

Markierung unterirdischer Wässer Untersuchungen in Slowenien 1972—1975

Schriftleitung:

R. GOSPODARIČ (Postojna) und J. G. ZÖTL (Graz)

Inhalt:

Vorwort (B. MIKOŠ)

A. Markierung von Karstgewässern

1. Einleitung (J. G. ZÖTL)

2. Untersuchungen im Einzugsgebiet der Ljubljana

2. 1. Darstellung des Untersuchungsgebietes

2. 1. 1. Geomorphologische und hydrographische Verhältnisse
(P. HABIČ)

2. 1. 2. Geologie und Hydrogeologie (S. BUSER, F. DROBNE und
R. GOSPODARIČ)

2. 2. Voruntersuchungen 1972—1975

2. 2. 1. Hydrologische Untersuchungen (K. ŽIBRIK, F. LEWICKI und
A. PIČININ)

2. 2. 2. Meteorologische Untersuchungen (F. BERNOT)

2. 2. 3. Hydrospeliologische Untersuchungen (P. HABIČ)

2. 2. 4. Hydrochemische Untersuchungen (Martina ZUPAN und
M. KOLBEZEN)

2. 2. 5. Ergänzende Bemerkungen zur Geochemie der Wässer des
Karstsystems der Ljubljana (J.-J. MISEREZ)

2. 2. 6. Ergebnisse von Messungen des Gehalts an Deuterium,
Sauerstoff-18 und Tritium in Wasserproben des Unter-
suchungsgebietes im Zeitraum von 1972—1975 (H. MOSER,
V. RAJNER, D. RANK, W. STICHLER)

2. 2. 7. Bakteriologische Untersuchungen (M. TRATNIK)

2. 2. 8. Virologische Untersuchungen (M. MOZETIČ)

2. 3. Durchführung und Ergebnisse des kombinierten Markierungs-
versuches 1975

2. 3. 1. Zweck und Programm der Markierung (F. HRIBAR)

2. 3. 2. Die meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse
während des Markierungsversuches vom 26. Mai bis
10. Juli 1975 (F. BERNOT, F. LEWICKI, A. PIČININ und
K. ŽIBRIK)

2. 3. 3. Die beschickten Ponore und beobachteten Quellen sowie
die angewandten Tracer (F. HRIBAR)

2. 3. 4. Die Markierung mit Fluoreszenztracern

2. 3. 4. 1. Methodik und Ergebnisse der Direktmessung von
Fluoreszenztracern (H. BEHRENS, Martina ZUPAN,
M. ZUPAN)

2. 3. 4. 2. Ergebnisse des Fluoreszenztracer-Nachweises mit-
tels Aktivkohle (F. BAUER)

- 2. 3. 5. Die Markierung mit Sporen (H. HÖTZL, V. MAURIN und J. G. ZÖTL)
 - 2. 3. 5. 1. Die Präparation von Lycopodiumsporen in Form einer Suspension (M. DECHANT)
- 2. 3. 5. Die Markierung mit Salzen (H. BEHRENS und Martina ZUPAN)
- 2. 3. 6. Die Markierung mit Cr-51 (M. PIRŠ)
- 2. 3. 7. Die Markierung mit Detergentien (W. KÄSS)
- 2. 4. Neue hydrogeologische Erkenntnisse
 - 2. 4. 1. Karsthydrographische Auswertung (P. HABIČ)
 - 2. 4. 2. Hydrogeologische Interpretation der unterirdischen Wasserverbindungen (R. GOSPODARIČ, P. KRIVIC und R. VERBOVŠEK)
- 3. Die Anwendbarkeit künstlicher Markierungsstoffe in Karstgebieten
 - 3. 1. Fluoreszenztracer (F. BAUER, H. BEHRENS, Martina ZUPAN)
 - 3. 1. 1. Allgemeine Angaben über Fluoreszenztracer
 - 3. 1. 2. Erfahrungen mit Fluoreszenztracern beim Markierungsversuch 1975 im Einzugsbereich der Ljubljana
 - 3. 2. Salze (Martina ZUPAN)
 - 3. 3. Durch Radioaktivitätsmessung nachweisbare Stoffe (H. BEHRENS)
 - 3. 3. 1. Radioaktive Tracer
 - 3. 3. 2. Aktivierungsanalytische Tracer
 - 3. 3. 3. Erfahrungen mit durch Radioaktivitätsnachweis festgestellten Tracern beim Markierungsversuch 1975 im Einzugsgebiet der Ljubljana
 - 3. 4. Triftstoffe (V. MAURIN und J. G. ZÖTL)
 - 3. 5. Sonstige Markierungsmittel (R. GOSPODARIČ)
- B. Markierung von Porengrundwässern (W. KÄSS, F. DROBNE und B. BUKVIČ)
 - 1. Untersuchungen im Quartär des Savinja-Tales 1973
 - 1. 1. Hydrogeologischer Überblick
 - 1. 2. Situation und Voruntersuchungen im Versuchsfeld
 - 1. 2. 1. Pumpversuch in der Brunnenbohrung Vč-73
 - 1. 3. Die Durchführung der Markierungsversuche
 - 1. 3. 1. Ergebnisse mit Serratia marcescens
 - 1. 3. 2. Ergebnisse mit Uranin
 - 1. 3. 3. Ergebnisse mit Eosin
 - 1. 3. 4. Ergebnisse mit Kaliumchlorid
 - 2. Vergleich mit Markierungsversuchen im Lockergestein in anderen Gebieten
 - 3. Zusammenfassung
- Literatur
- Povzetek (Zusammenfassung in slowenischer Sprache)
- Verzeichnis der Autoren und Mitarbeiter

Vorwort

Aufgrund des Beschlusses der II. Tagung der Fachleute für die Verfolgung der unterirdischen Wässer in Freiburg im Jahre 1970 wurde Jugoslawien die Organisation der folgenden Tagung anvertraut. Vorherrschend war der gemeinschaftliche Wunsch, daß im klassischen Karst mit den spezifischen hydrologischen und speläologischen Verhältnissen die verschiedenen Verfolgungsmethoden und Markierungsmittel ausprobiert werden sollten.

Das jugoslawische Komitee für die internationale hydrologische Dekade hat die Organisation dieses 3. internationalen Symposiums über die Verfolgung der unterirdischen Wässer (3. SUWT) übernommen. Dieses hat einen besonderen Organisationsausschuß ernannt, die hauptsächlichlichen Forschungs- und Organisationsaufgaben sind aber der damaligen Hydrometeorologischen Anstalt Sloweniens und dem Karstforschungsinstitut der Slowenischen Akademie der Wissenschaften und Künste in Postojna anvertraut worden. Diese beiden Institutionen haben in Mitarbeiterschaft mit anderen heimischen und fremden Forschungsanstalten einen Fachausschuß und ein breites Forschungsteam zusammengestellt, welches das Programm der vorgehenden Forschungen, dann den kombinierten Verfolgungsversuch, und zwar im Jahre 1973 im Alluvium des Tales der Savinja, im Jahre 1975 aber im verkarsteten Flußgebiet der Ljubljana, vorbereitet und ausgeführt hat. Eine besondere Aufmerksamkeit war den Untersuchungen und dem Verfolgungsversuch im unteren Teil des Ljubljana-Flußgebietes im unmittelbaren Hinterland der Ljubljana-Quellen gewidmet. Hier konnten die verschiedenen Verfolgungsmethoden und Markierungsmittel überprüft und einige Probleme im hydrologischen System mit ergiebigen Wassermengen und verhältnismäßig verwickelten unterirdischen Wasserverbindungen gelöst werden.

Verschiedene Fachleute, Hydrologen und Meteorologen, Chemiker und Physiker, Geologen, Geographen und Speläologen, Biologen, Mediziner und andere haben an den Forschungen und am Verfolgungsversuch teilgenommen. Eine gute und ständige Koordination aller Tätigkeiten, die mit dem Fachausschuß erreicht wurde, war notwendig. Der Fachausschuß ist im Zeitabschnitt 1972 bis 1975 öfters zusammengetreten, hat über fachliche Fragen der Untersuchungen und des Verfolgungsversuches und über die Veröffentlichung der Resultate der Forscher und Vertreter der mitwirkenden Institutionen aus Deutschland, Österreich, Schweiz und Jugoslawien verhandelt und entschieden.

Schon von allem Anfang an war vorgesehen, daß die Ergebnisse dieser zwischenstaatlichen Mitarbeit nur dann ihren Zweck erreichen, wenn sie veröffentlicht und bei einer Tagung und auf einer Fachexkursion besprochen werden. So wie die Untersuchungen und der Verfolgungsversuch war auch die Veröffentlichung der Ergebnisse das wichtigste Thema der Sitzungen des Fachausschusses in Portorož 1974, in Wien 1974 und 1975, in Ljubljana 1975 und in München 1976. Hier wurden auch die Richtlinien für die Abfassung der Berichte und deren Druck vereinbart und für diese Aufgaben die entsprechenden Mitarbeiter bestimmt.

Die Publikation über die „Verfolgung der unterirdischen Wässer, Forschungen in Slowenien 1972—1975“ ist das Ergebnis des angewandten Wissens, der Mühe und der Mittel der Fachleute und der Anstalten, die im Gebiet des Alpen- und des Dinarischen Raumes mit dem grundlegenden Wunsch schaffen und arbeiten, daß mit den aktuellen Mitteln und dem Wissen die Probleme der Hydrologie, Wasserwirtschaft und Wasserversorgung erkannt und gelöst werden. Die For-

schungsmethoden, die Verfahrensweisen und die Ergebnisse sind in englischer Sprache verfaßt mit der Absicht, daß der Inhalt einem breiteren Kreis von Fachleuten der ganzen Welt zugänglich und auch verwendbar wäre. Der Wunsch, daß die Ergebnisse möglichst weit zugänglich gemacht werden, hat das Organisationskomitee des Symposiums dazu bewogen, daß es zum Druck des Materials in deutscher Sprache mit einer slowenischen Zusammenfassung in der Fachrevue „Steirische Beiträge zur Hydrogeologie“ mit Dr. J. G. Zötl als Schriftleiter die Einwilligung gegeben hat.

Die umfangreiche Arbeit konnte nur mit Mitarbeitern ausgeführt werden, die durchwegs vom Wunsch beseelt waren, der hydrologischen Wissenschaft und Praxis nach bestem Können und Wissen beizutragen. Die Auslese der Mitarbeiter aus vier europäischen Alpenländern war in dieser Hinsicht eine glückliche und äußerst nützliche. Im Namen des Organisationsausschusses des Symposiums danken wir allen ausländischen Mitarbeitern und deren Institutionen, und zwar der Bundesanstalt für Wasserhaushalt von Karstgebieten, Wien, dem Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung m. b. H., München, dem Geologischen Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg, dem Lehrstuhl für Geologie und Abteilung für angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, der Université de Neuchâtel, dem Geotechnischen Institut der Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Wien, und der Vereinigung für hydrogeologische Forschungen in Graz, für ihre ausdauernde und aufopfernde Tätigkeit und erfolgreiche Mitarbeit. Ohne deren Einsatz im einzelnen als auch zusamt wäre der Inhalt der verrichteten wissenschaftlichen Mitarbeit sehr verkümmert.

Der Kreis der slowenischen und übrigen jugoslawischen Mitarbeiter und Institutionen ist sehr umfangreich, alle einzelnen und deren Anstalten haben zur gemeinsamen Aufgabe einen nützlichen Anteil beigetragen. Ein besonderer Dank muß den mit der Ausführung des Verfolgungsversuches und der Forschungen Betrauten und den Verfassern der Fachbeiträge in der vorliegenden Publikation ausgesprochen werden, ebenso den Schriftleitern, die mit Hilfe der Übersetzer die anspruchsvolle Redaktion der Beiträge in deutscher, englischer und slowenischer Sprache erledigt und sinngemäß redigiert haben. Bei der großen Zahl der inhaltlich, stilistisch und technisch verschiedenen Texte, welche infolge Zeitmangels nicht alle vom Lektor durchgesehen werden konnten, sind natürlich verschiedene Mängel vorhanden, insbesondere bei den Übersetzungen. Dr. Ph. T. R. Shaw, Lacock, Chippenham (England), hat die englischen Übersetzungen flüchtig durchgesehen, wofür wir ihm aufrichtig danken.

Die Publikationen hätten nicht ohne die materielle und moralische Unterstützung des Jugoslawischen Komitees für das internationale hydrologische Programm, des Verbandes der Wassergemeinschaften Sloweniens, der Forschungsgemeinschaften Sloweniens und der Slowenischen Akademie der Wissenschaften erscheinen können. Auch diesen Anstalten danken wir aufrichtig für die Hilfe und Mitarbeit.

Boris Mikoš
Präsident des Organisationskomitees

A. Markierung von Karstgewässern

1. Einleitung

(J. G. ZÖTL)

Die Markierung unterirdischer Wässer in verkarsteten Gebirgen geht zwar weit zurück (s. G. TIMEUS 1924), kam aber in den letzten Jahrzehnten vor allem aufgrund technischer Erfordernisse immer häufiger zur Anwendung. Dabei waren die unterschiedlichen Anforderungen etwa von seiten des Tunnel- und Speicherbaues oder der Planung von Wasserversorgungen auch eine Triebfeder für die Weiterentwicklung der Markierungsmethoden.

Bis 1966 war das diesbezügliche Schrifttum in den verschiedensten Artikeln und Zeitschriften verstreut und der Stand der Entwicklung der Methoden schwer überschaubar. Ausdruck dieser Tatsache war der Umstand, daß ein für dieses Jahr nur als Treffen von kaum zwei Dutzend Fachleuten gedachtes Meeting in Graz explosiv zu einer Tagung von 125 Teilnehmern aus 15 Ländern wurde. Diese Dokumentation der Notwendigkeit der Kommunikation und Information auf diesem Spezialgebiet der Hydrologie und Hydrogeologie unterstrich eine immer mehr bereits laufende aber in ihrer Bedeutung noch nicht voll erkannte Notwendigkeit interdisziplinärer Kooperation. Es kann daher nicht überraschen, daß bereits im ersten internationalen Treffen im Jahre 1966 die Wurzeln für die Weiterführung dieser Kontakte lagen. Daß daraus keine vereinsrechtliche Institution erwuchs, hat Vor- und Nachteile. Wir sahen die Vorteile überwiegen: Frei von Statuten und organisatorischen Bindungen sind dem internationalen Kreis der direkt betroffenen Fachleute für Form und Zeit ihres Gedankenaustausches keine Fesseln aufgezwungen.

Schon für die zweite Tagung, die im Jahre 1970 in Freiburg i. Br. ablief, zeitigte dieser offene Rahmen seine Früchte. Stand beim ersten Treffen in Graz noch die Beschreibung einzelner Markierungsmethoden im Vordergrund und bedeuteten die gleichzeitig laufenden Feldversuche nur eine Demonstration der Methoden, so rückte 1970 bereits der langfristig vorbereitete Markierungsversuch im Donau-Aach-Gebiet in den Vordergrund, der im Jahr vor der Tagung durchgeführt wurde.

Wer den Verlauf der Entwicklung aufmerksam verfolgt, wird feststellen, daß es sich keineswegs um eine Vernachlässigung der direkt die Markierungsmethoden betreffenden Belange handelt, sondern daß im Gegenteil die Vorbereitung ihrer Anwendung zum ersten Mal gebührend ins Gewicht fiel. Vorbildlich für diesen neuen Akzent war die Aufarbeitung der bereits vorliegenden Daten durch W. Käss (1969).

Die Vermeidung starrer institutioneller Bindungen zeitigte noch einen weiteren Erfolg: Weder bezüglich der Verlagerung des Tagungsschwerpunktes noch bezüglich des organisatorischen Ablaufes ergaben sich Schwierigkeiten. Neu war das absolut positive Resultat, daß neben die Berichte der Weiterentwicklung von Markierungsmethoden die Klärung noch offener karsthydrologischer Fragen von überregional bedeutsamen Musterlandschaften der Verkarstung trat.

Dem Antrag, das dritte Internationale Symposium für die Anwendung von Markierungsstoffen zur Verfolgung unterirdischer Wässer in das Gebiet des klassischen Karstes zu verlegen, habe ich daher gerne zugestimmt, und ich habe mich redlich bemüht, zu erwartende organisatorische Schwierigkeiten beseitigen

zu helfen, obwohl deren Ausmaß zunächst nicht von allen Beteiligten realistisch eingeschätzt wurde, was die Zeitdifferenz zur letzten Tagung (sechs Jahre) belegt.

Dennoch hat sich die von wissenschaftlicher Sachlichkeit getragene Entscheidung gerechtfertigt: Die jahrelangen Vorbereitungsarbeiten haben ein bis jetzt unbekanntes Optimum erreicht. Die örtliche, zeitliche, sachliche und personelle Ausweitung der Zusammenarbeit jugoslawischer, deutscher und österreichischer Institutionen hat ein Ausmaß erreicht, das international als Vorbild wissenschaftlicher Kooperation dienen kann.

Für die Zukunft bietet sich daher dieses Vorbild an, zur Vorbereitung der gegenseitigen Information über die Weiterentwicklung von Methoden zur Verfolgung unterirdischer Wässer die intensive Untersuchung eines charakteristischen Karstareals als Diskussionsmittelpunkt zu wählen.

Es ist wohl unbestritten, daß diese Methode (bei einem entsprechenden Angebot) einerseits zur speziellen Bearbeitung von Karstgebieten führt, deren Studium von überregionalem Interesse ist, während andererseits die in gewissen Zeitabschnitten eingetretene Weiterentwicklung von Markierungsmethoden wieder dem Interessentenkreis präsentiert wird.

Damit mündet die Entwicklung letzten Endes wieder in den Bezug von Grundlagen- und Zweckforschung, deren Trennung zwar theoretisch perfekt, in der Praxis aber schwer durchführbar ist.

Ich möchte in diesem Zusammenhang meinen jugoslawischen Kollegen danken, daß sie nicht nur den obgenannten Tatsachen Rechnung trugen, sondern auch der Publikation in deutscher Sprache in dieser Zeitschrift zustimmten. Sie ermöglichten damit die Kontinuität, daß bisher alle Vorarbeiten zu den Tagungen betreffend die Anwendung von Markierungsstoffen zur Verfolgung unterirdischer Wässer in dieser Zeitschrift publiziert wurden. Ich bin außerstande, allen Autoren und Organisatoren, die sich bemühten, ihre Beiträge auch in deutscher Sprache zu formulieren, zu danken, und möchte dies in meinem Dank an die Herren B. MIKOŠ und R. GOSPODARIĆ einbinden.

Was die Publikation anbelangt, so brachte der Umfang nicht nur eine organisatorische, sondern auch eine neue finanzielle Belastung mit sich. Ich möchte daher nicht versäumen, neben dem Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung und dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung auch der Gesellschaft zur Pflege der wissenschaftlichen Beziehungen mit Jugoslawien an den steirischen Hochschulen für die Förderung dieser Publikation zu danken.

Abschließend möchte ich bemerken, daß mir die Zusammenarbeit mit ausländischen Kollegen nicht neu ist. Daß sie nunmehr auch mit Kollegen aus Jugoslawien zur Routine geworden ist, darf ich mit einer Zusammenfassung der Untersuchungen in slowenischer Sprache unterstreichen. Von einer Namensnennung der deutschen, österreichischen und Schweizer Mitarbeiter, die mich bei der schwierigen Redaktionsarbeit bestens unterstützen, möchte ich aufgrund der großen Zahl mit einer Ausnahme absehen. Namentlich darf ich Herrn Dr. J. MAIRHOFER nennen, der, nunmehr im verdienten Ruhestand, zu Beginn der Untersuchungen einen wesentlichen Anteil zum Aufbau der Isotopenuntersuchungen der BVFA-Arsenal im Untersuchungsgebiet beitrug. Meinen persönlichen Dank schulde ich J. Mairhofer für die redaktionelle Unterstützung durch die Übersetzung radiotechnischer Abschnitte aus dem Englischen, die mir als Nichtphysiker erhebliche Mühe bereitet hätte.

2. Untersuchungen im Einzugsgebiet der Ljubljana

2. 1. Darstellung des Untersuchungsgebietes

2. 1. 1. Geomorphologische und hydrographische Verhältnisse (P. HABIČ)

Das Karsteinzugsgebiet der Ljubljana zählt nebst dem Triester Karst zu den klassischen Karstgebieten Europas. Dieses Gebiet erregte durch die Karstwasserschwankungen im Polje von Cerknica schon vor mehreren Jahrhunderten große Aufmerksamkeit (N. FRICHLIN 1583, A. KIRCHER 1665, J. V. VALVASOR 1689, J. A. NAGEL 1748, F. A. STEINBERG 1761, B. HACQUET 1778, T. GRUBER 1781 und andere). Zu den Merkwürdigkeiten dieser Gegend zählen u. a. die Schwinden der Flüsse Pivka, Unica und Ljubljana sowie die Karstpoljen und zahlreiche Höhlen, die von A. SCHMIDL (1854), W. PUTICK (1887), E. A. MARTEL (1894) und anderen Forschern erstmals beschrieben wurden. Die Entdeckung der Postojnska jama (Adelsberger Grotte) im Jahre 1818 hat auch den touristischen Ruf dieser Karstgegend begründet (F. HABE, 1968).

Die Arbeit der Naturhistoriker diente aber gerade in diesem Gebiet frühzeitig auch praktisch-wirtschaftlichen Interessen. Auf der einen Seite wuchs mit der Entwicklung der Ansiedlungen, der Industrie und der Verkehrswege der Bedarf an Trinkwasser, das im Karst immer fehlte. Andererseits haben temporäre Überschwemmungen in den Karstpoljen eine schnellere Entwicklung der Landwirtschaft und auch die sonstige Nutzung des relativ günstigen Terrains inmitten des Karstes behindert (R. VICENTINI 1875, W. PUTICK 1888). Fast hundertjährige Bestrebungen zur Behebung der Überschwemmungen in den Karstpoljen haben bis jetzt noch nicht die gewünschten Ziele erreicht. Alle Forschungen und praktischen Versuche haben bewiesen, daß man die Karstnatur ohne große und kostspielige Eingriffe nicht bewältigen kann. Trotz Öffnung und Reinigung der Ponore in den Karstpoljen (W. PUTICK 1887), haben sich die Überschwemmungen in der Regenzeit nicht wesentlich vermindert. Mit der Verstopfung der Sauglöcher und der Ponore war es aber andererseits auch nicht möglich, zur Trockenzeit das Entweichen des Wassers in den Karstuntergrund zu verhindern. Es ist bis jetzt nicht gelungen, die entsprechend ihrem Relief günstigen Karstdepressionen im Flußgebiet der Ljubljana in natürliche Speicher für die Energiegewinnung oder sonstige Ausnützung des Karstwasserreichtums umzuwandeln (F. JENKO 1959, M. BREZNIK 1961, P. HABIČ 1974).

Die Ljubljana sammelt ihr Wasser aus dem äußersten nordwestlichen Teil des Dinarischen Karstes und gehört als rechter Zufluß der Save dem Donauflußgebiet und damit dem Einzugsgebiet des Schwarzen Meeres an. Im nördlichen Teil liegt die oberflächliche Wasserscheide mit den Zuflüssen der Sora, vorwiegend im nicht verkarsteten Gebiet der Julischen Voralpen. Im Westteil verläuft die Wasserscheide zwischen der Ljubljana und den adriatischen Zuflüssen wie Idrijca, Vipava, Notranjska Reka und Ričina auf den hohen Karstplateaus von Hrušica und Javorniki bis zum Snežnik. Die tatsächliche Wasserscheide ist irgendwo im Untergrund zu suchen, und die Wässer fließen von diesen Karstplateaus nach mehreren Seiten ab. Dasselbe gilt auch für die Wasserscheide im Einzugsgebiet der Flüsse Kolpa und Krka an der Südseite des Flußgebietes der Ljubljana (Fig. 1).

Das Karsteinzugsgebiet der Ljubljana kann man deshalb nicht genau bestimmen (Tafel I). Die Wasserscheide wird zumeist entlang der höchsten Karstbergrücken gezogen. Es ist aber bekannt, daß im Karst sehr oft die orogra-

phische Wasserscheide wesentlich von der tatsächlichen abweicht und sich in den verschiedenen hydrologischen Situationen verändern kann.

Viele Abweichungen der orographischen von der tatsächlichen Wasserscheide konnte man bis jetzt nicht einmal beiläufig abschätzen, obwohl gerade in dieser Richtung mehrere Versuche aufgrund geologischer, geomorphologischer und hydrologischer Angaben durchgeführt wurden. Unbekannte Grenzen des Einzugsgebietes verursachen gewisse Schwierigkeiten bei der Lösung praktischer wasserwirtschaftlicher Fragen.

Das gesamte Flußgebiet der Ljubljana bis zu ihrer Mündung in den Savefluß schätzt man auf 1900 km², auf die engeren Karstbereiche, das unmittelbare Hinterland der Karstquellen bei Vrhnika, entfallen 1100 bis 1200 km². Orographisch ist das Flußgebiet sehr bewegt. Die Höhendifferenz zwischen dem höchsten Karstmassiv Snežnik (Schneeberg, 1796 m) und der Mündung des Flusses Ljubljana in die Save beträgt 1530 m, im engeren Karstgebiet bis zu den Quellen der Ljubljana bei Vrhnika liegt der Höhenunterschied noch immer bei 1500 m.

Die Reliefeigenheiten des Einzugsgebietes der Ljubljana kann man am leichtesten nach den einzelnen Einheiten, die vom geologischen Bau des Gebietes zwischen den Alpen und den Dinariden und der geomorphologischen Entwicklung an der Grenze der Einzugsgebiete der Adria und des Schwarzen Meeres abhängen, erkennen. Im südlichen Teil der Wasserscheide des Flusses befinden sich die höchsten, waldreichen und unbesiedelten Karstplateaus, unter denen der Snežnik (Schneeberg) mit 1796 m Seehöhe dominiert. Gegen Nordwesten folgt in dinarischer Richtung mehrmals unterbrochen der Javorniki-Zug mit Anhöhen bis 1260 m. Die tiefste Lücke in diesen hohen Karstplateaus stellt die Pforte von Postojna—Postojnska vrata mit einer Höhe zwischen 600 und 700 m dar, die auch eine bedeutende Rolle im Verkehr zwischen dem Adriatischen und dem Pannonischen Becken spielt. Jenseits der Pforte von Postojna ziehen sich in nordwestlicher Richtung die waldreichen Karstplateaus Hrušica (Birnbauer Wald) und Trnovski gozd (Ternowaner Wald) hin, wo die Gipfel eine Höhe von 800 bis 1200 m erreichen.

An der Südwestseite des Hohen Karstes gehört dem Flußgebiet der Ljubljana das gut besiedelte Flyschbecken der Pivka an, dessen Boden vorwiegend zwischen 520 und 600 m liegt. Es ist an allen Seiten von höheren Karstrücken umgeben. In diese sind niedrigere Lücken nur an der Wasserscheide gegen das Vipavatal in einer Höhe von 595 m bei Razdrto unter dem Karstmassiv Nanos und gegen das Tal der Notranjska Reka beim Orte Pivka in der Höhe von 590 m sowie bei dem Dorfe Knežak in 600 m Höhe eingeschnitten. Der Fluß Pivka verschwindet bei der Stadt Postojna in 511 m Höhe in den Untergrund. Das ist aber nicht die tiefste Stelle des Pivkabeckens; der Sickerfluß Lovka hat sich bei Predjama noch tiefer in die Flyschunterlage eingeschnitten (F. HABE 1962). Im mittleren Teil des Einzugsgebietes der Ljubljana liegt an der nordöstlichen Seite der hohen Karstplateaus, im Notranjsko podolje (Innerkrainer Talung), eine breite Zone niedriger Höhen zwischen 450 und 600 m. Dort sind die Karstpoljen stufenartig angeordnet; sie sind die tiefsten Reliefdepressionen und die einzigen Ebenen im ganzen Karstflußgebiet. An der Wasserscheide zum Flußgebiet der Kolpa liegt am höchsten das Polje bei Prezid (770 m). Der Reihe nach folgen dann die Poljen Babno Polje (750 m), Loško Polje (580 m), Ceriško Polje (550 m), Rakov Škocjan und Unško Polje (520 m), Planinsko Polje (450 m), Logaško Polje (470 m) und endlich Ljubljansko barje (285 bis 300 m). Auf der Ostseite dieser Talung erreichen die Rücken der Wasserscheide 800 und

1100 m Höhe, sind etwas gegliedert und nur auf dem Karstplateau Bloška planota (720 m) und im Quellgebiet des Baches Cerknjšica niedriger.

Eine eigene Reliefeinheit stellt der nordwestliche Teil des Flußgebietes mit dem Plateau Logaško-Rovtarska planota dar, wo Höhen zwischen 500 und 800 m vorherrschen. Dieses Gebiet trennt die Talung Hotensko podolje, die in der Richtung vom Dorfe Godovič (600 m, an der Wasserscheide mit dem Fluß Idrijca) gegen Hotedršica und Kalce (500 m) als ein ziemlich einheitliches Trockental verläuft, vom Karstmassiv Hrušica. Im Bereich des Plateaus Logaško-Rovtarska planota wechseln sich nicht verkarstete Bereiche und Karstrelief ab, was einem sukzessiven Übergang von der Karsttalung Notranjsko podolje zu dem vorherrschenden normalen Relief in den benachbarten Flußgebieten der Flüsse Idrijca und Sora entspricht.

Das ehemalige Einzugsgebiet des Flusses Ljubljana war größer als heute (Fig. 1). Mit der Verkarstung wurde ein Teil der Entwässerung, vor allem die Flüsse Idrijca und Vipava, zur Adria umgelenkt. Auch der Fluß Krka hat als südlicher Zufluß der Save einen Teil des ehemaligen Flußnetzes der Ljubljana übernommen (F. KOSSMAT 1916, A. MELIK 1952, P. HABIČ 1968). Nach den Hauptreliefformen versuchten die Geologen und Geomorphologen das ehemalige oberflächliche Flußnetz zu rekonstruieren, das heute nur noch in den undurchlässigen Flysch- und Schieferbereichen sowie teilweise im Dolomit und in den Karstpoljen erhalten ist. In den Kalkarealen verlagerten sich einst oberirdisch fließende Wässer in den Untergrund.

Karstmorphologisch ist bisher nur der Problembereich der sogenannten pliozänen Ljubljana bis ins einzelne erforscht worden (F. KOSSMAT 1916, A. MELIK 1952), und das vor allem aufgrund der Reliefeigenschaften, die auf den ursprünglich einheitlichen Oberflächenfluß in der Talflucht von Notranjsko und in ihrer Nachbarschaft hinweisen. Neben der „pliozänen“ Problematik sind die Probleme der Quartär-Entwicklung des Karstes etwas genauer bearbeitet worden, vor allem die der Karstpoljen (A. MELIK 1955) und der zahlreichen Karsthöhlen (S. BRODAR 1952, I. GAMS 1963 und 1965, F. OSOLE 1968, R. GOSPODARIČ und P. HABIČ 1966, R. GOSPODARIČ 1970). Die letzteren Abhandlungen beschränken sich vor allem auf die nähere Umgebung von Postojna und Pivška kotlina. Wertvolle Daten über die morphologische Entwicklung im Einzugsgebiet der Ljubljana lieferten Bohrungen auf dem Ljubljansko Barje und Pollenanalysen der erbohrten Sedimente (A. ŠERCELJ 1965).

Die neueren Ergebnisse der Untersuchungen der Entwicklung des jungen tektonischen Kessels von Ljubljansko Barje (Ljubljanaer Moor) dienen als Ausgangspunkt für weitere Studien über die morphologische und speläologische Entwicklung des Karstes im Einzugsgebiet der Ljubljana. Die Entstehung des Barje-Kessels ist eng an den Kontakt von Alpen und Dinarischem Gebirge gebunden (I. RAKOVEC 1955). Durch diesen entstand hauptsächlich im Pleistozän der tektonische Kessel, der bis zu 200 m tief und nur mit jüngeren und mittelpleistozänen Sedimenten gefüllt ist (A. ŠERCELJ 1965). Das Alter des Barje-Absinkens ist damit verhältnismäßig genau bestimmt, außerdem zeigen uns die verschiedenen Sedimente, daß die Vertiefung des Kessels ungleichmäßig verlief. Mit dem Absinken des Barje-Kessels trat aber im Einzugsgebiet der Ljubljana eine erhebliche Veränderung ein, die die Verlegung der Oberflächenflüsse in den Untergrund beschleunigte. Zwischen der Barje-Ebene und dem ehemaligen Grund der Oberflächen-Ljubljana in der Talflucht von Notranjsko schufen tektonische Verschiebungen noch ungefähr 150 m Höhenunterschied,

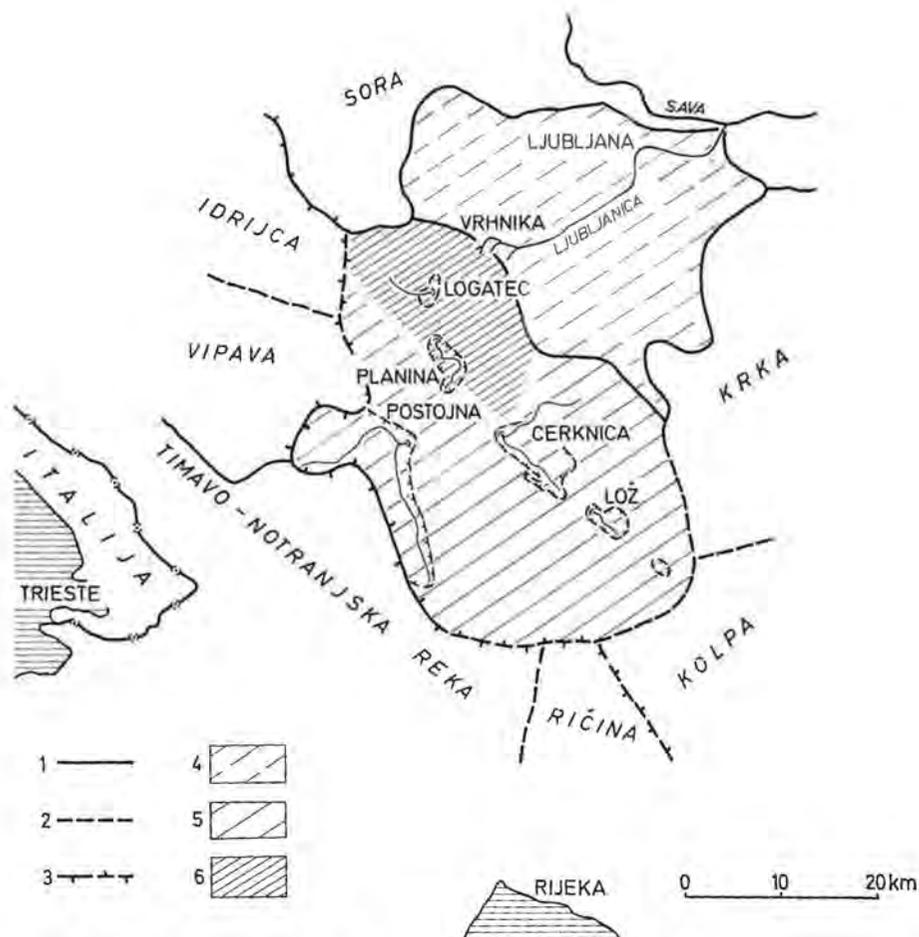


Fig. 1: Lage des Einzugsgebietes der Ljubljana. 1 — Oberflächliche Wasserscheide, 2 — Karstwasserscheide, 3 — Wasserscheide Adria—Schwarzes Meer, 4 — der nichtverkarstete Teil des Flußgebietes, 5 — Karstareale des Flußgebietes, 6 — engerer Untersuchungsbereich des kombinierten Markierungsversuches.

Sl. 1: Položaj porečja Ljubljane. 1 — površinsko razvodje, 2 — kraško razvodje, 3 — jadransko—črnomoško razvodje, 4 — nekraški del porečja, 5 — kraški del porečja, 6 — ožje raziskovalno območje kombiniranega sledilnega poskusa.

wodurch eine weitere Gliederung der fluviatil angelegten Talflucht durch die Verkarstung erfolgte.

Die Hauptzüge in der Entwicklung der Karstoberfläche und des Untergrundes haben wir mit einem schematischen Längsschnitt des zentralen Teils der Talflucht zwischen dem Ljubljansko Barje, Postojnska kotlina und dem Cerknjiško Polje darzustellen versucht (Fig. 2). Der zentrale Teil der Talflucht von Notranjsko zwischen Vrhnika, Postojna und Cerknica ist kein einheitliches Trockental, sondern besteht aus verschiedenen Reliefeinheiten. Zwischen den höheren Karstflächen wie Hrušica, Javorniki und Pokojiška planota können wir schließlich die ehemalige Talsohle der Ljubljana kaum noch verfolgen, weil dieses Gebiet durch Korrosionsprozesse schon stark aufgegliedert ist in

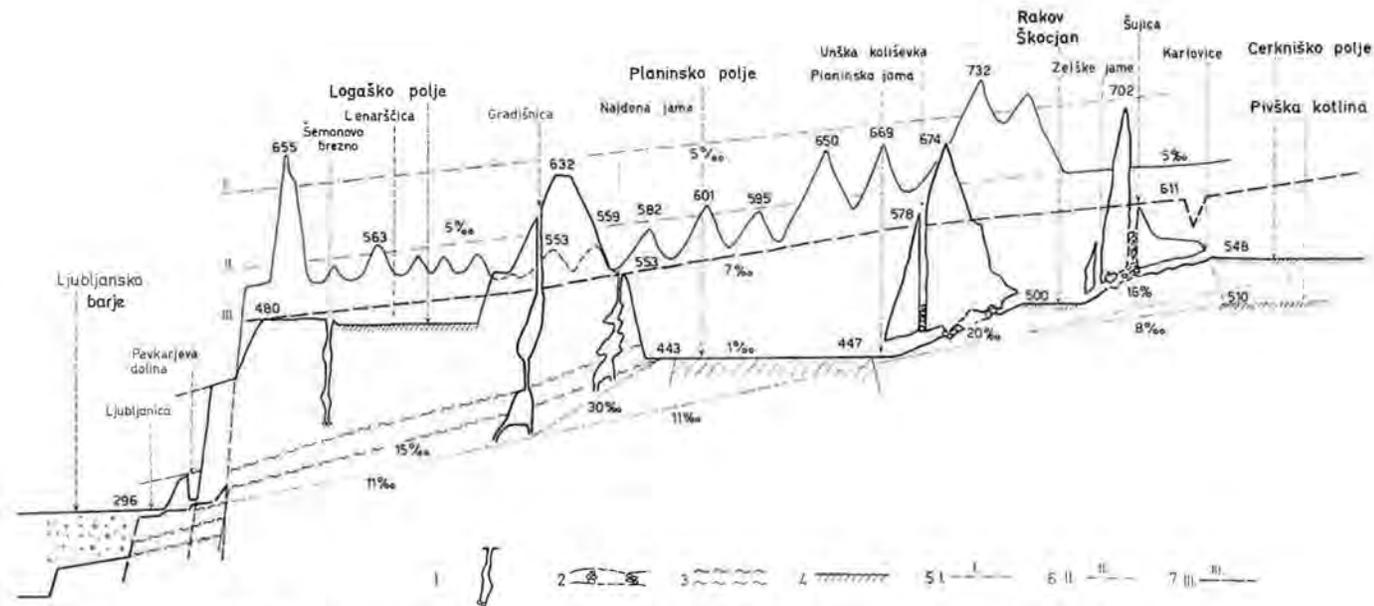


Fig. 2: Längsschnitt des zentralen Teiles des Karsteinzugsgebietes der Ljubljana.
 1 — aktive Wasserhöhle oder Schacht, 2 — unbekannte Abschnitte in den bekannten Wasserhöhlen, 3 — vermutliche Zone der ehemaligen Wasserhöhlen zwischen dem Planinsko Polje und dem Ljubljansko barje, 4 — Boden des Karstpoljes, 5 — Reliefstufe von Gradisce, 6 — Reliefstufe Bodiški vrh, 7 — Dolina oder Ravnik-Reliefstufe.

Sl. 2: Vzdolžni prerez osrednjega dela kraškega porečja Ljubljane. 1 — vodna jama ali brezno, 2 — neznan odseki v znanih vodnih jamah, 3 — predvidena cona nekdanjih vodnih jam med Planinskim poljem in Ljubljanskim barjem, 4 — dno kraškega polja, 5 — Gradiška reliefna stopnja, 6 — Bodiška reliefna stopnja, 7 — Dolinska reliefna stopnja.

einzelne kuppelartige Gipfel oder kleinere Formen wie Bänke und Stufen. Die Karstumgestaltung hat die ursprünglichen Reliefformen bereits so sehr verändert, daß man sie außer an charakteristischen Höhen der einzelnen Erhebungen nicht mehr recht erkennen kann. Die charakteristischen höheren und niedrigen kuppelartigen Gipfel gehören vornehmlich zwei Niveaus an; das sind die höhere sogenannte Gradiška Stufe und die niedrigere, besser ausgeprägte Bodiška Stufe. Im Längsschnitt zeigen sich einzelne kuppelartige Gipfel als Reste des ursprünglichen Trockentales mit einem Durchschnittsgefälle von etwa 5‰. An verschiedenen Stellen des ehemaligen Oberflächentales wurden Spuren fluvialer Sedimente gefunden (R. GOSPODARIČ 1968).

Von besonderer Bedeutung ist dabei das Sediment, das auf dem Gipfel Bodiški vrh (558 m) gefunden wurde. Aufgrund vorangegangener palinologischer Analysen wird geschätzt, daß es aus dem älteren Pleistozän oder jüngeren Pliozän stammt (A. ŠERCELJ 1968). Die mehr als 5 m starke Schicht von ziemlich karbonathaltigem Ton konnte nur durch Wasser angeschwemmt werden, die noch an der Oberfläche im Niveau der Bodiška Stufe flossen. Auch wenn dieser Ton ein Rest von Höhlensedimenten sein sollte, verleiht ihm die Lage auf dem isolierten Bodiški vrh eine besondere Bedeutung. Nach dem Alter dieses Sediments kann man ungefähr das Alter der niedrigeren Karstoberfläche abschätzen bzw. jenes der Dolinska Stufe, wo die Gewässer noch auf der Oberfläche fließen konnten und den umfangreichen, durch Erosion und Korrosion gezeichneten Logaški Ravnik ausbildeten. Dieser wurde bisher in das mittlere oder mindestens obere Pliozän eingereiht (I. RAKOVEC 1955). Dem Altpleistozän zugehörend und noch jünger sind demnach auch alle übrigen Karstsenkungen und Karstpoljen in diesem Teil des Einzugsgebietes der Ljubljana.

Die **Entwicklung des Karstes** verlief im ganzen Einzugsgebiet der Ljubljana nicht gleichmäßig, sie war ja in großem Ausmaß von den lokalen geologischen und morphologischen Verhältnissen abhängig. Deswegen können wir bei jedem Karstpolje neben den gemeinsamen Entwicklungseinheiten auch einige spezifische Züge erkennen.

Im engeren Hinterland der Ljubljana-Quellen heben sich vor allem geomorphogenetische Unterschiede zwischen dem Logaško und dem Planinsko Polje ab. Der Lage und der stufenartigen Anordnung nach wäre zu erwarten, daß das Logaško Polje niedriger sei, es ist aber gerade umgekehrt, was schon J. RUS (1925) und A. MELIK (1928) betont haben. Das Logaško Polje, am Kontakt der verkarsteten Kreidekalke mit den weniger durchlässigen Triasdolomiten gelegen, formten vor allem die Bäche aus dem dolomitischen und aus dem schieferigen Hinterland, während die Wasser des Flusses Unica im Planinsko Polje dieses Polje nicht beeinflussten. Aus den charakteristischen, niedrigen Randterrassen an der Ostseite des Logaško Poljes schließen wir, daß sich dieses langsamer vertiefte als das Planinsko Polje und sich sukzessiv verengte. Die Vertiefung verhinderten vor allem ausgiebige Anschwemmungen der oberirdischen Zuflüsse, auf die Verengung hatte vor allem die Karstzergliederung des Flußnetzes im Hinterland des Poljes Einfluß, wo sich das Plateau Rovtarska planota befindet.

Auf der Rovtarska planota liegen hinter den Ponoren der heutigen Sickerflüsse die Trockentäler, wo einst die Wasser oberflächlich in das Logaško Polje zusammenflossen (Fig. 3). Die heutigen oberirdischen Bäche (die Petkovščica, Majerjeva grapa, Rovtarica und Ovčica, Pikeljščica, Žejski potok, Hlevišarka und Hotenka) verschwinden weit entfernt vom Polje, in welches nur der Bach Logaščica mit kaum einem Viertel des ehemaligen Hinterlandes zufließt. An den

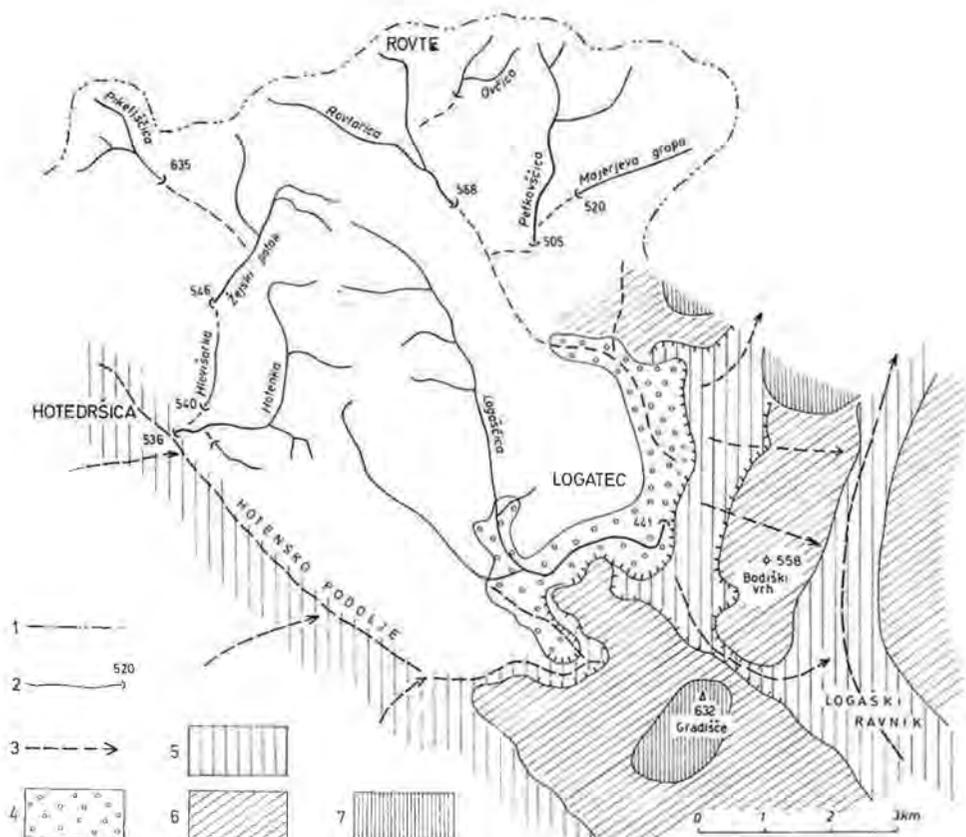


Fig. 3: Bachschwinden und Trockentäler auf dem Karstplateau Logaško-Rovtarska planota. 1 — Oberflächliche Wasserscheide, 2 — Bachschwinde mit der Meereshöhe der Schwinde, 3 — Trockental, 4 — Quartäre Ablagerungen am Karstrandpolje, 5 — Dolina- oder Ravnik-Reliefstufe, 6 — Stufe von Bodiški vrh, 7 — Stufe von Gradišče.

