

Hydrogeologische Untersuchungen im Bereich der Großrutschung des Gradenbachtals bei Döllach/Kärnten

Von H. ZOJER & J. ZÖTL (Graz)

1. Vorbemerkung

Das Gradenbachtal war im Bereich seiner Mündung in das Mölltal im Jahre 1965 Schauplatz einer katastrophalen Großrutschung. Vom 1. bis 3. September dieses Jahres fielen im Untersuchungsgebiet fast 140 mm Niederschlag, was etwa einem Fünftel der Jahressumme entspricht. Im Gefolge dieses Starkregens kam es in verschiedenen Bereichen des Gradenbachtals, vor allem aber in großem Ausmaß am Berchtoldhang (Fig. 1), d. i. am südexponierten Ausgang des Tales zur



Fig. 1: Der Berchtoldhang am Ausgang des Gradenbachtals in das Mölltal. Das unruhige Relief weist bereits auf die instabilen Hangverhältnisse. Die Einspeisungsstellen für den kombinierten Markierungsversuch 1971 sind durch Punkte markiert (1 = Eingabestelle von Kalisalz, 2 = Einspeisung von Sulforhodamin-G-extra, 3 = Eingabe von Uranin und Indium).

Möll, zu einer großflächigen Rutschung. Die dadurch entstandene Mure hat die Ortschaft Putschall verschüttet. Am Hang selbst mußte der direkt über den Anrissen gelegene Berchtoldhof aufgegeben werden, weiter hangaufwärts entstanden örtlich meterbreite Spalten.

Diesen vernichtenden Hangbewegungen folgte ein Jahr später eine weitere Katastrophe, die Ortschaft Putschall mußte zum größten Teil aufgegeben werden. Mehr als 1 Mill. m³ Murenmaterial ergoß sich in das Mölltal hinaus und gefährdete sogar die etwas talabwärts gelegene Siedlung Döllach.

Im Auftrag der Gebietsleitung für das Drau- und Mölltal der Wildbach- und Lawinenverbauung wurden in diesem Bereich Untersuchungen über die Wasserzirkulation im Bergleib und deren Zusammenhang mit der weiterhin starken Bewegungsbereitschaft des Hanges durchgeführt.¹

2. Die hydrogeologischen Verhältnisse

Was den **geologischen Aufbau** betrifft, wird das Untersuchungsgebiet in erster Linie von der sogenannten Matreier Schuppenzone — von Ch. EXNER (1964) auch als Gneislamelle 5 bezeichnet — geprägt. Diese Formation, im allgemeinen nur sehr geringmächtig, besteht aus einer Folge von Quarzphylliten, Kalkschiefern, Quarziten und dolomitischen Gesteinen, die bei einem NNW-SSE-Streichen mittelsteil bis steil nach W einfallen. Im Hangenden grenzt die Matreier Zone nach einer diaphthoritischen Übergangslage diskordant an die altkristalline Schubmasse der Schobergruppe. So wird der westliche Teil des Untersuchungsgebietes von Granitgneisen des Fleckenkopfes, Glimmerschiefern und Granatglimmerschiefern aufgebaut. Im Liegenden der Matreier Schuppen breitet sich konkordant der Schiefermantel der zentralen Gneiskerne aus, bestehend aus Schwarzschiefern, Kalkglimmerschiefern und Serpentinlagen.

Für die **hydrologische Situation** von großer Bedeutung sind am linken, d. h. am Rutschhang des Tales, weit oberhalb der jungen Rutschungsnischen in 1800 m und höher gelegene Zerrungsspalten. Wir fassen sie im Sinne von J. STINI (1941, 1942) als Zeugen des Talzuschubes auf. Sie öffnen Wasserwege tief in den Bergleib und können zur Zeit der Schneeschmelze oder bei Starkregen beachtliche Wassermengen aufnehmen.

Untersuchungen der Großrutschung selbst (G. KRONFELLNER-KRAUS) ergaben zwischen 1968 und 1973 eine Verschiebung des Hangfußes von durchschnittlich 36 cm pro Jahr und eine Zunahme der Hangbewe-

¹ Herrn Oberforstrat Dipl.-Ing. Dr. STRITZL danken wir für die Genehmigung der Veröffentlichung der Studie. Eine Kurzfassung dieses Aufsatzes erschien in den Arbeiten aus dem Geographischen Institut der Universität Graz, Heft 19, 1973 (Morawetz-Festschrift).

gungen mit der Höhe bis zu einem Ausmaß von 128 cm/Jahr knapp unterhalb des Eggerwiesen-Kopfes. Durch die starke Erosionstätigkeit des Gradenbaches am Fuß der Großrutschung wurde die Labilität des Hanges noch verstärkt. Diesem Umstand Rechnung tragend, versuchte man durch die Errichtung einer Sperrenstaffelung im besonders kritischen Bereich des Gradenbaches und dem damit entstehenden Schuttpolster den Hangfuß zu belasten und zu stabilisieren. Obwohl die Betonsperren durch Stahlarmierungen verstärkt wurden, hielten sie dem Bergdruck nicht stand (Belastung bis zu 100 kp/cm²) und zeigten bald erhebliche Schäden. So wurde z. B. der linksuferige Sperrenteil bei einigen Anlagen um etliche Zentimeter angehoben.

Von den Organen der Wildbachverbauung wurden eine exakte Aufnahme der Wasseraustritte sowie langfristige Messungen der Quelltemperaturen, Quellschüttungen und des Niederschlages durchgeführt.

Eine Übersicht über die Lage der Quellen gibt Fig. 2. Als Schüttungsangaben wurden Mittelwerte aus 10- bis 14maligen Messungen zwischen Juli 1968 und Jänner 1971 verwendet. Die höchstgelegene Quellgruppe befindet sich nördlich der Eggerwiesen im Talschluß des Berchtoldgrabens. Ihr Einzugsgebiet liegt in den Südosthängen des Fleckenkopfes im Bereich der Granitgneise, verschuppten Phyllite und Diaphtorite. Je nach Lage und vorherrschendem Gestein des Einzugsgebietes weisen die Quellen einen verschiedenen Habitus auf (verschiedener Chemismus, unterschiedliche Isotopengehalte und andere Ergebnisse beim Markierungsversuch). Dies gilt auch für die Quellen Nr. 19, 20 und 21 auf der Thaler Alm.

Ebenso unterschiedlich ist der Mechanismus der unterirdischen Entwässerung im Einzugsgebiet der Quellen südöstlich der Eggerwiesen. Dies ist z. T. dem Auftreten von Folgequellen zuzuschreiben.

Eine weitere, tiefer gelegene Quellzone liegt in west-östlicher Richtung vom Wasseraustritt Nr. 51 bis zu Nr. 11, wobei auch hier, besonders im zentralen Bereich, ein Teil der Wasseraustritte Folgequellen sind. Einen eigenen Bereich entwässert die Quelle Nr. 49, während die Gruppe im Gebiet der rezenten Anrisse wieder unterschiedlichen Charakter aufweist.

Aus dreijährigen Aufzeichnungen der Wildbachverbauung über Niederschlag und Abfluß im Einzugsgebiet des Berchtoldbaches geht hervor, daß im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) zwischen 30 und 60% des Niederschlages als Abfluß abströmen. Abschmelzungsvorgänge, die bis in den Juni hineinreichen, sind in dieser Kalkulation inbegriffen, so daß man in den Sommermonaten eine Verdunstungsrate von mindestens 60% anschätzen muß. Im Jahresdurchschnitt dürfte der Wert jedoch nicht an 40% heranreichen.

