle
- am 10.8.1978 beprobte Quelle
- ⊗ beprobte Schwinde (Datum wie bei Qu.)