Sl. 3: Ponikalnice in suhe doline na Logaško-rovatarski planoti, 1 — površinsko razvodje, 2 — ponikalnica z nadmorsko višino ponora, 3 — suha dolina, 4 — kvartarne naplavine na robnem kraškem polju, 5 — Dolinska ali Ravniška reliefna stopnja, 6 — Bodiška stopnja, 7 — Gradiška stopnja.

Ponorstellen dieser Sickerflüsse entstanden junge Blindtäler mit mehr oder weniger ausgeprägtem, felsigem Rand und einem ebenen, angeschwemmten Boden. Meistens ungangbare Schlucklöcher befinden sich im Talboden oder am Fuße des felsigen Randes, nur bei den Bächen Petkovščica, Ovčica, Pikeljščica und Žejski potok haben sich kürzere Ponorhöhlen entwickelt.

Die Entwicklung des Planinsko Poljes war wesentlich anders. Dieses formten und vertieften die Karstwässer aus dem Bereich des Cerknisko Polje und aus dem Pivkabecken. Die Wässer flossen unterirdisch am Logaško Polje vorbei in die Karstquellen der Ljublanica. Bei der Entwicklung des Planinsko Poljes können wir zwei Hauptphasen unterscheiden. Der ältere Poljeboden war in einer Anhöhe von ca. 520 m und bildete zusammen mit den jetzigen Uvalas bei Unec-Rakek ein einheitliches Karstpolje an der bedeutenden geotektonischen Grenze der Verwerfungen von Idrija und Predjama. Es folgte dann eine aus-

giebige Vertiefung des Poljebodens bis zu den heutigen Höhen zwischen 440 und 450 m, doch in einem ziemlich engeren Umfang, weil die Uvalas von Unec aus dem oberflächlichen Zusammenfluß der Wässer, die von Cerknica und von Postojna zuflossen, ausgeschieden worden sind. Dieser Zusammenfluß wurde in den Bereich der Malni (= des Mühlbachtals) und der Höhle von Planina verlegt. Parallel mit der Vertiefung des Poljebodens von Planina formten sich am Rande die unterirdischen Zu- und Abflußkanäle.

Durch eingehende speläologische Untersuchungen (W. PUTICK 1888, I. MICHLER 1955, I. GAMS 1963, M. PUC 1965, F. ŠUŠTERŠIČ und M. PUC 1972, R. GOSPODARIČ 1970, 1976) wurden mindestens drei deutlich ausgeprägte Etagen der Zu- und Abflußkanäle festgestellt. Die niedrigste Etage ist jetzt aktiv, die mittlere ist die umfangreichste und überwiegend trocken, die oberste ist infolge von Verstürzen nur in kürzeren Höhlenabschnitten erhalten. Ähnliches gilt für die Umrandung der Poljen von Postojna und Cerknica. Kleinere Unterschiede sind vor allem auf den verschiedenen geologischen Bau (Flysch, Dolomit) und auf die unterschiedliche Verkarstung des Hinterlandes zurückzuführen.

Die Ponorbereiche der Karstpoljen zeichnen sich durch das ziemlich gut entwickelte, doch oft unterbrochene Netz der Abflußwege aus. Bekannt sind die Höhlensysteme von Postojna, von Cerknica und von Planina, obwohl an den Karstquellen viel mehr einheitliche Kanäle vorherrschen, was sich am schönsten bei der Höhle von Planina zeigt. Dort sind in einem Höhlengang mehrere Etagen vereinigt, und in ihm kann man mehrere Erosions- und Akkumulationsphasen, die mit der allgemeinen Entwicklung der Karstoberfläche und des Untergrundes im jüngeren Quartär verbunden sind, unterscheiden (R. GOSPODARIČ 1976).

Die Vertiefung der Karstpoljen und der dazwischenliegenden unterirdischen Kanäle ist eng miteinander verbunden. Die Entwicklung ist von der Erosionsvertiefung im Bereich der oberflächlichen Wasserläufe im Quellgebiet, zugleich aber auch von der Erniedrigung der relativ weniger durchlässigen Barrieren im mittleren Teil des Flußgebietes, auf welchem sich die Karstpoljen entwickelten, abhängig. Neben der Lage der Kanäle ist auch ihre Durchlässigkeit bedeutend. Im allgemeinen sollten sich die Kanäle mit dem Alter verbreitern, doch haben verschiedene, durch das oberirdische Wasser in den Untergrund abgelagerte Anschwemmungen diese Entwicklung verhindert. Eine verminderte Durchlässigkeit der Kanäle verursachten auch Verstürze, die die unterirdische Wasserbewegung hemmen und das Wasser zur Suche neuer Wege zwingen. Auf diese bedeutende Funktion der Einstürze im unbekanntem Untergrund weisen auch zahlreiche Einsturzdolinen, „koliševka“ genannt, hin. In der Talung Notranjsko podolje sind über 150 größere Einsturzdolinen bekannt, entstanden durch den Deckenverstoß einstiger Wassergänge. Am dichtesten sind die Einsturzdolinen knapp an den Ponoren und auf der niedrigen plateauartigen Oberfläche unmittelbar oberhalb der Karstquellen der Ljubljana. Zahlreich sind sie aber auch in der Zwischenregion. Die Einsturzdolinen unterscheiden sich nach der Form, der Größe und der Lage (F. ŠUŠTERŠIČ 1973). Den größeren Teil dieser interessanten Karstformen kann man mit der Anordnung der mittleren Etage der unterirdischen Kanäle in Verbindung setzen. Eine ungewöhnliche Lage haben die Einsturzdolinen und die Sacktäler Močilnik und Retovje unmittelbar oberhalb der Karstquellen der Ljubljana. Sie liegen bedeutend niedriger als andere verwandte Formen. Wenn sie oberhalb derselben Kanäle wie andere Einsturzdolinen entstanden, was sehr wahrscheinlich ist, dann muß ihre jetzige Lage mit den zugehörigen Kanälen zusammen auf die allmähliche

tektonische Senkung des Ljubljansko barje und seiner Umrandung zurückzuführen sein. Mit der Annahme einer solchen Entwicklung stimmen auch andere Reliefeigenheiten am Übergang der Talung Notranjsko podolje in die Umrandung des Ljubljansko barje überein.

Unter der morphologischen Dolinka-Stufe sind am Übergang bis zum felsigen Boden des Ljubljansko barje wenigstens noch fünf Stufen, die bis jetzt vor allem mit der Erosionswirkung des Flusses Ljubljanica erklärt wurden (I. RAKOVEC 1955), bekannt. Über die Umformungsfähigkeiten des Wassers an den Karstquellen können wir uns an den verschiedensten Stellen überzeugen, doch ist die gesamte Reliefbrücke in der stufenartigen Umrandung des Ljubljansko barje bei Vrhnika schwer allein dem Erosionsprozeß zuzuschreiben. Für eine solche Entstehung der stufenartigen Umrandung gibt es keine Beweise, es fehlen nämlich alte Sacktäler bei den heutigen Karstquellen, wie sie bei Močilnik und Retovje bestehen. Sie vermißt schon A. MELIK (1952). Es ist merkwürdig, daß auf diesen Stufen bis jetzt noch keine Reste der damaligen Wasserhöhlen gefunden wurden.

Es weist alles darauf hin, daß gleichzeitig mit der Entstehung des Kessels von Ljubljansko barje die ursprünglichen Höhlengänge zusammen mit der Oberfläche und mit den Einsturzdolinen in Stufen teilweise sogar unter die jetzige Anschwemmungsebene entwässerten. Die jüngeren Anschwemmungen stauten das Ausfließen des Wassers aus den ursprünglichen Kanälen, welche an mehreren Stellen durch tektonische Verschiebungen unterbrochen wurden, zurück, so daß die Ströme in den Spalten neue Wege zur Oberfläche suchen mußten. Anstatt eines einheitlichen geschlossenen Wasserlaufes, so wie wir ihn bei der Höhle von Planina und bei den vielen anderen Karstquellen (Vaucluse, Aachtopf) treffen, hat der Karstfluß Ljubljanica einen breiten verzweigten Ursprung. Die Wässer brechen aus zahlreichen engen und ungangbaren Spalten heraus. Selten sind die Kanäle, in denen die Höhlentaucher tiefer in die Unterwelt vordringen könnten (A. PRAPROTNIK und P. KRIVIC 1973). In den morphologischen und in den hydrologischen Verhältnissen an den Karstquellen der Ljubljanica sehen wir also die Folgen einer jungen tektonischen Senkung. Die Einflüsse dieser Senkung reichen aber noch tief in das Karsthinterland hinein.

Die Abwechslung der durchlässigen und der undurchlässigen Gesteine im Flußgebiet der Ljubljanica ermöglicht sowohl eine oberflächliche als auch eine unterirdische Entwässerung, woraus verschiedene **hydrogeographische Eigenheiten** resultieren. Ihre Anordnung ist aber derart, daß die oberirdischen und die unterirdischen Wässer aus den Quellgebieten in den Karstpoljen zusammenfließen, dort versiegen und in den niedrigeren Karstpoljen wieder an die Oberfläche treten. Endlich kommen alle Wässer nach einer mehrmaligen Versickerung oder nach der direkten unterirdischen Strömung in den Karstquellen bei Vrhnika in einer verhältnismäßig engen Zone am Westrand des Ljubljansko barje (Laibacher Moor) zutage, um dann oberflächlich in den Savefluß zu münden.

Bei Vrhnika, in einem einen Kilometer breiten und bis zwei Kilometer langen Sacktal, reihen sich von Nordwesten gegen Südosten die Quellen der Mala Ljubljanica (1. 3), (Fig. 4. A), der Velika Ljubljanica (1. 4) und der Lubija (1. 2), (Fig. 4. B), während die Karstquellen der Bistra (1. 1) noch gute zwei Kilometer weiter östlich am Rande des Ljubljansko barje zutage treten. Westlich von Vrhnika sammelt der Bach Bela die oberflächlichen Wässer aus dem teilweise verkarsteten Dolomit und auch kleinerer Karstquellen, unter welchen die Quelle Staje (1) und die Quelle Lintvern die bedeutendsten sind (Fig. 4).

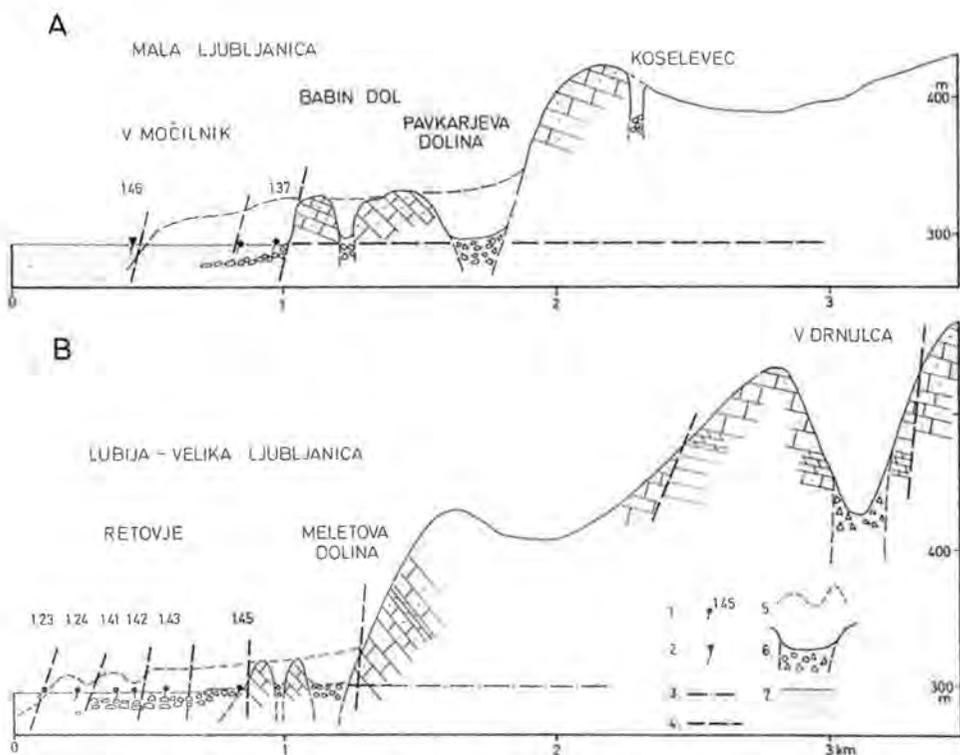


Fig. 4: Profil des engeren Hinterlandes der Ljubljana-Quellen (A — Močilnik, B — Retovje). 1 — Karstquelle mit Kennzeichnung, 2 — Thermalquelle, 3 — Karstwasserniveau, 4 — bedeutendere Verwerfung, 5 — Umriß des Karstsacktales, 6 — Einsturzdoline mit Versturzböcken, 7 — quartäre Ablagerungen des Ljubljansko barje.

Sl. 4: Prerez ožjega zaledja izvirov Ljubljance, A — Močilnik, B — Retovje. 1 — kraški izvir z oznako, 2 — termalni izvir, 3 — nivo kraške vode, 4 — važnejši prelom, 5 — obris zatrepne doline, 6 — udornica s podornim skalovjem, 7 — kvartarne naplavine Ljubljanskega barja.

Letztere war schon J. V. VALVASOR (1698) als eine intermittierende Quelle, die das Wasser nur in ungleichmäßigen Zeitabständen ausspeit, bekannt. Ein Teil des oberflächlichen Baches Bela versickert im eigenen Flußbett und fließt unterirdisch zur Karstquelle Kožuhov izvir (1. 32), die aber nach ihrer Ergiebigkeit und früheren Markierungsversuchen ein ziemlich umfangreiches Hinterland besitzt (P. HABIČ 1976). Einige hundert Meter vor dem Zusammenfluß der Mala Ljubljana und des Baches Hribščica gibt es am rechten Ufer die bekannte kleinere Thermalquelle Furlanove toplice (1. 38).

Zu den Quellen an der linken Seite des Bela-Tales gehören zwei kleinere Karstquellen (Primcov studenec und Bečkajev studenec, 1. 34), die das nächste Hinterland entwässern, auch mit der Quelle Kožuhov izvir (1. 32) besteht eine Verbindung (P. HABIČ 1974). Die Mala Ljubljana (1. 3) erhält auch das Wasser aus dem Sacktal der Quelle Mali Močilnik (1. 36) und aus den drei Quellen des Veliki Močilnik (1. 37), die in einem malerischen Sacktal liegen und mit 30 Meter hohen, senkrechten Wänden umgeben sind.

Die Karstquellen der Velika Ljubljana (1. 4) entspringen im Retovje, dem Močilnik ähnlichen, aber doch mehr gegliederten Sacktal mit mehreren Quellen. An seiner linken Seite ist unter der senkrechten Felswand die Karstquelle Malo okence (1. 44), die nur bei Hochwasser aktiv ist. Sehr ähnlich ist auch die Karstquelle Veliko okence (1. 45), die eine der Hauptquellen der Ljubljana darstellt und am äußersten südlichen Teil des Sacktales Retovje liegt. Die Karstquellen 1. 44 und 1. 45 sind nur bei höheren Wasserständen aktiv. Das Sacktal Retovje verbreitert sich gegen Norden, wo das Wasser an mehreren Stellen herausbricht. Malerisch wirkt die ständige, starke Karstquelle Pod skalo (1. 43), etwas kleiner und beim Hochwasser wegen des Sprudelns besonders interessant ist aber die Karstquelle Pod orehom (1. 42). Die nächste Karstquelle Maroltov izvir (1. 41) ist mit einer Mauer eingefaßt und teilweise durch ein Wohngebäude überbaut. Sofort hinter dieser Quelle verbreitet sich das Flußbett der Velika Ljubljana am Übergang vom felsigen zum lehmigen Boden in einen größeren Tümpel. An der rechten Seite dieses Tümpels befindet sich die letzte Quelle in der Reihenfolge der Quellen der Velika Ljubljana.

Ein niedriger Felsrücken trennt Retovje von dem wenig ausgeprägten Sacktal, in welchem die Karstquellen der Lubija (1. 2) von der temporären Smukov izvir (1. 24) und Gradarjev izvir (1. 23) bis zu der ständig fließenden Jurčkov izvir (1. 21) und Ceglarjev izvir (1. 22) angeordnet sind. Zwischen den Quellen der Lubija und der Bistra (1. 1) liegen einige kleinere unbedeutende Quellen.

Der Bistrafluß (1. 1) erhält das Wasser aus drei Hauptkarstquellen. Ein weitgehend geschlossener Quellaustritt ist die Grajski izvir (1. 13), die das ehemalige Karthäuserkloster von der Nordseite her umgibt. Auf der Gegenseite fließt hingegen das Wasser aus zahlreichen Spalten zu Zupanov izvir (1. 12). Weiter gegen Osten folgt eine ähnliche Reihe von Spaltenquellen, die das Wasser der Galetov izvir (1. 11) zuführen. Noch weiter östlich liegen zwei kleinere Quellen, Pasji studenec (1. 15) und Ribčev studenec (1. 14), die nur periodisch schütten.

Die den beschriebenen Karstquellen nächsten Schwinden befinden sich westlich von Vrhnika im Bereich des Karstplateaus Logaška planota und Rovtarska planota, das einen Umfang von ca. 100 km² verkarsteter und unverkarsteter Oberfläche umfaßt. Der Schwindenbach Petkovščica (2. 11) entwässert ca. 10 km², der Schwindenbach Rovtarica (2. 21) zusammen mit dem Bach Ovčica (2. 22) 8 km² vorwiegend undurchlässige Oberfläche. Ein Teil dieser Wasser verschwindet in den verkarsteten Dolomitboden. Dasselbe gilt auch für die nächsten, noch mehr gegen Westen gelegenen Schwindenbäche, die sofort versickern, wo sie auf durchlässige Kalke treffen. Die Flüsse Hotenka (2. 31) und Žejski potok (2. 32) haben je 4 km² des Flußgebietes im Dolomit, der Fluß Pikeljščica (2. 51) aber nur 2,5 km². Südlich von diesen Schwindenbächen läuft der Bach Logaščica (2. 41) aus dem ca. 20 km² großen Gebiet aus Triasdolomit und verschwindet im Ponor Jačka am Ostrand des Logaško Polje.

Der bedeutendste Sickerfluß im Hinterland der Ljubljana-Quellen ist die Unica (3.) im Planinsko Polje. Die Zuflüsse befinden sich in der Süd- und Westseite, die Abflußstellen aber an der östlichen und nördlichen Seite des 16 km² ausgedehnten Karstpoljes. Es ist bekannt, daß in das Polje von Planina die Wasser aus dem Pivkabecken, aus dem Cerknisko Polje — über den Rakov Škocjan — und unmittelbar aus dem Karstmassiv Javorniki zusammenfließen (F. JENKO 1959; I. GAMS 1966, 1970). Die Hauptquellen des Flusses Unica (3. 0) befinden sich an der Südseite des Poljes in Kreidekalken, und zur Zeit der

Hochwässer fließt aus der 6 km langen Höhle Planiska jama (3. 9) ein richtiger Fluß. In der Höhle fließen nämlich die Wässer aus dem Cerknisko Polje, vom Javornikizug und vom Pivkabecken zusammen.

Die Karstquellen Malenščica (3. 7) befinden sich in dem benachbarten Sacktal. Die Hochwässer werden dort teilweise gedämpft, Niederwässer wirken sich besonders an den stärksten Quellen aus. Östlich vom Sacktal Malni liegen schon am Kontakt der Kalke und der Dolomite die temporären Quellen Škratovka (3. 6). Temporäre Speier befinden sich auch im nordwestlichen Winkel des Planinsko Poljes unter dem Dorf Grčarevec, die zur Zeit der Hochwässer ihr Wasser aus einem Teil des Karstmassivs Hrušica und vielleicht auch aus dem Fluß Hotenka erhalten.

Die Hauptschlucklöcher Podstenami (3. 1) des Flusses Unica liegen am Nordrand des Poljes, wo vor allem die mittleren und die hohen Wässer verschwinden. Zur Zeit der Niederwässer verliert sich der ganze Fluß Unica schon in den Ponoren am Ostrand des Poljes, wo sich längs des Flusses die Ponore Mrčonovi ključiči (3. 44), Milavcovi ključiči (3. 42), Zrnki in Ribce (3. 43), die Schlucklöcher am Dolenje loke (3. 41) und bei der Laška žaga (3. 21) und andere befinden. Das Wasser entweicht in den Untergrund unmittelbar aus dem Flußbett der Unica in viele ungangbare Spalten, zur Zeit der großen Überschwemmungen verliert sich das Wasser in mehr als 150 Schlucklöchern und Spalten. Nur in Dolenje loke und in Škofji lom sind zwei bis 160 m lange Ponorhöhlen bekannt.

Zur Zeit der Hochwässer fließt dem Planinsko Polje mehr Wasser zu, als die Schwinden schlucken können. Die Folgen davon sind jedes Jahr mehrmalige Überschwemmungen. Bei den Überschwemmungen, die ein bis zwei Monate dauern, steigt das Wasser im Polje bis 10 m hoch, was eine Menge bis zu 70 Millionen Kubikmeter Wasser ergibt.

In Pivkabecken sammelt der Fluß Pivka (4. 0) die Oberflächenwässer aus dem Fylschgebiet, zur Zeit der Mittel- und Hochwässer erhält die Pivka aber auch einen Teil der Karstwässer aus dem Westrand des Gebirgsmassivs Javorniki. Bei Niederwasser entwässert das Gebiet der Javorniki unmittelbar in die Karstquellen 3. 7 (P. HABIČ 1968).

In der Karstdepression Rakov Škocjan fließen in dem 2,5 km langen oberflächlichen Lauf des Baches Rak (5. 1) die Wässer aus dem Cerknisko Polje und teilweise aus dem Gebirgszug Javorniki, die in der Karstquelle Kotličiči (5. 2) und in den benachbarten temporären Quellen zutage treten. Ein Teil der Wässer des Cerknisko Polje kommt aus der Höhle Zelske jame (5. 4). Der Fluß Rak verschwindet teilweise schon vor der großen Naturbrücke, der Hauptponor befindet sich aber in der über 1,2 km langen und bis jetzt noch nicht gänzlich erforschten Höhle Tkalca jama (5. 0). Zur Zeit der Hochwässer sind die Zuflüsse größer als die Schluckfähigkeiten der Ponore, und das Tal Rakov Škocjan wird periodisch überschwemmt.

Der vorwiegend ebene Boden des Cerknisko Polje, wo zur Zeit der Überschwemmungen ein breiter Karstsee entsteht, hat ein Ausmaß von ca. 36 km². Die Hauptponorhöhlen und Schlucklöcher liegen in der Höhlenbucht Jamski zaliv am nordwestlichen Rand des Poljes. Die größten Wassermengen führen die Höhlen Mala Karlovica (6. 01) und Velika Karlovica (6. 00), wo über 7 km lange Höhlengänge erforscht wurden, ab. Niedrigere Wässer verschwinden vor allem in den Randschlucklöchern Narte (6. 022), Kamnje (6. 021), Svinjska jama (6. 02) und in den zahlreichen Talponoren, die inmitten des Poljebodens in einer einen Kilometer breiten Zone angeordnet sind. Da reihen sich die Tal-

ponore von Rešeta (6. 18), Vodonos (6. 16) und Retje (6. 21) gegen Süden bis zum Fluß des Gebirgsmassivs Javorniki, darauf folgen die Ponore Bečki (6. 15), Sitarica (6. 13), Velike und Male Ponikve (6. 14) bis zu den Schlucklöchern und zu den Estavellen Gebno (6. 035), Kotel (6. 038) und Češljenca (6. 033), im See- teil genannt Zadnji kraj, bis zum Ponor Lovišča (6. 051) an der Ostseite des Dorfes Otok. Den größten Teil des Jahres sind diese Talponore überschwemmt, zur Zeit der Dürre verlieren sich in ihnen die letzten Wässer, die noch in das Polje zufließen. Die Zuflußseiten liegen an der Ost- und Südseite des Poljes. Neben dem oberflächlichen Bach Cerkniščica (6. 45) mit beinahe 45 km² des Einzugsgebietes fließen von den dolomitischen Abhängen des Berges Slivnica kleinere Gerinne in die Bäche Martinjščica (6. 23) und Grahovščica (6. 25) herab. Etwas ausgiebiger sind an der Ostseite des Poljes die Karstquellen Žirovniščica (6. 45) und Lipsenjščica bzw. die Quelle Šteberščica (8. 12), die ihr Wasser aus dem Bloško Polje (7. 0) und aus seinem benachbarten Karsthinterland bekommt. Diese Gewässer fließen teilweise durch die interessante, 8 km lange Wasserhöhle Križna jama („Kreuzberghöhle“ in der deutschen Literatur), bekannt durch zahlreiche Seen und durch die dazwischenliegenden Sinterschwellen. Die Hauptkarstwasserquellen im südöstlichen Winkel des Poljes wie Obrh (6. 07), Cemun (6. 071) und andere Karstquellen unmittelbar aus den Bergmassiven Javorniki und Snežnik münden in den Seefluß Stržen (6. 087). Einen bedeutenden Teil des Wassers erhält das Cerkniško Polje aus dem benachbarten Loško Polje. Die Zuflüsse sind oft höher als die Abflüsse, und das Cerkniško Polje verwandelt sich durchschnittlich acht Monate jährlich in einen Karstsee, der manchmal das ganze Jahr nicht versiegt. In ihm gibt es bei den höchsten Wässern, wenn der Seespiegel über 552 m steigt, bis 80 Millionen Kubikmeter Wasser.

Das benachbarte Loško Polje ist kleiner (12 km²) und hat im Vergleich mit dem Cerkniško Polje und dem Planinsko Polje einen engeren Ponorbereich im nordwestlichen Winkel, wo sich die bekannte Ponorhöhle Golobina (8. 0) befindet. Bei Niedrigwasser verliert sich das Wasser des Baches Obrh (8. 01) im Wasserbett, bevor es die Ponorhöhle Golobina erreicht, bei Hochwasser aber überflutet es die Höhle und einen Teil des Poljes, wo sich bis 50 Millionen Kubikmeter Wasser sammeln. Die Hauptquellen sind an der südöstlichen und an der östlichen Seite des Karstpoljes, wo sich die ständige Karstquelle Veliki Obrh (8. 24) befindet, die Quelle Mali Obrh (8. 15) und andere Quellen am Westrand des Poljes versiegen bei Niedrigwasser. Die Karstquelle Veliki Obrh bekommt das Wasser aus dem höher gelegenen Babno Polje und aus dem Uvala bei Prezid, wo sich der Ponorfluß Trebuhovica (9. 0) befindet. Dieser Bach liegt im ganzen System der Ponorflüsse der Ljubljana am höchsten und ist von den Karstquellen der Ljubljana bei Vrhnika am weitesten entfernt.

Die Abwechslung des oberirdischen und des unterirdischen Fließens im Einzugsgebiet der Ljubljana-Quellen verursacht eine ganze Reihe von hydrologischen Unbekannten, die bis jetzt noch nicht gänzlich gelöst wurden. Zur Zeit der Überschwemmungen im Cerkniško Polje, im Planinsko Polje und im Rakov Škocjan können weder die Zufluß- noch die Abflußmengen gemessen werden. Weil die Überschwemmungen im Cerkniško Polje am längsten dauern, sind die Wassermengen, die durch das Polje fließen, am wenigsten bekannt. Die Färbung des Wassers in der Höhle Golobina (F. BIDOVEC 1968) zeigt aber, daß vielleicht ein Teil des Wassers aus dem Loško Polje auch unter dem Cerkniško Polje in die Karstquellen der Ljubljana fließt.

Die ersten greifbaren Hinweise für die Erfassung der Karstwasserverhältnisse im Einzugsgebiet der Ljubljana gaben die aufeinanderfolgenden Färbungen der Ponorflüsse (A. ŠERKO 1946, I. GAMS 1965) in den Jahren von 1910 bis 1965.

Aufgrund dieser Markierungen wurden Hauptwasserverbindungen zwischen den Ponoren und den zugehörigen Quellen festgestellt. Weil aber jede Färbung bei anderen Wasserverhältnissen ausgeführt wurde, waren auch die Resultate dieser Markierungen sehr verschieden. Mittels der neuen Untersuchungen und Markierungen, die in den Jahren 1972 bis 1975 im Rahmen des 3. internationalen Symposiums über die Markierungen der unterirdischen Gewässer durchgeführt wurden, konnten offene Fragen neuerdings überprüft werden.

Vor dem Beginn der Untersuchungen und der kombinierten Markierungsversuche war es möglich, ein **Schema der unter- und oberirdischen Entwässerung** im Einzugsgebiet der Ljubljana-Quellen zusammenzustellen (Fig. 5).

Auf Fig. 5 sind die bekannten und supponierten Abschnitte der Wasserscheide eingetragen, weiters die Sickerwasserläufe auf der Erdoberfläche mit den entsprechenden unterirdischen Verbindungen, die periodischen Hochwasser-Überläufe aus den Karstmassiven, die Karstwasserzonen, aus denen die ständigen Quellen gespeist werden, die zentrale hydrogeologische Barriere, durch welche das Gewässernetz in eine obere und untere Hälfte geteilt wird, die Karstpoljen und die wichtigsten Pegelstationen, welche die Daten für das Studium der hydrologischen Merkmale des Karstflusses Ljubljana messen und zusammentragen.

Im Bereich des Ljubljanaer Moors bei Vrhnika (1.02) und bei Komin (1.01) können wir alle Wässer messen, die hier aus dem ausgedehnten, jedoch nur annähernd begrenzten Karstwässernetz zusammenfließen. Vermutlich erscheint nur ein kleiner Teil der Karstwässer nicht auf der Oberfläche des Ljubljanaer Moors, weil sie dessen Grundwasser unmittelbar speisen. Im übrigen sind aber die Daten über die Durchflüsse der Ljubljana (1.02), der Lubija (1.2) und der Bistra (1.1) für das Studium der Wasserbilanz des gesamten Karstwässernetzes von großer Bedeutung. Wegen des unbestimmten Umfanges des Gewässernetzes ist es schwierig, die ganze Niederschlagsmenge und damit auch die tatsächlichen Abflusskoeffizienten festzulegen, und das um so mehr, als zwischen der Verteilung der Niederschläge und jener der Abflüsse bedeutende Unterschiede bestehen und diese Werte im Karstwassergebiet der Ljubljana schon auf kurze Entfernungen hin leicht starke Veränderungen erfahren.

In den Sickerflüssen der Karstpoljen ist nur ein Teil der Wässer des hydrologisch sehr heterogenen Gewässernetzes zu erfassen. Einzelne Teile dieses Netzes bilden zwar einheitliche, gleichartige hydrographische Bereiche, wie z. B. die engeren Flußgebiete der Nanošćica (4.1) und der Cerknjšćica (6.45), es überwiegen jedoch ungleichmäßige oder heterogene Gebiete, z. B. das Flußnetz der Pivka (4.21), zu dem nur Hochwässer aus dem Javorniki-Gebiet zufließen.

Ähnliche hydrographische Verhältnisse machen sich auch in den Flußgebieten des Loško Polje und Cerknjško Polje, des Rakov Škocjan und des Planina Polje geltend.

Einen in gewissem Grad eigenartigen hydrographischen Typus zeigt das Plateau Bloke (7.0) samt seiner Nachbarschaft. Seine auf der Erdoberfläche fließenden Wässer, die versickern und unterirdisch zu den Poljen von Cerknica

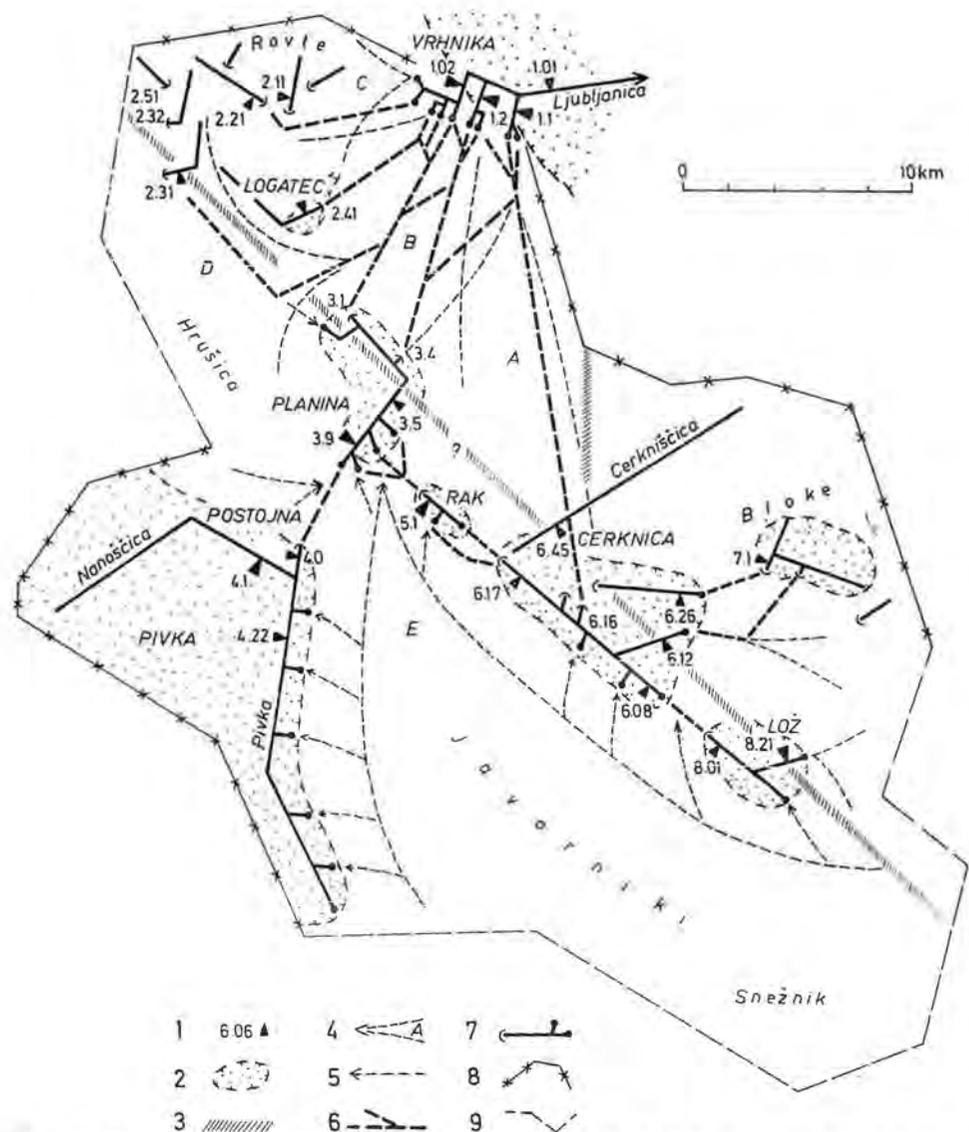


Fig. 5: Schema der oberflächlichen und der unterirdischen Wässer im Karsteinzugsgebiet der Ljubljana. 1 — wichtigere Wassermessstationen, 2 — Karstpolje mit Ablagerungen, 3 — die zentrale hydrogeologische (relative) Barriere, 4 — Sammlungsbereich der ständigen Karstquellen, 5 — periodische Hochwasserwege des Karstwassers, 6 — unterirdische Wasserverbindungen, 7 — oberflächlicher Wasserlauf mit den Quellen und den Schwänden, 8 — oberflächliche Wasserscheide, 9 — vermutliche Karstwasserscheide.

Sl. 5: Shema površinskih in podzemeljskih voda v kraškem porečju Ljubljane. 1 — važnejše vodomerne postaje, 2 — kraško polje z naplavinno, 3 — osrednja hidrogeološka pregrada, relationalna bariera, 4 — zbirno območje stalnih kraških izvirov, 5 — občasni visokovodni prelivni kraške vode, 6 — podzemeljske vodne zveze, 7 — površinski tok z izviri in ponori, 8 — površinsko razvodje, 9 — kraško predpostavljeno razvodje.

und Lož abfließen, können wir mit einigen anderen Karstwässern in ein gemeinsames Beobachtungsnetz zusammenfassen (6.12 und 6.21). Das Gewässernetz ist zum größten Teil bekannt, so daß hier ein genaueres Studium der Wasserbilanz und der Eigenheiten des ober- und unterirdischen Abflusses möglich ist.

Nahezu durch die Mitte des Karstflußnetzes der Ljubljana verläuft längs der Idrija-Bruchlinie eine nur teilweise durchlässige Dolomitbarriere, welche die Karstwässer der südlichen Hälfte des Flußnetzes zwingt, daß sie nach Durchquerung der Karstpoljen aufs neue in den Untergrund versinken und zu den Quellen der Ljubljana abfließen. Über die Poljen strömt der größte Teil der Karstwässer aus dem höher gelegenen zum tiefer gelegenen Gewässernetz, der kleinere Teil fließt dagegen durch die verkarstete Barriere im Gelände zwischen den Poljen von Cerknica und Planina und der Ortschaft Hotedršica unmittelbar zu den Ljubljanaquellen ab. Diese Wässer können nicht genau gemessen werden, so daß wir nicht wissen, wie groß der Anteil aller Wässer des oberen Flußnetzes der Ljubljana ist, der tatsächlich das Polje von Planina durchströmt (Unica, Haasberg, 3. 5). Nach den Angaben vor dem Markierungsversuch sind dort die durchschnittlichen Jahresdurchflüsse um 30 bis 40% geringer als die Jahresdurchflüsse des gesamten Karstflußnetzes der Ljubljana. Die Unterschiede sind zu Trockenzeiten größer (50%), bei Hochwässern dagegen kleiner (20%). Den Unterschied beeinflussen die Zwischenzuflüsse aus dem Karstgebiet zwischen den Poljen von Cerknica und Planina und dem Ljubljanaer Moor (auf Fig. 5 bezeichnet mit A, B, C), jedoch auch die Wässer, die aus dem höher gelegenen Karstwassernetz (D, E, F) unterirdisch durch die erwähnte relative Barriere abfließen.

Das Gebiet der Logaške Rovte mit seinen neun kleineren Sickerbächen auf der Erdoberfläche und einem ständigen unterirdischen Abfluß aus dem unbekanntem Karsthinterland der Hrušica (D) ähnelt in hydrologischer Hinsicht einigermaßen dem Bloke-Plateau. Doch ist es schwer, den Abfluß aus den Logaške Rovte und der Hrušica zu messen, weil sich die aus diesem Hinterland kommenden Wässer unterirdisch mit Wässern aus dem anderen Teil des Karstflußnetzes der Ljubljana mischen. Mit den Wasserstandsmessungen an den Sickerbächen (2.1 bis 2.5) wird wahrscheinlich im Durchschnitt nicht einmal die Hälfte des Abflusses aus diesem Gebiet erfaßt.

Bei der Ermittlung des unmittelbaren Abflusses des Sees von Cerknica zu den Quellen am Rande des Ljubljanaer Moores stehen wir vor einem besonderen Problem, das im Zusammenhang mit der Feststellung des gesamten Zuflusses zum Polje von Cerknica und gleichzeitig mit Messungen des Abflusses in Richtung zum Rakov Škocjan und zum Polje von Planina und direkt zu Quellen der Ljubljana zu lösen sein wird.

Offen ist auch die Frage der von Lož kommenden Wässer. Während nämlich die Quellen des Obrh im Cerknisko Polje schon vollkommen trocken liegen, versickert vor der Schwinde Golobina am Loško Polje noch eine Wassermenge bis zu 1 m³/s. Dieses Wasser fließt möglicherweise unter dem Javornikuzug längs des Cerknisko Poljes in die Unicaquellen auf dem Planinsko Polje, es kann aber auch unter dem Cerknisko Polje zu den Bistra-, Lubija- und Ljubljanaquellen am Rande des Ljubljanaer Moores abfließen.

Aus dem Gesagten ist ersichtlich, daß trotz der 100jährigen Tradition der hydrologischen Untersuchungen eine Menge von hydrologischen Unbekannten vorhanden ist.

2. 1. 2. Geologie und Hydrogeologie (S. BUSER, F. DROBNE und R. GOSPODARIČ)

Der größte Teil des Karsteinzugsgebietes der Ljubljana ist im Maßstab 1:75.000 auf der geologischen Karte Ajdovščina (Haidenschaft) und Postojna (Adelsberg) zusammen mit den Erläuterungen von F. KOSSMAT (1905) dargestellt. Die geologischen Untersuchungen des Gebietes nach dem Jahr 1945 wurden von Geologen der Geološki zavod Ljubljana durchgeführt. Das Blatt Postojna wurde neu kartiert. In jeder Hinsicht wurden die älteren Daten wesentlich vervollständigt (S. BUSER 1965, 1973, M. BREZNIK 1962, K. GRAD 1962, M. PLENIČAR 1954, 1970). Auch für den tektonischen Aufbau ergaben sich neue Erkenntnisse, vor allem durch Geologen des Bergwerks Idrija (J. MLAKAR 1969, L. PLACER und J. ČAR 1975).

Für die hydrologischen Untersuchungen war es aber dennoch notwendig, das Gebiet zwischen Vrhnika, Logatec und Postojna nochmals zu bearbeiten, weil die bestehenden Daten unzulänglich waren. Eine besondere Aufmerksamkeit sollte dabei den hydrogeologischen Eigenschaften der Gesteine gewidmet werden, was bisher nicht näher studiert wurde.

Die vorliegenden Beschreibungen der lithostratigraphischen, tektonischen und hydrogeologischen Verhältnisse beruhen auf den bisherigen Literaturangaben sowie den Geländebeobachtungen, welche für das Forschungsprogramm des „3rd International Symposium of Underground Water Tracing“ ausgeführt worden sind.

Lithostratigraphie

Das betrachtete Einzugsgebiet der Ljubljana gehört zu den Äußeren und den Inneren Dinariden. Für die Äußeren Dinariden sind Flachmeer-Ablagerungen der jurassischen und kretazischen Schichten (Kalke, Dolomite) kennzeichnend. Tiefmeersedimente (Plattenkalke, hornsteinführender Dolomit, Flyschgesteine u. s.) gleichen Alters aber sind für die Inneren Dinariden typisch. Die beiden geotektonischen Einheiten grenzen nordöstlich der Idria-Bruchzone aneinander, wo in tektonischen Fenstern noch Flachmeersedimente der Unterkreide vorliegen.

Im Bereich der Untersuchungen und Markierungsversuche sind Schichten folgenden Alters aufgeschlossen: Permokarbon, Perm, Trias, Jura, Kreide, Paläozän, Eozän und Quartär. Die Triasschichten sind am meisten verbreitet, weniger Jura und Kreide, am wenigsten aber Permokarbon, Perm und das Tertiär. Die Quartärablagerungen sind auf die Karstpoljen und das Ljubljanaer Moor begrenzt.

Schichten des Permokarbon und Perm liegen in einem engen und oft unterbrochenen Zug von Idrija bis nach Vrhnika vor. Schwarzer Tonschiefer, Quarzsandstein und Konglomerat, überlagert von den „Grödener“ Klastiten, geschichtetem Dolomit und Kalkstein, sind vertreten. Die Schichtmächtigkeit beträgt einige 100 m. Die Schichten sind jedoch nicht in ihrer vollen Mächtigkeit vertreten, weil sie in Decken vorliegen.

Die **Triasschichten** sind lithologisch sehr vielfältig. Sie wurden stratigraphisch gut erfaßt, am besten im Raum westlich von Vrhnika bis nach Idrija, weniger im östlichen Teil des betrachteten Flußgebietes.

Im Liegenden finden sich die etwa 600 m mächtigen Skythschichten. Überwiegend Dolomit, weniger hingegen Schiefer, Sandstein, Oolithenkalk und Mergelkalk sind darin vertreten.

Die Anisische Stufe wird von einem bis 300 m mächtigen körnigen Massendolomit repräsentiert.

In der Ladinischen Stufe wurden bankige Dolomitkonglomerate (bis 400 m mächtig), westlich von Rovte Tuffe und Tuffite, im Gebiet der Schwindenbäche Rovtarica und Petkovšičica aber geschichtete Kalke abgelagert.

In der Karnischen Stufe treten bis 400 m mächtige Cordevolschichten eines hornsteinführenden Plattenkalkes und bis 300 m mächtiger Massendolomit auf. Im Westen kommen diese Gesteine im Podroteja-Quellenbereich vor, sie werden auch bei Borovnica im Osten des Betrachtungsgebietes beobachtet.

Das obere Karn (Jul und Tuval) ist überwiegend klastisch entwickelt. Dolomit ist im Norden von Hotedršica, bei Borovnica, bei Godovič und Logatec sowie in den tektonischen Decken und Klippen aufgeschlossen. Die Mächtigkeit der Klastite kann auf 300 m, die des Dolomites bei Borovnica aber auf 250 m geschätzt werden.

Die Norische und Rhätische Stufe sind als geschichteter feinkörniger und als grobkörniger, massiver Dolomit entwickelt. Die Dolomitmächtigkeiten betragen um 1100 bis 1300 m. Das Dolomitgestein ist an Störungen zu Mylonit-Brekzien zerbrochen. Auch mehrere 100 m breite Zerbrechungszonen von Dolomit werden beobachtet, sie können zum Teil als wasserstauende Horizonte angesehen werden.

Die etwa 1600 m mächtigen **Juraschichten** sind als Kalke und Dolomite der Karstfazies abgelagert, wobei Kalk etwa sechsmal häufiger ist. Von diesen Gesteinen ist das Karstgebiet zwischen dem Ljubljanaer Moor und dem Polje von Cerknica sowie auch dessen nördliche, östliche und südliche Umrandung aufgebaut. Etwas Juradolomit und Kalk werden noch im Hangenden des Triasdolomites beim Polje von Planina beobachtet, mehr aber auf dem Hrušica-plateau, wo die unterirdische Wasserscheide der Flüsse Ljubljanica und Vipava verläuft.

Die Unterliasschichten sind als ein grobkörniger bituminöser Dolomit, um 100 m mächtig, vertreten. Geschichtete Kalke, aufgeschlossen vor allem am Nordrand des Poljes von Planina und bei Cerknica, und etwas Dolomit, schichtig und bituminös, sind im Mittleren Lias abgelagert.

Oberlias und Dogger können stratigraphisch und lithologisch nicht unterschieden werden. Eine bis 800 m mächtige Schichtenfolge von feinkörnigen und oolithischen Kalken, mit Einlagerungen eines grobkörnigen bituminösen Dolomits, liegt vor. Die meisten Karstquellen der Ljubljanica sind an diese Schichten gebunden. Das Untere Malm ist durch massige oolithische Kalke und Riffkalke in Mächtigkeiten bis zu 300 m vertreten. Oberes Malm ist vor allem von einem grobkörnigen Dolomit, untergeordnet auch von Kalkschichten, bis 200 m mächtig, aufgebaut. Diese Schichten können entlang des Plateaus von Logatec in einem engen Streifen zwischen dem Kalk des Unteren Malm im Liegenden und der oberen Kreide im Hangenden verfolgt werden. Zwischen dem unteren und dem oberen Malm kommen Linsen eines roten und braunen Bauxits vor.

Die **Kreideschichten** sind zwischen den Poljen von Planina und Logatec, wo Jura konkordant überlagert wird, und in dem Idrija-Žiri-Gebiet der tektonischen Decken (vor allem in der Čekovnik Decke) aufgeschlossen.

Die Unterkreide ist etwa 1200 m mächtig. Im Liegenden sind zuerst ein Kalk und Dolomit, welche dem oberen Malm ähnlich sind. Darauf folgt ein geschichteter, teils mikritischer Kalk. Mächtige Zwischenlagerungen eines dunkelgrauen bituminösen geschichteten Dolomites zwischen Laze und Logatec und etwas Tonmergel nordöstlich von Logatec sind in den Kalkschichten enthalten. In

diesen Sedimenten werden die hauptsächlichlichen Ponorzonen und Karsthöhlen am nördlichen und nordöstlichen Rand des Poljes von Planina vorgefunden.