Für den Zeitraum der Quellmessungen konnte eine mittlere Jahresniederschlagsmenge von etwa 780 mm (aus den Werten der Station Fleißner oberhalb Putschall) errechnet werden. Die Summe der Ab-

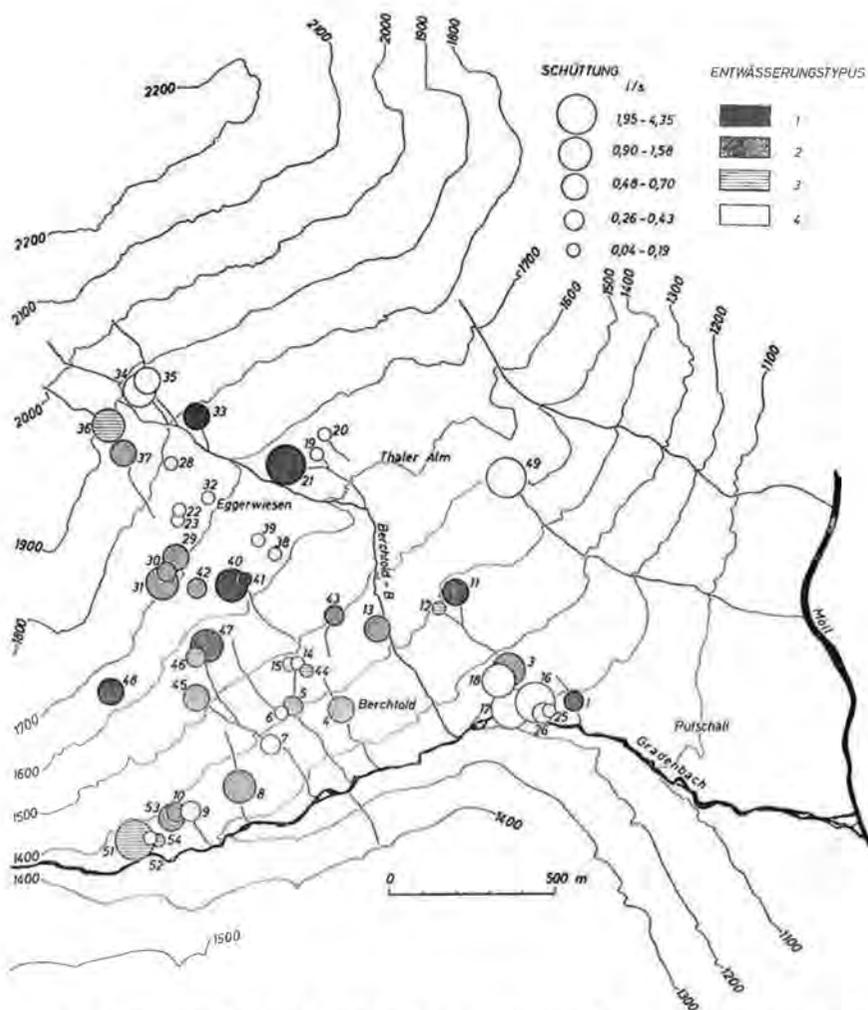


Fig. 2: Die Lage der Quellen am Berchtoldhang. Die Signaturen innerhalb der Kreise entsprechen dem aufgrund von Schüttungs- und Temperaturschwankungen gegebenen Entwässerungstypus der Wasseraustritte (1 = sehr tiefreichend, 2 = tiefreichend, 3 = seichtliegend, 4 = sehr seichtliegend).

flußhöhen aller Quellen — auch auf ein Jahr umgerechnet — beträgt 420 mm. Da diese Angabe nur den unterirdischen Abfluß durch Quellen betrifft, verbleiben für den Oberflächenabfluß und für die Verdunstung zusammen nur mehr ungefähr 45⁰/₀. Ein Anteil von nur wenigen Prozent für den Oberflächenabfluß ist für Schiefergebiete sehr unge-

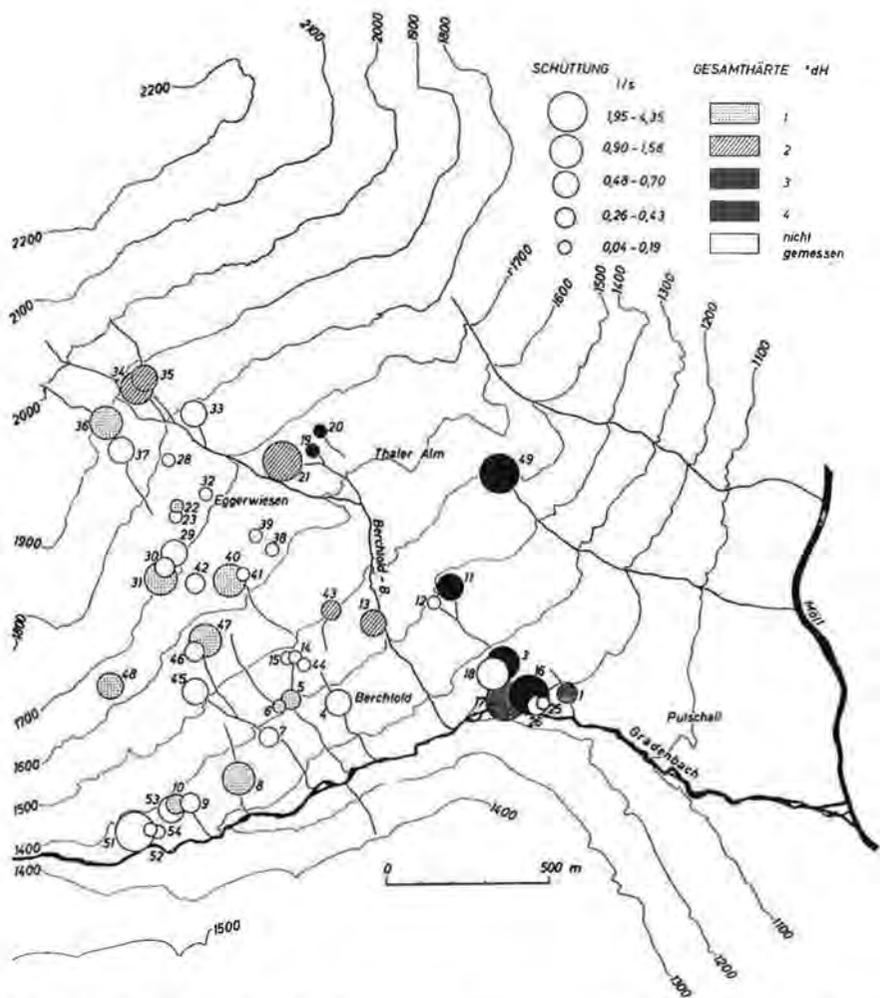


Fig. 3: Die Gesamthärte (in deutschen Härtegraden) von Quellwässern am Berchtoldhang (1 = 1,4–4,5; 2 = 8,1–14,0; 3 = 22,0–25,0 und 4 = 31,5–33,0 d. H.).

wöhnlich, wenn auch im vorliegenden Bereich der Untergrund durch eine ihm eigene Tektonik wasseraufnahmefähiger geworden ist. Vieles deutet darauf hin, daß das Auftreten von Folgequellen den tatsächlichen unterirdischen Abfluß verfälscht und die Summierung aller Quellschüttungen einen zu hohen Wert für den unterirdischen Abfluß ergibt.