Die Obere Kreide (Cenoman und Turon) ist in dem Gebiet zwischen den Poljen von Planina und Logatec mit schichtigen organogenen Kalken, Riffkalk und einem hornsteinführenden Plattenkalk vertreten. Die Senonschichten sind in der Umgebung von Kališe als geschichtete mikritische Kalke und als ein rudistenführender Massenkalk (bis 400 m mächtig) sowie als rote und grau-grüne Mergel (bis 100 m mächtig) entwickelt.

Die bis 50 m mächtige Schichtenfolge der rötlichen und grünlichen Mergel sowie der Kalkbrekzien bei Kališe haben zum Teil auch ein **paläozänes Alter**. Erosionsreste der Flyschgesteine (Sandstein und Mergel) bei Kališe gehören dem **Eozän** an.

Quartäre Ablagerungen. Auf den Karstoberflächen sind Lehme, Sande, Schotter und fossile Böden bekannt, welche zum Teil ein quartäres Alter aufweisen. Altpleistozäne Pflanzen sind durch die Pollenfunde im Lehm der Karst-eintiefungen zwischen Vrhnika und Logatec nachgewiesen. Dagegen sind in den Karstpoljen nur jungpleistozäne Sedimente bekannt. Im Polje von Cerknica sind 5 bis 15 m mächtige Lehme, Sande und Schotter eingeschwemmt, welche Pflanzenreste aus dem Würm und Holozän enthalten. Ähnliche bis 5 m mächtige Ablagerungen sind auch in den Poljen von Unec, Planina und Logatec zu beobachten. Im Ljubljanaer Moor sind Würmsedimente in Mächtigkeiten bis 100 m (mehr als das ganze Liegende und Hangende) bekannt. Unter diesen Moorsedimenten sind graue Tone, Silt und Sande sowie Torf und ein schwarzer Humus abgelagert. Quartäre Ablagerungen sind auch gemeinsam mit dem autochthonen Schutt und Sinter in den Karsthöhlen erhalten geblieben.

Tektonik

Das Karsteinzugsgebiet der Ljubljana liegt in dem Raum, wo alpidische Strukturen in die dinarischen übergehen (F. KOSSMAT 1923, I. RAKOVEC 1956). Über die Merkmale und den Umfang dieses Überganges bestehen gegensätzliche Auffassungen (R. GOSPODARIČ 1969). Im westlichen Teil des Einzugsgebietes hat I. MLAKAR (1969) einen Deckenbau bewiesen, wogegen S. BUSER (1965) für die östlichen Gebietsteile einen Bruchschollenbau vertritt. Der unterschiedliche tektonische Aufbau ist auch aus der Geologischen Grundkarte, Blatt Postojna (1967), ersichtlich, welche auch als Grundlage für die Hydrogeologische Karte (Beilage 2) gedient hat.

Kennzeichnend für den nordwestlichen Teil des Einzugsgebietes der Ljubljana ist der **Deckenbau** (I. MLAKAR 1969). Auf dem Autochthon liegt die Koševnik-(erste)-Decke, von Kreideschichten aufgebaut. Den größten Umfang nimmt die Decke zwischen Godovič, Hotedršica und Idrija ein. Sie setzt sich gegen Logatec fort, wo sie von den höheren Decken überlagert wird. Wahrscheinlich ist die Decke sehr bedeutend für die Karstwasserabflüsse in Richtung Ljubljana und Idrija.

Die Čekovnik-(zweite)-Decke ist aus Obertriasdolomit, teils auch aus karnischen Klastiten aufgebaut. Die Decke nimmt den größeren Raum zwischen Hotedršica, Godovič und südlich von Hotedršica—Zala ein. Auch der Dolomit der oberen Trias im Raume Vrhnika—Petkovec gehört dazu.

Die Idrija-(dritte)-Decke umfaßt das große Gebiet zwischen Rovte, Logatec und Hotedršica sowie einen engen Streifen bis nach Idrija. Eine Schichtenfolge vom Permokarbon bis zur Oberen Trias liegt hier in inverser Lage vor. An der

östlichen Deckenseite, im Raum der Schwindenbäche Rovtarica, Pikeljščica und Žejski potok, überwiegen wasserdichte Gesteine des Permokarbon, Perm und der Unteren Trias. Bei der oberflächennahen Lage und den nur mäßigen Mächtigkeiten in der Decke ist kein Einfluß dieser Gesteine auf die Karstwasserdurchflüsse zu erwarten, weil diese vorwiegend in den unteren zwei Decken verlaufen.

Die Žiri-Trnovo-(vierte)-Decke liegt an der nordwestlichen Grenze und außerhalb des Betrachtungsgebietes.

Das zentrale Gebiet zwischen dem Ljubljanaer Moor und den Poljen von Logatec, Planina und Cerknica gehört dem Autochthon zu. Dieses ist bruchtektonisch zu Schollen zerlegt und gegliedert, z. B. in das Becken des Ljubljanaer Moores mit den Inselbergen (vereinzelten kleinen Hochschollen), die Scholle von Vrhnika-Cerknica, die Schuppe von Rakek-Cerknica und Schollen der Hrušica und Javornik-Snežnik (S. BUSER 1965).

Das Moorbecken von Ljubljana mit den vereinzelten kleinen Hochschollen ist durch Verwerfungen mit den (dinarischen und querdinarischen) Richtungen (Nordwest—Südost und Nordost—Südwest verlaufend) abgegrenzt. In den Becken sind zahlreiche tektonische Gräben und Horste zu beobachten. Die bedeutendste Grabenstruktur liegt im Bereich nördlich der Ljubljanaquellen vor. Es ist anzunehmen, daß bei der Entstehung des Grabens auch die älteren unterirdischen Kanäle des Flusses abgesenkt und mit den jungpleistozänen Sedimenten ausgefüllt worden sind.

Die Scholle von Vrhnika-Cerknica umfaßte den Raum des Logatecplateaus zwischen Vrhnika im Norden und den Poljen von Planina und Cerknica im Süden, wo die Idrijaverwerfung (= Blattverschiebung) verläuft. Der östliche Schollenteil ist an der Borovnicaverwerfung am meisten gehoben, wodurch bei Borovnica die wasserundurchlässigen karnischen Schichten zutage treten. Die Kalk- und Dolomitschichten des Jura und der Kreide sind nicht gefaltet und fallen flach gegen Westen ein. Auch die Antiklinalstruktur von Borovnica ist fraglich. Die dortigen Schichten fallen ebenso westwärts, nur an den Störungen aber auch gegen Osten, ein. Die Scholle ist noch durch zahlreiche Brüche verschiedener Richtungen gegliedert (Fig. 6).

Die Schuppe von Rakek-Cerknica liegt als ein enger Streifen von Dolomiten der oberen Trias und des Jura zwischen beiden Ortschaften vor. Die Kreideschichten von Javornik-Snežnik sind an der Predjamaaufschiebung von der Rakek-Cerknica-Schuppe überlagert. Wegen der Nähe der Idrijaverwerfung ist die Schuppe selbst zu einer breiten Bruchzone umgewandelt. Es ist anzunehmen, daß sie eine unterirdische Barriere für einen Teil der Gewässer darstellt, welche vom Cerknicasee abfließen.

In das Betrachtungsgebiet reichen auch der nördliche und östliche Teil der Hrušica. Das Plateau gehörte einst der Scholle von Vrhnika-Cerknica an, die in Richtung Nordwest—Südost streichenden Verwerfungen, vor allem die Idrijaverwerfung, haben aber diese Verbindung unterbrochen.

Der nördliche Teil der Scholle von Javornik-Snežnik ist aus Unterkreidekalk aufgebaut, im Südosten des Cerknicasees aber liegt noch der Malmkalk vor.

Das Betrachtungsgebiet ist durch zahlreiche **bruchtektonische Strukturen** gegliedert, welche sowohl durch Geländebeobachtungen als auch fotogeologisch festgestellt wurden. Besonders die Brüche in den dinarischen (Nordwest—Südost-)Richtungen sind kennzeichnend. Die Idrija-Verwerfung ist darunter besonders bemerkenswert. Mit zahlreichen parallelen Staffelbrüchen erscheint die Struktur zwischen Kalce, Unec, Rakek und Cerknica als eine Bruchzone.

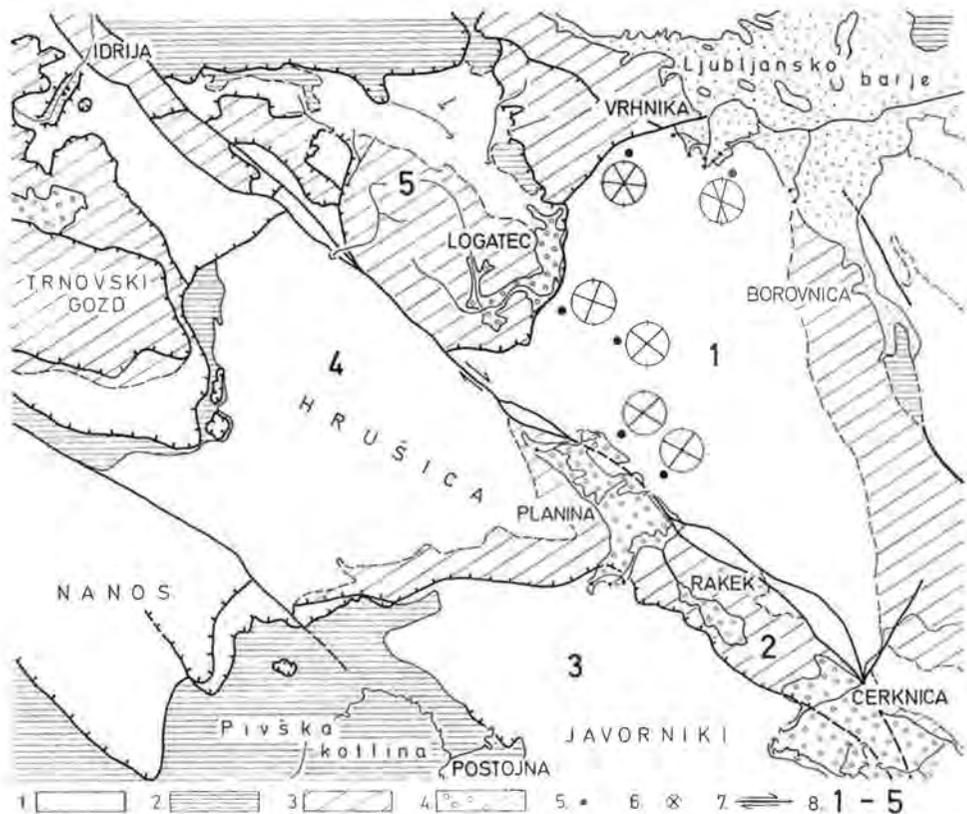


Fig. 6: Hydrogeologische Einheiten im Zentralteil des Einzugsgebietes der Ljubljana. 1 — Kalke, 2 — undurchlässige Gesteine (Schiefer, Mergel usw.), 3 — Dolomite, 4 — Quartärablagerungen in den Karstpoljen und Mooren, 5 — Meßstellen der Rupturen, 6 — Rupturdiagramme, vereinfacht, 7 — Idrija-Verschiebung (=) und andere Verwerfungen, 8 — Hydrogeologische Einheiten; 1 = Vrhnika-Cerknica-Scholle, 2 = Rakek-Cerknica-Schuppe, 3 = Javorniki-Snežnik-Scholle, 4 = Hrušica-Scholle, 5 = Idrija-Žiri-Deckenbau (nach S. BUSER, 1965).

Sl. 6: Hidrogeološke enote v osrednjem delu kraškega porečja Ljubljane. 1 — apnec, 2 — nepropustne kamnine (skrilavci in drugo), 3 — dolomit, 4 — naplavine na kraških poljih in barju, 5 — lokacija merjenih ruptur, 6 — diagrami ruptur, poenostavljeni, 7 — Idrijski zmik (=) in drugi prelomi, 8 — hidrogeološke enote; 1 — Vrhnisko-cerkniška gruda, 2 — Rakeško-cerkniška gruda, 3 — Javorniško-snežniška gruda, 4 — Hrušica gruda, 5 — Idrijsko-žirovsko ozemlje pokrovov (vse po S. BUSERJU 1965).

I. MĀAKAR (1969) erkannte, daß an dieser Großstörung bei Idrija auch beträchtliche relative Horizontalverschiebungen (Blattverschiebungen) von Deckenteilen in der Richtung Nordwest—Südost vorliegen. Die Idrija-Blattverschiebung spielt eine wesentliche Rolle für den geologischen Aufbau, insbesondere aber auch für die hydrogeologischen Strukturen im Einzugsgebiet der Ljubljana.

„Dinarisch“ streichende Störungen werden auch im zerbrochenen Obertrias-Dolomit sowie im Jurakreidekalk zwischen Rovte, Logatec und weiter südwärts im Plateau von Logatec beobachtet.

Zahlreiche gleich gerichtete Brüche sind auch in dem stark zertrümmerten

Jurakalk bei Vrhnika feststellbar. Ost—West-streichende Störungen sind im Gebiet von Rovte—Idrija bekannt. Sie sind älter als die „dinarisch“ streichenden Brüche, weil die Decken von diesen Strukturen nicht beansprucht sind. Eine größere Nordost—Südwest („querdinarisch“)streichende Störung verläuft im Talzug zwischen Vrhnika und Logatec.

Nord—Süd-streichende Störungen wurden für das Gebiet der Logatecplateaus zwischen Cerknica und Vrhnika sowie bei Logatec und Hotedrsica (meist photo-geologisch) ermittelt.

Aufgrund von Geländebeobachtungen kann geschlossen werden, daß die Bruchsysteme im Logatecplateau keinen größeren Einfluß auf die Karstwasserdurchflüsse haben. Entscheidend dafür aber sind die Klüfte und Spalten im Kalkstein und die Zerklüftung des Dolomits. So sind die Ponore am Nordrand des Poljes von Planina an eine starke Zerklüftung im Kalkstein gebunden. Die Streichrichtung der Klüfte ist meistens „querdinarisch“. Ähnliche Verhältnisse werden auch bei den Karstquellen der Ljubljana beobachtet. Das Wasser kommt zutage durch Wasserhöhlen, welche mehr den Klüften als den Brüchen folgen.

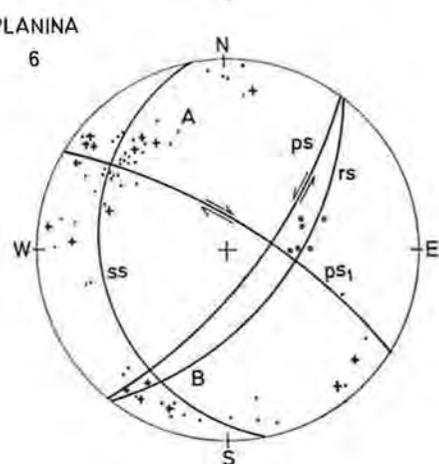
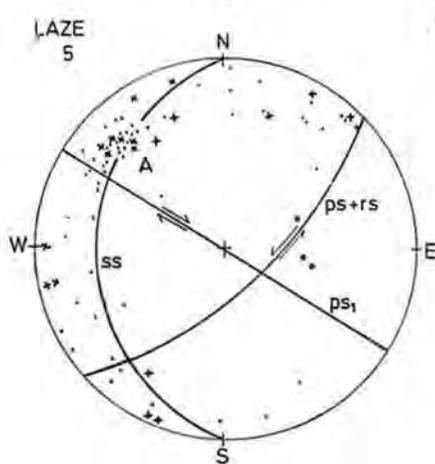
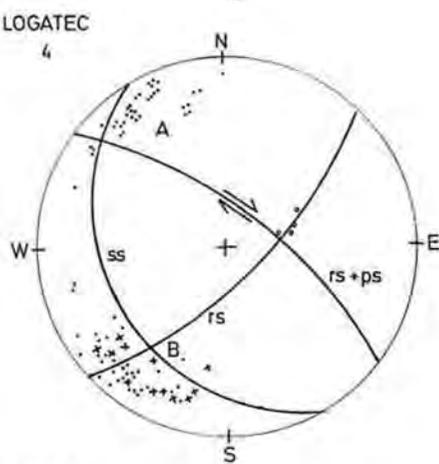
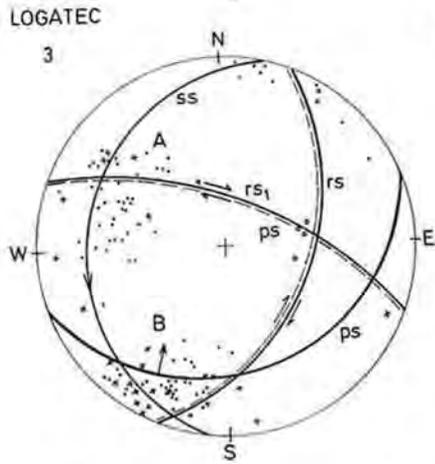
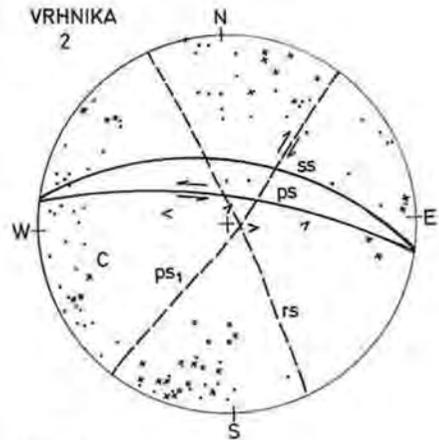
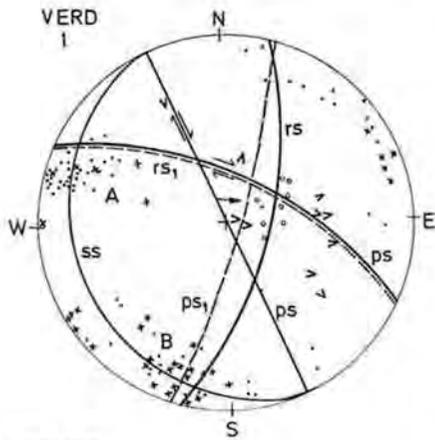
Die Formung des geologischen Baues im Idrijagebiet entwickelte sich nach den neuesten Daten (L. PLACER & J. ČAR 1975) in den jungtertiären, den alttertiären und den mitteltriadischen **tektonischen Phasen**. Wegen der noch unzuverlässigen Merkmale sind die Phasen in Zeit und Raum noch nicht näher definiert. Ohne Zweifel ist aber der geologische Aufbau des ganzen Einzugsgebietes der Ljubljana von gleichen Phasen gebildet.

Die Phasen in der Mittleren Trias sind durch die vielfältige Entwicklung der Sedimente aus dieser Zeit gekennzeichnet. Für die alttertiären Phasen (pyrenäische u. a.) ist die Entstehung des Deckenbaues zwischen Logatec und Idrija sowie der Aufschiebungen von Planina—Cerknica typisch. Die jungtertiären Phasen zeigen sich als horizontale (Blatt-)Verschiebungen der Struktureinheiten. Außer den obigen Phasen sind noch tektonische Bewegungen im Quartär festzustellen, die Absenkung des Ljubljanaer Moores erfolgte in dieser Zeit. Einige Brüche im Einzugsgebiet der Ljubljana sind noch heutzutage seismisch aktiv.

Zahlreiche Straßen- und Eisenbahneinschnitte im verkarsteten Hinterland der Ljubljanaquellen ermöglichen im allgemeinen einen guten Einblick in die Zerbrechung der Gesteine. Leider waren für **mikrotektonische Untersuchungen** nur einige Aufschlüsse der Lias- und Doggerkalke bei Vrhnika und der Unterkreidekalke westlich von Logatec und am Rand des Poljes von Planina geeignet. Die gesammelten Daten sind in Diagrammen dargestellt (Fig. 7) und werden mit diesen erläutert.

Fig. 7: Rupturendiagramme (1—6) mit Ortsbezeichnung, die Projektion erfolgt auf die untere Hälfte des Schmidt-Netzes. ○ — Schichtfugenpol, ● — Klüftpol, x — Verwerfungspol, > — Richtung der ± senkrecht verlaufenden Strömung auf den Bruchflächen, ss — Schichtrichtung, rs — Hauptklüftschar (A), rs₁ — Nebenschar (B, C), ps — Hauptverwerfungsrichtung (rechtssinnig), ps₁ — Nebenverwerfungsrichtung (linkssinnig).

Sl. 7: Diagrami ruptur (1—6) z bližnjimi naselji, projekcija na spodnjo polovico Schmidtove mreže. ○ — pol lezike, ● — pol razpoke, x — poli zmikov in drugih prelomov, > — smer ± navpičnih drs na prelomnih ploskvah, ss — smer lezik, rs — smer prve skupine razpok (A), rs₁ — smer druge, tretje skupine razpok (B, C), ps — smer desnosučnih zmikov, ps₁ — smer levosučnih zmikov.



Die Methode der gegenständlichen Untersuchungen basiert auf dem Studium der Strukturen an Klüften und Kleinbrüchen. Nach dieser genetischen Methode ist es möglich, Generationen der obigen bruchtektonischen Kleintrennflächen untereinander zu unterscheiden; deren übliche statistische Analyse erlangt dabei nur eine zweitrangige Bedeutung (P. BANKWITZ 1966, R. GOSPODARIČ 1973). Mit dieser Methodenauswahl sollten die tektonischen und hydrogeologischen Daten über den Karst zwischen Vrhnika, Logatec, Planina und Cerknica vervollständigt werden.

In den einzelnen Aufschlüssen konnten relativ unterschiedlich alte bruchtektonische Kleintrennflächen festgestellt werden. Im Liaskalk oberhalb Verd bei Vrhnika wurden beobachtet:

- Klüfte in der Richtung NNE—SSW (Hauptschar) als die ältesten,
- Klüfte der Richtung WNW—ESE als die jüngeren,
- klüftungsparelle Kleinbrüche, wobei die Richtung WNW—ESE mit den rechtssinnigen Seitenverschiebungen mehr ausgeprägt ist,
- Vertikalverschiebungen an den festgestellten älteren Steilbrüchen.

Südlich von Vrhnika, im dickbankigen Oolithenkalk, konnten festgestellt werden:

- in der Richtung E—W gefaltete Schichten,
- schichtungsparelle linkssinnige Blattverschiebungen,
- normale Brüche in Richtung NNE—SSW streichend, mit Abschiebungen der östlichen Hangendschollen.

Im Unterkreidekalk östlich von Logatec sind zu beobachten:

- ältere Klüfte der Streichrichtung NNE—SSW,
- jüngere Klüfte in Richtung WNW—ESE,
- Blattverschiebungen an Bruchflächen der Richtung NW—SE.

Im Aufschluß des Unterkreidekalkes beim Anschluß der Autobahn bei Logatec zeigen sich:

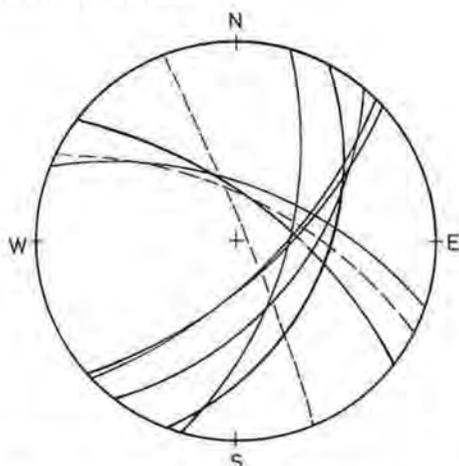
- eine ältere Schar von Klüften der Richtung NE—SW,
- eine jüngere Klüftung mit der Streichrichtung NW—SE,
- rechtssinnige Blattverschiebungen an Klüftflächen in der Richtung NW—SE.

An der Autobahn bei Laze und der Eisenbahnstation Planina sind in Aufschlüssen eines Unterkreidekalkes zu beobachten:

- eine Klüftschar in der Richtung NE—SW,
- betont linkssinnige Blattverschiebungen an Bruchflächen in der Streichrichtung NE—SW und weniger ausgeprägte rechtssinnige Blattverschiebungen an Bruchflächen der Richtung NW—SE.

In den einzelnen Diagrammen werden die hauptsächlichen Richtungen der Schichtung, der Klüfte sowie der Bruchflächen, wie sie in einigen Aufschlüssen des untersuchten Gebietes vorkommen, dargestellt. Zwei Sammeldiagramme (Fig. 8) aber zeigen, daß unter den Bruchflächen die rechtssinnigen Blattverschiebungen in der Richtung NW—SE, unter den Klüftscharen aber die Richtung NE—SW am meisten ausgeprägt sind. Die Blattverschiebungen haben sich aus den gleich orientierten Klüften entwickelt. Am Moorrand bei Vrhnika tritt die Richtung NNW—SSE der Bruchflächen hervor. Merkmale der jüngsten Vertikalbewegungen sind daraus erkennbar. Eine Klüftung südlich von Vrhnika ist parallel gerichtet. Sie zeigt aber kaum Anzeichen von Vertikalverschiebungen. Entgegen dem Polje von Planina sind im Unterkreide-Kalk zwei Klüftscharen (in Richtungen NW—SE und NE—SW) feststellbar. Am Polje selbst aber sind nur Klüftrichtungen NE—SW zu beobachten, teils zu linkssinnigen

JOINT-DIAGRAMM



FAULT-DIAGRAMM

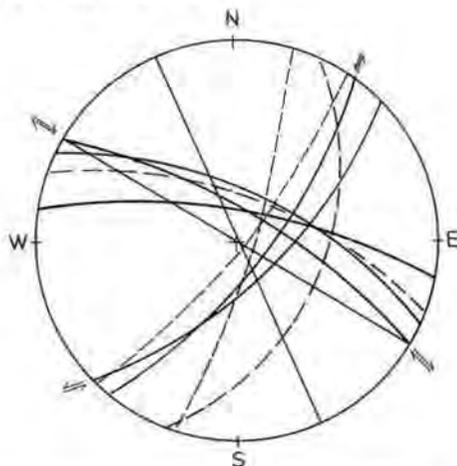


Fig. 8: Gesamtdiagramme für Klüfte und Verwerfungen; zu beachten ist der einheitliche Rupturenverlauf (NW—SE und NE—SW) in der Vrhnika-Cerknica-Scholle mit der Ausnahme südlich von Vrhnika, wo auch die Richtung NNW—SSE vorhanden ist.

Sl. 8: Skupna diagrama ruptur, opozoriti je na enoten potek ruptur v smereh NW—SE in NE—SW v Vrhnisko-cerkniški grudi in na izstopajočo smer ruptur NNW—SSE južno od Vrhnike.

Blattverschiebungen geprägt. Rechtssinnige Blattverschiebungen an Bruchrichtungen NW—SE sind dort seltener.

Außer den Angaben über die Richtungen und Arten der Rupturen ist es für die hydrologischen Zwecke bedeutend, daß die Klüfte zwar häufig sind, aber die Gesteine nicht auf längere Distanzen schneiden. Überall bleiben die Klüfte zwischen den ss-Flächen. Höchstens zwei, drei Schichtfugen werden von einer Kluft geschnitten. Kombinationen von Klüften mit flach einfallenden Schichtfugen sind zu beobachten, wo ein Einsickern des Wassers auf stufenförmigen Wegen möglich ist. Von den bearbeiteten Aufschlüssen können unterschiedlich korrodierte Klüfte nur bei der Eisenbahnstation Planina beobachtet werden. Nur seltene, Nordwest—Südoststreichende Klüfte sind dort zu korrodierten Spalten ausgeweitet, wogegen an den überwiegenden Nordost—Südwest-Klüften keine Korrosionsspalten sichtbar sind.

Nach der Kalkzerklüftung an der Oberfläche ist auf vergleichbare Verhältnisse auch in größerer Tiefe zu schließen. Die tektonischen Prozesse haben ja offensichtlich die ganze Struktureinheit, das Plateau von Logatec, auf eine ähnliche Weise umgeformt.

Auch für die Brüche gelten die gleichen hydrogeologischen Feststellungen wie für die Klüfte. Gewundene und unterbrochene Bruchflächen sind häufiger als die einheitlichen langen Brüche. Weil es sich des öfteren um Blattverschiebungen handelt, sind tektonische Brekzien von unterschiedlicher Mächtigkeit häufig. Derartige Zonen reichen auch in die Tiefe, wo in den Höhlen die unterirdischen Wasserbahnen verlaufen. Die häufigeren Blattverschiebungen in der Richtung Nordwest—Südost beeinflussen wahrscheinlich die unterirdische Fließrichtung der Wasser gegen Nordwesten.

Oberhalb des Quellgebietes der Ljubljana sind die Kalkstein-Pakete durch

die jüngere Tektonik senkrecht verschoben. Die Gesteine hatten in der Horizontalebene einen größeren Raum eingenommen. Die dazwischen verlaufenden Steilbrüche sind dadurch auch hydrogeologisch aktiver und durchlässiger geworden. Die verwickelten Karstwasserbahnen etwa 1 km südlich vom Moorrand bei Vrhnika sind wahrscheinlich an die jungen tektonischen Prozesse in deren Quellgebiet gebunden. Auch ein Ausbruch eines warmen, etwa 16.000 Jahre alten Wassers (siehe Kapitel 2. 2. 5.) auf die Oberfläche (Furlanove toplice 1. 46) bei Vrhnika ist auf diese junge Tektonik zurückzuführen. Die häufigen Erdbeben in diesen Räumen weisen auf eine noch heutzutage aktive Tektonik. Im Karst südlich des Moorbeckens aber sind diese jüngsten Bewegungen nicht in solchen Ausmaßen zur Geltung gekommen, daß deren Folgen als Rupturen in den dortigen Gesteinsaufschlüssen erkennbar wären.

Beim Polje von Planina sind die ausgeprägten Kluftscharen und Blattverschiebungen in Richtung Nordost—Südwest zu betonen, entlang welcher die jüngeren Ponor-Höhlen am Nordostrand entwickelt sind. Die Höhlen laufen in die größeren Wasserkanäle zusammen, deren Richtungen aber den gegen Norden verlaufenden Schichten angepaßt sind.

Hydrogeologische Verhältnisse

Im Gebiet des Karstflusses Ljubljana, welches auf der hydrogeologischen Karte dargestellt ist, können die Gesteine bzw. Gesteinskomplexe nach der Durchlässigkeit und der Porosität in vier Gruppen gegliedert werden.

Die **gut durchlässigen Gesteine** sind die geschichteten, bankigen und die ungeschichteten Kalksteine sowie die kalkigen Konglomerate des mesozoischen Alters. Die Klüftungs- und Karst-Porosität und eine ungleichmäßige Verkarstung dieser Gesteine sowie die unterirdischen Karstgewässer mit einem diskontinuierlichen Wasserspiegel sind kennzeichnend.

Die wasserführenden Schichten mit der Karst-Porosität sind im mittleren Teil des Gebietes zwischen Vrhnika und Planina verbreitet. Die Durchlässigkeiten dieser Schichten sind in den einzelnen Verkarstungszonen außergewöhnlich hoch, können aber in den tektonisch und von der Karst-Korrosion wenig beanspruchten Gebieten auch nur sehr niedrig sein. Turbulente Durchflüsse der unterirdischen Gewässer, wo die üblichen Bewegungsgesetze nicht mehr gelten, sind für Durchströmungen von verkarsteten Zonen kennzeichnend. Große Schwankungen von Durchflußmengen zeigen deren geringe Speicherfähigkeit (Retention) an. Die Gesteine können als gute Kollektoren angesehen werden.

Als **mittelmäßig durchlässige Gesteine** sind die geschichteten und ungeschichteten Dolomite sowie die Wechschichten von Dolomit und Kalkstein des Mesozoikums einzuordnen. Das Gebiet zwischen Borovnica und Cerknica, Logatec und Idrija sowie auch zwischen Planina und Cerknica ist größtenteils von den mittel durchlässigen Gesteinen aufgebaut. Die Klüftungsporosität ist darin dominant, die Gesteine sind nur selten verkarstet. Die unterirdischen Gewässer durchströmen die Gesteine laminar durch die Klüfte und die Poren. Eine zweifache Rolle kommt diesen Gesteinen zu: Dem Kalkstein gegenüber stellen sie schwache Barrieren dar, sonst aber sind sie Kollektoren.

Die **wenig durchlässigen bis undurchlässigen Gesteine** sind die klastischen Sedimente mit Zwischenlagerungen von Karbonatgesteinen aus dem Permokarbon, der Trias, Kreide und aus dem Paläogen. Die Klüftungsporosität und diskontinuierlichen Niveaus der Karstwasser kommen in den Gesteinen vor. Durch die verschiedenen Schiefer, Silt- und Mergelsteine, in Wechsellagerungen mit den anderen Gesteinen, entstehen undurchlässige Wasserbarrieren. Im Tal von Borovnica sind sie richtunggebend für die Karstwasserabflüsse gegen Nord-

westen und in das Gebiet der Decken von Idrija-Žiri, wo diese Sedimente nur oberflächennahe Barrieren darstellen.

Unter den **Sedimenten mit einer intergranulären und kapillaren Porosität** sind die fluviatilen Ablagerungen (Tone, Sande, Schotter), der Gehängeschutt sowie die quartären Moor-Sedimente (Lehme, zum Teil mit organogenen Beimengungen, Silt und Sand) zu verzeichnen. Die undurchlässigen, etwa 100 m mächtigen Quartär-Sedimente des Ljubljanaer Moores sind eine Barriere für die Karstgewässer. Deshalb treten diese mit zahlreichen Quellen von Vrhnika bis Bistra zutage und alimentieren die Ljubljana.

Nach der lithologischen Zusammensetzung und Funktion können mehrere mit dem tektonischen Aufbau des Gebietes übereinstimmende hydrogeologische Einheiten unterschieden werden.

Die Scholle von Vrhnika zeigt regional einen recht einfachen Aufbau. Ihr östlicher Teil mit den undurchlässigen karnischen Schichten und dem obertriassischen Dolomit stellt eine hydrogeologische Barriere dar. Die hauptsächlich unterirdischen Wasserströme befinden sich im zentralen und westlichen Teil durch die hier überwiegenden Kalksteine. Der Dolomit entlang des mittleren Teiles der Einheit stellt kein Hindernis für die Wasserwege dar.

Die Schuppe von Rakek-Cerknica, mit einem mylonitisierten Dolomit in dem Mittelteil, ist eine hydrogeologisch relative (Teil-)Barriere. Die bekannte Karst-Bifurkation des Cerknica-Sees ist daran gebunden.

Nur teilweise reichen die Massive von Snežnik-Javornik und Hrušica in das betrachtete Gebiet. Die Einheiten sind überwiegend von Kalksteinen aufgebaut. Nur im Gebiet von Planina kommen Dolomite vor, die als eine hydrogeologische Barriere wirken könnten.

Der nordwestliche Teil des Untersuchungsgebietes gehört zum Deckenbau von Idrija-Žiri. Der Dolomit in der Idrija-Decke und die Schuppe von Zaplana sind als hängende Barrieren anzusehen. Die dortigen Gesteine überdecken die durchlässigen Kalksteine, wodurch Wasserdurchflüsse unter der Dolomit-Decke möglich sind. In den Decken von Idrija-Žiri sind Wechsellagerungen von durchlässigen und wasserdichten Gesteinspaketen zu beobachten. Die undurchlässigen Gesteine treten als „scheinbare“ oder „hängende“ Barrieren auf, denen die Wasserströme sowohl in horizontalen als auch vertikalen Richtungen ausweichen können.

Eine wasserdichte Barriere stellen schließlich noch die Obertrias-Dolomite südlich des Tales von Podlipa dar. Zusammen mit der Barriere, welche sich vom Cerkniško Polje bis nach Borovnica hinzieht, wird somit das Gebiet der am meisten durchlässigen, stark verkarsteten Gesteine bei Vrhnika abgegrenzt. Durch die beiden Barrieren werden die Karstwässer zum Austritt an die Oberfläche gezwungen.

2. 2. Voruntersuchungen 1972—1975

2. 2. 1. Hydrologische Untersuchungen (K. ŽIBRIK, F. LEWICKI und A. PIČININ)

Problematik

Die hauptsächlich hydrologischen, geomorphologischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes des Ljubljana-Karstflusses wurden im Kapitel 2. 1. behandelt. Es ist offensichtlich, daß die hydrologischen Gesetzmäßigkeiten unter natürlichen Bedingungen nicht auf gleiche Weise wie im nichtverkarsteten Gebiet festgestellt werden können.

In der Karsthydrologie können wir uns nicht mit dem spezifischen Abfluß (q),

ausgedrückt in $l/sek. km^2$, der als Funktion im Zusammenhang mit der Zunahme der Oberfläche des Niederschlagsgebietes abnimmt, behelfen. Die Niederschlagsgebiete im Karst sind nämlich meistens nicht erfaßbar. Ebenso können nicht immer die Abflußkoeffizienten (c) bestimmt werden, da die Niederschlagsmengen nicht genau bestimmt und der gesamte Abfluß nicht gemessen werden können. Auch die korrelativen Methoden, deren man sich gewöhnlich in nicht verkarsteten Bereichen bedient, versagen wegen des spezifischen Wasserregimes im Karst. Dieses kommt in dem verschiedenen Versinken des Wassers und in den zeitlich und räumlich schwer bestimmbareren Retentionen in den Untergrund zum Ausdruck.

Das Wasserregime ist im Karsteinzugsgebiet des Ljubljana-Flusses besonders kompliziert (siehe Kapitel 2.1.1.). Die Wassermengen konnten aufgrund der zur Verfügung stehenden Angaben weder auf der Oberfläche noch für den Untergrund zuverlässig bestimmt werden. Ebenso unzuverlässig ist die Größe des Niederschlagsgebietes, auch die unterirdischen Wasserverbindungen sind noch nicht zur Genüge bekannt. Daher mußten zunächst der Beobachtungsdienst und die Messungen der Niederschläge und Durchflüsse vervollständigt, dann neuerlich der Umfang des Niederschlagsgebietes geschätzt und ergänzt, schließlich innerhalb desselben kleinere Gebiete mit zuverlässig bestimmbareren hydrologischen Parametern (F , P , Q , q , c) ausgesucht werden. Hierauf wurde versucht, mit diesen bekannten Parametern die unbekannteren hydrologischen Verhältnisse der einzelnen Karstgebiete rechnerisch zu erfassen. Auf diese Weise sind die Ausgangspunkte für die Wasserbilanzbestimmung des gesamten Karsteinzugsgebietes der Ljubljana gewonnen worden.

Das Netz der hydrologischen Meßstellen und der Beobachtungsdienst

Die Zahl der hydrologischen und Niederschlagsmeßstellen im Karsteinzugsgebiet der Ljubljana wurde in den Jahren 1972 bis 1975 vergrößert und die Meßstellen so eingerichtet, daß sie ununterbrochen die Niederschläge und Wasserstände registrierten, vor allem an den wichtigeren Schwinden und Quellen. Die Durchflüsse bei verschiedenen Wasserspiegeln wurden häufiger gemessen.

Vor dem Jahre 1972 befanden sich im Karsteinzugsgebiet der Ljubljana 35 hydrologische Meßstationen, von denen drei mit Limnographen ausgestattet waren, nämlich Ljubljana 1. 02, Bistra 1. 1 und Pivka 4. 0.

Das Beobachtungsnetz ist in den Jahren 1972 und 1973 mit 16 hydrologischen Meßstationen ergänzt worden, so daß im Jahre 1975 51 Meßstationen mit 13 Limnographen vorhanden waren. Die Meßstationen auf dem Gebiet des vorgesehenen Markierungsversuches wurden vor allem mit Limnographen ausgerüstet. Infolge des verringerten Programms sind in den Poljen von Cerknica und Planina nicht alle Limnographen installiert worden, auch die nach dem ursprünglichen Programm vorgesehenen geologischen Bohrungen zwecks Beobachtung des Wasserspiegels im Untergrund sind entfallen. Einige Angaben über die Wasserspiegelschwankungen in den Höhlen Mačkovica, Logarček, Najdena jama, Gradišnica und Grudnov brezen zwischen dem Polje von Planina und den Lubljana-Quellen verdanken wir periodischen Beobachtungen (Kapitel 2.2.3.). Die größte Aufmerksamkeit wurde den Durchflußmessungen in den Grundmeßstellen, besonders bei den Schwinden und Quellen, gewidmet. In den Jahren 1972 bis 1975 hat der hydrologische Dienst zusammen 1926 Messungen, und zwar im Jahre 1972 126, 1973 305, 1974 328 und 1975 1167 vorgenommen.

Die hydrologische Begrenzung des Niederschlagsgebietes des Karstflusses Ljubljana

Nach verschiedenen Angaben sollte das Niederschlagsgebiet der Ljubljana 1000 bis 1200 km² umfassen, was aufgrund der Orographie und der Verfolgung der unterirdischen Wasserläufe vor allem auf der Wasserscheide zwischen den Flüssen Ljubljana, Kolpa und Krka festgestellt worden ist (A. ŠERKO 1948, F. JENKO 1959). Der Umfang des Niederschlagsgebietes ist durch den Vergleich der durchschnittlichen Durchflüsse für Jahre und längere Zeiträume auf kleineren Gebieten genauer auf $F = 1108,78 \text{ km}^2$ bestimmt worden. Aufgrund des Abflusses der Karstwässer aus einzelnen kleineren Gebieten und durch den Vergleich der Durchflüsse in den hydrologischen Meßstellen ist das ganze Einzugsgebiet in acht größere hydrologische Gebiete (Fig. 9) mit spezifischem Wasserregime aufgeteilt worden (Tab. 1).

Tabelle 1: Hydrologische Gebiete mit berechneten Flächengrößen in km² und % der Gesamtfläche.

1. Gebiet von Lož	185,03 km ²	16,7 ⁰ / ₀
2. Gebiet von Bloke	47,05 km ²	4,2 ⁰ / ₀
3. Gebiet von Cerknica	241,7 km ²	21,8 ⁰ / ₀
4. Gebiet des Rak-Baches	27,3 km ²	2,5 ⁰ / ₀
5. Gebiet von Pivka und Javorniki	296,74 km ²	26,8 ⁰ / ₀
6. Gebiet von Planina	67,53 km ²	6,1 ⁰ / ₀
7. Gebiet von Logatec und Rovte	119,83 km ²	10,8 ⁰ / ₀
8. Gebiet von Menešija und unmittelbares Gebiet der Ljubljana-Quellen	123,6 km ²	11,1 ⁰ / ₀
Zusammen	1108,78 km ²	100,0 ⁰ / ₀

Die obige Aufteilung folgt Sektoren mit der Koordinierung der mittljährlichen Durchflüsse in den Jahren 1973, 1974, 1975 und der mittleren Durchflüsse für die Zeitabschnitte 1959 bis 1973 und 1972 bis 1975, die entlang des Ljubljana-Flußlaufes bis zum Schlußprofil bei der hydrologischen Meßstelle Komin (Fig. 10) überprüft wurden.

Abflüsse und durchschnittliche Jahresdurchflüsse

Der gesamte Abfluß aus dem Einzugsgebiet ist in den Quellen der Ljubljana (1. 1, 1. 2, 1. 3 und 1. 4) registriert und mit dem Hydrogramm der Durchflüsse für das Jahr 1975 und mit den jährlichen charakteristischen Durchflüssen von Nieder-, Mittel- und Hochwässern dargestellt (Tabelle 2).

Die Anordnung der mittleren täglichen Durchflüsse entspricht dem Niederschlagsregime. Zwei Maxima und zwei Minima kommen ebenso wie beim Niederschlagsregime (siehe Kapitel 2. 2. 2.) im Laufe des Jahres zur Geltung. Das primäre Maximum tritt im Herbst, in den Monaten Oktober oder November, das sekundäre beim Übergang des Frühlings in den Sommer in Erscheinung. Dies war der Fall in den Jahren 1973 und 1974, nicht aber in den Jahren 1972 und 1975, in denen das primäre Maximum ausnahmsweise im Mai bzw. April, das sekundäre im November auftrat. Das primäre Maximum im März oder April ist zumeist durch die SchneeRetention bedingt, während es im Mai nur von den Niederschlägen abhängt. Die minimalen Durchflüsse treten normal

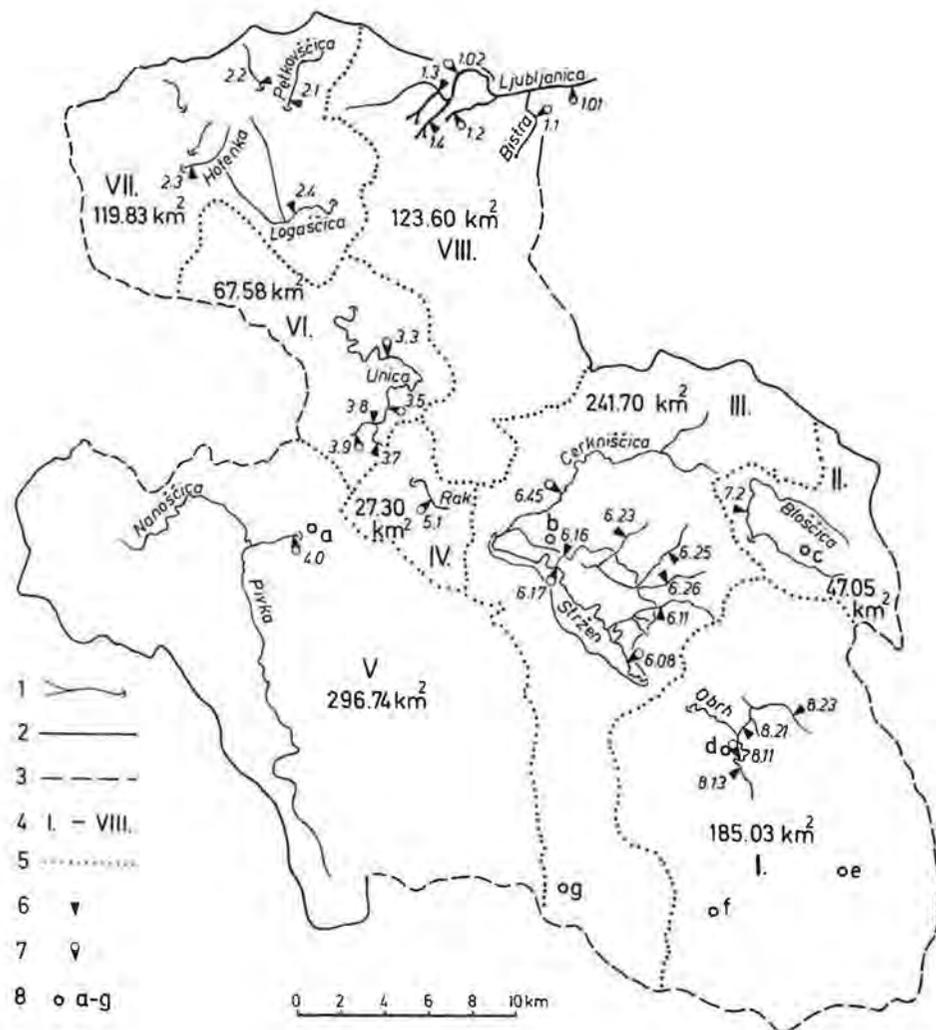


Fig. 9: Karsteinzugsgebiet der Ljubljana mit kalkulativen hydrologischen Bereichen. 1 — Oberflächliche Flüsse und Schwinden, 2 — oberflächliche Wasserscheide, 3 — vermutete Karstwasserscheide, 4 — Bezeichnung der kalkulativen hydrologischen Bereiche, 5 — Begrenzung der kalkulativen hydrologischen Bereiche, 6 — wichtigste hydrologische Meßstationen, 7 — hydrologische Meßstationen mit Limnigraphen, 8 — wichtigste Niederschlagsmeßstellen (a—g).