Ähnlich wie Schüttungs- und Temperaturmessungen an Quellen geben auch chemische Untersuchungen der Wässer einen Aufschluß

über hydrogeologische Zusammenhänge. So wurde im Zuge der Voruntersuchungen die Gesamthärte ausgesuchter Quellwässer bestimmt, wobei sich eine verblüffende Übereinstimmung mit den geologischen Gegebenheiten ergab (Fig. 3). Die nahezu N—S gerichteten verschiedenen Gesteinspakete bringen eine vertikale Abgrenzung der Wässer nach ihren Einzugsgebieten mit sich. So entwässern die Quellen im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes hauptsächlich Kalkglimmerschiefer und führen entsprechend harte Wässer. In den mittleren Bereichen, etwa in der Umgebung des Berchtoldbaches, zeigen die Quellen eine Gesamthärte von 10 bis 15° dH. Das Einzugsgebiet dieser Wässer dürfte z. T. noch in die Kalkglimmerschiefer hineinreichen, hauptsächlich jedoch in den quarzitisch-phyllitisch-diaphtoritischen Gesteinen liegen. Gegen W hin werden die Quellwässer immer weicher (Gesamthärte 5° dH).

Der Berchtoldhang ist morphologisch stufenartig gegliedert. Die flachen Geländeabschnitte werden von z. T. recht mächtigen Moränenablagerungen überdeckt, die in erster Linie aus Granitgneisen, Glimmerschiefern und Amphiboliten bestehen. Ihre Wässer sind im allgemeinen sauer und weich. Da im Gebiet der Thaler Alm und südlich davon außerordentlich harte Wässer austreten, weist dies auf eine Entwässerung, die nicht allein aus der Moräne stammt.

3. Tritiummessungen; die Meßdaten und ihre Interpretation

Tritium (T oder ^3H) ist das radioaktive überschwere Wasserstoffisotop mit einer Halbwertszeit von 12,26 Jahren. Die Messung erfolgt in absoluten Werten, den sog. Tritium-Einheiten (T. U.). Ein T. U. ist gleich 1 Atom ^3H auf 10^{18} Atome ^1H . Der natürliche Tritiumgehalt des Niederschlagswassers (produziert durch die Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit atmosphärischen Komponenten) würde etwa 10 T. U. betragen. Durch die thermonuklearen Explosionen erfolgte eine gewaltige Impfung der Atmosphäre mit Tritium, deren Höhepunkt im Jahre 1963 zu verzeichnen war. Seither sank der Tritiumgehalt der Niederschläge einem jahreszeitlichen Gang folgend wieder ab und liegt in Mitteleuropa nunmehr etwa bei einem Jahresmittel von 100 T. U.

Tritiummessungen können für die Beurteilung der Speicherung von Niederschlagswasser im Untergrund sehr bedeutsam sein, es ist dazu jedoch notwendig, den T-Gehalt der Niederschläge zu kennen.

Tabelle 1 weist die im Bereich des Gradenbachtals gemessenen Werte aus.

Fig. 4 illustriert die Interpretation der in den gesammelten Monatsniederschlägen gemessenen Tritiumwerte. Kurve A zeigt den Gang des Tritiumgehaltes der Niederschläge bei Wien. Im Vergleich zu anderen Jahren ist der Märzwert abnorm hoch, im allgemeinen zeigt die Jahreskurve die höchsten Werte im Juni. Da die Jahreskurve verschiedener

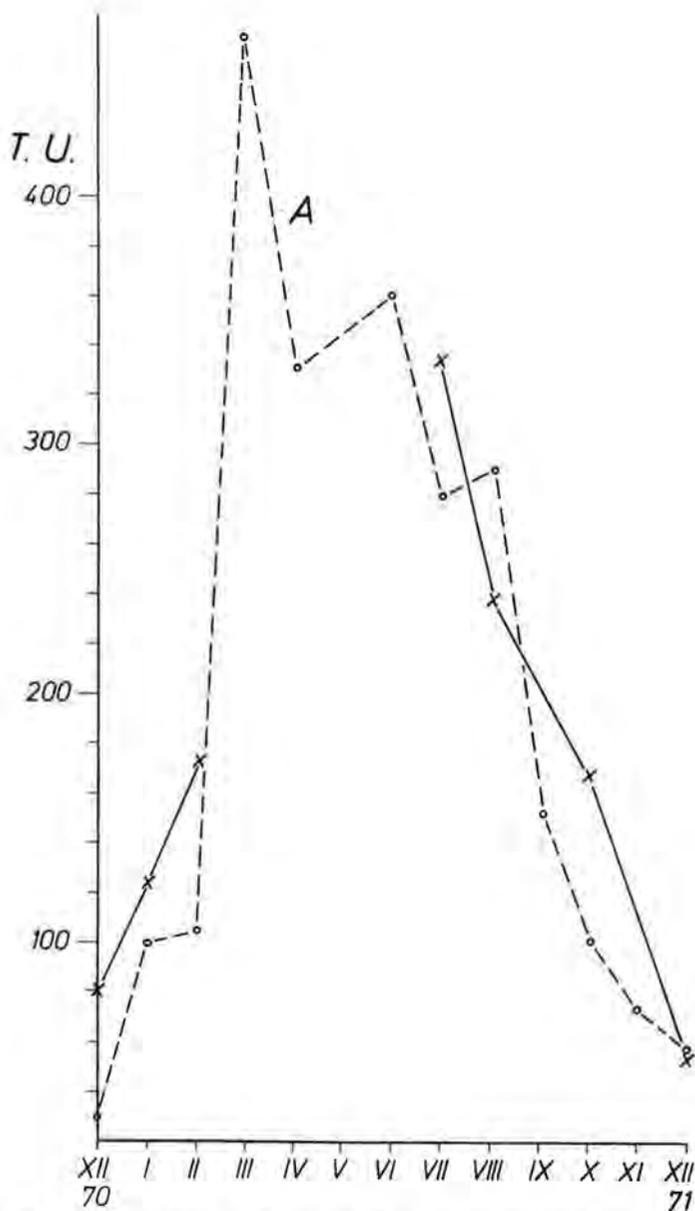


Fig. 4: Der Jahrgang 1971 der T-Werte im Niederschlag bei Wien (strichliert, Kurve A) und die im Raum Gradenbach gemessenen T-Werte des Niederschlags (durch Vollstriche verbunden).

Stationen zwar verschieden hohe Werte aufweisen können, in der Regel aber parallel verlaufen (Maximum im Sommer, Minimum im Winter), reichten die nicht von allen Monaten vorliegenden Meßwerte der Niederschläge im Gradenbachtal für die Aussage aus, daß der mittlere T-Gehalt der Niederschläge im Sommerhalbjahr 1971 bei etwa 300 T. U., jener des vorhergehenden und nachfolgenden Winterhalbjahres bei etwa 120 T. U. lag.

Tabelle 1: Tritiumwerte (T. U.) von Quellwässern und Niederschlägen (Monatsdurchschnitt) aus dem Gebiet des Gradenbachtals.

Quelle Nr.	15. 4. 1971	3. 9. 1971	31. 10. 1971	11. 1. 1972
1	120 ± 7	127 ± 7	—	119 ± 6
5	—	249 ± 13	353 ± 13	254 ± 13
6	260 ± 14	—	—	—
8	296 ± 15	258 ± 13	273 ± 14	274 ± 14
11	311 ± 16	—	—	—
12	306 ± 16	284 ± 15	281 ± 15	275 ± 14
17	265 ± 14	—	—	—
19	266 ± 14	—	—	—
20	276 ± 14	—	—	—
21	259 ± 14	246 ± 13	239 ± 12	—
40	230 ± 12	234 ± 12	236 ± 12	241 ± 12
42	231 ± 12	—	—	—
49	322 ± 17	280 ± 15	261 ± 14	241 ± 12
B	230 ± 12	—	—	—

B = Berchtoldbach

Niederschlag:

XII (1970)	I (1971)	II	III	IV	V	
80 ± 5	122 ± 7	174 ± 9	—	—	—	
VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII (1971)
—	334 ± 17	239 ± 12	—	169 ± 9	—	57 ± 3

Vergleichen wir diese in den Niederschlägen gemessenen T-Werte mit jenen der Quellwässer, so ergeben sich z. T. recht interessante Aussagen. Es wurde versucht, mit Proben aus der Zeit der Schneeschmelze (15. 4. 1971), des Spätsommers und Herbstes (3. 9. und 31. 10. 1971) und des Hochwinters (11. 1. 1972) das Auslangen zu finden. Desgleichen wurde nur eine ausgewählte Zahl von Quellen (insgesamt 7, vgl. Tabelle 1) mehrmals beprobt. Es handelt sich um den Versuch, mit Hilfe unserer aus anderen Bereichen vorliegenden Erfahrungen bei einem Minimum des Aufwandes zu einer Beurteilung des Isotopengehaltes der Wässer des Gradenbachtals zu gelangen.

Quelle 1 zeigt im April 1971 zunächst einen T-Wert, der dem Mittel der vorhergegangenen Wintermonate entspricht (Tab. 1 und Fig. 4). Daraus könnte zunächst geschlossen werden, daß hier ein direkter Abfluß der Schneeschmelzwässer erfolgte, d. h., daß durch Quelle Nr. 1 ein System mit raschem unterirdischem Durchfluß entwässert wird.

Systematische Messungen des T-Gehaltes führten bezüglich des unterirdischen Abflusses zu Modellvorstellungen. Zwei dieser Modelle sind

- a) das sog. „Piston-Modell“. Nach diesem erfolgt der unterirdische Abflußgang in dem Niederschlag entsprechenden Schüben, ohne daß eine nennenswerte Vermischung der Niederschlagswässer verschiedener Jahre bzw. der aufeinanderfolgenden Infiltrationsraten erfolgt.
- b) das sog. „Exponential-Modell“. Nach diesem vermischen sich die versickernden Niederschläge vor dem Wiederaustritt vollends, das Zusammentreffen von Wassersträngen verschieden langer unterirdischer Fließdauer wird angenommen. Hat man ausreichend Daten, so lassen sich die Wasserkomponenten früherer Jahre berechnen.

Zurückkehrend zu Quelle 1 zeigen nun die Meßwerte vom September 1971 (Tabelle 1), daß kein Abflußvorgang nach dem „Piston-Modell“ vorliegt, wie man nach dem Aprilwert zunächst annehmen hätte können. Der in allen Proben bei Einrechnung der Meßfehler praktisch konstante T-Gehalt zeigt vielmehr in Anbetracht der hohen Werte das T in den Sommerniederschlägen für die Septemberprobe nur einen äußerst geringen Anteil rezenter Wässer. Im Verein mit der relativ geringen Schwankung der Schüttung läßt der konstant niedrige T-Wert die für alle beobachteten Quellen größte Komponente älter Wässer und daher ein entsprechendes Reservoir annehmen. Die Sonderstellung der Quelle kommt auch im Häufigkeitsdiagramm (Fig. 5) zum Ausdruck.

Eine eindeutige Komponente der Sommerniederschläge 1971 zeigt Quelle 5 in der Oktoberprobe (Tabelle 1). Wir haben es zwar auch hier mit Mischwässern zu tun, wie der Septemberwert zeigt, doch treten unverkennbar um nur einige Monate verzögerte Schübe rezenter Niederschläge auf. Der ausgeprägte Kaliumdurchgang (vgl. Fig. 7) bezeugt die Richtigkeit dieser Interpretation der Isotopenwerte. Auch die große Streuung im Häufigkeitsdiagramm (Fig. 5) weist in diese Richtung.

Eine im großen gesehen fallende Tendenz der T-Werte zeigen die Quellen Nr. 49 (deutlich) und Nr. 21, was auf eine sehr gute Durchmischung der Wässer mit einer überwiegenden Komponente um einige Jahre älterer Wässer, aber gegebener Zumengung rezenter Infiltration, deutet. Diese ist bei Nr. 49 gleichmäßiger. Auch Quelle Nr. 40 liefert ein typisches Mischwasser.

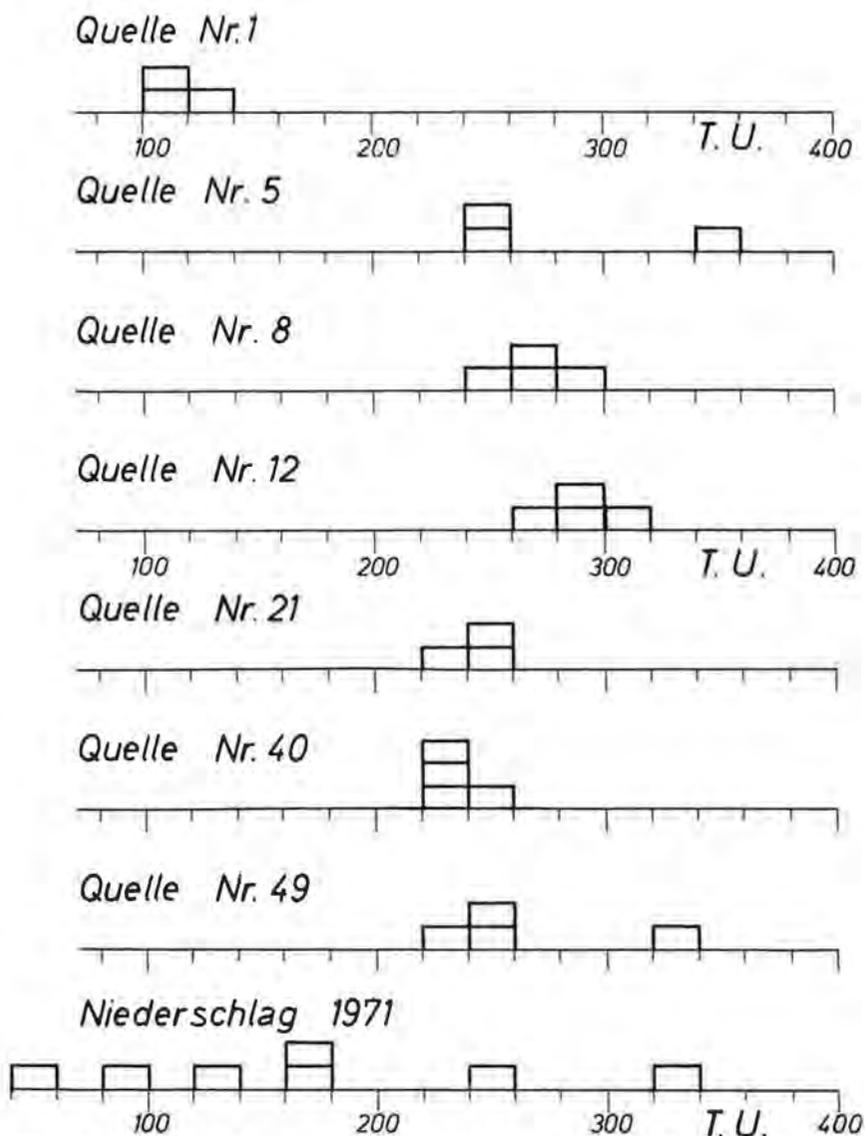


Fig. 5: Häufigkeitsdiagramm der an Wässern aus dem Gradenbachtal gemessenen Tritiumwerte.

Die Quellen Nr. 8 und 12 zeigen vom April bis zum September 1971 eine deutliche Abnahme des Tritiumwertes, was beweist, daß in dieser Zeit hier kein Wiederaustritt von Sommerniederschlägen erfolgte. Dem

entspricht, daß der bei anderen Quellen im Juli (August) verzeichnete Kalidurchgang (s. Fig. 6 bis 9) hier nicht beobachtet werden konnte.