Sl. 9: Kraško porečje Ljubljance s kalkulativnimi hidrološkimi območji. 1 — površinski vodotoki, ponikalnice, 2 — površinska razvodnica, 3 — domnevna kraška razvodnica, 4 — razmejitev kalkulativnih območij, 5 — oznake kalkulativnih hidroloških območij, 6 — važnejše vodomerske postaje, 7 — vodomerske postaje z limnigrafi, 8 — važnejše padavinske postaje (a—g).

Tabelle 2: Übersicht über die charakteristischen Durchflüsse in den wichtigsten hydrologischen Meßstationen im Karsteinzugsgebiet der Ljubljana für die Jahre 1972—1975.

No.		F km ²	Q _{min} m ³ /s 1972— 1975	Q m ³ /s					Q _{max} m ³ /s 1972— 1975
				1972	1973	1974	1975	1972/ 1975	
8.21	V. Obrh	66.1	0,33	3.97	2.73	3.78	3.17	3.41	27.0
8.11	M. Obrh	98.2	0.00	(1.45)	1.30	1.55	1.33	1.41	
7.1	Bloščica	23.4	0.02	0.45	0.34	0.46	0.42	0.42	15.9
6.10	Gorički p.		0.00	(0.15)	0.08	0.14	0.11	0.12	1.97
6.11	Lipsenjščica		0.01	1.56	1.08	1.47	1.08	1.30	16.0
6.25	Grahovščica	4.88	0.01	0.06	0.05	0.06	0.03	0.05	1.80
6.23	Martinjski potok	1.17	0.00	0.13	(0.14)	0.16	0.12	0.14	3.20
6.26	Zerovniščica	7.59	0.01	0.30	0.17	0.16	(0.21)	0.21	7.59
6.45	Cerkniščica	65.8	0.08	1.32	1.04	1.03	0.98	1.09	48.0
5.1	Rak		0.00	12.1	7.38	12.2	9.42	10.28	45.3
4.0	Pivka		0.01	6.31	3.00	4.79	5.26	4.84	65.0
3.7	Mlinščica		2.01	8.03	6.72	7.69	6.46	7.23	9.54
3.5	Unica		1.89	23.90	17.30	24.00	20.60	21.45	81.5
2.3	Hotenka	3.53	0.02	0.16	0.12	0.14	0.16	0.15	4.11
2.2	Rovtarica	6.16	0.02	0.34	0.28	0.25	0.29	0.29	13.7
2.1	Petkovščica	8.61	0.01	(0.25)	0.14	0.16	0.23	0.20	6.75
2.4	Logaščica	16.53	0.02	0.57	0.44	0.47	0.42	0.48	9.22
1.02	Ljubljana		1.56	29.40	19.80	25.00	22.50	24.18	69.9
1.3	M. Ljubljana		0.29	9.94	6.30	7.54	7.21	7.75	25.8
1.4	V. Ljubljana		1.48	19.20	12.80	17.10	15.00	16.03	65.8
1.2	Lubija		0.62	7.91	5.46	7.13	6.21	6.68	22.6
1.1	Bistra		1.81	8.73	7.94	8.42	7.46	8.14	17.5
	1.1 + 1.2 + 1.3 + 1.4		4.25	45.78	32.50	40.19	35.88	38.60	131.7

Bemerkung: F km² = Fläche der kalkulierten Niederschlagsbereiche

Q_{min} m³/s = kleinste Durchflüsse

Q m³/s = mittlere Durchflüsse

Q_{max} m³/s = größte Durchflüsse

im August oder September und im Februar oder März auf. Im Jahre 1974 gab es die niedrigen Frühlingswässer erst im April. Die Gründe für die Abweichungen vom normalen Auftreten der jährlichen Maxima und Minima sind jedenfalls in den klimatischen Verhältnissen zu suchen.

Aufgrund der bekannten Wassermengen in den Ljubljana-Quellen und in den einzelnen Teilen des Einzugsgebietes sind die Durchflüsse für alle anderen hydrologischen Gebiete bestimmt worden. Die spezifischen Abflüsse sind aus den bekannten Niederschlagsgebieten und den zugehörigen Durchflüssen berechnet worden. Diese sind analog für die benachbarte Karstregion für die einzelnen hydrologischen Gebiete verwendet worden, wodurch für diese Ge-

biete der gesamte Abfluß und die durchschnittlichen Jahresdurchflüsse berechnet werden konnten. Die Abflußkoeffizienten sind aufgrund der ausgerechneten jährlichen Abflüsse und der gemessenen jährlichen Niederschläge berechnet worden. Die Unterschiede in den spezifischen Abflüssen und den Abflußkoeffizienten beruhen auf verschiedenen Abfluß- und Durchflußgesetzmäßigkeiten im Karsteinzugsgebiet der Ljubljana. Da keine konkreten Angaben über die Verdunstung im Untersuchungsgebiet zur Verfügung standen, sind die Verluste für die einzelnen Hydrosysteme und für das ganze Einzugsgebiet aufgrund der bekannten Niederschläge und Abflüsse berechnet worden (Tabelle 3).

Tabelle 3: Übersicht über die durchschnittlichen hydrologischen Parameter im Karsteinzugsgebiet der Ljubljana für den Zeitabschnitt 1972—1975.

Region	F km ²	P		R			q	c	E mm
		mm	10 ⁶ m ³	mm	10 ⁶ m ³	Q	l/s km ²	$\frac{R}{P}$	(P-R)
1.	185,03	1765	327	926	171,4	5,43	29,3	0,52	839
2.	47,05	1604	75	563	26,5	0,84	17,9	0,35	1041
3.	241,70	1894	458	1507	364,2	11,54	47,7	0,80	387
4.	27,30	1688	46	927	25,3	0,80	29,7	0,55	845
5.	296,74	1690	504	1097	326,6	10,35	34,9	0,65	593
6.	67,53	1831	124	966	65,3	2,09	30,7	0,53	864
7.	119,83	1907	229	984	118,0	3,72	31,2	0,57	923
8.	123,60	1774	219	978	120,9	3,83	31,0	0,55	796
Total	1108,78	1797	1982	1099	1218,1	38,60	34,8	0,61	698

Bemerkungen: 1—8 — kalkulative hydrologische Gebiete
 F — Oberfläche der kalkulativen hydrologischen Gebiete
 P — Niederschläge
 R — Abfluß
 Q — mittlerer Durchfluß
 q — spezifischer Abfluß
 c — Abflußkoeffizient
 E — Evapotranspiration (Verluste)

Beim Vergleich der Verluste in den einzelnen hydrologischen Gebieten kann man feststellen, daß die Verluste auf dem Plateau von Bloke überdurchschnittlich, im Gebiet von Cerknica aber unterdurchschnittlich sind. Für das Gebiet von Cerknica könnte man den kleineren Verlust teilweise der Retention, teilweise den Unterschieden in der Evapotranspiration, teilweise dem vorausgesetzten Zu- und Abfluß zuschreiben. Das Gebiet von Bloke müßte noch eingehender erforscht und die Gründe der Abweichungen von den normalen Verlusten festgestellt werden. Bei einer durchschnittlichen Tagesverdunstung von 1,5 bis 2,0 mm befindet sich der mittlere Wert für das ganze Gebiet im Betrag von 698 mm doch noch in den glaubhaften Grenzen.

Die durchschnittlichen Durchflüsse und die gesamten Wassermengen für die einzelnen hydrologischen Systeme und deren Anteil in den Ljubljana-Quellen für den Zeitabschnitt 1972 bis 1975 sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Anteile der einzelnen hydrologischen Gebiete am Gesamtabfluß.

	m ³ /s	10 ⁶ m ³	%
1. Gebiet von Lož	5,43	171,36	14,1
2. Gebiet von Bloke	0,84	26,50	2,1
3. Gebiet von Cerknica	11,54	364,19	30,0
4. Gebiet des Rak-Baches	0,80	25,25	2,1
5. Gebiet von Pivka und Javorniki	10,35	326,62	26,8
6. Gebiet von Planina	2,09	65,32	5,4
7. Gebiet von Logatec und Rovte	3,72	118,02	9,6
8. Gebiet von Menešija mit den Quellen bei Vrhnika	3,83	120,86	9,9
Zusammen	38,60	1218,12	100,0

Der unmittelbare Abfluß aus dem Gebiet von Cerknica in die Ljubljana-Quellen in den einzelnen Jahren und im Zeitabschnitt 1972 bis 1975, und zwar auf Grundlage des bekannten Abflusses aus diesem Gebiet über den Rak-Bach, ist besonders bewertet worden.

Tabelle 5: Abfluß aus dem Gebiet von Cerknica.

	1972 %	1973 %	1974 %	1975 %	1972—1975 %
Unmittelbar in die Ljubljana	48	47	37	37	42
Über den Rak-Bach	52	53	63	63	58

Das Verhältnis der Abflüsse aus dem Gebiet von Cerknica ist bei längere Zeit andauernden Niederwässern wesentlich anders als bei längere Zeit dauernden Hochwässern, wo das Polje längere Zeit überschwemmt ist und mehr Wasser durch die Schwinden am Rande über den Rak-Bach abfließt.

Tabelle 6: Die Verteilung der jährlichen Wassermengen der Ljubljana auf die einzelnen Quellbereiche.

Jahr	1972	1973	1974	1975	1972—1975
Wasser in 10 ⁶ m ³	1447,67	1024,93	1267,43	1131,87	1218,12
Quellen	%	%	%	%	%
1. 1	19,1	24,4	20,9	20,8	21,1
1. 2	17,3	16,8	17,7	17,3	17,3
1. 4	41,9	39,4	42,6	41,8	41,5
1. 3	21,7	19,4	18,8	20,1	20,1

Der Anteil in den Quellen ändert sich alljährlich in Abhängigkeit vom Niederschlagsregime. Normal ist der Westteil des Einzugsgebietes reicher an Niederschlägen, doch im Jahre 1973 gab es ausnahmsweise mehr Niederschläge im Ostteil des Einzugsgebietes, was auch in der größeren Wassermenge in den Quellen 1. 1 zum Ausdruck kam.

Der Einfluß der oberflächlichen und unterirdischen Retentionen auf die Abfluß- und Durchflußverhältnisse

Der Einfluß der unterirdischen und oberflächlichen Retentionen im Karst besteht darin, daß der Abfluß der hohen Wässer gedrosselt und zeitlich gedehnt ist. Die Spitzen der Hochwässer sind zwei- bis dreimal niedriger als bei gleich

großen Wasserläufen in nicht verkarsteten Gebieten. Das Verhältnis in den charakteristischen Durchflüssen der größeren Wasserläufe in Slowenien weist auf den größeren oder kleineren Einfluß der Karstretention in deren Einzugsgebiet hin. Je größer die mittlere Wasserführung und je kleiner die Unterschiede zwischen Nieder- und Hochwässern sind, um so mehr Karst befindet sich im Einzugsgebiet.

Tabelle 7: Verhältnis der charakteristischen Durchflüsse der wichtigeren Flüsse in Slowenien für den Zeitabschnitt 1926—1965 nach Angaben der Hydro-meteorologischen Anstalt der S. R. Slowenien.

	Qmin	:	Q	:	Qmax
Ljubljana—Vrhnika	1	:	15	:	62
Ljubljana—Moste	1	:	14	:	85
Krka—Podbočje	1	:	13	:	113
Sava—Radovljica	1	:	6	:	100
Sava—Šentjakob	1	:	6	:	81
Savinja—Laško	1	:	11	:	308
Soča—Solkan	1	:	8	:	160

Der Javorniki-Zug im Einzugsgebiet der Ljubljana ist im Hinblick auf das Karsthydroregime besonders interessant. Die eingehende Analyse der Durchflüsse aus dem Polje von Cerknica über Rakov Škocjan und aus dem Pivka-Becken weist darauf hin, daß das Gebiet der Javorniki bei niedrigen Wässern verhältnismäßig große Wassermengen sowohl mit Rücksicht auf das vorgesehene Hinterland als auch im Vergleich mit der Wassermenge in den Ljubljana-Quellen spendet.

Schlußfolgerungen

Allen bisherigen hydrologischen und anderen Ermittlungen lag die Erzielung einer Wasserbilanz zum Ziel. Doch sind dabei einige Grenzniederschlagsgebiete der Ljubljana noch nicht erforscht worden. Problematisch sind auch die inneren Einteilungen und die Zugehörigkeiten zu den einzelnen hydrologischen Gebieten, vor allem für kleine und große Wasserstände, was Gegenstand weiterer hydrologischer Untersuchungen sein wird. Die bisherigen Erfahrungen und Feststellungen haben gezeigt, daß die hydrologische Analyse geschlossene Karsteinheiten mit bekannten Wassermengen oder wenigstens mit bestimmten Niederschlagsgebieten, sei es innerhalb des Einzugsgebietes oder, wenn sich der Karst an der Wasserscheide befindet, im Rahmen mehrerer Einzugsgebiete, umfassen muß. Ganz und gar nicht empfehlenswert ist es, nur ein engeres Karstgebiet, für welches weder die Durchflüsse noch das Einzugsgebiet bekannt sind, zu untersuchen.

Eine Aufgabe der vorgehenden hydrologischen Untersuchungen war auch die Feststellung, bei welchen Wasserverhältnissen die gegenseitigen Verbindungen zwischen den Schwinden und den Quellen am besten mit den kombinierten Markierungen untersucht werden könnten. Es wurde festgestellt, daß die günstigsten Bedingungen für die Ausführung eines kombinierten Markierungsversuches bei mittleren Wässern vorhanden sind, wenn der Unica-Fluß (3.5) 23,2 m³/s und die Ljubljana (1.02) 25,0 m³/s führen. Solche Durchflußverhältnisse treten am häufigsten im Frühjahr zwischen den Monaten März und Juni auf.

2. 2. 2. Meteorologische Untersuchungen (F. BERNOT)

Grundzüge der klimatischen Verhältnisse

Slowenien gehört dem klimatischen Übergangsgebiet zwischen dem kontinentalen und dem mediterranen Klima an. Der Übergang kommt gerade im Flußgebiet der Ljubljana stark zum Ausdruck, was durch die sogenannte „Pforte von Postojna“ verursacht wird. In der kühlen Jahreshälfte bilden die wichtigsten dinarischen Hochplateaus Snežnik, Javornikizug, Nanos, Hrušica und Trnovski gozd eine ziemlich ausgeprägte Schranke zwischen dem inneren Slowenien mit nahezu kontinental strengen Wintern und dem wärmeren Küstenland südwestlich der Hochplateaus mit höheren Temperaturen.

Die erwähnte Pforte von Postojna liegt nur etwa 650 m ü. M., die großen Hochplateaus dagegen über 1200 m. Durch die Pforte dringt die kalte Luft gegen das Meer vor, weshalb auch das unmittelbar hinter der Pforte gelegene Becken von Postojna die relativ niedrigsten Temperaturen des gesamten südwestlich der Plateaus gelegenen Gebietes aufweist. Die auf der Nordseite der Barriere gelegenen Poljen von Cerknica und Planina, teilweise aber auch das nordöstlich der Plateaus gelegene Gebiet bis zum Ljubljanaer Moor haben andererseits die höchsten Temperaturen Innersloweniens. Die Ursache der höheren Temperaturen ist wieder die Pforte von Postojna, welche der warmen, über der nördlichen Adria lagernden Luft einen ziemlich ungehinderten Zutritt ins Innere Sloweniens erlaubt.

Im Flußgebiet der Ljubljana machen sich normalerweise zwei Niederschlagsmaxima und zwei Minima geltend. Das primäre Maximum tritt im Herbst auf (Oktober, November), das sekundäre im Übergang vom Frühling zum Sommer (Mai, Juni). Das primäre Niederschlagsminimum fällt grundsätzlich in den Februar, das sekundäre in den August bzw. Juli.

In bezug auf die Niederschläge zeigt sich der Übergangscharakter des Gebietes in einem sehr ausgeprägten sekundären Niederschlagsminimum. In einem großen Teil des Flußgebietes der Ljubljana tritt nämlich das sekundäre Niederschlagsminimum im Juli auf und gleicht zur Gänze oder nahezu ganz dem Hauptminimum im März; gerade das sommerliche Niederschlagsminimum ist jedoch ein Kennzeichen des mediterranen Klimas.

Die klimatischen Gegebenheiten in den Jahren 1972 bis 1975

Das Jahr 1972 war kühl und übermäßig feucht, was die Durchschnittstemperaturen und die Jahreshöhe der Niederschläge im Vergleich mit den mehrjährigen Werten (Durchschnitt des Zeitabschnittes 1926—1965) bezeugen. Die ersten drei Monate des Jahres waren zu warm, während positive Temperaturabweichungen der übrigen Monatsmittel selten waren. Was die Niederschläge angeht, war das obere und mittlere Flußgebiet der Ljubljana in den Monaten zwischen Februar und Mai, der untere Teil aber zwischen den Monaten Februar und Juli überdurchschnittlich feucht. In der übrigen Zeit des Jahres wechselten übermäßig nasse Monate mit Monaten unterdurchschnittlicher Niederschlagsmengen ab. Die Jahreshöhe der Niederschläge, welche das Flußgebiet der Ljubljana empfängt, verringert sich in der Richtung ihres Laufes, d. h. vom Süden gegen den Norden (Fig. 11, 12).

Das Jahr 1973 war im allgemeinen zu kühl, nur die Monate Jänner, Mai, Juni und September waren im ganzen Gebiet zu warm. Einzelne Teile des Fluß-

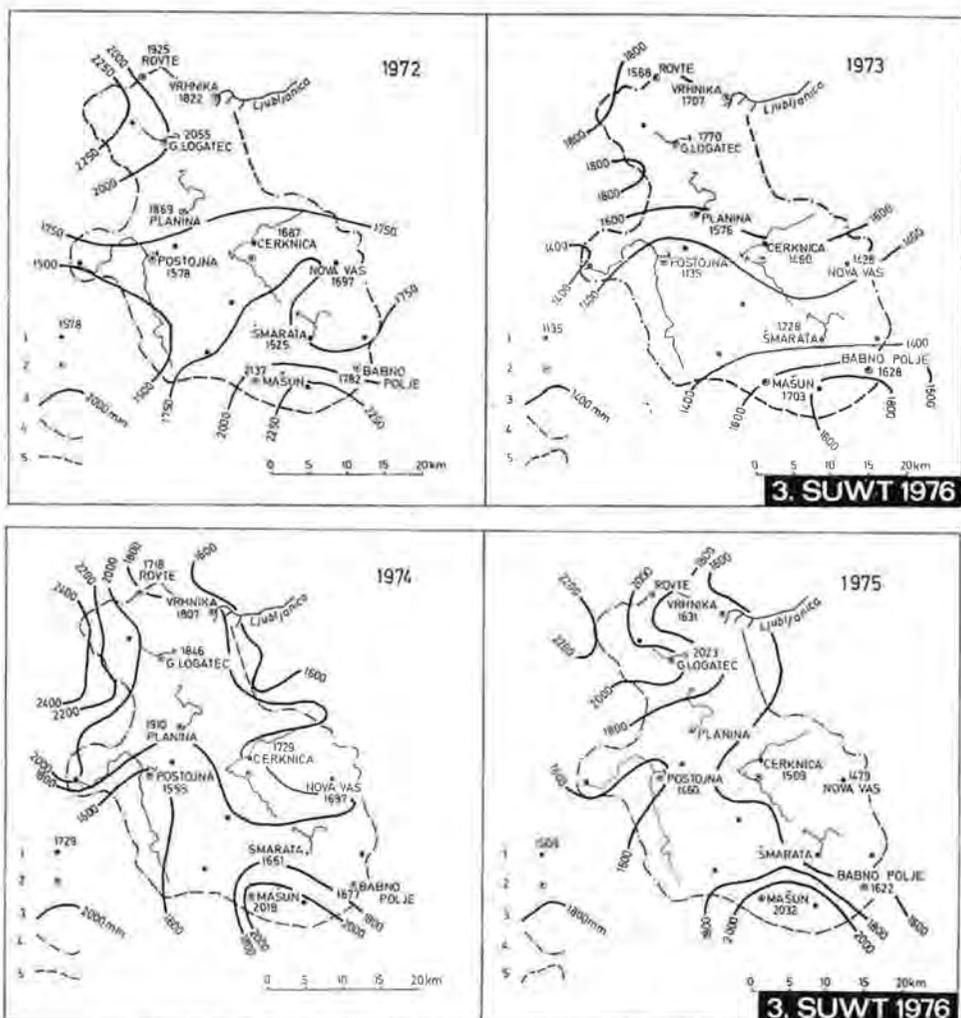


Fig. 11: Karte der Niederschläge für Jahre 1972—1975. 1 — Niederschlagsmeßstation, 2 — meteorologische Meßstation, 3 — Isohyete mit Niederschlagshöhe in mm pro Jahr, 4 — oberflächliche Wasserscheide, 5 — Karstwasserscheide.

Sl. 11: Padavinska karta za 1972—1975. 1 — padavinska postaja, 2 — meteorološka postaja, 3 — izohieta z letno količino padavin v mm, 4 — površinsko razvodje, 5 — kraško razvodje.

gebietes zeigten positive Abweichungen von Monatsmitteln: Postojna im Februar und Vrhnika im März und Mai (Fig. 13). Die Jahreshöhen der Niederschläge im südlichen, höheren Teil (Babno Polje) und im nördlichen, niedrigeren Teil (Vrhnika) standen etwas über, im zentralen Teil aber etwas unter dem normalen Wert. Das primäre Maximum ist im gesamten Gebiet im September zur Geltung gekommen. Das Auftreten des sekundären Maximums war nicht einheitlich, im oberen Teil des Flußgebietes im Dezember, im zentralen im Juni und im unteren im Juli. Die Veränderlichkeit der Niederschläge war von Monat zu Monat eine ziemlich große. Aus der beige-schlossenen Niederschlagskarte

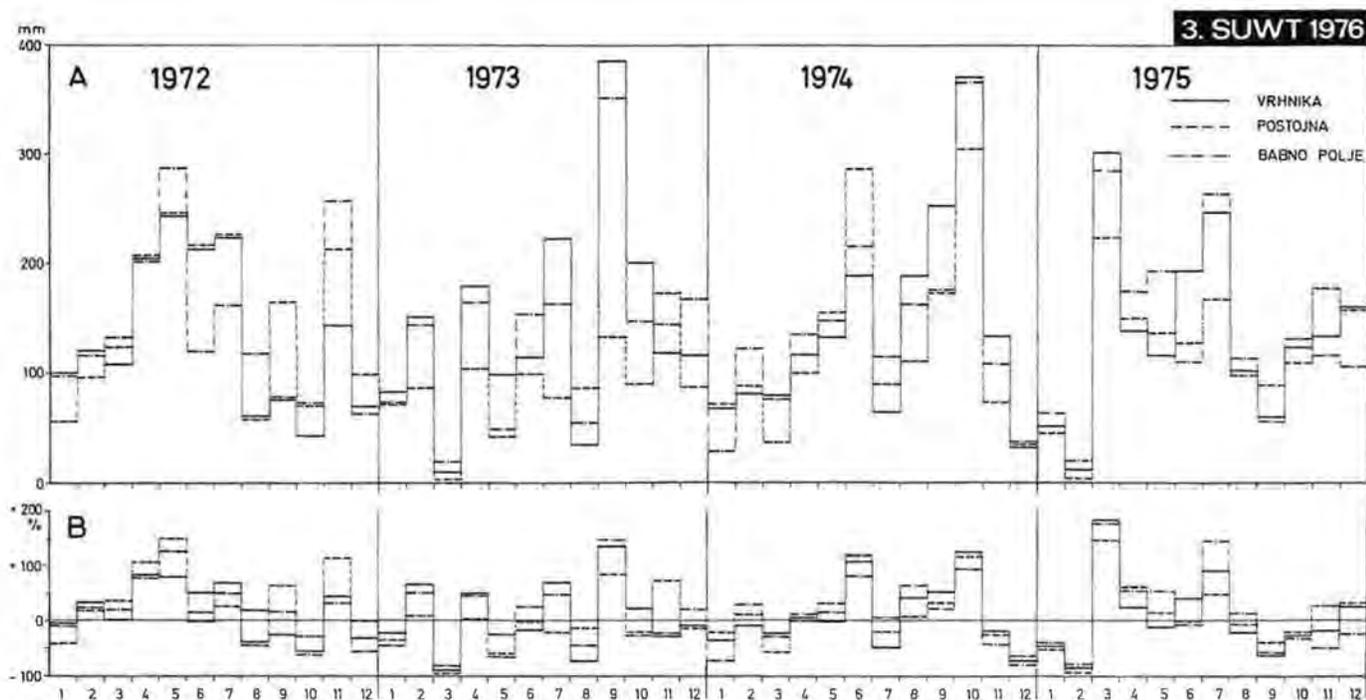


Fig. 12: Monatliche Niederschlagshöhe für Jahre 1972, 1973, 1974 und 1975 (A) und ihre Abweichungen in % von durchschnittlichen Monatswerten für die Periode 1926—1965 (B) an den Meßstationen Vrhnika (Seehöhe 293 m), Postojna (Seehöhe 533 m) und Babno Polje (Seehöhe 756 m).

Sl. 12: Mesečne količine padavin v mm po letih od 1972 do 1975 (A) in njih odkloni v % od poprečnih mesečnih količin za obdobje 1926—1965 (B) za postaje Vrhnika (Altitude — 293 m), Postojna (Alt. — 533 m) in Babno polje (Alt. — 756 m).

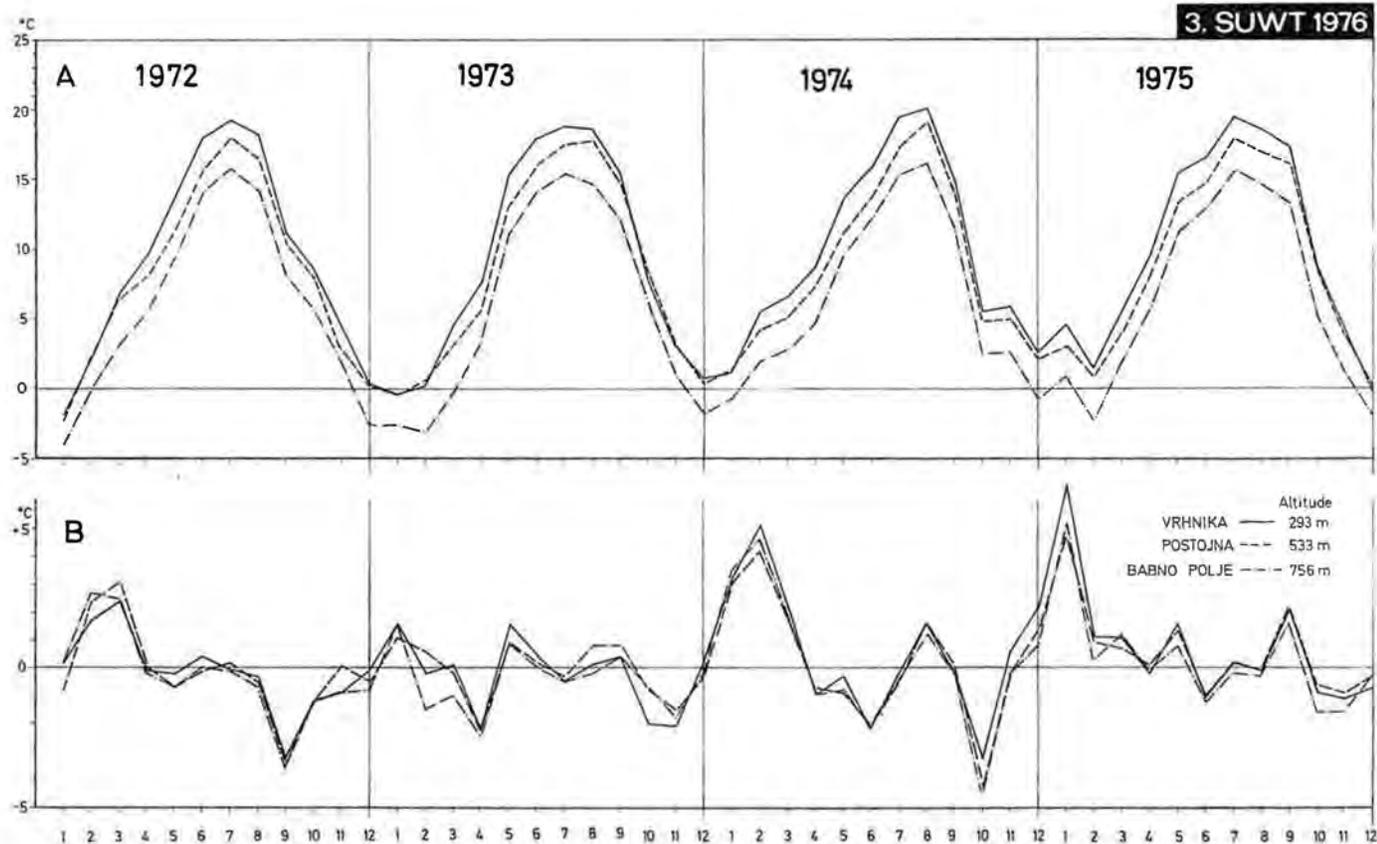


Fig. 13: Monatsmittel der Lufttemperatur in Jahren 1972, 1973, 1974 und 1975 (A) und ihre Abweichungen von Durchschnittswerten der Periode 1926—1965 (B) für die Meßstationen Vrhnika, Postojna und Babno Polje.

Sl. 13: Srednje mesečne temperature po letih od 1972 do 1975 (A) ter njih odkloni od poprečnih vrednosti za obdobje 1926 do 1965 (B) za postaje Vrhnika, Postojna, Babno polje.

(Fig. 11) ist zu ersehen, daß der Südteil des Gebietes die größten Niederschlagsmengen erhalten hat, diesem folgt der Nordteil, dazwischen aber, zwischen den Isochyeten von 1400 mm, fielen etwas weniger Niederschläge.

Die Temperatur war im Jahre 1974 etwas zu hoch, und zwar die Monate Jänner, Februar, März, August und Dezember im ganzen Gebiet, der Monat Juli in Vrhnika und der Monat November in Vrhnika und Postojna.

Die Niederschläge waren im Vergleich zu den normalen Werten (Durchschnitt des Zeitabschnittes 1926—1965) im ganzen Gebiet überdurchschnittlich. Der Monat Oktober war besonders naß (primäres Niederschlagsmaximum), das sekundäre Maximum ist im Monat Juli gemessen worden. Aus der Niederschlagskarte (Fig. 11) ist ersichtlich, daß das Gebiet des Berges Snežnik die größten Niederschlagsmengen aufzuweisen hat. Diesem folgt das Gebiet zwischen dem See von Cerknica, Planina pri Rakeku und Vrhnika. Das Zwischengebiet (Babno Polje—Javornik—Postojna) hat etwas kleinere Niederschlagsmengen.

Auch im Jahre 1975 war die Temperatur etwas zu hoch, die Niederschläge überschritten das langjährige Mittel nicht wesentlich. Die Monate Jänner, Februar, März, Mai und September weisen im ganzen Gebiet, der Monat April in Postojna, der Juli in Postojna und Vrhnika positive Temperaturabweichungen auf (Fig. 13). Die Monate März, April und Juli waren im ganzen Gebiet, Mai und August im Babno Polje, Mai, November und Dezember in Postojna, Juni und Dezember in Vrhnika übermäßig naß. Der Monat Februar war im Jahre 1975 äußerst trocken, entfielen doch auf das Flußgebiet der Ljubljana kaum 5 bis 20 Prozent der normalen Monatshöhe der Niederschläge (Fig. 12). Aus der Niederschlagskarte des Jahres 1975 folgern wir, daß das Gebiet am Snežnik und der Hrušica recht kräftig, der übrige Teil des Flußgebietes annähernd gleichmäßig beregnet war.

2. 2. 3. Speläohydrologische Untersuchungen (P. HABIČ)

Im Karst zwischen dem Cerknisko Polje (Polje von Cerknica), dem Planinsko Polje (Polje von Planina) und dem Ljubljansko barje (Laibacher Moor) wie auch im Bereich des Karstplateaus Rovtarska planota sind mehrere hundert verschiedene Schächte und Höhlen bekannt. Darunter sind aktive Wasserhöhlen mit ständiger oder periodischer Wasserführung selten. Kürzere erhaltene Abschnitte der älteren, jetzt trockenen Höhlengänge weisen auf ehemalige Wasserwege in verschiedenen Höhen ober den heutigen Höhlengängen hin. Diese Wasserwege deuten auch zahlreiche Einsturzdolinen auf der Karstoberfläche zwischen den Schwinden und den Quellen an. Wir versuchten, die Wasserhältnisse im Karstuntergrund mit der Beobachtung des Wasserniveaus in den Höhlen, in den Karstpoljen und an den Quellen bei Vrhnika zu erkennen.

Einige speläologische Eigenheiten

Die höhlenforschenden Bestrebungen im Karsteinzugsgebiet der Ljubljana zielten schon von jeher auf die unmittelbare Entdeckung der unterirdischen Wasserwege. Die Höhlenforscher haben bis jetzt den größten Erfolg in der Gegend zwischen Postojna, Planina und Cerknica zu verzeichnen, wo sie schon über 45 km trockene und wasserführende Gänge entdeckt haben. Zwischen den Schwinden und den Quellen ist dort nur noch ein gutes Drittel der Wasser-

wege unbekannt. Zwischen dem Planinsko Polje und dem Ljubljansko barje sind bis jetzt nur 8 km Höhlen bekannt, zugänglich ist aber nur ein Zehntel des Abstandes zwischen den Schwinden und den Quellen. Obwohl hier die Wässer von der Seite des Cerknisko Polje und der Pivška kotlina (des Pivkabeckens) zusammenströmen, können wir dem Sickerfluß doch nirgends tiefer in den Untergrund folgen. Die Höhlenforscher haben sich sehr bemüht, die unterirdischen Wassergänge wenigstens von der Oberfläche aus zu erreichen. Sie haben über 450 Schächte und Höhlen erforscht, doch gelangten sie nur an drei oder vier Stellen zum fließenden Wasser. Aber auch hier verhinderten Verstürze und Siphone das tiefere Eindringen in den Untergrund.

Unter den erforschten Karsthohlräumen überwiegen die Schächte (über 50%) und schräge oder horizontale Hohlräume, die vor allem durch korrosive Tätigkeit des Niederschlagswassers entstanden sind. Nur am Rande des Planinsko Poljes, des Logaško Poljes (Polje von Logatec) und am Rande der Sickerwässer des Karstplateaus Rovte sind einige trockene und aktive Höhlen, welche fließende Sickerwässer geschaffen haben, vorhanden. Die Lage der trockenen Höhlen erzählt wenig über die heutige Anordnung der unterirdischen Wasserläufe. In dieser Hinsicht sind die wenigen aktiven Wasserhöhlen bedeutsamer.

Unter den 150 bekannten Schwinden im Planinsko Polje sind nur einige kürzere spaltenartige Wasserhöhlen, die aber sehr wenig den Ponorhöhlen an der Abfluß-Seite des Cerknisko Polje oder im Höhlensystem von Postojna ähneln (R. GOSPODARIČ 1970, 1973).

Die erste kleinere Höhle an den Schwinden des Flusses Unica ist der Ponor Žrnki (3. 43). Der künstlich verbreitete und mit einer Mauer eingefasste Eingang führt in einen engen spaltenartigen Gang, der nur einige Meter begehbar ist. Die andere bedeutendere Wasserhöhle befindet sich in Dolenje loke (3. 41). Der Eingang ist mit einer Mauer umgeben und mit einem Eisennetz geschlossen. Bei Niedrigwasser ist der Gang nur in einer Länge von 170 m gangbar. Zuerst zieht er sich gegen Nordosten, dann gegen Norden in Richtung der Wasserhöhlen Mačkoviča und Logarček. Weil bisher die unmittelbare Fortsetzung dieses Wasserganges nicht gefunden wurde, ist nur zu vermuten, daß die Wässer, die in Dolenje loke verschwinden, bei höherem Wasserstand die unteren Höhlengänge der Höhle Logarček überschwemmen. Mit der Markierung im Jahre 1975 ist bewiesen worden, daß das Wasser aus den Schwinden Dolenje loke durch die Höhle Logarček fließt (siehe das Kapitel über Tinopal 2. 3. 3.).

Beim Dorfe Laze ist der 18 m tiefe wasserstandanzeigende Schacht Erjavščica (Kat.-Nr. 102) bekannter, in welchem man bei mittleren und bei hohen Wässern die Oszillierung des Wassers beobachten kann. Doch ist die Höhle wegen der Nähe des Poljes und wegen der ständigen Verschüttung für eine regelmäßige Beobachtung nicht geeignet.

Im Ponorsacktal bei Škofji lom befinden sich mehrere spaltenartige Schwinden, begehbar nur 20 bis 50 m. Die hier längste Ponorhöhle geht nach 160 m in eine unbegehbare Spalte über. Im Sacktal bei der Stelle „Podstenami“ (Unter den Felswänden) befinden sich im Strombett des Flusses Unica zwei ummauerte und mit einem Eisennetz bedeckte Ponorschächte, nach W. PUTICK (1888) Katarotrons genannt. In einer Tiefe von 10 bis 15 m setzen sie sich in einem 20 und 100 m langen schrägen Höhlengang fort. Eine kleinere, spaltenartige Höhle liegt auch am Ende des Flußbettes Unica bei Podstenami. Am Fuße der senkrechten Felswände im Abschluß des Ponorsacktales liegen drei kürzere Höhlen, die aber auch durch Grabungen nicht wesentlich vertieft werden konnten. Wahrscheinlich sind das Teile der ehemaligen geräumigeren Ponorhöhlen, die aber

vom Lehm und von den Einsturzfelsen verschüttet wurden. Kürzere spaltenartige Höhlengänge sind im Dolomit bei den Schwinden längs des Flusses Unica zwischen dem Hügel Jakovica und dem Dorfe Grčarevec bekannt.

Im vorigen und auch in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts versuchte man mit der Verbreiterung und mit der Ausgrabung der Schwinden die Überschwemmungen im Polje zu vermindern. Doch waren alle Bemühungen umsonst, es wurden auch keine bedeutenden Abflußgänge an der Ponorseite des Planinsko Poljes gefunden. Die primären Eingänge sind entweder mit 10 m dicken Schichten quartärer Anschwemmungen verschüttet oder sie sind mit Versturzfelsen und Gehängeschutt am steilen, felsigen Rand des Poljes zugeschüttet.

Mit der Entdeckung und Erforschung der bedeutenden Wasserhöhlen in den Jahren 1887 bis 1974, wie Mačkoviča (Kat. Nr. 52), Logarček (Kat. Nr. 28), Vranja jama (Kat. Nr. 88) und vor allem Najdena jama (Kat. Nr. 259) am höheren Ponorrand des Planinsko Poljes, sind die Vorstellungen vom Karstuntergrund und von den Karstwasserläufen ziemlich vervollständigt worden. Die trockenen und aktiven Teile dieser Höhlen beweisen, daß der größere Teil der Wässer in breiteren, geschlossenen unterirdischen Höhlengängen fließt. Hinter den scheinbar kleinen Schwinden am Polje befinden sich geräumigere Höhlengänge mit den ständigen oder periodischen Wasserläufen. In den Höhlengängen sind breite und hohe Versturzsäle, aber auch enge Stellen und tiefe Siphontümpel mit verschiedenen umfangreichen Seen zu sehen. Aufgrund der ziemlich großen Schwankung des Wasserniveaus in diesem Untergrund ist zu schließen, daß sich tiefer im Hinterland weniger durchlässige Abschnitte mit weniger ausgehöhlten oder mehr verschütteten Höhlengängen befinden, die nicht alle in die Ponore fließenden Hochwässer ableiten können. Die erforschten Höhlengänge sind nur ein Teil des unterirdischen Wassernetzes, das man durch Höhlenforschungen nie gänzlich kennenlernen wird.

Schwankungen des Wasserniveaus in den Höhlen

Bei den Forschungen in den Wasserhöhlen stoßen die Höhlenforscher auf verschiedene Wasserverhältnisse. Solange aber die Höhlen nicht genau vermessen wurden, konnte man auch mit eingehenden Beobachtungen nicht feststellen, ob die Wässer in den verschiedenen Höhlen und auf den verschiedenen Stellen derselben Höhlen untereinander verbunden sind, ob sie einen Teil eines einheitlichen Wasserlaufes darstellen oder ob es sich um mehrere Wasserläufe handelt und ob die Wasserniveaus in den unterirdischen Seen und Siphonen verschieden hoch sind. Die Verbindungen der unter- und der oberirdischen Wässer aber waren noch weniger klar.

Im Rahmen der Voruntersuchungen im Flußgebiet der Ljubljana wurden die ersten systematischen Messungen des Wasserniveaus zugleich in verschiedenen Höhlen an der Ponorseite des Planinsko Polje und in seinem umfangreichen Hinterland ausgeführt. Regelmäßig wurden in den Jahren 1974 und teilweise 1975 nur die Wässer beobachtet, die bei den verschiedenen Wasserständen erreichbar waren.

Mačkoviča (Kat. Nr. 52) ist eine 530 m lange und 44 m tiefe, vorwiegend trockene Höhle mit einem ständigen Wassertümpel am Ende. Sie öffnet sich in den Unterkreidekalken am Grund einer seichten Einsturzdoline in einer Meereshöhe von 478 m, vom östlichen Rand des Planinsko Poljes beim Dorfe Laze gute 200 m weit entfernt. Vom Eingang führt der Versturzgang hinunter zum Kleinen Saal, wo zur Zeit der Überschwemmungen des Planinsko Poljes das

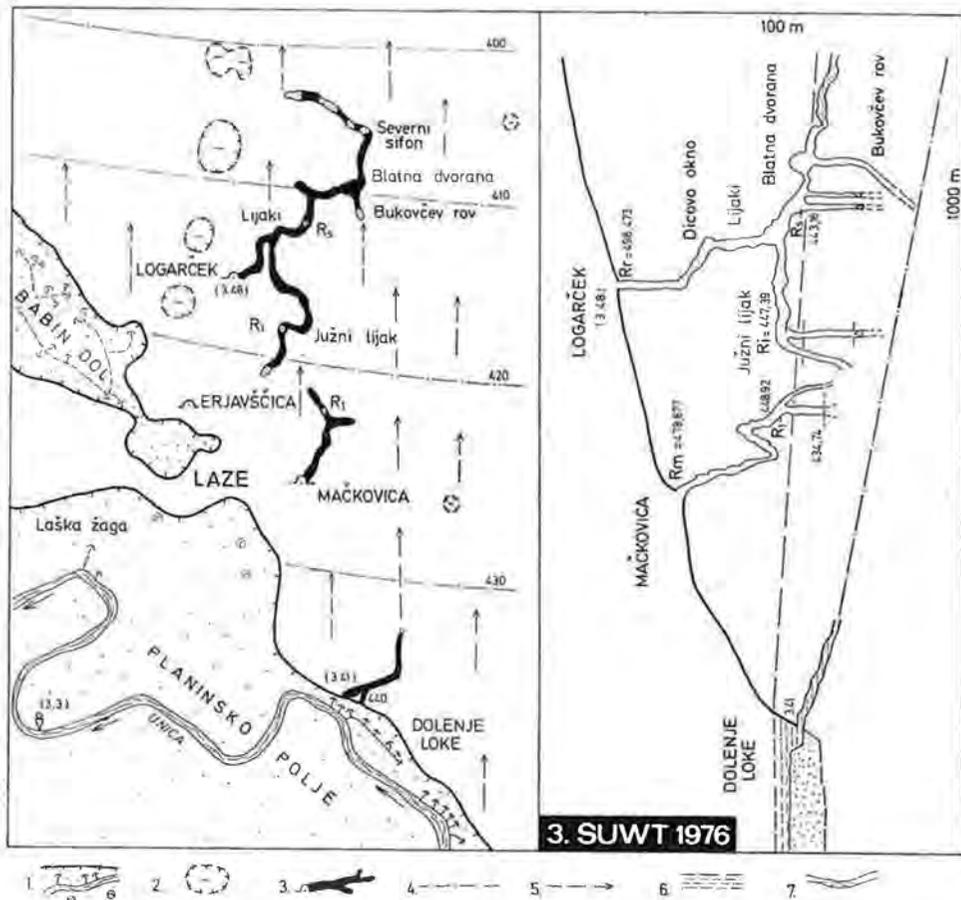


Fig. 14: Lage und Schnitt der Höhlen am Ostrand des Planinsko Poljes, 1 — Rand des Karstpoljes mit dem oberflächlichen Flußbett und mit den Ponoren, 2 — Einsturzdolinen, 3 — Vereinfachter Höhlengrundriß, 4 — das tiefste beobachtete Karstwasserniveau — Hydroisohypse, 5 — Abflußrichtung des Karstwassers, 6 — Höhe der Überschwemmung im Polje und in den Höhlen, 7 — Wasserbecken des eingefangenen Wassers in der Höhle, vereinfachter Höhlenlängsschnitt.

Sl. 14: Položaj in prerez jam ob vzhodnem robu Planinskega polja. 1 — rob kraškega polja s površinsko strugo in požiralniki, 2 — udornice, 3 — poenostavljeni tloris jame, 4 — najnižja znana gladina kraške vode — hidroizohipsa, 5 — smer odtoka kraške vode, 6 — višina poplave na polju in v jamah, 7 — bazeni ujete vode v jami, poenostavljeni prerez jame.

Wasser zum Vorschein kommt. Der Höhlengang steigt dann an, und ein enger Durchgang zwischen den Versturzböcken führt in den Großen Saal, aus welchem zwei kürzere Gänge abzweigen. Der breitere Ostgang ist schon nach einigen zehn Metern mit Lehm und Versturzböcken zugeschüttet. Auf der Nordwestseite des Saales öffnet sich ein enger Höhlengang mit einem kleinen See in der Mitte und einem ständigen Siphon am Ende (Fig. 14). Das Niveau des Sees schwankte im Zeitabschnitt 1974/75 zwischen 434,7 und 444,6 m, während das Wasserniveau im Schlußsiphon nicht beobachtet werden konnte. Der

Seespiegel schwankte bei Niedrigwasser verhältnismäßig wenig, ausgiebiger erhöhte er sich erst bei den Überschwemmungen im Polje. Wenn auch in der Beobachtungszeit keine extremen Wasserverhältnisse herrschten, konnten wir doch feststellen, daß zur Zeit der Hochwässer der Wasserspiegel in den Höhlen unter dem unmittelbaren Einfluß der Überschwemmungen im Polje steht, zur Zeit der Mittel- und der Niedrigwässer aber der Einfluß der Unica unterbrochen wird, so daß im Wassertümpel nur das ruhende Wasser zu beobachten ist. Zur Zeit der Überschwemmungen hebt sich der Wasserspiegel an der östlichen Ponorseite des Poljes um zirka 7 m, in der Höhle aber um 10 m, doch bleibt er noch um zirka 5 m niedriger als auf der Oberfläche. Daraus ist zu schließen, daß hier die Stauung des Wassers irgendwo tiefer im Karstgebiet und nicht direkt an den Ponoren anfängt. Die Höhendifferenz in den Wasserniveaus vermindert sich mit dem Anwachsen der Überschwemmung, damit aber wahrscheinlich auch die Kapazität der Ponore, was sich in der Stauung der Wässer im Polje widerspiegelt. Mit den periodischen Beobachtungen können wir die Wasserverhältnisse zur Zeit der Zunahme und Abnahme nicht so genau kontrollieren, daß es möglich wäre, den unmittelbaren Einfluß der oberflächlichen Wässer auf die unterirdischen zu beurteilen.