4. Der kombinierte Markierungsversuch

4. 1. Die Einspeisung

Bei dem kombinierten Markierungsversuch wurden in die Einspeisungsstellen (s. Fig. 1, 10)

E 1 400 kg Kalidüngesalz,

E 2 5 kg Sulforhodamin-G-extra und

E 3 2 kg Indium und 10 kg Uranin

eingesetzt. Der Einsatz in E 2 und E 3 erfolgte am 14. und 15. Juni 1971, die Eingabe in E 1 in der Hauptsache am 16. Juni.¹

4. 2. Die Ergebnisse der Probenuntersuchungen

4. 2. 1. Die Untersuchungen der Quellwässer auf Kalium

Die Probennahme aus den Quellen Nr. 1, 3, 5, 8, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 21, 25, 38, 40, 43, 49, A und B (= Bachwasser Berchtoldgraben; vgl. Fig. 10) erfolgte mit Ausnahme von zwei Tagen bis 19. Juli 1971 täglich, später in den Witterungsverhältnissen angepaßten größeren Zeitabständen (ersichtlich aus den Fig. 6 bis 9, wo jeder Meßpunkt in den Konzentrations-Zeitkurven einer Probennahme entspricht).

Bei der Darstellung aller Meßwerte in Konzentrations-Zeitkurven ergab sich ein eindeutig über dem natürlichen Hintergrund bzw. dessen Schwankungen liegender Kaliumdurchgang bei den Quellen bzw. Beobachtungsstellen A, B, 3, 5, 11, 18, 21, 38, 40 und 49.

Die Messungen des Kaliumgehaltes der einzelnen Wasserproben erfolgten mittels des Flammenphotometers. Insgesamt wurden bis 28. Juli 1972 1335 Kaliummessungen durchgeführt. Die Darstellung der Konzentrationskurve erfolgte in mg/l. Von den meisten Proben vor und während des Kaliumdurchganges wurde auch die elektrolytische Leitfähigkeit des Wassers gemessen, die den Gesamtgehalt an gelösten Stoffen abzeichnet. Dies erwies sich als wichtig für die endgültige Bewertung der Kaliumkurven. So zeigt sich bei allen Quellen eine hohe elektrolytische Leitfähigkeit, d. h. Gesamtionenkonzentration, in der niederschlagsfreien Zeit vom 1. bis 12. Juli. Der Höhepunkt des Kaliumdurchganges folgt generell den Niederschlägen vom 13. bis 18. Juli (vgl. Fig. 6 bis 9). Die elektrolytische Leitfähigkeit ist zu dieser Zeit

¹ Für die Mitarbeit beim Markierungsversuch danken wir den Herren Dr. H. GAMERITH (dzt. Geologe bei der AUSTROMINERAL, Wien) und Doktor P. HACKER (Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal in Wien).

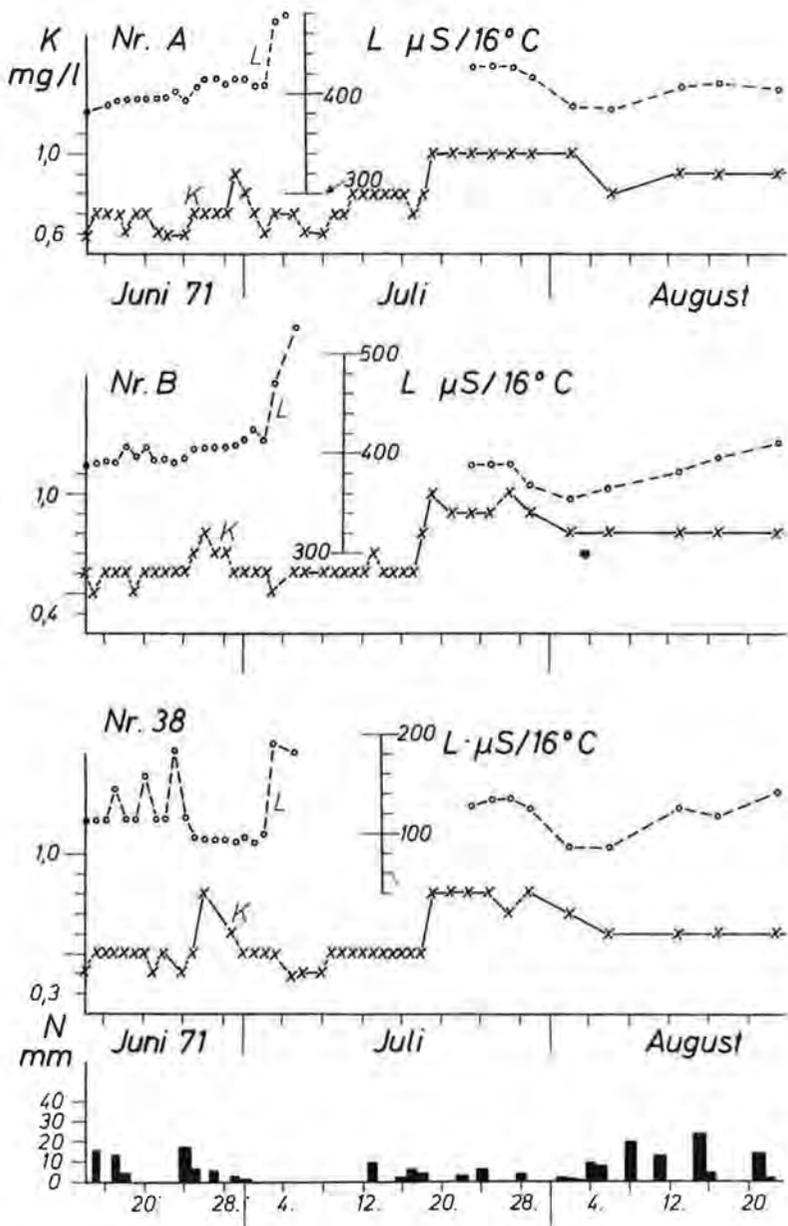


Fig. 6: Durchgangskurven des Kaliums in den Beobachtungsstellen A, B, 38. L = elektrolytische Leitfähigkeit in μS bei $16^\circ C$.

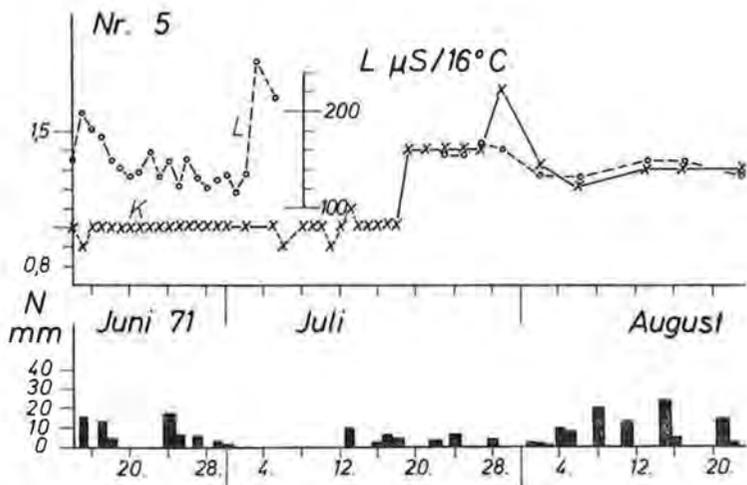
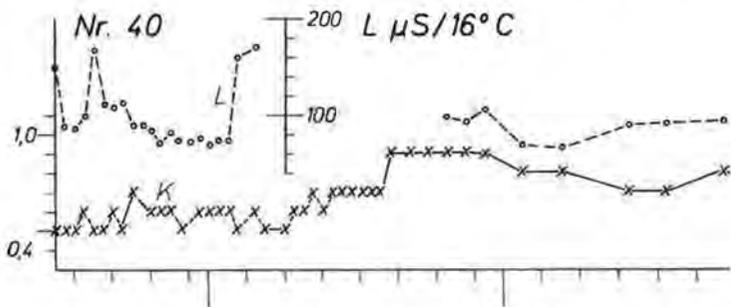
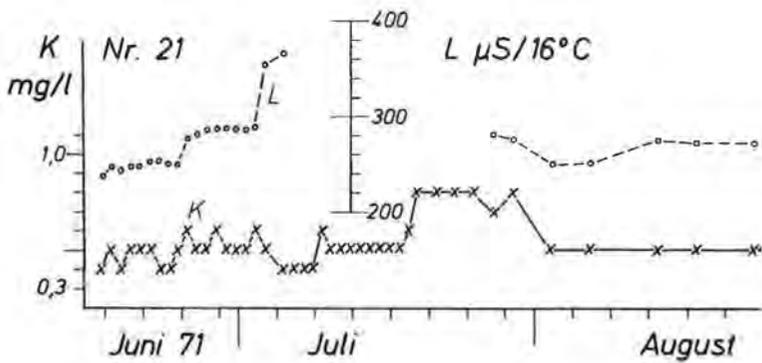


Fig. 7: Durchgangskurven des Kaliums in den Quellen Nr. 21, 40 und 5.

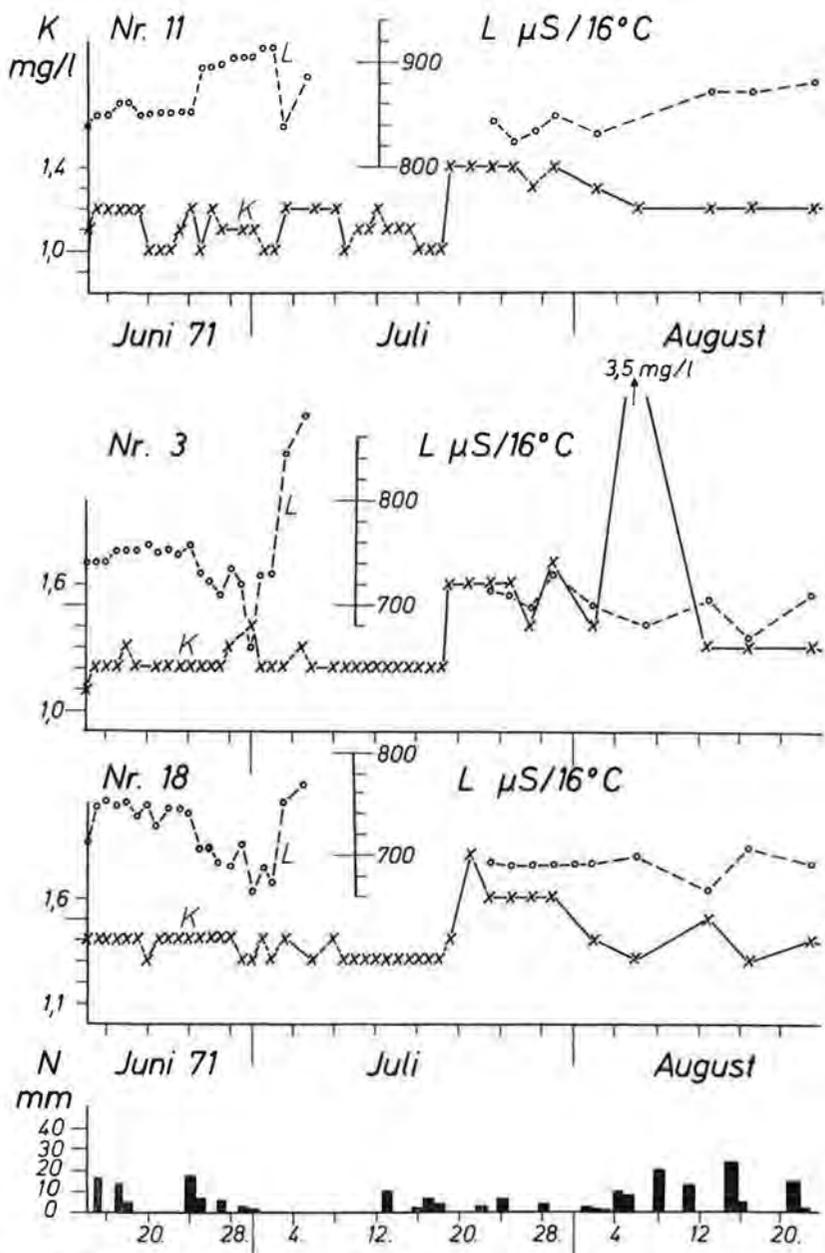


Fig. 8: Durchgangskurven des Kaliums in den Quellen Nr. 11, 3 und 18.

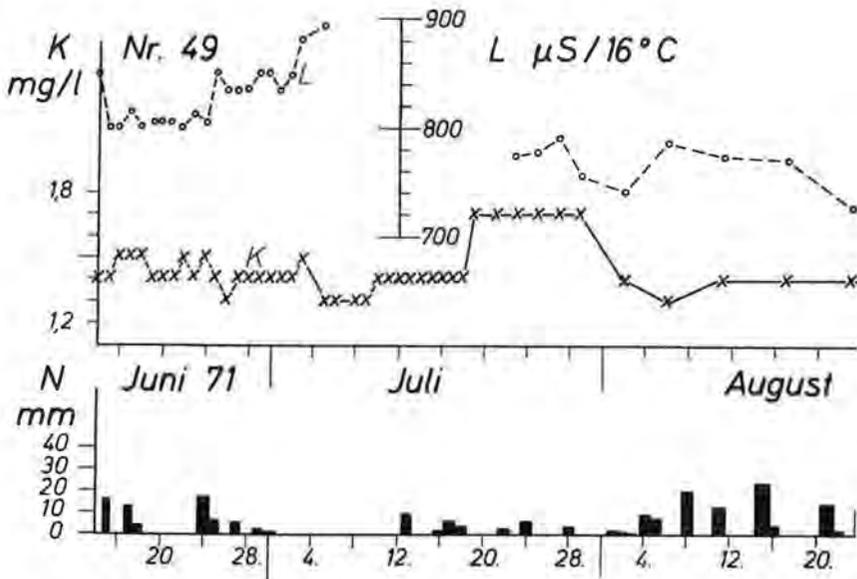


Fig. 9: Durchgangskurven des Kaliums in der Quelle Nr. 49.

wesentlich niedriger, d. h., daß der Anteil des Kaliums an der Gesamtionenkonzentration (mval-%) wesentlich höher war als vorher und als in der Kurve optisch zum Ausdruck kommt. Es ist der endgültige Nachweis, daß es sich um einen echten Kaliumdurchgang handelt, der nur auf den künstlichen Einsatz des Kalisalzes zurückgeführt werden kann.

Betrachten wir nun die einzelnen Kurven der kaliumpositiven Wässer, so zeigen die auf Fig. 6 dargestellten Durchgänge bei der Quelle A, im Bach des Berchtoldgrabens (Beobachtungsstelle B) und bei Quelle Nr. 38 (vgl. Fig. 10) schon eine erste Spitze nach den Niederschlägen vom 23. bis 25. Juni, deren Echtheit besonders bei Quelle Nr. 38 durch die gleichzeitig gefallene elektrolytische Leitfähigkeit unterstrichen wird. Der Hauptdurchgang setzt durchwegs mit der Probe vom 19. Juli an und endet Ende Juli/Anfang August.