Die Höhle Logarček (Kat. Nr. 28, 3. 48) liegt nördlich von der Höhle Mačkovića, dazwischen befinden sich nur 150 m unbekannter Untergrund, obwohl die Eingänge zirka 700 m voneinander entfernt sind. Ein 18 m tiefer Eingangsschacht führt zu einem älteren, trockenen Höhlengang in der Höhe zwischen 470 und 480 m. Beim Dietzfenster klettern wir in den 20 m tiefer gelegenen Hauptgang hinab, in dem an mehreren Stellen das Wasser erreichbar ist. Der untere Teil der Höhle besteht aus dem Süd- und dem Nordgang, die mit Siphonseen abschließen. In beiden Teilen sind trichterförmige 15 bis 20 m tiefe Schächte vorhanden, in welchen die Wasserniveauschwankungen zu beobachten sind (Fig. 14). Die Wasserverhältnisse in der Höhle Logarček sind schon verhältnismäßig gut studiert worden, wegen der fehlenden Meßangaben sind aber die Schlußfolgerungen noch nicht genügend gesichert (I. GAMS 1963).

In der Höhle Logarček können wir an mehreren Stellen zum Wasser gelangen. Für regelmäßige Beobachtungen sind aber nur der sogenannte „Južni lijak“ (der südliche Trichter) und der „Lijak pred Pasažo“ (der Trichter vor der Passage) geeignet. Das Wasser in beiden Trichtern versiegt nach längerer Dürre, ähnlich wie im tiefsten Teil des Höhlenganges „Bukovčev rov“, der zugleich den niedrigsten erreichbaren Punkt in der Höhle Logarček darstellt. Das Wasser bleibt nur in den einzelnen Seen jenseits des nördlichen Siphonschachtes, wo es sich um eingefangenes Wasser handelt, das nicht in unmittelbarer Verbindung mit den ständigen Zuflüssen des Flusses Unica aus den Planinsko Polje steht. Bei Hochwasser ist der nördliche Teil des Hauptganges hinter der Passage nicht zugänglich, und es können daher die Wasserverhältnisse in den Höhlenteilen Blatna dvorana (Kotiger Saal) und Bukovčev rov nicht beobachtet werden.

In den Jahren 1974 und 1975 war das niedrigste Wasserniveau im südlichen Trichter auf der Kote 425,98, das höchste aber auf der Kote 440,97 registriert. Die Differenz beträgt also 15 m. Nach den älteren unüberprüften Angaben sollte das Hochwasser 445 oder sogar 448 m erreichen, das niedrigste Wasser aber unter 407 m liegen, so daß die maximale Differenz in den Wasserniveaus über 40 m beträgt. Die Angleichung der maximalen Wasserniveaus im Polje und in der Höhle ist nach unseren Beobachtungen fraglich. Nach der Beurteilung der Verhältnisse in der Höhle Mačkovića könnte auch in der Höhle Logarček das

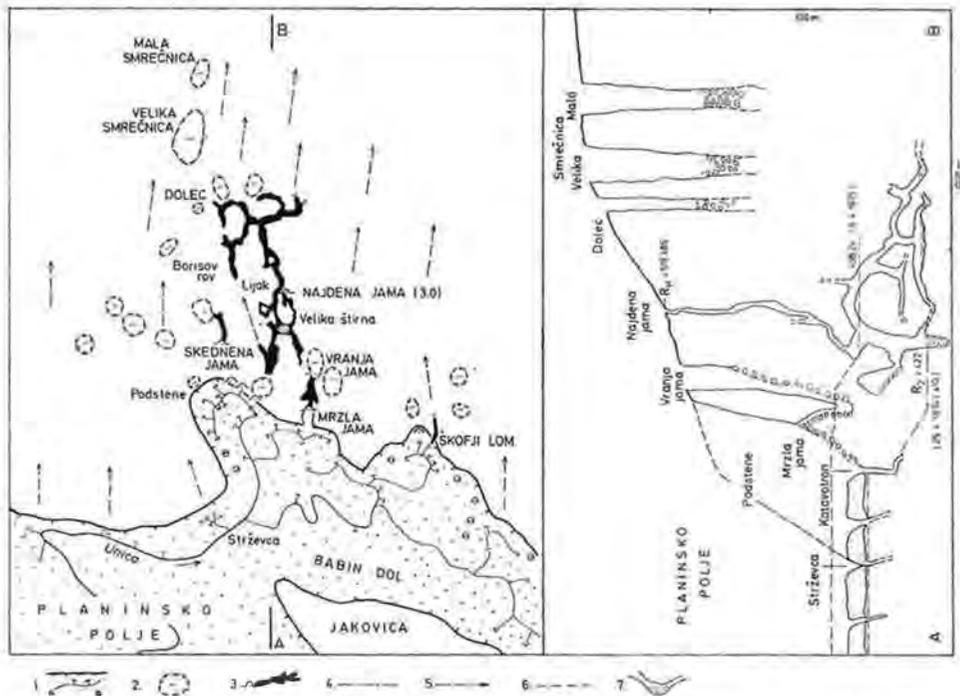


Fig. 15: Lage und Profil der Höhlen am Nordrand des Planinsko Polje, 1 — Karst-poljerand mit dem oberflächlichen Flußbett und mit den Ponoren, 2 — Einsturzdoline, 3 — vereinfachter Höhlengrundriß, 4 — das tiefste beobachtete Karstwasserniveau, 5 — Abflußrichtung des Karstwassers, 6 — Höhe der Überschwemmung im Polje und in den Höhlen, 7 — vereinfachter Höhlendurchschnitt.

Sl. 15: Položaj in prerez jam ob severnem robu Planinskega polja. 1 — rob kraškega polja s površinsko strugo in požiralniki, 2 — udornice, 3 — poenostavljeni floris jame, 4 — najnižja znana gladina kraške vode, 5 — smer odtoka kraške vode, 6 — višina poplave na polju in v jamah, 7 — poenostavljen prerez jame.

Wasserniveau höher sein, als wir bis jetzt registrieren konnten, doch würde es noch immer ein wenig unter dem Wasserspiegel des Poljes bleiben.

Die Höhle Vranja jama (Kat. Nr. 88) war lange Zeit die einzige Höhle am Nordrand des Planinsko Polje, in welcher es möglich war, zur Zeit der Überschwemmungen im Polje zum unterirdischen Fluß Unica zu gelangen. Der Eingang in diese Höhle öffnet sich unter der senkrechten Südwand einer größeren Einsturzdoline, die offensichtlich durch den Einsturz der Höhlendecke ober dem ehemaligen Höhlengang entstanden ist. Zugänglich ist nur der kürzere südliche Teil des Höhlenganges, der sich zusammen mit der Höhle Mrzla jama (Kalte Höhle) gegen das Polje öffnet, während der primäre Eingang von dieser Seite her zerstört ist. Die Fortsetzung der Höhle Vranja jama gegen Norden war bis zur Entdeckung der Höhle Najdena jama im Jahre 1963 unbekannt. Damals zeigte es sich, daß einige Höhlengänge der Najdena jama und insbesondere der Versturzaal Konglomeratna dvorana (Konglomeratsaal) die unmittelbare Fortsetzung der Höhle Vranja jama und zugleich den bedeutenden Abflußgang in der nördlichen Umrandung des Planinsko Polje bilden (Fig. 15).

Außer in der Höhle Vranja jama ist im früheren Jahrhundert der berühmte Höhlenforscher der unterirdischen Ljubljana, W. PUTICK (1888), bis zum Wasser auch in der Lipperthöhle, die aber später Höhlenforscher nicht mehr finden konnten, vorgedrungen. Vielleicht hat die Höhlenforscher die von Putick etwas übertriebene Vorstellung des unterirdischen Höhlenwasserganges getäuscht. Bei der Suche nach der Lipperthöhle kamen Höhlenforscher zu einer sehr ähnlichen Höhle gerade an der Stelle, wo die Lipperthöhle sein sollte. Weil sie aber in ihr den unterirdischen Fluß nicht erreichten, haben sie ihr den Namen Najdena jama (die Gefundene Höhle) gegeben. Dieser scheinbare Irrtum führte nachträglich zur bedeutendsten Entdeckung in den letzten Jahrzehnten im Einzugsgebiet des Karstflusses Ljubljana. Als nämlich die Höhlenforscher in der Höhle Najdena-Lippertova jama eine Höhlenenge, durch die ständig starker Wind wehte, durchgegraben hatten, sind sie erst zu dem richtigen Höhlensystem an der Abflußseite des Planinsko Polje gekommen.

Die Höhle **Najdena jama** (Kat. Nr. 259, 3. 0) ist in speläologischer wie hydrologischer Hinsicht bedeutsam. 4200 m Trocken- und Wassergänge in drei Etagen sind bisher bekannt. Der Eingang in einer Höhe von 520 m ist in Luftlinie 0,5 km vom Polje entfernt, während sich die Höhle mit der Podorna dvorana (dem Versturzaal) im südlichen Teil den Schwinden bei „Podstenami“ auf 150 m nähert, ihr am meisten entfernter nördlicher Teil aber kaum 900 m vom Polje entfernt ist.

Ein enger Kaminschacht mit der Tiefe von 30 m führt in einen schrägen Saal und weiter durch einen engeren Höhlengang zum zweiten Saal in der Höhle zwischen 470 und 480 m. Dort wurden erst im Jahre 1963 die neuen Teile der Höhle Najdena jama (M. Puc 1964, 1965) entdeckt. Hinter der durchgegrabenen Passage geht der Höhlengang in die trichterförmige „Velika štirna“, deren Boden ständig mit Wasser überflutet ist. Der Höhlenteil „Velika štirna“ entstand am Kreuzpunkt zweier Etagen. Inmitten des oberen Höhlenganges liegt der gegen Süden gerichtete Konglomeratsaal, jenseits der „Velika štirna“ setzt sich aber der Hauptgang gegen Norden fort. Der Hauptgang, genannt „Piparski rov“, erniedrigt sich jenseits der zweiten Passage schon so weit, daß er bis zur Decke vom Überschwemmungswasser überflutet wird. Deswegen ist der Abschlußteil der Höhle Najdena jama nur bei Niedrigwasser zugänglich. Er teilt sich in mehrere Höhlengänge, die mit einem Verstoß und Siphonen abschließen. Hydrologisch ist noch besonders der Westarm oder Borisgang, der gegen Süden zurückbiegt und zum Zuflußsiphon führt, interessant. Der Höhlenfluß bildet hier einen 6 m tiefen Wasserfall, bevor er in den Seitenabflußsiphon abfließt (Fig. 15). Die Höhle Najdena jama ist noch nicht genau genug vermessen, um bei jedem Besuch die Unterschiede in den Wasserniveaus zwischen den einzelnen Siphonen und kleinen Seen erkennen zu lassen.

Wegen des schwierigen Zuganges konnten die Beobachtungen und die Vermessung nur bei der ständig zugänglichen Velika štirna durchgeführt werden. Das Wasser oszilliert in ihr nach den Vermessungen im Jahre 1974 und 1975 zwischen 410 und 438 m. In extremen Verhältnissen ist zu erwarten, daß die Differenz zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Wasserniveau auch mehr als 30 m erreicht. Aus den verhältnismäßig geringen Veränderungen des Wasserniveaus bei niedrigen Wasserständen des Flusses Unica ist zu schließen, daß dann das Wasser im Velika štirna eingefangen ist, ähnlich wie in den Höhlen Logarček und Mačkovica, und nicht das tatsächliche Wasserniveau des niedrigsten Abflusses aus dem nördlichen Teil des Planinsko Polje anzeigt. Auf beträchtliche Unterschiede in den Wasserniveaus in der Höhle Najdena

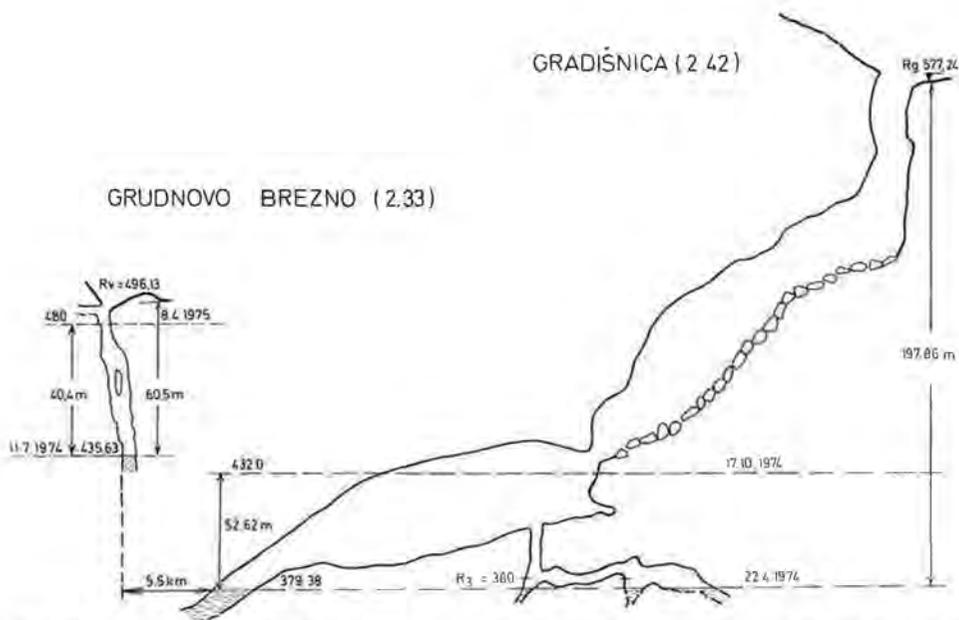


Fig. 16: Aufriß der Schächte Gradišnica (2.42) und Grudnovo brezen (2.33) mit dem niedrigsten und mit dem höchsten beobachteten Karstwasserniveau.

Sl. 16: Prerez Gradišnice (2.42) in Grudnovega brezna (2.33) z najnižjo in najvišjo znano gladino kraške vode.

jama weist schon der erwähnte Wasserfall im Borisgang. Periodisch erscheint der Wasserfall auch beim Zufluß in den Velika štirna, wenn der Fluß Unica bei „Podstenami“ schnell zunimmt. Bei den Hochwässern werden die Differenzen ausgeglichen, und das Wasser überflutet höhere, geräumigere und untereinander besser verbundene Höhlengänge.

Beim Steigen des Wassers wird das Gefälle zwischen dem Wasserniveau im Polje und in der Höhle vermindert, doch bleibt das Wasserniveau in der Najdena jama noch immer um 8 bis 10 m unter dem Wasserniveau im Polje.

Der größte Unterschied in der Höhe des Wasserniveaus besteht im Wasser-schacht **Gradišnica** (Kat. Nr. 86, 2. 42). Der Schacht öffnet sich am Karst-plateau zwischen dem Planinsko Polje und Logaško Polje in der Höhe von 570 bis 580 m, er ist gute 200 m tief und geräumig, mit einem großen Saal am Grund, wo das Wasser in zwei ständigen und in einem periodischen Siphonsee zum Vorschein kommt (Fig. 16). Die Differenz zwischen dem niedrigsten Wasserniveau 379,57 m, registriert in den Jahren 1974 und 1975, und dem höchsten Wasserniveau (432 m) beträgt 53 m. In den extremen Wasserverhältnissen ist aber die Differenz noch etwas größer. Das Niedrigwasser ruht ähnlich wie in den Höhlen Najdena jama, Logarček und Mačkovića in Becken und hat wahrscheinlich keine unmittelbare Verbindung mit dem niedrigsten ständigen Wasserlauf im Einzugsgebiet der Ljubljanaquellen.

Grudnovo brezno (Grudensschacht, Kat. Nr. 2181, 2. 33) liegt nordwestlich des Planinsko Polje am Fuß des Karstplateaus Hrušica ungefähr am halben Wege zwischen den Schwinden des Baches Hotenka und den periodischen Speiern beim Dorfe Grčarevec. Der Eingang öffnet sich in einer Höhe von 496 m, ist 60 m tief und hat den Grund ständig überflutet (Fig. 16). Im Gegensatz zu den früher behandelten Wasserhöhlen längs des unterirdischen Flusses

Unica kommen im Grudnovo brezno vor allem die Wässer aus dem Bereich des Karstplateaus Hrušica zum Vorschein; eine Verbindung mit dem unterirdischen Bach Hotenka ist noch nicht bewiesen. Die Schwankung des Wasserniveaus ist bei Niedrigwasser ähnlich wie in der Höhle Mačkovica. Das Wasserniveau hält sich vorwiegend in der Höhe zwischen 435 und 436 m, nur nach ausgiebigem Regen steigt es für kurze Zeit außergewöhnlich hoch. Nach der Regenzeit im Oktober 1974 war das Wasserniveau 480 m hoch, die Einheimischen geben aber an, daß das Wasser im Jahre 1923 aus dem Schacht floß (I. GAMS & P. HABIČ 1961). Das Wasserniveau schwankt also in dieser Gegend um mehr als 60 m und steigt bei Hochwasser 40 bis 50 m über das Wasserniveau im Planinsko Polje, bei Niedrigwasser aber fällt es bis 10 m unter die Poljenebene. Das bedeutet, daß die Hochwässer aus dem Bereich der Grudnovo blazno in das Planinsko Polje überfließen, die Niedrigwässer aber am Polje vorbei unmittelbar zu den Ljubljanaquellen abziehen.

Der Vergleich des Wasserniveaus in den Höhlen mit den Wasserläufen der Unica und mit den Ljubljanaquellen

Aus Fig. 17 ist ersichtlich, daß in jeder der beobachteten Höhlen das Verhältnis zwischen der Schwankung des Wasserniveaus und den Wasserläufen der Unica verschieden ist. Die niedrigen und die mittleren Wässer beeinflussen das Wasserniveau in der Höhle Mačkovica nicht. Das Wasserniveau hebt sich dort erst bei Durchflüssen von über $40 \text{ m}^3/\text{s}$, wenn sich die Differenz in den Wasserniveaus auf der Oberfläche und in der Höhle nach und nach von 10 auf 5 m vermindert. In der Höhle Logarček (3. 48) ist das Wasserniveau mehr von den Durchflüssen der Unica abhängig. Bei außerordentlich niedrigen Wässern befindet sich das Wasserniveau in der Höhle 30 bis 40 m unter dem Wasserniveau im Polje. Beim Anwachsen des Durchflusses von 2 bis $10 \text{ m}^3/\text{s}$ hebt sich das Wasserniveau in der Höhle um 20 m, bei höheren Durchflüssen wächst aber das Wasserniveau langsamer an, und zwar um 10 m bei den Durchflüssen von 10 bis $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Stärker hebt sich das Wasserniveau, wenn der Fluß Unica das Polje überflutet. Das Ansteigen ist ähnlich wie in der Höhle Mačkovica, nur mit dem Unterschied, daß dort das Wasserniveau 5 bis 6 m höher ist. In der Höhle Najdena jama steht das Wasser im Höhlenteil „Velika štirna“ um 35 m niedriger als im Polje und beinahe in derselben Höhe wie in der Höhle Logarček. Bei den Durchflüssen der Unica von 5 bis 30 bzw. $40 \text{ m}^3/\text{s}$ steigt das Wasserniveau nur um 2 m an, dann aber beginnt es sich mit dem Anwachsen des Durchflusses schneller zu heben, so daß das Wasserniveau bei den höchsten Überschwemmungen nur gute 10 m unter dem Wasserniveau im Polje und nur 2 m niedriger als in der Höhle Logarček steht.

In der Höhle Gradišnica (2. 42) waren bei den Durchflüssen unter $10 \text{ m}^3/\text{s}$ keine Veränderungen im Wasserniveau zu bemerken. Bei den höheren Durchflüssen hebt sich aber das Wasserniveau verhältnismäßig schnell und zwar ziemlich im Einklang mit dem Anwachsen des Wassers in der Höhle Najdena jama. Weil die Hochwässer in den beiden Höhlen bisher nicht gleichzeitig beobachtet wurden, ist es zur Zeit nicht möglich, die tatsächlichen Unterschiede in den Niveaus anzugeben. Am 16. Oktober 1974 war das Wasserniveau in der Najdena jama 436 m, am nächsten Tag aber beim Fallen des Wassers im Polje 432 m hoch. Die Beobachtungen zeigen, daß eine ausgiebigere Hebung des Wasserniveaus in der Najdena jama unter dem Einfluß der angestauten Wässer in der Höhle Gradišnica steht. Eine Stelle beim Durchfluß der unterirdischen Unica

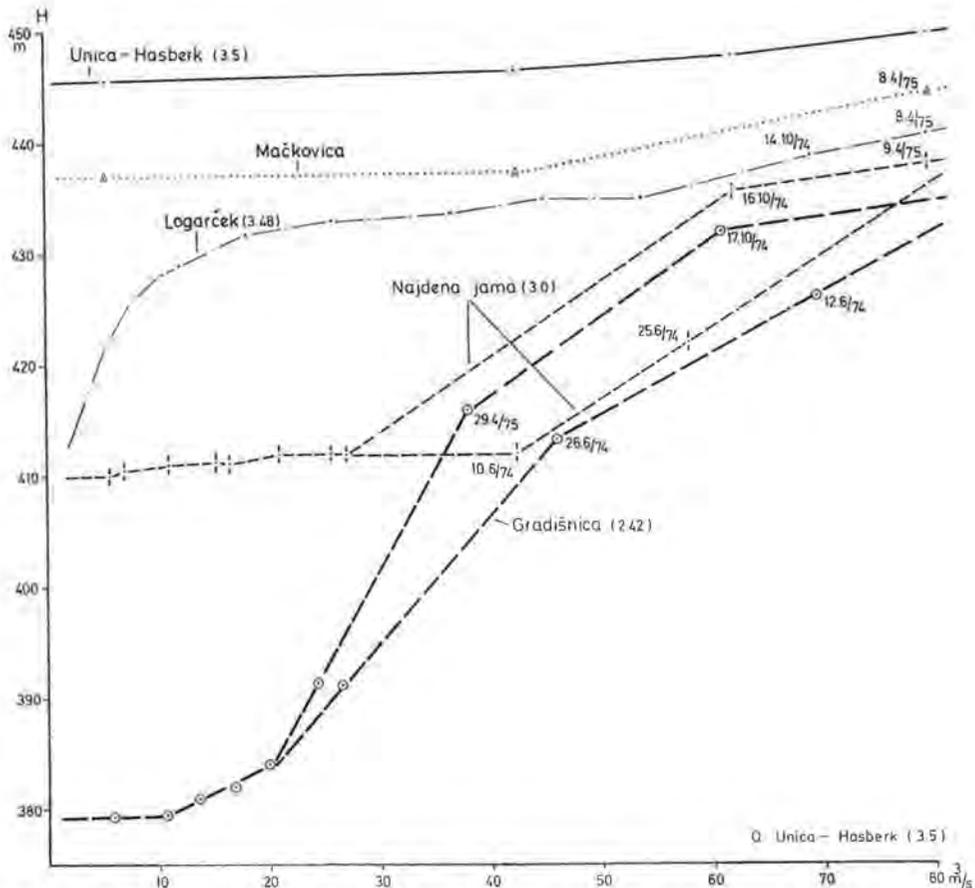


Fig. 17: Vergleich des Wasserniveaus in den Höhlen Mačkovića, Logarček (3.48), Najdena jama (3.0) und Gradišnica (2.42) mit den Durchflüssen der Unica bei Hasberg (3.5).

Sl. 17: Primerjava vodne gladine v jamah Mačkovića, Logarček (3.48), Najdena jama (3.0) in Gradišnica (2.42) s pretoki Unice—Hasberg (3.5).

zwischen dem Planinsko Polje und den Ljubljanaquellen befindet sich demgemäß nördlich von der Höhle Gradišnica und beeinflusst offensichtlich die ausgiebigen Schwankungen des Wasserniveaus in dieser Höhle, wahrscheinlich aber auch die Wasserstauung in den anderen Höhlen und im Planinsko Polje.

Beim Vergleich des Wasserniveaus längs des unterirdischen Wasserlaufes zwischen dem Planinsko Polje und den Ljubljanaquellen (Fig. 2) zeigen sich schon aufgrund der bescheidenen Angaben interessante hydrologische Verhältnisse. Das Niveau des Karstwassers am Ponorrand des Planinsko Poljes und im Bereich des Karstplateaus Hrušica, wie dies die Beobachtungen im Wasser-schacht Grudново brezno (2.33) zeigen, erniedrigt sich während der Dürre bis um 40 m. Weil aber die niedrigsten Durchflüsse der Unica (3.5) das Wasserniveau in der Najdena jama (3.0), Gradišnica (2.42) und im Grudново brezno (2.33) nicht beeinflussen, ist zu vermuten, daß dort die Wässer stehen oder den Weg in eine tiefere Etage gefunden haben. Das minimale Gefälle zwischen der Höhle Logarček (3.48) und den Ljubljanaquellen (1.1 bis 1.4) beträgt 10‰.

Bei Hochwasser hebt sich das Wasserniveau am meisten im Zwischenteil, in der Gradišnica (2. 42) um mehr als 50 m, im Planinsko Polje (3. 1) um 10 und an den Ljubljanaquellen (1. 4) um 1 bis 6 m. Das maximale Gefälle zwischen der Gradišnica (2. 42) und den Quellen beträgt dann 20‰. Das Wasserniveau hebt sich im Karst nordwestlich vom Planinsko Polje, wie dies die Beobachtungen im Wasserschacht Grudnovo brezno (2. 33) und die Karstquellen bei Grčarevec zeigen, über das Poljeniveau, was die Versickerungsverhältnisse der Ponore bei Podstenami (3. 1) beeinflusst.

Die Schwankungen und Höhen des Wasserniveaus an den Ljubljanaquellen sind zu gleicher Zeit verschieden. Das höchste Wasserniveau ist in der Quelle 1. 32 und schwankt zwischen 296 und 297 m. In der Quelle 1. 34 ist es um 1 m niedriger und schwankt nur einen guten halben Meter. Das Wasserniveau der Quelle 1. 36 schwankt zwischen 288 und 293 m, in 1. 37 sind kaum Schwankungen erkenntlich. In den Quellen 1. 4 wird die Differenz in den Wasserniveaus längs des Wasserlaufes aufwärts größer, es liegt bei 1. 45 mit einem Wasserniveau zwischen den Höhen zwischen 291 und 295 m, bei 1. 42 aber zwischen 289 und 292 m. Verhältnismäßig klein sind die Unterschiede zwischen den niedrigsten und den höchsten Wässern in den Quellen 1. 21 bis 1. 24, die sich zwischen 290 und 291 m bewegen. Ähnliches gilt auch für die Quellen 1. 11 bis 1. 13, wo sich die Wasserniveaus gewöhnlich zwischen 292,5 und 293,5 m bewegen und wo die Unterschiede zwischen den niedrigsten und den höchsten Wasserständen nicht mehr als 1 m betragen. Das Wasserniveau in den Ljubljanaquellen erniedrigt sich im allgemeinen von der Quelle 1. 32 und von den Quellen 1. 1 gegen die Quellen 1. 36 und 1. 37.

Verhältnismäßig kleine Differenzen in den Wasserniveaus zwischen den niedrigen und den hohen Wässern können die Folge einer ausreichend großen Durchlässigkeit der Kanäle sein. Durch diese kann das Wasser fließen, ohne daß sich die Wasserniveaus im Hinterland wesentlich heben. Weil aber tiefer im Hinterland bedeutendere Unterschiede in den Wasserniveaus festgestellt wurden, müssen sich die Drücke vor den Quellen ziemlich vermindern, vor allem im engeren Hinterland der Quellen (1. 4). Oberhalb von diesen Quellen sind mehrere Einsturzdolinen, deren Sohlen sich nur gute 10 m ober den Quellen befinden und die bei den Überschwemmungen nicht überflutet sind. Anders ist es im Hinterland der Quelle 1. 36, wo sich am Grunde der 200 m entfernten Einsturzdoline Grogarjev dol ein 5 m tiefer See bildet (Fig. 18). Das Wasserniveau ist dann 6 m höher als in der Quelle 1. 36. und kann noch anwachsen, wenn das Wasser in der Quelle schon sinkt. Das ist wahrscheinlich nur mit dem Durchfluß des Wassers aus dem höher gelegenen Hinterland des Baches Hribščica (1. 32) zu den Quellen (1. 36 und 1. 37) zu erklären.

Das Wasserniveau in den Ljubljanaquellen beeinflussen teilweise verschiedene Wehranlagen, durch welche einst das Karstwasser zu zahlreichen Sägen und Mühlen geleitet wurde. Der größere Teil derselben ist aber schon gegen Ende des vorigen und am Anfang dieses Jahrhunderts verfallen. Künstliche Dämme befinden sich noch heute beim Bistraschloß, bei der Zupanmühle (1. 12) und bei den Quellen 1. 11, wo sich eine kleine Hydrozentrale befindet. Teilweise sind auch die Quellen 1. 22 eingedämmt, doch der Damm bei Quelle 1. 37 ist verfallen. Bei der Quelle 1. 36 steht die Säge noch immer, die Arbeit hat aber schon vor etlichen Jahren aufgehört. Auch in der Quelle (1. 32), bei der Kožuhmühle, kann man das Wasser mit einem Sperrdamm regulieren, womit vor Jahren die Verbindung dieser Quelle mit der Quelle 1. 34 bewiesen worden ist. Der Einfluß einer künstlichen Eindämmung wurde auch in den Bohrungen

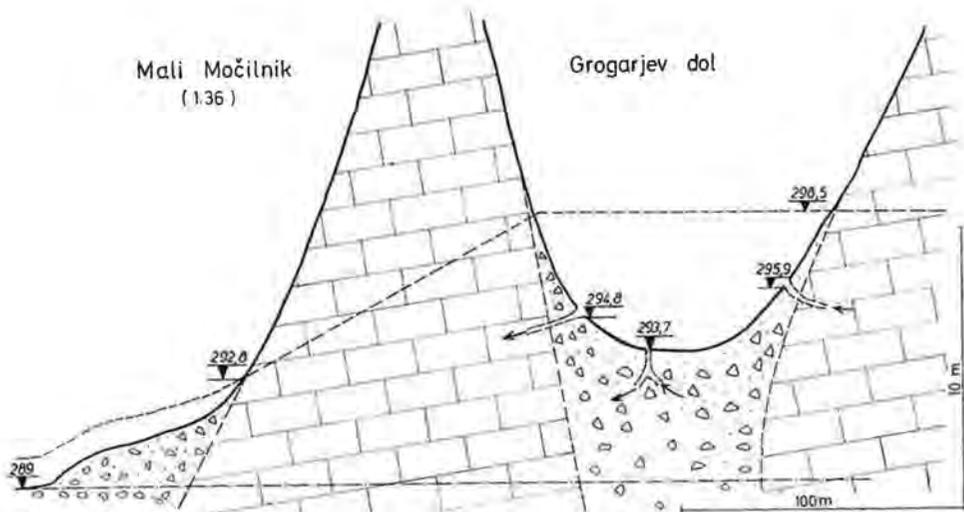


Fig. 18: Geologisches Profil des Gebietes zwischen der Quelle Mali Močilnik (136) und der Einsturzdoline „Grogarjev dol“ mit dem höchsten beobachteten Karstwasserniveau.

Sl. 18: Prerez med izvirom Mali Močilnik (136) in udornico Grogarjev dol z najvišjo opazovano gladino kraške vode.

im engeren Hinterland beider Quellen beobachtet (P. HABIČ 1976). Die künstliche Eindämmung der Ljubljanaquellen kann das Steigen des Wasserniveaus und auch die Verteilung des Wassers im Karsthinterland beeinflussen. So ist es den Einheimischen bekannt, daß bei Niedrigwasser die Eindämmung der Quelle 1.22 den Wasserstand in der Quelle 1.45 und auch die Durchflüsse in den Quellen 1.1 beeinflußt. Umgekehrt, wenn die Sperren des Staudammes in 1.1 geöffnet werden, vermindern sich die Durchflüsse in den Quellen 1.2 und 1.4.

Obleich lokale Verhältnisse die Höhe des Wasserniveaus in den Quellen und die Unterschiede zwischen den Nieder- und Hochwässern beeinflussen können, widerspiegeln sich da gleichwohl auch andere hydraulische Faktoren des Karsthinterlandes, die wir bislang mit den beschränkten Mitteln noch nicht eingehend studieren konnten.

2. 2. 4. Hydrochemische Untersuchungen (Martina ZUPAN und M. KOLBEZEN)

Die Voruntersuchungen der Wasserqualität im Einzugsgebiet der Ljubljana sind in der Zeit vom August 1972 bis zum Markierungsversuch im Mai 1975 ausgeführt worden. Die Aufgaben waren:

- A. Untersuchung der chemischen Wasserzusammensetzung als Methode der Verfolgung unterirdischer Wasserläufe. Aufgrund der systematischen Vergleiche einiger physikalischer Eigenschaften des Wassers soll festgestellt werden, ob Ähnlichkeiten zwischen den Ponoren und den Quellen bestehen. Im positiven Fall soll weiters festgestellt werden, ob es möglich wäre, auf diese Weise die Richtungen der unterirdischen Wasserläufe anzudeuten.
- B. Untersuchungen der Wasserqualität sollen die Feststellung der chemischen Zusammensetzung und des Grades der Verunreinigung der Karstgewässer ermöglichen. Falls aufgrund der Parameter der Verunreinigung Ähnlichkeiten zwischen den Wässern der einzelnen Schwinden und den Quellen gefunden werden könnten, so wäre auch dies als Markierung auszuwerten.

C. Wasseruntersuchungen betreffend den natürlichen Gehalt der Stoffe, die beim Markierungsversuch verwendet werden sollten.

Wasserproben aus den Schwinden und Quellen wurden in der Zeit vom August 1972 bis zum Mai 1975 einmal monatlich entnommen. 30 Serien von Proben sind vor dem Markierungsversuch, eine nach dessen Beendigung analysiert worden. Die Untersuchungen haben durch dieses Programm — einmal monatliche Probenahme — alle bedeutsamen hydrologischen Situationen erfaßt.

Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Kalzium-Magnesium- und Karbonatgehalt sind in jeder Serie der Wasserproben bestimmt worden. Diese Analyse wurde kontroll-physikalisch-chemische Analyse benannt.

Bei 10 von 31 Serien sind neben diesen Parametern noch jene Parameter gemessen worden, die das Bild der gesamten chemischen Zusammensetzung und den Grad der Verunreinigung zeigen: SiO_2 , Al, Fe, Na, K, Cl, SO_4 , Phosphate, NO_2 , NO_3 , NH_4 , chemischer und biochemischer Bedarf nach Sauerstoff, Detergentien und Zahl der koliformen Bakterien (qualitativer Test, vorgenommen, solange noch nicht Proben gesondert für die bakteriologischen Analysen entnommen wurden). Diese Analysen werden als komplette physikalisch-chemische Analysen bezeichnet. Sie wurden zu verschiedenen Jahreszeiten, bei verschiedenen Wasserständen und verschiedener Witterung durchgeführt: einmal bei niedrigem, zweimal bei niedrig-mittlerem, dreimal bei mittlerem, zweimal bei mittelhohem und zweimal bei hohem Wasserstand. Zwei Serien von Proben sind bei starken Niederschlägen und eine Serie bei starken Niederschlägen nach einer vorangegangenen längeren Trockenperiode entnommen worden.

Zugleich mit den Proben für die chemischen Analysen wurden auch Proben zwecks Untersuchung des Gehaltes an Tritium, Deuterium und radioaktivem Kohlenstoff (Kapitel 2. 2. 6.) entnommen.

In den letzten Monaten vor dem Markierungsversuch sind viermal Proben für die Bestimmung des natürlichen Gehaltes an organischen Fluoreszenzfarbstoffen entnommen worden.

Die physikalisch-chemischen Wasseranalysen sind hauptsächlich nach dem in den „Deutschen Einheitsverfahren für Wasser- und Abwasseranalysen“ beschriebenen Verfahren durchgeführt worden. Die Analyse der Fluoreszenzfarbstoffe ist im Kapitel 2. 3. 3. beschrieben. Der qualitative Test für koliforme Bakterien ist auf Kolibändern der Firma SA Zollikon getätigt worden.

Die Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen sind so umfangreich, daß sie in diesem Rahmen nicht in ihrer Gesamtheit dargestellt werden können. Dieses Kapitel ist nur eine kurze Darstellung der Ergebnisse, in der nur das Wesentlichste mitgeteilt wird.

A. Die chemische Wasserzusammensetzung als natürlicher Tracer zur Feststellung unterirdischer Wasserverbindungen.

Es wurde versucht, Ähnlichkeiten zwischen den Schwinden und den Quellen aufgrund der Ergebnisse von 31 Serien Kontrollanalysen auf dreifache Weise festzustellen:

- a) Aus dem Vergleich der Analysen der einzelnen Probenreihen und zugleich aus dem Vergleich der hydrologischen Situationen zur Zeit der Probenahmen. Es sollten die optimalen hydrologischen Bedingungen und die Parameter zwecks Feststellung der unterirdischen Wasserverbindungen bestimmt werden.

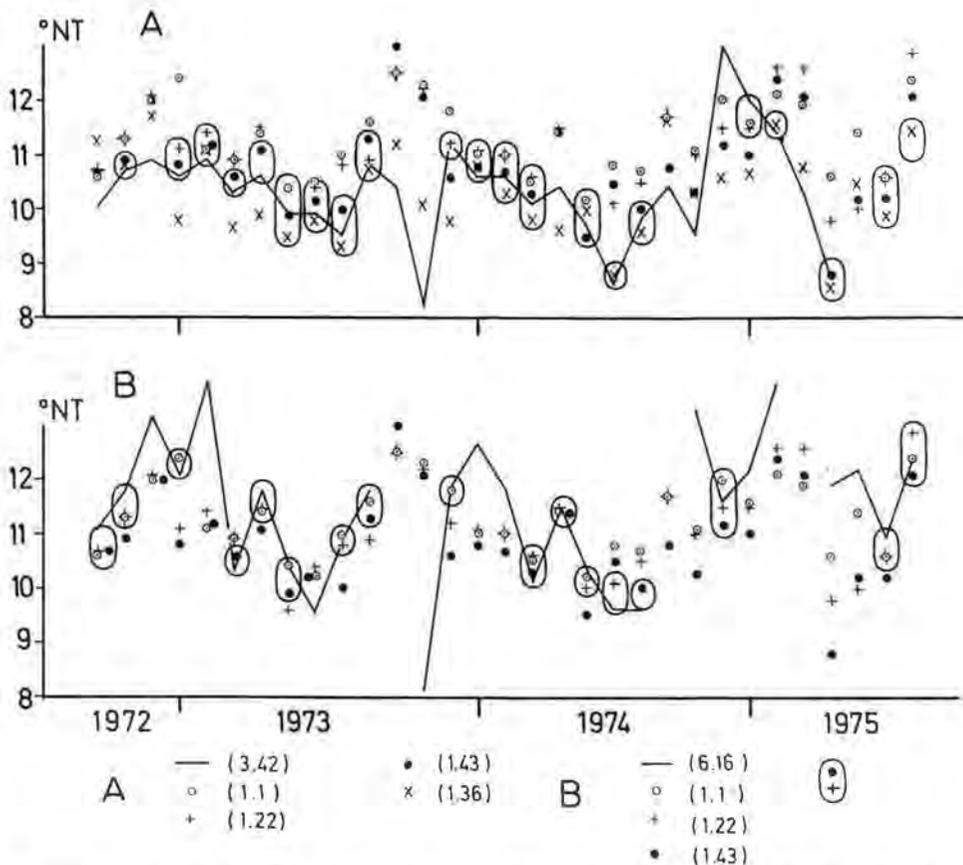


Fig. 19: Vergleich der Gesamthärte ausgewählter Schwinden und Quellen für den Zeitabschnitt 1972—1975 in deutschen Härtegraden (°NT): A — Vergleich der Unica (3.42) mit den Quellen Bistra = 1.1, Lubija, Ceglarjev izvir = 1.22, Ljubljana, Izvir pod skalo = 1.43, Ljubljana, Mali Močilnik = 1.36; B — Vergleich der Ponorwässer aus Cerkniško Polje (Vodonos 6.16) mit denselben Quellen wie bei A; a — Unterschiede der Härte sind kleiner als 0,5 °NT.

Sl. 19: Primerjava totalnih trdot v izbranih ponorih in izviri za obdobje 1972—1975 v nemških stopinjah (°NT). A — Primerjava Unice (3.42) z izviri, 1.1 — Bistra, 1.22 — Lubija, Ceglarjev izvir, 1.43 — Ljubljana, Izvir Pod skalo, 1.36 — Ljubljana, Mali Močilnik; B — Primerjava Cerkniško jezero, Vodonos (6.16) z izviri 1.1 Bistra, 1.22 Lubija, Ceglarjev izvir, 1.43 — Ljubljana, Izvir pod skalo, a — razlike v trdotah so manjše od 0,5 °NT.

b) Aus dem Vergleich der Monatswerte der einzelnen Parameter für die ganze Untersuchungszeit.

c) Aus dem Vergleich der Durchschnittswerte der einzelnen Parameter für die ganze Untersuchungszeit.

Bei der Feststellung ähnlicher physikalisch-chemischer Eigenschaften der in Schwinden versinkenden Wässer und der Quellwässer sind wegen der zu großen Zahl nur jene Schwinden berücksichtigt worden, die für die Einspeisung vorgesehen waren (außer der Schwinde 3.41) sowie je eine Quelle aus den Gruppen 1.1, 1.2, 1.3 und 1.4. Besonders wurde die Quelle 1.44 berücksichtigt, da sie einige Eigenheiten aufweist. Fig. 19 zeigt, daß die Gesamthärten

des versickernden und des Quellwassers in bestimmten Serien sehr ähnlich sind; Abweichungen bis $0,5^0$ NT sind eingerechnet. Die in den Wasserproben der Schwinde 6.16 gemessenen Härten sind meistens den Härten des Quellwassers 1.14 ähnlich (14mal oder in 45% aller Probennahmen), weniger häufig ähnlich aber mit den Härten der Quellwässer 1.44 und 1.36 (viermal). Die Härten des Unica-Flusses sind in der Schwinde 3.42 meistens den Härten in der Quelle 1.43 (16mal oder 51,5% aller Probennahmen), weniger oft aber den Härten in den Quellen 1.13 (achtmal) und 1.22 (elfmal) ähnlich. In der Quelle 1.44 zeigt sich die Ähnlichkeit zwölfmal, in der Quelle 1.36 sogar 16mal. Die Schwinden 3.1 zeigen die größte Ähnlichkeit mit der Quelle 1.36, und zwar neunmal, mit den Quellen 1.44 sechsmal, 1.43 achtmal, 1.22 viermal und 1.13 nur einmal.

Die angeführten Angaben lassen die Vermutung zu, daß die Wässer des Sees von Cerknica hauptsächlich mit den südöstlichen Quellen des Ljubljana-Karstflusses (Quellen der Bistra) verbunden sind. Diese Verbundenheit vermindert sich gegen die nordwestlichen Quellen zu immer mehr, doch dafür kommt es zu einer größeren Ähnlichkeit mit den Wässern aus der südlichen Seite des Poljes von Planina (Milavčevi ključi). Die Wässer aus der nördlichen Seite des Poljes von Planina (Podstene) weisen auf eine Verbindung mit den Quellen 1.4 und 1.3 hin.

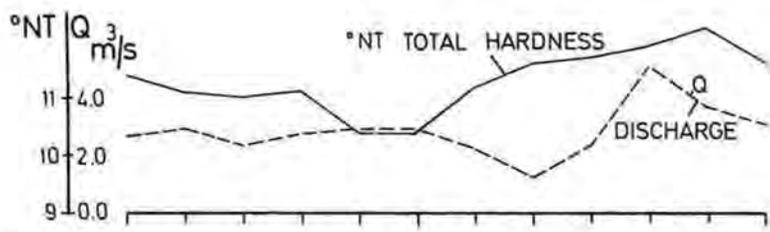
Es ist unmöglich, eine Ähnlichkeit der Härten im Wasser der Schwinden 2.41 und 2.31 mit den Härten der Quellwässer bei Vrhnika festzustellen. Eine Ausnahme bildet nur die Quelle 1.44, wo mit dem Wasser der Schwinde 2.41 ähnliche Härten zweimal und mit der Schwinde 2.31 dreimal auftreten. Auch die größeren Schwankungen bei der Quelle 1.44 lassen die Vermutung zu, daß die Wässer der erwähnten Schwinden diese Quelle speisen.

Aufgrund ähnlicher Härten haben wir die optimale hydrologische Situation für die Verfolgung unterirdischer Wasserläufe kennengelernt. Die Wasserhärten der Schwinde 3.42 sind bei mittlerem Wasserstand den der Quellwässer 1.4 und 1.3, beim mittelniedrigen Wasserstand dem des Quellwassers 1.1 am ähnlichsten. Das Wasser der Schwinde 6.16 ist aber bei mittelniedrigem Wasserstand dem der Quellwässer 1.4 und 1.3, bei mittlerem Wasserstand dem Quellwasser von 1.1 am ähnlichsten. Vermutlich ist eine mittlere Wasserführung für die Verfolgung mehr direkter Wasserverbindungen zwischen den Schwinden und den Quellen, ein mittelniedriger Wasserstand aber für die Feststellung unterirdischer Wasserverbindungen, wo die Quellen aus verschiedenen Schwinden gespeist werden, günstiger.

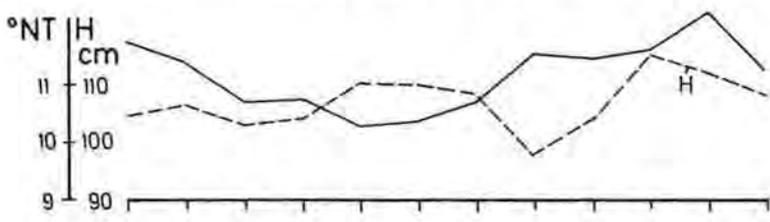
Die elektrische Leitfähigkeit ist an den gleichen Schwinden und Quellen wie die Gesamthärte verglichen worden, allerdings mit schlechteren Ergebnissen als bei der Härte. Im Hinblick auf die elektrische Leitfähigkeit ist das Wasser der Schwinde 3.42 zumeist den Quellwässern 1.3 und 1.4, jenes der Schwinde

Fig. 20: Mittlere monatliche Durchflüsse (Q) und Gesamthärte (0 NT = d.HG) für Quellwässer im Zeitabschnitt 1972—1975; 1.13 — Bistra, Grajski izvir; 1.22 — Lubija, Ceglarjev izvir; 1.43 — Ljubljana, Izvir Pod skalo; 1.37 — Ljubljana, Veliki Močilnik; 1.36 — Ljubljana, Mali Močilnik; 1.32 — Hribščica, Kožuhov izvir.

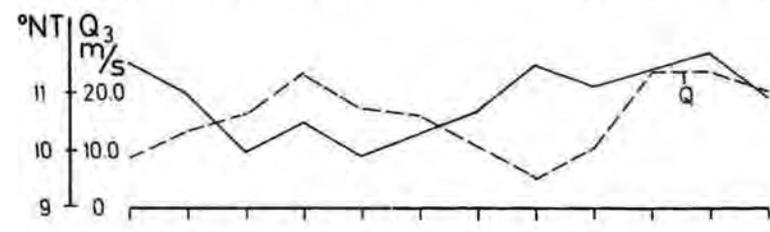
Sl. 20: Srednje mesečni pretoki (Q) in totalne trdote (0 NT) izvirne vode v obdobju 1972—1975. 1.13 — Bistra, Grajski izvir, 1.22 — Lubija, Ceglarjev izvir, 1.43 — Ljubljana, Izvir pod skalo, 1.37 — Ljubljana, Veliki Močilnik, 1.36 — Ljubljana, Mali Močilnik, 1.32 Hribščica, Kožuhov izvir; 0 NT — nemške trdotne stopinje.



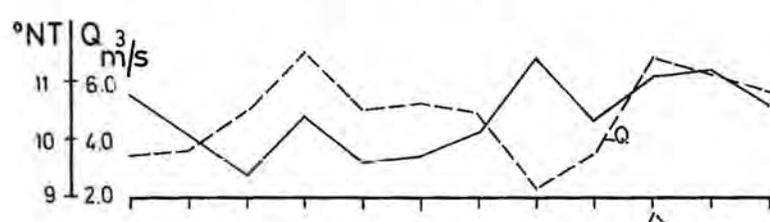
1.13



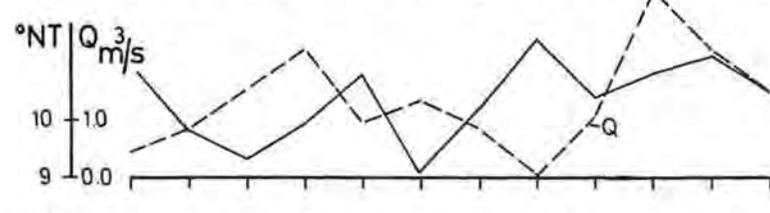
1.22



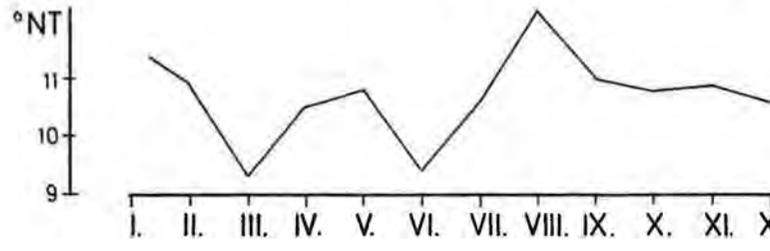
1.43



1.37



1.36



1.32

I. II. III. IV. V. VI. VII. VIII. IX. X. XI. XII.

6.16 dem Quellwasser 1.3 am ähnlichsten. Die elektrische Leitfähigkeit ist wohl nicht geeignet, die verwickelten unterirdischen Wasserverbindungen festzustellen. Vielleicht ist diese Methode erfolgreicher bei direkten unterirdischen Wasserverbindungen, wie dies ein Markierungsversuch zwischen dem Bache Loški potok und den Quellen der Rakitnica im Jahre 1964 (I. GAMS, 1965) gezeigt hat.

Auch die durchschnittlichen Durchflüsse und die durchschnittlichen monatlichen Härten einiger Schwinden und Quellen sind verglichen worden (die durchschnittliche Jännerhärtigkeit in den Jahren 1972 bis 1975 ist z. B. aus den Probenreihen im Jänner jedes Jahres berechnet worden; ebenso die Durchschnittshärten für die übrigen Monate). Die diesbezüglichen Kurven (Fig. 20 und 21) weisen auf die jahreszeitlichen Schwankungen hin, die in einzelnen Quellen weniger markant sind als in einzelnen Schwinden. Dies gilt vor allem für die Quellen 1.1, 1.2 und 1.4, welche den Verlauf der Gesamthärte in bezug auf die Jahreszeiten zeigen. Die Härte fällt nach dem Wintermaximum Anfang des Jahres auf das Minimum am Ende des Frühlings (Mai, Juni) und steigt dann bis zum absoluten Jahresmaximum im November an, worauf sie wieder zu fallen beginnt. Das absolute Maximum tritt bei den Quellen 1.3 und 1.33 schon im August, bei den Schwinden 2.41 und 2.31 aber im Juli auf, das sekundäre Minimum liegt im August.

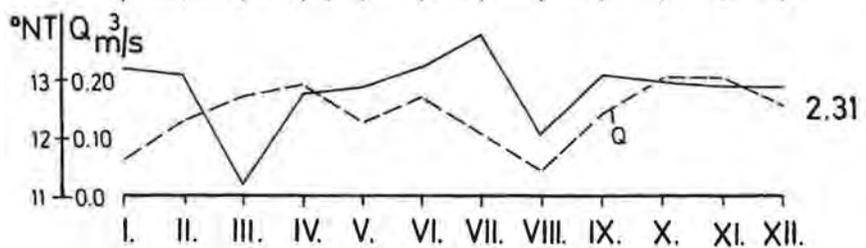
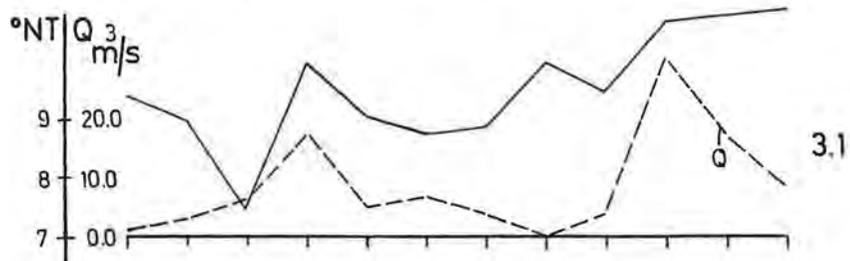
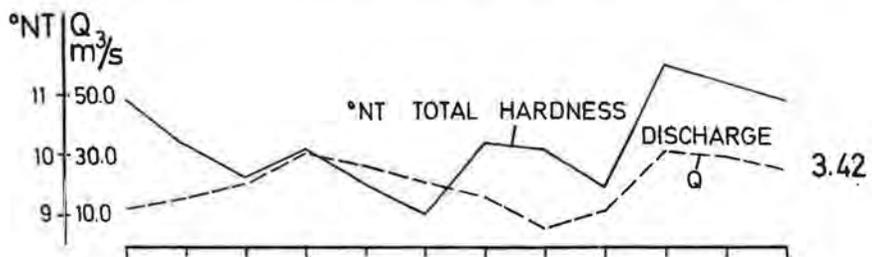
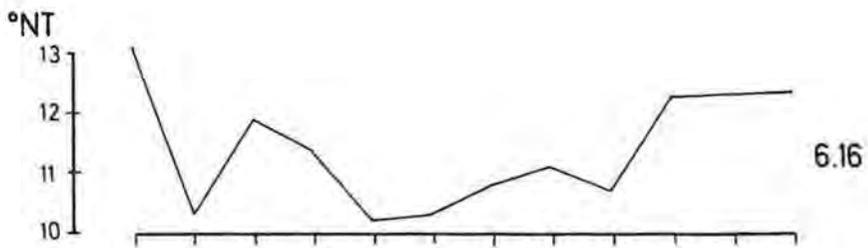
Eine andere Eigenheit ist die niedrige Härte im März bei verhältnismäßig großen Durchflüssen und die hohen Härten bei kleinen Durchflüssen im August. Die hohen Härten des Wassers in den Sommermonaten sind mit der Tatsache verbunden, daß die Durchflüsse im Frühling aus dem unterirdischen Wasserlauf, aus ausgiebigeren Niederschlägen und dem Wasser der Schneeschmelze resultieren, die minimalen Wässer im August aber nur dem unterirdischen Wasserkörper entspringen.

Die Kalzium- und Magnesiumhärten (einmal monatlich gemessener Proben) unterscheiden sich von den mittleren Werten dieser Härten in den einzelnen Quellen 1.1, 1.2 und 1.4 verhältnismäßig wenig (Fig. 22). Dies gilt vor allem für die Quelle 1.43, wo die Härten ohne Rücksicht auf die Temperatur, den Wasserstand, die Jahreszeit und andere Umstände am wenigsten variieren. Etwas größere Abweichungen weist die Kalziumhärte im Monat Juni bei den Quellen 1.13, 1.22, 1.3 und 1.32 auf.

In der ersten Jahreshälfte überwiegen im Quellgebiet Härten mit unterdurchschnittlichem Jahreswert, in der zweiten aber Härten mit überdurchschnittlichem Jahreswert. Diese Unterschiede sind an den Schwinden geringer (Fig. 23). Beim Vergleich der Kalzium- und Magnesiumhärte mit dem Jahreszyklus der Wassermengen zeigen sich einige Abhängigkeiten nur bei der Magnesiumhärte. Im allgemeinen ist eine Tendenz des Sinkens der Mg-Härten mit der Zunahme der Wassermengen zu bemerken.

Fig. 21: Mittlere monatliche Durchflüsse (Q) und Gesamthärte ($^{\circ}\text{NT} = \text{d.HG}$) für Schwindenwässer im Zeitabschnitt 1972—1975: 6.16 — Cerkniško polje, Vodonos; 3.42 — Unica, Milavcovi ključi; 3.1 — Unica, Podstene; 2.41 — Logaščica, 2.31 — Hotenka.

Sl. 21: Srednje mesečni pretoki (Q) in totalne trdotne ($^{\circ}\text{NT}$) ponorne vode v obdobju 1972—1975. 6.16 — Cerkniško jezero, Vodonos, 3.43 — Unica, Milavcovi ključi, 3.1 — Unica, Podstene, 2.41 — Logaščica, 2.31 — Hotenka, $^{\circ}\text{NT}$ — nemške trdotne stopinje.



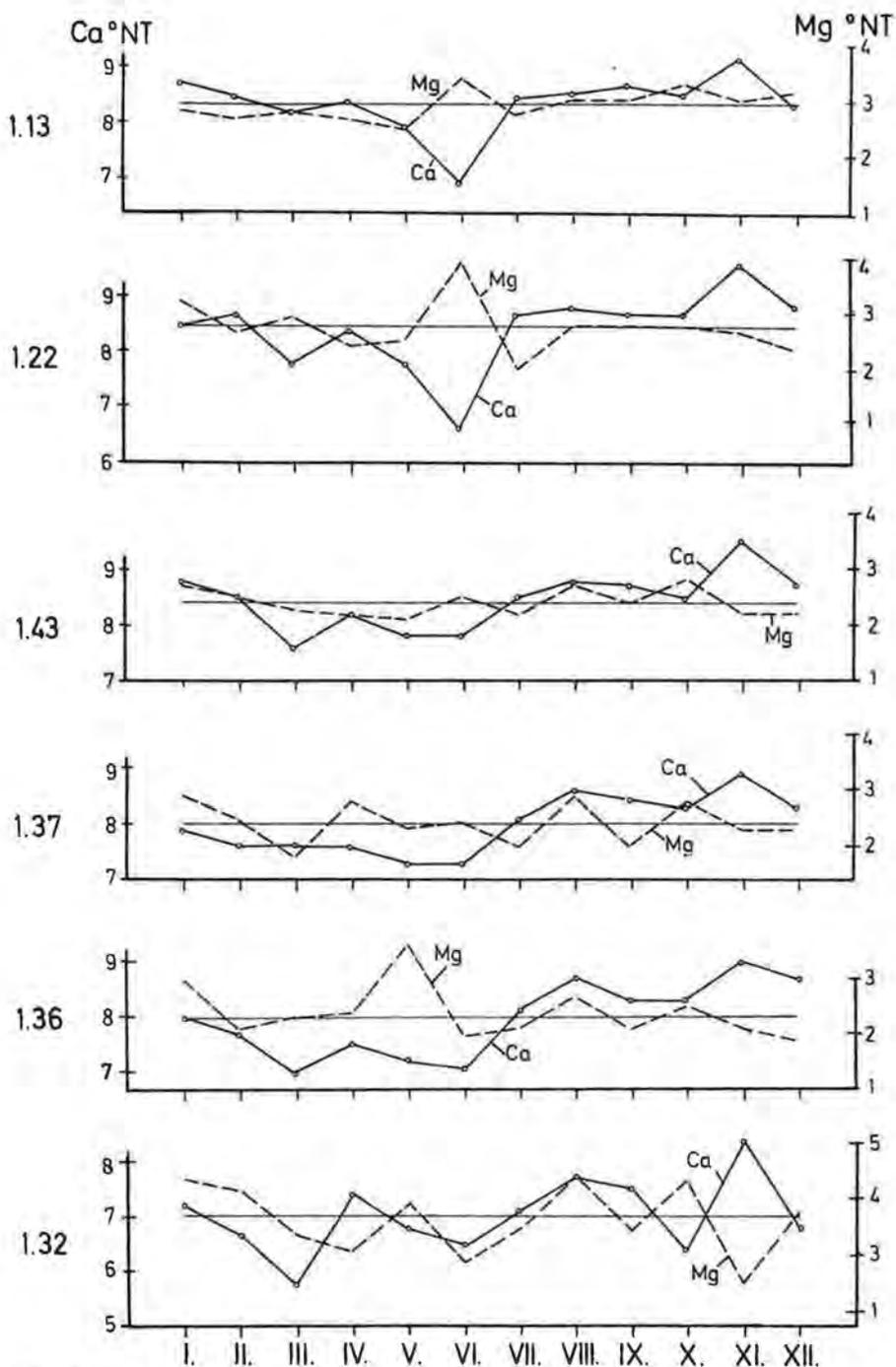


Fig. 22: Kalcium- ($\text{Ca}^{\circ\text{NT}}$) und Magnesiumhärten ($\text{Mg}^{\circ\text{NT}}$) und deren Durchschnittshärten im Quellwasser monatlich im Zeitraum 1972–1975. Quellen wie bei Fig. 20.

Sl. 22: Kalcijeve ($\text{Ca}^{\circ\text{NT}}$) in magnezijeve trdote ($\text{Mg}^{\circ\text{NT}}$) ter njihovi poprečni izvorne vode po mesecih v obdobju 1972–1975. Izviri kot pri sliki 20, °NT — nemške trdotne stopinje.

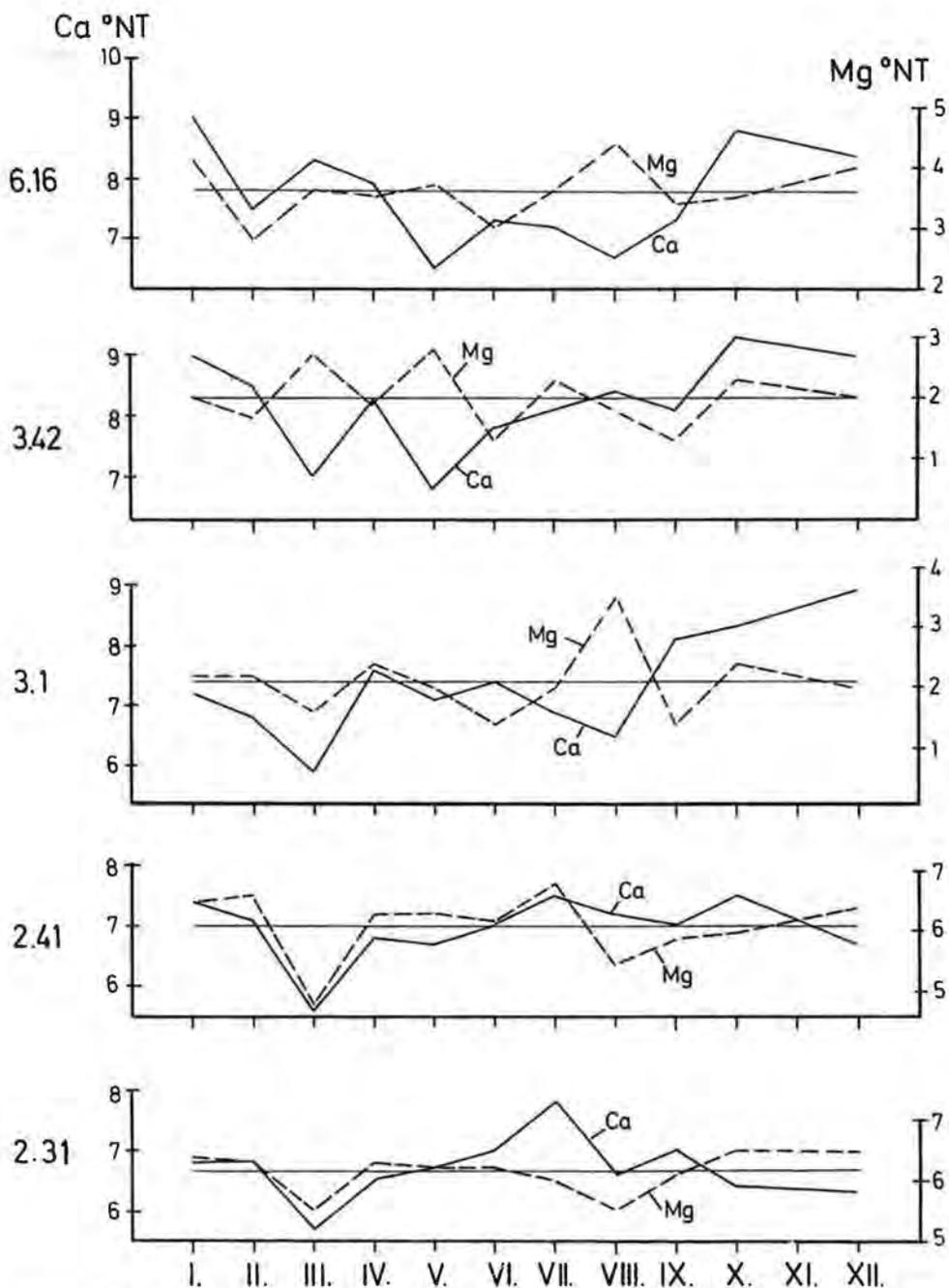


Fig. 23: Kalcium- ($\text{Ca}^{\circ\text{NT}}$) und Magnesiumhärten ($\text{Mg}^{\circ\text{NT}}$) und deren Durchschnitte in Schwindenwässern monatlich im Zeitabschnitt 1972—1975. Schwinden wie bei Fig. 21.

Sl. 23: Kalcijeve ($\text{Ca}^{\circ\text{NT}}$) in Magnezijeve trdote ($\text{Mg}^{\circ\text{NT}}$) ter njihovi poprečni ponesne vode po mesecih v obdobju 1972—1975. Ponesne kot na sliki 21, °NT — nemške trdotne stopinje.

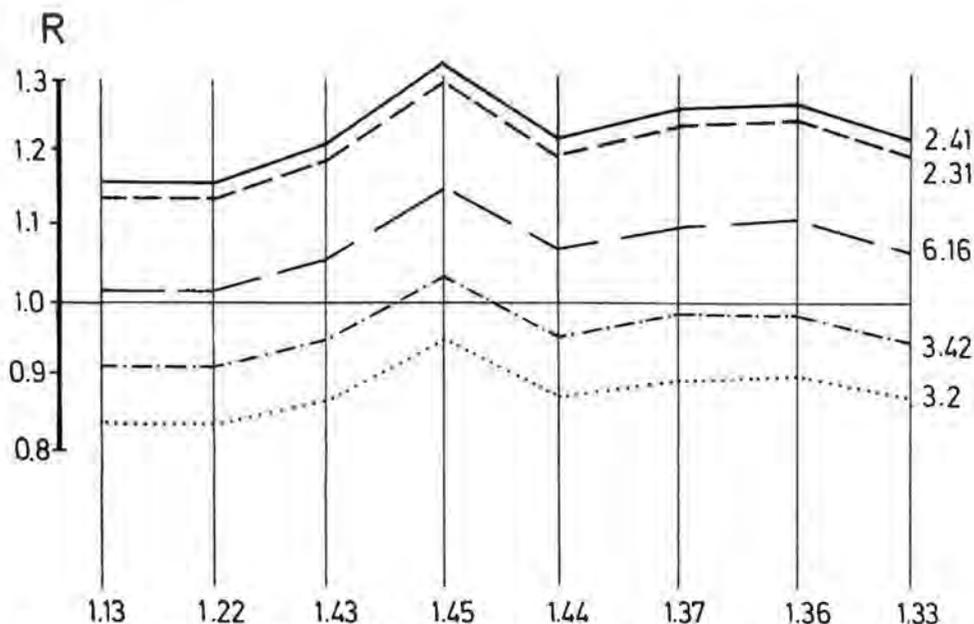


Fig. 24: Verhältnis der Gesamthärten (R) zwischen ausgewählten Schwinden und Quellen im Zeitabschnitt 1972—1975. Kennzeichen für Ponore und Quellen siehe Fig. 20—23.

Sl. 24: Razmerje totalnih trdot vode (R) med izbranimi ponori ter izviri v obdobju 1972—1975. Oznake izvirov in ponorov kot na prejšnji slikah.

Da die Verbindungen zwischen dem Schwinden- und dem Quellwasser der Ljubljana aufgrund der monatlichen Abweichungen der Ca- und Mg-Härten nicht erkannt werden konnte, wurde versucht, dies mit dem Verhältnis der Gesamthärten der Wasser für alle analysierten zu erreichen (Fig. 24). Die Durchschnittswerte der Gesamthärten sind in der Tabelle 8 angegeben.

Tabelle 8: Durchschnittswerte der Gesamthärte bei den Schwinden und Quellen.

Schwinde	°NT	Quelle	°NT
6.16	11,4	1.13	11,3
3.42	10,3	1.22	11,3
3.1	9,5	1.43	10,8
2.41	13,1	1.45	9,9
2.31	12,9	1.44	10,7
		1.37	10,4
		1.36	10,3
		1.32	10,7

Die größte Ähnlichkeit zeigt sich zwischen den Wässern des Sees von Cerknica (Schwinde 6.16) und den Quellwässern 1.13 und 1.22. Diese Ähnlichkeit nimmt gegen die Quellen 1.4 und 1.3 ab, wo sich dagegen eine größere Ähnlichkeit mit dem Wasser der Schwinde 3.42 zeigt. Die Wässer der Schwinden 2.41 und 2.31 weisen auch bei diesem Vergleich nicht auf eine Verbindung mit den Quellen bei Vrhnika hin. Ähnliche Ergebnisse sind mittels eines Vergleiches der bei mittlerem und mittelniedrigem Wasserstand entnommenen Proben erzielt worden.

Beim Vergleich der durchschnittlichen Gesamthärten des Schwinden- und Quellwassers in den Jahren 1972 bis 1975 kommt die Ähnlichkeit der Quellwasser von 1.1 mit dem Schwindenwasser 6.16 am besten zum Ausdruck. Der Einfluß dieses Wassers ist noch bei der Quelle 1.43, welche die konstantesten Härten besitzt, zu bemerken. Vielleicht handelt es sich hier um einen geschlossenen Wasserlauf in einem einheitlichen unterirdischen Kanal, in den nur wenig Wasser aus den benachbarten, noch nicht ausgearbeiteten Wasserwegen zufließt.

Unter den gemessenen physikalisch-chemischen Parametern des Ljubljanka-Karstflusses haben die besten Ergebnisse der Vergleich der Gesamthärten, schlechtere aber der Vergleich des Kalzium- und Magnesiumgehaltes und der elektrischen Leitfähigkeit erbracht. Die Ergebnisse der einzelnen Serien von Proben oder die durchschnittlichen Werte mehrerer Serien eines längeren Zeitabschnittes sind untereinander besser vergleichbar als die durchschnittlichen Monatswerte der gemessenen Parameter.

B) Die chemische Zusammensetzung und Verunreinigung der Ponor- und Quellwässer

Die Ergebnisse der chemischen Analysen werden von zwei Gesichtspunkten aus erörtert. Der erste Gesichtspunkt ist die Zusammensetzung der Karstwässer mit Rücksicht auf den Gehalt der Kationen Ca, Mg, Na und K und der Anionen HCO_3 , SO_4 , Cl und NO_3 . Dieser Gehalt ist vor allem von der Zusammensetzung des Gesteins, auf dem das Wasser fließt, und nur ausnahmsweise von der Verunreinigung abhängig. Der zweite Gesichtspunkt ist die Zusammensetzung der Karstwässer mit Rücksicht auf den Gehalt an Stickstoffverbindungen, Phosphaten, Detergentien, an suspendiertem Material und auf den biochemischen Bedarf von Sauerstoff und koliformen Bakterien, was alles auf die Verunreinigung hinweist. J. MISEREZ hat das Verhältnis zwischen den Kationen Ca, Mg, Na und K in Einheiten mmol/l eingehend beschrieben (siehe 2.2.5.). Der Jahresgang aller im Wasser gelösten Salze, des Kalziums und Magnesiums ist in diesem Bericht beschrieben. Es sei noch auf Fig. 25 verwiesen, wo die Durchschnittswerte der Gesamt-Ca- und -Mg-Härte für den Zeitabschnitt 1972 bis 1975 angegeben sind. Beim Vergleich beider Beiträge muß beachtet werden, daß 1° NT den 0,178 mmol oder 0,356 mval Ca bzw. Mg entspricht. Aus beiden Beiträgen ist sonst ersichtlich, daß die Karstwässer des untersuchten Gebietes sehr wenig Natrium und Kalium, dafür aber viel mehr Kalzium und Magnesium besitzen.

Bikarbonat trägt am meisten, Sulphat, Chlorid und Nitrat aber wenig zum Gehalt an Anionen bei. Die Jahresschwankungen des Bikarbonats verlaufen parallel mit den Schwankungen der gesamten Mineralisierung. Der Gehalt von den übrigen Anionen verändert sich, doch kann schwerlich gesagt werden, daß diese Veränderungen von den Jahreszeiten abhängig sind. Sie hängen vom Wasserstand, noch mehr aber von den Witterungsverhältnissen und von der Verunreinigung ab.

Die durchschnittlichen Kationen- und Anionenwerte sind für einige Ponore und Quellen in der Tabelle 2 angegeben. Diese Werte sind für Ca und Mg an einigen Entnahmestellen etwas höher als die von J. MISEREZ angegebenen. Der Grund hierfür dürfte wahrscheinlich in der kleineren Probenzahl liegen (nur die Serien 10 bis 20), die in Neuchâtel analysiert worden sind, und in der Tatsache, daß gerade in diesen Serien der Gehalt an Ca und Mg keine hohen Werte erreicht hat.

3. SUWT 1976

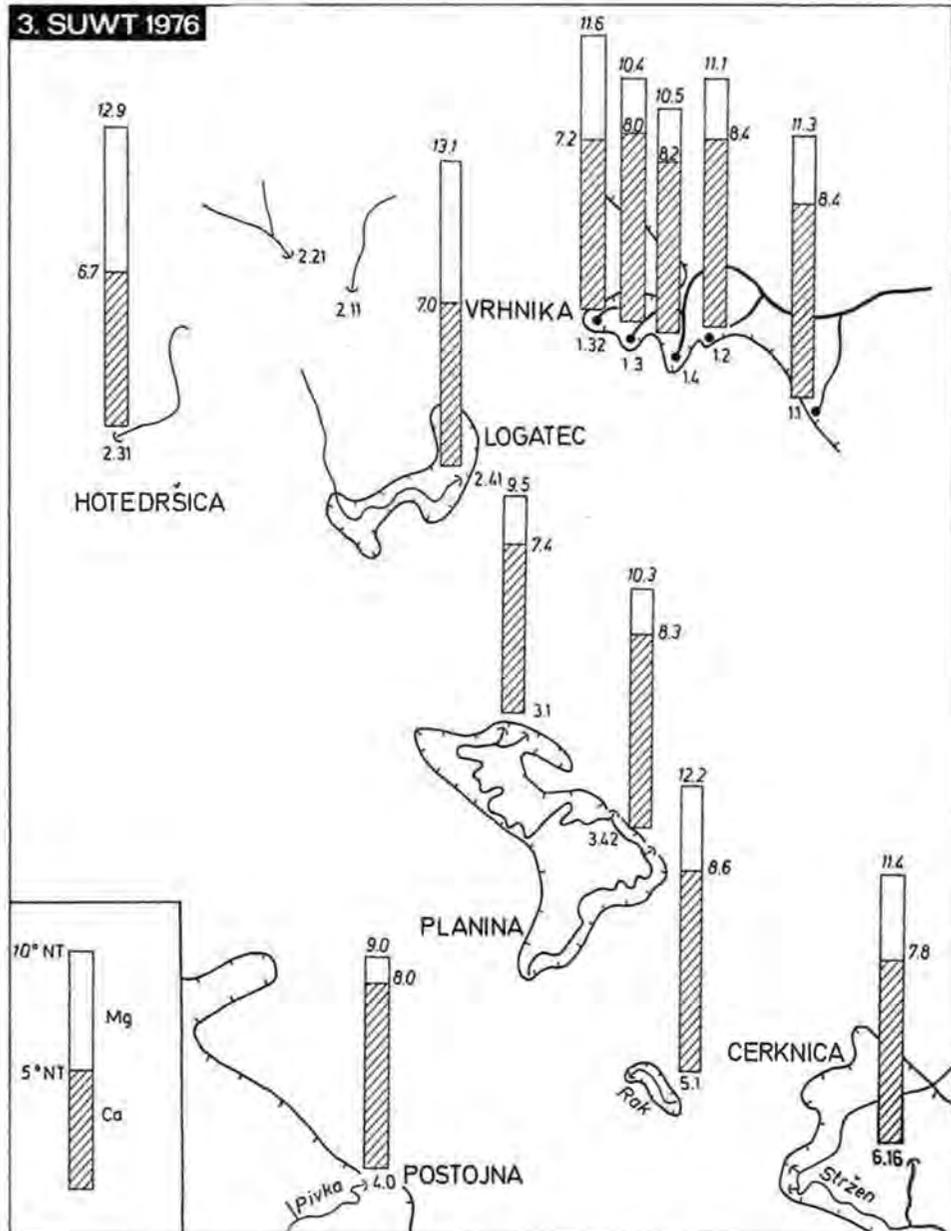


Fig. 25: Durchschnittliche Gesamthärte, Kalcium- ($\text{Ca}^{\circ}\text{NT}$) und Magnesiumhärte ($\text{Mg}^{\circ}\text{NT}$) des Einzugsgebietes der Ljubljanica im Zeitabschnitt 1972—1975.

Sl. 25: Poprečne totalne trdotne, kalcijeve (Ca) in magnezijeve trdote (Mg) v kraškem porečju Ljubljanice za obdobje 1972—1975. °NT — nemške trdotne stopinje.

Die Quellen sind nach den Ergebnissen der chemischen Analysen in mehrere Gruppen eingeteilt worden, welche vermutlich von den gleichen Ponoren gespeist werden. In diesen Gruppen unterscheiden sich die Durchschnittswerte von SO_4 , Cl , NO_3 , K und KNa bis 0,01 mval, die Durchschnittswerte von Ca , Mg und HCO_3 aber höchstens bis 0,04 mval/l (in der Mehrzahl der Fälle bis 0,02 mval/l). Die mittleren Werte der Analysen der einzelnen Quellen für die Quellengruppen sind in Tabelle 9 angegeben. Die Unterschiede in den Analysen zwischen den Quellen der einzelnen Gruppe bewegen sich hauptsächlich in den Grenzen der Genauigkeitsfehler der Analysen.

Die chemische Zusammensetzung der Quellwässer ist auch zwischen den Quellengruppen sehr ähnlich, da ja überall der Gehalt (3 bis 4 Teile) an Kalzium das Magnesium (1 Teil) überwiegt. Die Quellen 1. 14, 1. 32 und 1. 34 aber, bei welchen das Verhältnis $\text{Ca} : \text{Mg} = 1,3-1,9 : 1$ beträgt, scheiden natürlich aus.

Die Schwindenwässer unterscheiden sich mehr. Das Verhältnis der Durchschnittswerte $\text{Ca} : \text{Mg}$ beträgt im Polje von Planina fast 4 : 1, bei der Schwinde 6.16 im Polje von Cerknica 2,1 : 1, in den Bächen Hotenka und Logaščica 1,1 : 1, in der Petkovščica 1,6 : 1 und in der Rovtarica 2,1 : 1. Sowohl in den Quellen als auch in den Schwinden überwiegt Bikarbonat über die übrigen Stoffe.

Tabelle 9: Durchschnittliche Kationen- und Anionenwerte der Ponore und Quellwässer.

Ort der Probennahme	KATIONEN (mval/l)					ANIONEN (mval/l)				
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ Kat.	HCO ₃ [']	SO ₄ [']	Cl [']	NO ₃ [']	Σ An.
1.14	2,42	1,89	0,04	0,01	4,36	3,95	0,44	0,07	0,06	4,52
1.11, 1.12, 1.13	2,99	1,03	0,06	0,02	4,10	3,80	0,32	0,09	0,05	4,26
1.22	3,00	0,99	0,06	0,02	4,07	3,75	0,32	0,09	0,04	4,20
1.21	2,94	0,88	0,07	0,02	3,91	3,60	0,34	0,10	0,04	4,08
1.42, 1.43	2,98	0,86	0,07	0,02	3,93	3,60	0,34	0,10	0,04	4,08
1.45	2,83	0,69	0,08	0,02	3,62	3,36	0,36	0,13	0,04	3,89
1.44	2,85	0,68	0,12	0,02	3,67	3,08	0,60	0,10	0,05	3,83
1.37	2,83	0,86	0,07	0,02	3,78	3,47	0,27	0,11	0,06	3,91
1.36	2,84	0,80	0,08	0,02	3,74	3,31	0,39	0,12	0,06	3,88
1.32	2,53	1,31	0,06	0,02	3,92	3,48	0,34	0,09	0,05	3,96
1.34	2,65	1,77	0,07	0,04	4,53	4,09	0,37	0,10	0,09	4,65
2.21	2,65	1,19	0,07	0,02	3,93	2,75	0,98	0,09	0,04	3,86
2.11	2,14	1,38	0,06	0,02	3,60	3,30	0,28	0,09	0,03	3,70
2.3	2,37	2,20	0,05	0,02	4,64	4,40	0,27	0,08	0,03	4,78
2.41	2,48	2,19	0,08	0,02	4,77	4,50	0,25	0,12	0,03	4,90
3.1	2,63	0,75	0,08	0,02	3,48	3,20	0,27	0,13	0,03	3,63
3.41	2,78	0,75	0,07	0,02	3,62	3,35	0,24	0,09	0,05	3,73
3.42	2,94	0,74	0,07	0,02	3,77	3,47	0,27	0,09	0,04	3,87
6.16	2,77	1,29	0,05	0,02	4,13	3,80	0,25	0,09	0,02	4,16

Die während der Untersuchungen vorgenommenen Analysen von zehn Serien von Proben zeigen, daß die Verunreinigung der Karstwässer sehr von den hydrologischen und meteorologischen Verhältnissen abhängig ist. Die Wässer sind beim mittleren Wasserstand im Zeitabschnitt mit mäßigen Niederschlägen und im Zeitabschnitt ohne Niederschläge chemisch so wenig verunreinigt, daß sie nach der geltenden Klassifikation leicht in die zweite Qualitätsklasse eingereiht werden können, natürlich aufgrund der Beurteilung des chemischen Bildes (die bakteriologischen Analysen liefern ein wesentlich schlechteres Bild). Hingegen ist die Verunreinigung bei Niedrigwasser, noch mehr aber bei Hochwässern, die starken Niederschlägen nach langen Trockenperioden folgen (zumeist im Herbst), außerordentlich groß.

Alle Schwinden und Quellen des Ljubljana-Einzugsgebietes haben häufig einen ziemlich hohen Gehalt an Ammoniak: die Schwindenwässer zeigen 0,03 bis 0,27, die Quellwässer aber nur 0,01 bis 0,15 mg NH_4/l . Der Ammoniakgehalt nimmt bei Niedrigwasser besonders in den wärmeren Monaten sehr zu. Ein derartiger Fall ist bei den Wasserproben im Mai 1973 festgestellt worden. In den Quellen 1. 11 sind 2,8 mg/l, in 1. 12 bis 3,9 mg/l, in 1. 13 bis 2,1 mg/l, in der Quelle 1. 42 bis 2,72 mg/l gemessen worden. Der Ammoniakgehalt hat auch in allen übrigen Quellen bei Vrhnika 1 mg/l überschritten. In den Wasserproben aus den Poljen von Planina, Cerknica und Rakov Škocjan waren 0,6 bis 0,8 mg/l Ammoniak vorhanden, in den Wässern von Rovte und Logatec auch über 1 mg/l.

In den Wasserproben vom September 1973, als einer langen Trockenperiode äußerst starke Niederschläge folgten, sind die maximalen Gehalte an Nitrat und Sulphat gemessen worden. Wir wollen einige ausnahmsweise hohe Werte an Nitrat anführen: Quelle 1. 21 hatte 0,21 mg/l, Quelle 1. 36 bis 1,17 mg/l, Quelle 1. 34 bis 1,1 mg/l, die Wässer bei den Schwinden 2. 41 und 3. 41 aber 6,75 mg/l bzw. 1,63 mg/l NO_2 (die für Trinkwasser erlaubte Grenze beträgt 0,01 mg/ NO_2). Maximale Werte an Nitrat (0,02 bis 0,07 mg/l) waren auch in allen anderen Quellen und Schwinden zur Zeit der Probennahme vorhanden, wenn auch etwas niedrigere als bei den oben erwähnten Entnahmestellen.

In den Quellen dieser Serie von Proben war auch der Gehalt an Nitraten der höchste und zwar 4,8 bis 16,7 mg/l NO_3 ; nicht so hohe maximale Nitratgehalte treten bei den verschiedenen Probenahmen in den Schwinden auf.

Die Sulphatgehalte aber waren (bei der Probennahme im September 1973) sehr hoch: an den Quellen zwischen 33,6 bis 48,6 mg/l (weniger nur bei den Quellen 1. 32 bis 18 mit 7 mg/l und 1. 37 mit 14,0 mg/l), an den Schwinden aber nur 13,0 bis 22,9 mg/l SO_4 . Bei den übrigen Probenserien betrug der Sulfatgehalt 2,0 bis 16,8 mg/l. Eine Ausnahme ist die Schwinde 2. 21, wo die Erhöhung des Wertes häufig auftritt, zumeist über 30 mg/l, der höchste Wert erreichte sogar 93,6 mg/l SO_4 . Ebenso besitzen einen höheren Sulfatgehalt die Quellen 1. 44 und 1. 45, wenn in ihnen das Wasser steht.

Die Erhöhung des Phosphatgehaltes weist nicht auf die Abhängigkeit vom Wasserstand hin. Der Phosphatgehalt im See von Cerknica ist verhältnismäßig niedrig (0,01 bis 0,02 mg/l), am höchsten ist er im Bach Logaščica (0,04 bis 0,33 mg/l PO_4). In den übrigen Schwinden und Quellen bewegt sich der Phosphatgehalt von 0,02 bis 0,08 mg/l.

Ebenso unabhängig vom Wasserstand verändert sich der Gehalt an Detergentien, der zwischen 0,01 und 0,05 mg/l TBS beträgt. Der Gehalt schwankt in allen Schwinden und Quellen, und von keiner Entnahmestelle kann gesagt werden, daß sie nie einen erhöhten Gehalt an Detergentien besaß.

Der Sauerstoffgehalt war an allen Entnahmestellen genügend hoch, die Sättigung (Saturation) fiel nie unter 85%. Der chemische und biochemische Bedarf nach Sauerstoff war zumeist niedrig, ausgenommen die Wasserläufe 6. 45, 2. 41 und 4. 0, die mit Abfallwasser belastet sind, ferner bei stehenden Wässern zur Zeit der Dürre (6. 0, 3. 1, 1. 45 und 1. 4). Der Verbrauch von Sauerstoff ist zeitweise erhöht in der Quelle 1. 32 (chemisch bis 20,1 mg/l KMnO_4 und biochemisch bis 6,5 mg/l O_2) und in der Quelle 1. 34 (chemisch bis 15,3 mg/l KMnO_4 und biochemisch 5,1 mg/l O_2). In einigen Proben der Quellen 1. 21 und 1. 22 ist ein erhöhter Bedarf an Sauerstoff (bis 4,1 mg O_2 /l) festgestellt worden, gewöhnlich bei niedrigen oder hohen Wasserständen. Die Schwinde 6. 16 besitzt einen regelmäßig etwas höheren Bedarf nach Sauerstoff (10 bis 19,3 mg/l KMnO_4), während der biochemische Bedarf niedrig ist (0,4 bis 1,5 mg/l O_2).

Bei der Beurteilung der Wasserqualität muß auch die Anwesenheit der koliformen Bakterien berücksichtigt werden. In den Serien, wo die Proben nicht für eine vollkommene bakteriologische Analyse entnommen wurden, wurde nur der qualitative Test getätigt. Man kann von allen Entnahmestellen behaupten, daß auf dem gesamten Untersuchungsgebiet nicht eine einzige Entnahmestelle vorhanden ist, die in zwei Serien der Wasserproben ein negatives Resultat bezüglich der koliformen Bakterien ergeben hätte.

Die kurze Zusammenfassung und Beurteilung der Wasserqualität wäre die folgende: Die Karstwässer sind in den Zeitabschnitten ohne größere Niederschläge und bei mittleren, mittleren Hoch- und mittleren Niederwasserständen chemisch nicht verunreinigt. Bei niedrigem Wasserstand wächst der Ammoniakgehalt und zum Teil der chemische und biochemische Bedarf nach Sauerstoff. Bei hohem Wasserstand erhöht sich der Gehalt an Nitrit, Nitrat, Sulfat und ebenso der chemische Bedarf nach Sauerstoff.

C) Die Bestimmung des natürlichen Hintergrundes der Chloride, des Kaliums und der organischen Fluoreszenzfarbstoffe

Der natürliche Hintergrund („background“) für Kalium und Chlorid war aus neun kompletten, vor dem Markierungsversuch durchgeführten Analysen und aus den Analysen der Chloride in allen Proben der 25. bis zur 30. Serie bestimmt worden. Bei den angegebenen Grenzen des Gehaltes sind nur die Einspeisestellen und die beobachteten Quellen berücksichtigt worden.

Die minimalen Konzentrationen des Chlorids und Kaliums sind überall im Dezember 1974 bei mittlerem Wasserstand ohne größere Niederschläge gemessen worden. Der Gehalt an Chlorid (1,6 bis 2,1 mg/l) und Kalium (0,1 bis 0,4 mg/l) war an allen Entnahmestellen der Proben ziemlich ähnlich.

Die überall vorhandenen maximalen Werte sind nicht an allen Stellen gleichzeitig aufgetreten, sie wurden entweder während der langen trockenen Perioden oder nach starken Niederschlägen, welche der Trockenperiode folgten, gemessen. In den maximalen Werten (Chlorid 4,1 bis 10,7 mg/l, Kalium 0,8 bis 1,9 mg/l) sind keine größeren Unterschiede zwischen den Schwinden und den Quellen vorhanden.

Der höchste Kaliumgehalt (3,5 mg/l), gemessen im Mai 1973 in der Quelle 1. 34 (wahrscheinlich als Folge des Kunstdüngers), ist nicht berücksichtigt worden.

Der „background“ von Chlorid und Kalium ist bei ständigen Wetterverhältnissen ziemlich gleichmäßig, bei stärkeren Niederschlägen vergrößern sich aber die Schwankungen des Chlorid- und Kaliumgehaltes.

Die Proben für die Bestimmung des natürlichen Hintergrundes der Farbstoffe Uranin, Eosin, Amidorhodamin, Rhodamin und Tinopal wurden im Oktober 1974 für die ersten vier Markierungsmittel, im März, April und Mai 1975 für alle fünf Markierungsmittel entnommen. Alle in der Tabelle 9 angeführten Proben sind gemessen worden. Eosin, Amidorhodamin und Rhodamin sind in keiner der analysierten Proben nachgewiesen worden. Uranin war aber in folgenden Proben vorhanden:

1. 45 (Probenahme Oktober 1974)	— 0,01 mg/m ³
1. 13 und 1. 43 (Probenahme Oktober 1974)	— 0,002 mg/m ³
6. 08 (Probenahme März 1975)	— 0,02 mg/m ³
2. 11 (Probenahme Mai 1975)	— 0,05 mg/m ³
2. 21 (Probenahme Mai 1975)	— 0,39 mg/m ³
3. 9 (Probenahme Mai 1975)	— 0,08 mg/m ³

Die neuerdings vier Tage später entnommenen Proben bei 2. 11 und 2. 21 enthielten kein Uranin mehr.

Tinopal besitzt unter den organischen Farbstoffen den größten „background“. Der größte Tinopalgehalt im Wasser ist im März 1975 gemessen worden, als die Proben bei außerordentlich starken, einer langen Trockenperiode folgenden Niederschlägen entnommen worden sind. Der Gehalt war in allen Schwinden und Quellen sehr hoch, 0,5 bis 1,15 mg/m³. Nur die Proben von 1. 46, 5. 2, 5. 3 und 6. 08 besaßen weniger als 0,01 mg/m³ Tinopal. Im Monat April 1975 sind die Proben bei ziemlich hohem Wasserstand, jedoch ohne stärkere Niederschläge entnommen worden; die gemessenen Tinopalwerte waren niedrig: 0,001 bis 0,02 mg/m³. Die Proben vom Mai 1975, knapp vor der Einspeisung, zeigten 0,001 bis 0,08 mg/m³ Tinopalgehalt. Auch Säckchen mit Aktivkohle sind zweimal eine Woche lang in die Quellen eingesetzt worden mit dem Ziel, den „background“ der Fluoreszenzfarbstoffe zu bestimmen. Die Messungen hat F. BAUER vorgenommen, die Ergebnisse sind im Kapitel 2. 3. 3. 2. beschrieben.

2. 2. 5. Ergänzende Bemerkungen zur Geochemie der Wässer des Karstsystems der Ljubljana (J.-J. MISEREZ)

Vorbemerkung

Eine umfassende Beschreibung der Hydrochemie des Gebietes ist im Kapitel 2. 2. 4. gegeben. Der hier vorgelegte Beitrag ist nur eine bescheidene Ergänzung. Es soll gezeigt werden, was eine analytische Auswertung ergeben kann, die sich praktisch nur der wichtigsten Kationen bedient, bei einer nur monatlichen Probenahme durch ein Jahr. Ausgenommen einige ergänzende Werte (pH, Temperatur, SiO₂ und Härte), die Aufzeichnungen jugoslawischer Kollegen entstammen, wurden alle in diesem Bericht bearbeiteten chemischen Messungen in Neuchâtel durchgeführt. Im allgemeinen handelt es sich um Parameter, die mindestens auch noch einen Monat nach der Probenahme untersucht werden können, z. B. Ca, Mg, Sr, Na, K (gemessen mittels Atomabsorption Spektrophotometrie) und organische Humusstoffe (sichtbar im UV-Spektrophotometer).

Allgemeine Hydrogeochemie

Die Mineralisation der Karstwässer ist meistens gering und variiert sowohl zeitlich als auch dem Umfang nach nur wenig, aber gerade die Grenzen dieser Variationen sind von wissenschaftlichem Interesse. Im besonderen waren

es M. BAKALOWICZ und A. AMINOT (1974), die bewiesen, daß kurz vor Hochwässern der Chemismus aufhört „alltäglich“ zu sein, während J.-J. MISEREZ (1973, 1975) und M. POCHON (1974) die Bedeutung des Bodens (der Verwitterungsschwarte) und des Kalkstein-Boden-Kontaktes für chemische Veränderungen des Wassers betonten. Für diese Untersuchungen sind allerdings kontinuierliche Messungen oder im Boden installierte Probensammler notwendig.

Die Wässer des Systems der Ljubljana unterliegen den allgemeinen Regeln, ausgenommen was das Magnesium betrifft. Die Mg-Variabilität hängt mit dem Wechsel von Kalken und Dolomitgesteinen zusammen. Die in Neuchâtel durchgeführten Analysen erfolgten an monatlich über ein Jahr hin gezogenen Proben, entnommen an ober- und unterirdischen Gerinnen, Ponoren und Quellen. Im folgenden werden die Serien 10 (Juni 1973) bis 20 (Juli 1974) betrachtet. Fig. 26 zeigt die Verteilung der jährlichen Variationen von Kalzium und Magnesium. Um die generelle Übersicht zu erleichtern und zu vereinfachen, wurden die von den Mittelwerten und Standardabweichungen abgeleiteten Verteilungen (im allgemeinen von elf Proben) aufgetragen, obwohl das Auftreten der Häufigkeiten manchmal dem „log“-Typus entspricht. Wässer, die Kontakt mit Dolomiten haben, zeichnen sich klar ab (z. B. 6. 12, 6. 26, 6. 23, 6. 45), genauso wie jene, die hauptsächlich aus Kalken oder mergeligen Kalken kommen (4. 0: Mergel oder kalkige Mergel im eozänen Flysch).