Fig. 7 zeigt die Durchgangskurven bei den Quellen Nr. 21, 40 und 5. Die Quellen Nr. 21 und 40 dürften in ihrer Höhenlage die Westgrenze der durch die Salzung betroffenen unterirdischen Wässer darstellen. Die Kalidurchgänge bei Nr. 38, 40 und 5 werden leichter verständlich, wenn man den nachgewiesenen Wasserverlust im Berchtoldgraben im Bereich unter den Quellen 21 und A ins Kalkül zieht. Den ausgeprägtesten Durchgang weist Quelle Nr. 5 auf, die Spitze am 29. Juli folgt den geringen Niederschlägen des Vortages.

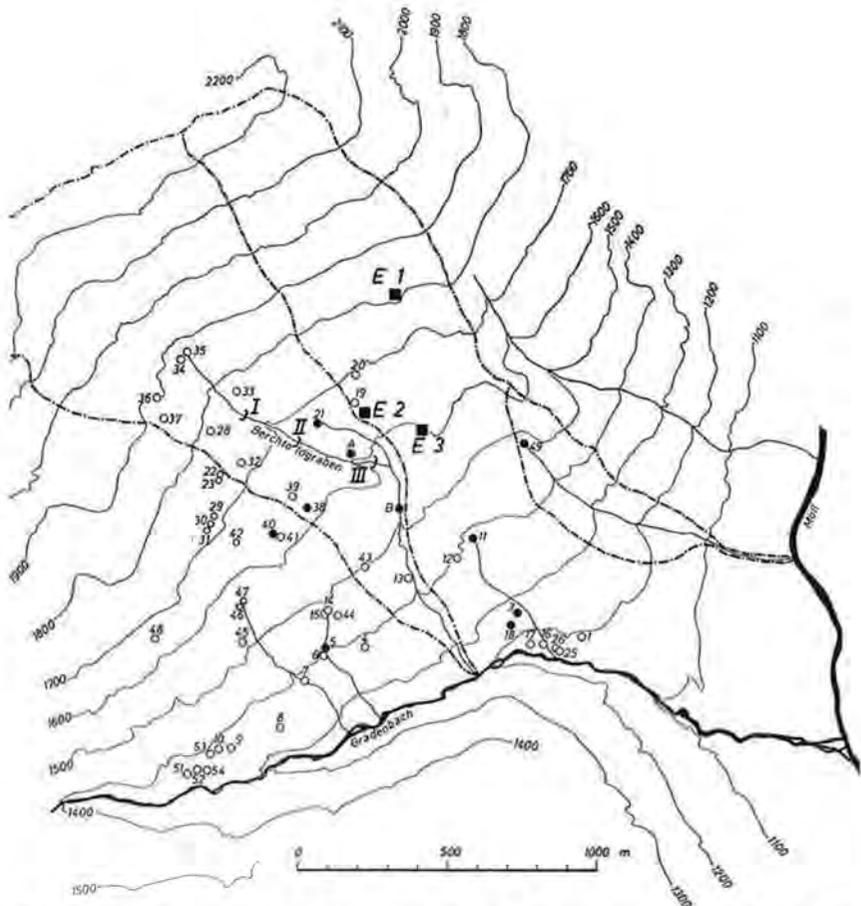


Fig. 10: Das Untersuchungsgebiet mit den Quellaustritten. Die vollen Kreisflächen zeigen die beim Markierungsversuch 1971 kaliumpositiven Quellen. E 1 bis E 3 = Einspeisstellen, I bis III = Abflußstellen im Berchtoldgraben.

In Fig. 8 finden sich die Durchgangskurven des Kaliums in den Quellen 11, 3 und 18. Bei Quelle 3 fallen die starken Schwankungen, insbesondere der abnorm hohe Peak des Durchganges am 6. August 1972, auf, der den Niederschlägen der Vortage folgt und durch den niedrigen Wert der Leitfähigkeit wieder besonders betont wird. Dieser hohe Wert war bereits ohne Aufzeichnung der Konzentrations-Zeitkurve als Kalidurchgang erkennbar.

Fig. 9 zeigt schließlich den Durchgang des Kaliums in Quelle 49,

dem in seiner Höhenlage östlichsten tracerpositiven Wasseraustritt. Die an sich nicht sehr markante Durchgangskurve wird wieder erst durch die Gegenläufigkeit der Leitwerte signifikant.

4. 2. 2. Die Untersuchungen der Quellwässer auf Sulforhodamin-G-extra, Uranin und Indium

- a) Sulforhodamin-G-extra ist ein besonders verdünnungsfähiger Fluoreszenzfarbstoff, der sowohl in sauren als auch alkalischen Wässern, d. h. unabhängig von deren pH-Bereich, wirksam ist. Der Farbstoff unterliegt im Gegensatz zu Rhodamin-B einer nur geringen Adsorption durch tonige Substanzen. Die Untersuchung der Wasserproben erfolgte mittels eines hochempfindlichen Spektralfluorometers. Der Tracer kam in eine Bachversickerung in 1640 m Sh. zum Einsatz. Die eingebrachte Menge hätte ausgereicht, 5 Mio. m³ Wasser deutlich meßbar zu färben.
- b) Uranin ist ebenfalls ein Fluoreszenzfarbstoff, der nicht nur äußerst verdünnungsfähig ist, sondern zusätzlich durch Aktivkohledetektoren nachweisbar ist. Diese werden in das Wasser eingehängt und speichern den Farbstoff, wenn er auch nur in geringsten Konzentrationen durchfließt. Auf diese Weise ist eine von der Entnahme der Wasserproben unabhängige Kontrolle gegeben. Da dieser Farbstoff aber von sauren Böden in beträchtlichem Ausmaß adsorbiert wird, wurden in die gleiche Injektionsstelle, eine Doline in 1595 m Seehöhe,
- c) 2 kg Indium eingesetzt. Indium ist ein aktivierungsanalytischer Tracer, der durch Neutronenbeschuß im Atomreaktor aktiviert und damit nachgewiesen wird. Die für b) und c) genannten Mengen hätten zur Markierung einer Wassermenge von etwa 100 Mio. m³ Wasser ausgereicht. Indium wird, wie durch Versuche in den Zentralalpen nachgewiesen wurde, von tonigen Gesteins- oder Verwitterungssubstanzen nicht nennenswert adsorbiert, es wurde deshalb zusammen mit dem Uranin eingesetzt.

Die unter a) bis c) beschriebenen Markierungsstoffe konnten in **keiner beprobten Wasseraustrittsstelle nachgewiesen werden**, insgesamt wurden 1001 Proben auf Sulforhodamin-G-extra und je 997 Wasserproben auf Uranin und Indium untersucht. Außerdem wurden 69 Aktivkohledetektoren eluiert.

Der negative Befund kann auf keinen Fall auf eine zu geringe Menge der eingesetzten Stoffe zurückgeführt werden. Da es sich um ungefährliche Stoffe handelt, wurde — wie aus den oben angeführten möglichen Verdünnungsgraden hervorgeht — mehr als tausendfach überdosiert. Auch eine zu weitmaschige Probennahme kann nicht als Ursache der negativen Befunde vorliegen. Erfahrungsgemäß dauert eine Markierung bzw. der Durchgang eines Tracers um so länger, je später

er nach der Impfung erfolgt (Verdünnungseffekt). Der durchschnittlich mehr als eine Woche andauernde Salzdurchgang (s. Fig. 6 bis 9) bestätigt diese Erfahrung auch für das vorliegende Untersuchungsgebiet.