Fig. 27 zeigt die Natrium- und Kaliumkonzentrationen und ihre Variationen. Im allgemeinen sind die Streuungen sehr beschränkt, doch besteht ein Vorherrschen des Natriums über das Kalium, wie schon von J.-J. MISEREZ (1973) für den Jura und von N. CHRISTOPHER (1975) in Derbyshire festgestellt wurde. Eine zunehmende Konzentration von Natrium und Kalium zusammen mit einer Vergrößerung ihrer Standardabweichungen ist immer ein Zeichen von Verunreinigung (4. 0). Die Zunahme von Natrium allein ist hingegen ein Zeichen der Existenz von Evaporiten (6. 26 und 1. 44), und in diesem Fall verhält sich Strontium immer dem Natrium gleichlaufend. Die Verteilungen von Na und Sr können daher binomisch sein, was jedoch in der graphischen Darstellung nicht berücksichtigt wurde.

Unserer Erfahrung entsprechend kann gelegentlich der Fall auftreten, daß sich das Mittel des Kaliumgehaltes jenem des Natriums annähert, dies ohne Zunahme von Strontium. Im Untersuchungsgebiet tritt dieser Fall nicht sehr klar auf (3. 41, 2. 11). Solche Fälle können bis zu einer Umkehr des Na/K-Verhältnisses führen, verursacht entweder durch organische Substanzen oder durch Tonsuspensionen (Illite), an die Kalium stärker gebunden ist als Natrium.

Im allgemeinen ergeben die skizzierten chemischen Züge einen ersten Indikator betreffend die in einen Ponor versinkenden Wässer, aber diese natürlichen Tracer unterliegen Störungen von seiten des Gesteins und des Grades der Sättigung in bezug auf ihre korrespondierenden Minerale.

Die Physische Chemie und das Gleichgewicht von Lösungen in Beziehung zu den Mineralen

PCO₂

Die nach der Methode von H. ROQUES (1963) errechneten Gleichgewichts-CO₂-Partialdrücke liegen im gesamten in Fig. 28 dargestellten pH-Härte-Diagramm zwischen $1,9 \cdot 10^{-3}$ atm (2. 41 am 24. Oktober 1972) und $1,2 \cdot 10^{-2}$ atm (8. 21 am 2. Oktober 1972).

Die Anzahl der Proben und der erfaßte Zeitraum scheinen statistisch ausreichend, um anzunehmen, daß es sich bei diesen beiden Werten um die Extreme

3. SUWT 1976

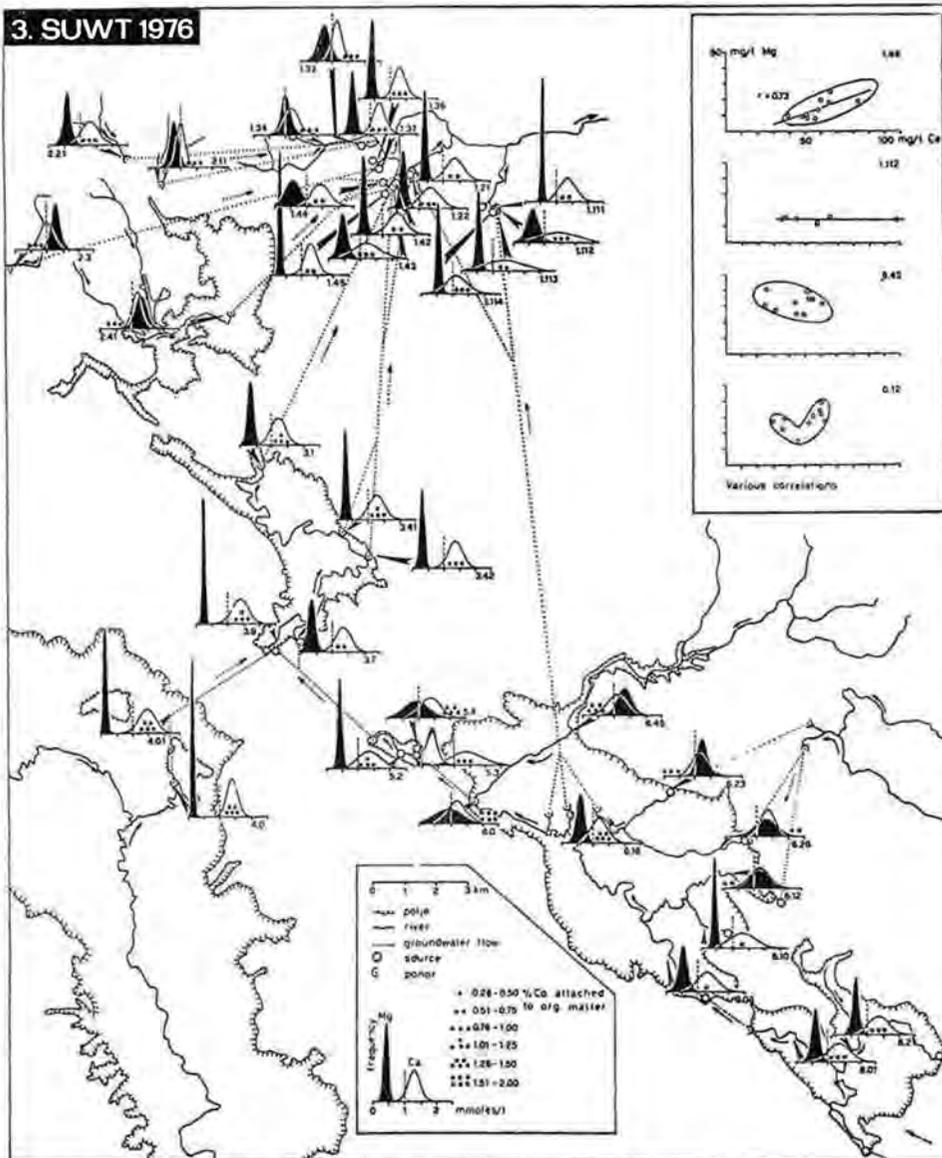


Fig. 26: Verteilung der jährlichen Variationen von Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen in den Wässern des Einzugsgebietes der Ljubljana auf der Basis monatlicher Proben von Juni 1973 bis Juni 1974.

Sl. 26: Hidrogeokemična karta kraškega sistema Ljubljane. Normalna razdelitev in nekatere korelacije kalcijevih in magnezijevih koncentracij, odstotek kalcija vezanega na organski snovi (letno povprečje) na osnovi vzorčevanj med junijem 1973 in julijem 1974. Oznake izvirov in ponorov kot pri drugih.

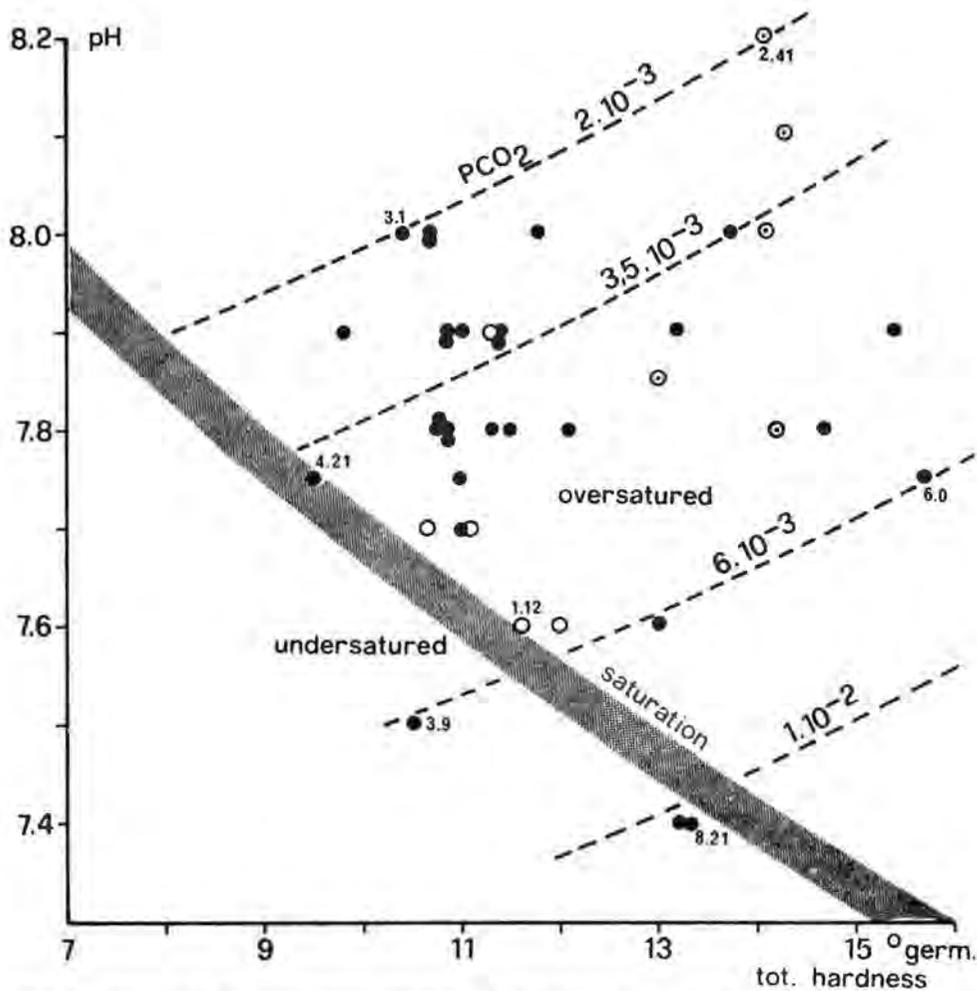


Fig. 28: Die Lage verschiedener Proben in Relation zur Gleichgewichtskurve von Calcit bei 10° C. Die Gleichgewichtskurve hat nur Partialdrücke in Relation zum PCO_2 des Gleichgewichtes, berechnet für jede Probe, gezeichnet. Schwarze Punkte = Auswahl verschiedener Lagen von Probenserien, gezogen zwischen 26. 9. und 2. 10. 1972; leere Kreise = Lage von 1.12 aus verschiedenen Proben, entnommen zwischen 30. 8. 1972 und 1. 2. 1973; Kreise und Punkt = Lage von 2.41 aus verschiedenen Proben, gezogen zwischen 30. 8. 1972 und 1. 2. 1973.

Sl. 28: Situacija različnih vzorcev glede na ravnotežno krivuljo kalcita pri 10° C. Ravnotežna krivulja je samo za orientacijo. Na drugi strani pa so izobare parcialnih pritiskov CO_2 za vse vzorce. Črno so označeni vzorci serij med 26. 9. in 2. 10. 1972. Belo so vzorci med 30. 8. 1972 in 1. 2. 1973. Belo s pikami so vzorci 30. 8. 1972 in 1. 2. 1973.

im Slowenischen Karst handelt. Variationen sind an den jährlichen Rhythmus des CO_2 in der Bodenluft und an die Höhenlage des ober- oder unterirdischen Kontaktbereiches gebunden. Es sei noch darauf hingewiesen, daß zwei identische Gleichgewichts- CO_2 -Partialdrücke von sehr verschiedenen Härte-pH-Verhältnissen definiert werden können, wobei sie in bezug zum Kalzit im nicht gesättigten, im Gleichgewichts- oder im übersättigten Bereich liegen können, was aus Fig. 28 klar zu ersehen ist (z. B. 3.9, 1.12 und 6.0 für $\text{PCO}_2 \sim 6 \cdot 10^{-3}$ Atmosphären).

Bezüglich der mittleren Höhe des Einzugsgebietes der Ljubljana sind die zwischen 10^{-3} und 10^{-2} atm liegenden PCO_2 -Werte gering im Vergleich mit anderen Karstgebieten Europas mit ähnlicher Höhenlage und Bedeckung. Die Drücke sind z. B. im Mittel geringer als im zentralen Faltenjura, trotz der hier höheren Lage der Becken und des weniger milden Klimas (J.-J. MISEREZ 1973). Vergleicht man die Werte mit den von H. ROQUES (1963) gegebenen Beispielen, so entsprechen die CO_2 -Partialdrücke des Ljubljana-Systems eher dem Gebirgskarst der Pyrenäen und Vercors. Die schwachen CO_2 -Partialdrücke der slowenischen Karstwässer sind, zumindest was die unterirdischen Wässer anbelangt, zweifellos bedingt durch die schnelle Infiltration überwiegend in Ponore und durch die geringe Tiefe des weniger aus Klüften als großlumigen Karströhren bestehenden Gewässernetzes, das zudem rasch durchflossen wird.

Lösungsgleichgewichte bezüglich Kalzit und Dolomit

Im ganzen Gebiet und während der verschiedenen Zeiten der Probennahme können die Wässer bezüglich des Kalzites aggressiv, stabil oder zur Ausfällung bereit sein, wobei letzterer Zustand der wichtigste und interessanteste ist. Die Lage der Stabilitätsgeraden nach TILLMAN (nach F. TROMBE, 1952) ist ähnlich jener in unserer Fig. 28. Bei Berechnungen nach der Methode von W. BACK (1963), durchgeführt von J.-J. MISEREZ (1973) kommt man zu mehr als 200% Sättigung bezüglich des Kalzites (6.45). Der Sättigungsindex in Beziehung zum Aragonit, berechnet nach der Methode von W. BACK et al. (1966), überschreitet in diesem Fall ebenfalls 100%. Was den Dolomit betrifft (Berechnung nach der Methode von W. BACK et al. 1966, J.-J. MISEREZ 1973), zeigen Proben der Entnahmestellen 6.45, 6.12 und 6.23 ebenfalls des öfteren eine Sättigung von mehr als 200%. Andererseits sind alle diese Wässer aggressiv gegen Nesquehonite ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Bezieht man sich auf Studienergebnisse in vitro (F. LIPPMANN 1973) oder in situ (H. E. USDOWSKI 1967), in beiden Fällen kommt man zu dem Resultat, daß, so wie im Karst des Jura (J.-J. MISEREZ 1973), die Ausfällung der Karbonate, wenn sie eintritt, in Form von Kalzit mit Magnesium im Kristallgitter vor sich geht, was die Bildung magnesitischen Kalzits bedeutet, zu schließen etwa aus den Analysen von Proben aus 1.44 (positive Ca-Mg-Korrelation in Fig. 26).

Lösungsgleichgewichte in Beziehung zu Silikaten und Tonmineralien

Die Bereiche der theoretischen Existenz verschiedener Minerale der aluminosilikatischen Phase im Kontakt mit Wässern sind nach thermodynamischen Daten von R. M. GARRELS & C. L. CHRIST (1967), E. ERIKSSON & V. KHUNAKASEM (1966) und J. H. FETH et al. (1964) in Fig. 29 dargestellt. In Karstwässern sind Silikate, Natrium und Kalium Produkte bei Verwitterungsvorgängen von Tonphyllosilikaten (K-mica und Na-Montmorillonit), wobei zu bemerken ist, daß diese Spuren fast immer im Feld der Stabilität von Kaolinit enden, was auch

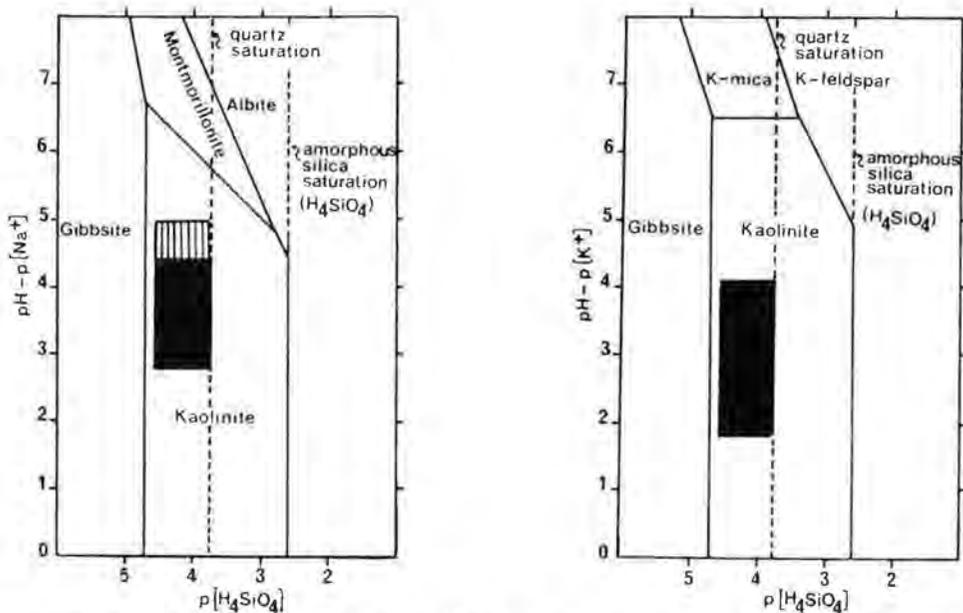


Fig. 29: Bereiche der theoretischen Existenz der alumino-silikatischen Phase im Kontakt mit Wässern nach thermodynamischen Daten von R. M. Garrels & C. L. Christ (1967), E. Eriksson & V. Khunakasem (1966) und J. H. Feth et al. (1964).

Sl. 29: Na_2O oziroma $K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ sistemi in položaj kraških voda Ljubljane. Črno — naravna polja, črtkano — onesnaževanje. $pX = -\log [X]$ z $[X]$ koncentracijo.

im Slovenischen Karst der Fall ist (= schwarz in Fig. 29). Nach einigen Autoren, insbesondere WOLLAST (1967, in R. A. BERNER 1971) ist die Neubildung von Kaolinit unter Bedingungen, wie sie im Karstwasser vorherrschen, durchaus plausibel, aber man vermutet, daß diese Synthese die totale Auflösung wesentlicher Stoffe in der Zeit des Überganges Phyllit—Kaolinit einschließt. Andererseits ist zu erwähnen, daß Wasser des Untersuchungsgebietes in bezug auf Quarz im Bereich der ungesättigten Wässer liegen, so daß die Neubildung dieses Minerals fast außer Zweifel steht.

Das Überwiegen von Natrium über Kalium kann durch eine größere Affinität des letzteren in bezug auf die Tonminerale erklärt werden. Unglücklicherweise stehen die speziellen hydrogeologischen Gegebenheiten des Slovenischen Karstes einer anderen Folge dieser Affinität entgegen, nämlich der merklichen Zunahme des Na/K-Verhältnisses beim Wechsel vom oberirdischen zum unterirdischen Fließen (N. CHRISTOFER 1975). Dieses Phänomen ist hier kaum zu verfolgen, wie z. B. die Betrachtung des unterirdischen Fließens von 6.16 zu 1.112 oder 2.3 und 2.41 zu 1.37 bezeugt. In diesem Karst ist die Tiefe des unterirdischen Wassernetzes nicht ausreichend, und die Zirkulation erfolgt zu schnell für eine echte Zunahme des Na/K-Verhältnisses vom Ponor zur Quelle.

Einfluß von Humussubstanzen auf die Mobilisation von Kalziumoxyd

Humussubstanzen sind von großer Bedeutung für die Mobilisation von Eisen, Kalium und (in geringerem Ausmaß) Kalzium (J.-J. MISEREZ 1973). Kalziumoxyd wird durch Huminsäuren angegriffen. Durch verbesserte Methoden von

R. DELBROUCK (1969) war es möglich zu zeigen, daß organische Lösungen aus einem Torfabbau ohne CO_2 -Gleichgewicht Kalzitpuder angreifen. Fig. 30 zeigt, daß das Lösungsphänomen auch bei Verwendung von Torf verschiedenster Herkunft abläuft. Es ist zweifellos möglich, daß ein identer Effekt mit Dolomit auftritt und schließlich auch mit Magnesium.

Bei den Jura-Wässern, die ihren Ursprung in Torflagen oder Wiesendrai-

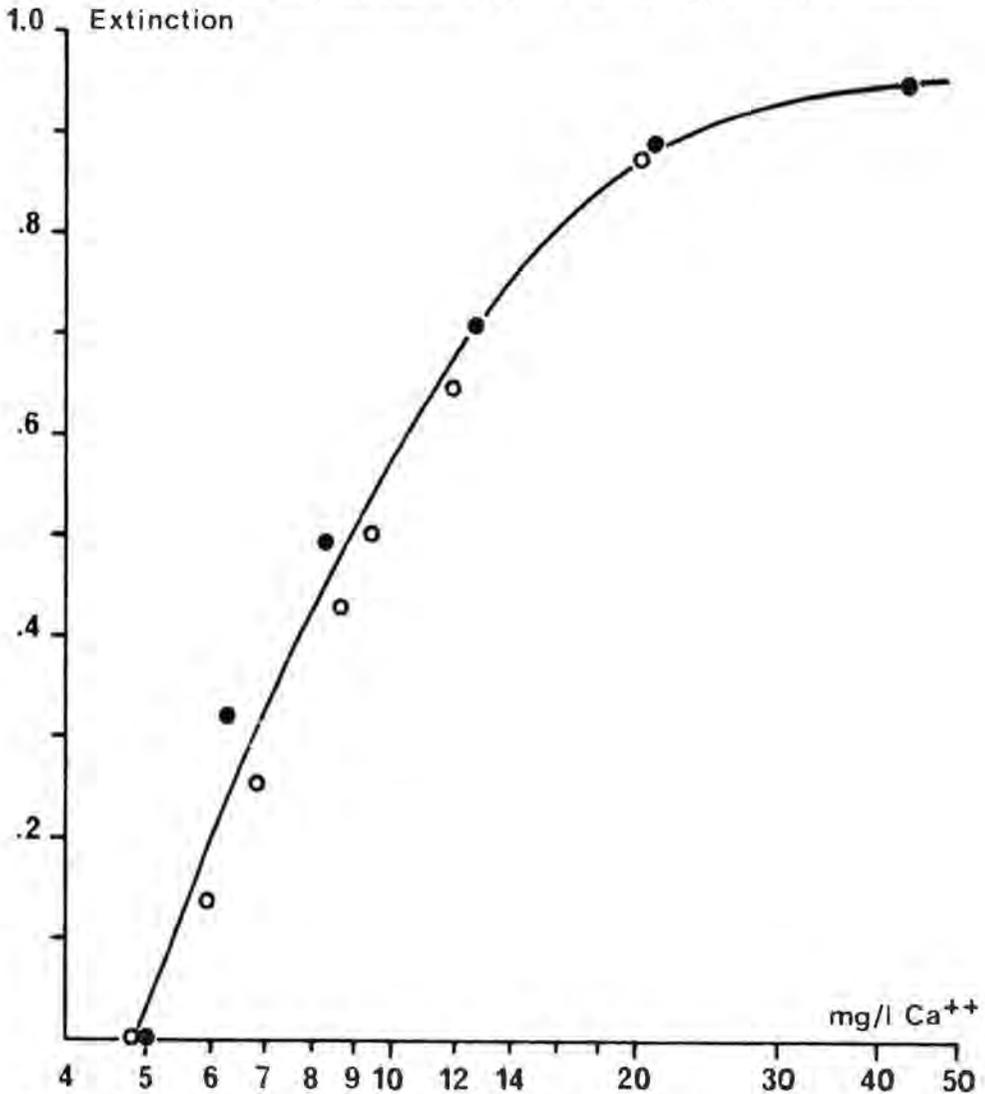


Fig. 30: Die Lösung von Kalzit durch organische Substanzen von Torfproben verschiedener Herkunft (Konzentrations-Lösungskurve).

Sl. 30: Razmerje v mol/l. humusna snov (ekstinkcija pri 270 nm) — kalcij za dve raztopini različnih šotnih ekstraktov. Po 24 urah stika s kalcitnim prahom v dušikovi atmosferi. Za vrednost dane in izmerjene ekstinkcije v vodi dobimo mg/l vezanega kalcija, od katerega moramo odšteti 4,9 mg/l slepe vrednosti.

nagen haben bzw. die Böden der undurchlässigen Poljenfüllungen durchfließen, gibt es Beispiele, bei denen 50%, ja ausnahmsweise bis 100% ihres Kalziumgehaltes auf Lösung ohne Mitwirkung von CO₂ beruhen. Im Karst des Flußsystems der Ljubljana ist dieser Anteil sicher wesentlich geringer, sowohl in den Poljen als auch in den unterirdischen Karstwässern, er wird im jährlichen Durchschnitt nicht über 2% hinausgehen. Ein leichtes Ansteigen zeigt sich zur Zeit verstärkter biologischer Entwicklung (Juni) und vermehrten Abfalles (September-Oktober). Die Reinhaltung der Wässer ist daher gerade in Karstgebieten von großer Wichtigkeit.

Jahreszeitliche Zyklen und episodische Variationen der chemischen Elemente

Es ist bekannt, daß die chemischen Konzentrationen der Karstwässer zeitlich einen zweifachen Einfluß aufweisen: den des jahreszeitlichen Klimarhythmus und den der Wasserführung. Verschiedene Autoren (z. B. in R. S. HARMON et al. 1972, E. T. SHUSTER et al. 1971) bestätigen, daß Kalzium und Bikarbonate im Karstwasser einen deutlichen jahreszeitlichen Zyklus aufweisen. In vielen Karstquellen werden diese Konzentrationszyklen im Zusammenhang mit Zyklen der mittleren täglichen Lufttemperatur der betroffenen Gebiete um Wochen, ja Monate verschoben (A. F. PITTY 1968, J.-J. MISEREZ 1975). Diese Variationen der Temperatur äußern ihren Einfluß auf den Chemismus der Wässer durch Modifikation des CO₂ in der Bodenluft und Einwirkung auf verwitterungsfähige Minerale, soweit diese nahe genug an der Erdoberfläche liegen.

Der jährliche Zyklus von Kalzium zeichnet sich relativ gut in Fig. 31 ab (1. 111 und 1. 32). Das Maximum zwischen August und Jänner würde klarer hervortreten, wenn die Monatsmittel aus einer mindestens wöchentlichen Probennahme resultieren würden. Bei Quelle 1. 32 scheint eine jahreszeitliche Zunahme von Magnesium aufzutreten, woraus auf Dolomite oder dolomitische Kalke im Einzugsgebiet zu schließen ist.

Es wurde gezeigt (J.-J. MISEREZ 1973), daß im Jura episodische chemische Variationen im Zusammenhang mit Schüttungsschwankungen von den jahreszeitlichen Variationen zu trennen sind. Es ist jedoch illusorisch, diesen Nachweis durch monatliche Messungen zu erbringen. Wir stimmen so mit anderen Autoren überein (M. BAKALOWICZ & A. AMINOT 1974), daß — ausgenommen spezielle geologische Verhältnisse (z. B. synklinale Becken des Jura) — es sehr schwierig ist, diese Konzentrationsänderungen mathematisch zu erfassen, wenn nicht kontinuierliche oder zumindest tägliche Messungen vorliegen. Für die Quellen auf Fig. 31 können daher weder für Natrium noch für Kalium Korrelationen zur Schüttung hergestellt werden.

Andererseits ist zu bemerken, daß die Korrelation zwischen Elementen derselben chemischen Gruppe gut bis ausgezeichnet ist, entweder innerhalb ein und derselben Quelle (Na und K in 1. 111 und 1. 32; Ca und Mg in 1. 32) oder auch zwischen zwei Quellen (Na und K; organische Substanzen). Die Gleichheit des Gehaltes organischer Substanzen in 1. 111 und 1. 32 ist auffallend.

Schlußfolgerungen

Der Chemismus der Karstwässer im Einzugsgebiet der Ljubljana hängt von folgenden Faktoren ab: Klima, geologischer Aufbau, geochemische Zusammensetzung von Böden und Gesteinen, hydrogeologische Verhältnisse, humangeographische Bedingungen und letzten Endes Thermodynamik und Kinetik wässriger Lösungen im Kontakt mit Mineralien. Monatliche Probennahmen

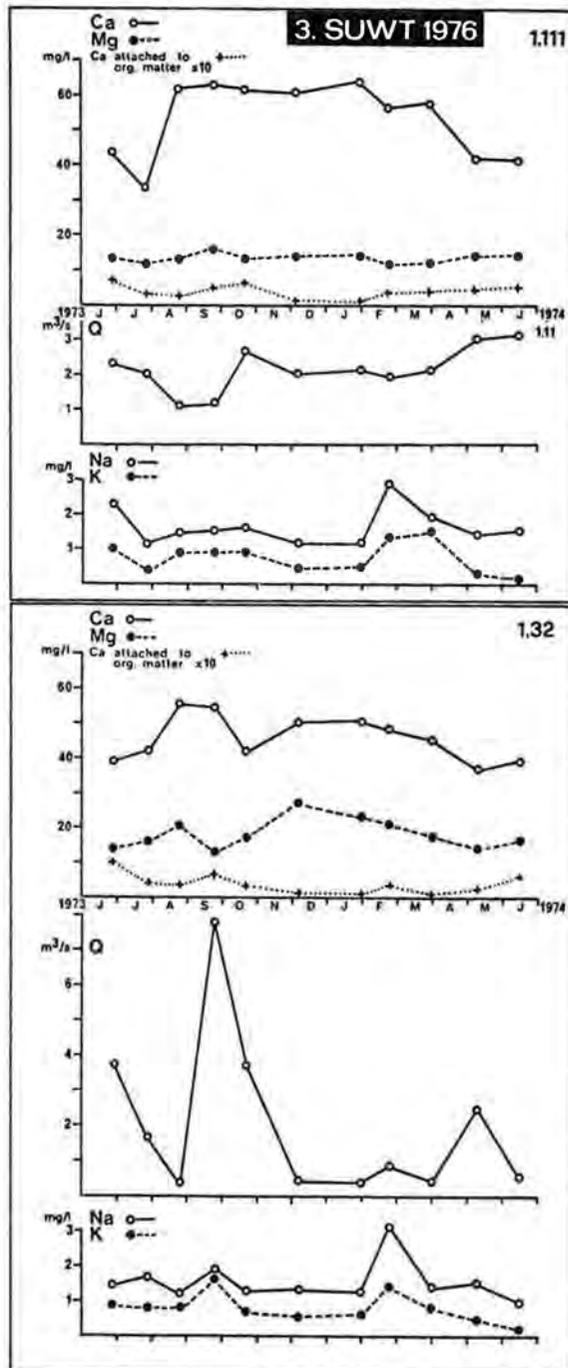


Fig. 31: Jahresgang (1974) des Ca-, Mg-, Na- und K-Gehaltes in 1.111 und 1.32.
 SL.31: Mesečne variacije različnih parametrov za dva kraška izvira Ljubljane.

genügen zur Charakterisierung größerer Variationen im Rahmen eines Jahres. Andererseits können episodische Veränderungen nur dann richtig erfaßt werden, wenn die Analysen in kürzeren Intervallen oder überhaupt kontinuierlich durchgeführt werden.

2. 2. 6. Ergebnisse von Messungen des Gehalts an Deuterium, Sauerstoff-18 und Tritium in Wasserproben des Untersuchungsgebietes im Zeitraum von 1972 bis 1975 (H. MOSER, V. RAJNER, D. RANK und W. STICHLER)

Einleitung

Im Rahmen der vorbereitenden Arbeiten für den Markierungsversuch im Einzugsgebiet der Ljubljana wurden monatlich Wasserproben bei etwa 45 Entnahmestellen des Untersuchungsgebietes (s. Tafel I) entnommen und auf ihren Gehalt an den Umweltisotopen Deuterium (D), Sauerstoff-18 (O-18) und Tritium (T) untersucht. Die D- und O-18-Analysen wurden im Institut für Radiohydro-metrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München, die T-Analysen im Geotechnischen Institut der Bundesversuchs- und Forschungs-anstalt Arsenal, Wien, durchgeführt. Der Probennahmezeitraum erstreckt sich bei den meisten Entnahmestellen von August 1972 bis Mai 1975 (s. Tab. 10). Sämtliche Analysenergebnisse sind in Tafel II zusammengestellt.

Die nachfolgende Diskussion bezieht sich im wesentlichen auf diese Analysenergebnisse. Die Zusammenschau der Ergebnisse sämtlicher im Untersuchungsgebiet durchgeführter Messungen kann eine neuerliche Beurteilung der Isotopenmeßergebnisse nach sich ziehen.

Grundsätzliches zur hydrologischen Interpretation

Die folgenden Bemerkungen sollen einen kurzen Überblick über die Grundlagen der hydrologischen Interpretation von D-, O-18- und T-Messungen geben. Für nähere Angaben muß auf die einschlägige Literatur (z. B. IAEA 1968, W. DROST u. a. 1974, J. ZÖTL 1974, J. GAT 1976) verwiesen werden. Dies gilt auch für meßtechnische Einzelheiten.

Deuterium und Sauerstoff-18

Die hydrologische Anwendung von Messungen des Gehalts an den stabilen Isotopen D und O-18 beruht im wesentlichen auf den in natürlichen Wässern auftretenden unterschiedlichen Konzentrationen (Schwankungsbreite für D von 220 bis 340 ppm und für O-18 von 1920 bis 2010 ppm). Diese Schwankungen sind hauptsächlich durch Isotopenfraktionierungen bei Phasenumwandlungen (Verdampfung, Kondensation u. ä.) bedingt, die durch Dampfdruckunterschiede der Moleküle HDO und $H_2^{18}O$ gegenüber H_2O hervorgerufen werden. Wesentlich ist dabei, daß die Isotopenfraktionierung temperaturabhängig ist: Je tiefer die Temperatur beim Phasenübergang ist, desto stärker ist die Isotopenfraktionierung.

Im natürlichen Wasserkreislauf verursacht diese Isotopenfraktionierung folgende Effekte:

- a) Höheneffekt: Mit zunehmender orographischer Höhe tritt eine Abnahme des Gehalts an schweren Isotopen auf. Für Deuterium beträgt diese Abnahme etwa $\delta D = 2,5\text{‰}^1$ pro 100 m Höhendifferenz. Gründe für diesen Höhen-

¹ Der δD - bzw. $\delta^{18}O$ -Wert gibt die ‰-Abweichung des Gehalts an Deuterium bzw. Sauerstoff-18, bezogen auf den Meerwasserstandard SMOW (Standard Mean Ocean Water), an. Die Meßgenauigkeit (2 σ -Kriterium) beträgt für $\delta D \pm 1\text{‰}$, für $\delta^{18}O \pm 0,15\text{‰}$.

Tabelle 10: Probennahmestellen für Wasserproben zur Messung des natürlichen Isotopengehaltes im Slowenischen Karst südlich von Ljubljana.

Bezeichnung der Entnahmestelle	Art der Entnahmestelle	Zeitraum der Entnahme
1. 111	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 112	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 113	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 114	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 121	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 122	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 123	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 13	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 14	Quelle	6. 74 — 5. 75
1. 21	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 22	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 32	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 34	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 37	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 38	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 42	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 43	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 44	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 45	Quelle	8. 72 — 5. 75
1. 46	Thermalquelle	6. 74 — 5. 75
2. 11	Pegel-Ponor	8. 72 — 5. 75
2. 21	Pegel-Ponor	8. 72 — 5. 75
2. 3	Pegel-Ponor	8. 72 — 5. 75
2. 41	Pegel-Ponor	8. 72 — 5. 75
3. 1	Ponor	8. 72 — 5. 75
3. 41	Ponor	8. 72 — 5. 75
3. 42	Ponor	8. 72 — 5. 75
3. 6	Quelle	7. 74 — 4. 75
3. 7	Pegel-Quelle	8. 72 — 5. 75
3. 9	Pegel-Quelle	8. 72 — 5. 75
4. 0	Pegel-Ponor	8. 72 — 5. 75
4. 01	Pegel-Ponor	9. 72 — 5. 75
5. 2	Quelle	8. 72 — 5. 75
5. 3	Quelle	9. 72 — 5. 75
5. 4	Pegel-Quelle	8. 72 — 5. 75
6. 00	Pegel-Ponor	8. 72 — 5. 75
6. 08	Pegel	2. 73 — 5. 75
6. 10	Pegel	6. 73 — 5. 75
6. 12	Pegel	6. 73 — 5. 75
6. 16	Ponor	8. 72 — 5. 75
6. 23	Pegel-Quelle	6. 73 — 5. 75
6. 26	Pegel-Quelle	8. 73 — 4. 75
6. 45	Pegel	8. 72 — 5. 75
8. 01	Pegel	8. 72 — 5. 75
8. 11	Pegel	9. 73 — 5. 75
8. 21	Pegel	8. 72 — 5. 75

effekt sind die mit der Höhe abnehmende Lufttemperatur, die fortschreitende Ausregnung beim Aufgleiten einer feuchtigkeitsgesättigten Luftmasse an einer orographischen Erhebung und die mit zunehmender Fallhöhe steigende Verdunstung fallender Regentropfen.

- b) Jahreszeitlicher Gang: Bedingt durch die Temperaturabhängigkeit der Isotopenfraktionierung tritt im Isotopengehalt der Niederschläge ein Maximum im Sommer und ein Minimum im Winter auf. In unserer Klimazone liegt die

- jahreszeitliche Schwankung der Monatsmittel der δD -Werte bei etwa 100%.
- c) Isotopengehaltsänderung bei Verdunstung (z. B. von Seeoberflächen): Bei Verdampfungsvorgängen tritt stets eine Anreicherung von schweren Isotopen in der flüssigen Phase auf. Bei einer solchen Phasenumwandlung kann dabei eine Verschiebung des Verhältnisses zwischen δD - und $\delta^{18}O$ -Wert ($\delta D = 8 \delta^{18}O + t$) in der Weise auftreten, daß O-18 stärker als D angereichert wird. Dies hat eine Änderung des Steigungsfaktors 8 zu kleineren Werten hin zur Folge. t hängt von der geographischen Lage des Untersuchungsgebietes ab und hat in Mitteleuropa Werte um 10.

Tritium

Tritium (T) ist ein radioaktives Isotop des Wasserstoffs, das mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren unter Aussendung niederenergetischer Beta-Strahlung zerfällt.

T wird in der Atmosphäre auf natürliche Weise in geringen Konzentrationen durch die Einwirkung der kosmischen Strahlung erzeugt, oxidiert dann zu Wasser und gelangt so mit einer Konzentration von etwa 6 T. U.² in den Wasserkreislauf, seine heutige hydrologische Anwendung beruht jedoch im wesentlichen auf der ungewollten weltweiten Markierung des Wasserkreislaufs, die seit 1952 durch die bei den Kernwaffentestserien frei werdenden Tritiummengen stattgefunden hat. Das Jahresmittel des Tritiumgehalts der Niederschläge stieg dadurch im Jahr 1963 bis auf das 1000fache des natürlichen Tritiumgehalts an (s. Fig. 32) und liegt derzeit noch bei etwa 100 T. U.

Neben dem in Fig. 32 dargestellten Verlauf der Jahresmittelwerte zeigt der Tritiumgehalt in den Niederschlägen auch jahreszeitliche Schwankungen. Im Gegensatz zu D und O-18, bei denen dieser Jahresgang auf Isotopentrenneffekte zurückzuführen ist, liegt die Ursache beim Tritium in dem jahreszeitlich unterschiedlichen Luftmassenaustausch zwischen Stratosphäre (Tritiumreservoir) und Troposphäre. Der Tritiumjahresgang zeigt ein Maximum im späten Frühjahr und ein Minimum im Spätherbst. Der Tritiumgehalt nimmt im Verlauf des Wasserkreislaufs nach dem Gesetz des radioaktiven Zerfalls ab; es können somit aus dem Tritiumgehalt von Grundwässern bei Kenntnis der Tritiumkonzentration des infiltrierenden Niederschlags Rückschlüsse auf die Verweilzeit des Wassers im Untergrund gezogen werden. Der Aussagezeitraum reicht bis zu etwa 50 Jahren. Wegen des von den Bombenversuchen verursachten unregelmäßigen Verlaufs der Eingangsaktivität ergeben sich besonders bei der Untersuchung von Mischwässern Mehrdeutigkeiten, welche die Interpretation erschweren.

Kurze Übersicht über bisherige Ergebnisse von Messungen des Gehalts an Umweltisotopen in der Karsthydrologie

Messungen des Gehalts an Umweltisotopen zur Untersuchung von Karstwassersystemen haben in den letzten Jahren bei verschiedensten Fragestellungen wesentlich zum Verständnis der komplizierten Zusammenhänge dieser in vielen Ländern der Erde wichtigen Grundwasserleiter beigetragen. Erste Untersuchungen in einem Karstgebiet in der südlichen Türkei konnten die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Grundwasserkörpern, Seen und Quellen

² 1 T. U. entspricht einer Aktivitätskonzentration 3,2 pCi/l bzw. einer Isotopenkonzentration von 10^{-16} .

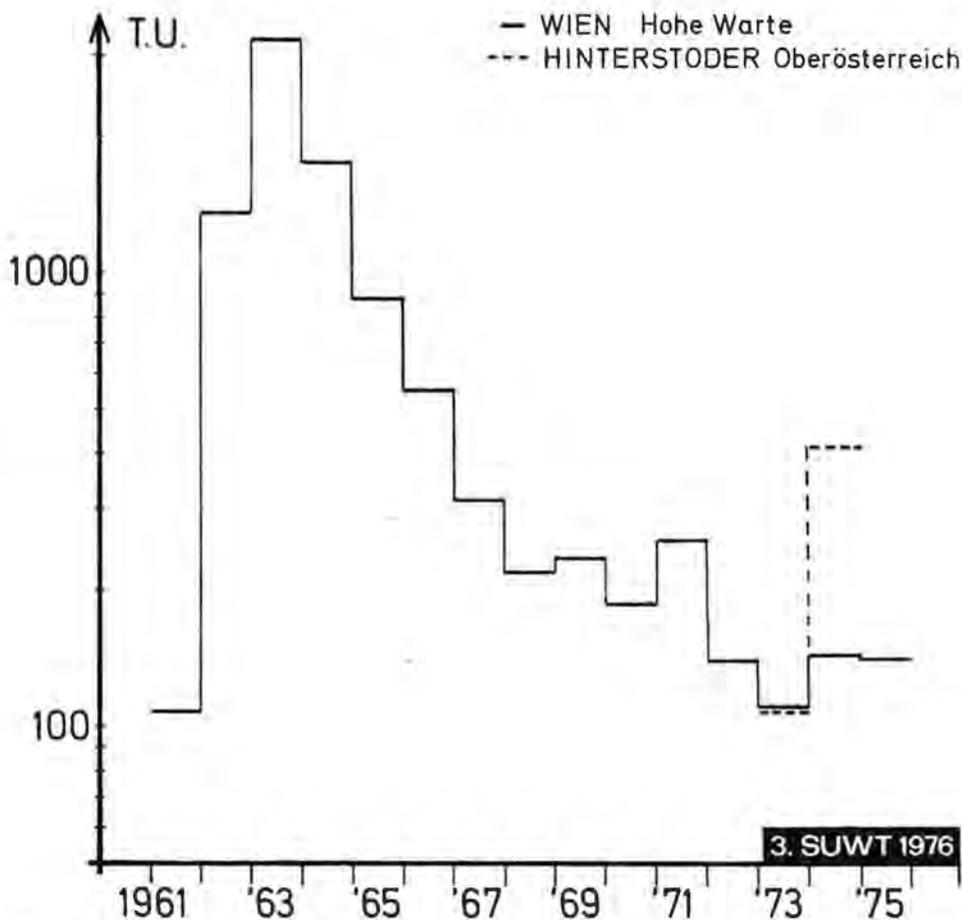


Fig. 32: Jahresmittelwerte des Tritiumgehalts in den Niederschlägen von Wien. Für die Jahre 1973 und 1974 ist zusätzlich der Tritiumgehalt der Niederschläge in Hinterstoder (Oberösterr.) eingezeichnet.

Sl. 32: Srednje letne vrednosti tritija v padavinah na Dunaju. Dodatno je prikazana vsebnost tritija v padavinah v Hinterstoderju (g. Avstrija) za leti 1973 in 1974.

klären (B. R. PAYNE 1967). Rückschlüsse auf unterirdische Abflüsse von Seen ergaben sich aus den aus Tritiummessungen ermittelten Verweilzeiten des Seewassers. In der Schweiz konnte, ebenfalls aus Tritiummessungen, das mittlere Wasseralter eines Karstwassers errechnet werden (U. SIEGENTHALER et al. 1970). An anderen Karstquellen der Schweiz, in Frankreich und Österreich lieferten die Messungen des Gehalts an Umweltisotopen die Grundlagendaten für Modelle über die Hydraulik des Karstwasserströmungssystems (U. SIEGENTHALER 1971, R. MARGRITA et al. 1970, E. ROTH et al. 1971, H. ZOJER & J. ZÖTL 1974).

Untersuchungen der zeitlichen Abhängigkeit des Gehalts an D, O-18 und T an zahlreichen Proben aus dem Gebiet des Toten Gebirges (Österreich) ergaben als wichtigstes Ergebnis, daß im Karst dieses Gebirges keine nennenswerte Speicherung von Niederschlags- und Schmelzwasser erfolgt. Außerdem konnten durch Vergleiche der Isotopenganglinien die Ergebnisse früher durchgeführter

Markierungsversuche bezüglich der Karstwassermenge bestätigt werden (T. DINČER et al. 1974).

Im großen Maßstab wurden T-, C-14-, D- und O-18-Messungen im Rahmen des im Jahr 1969 durchgeführten Markierungs-Großversuchs im Gebiet der Donauversickerung (H. BATSCHE et al. 1970a) verwendet.

Ähnlich wie bei den im folgenden beschriebenen Untersuchungen wurde auch damals der eigentliche Markierungsversuch durch vorangegangene Isotopenmessungen, die über den Zeitraum eines Jahres an Karstwasserproben durchgeführt wurden, ergänzt. Die Tritium- und C-14-Messungen ergaben auf der Grundlage der Modellvorstellung, daß sich das Karstwasser aus verschiedenen Komponenten zusammensetzt, deren Anteile mit wachsender Verweilzeit exponentiell abnehmen, Verweilzeiten von 2 bis 1500 Jahren, die zum großen Teil hydrologisch sinnvoll gedeutet werden konnten. Neben dieser kombinierten T- und C-14-Untersuchung konnten mit Hilfe der Ganglinien des T- und D-Gehalts in einzelnen Probennahmestellen (Schwinden, Quellen, Oberflächenwässer) Einzelheiten über Laufzeiten, Mischungsvorgänge und Einzugsgebiete des Karstwassers ermittelt werden (H. BATSCHE et al. 1970b).

Beitrag zum Zusammenhang von Niederschlag und Abfluß

Neben den Karstwasserproben wurden vom März 1973 an auch Niederschlagswasserproben (i. a. Monatssammelproben) von drei Probensammelstellen (Logatec, Postojna, Šmarata; s. Lageplan Tafel I) auf ihren Gehalt an D, O-18 und T untersucht.