Was die Gesamtzeit der Beprobung betrifft, so wurde diese über die Schneeschmelze 1972 hinaus ausgedehnt. Da sich auch während und nach der Schneeschmelze keine positiven Befunde ergaben, wurde die Beprobung der Quellen mit 28. Juli 1972 aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt.

5. Zusammenfassung und Folgerungen

Die Messungen des Tritiumgehaltes von jahreszeitlich verschiedenen Wasserproben aus ausgewählten Quellen ergaben durchwegs Mischwässer aus der Infiltration von Niederschlägen verschiedener Jahreszeiten und Jahre, wobei die Anteile der altersverschiedenen Infiltrationen jedoch stark variieren. Diese verschiedenen Isotopencharaktere der Quellen zeigen bereits, daß ein äußerst heterogenes unterirdisches Entwässerungssystem vorliegt. Mehrere Parameter zusammen lassen einzelne Quelltypen herauschälen. So charakterisieren z. B. die Verhältnisse bei Quelle Nr. 1, nämlich hoher Anteil von Altwässern, geringe Schüttungsschwankung und negativer Salzbefund, den Ausfluß aus einem tiefergreifenden System. Ähnlichen Typs, jedoch mit jüngeren Komponenten, sind die Quellen Nr. 8 und 12. Im Gegensatz dazu stehen etwa die Quellen Nr. 3 und 18, bei denen die starke Schüttungsschwankung und ihre durch den Kaliumdurchgang nachgewiesene Verbindung mit den offenen Spalten im Bereich von E 1 auf eine (wahrscheinlich stark niederschlagsabhängige) Beimengung von Rezentwässern hinweist. Ein wieder anderer Typus ist Quelle 5, für die sowohl durch den Tritiumbefund als auch den Salznachweis eine relativ starke Beimengung rezenter Wässer erwiesen ist. Dem scheint zunächst die geringe Schwankungsziffer zu widersprechen. Erst wenn man berücksichtigt, daß im orographisch darüberliegenden Bereich eine zeitweilige Rezentwasserversickerung im Berchtoldgraben vor sich geht, können Rezentwasseranteil und geringe Schüttungsschwankung in Einklang gebracht werden. Den Vorgang der Bachwasserversickerung bzw. dessen Abhängigkeit von hydrometeorologischen oder bodenhydrologischen Faktoren könnten nur systematische Messungen klären. Von uns wurden nur zwei Meßreihen durchgeführt (vgl. Fig. 10):

Meßstellen:	I (1730 m Sh)	II (1660 m)	III (1580 m)
28. August 1971	0,45 l/s	0,45 l/s	0,50 l/s
5. Oktober 1971	1,40 l/s	1,00 l/s	0,50 l/s

Mit der Oktobermessung ist eindeutig bewiesen, daß zeitweilig eine nicht unbeträchtliche Wassermenge (zu dieser Zeit immerhin nahezu

78 m³ pro Tag) in diesem Teil des Bachbettes in den Untergrund versickert.

Eine Folge dieses Wasserverlustes im Berchtoldgraben dürfte der Wasseraustritt von Quelle Nr. 43 sein. Dabei ist die in Fig. 2 ausgewiesene tiefreichende Entwässerung dieses Quelltypus nicht unbedingt ein Kriterium für den Begriff „keine Folgequelle“, da besonders in diesem Bereich die Wässer bei ihrer Wiederversickerung infolge der geringmächtigen Moränenaufgabe schnell in tiefere Zonen des Berges absinken können. Die überaus gleichmäßige Schüttung der Quelle Nr. 43 (G. KRONFELLNER-KRAUS, 1974) stellt überdies einen deutlichen Hinweis für eine dauernde Infiltration (durch den Berchtoldbach) dar.

Der Hauptdurchgang des Kaliums setzte bei den oberen Quellen (A, B, Nr. 21) am 18., bei den anderen positiven Quellen am 19. Juli 1971 ein, d. i. 32 bzw. 33 Tage nach der Einspeisung. Trotz des scheinbar gleichzeitigen Anstieges können infolge des Abstandes der Probenahme bis zu 30 Stunden Unterschied im tatsächlichen Auftreten der höheren Konzentration liegen. Auch die scheinbare Gleichmäßigkeit des Durchganges ist in der nur jeden zweiten Tag erfolgten Beprobung begründet, dazwischen können ganz erhebliche Schwankungen liegen, wie die Kurven der Quellen 3, 5 und 18 auch tatsächlich zeigen. Daß der Durchgang in mval-% der Gesamtionenkonzentration noch viel deutlicher zum Ausdruck kommt als in den mg-Kurven, läßt die elektrolytische Leitfähigkeit des Wassers erkennen, die zur Zeit des Durchganges viel niedriger lag als vorher (vgl. Fig. 6 bis 9). Die großen Spalten im oberen Hangbereich (1800 m und darüber) erweisen sich demnach als Schluckstellen, die die Niederschlagswässer den Quellen verschiedenster Höhenlage zuleiten. Da die Salzeinspeisung nur in eine Spalte erfolgte, ist anzunehmen, daß eine Reihe weiterer kaliumnegativer Quellen von anderen Spalten her gespeist wird. Starkregen können in diesen Systemen zu einem beachtlichen Rückstau und hydrostatischen Druck führen.

Bezüglich des bisher negativen Einsatzes der Fluoreszenzfarben und des Indiums wurde begründet, daß zu geringe Quantität, völlige Adsorption oder Mängel in der Beobachtung nicht die Ursache sein können. Am wahrscheinlichsten ist, daß die bei E 2 und E 3 eingesetzten Markierungsmittel in Totarme bzw. tiefere Partien der unterirdischen Systeme absanken. Daß dies durchaus möglich ist, wurde durch den Aufschluß solcher Säcke beim Tunnelbau und den damit verbundenen Austritt von Tracern, die Jahre zuvor eingespeist worden waren, schon bewiesen. Der Rückschluß auf das Vorhandensein solcher Säcke weist allerdings auch auf die Gefahr hin, daß diese nach Starkregen einem beachtlichen hydrostatischen Druck ausgesetzt sein können, in dessen Gefolge erneut mit stärkeren Hangbewegungen zu rechnen ist.

So entspricht die Tatsache der lebendigen Hangbewegung jeweils den kurz vorher gefallenen Niederschlägen, wie es G. KRONFELLNER-KRAUS (1974) für das Frühjahr und den Sommer 1972 beschreibt. Die starken Niederschläge vom Mai bis Juli dieses Jahres bewirkten — durch Kurzintervallmessungen nachgewiesen — Hangbewegungen bis über 1 cm/Tag, die sich auch in verstärkten Druckspannungen bei den Talsperren am Gradenbach widerspiegeln.

Literatur

- EXNER, Ch.: Erläuterungen zur Geologischen Karte der Sonnblickgruppe. Geologische Bundesanstalt, Wien 1964.
- KRONFELLNER—KRAUS, G.: Die Wildbacherosion im allgemeinen und der Talzuschub im besonderen. 100 Jahre Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien 1974.
- STINI, J.: Unsere Täler wachsen zu. Geologie und Bauwesen, 12, 3, Wien 1941.
- Talzuschub und Bauwesen. Die Bautechnik, 1942.
- Nochmals der „Talzuschub“, Geologie und Bauwesen, 14, 1, Wien 1942.

Anschrift der Verfasser:

Dr. H. ZOJER, Vereinigung für hydrogeologische Forschungen in Graz,
Rechbauerstraße 12, A-8010 Graz.

Professor Dr. J. ZÖTL, Abteilung für Hydrogeologie am Institut für
Baugeologie, Technische Hochschule in Graz, Rechbauerstraße 12,
A-8010 Graz.