Der Deuteriumgehalt

Fig. 33 zeigt die monatlichen Niederschlagshöhen und den Verlauf des Deuteriumgehalts der Monatsniederschlagsproben für die Probennahmestellen Šmarata, Postojna und Logatec. Wie erwartet, ergaben sich für die Monatsmittelwerte jahreszeitliche Schwankungen im δD -Wert von etwa 80‰. In Tab. 11 sind für die Zwei-Jahres-Periode von April 1973 bis März 1975 die gewichteten Mittelwerte der D- und O-18-Gehalte der einzelnen Niederschlagssammelstellen, deren Höhenkoten ü. NN und Niederschlagshöhen zusammengestellt. Diese Werte liegen im Mittel um etwa 4 bis 5‰ höher als die mittleren δD -Werte³ der Karstquellen der Ljubljana (No. 1.1 und 1.2); daraus kann man schließen, daß das Einzugsgebiet der Quellen im Mittel höher als die Niederschlagssammelstellen liegt. Aufgrund des Höheneffekts und im Vergleich mit den δD -Werten der Niederschlagssammelstellen errechnet sich eine mittlere Höhe des Einzugsgebietes von ungefähr 750 m ü. NN. Tab. 11 spezifiziert diese Aussagen soweit möglich für die einzelnen Quell-Gruppen.

³ Da die Bildung des gewichteten Mittels für die einzelnen Meßstellen auf wenigen Einzelmessungen beruht, sind die Mittelwerte mit einem relativ großen Unsicherheitsfaktor behaftet.

Fig. 33: Monatliche Niederschlagshöhen und Verlauf des Tritium- und Deuteriumgehalts im Monatsniederschlag für die Probennahmestellen Šmarata, Postojna und Logatec.

Sl. 33: Mesečne količine (N mm) ter ustrezne vrednosti tritija (T. U.) in deuterija (D ‰) za meteorološke postaje Šmarata, Postojna in Logatec.

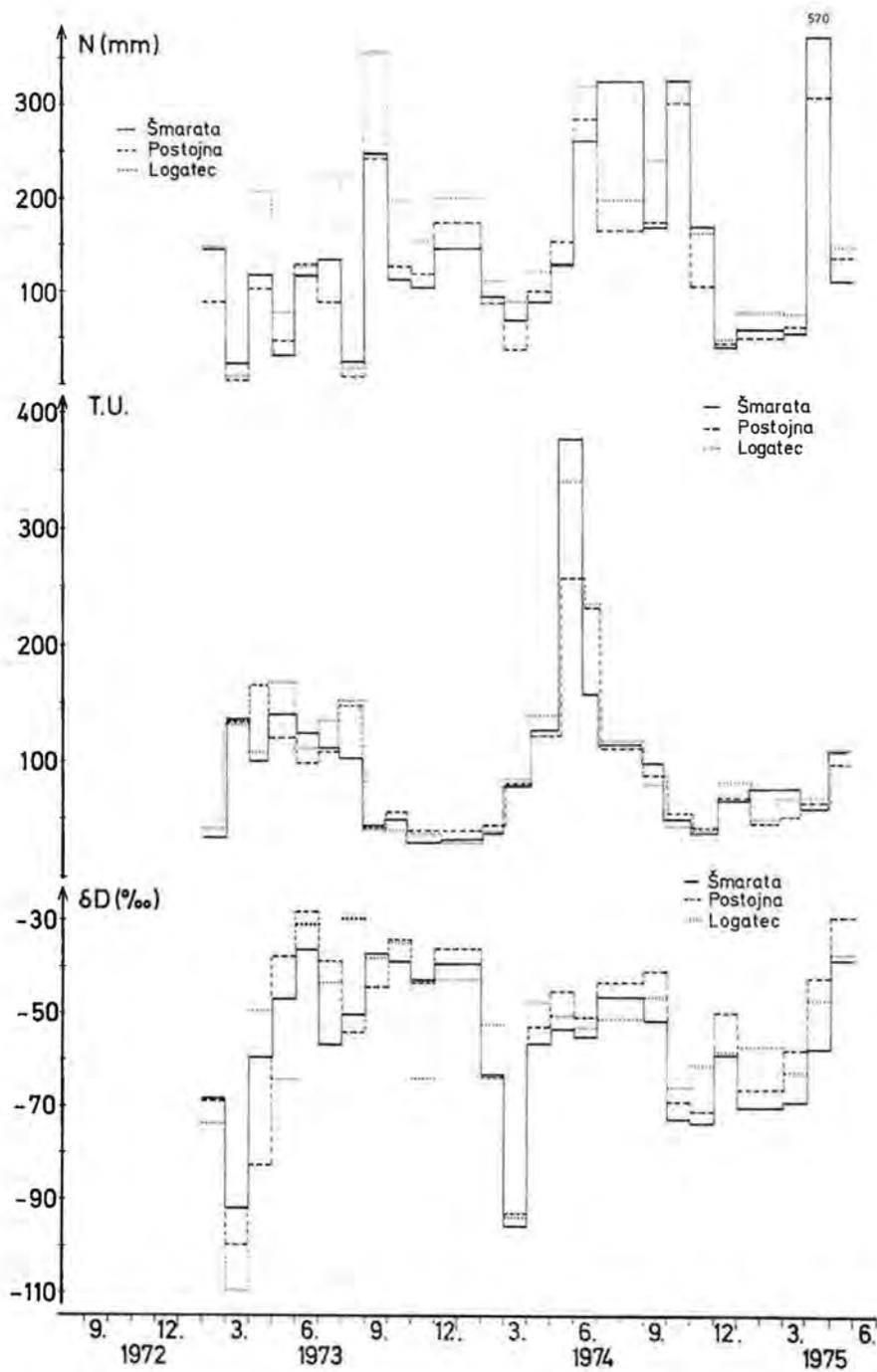


Tabelle 11: Zwei-Jahres-Mittelwerte des stabilen Isotopengehaltes von Niederschlag und Karstwasserproben im Einzugsgebiet der Ljubljana. Die Mittelwerte wurden über den Zeitraum April 1973 bis März 1975 gebildet. Sie sind mit der Niederschlagsmenge bzw. dem Abfluß gewichtet.

Niederschlagswasser

Sammelstelle	Höhe ü. NN	Niederschlagsmenge (mm)	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)
Smarata	590	3213	-54,8	-8,20
Postojna	533	2916	-49,4	-7,53
Logatec	486	4084	-50,3	-7,78

Karstwasser

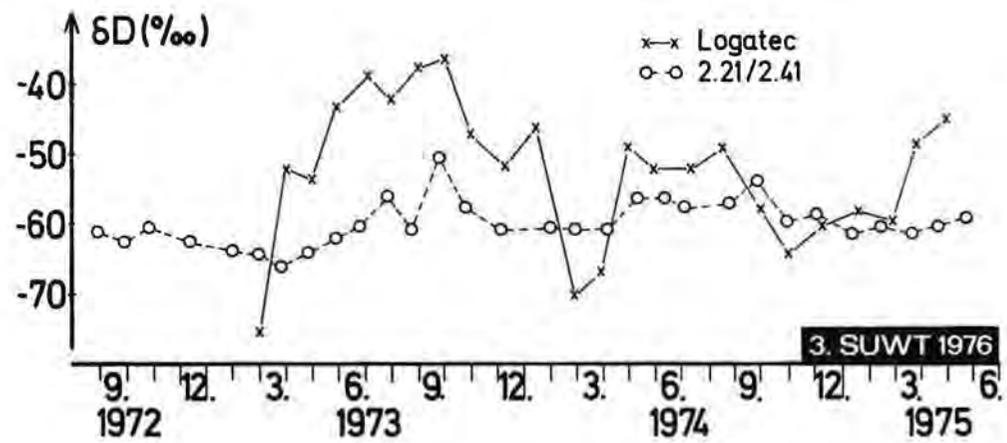
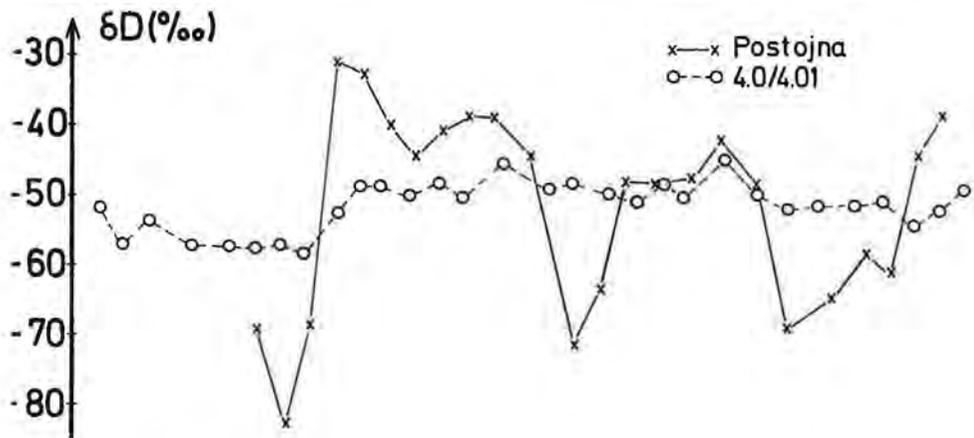
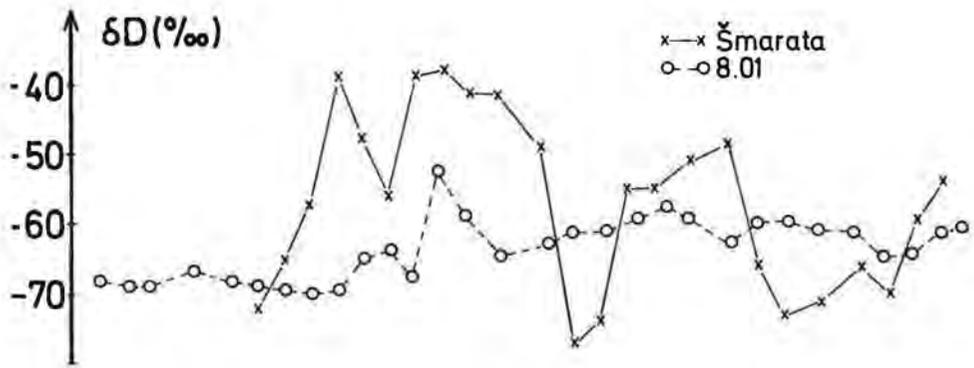
Entnahmestelle	δD (‰)
1. (1.11, 1.12, 1.13)	-56,0
1.2 (1.21, 1.22)	-55,5
1.31 (1.32, 1.34)	-57,0
1.3 (1.32, 1.34, 1.36, 1.37)	-55,5
1.4 (1.42, 1.43, 1.44, 1.45)	-53,8
2.1 (2.11)	-56,8
2.2 (2.21)	-57,7
2.3	-57,8
2.4 (2.41)	-54,7
3.5 (3.7, 3.9)	-54,2
3.9	-53,9
4.0	-51,0
5.1	-55,6
6.08	-60,6
6.16	-56,0
6.45	-62,7
8.21	-62,4

Um den zeitlichen Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluß aufzuzeigen, wurden übergreifende Monatsmittel verschiedener Gewichtung der δD -Werte der Niederschläge gebildet. Es zeigte sich, daß die Schwankungen der δD -Werte des Abflusses i. a. am besten durch die mit der Niederschlagsmenge gewichteten Zwei-Monats-Mittelwertganglinie reproduziert werden. Hydrologisch bedeutet dies, daß wesentliche Anteile des Karstwassers eine Verweilzeit von nur einigen Monaten zwischen Niederschlag und Abfluß besitzen.

In der Abb. 34 werden diese Zwei-Monats-Mittelwert- δD -Ganglinien des Niederschlags mit den δD -Ganglinien von Karstwässern in der Nähe der betreffenden Niederschlagsstation verglichen. Man erkennt durchwegs, daß alle Schwankungen der gemittelten δD -Niederschlagswerte im Abfluß wieder auftreten. Durch die Zwei-Monats-Mittelwertbildung wird die ursprüngliche

Fig. 34: Mit der Niederschlagsmenge gewichtete Zwei-Monats-Mittelwert- δD -Ganglinien der Niederschläge an den Stationen Smarata, Postojna und Logatec sowie δD -Ganglinien der Abflüsse an den Karstwasserentnahmestellen 8.01, 4.0/4.01 und 2.21/2.41, die im Bereich der betreffenden Niederschlagsmessstationen liegen.

Sl. 34: Krivulje dvomesečnih srednjih (δD) vsebnosti deuterija v padavinah glede na padavine na postajah Smarata, Postojna in Logatec ter krivulje δD diagrami za ponorno vodo v zajemnih mestih 8.01, 4.04 (4.01 in 2.21) 2.41, ki so v bližini navedenih meteoroloških postaj.



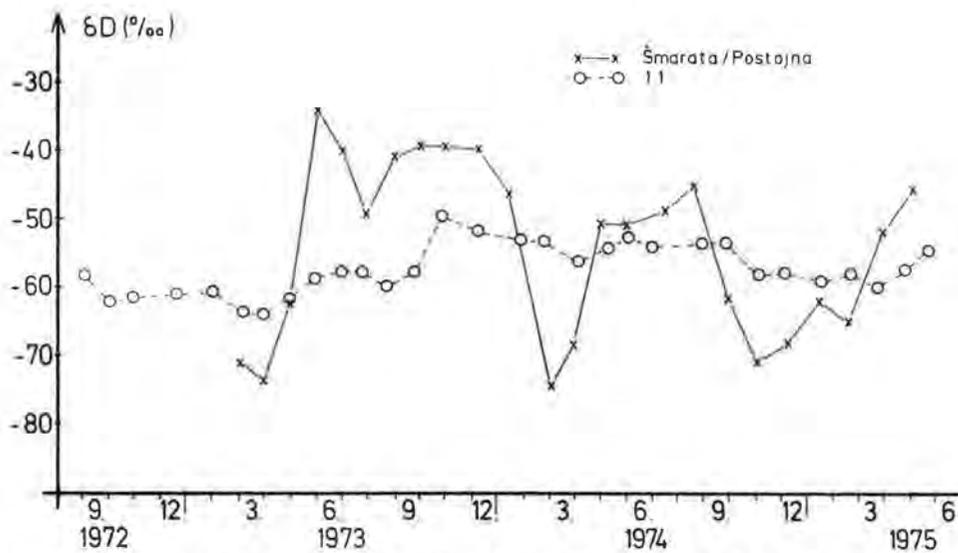


Fig. 35: Mittelwert der in Abb. 34 dargestellten δD -Ganglinien der Niederschläge an den Stationen Šmarata und Postojna sowie δD -Ganglinie der Quellen I.1.
Sl. 35: Diagram vrednosti δD v izviri I.1 in v padavinah postaj Šmarata in Postojna, kakor je prikazano na sl. 34.

Schwankungsbreite der δD -Niederschlagsganglinien auf etwa 40‰ reduziert. In den Ganglinien der δD -Werte des Karstwassers läßt sich hingegen nur mehr eine Schwankung von etwa 15‰ nachweisen. Diese Dämpfung der Schwankungsamplituden kann einerseits durch die hydrodynamische Dispersion längs des Fließweges und andererseits durch die Zumischung aus Karstwasserreservoirien erklärt werden.

Die Phasenverschiebung zwischen Niederschlag und Abfluß liegt bei etwa einem Monat, wobei die Unsicherheit dadurch bedingt ist, daß die δD -Werte des Niederschlags aus Monatssammelproben, die δD -Werte des Abflusses aus momentan genommenen Proben ermittelt wurden. Trotz dieser Schwierigkeit ist zu erkennen, daß der zeitliche Unterschied zwischen Niederschlag und Abfluß zu Zeiten hohen Niederschlagswasserangebots geringer wird. Der Vergleich der gemittelten δD -Werte der Niederschlagssammelstellen Šmarata und Postojna mit der mittleren δD -Ganglinie der Quellen No. I.1 erbringt etwa dasselbe Ergebnis (Fig. 35). Eine Vergrößerung des Phasenunterschieds ist erwartungsgemäß zu beobachten.

Der Tritiumgehalt

Die Tritiumgehalte der Monatsniederschlagsproben der Probennahmestationen Šmarata, Postojna und Logatec (Fig. 33) schwanken im Beobachtungszeitraum von Februar 1973 bis Mai 1975 zwischen 30 und 380 T. U., wobei ausnehmend hohe Werte im Mai 1974 auftreten. Die Ursache hierfür dürfte in ungewöhnlichen atmosphärischen Verhältnissen zu suchen sein. In Österreich wurden zur gleichen Zeit bei einzelnen Beobachtungsstationen bis zu 3000 T. U. im Monatsniederschlag gemessen (F. BAUER, V. RAJNER & D. RANK 1975). Der dabei gefundene Schwankungsbereich (die Werte von 40 Beobachtungsstationen lie-

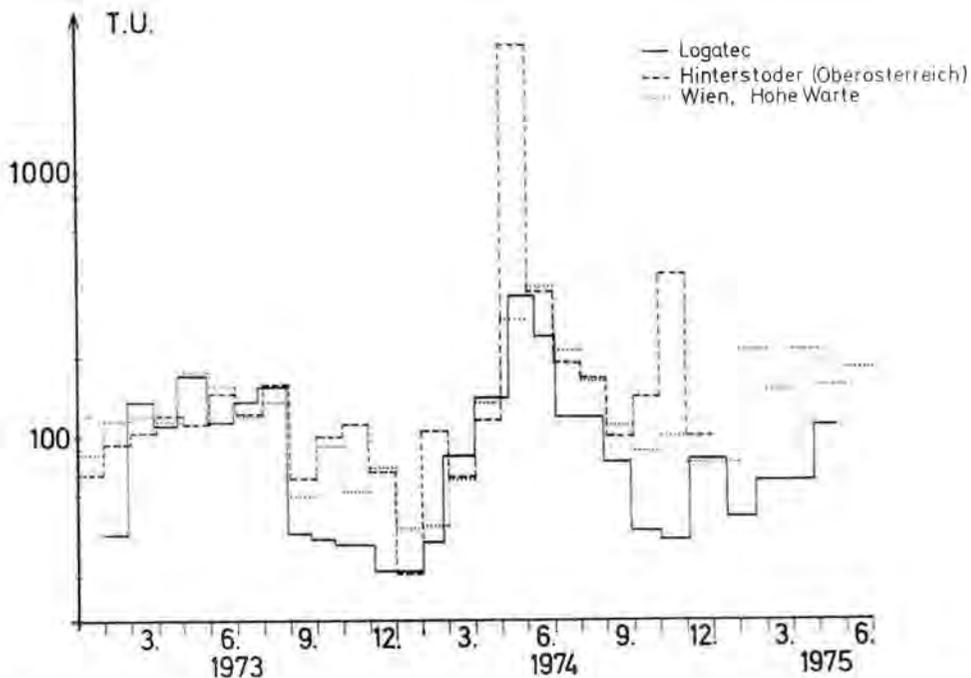


Fig. 36: Tritiumgehalt in den Monatsniederschlägen von Logatec, Wien und Hinterstoder (Oberösterreich).

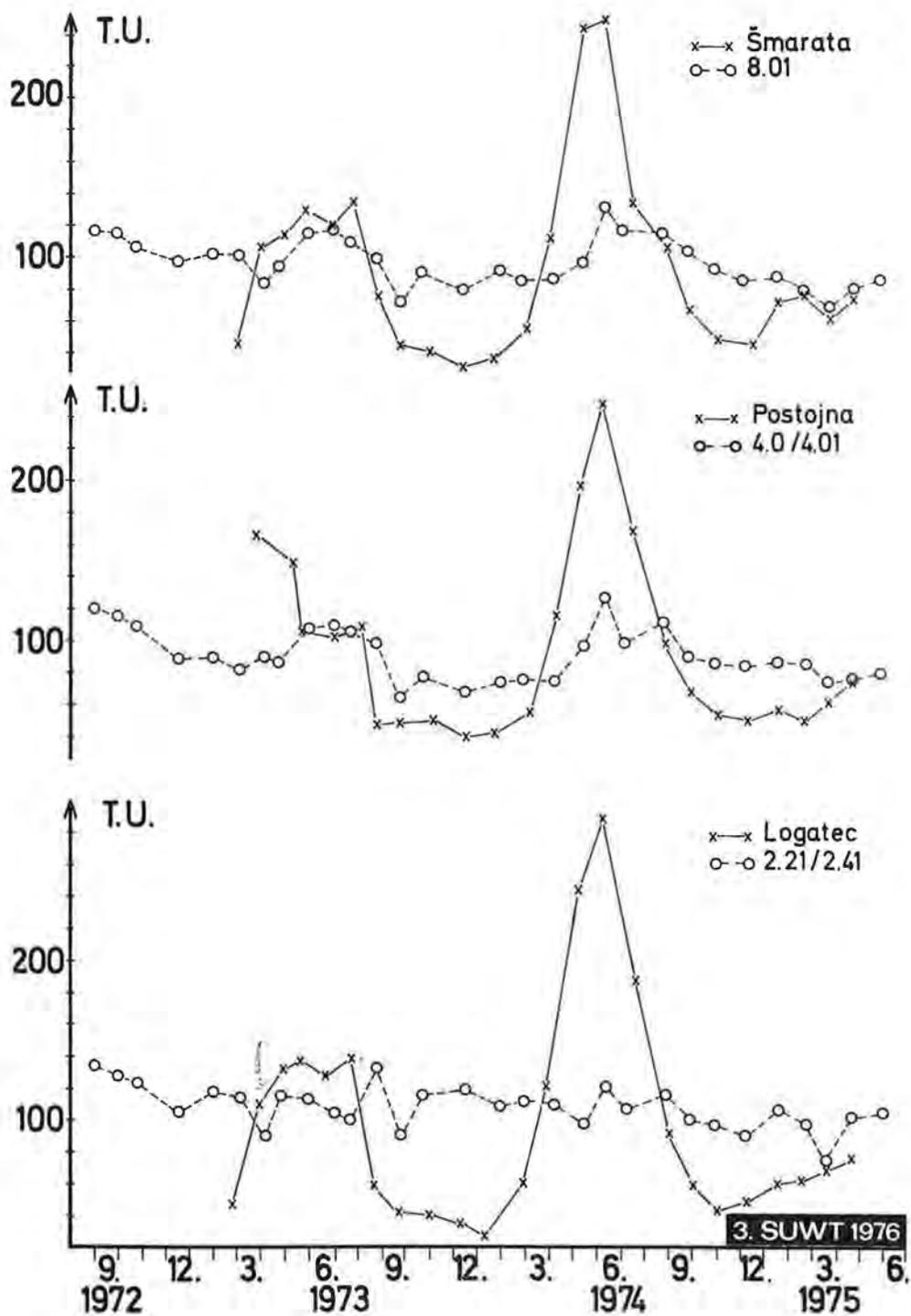
Sl. 36: Vrednost tritija (T. U.) v mesečnih padavinah v Logatcu, Dunaju in Hinterstoderju (g. Avstrija).

gen zwischen 200 und 3000 T. U.) weist darauf hin, daß möglicherweise auch im vorliegenden Untersuchungsgebiet mit starken lokalen Variationen zu rechnen ist, welche hydrologische Schlußfolgerungen erschweren können. Andererseits kann der Tritiumpeak der Niederschläge vom Mai 1974 im Karstwasser weiterverfolgt werden und so zusätzliche hydrologische Aussagen ergeben (s. später).

Betrachtet man den langjährigen Verlauf des Tritiumgehalts im Niederschlag mitteleuropäischer Probennahmestationen (Fig. 32), so zeigt er nach der zunächst exponentiellen Abnahme nach den Kernwaffenversuchen 1962/63 keine eindeutige Tendenz. Es fällt jedoch auf, daß das oben genannte Einzelereignis im Mai 1974 stark streuende Jahresmittelwerte der einzelnen Stationen zur Folge hat (s. z. B. die Differenz zwischen Wien und Hinterstoder, Oberösterreich).

Der Vergleich des T-Gehalts in den Monatsniederschlägen von Wien und aus dem Untersuchungsgebiet, z. B. von Logatec, zeigt, daß die Sommermaxima im Untersuchungsgebiet etwa gleich hoch sind wie in Wien, daß aber durch den geringeren Tritiumgehalt der Winterniederschläge das Jahresmittel im Untersuchungsgebiet niedriger liegt als in Wien (Fig. 36).

Im Gegensatz zu den vom Höheneffekt beeinflussten D- und O-18-Gehalten treten im Untersuchungsgebiet im allgemeinen keine großen Unterschiede im Tritiumgehalt zwischen den einzelnen Entnahmestellen auf (Tab. 12 und Tafel II). Die Tritiumgehalte der verschiedenen Karstwässer liegen dabei in der gleichen



3. SUWT 1976

Größenordnung wie die des Niederschlags. Ein abweichendes Verhalten zeigen die Probennahmestellen im Gebiet von Logatec, insbesondere 2.3, bei denen höhere T-Gehalte als im Niederschlag auftreten. Man kann daraus schließen, daß hier zu einem wesentlichen Prozentsatz ältere Wässer, die aus Niederschlägen mit höherem T-Gehalt gebildet wurden (Fig. 32), zum Karstwasserabfluß beitragen. Ähnliches gilt für 6.45. Der niedrige Tritiumgehalt der Thermalquelle 1.46 wird in einem der folgenden Abschnitte diskutiert.

Tabelle 12: Jahresmittelwerte des Tritiumgehaltes von Niederschlags- und Karstwasserproben im Einzugsgebiet der Ljubljana. Die Mittelwerte wurden über die Zeiträume April 1963 bis März 1974 und April 1974 bis März 1975 gebildet. Sie sind mit der Niederschlagsmenge bzw. dem Abfluß gewichtet.

Niederschlagswasser

Sammelstelle	(TU) 4.73/3.74	Tritiumgehalt 4.74/3.75
Šmarata	72	116
Postojna	71	118
Logatec	76	119

Karstwasser

Entnahmestelle	(TU) 4.73/3.74	Tritiumgehalt 4.74/3.75
1.1 (1.11, 1.12, 1.13)	84	97
1.2 (1.21, 1.22)	87	98
1.31 (1.32, 1.34)	89	98
1.3 (1.32, 1.34, 1.36, 1.37)	83	98
1.4 (1.42, 1.43, 1.44, 1.45)	78	101
2.1 (2.11)	86	101
2.2 (2.21)	107	98
2.3	120	103
2.4 (2.41)	106	98
3.5 (3.7, 3.9)	79	100
3.9	78	101
4.0	76	87
5.1	86	105
6.08	85	93
6.16	84	104
6.45	101	113
8.21	92	100

Aus dem Vergleich der Zwei-Monats-Mittelwert-T-Ganglinie der Niederschläge mit der T-Ganglinie der Karstwässer (Fig. 37) ergeben sich analoge Schlußfolgerungen wie aus dem Deuteriumgehalt.



Fig. 37: Mit der Niederschlagsmenge gewichtete Zwei-Monats-Mittelwert-T-Ganglinien der Niederschläge an den Stationen Šmarata, Postojna und Logatec sowie T-Ganglinien der Abflüsse an den Karstwasserentnahmestellen 8.01, 4.0/4.01 und 2.21/2.41, die im Bereich der betreffenden Niederschlagsmessstationen liegen.

Sl. 37: Krivulje dvomesečnih srednjih T. U. vrednosti v padavinah glede na količine padavin na postajah Šmarata, Postojna in Logatec ter krivulje T. U. vrednosti v ponorni vodi 8.01, 4.0 (4.01 in 2.21) 2.41, ki so v bližini navedenih meteoroloških postaj.

Weitere hydrologische Folgerungen aus den örtlichen und zeitlichen Variationen der Isotopengehalte des Karstwassers

a) Zwei-Jahres-Mittelwerte des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalts

Der Verlauf der δ -Werte der einzelnen Probennahmestellen im Beobachtungszeitraum stellt keine periodische Funktion dar, so daß die im folgenden diskutierten, mit dem Abfluß gewichteten Zwei-Jahres-Mittelwerte (s. Tab. 11) nicht als langjährige Mittel gelten können. Die T-Werte der Tab. 12 sind ohnehin wegen der zeitabhängigen input-Funktion nur für die betreffenden Jahre charakteristisch. Der relativ schnelle Abfluß der Hauptwassermenge der Niederschläge im Karstsystem des Untersuchungsgebietes läßt jedoch trotzdem gewisse hydrologische Aussagen aus dem Vergleich der Mittelwerte verschiedener Karstwasserentnahmestellen zu.

So ergibt z. B., daß der δD -Wert der **Probennahmestelle 1. 1** identisch mit dem der Probennahmestelle 6. 16 ist. Die gewichteten δD -Mittelwerte der ebenfalls zur Probennahmestelle 1. 1 fließenden Wässer der Stellen 6. 08, 6. 45 und 3. 5 gleichen sich in ihren Abweichungen von 6. 16 gegenseitig aus. Aus diesem Befund folgt, daß die Quellen 1. 1 zum überwiegenden Teil ihr Wasser aus dem Gebiet von Cerknica beziehen. Im Gegensatz dazu zeigt der höhere Mittelwert der **Probennahmestelle 1. 2** erhöhte Speisung aus dem Gebiet von Planina (3. 5) gegenüber den Quellen 1. 1. Der Mittelwert der **Probennahmestelle 1. 31** stimmt mit dem der Probennahmestellen im Gebiet von Logatec überein, was auf überwiegende Speisung dieser Quellen von Wässern aus dem Gebiet von Logatec hindeutet. Bei der **Probennahmestelle 1. 3**, die zusätzlich zu 1. 31 noch Wasser der Quellen 1. 36 und 1. 37 führt, wird der Mittelwert gegenüber 1. 31 durch den Zufluß aus dem Gebiet von Planina erhöht. Der hohe Mittelwert der **Probennahmestelle 1. 4** ist überwiegend durch die Wässer aus dem Gebiet von Planina bestimmt. Die Mittelwerte der **Probennahmestellen 3. 5 und 3. 9** ergeben sich als Mischwässer aus den Gebieten von Cerknica bzw. Rak und Postojna.

b) Der zeitliche Verlauf der δD - und T-Ganglinien des Karstwassers an den Tracereingabe- und Tracernachweisstellen des Markierungsversuchs

In den Fig. 38 und 39 sind jene Karstwasserentnahmestellen in ihren δD - und T-Ganglinien verglichen, zwischen denen durch den Markierungsversuch im Mai 1975 eine hydraulische Verbindung nachgewiesen werden konnte. Es soll dabei insbesondere geprüft werden, ob diese Verbindungen jahreszeitlich verschieden wirksam sind und auf welchen der nachgewiesenen Tracerwege starke Zumischungen isotopisch andersartigen Wassers stattfinden. In den Diagrammen der Fig. 38, 39 sind die Ganglinien der Tracernachweisstellen stark, die der Tracereingabestellen schwach ausgezogen. Die speziellen Verhältnisse, welche sich durch die mit hohen D- bzw. T-Gehalten verbundenen starken Niederschläge im September 1973 und Mai 1974 ergaben, werden in späteren Abschnitten gesondert diskutiert.

Probennahmestellen 1. 1, 3. 42, 6. 16 (Fig. 38).

Die δD -Ganglinie von 1. 1 folgt in ihrer Form derjenigen von 3. 42 meist ohne Phasenverschiebung und mit geringer Amplitudendämpfung. Auffälligerweise bleibt sie jedoch stets um 1 bis 3‰ unter der Kurve von 3. 42. Das zugemischte isotopisch leichtere Wasser stammt augenscheinlich von 6. 16, wobei diese Zumischung, bedingt durch die besonderen hydrologischen Verhältnisse

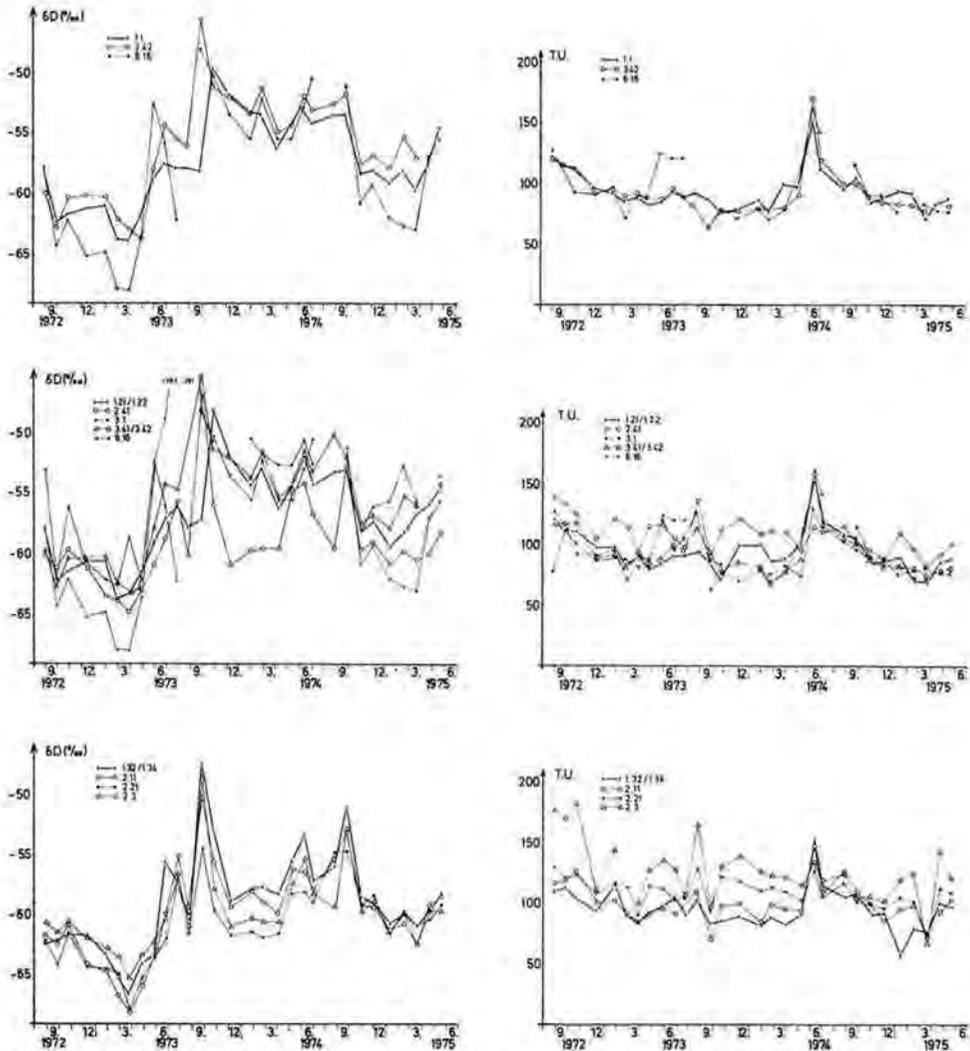


Fig. 38: Verlauf des Deuterium- und Tritiumgehalts von Karstwasserentnahmestellen, zwischen denen durch den Markierungsversuch im Mai 1975 eine hydraulische Verbindung nachgewiesen werden konnte. Die Ganglinien der Tracernachweisstellen sind stark, die der Tracereingabestellen schwach ausgezogen. Probenahmestellen 1.1, 3.42, 6.16; 1.21/1.22, 2.41, 3.1, 3.41/4.2, 6.16; 1.32/1.34, 2.11, 2.21, 2.3.

Sl. 38: Diagrami vsebnosti devterija (δD ‰) in tritija (T.U.) v kraških vodah na zajemnih mestih, med katerimi bi bila lahko dokazana vodna zveza s sledenjem v maju 1975. Krivulje izvornih vod so zarisane z debelo črto, ponornih voda pa s tanko črto.

im Gebiet von Cerknica, hauptsächlich im Winterhalbjahr wirksam ist. Im Spätsommer, bei starker D-Anreicherung im Oberflächenwasser von 6.16, erfolgt diese Zuspießung wahrscheinlich mit Wasser aus tieferen Bereichen des Sees, dessen δD -Wert nicht durch 6.16 repräsentiert wird. Die T-Werte zeigen in ihren Mittelwerten keine signifikanten Unterschiede. Der Verlauf bestätigt im übrigen die Schlußfolgerungen aus den δD -Werten.

Probennahmestellen 1. 21/1. 22⁵, 2. 41, 3. 1, 3. 41/3. 42, 6. 16 (Fig. 38).

Die mittlere δD -Ganglinie von 1. 21 und 1. 22 folgt im wesentlichen der mittleren Ganglinie von 3. 41 und 3. 42, wobei zeitweilig (Frühjahr und Herbst) andere Zuspeisungen wirksam werden (z. B. 6. 16). Die Probennahmestelle 3. 1 ergibt wenig repräsentative Werte, da in unregelmäßigen Abständen stehendes Wasser auftritt, in dem dann, bedingt durch starke Verdunstung, eine Erhöhung des D-Gehalts in der von der Oberfläche genommenen Probe nachgewiesen wird. Jedenfalls läßt diese Abbildung erkennen, daß 1. 21 und 1. 22 Mischwässer aus den Einzugsgebieten von Planina, Cerknica und möglicherweise auch von Logatec führen. Die Anhebung der T-Werte im Winter, insbesondere von 1. 22 im Winter 1973/74, deutet auf Anteile von älteren tritiumreicheren Wässern hin, wie sie auch im Gebiet von Logatec auftreten (s. vorne).

Probennahmestellen 1. 32/1. 34, 2. 11, 2. 21, 2. 3 (Fig. 38).

Die mittlere δD -Ganglinie von 1. 32 und 1. 34 folgt zwar in allen Einzelheiten der Ganglinie 2. 11, die Wässer von 1. 32 und 1. 34 müssen jedoch noch andere Einspeisungen (etwa aus einem nördlich gelegenen Einzugsgebiet) enthalten, da 2. 11 meist einen niedrigeren δD -Wert aufweist als 1. 32 und 1. 34 und das Maximum im Sommer 1973 in 2. 11 etwa einen Monat später als in 1. 32 und 1. 34 kommt. Die Einspeisungen aus 2. 3 und 2. 21 ergeben keine merkliche Beeinflussung von 1. 32 und 1. 34. Die T-Ganglinie des Quellenwassers liegt durchwegs, besonders in Niedrigwasser-Zeiten, unter den T-Werten der Wässer aus dem Gebiet von Logatec. Dies deutet auf eine Zuspeisung von alten (vor den Kernwaffentests gebildeten) tritiumarmen Wässern hin. Umgekehrt müssen die hohen T-Werte von 2. 21 und 2. 3 auf eine Zuspeisung von Wasser relativ hohen T-Gehalts aus der Kernwaffentestperiode zurückgeführt werden (s. vorne). Im übrigen folgt die T-Ganglinie des Quellwassers wie beim D-Gehalt am besten der Ganglinie von 2. 11.

Probennahmestellen 1. 36/1. 37, 2. 3/2. 41, 3. 1, 3. 42, 6. 16 (Fig. 39).

Die mittlere δD -Ganglinie von 1. 36 und 1. 37 folgt im wesentlichen der Ganglinie 3. 42, wobei nach dem starken Niederschlag im September 1973 eine Speicherwirkung des Niederschlagswassers zwischen der Einspeisungsstelle 3. 42 und den Quellen 1. 36 und 1. 37 beobachtet werden kann (s. später). Für die wenig repräsentativen Werte von 3. 1, die zeitweilig sehr gut der Ganglinie von 1. 36/1. 37 folgen, gilt wieder die schon vorher gemachte Bemerkung. Eine permanente hydraulische Verbindung mit 2. 3 und 2. 41 sowie mit 6. 16 läßt sich aus den Ganglinien nicht ableiten. Der Verlauf der T-Werte steht mit diesen Schlußfolgerungen im Einklang.

Probennahmestellen 1. 42/1. 43, 2. 41, 3. 1, 3. 41/3. 42, 6. 16 (Fig. 39).

Die mittleren δD - und T-Ganglinien von 1. 42 und 1. 43 folgen recht eng der mittleren Ganglinie von 3. 41 und 3. 42. Da die δD -Ganglinien von 2. 41 und 6. 16 fast immer niedrigere Werte und die T-Ganglinie von 2. 41 immer höhere Werte als die von 1. 42 und 1. 43 zeigen, kann von dieser Seite nur eine sehr geringe Zuspeisung erfolgen.

⁵ Der Schrägstrich bedeutet, daß in den Figuren die Mittelwerte der δD - bzw. T-Werte der betreffenden Probennahmestellen dargestellt sind.

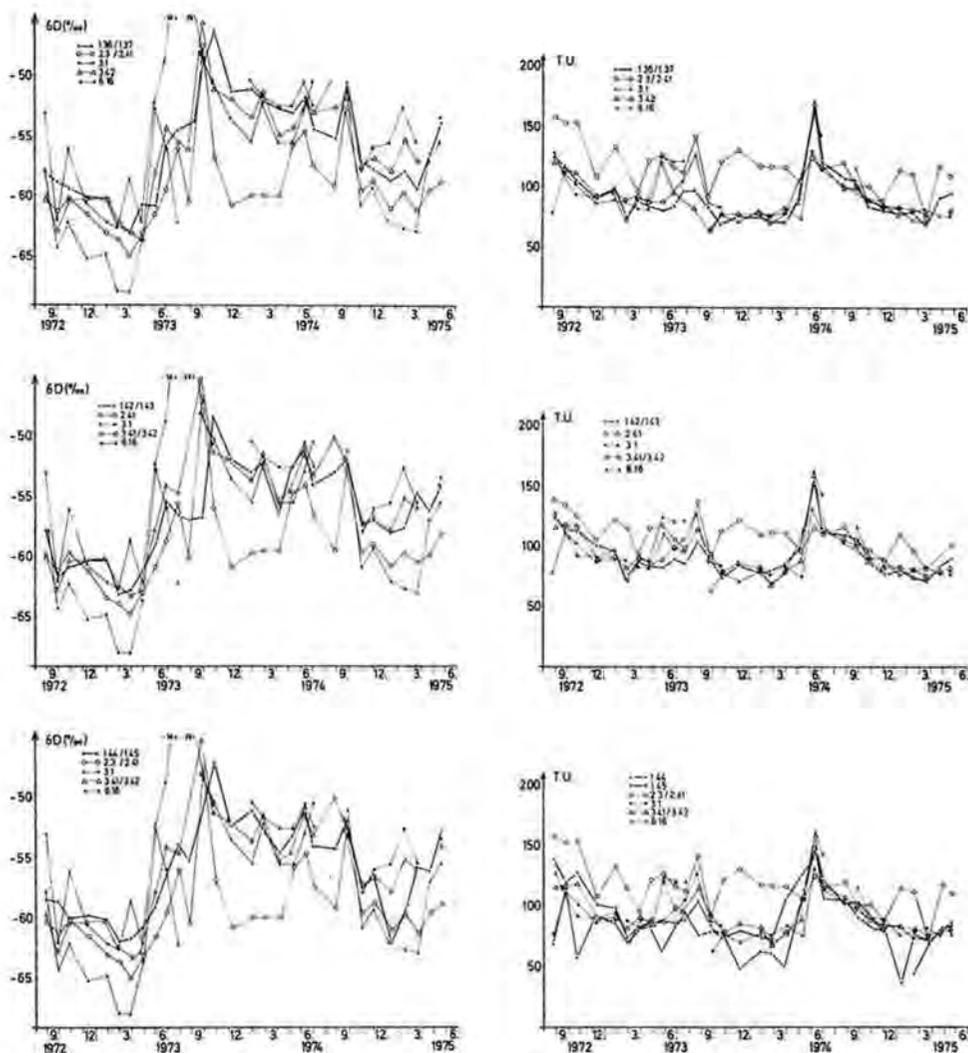


Fig. 39: Verlauf des Deuterium- und Tritiumgehalts von Karstwasserentnahmestellen, zwischen denen durch den Markierungsversuch im Mai 1975 eine hydraulische Verbindung nachgewiesen werden konnte. Die Ganglinien der Tracereingabestellen sind stark, die der Tracereingabestellen schwach ausgezogen. Probenahmestellen 1.36/1.37, 2.3/2.41, 3.1, 3.42, 6.16; 1.42/1.43, 2.41, 3.1, 3.41/3.42, 6.16; 1.44/1.45, 2.3/2.41, 3.1, 3.41/3.42, 6.16.

Sl. 39: Diagrami vsebnosti deuterija ($\delta D_{\text{‰}}$) in tritija (T.U.) v kraških vodah na zajemnih mestih, med katerimi bi bila lahko dokazana vodna zveza s sledenjem v maju 1975. Krivulje izvornih vod so zarisane z debelo črto, ponornih voda pa s tanko črto.

Probennahmestellen 1. 44/1. 45, 2. 3/2. 41, 3. 1, 3. 41/3. 42, 6. 16 (Fig. 39).

Die mittlere δD -Ganglinie von 1. 44 und 1. 45 zeigt stark wechselnde Mischwässer der einzelnen Zuflußgebiete, deren Zusammensetzung von der Wasserführung abhängt. Es ist anzunehmen, daß bei geringer Wasserführung im Gebiet von Planina der Einfluß aus dem Gebiet Logatec (2. 3 und 2. 41), der sonst weniger in Erscheinung tritt, stärker wird. Im Gegensatz zu den δD -Ganglinien ergeben sich bei den T-Ganglinien starke Unterschiede zwischen 1. 44 und 1. 45. Diese Abweichungen können zum Teil durch einen erhöhten Anteil von alten tritiumarmen Wässern bei Niedrigwasser erklärt werden. Der starke Abfall des T-Wertes von 1. 45 im Jänner 1975, der auch von einem starken Abfall des δD -Wertes begleitet wird, ist auf den Abfluß von Winterniederschlägen zurückzuführen.

Spezielle Beobachtungen

Die Wirkung des starken Niederschlages mit hohem δD -Wert von September 1973

Die relativ starken Niederschläge im September 1973 (283 mm) mit einem hohen δD -Wert (Monatsmittelwert -39‰) hatte einen ungewöhnlich hohen Eintrag an schweren Isotopen in das Karstwassersystem zur Folge. Dies hat, wie z. B. aus dem Verlauf der δD -Werte der Quellen 1. 1 (Fig. 38) ersichtlich ist, einen starken Anstieg der δD -Werte zur Folge. In den folgenden Monaten wird dann ein etwa exponentieller Abfall dieses δ -Wertes mit der Zeit beobachtet, dem sich die normalen jahreszeitlichen Schwankungen des δD -Wertes der späteren Niederschläge überlagern. Augenscheinlich spiegelt sich hier das Nebeneinander von schnell (d. h. in wenigen Tagen oder Wochen) und direkt abfließendem Niederschlagswasser und von Wasser wieder, das durch Mischung mit dem Karstwasserreservoir im Mittel länger (d. h. Monate oder Jahre) im Untergrund verweilt. Eine grobe Abschätzung ergibt beim beobachteten Beispiel der Quellen 1. 1 für den letzteren Anteil eine mittlere Verweilzeit von etwa einem Jahr.

Diese Verweilzeit hängt selbstverständlich von der Größe des Karstwasserreservoirs und seiner Geometrie ab. Im Falle der Quellen 1. 32 und 1. 34 erfolgt z. B. ein wesentlich schnelleres Abfließen des „schweren“ Niederschlagswassers vom September 1973, also eine geringere Durchmischung und Speicherung, als bei den naheliegenden Quellen 1. 36 und 1. 37, bei denen ein langsamer Abfall der δD -Werte und damit eine wesentlich höhere Verweilzeit beobachtet wird.

Die Wirkung des hohen Tritiumgehalts in den Niederschlägen im Mai/Juni 1974

Die relativ starken Niederschläge Ende Mai/Anfang Juni 1974 mit einem hohen T-Gehalt (s. vorne) hatten einen hohen T-Eintrag in das Karstwassersystem zur Folge. Dies hat in fast allen Probennahmestellen einen starken Anstieg der T-Werte zur Folge (s. Fig. 38 und 39). Allerdings hängt die Höhe des Maximums sehr stark vom Probennahmedatum ab. Für den zeitlichen Verlauf in der Folge gelten die gleichen Schlußfolgerungen wie bei den Auswirkungen des Deuteriummaximums vom September 1973.

Diskussion des Verlaufs des Tritiumgehalts während des Monats Juni 1974

Zur Kontrolle, wieweit Einzelproben repräsentativ sind, erfolgte im Juni 1974 aus den Quellen 1. 111 und 1. 37 alle drei Tage eine Probennahme. In die-

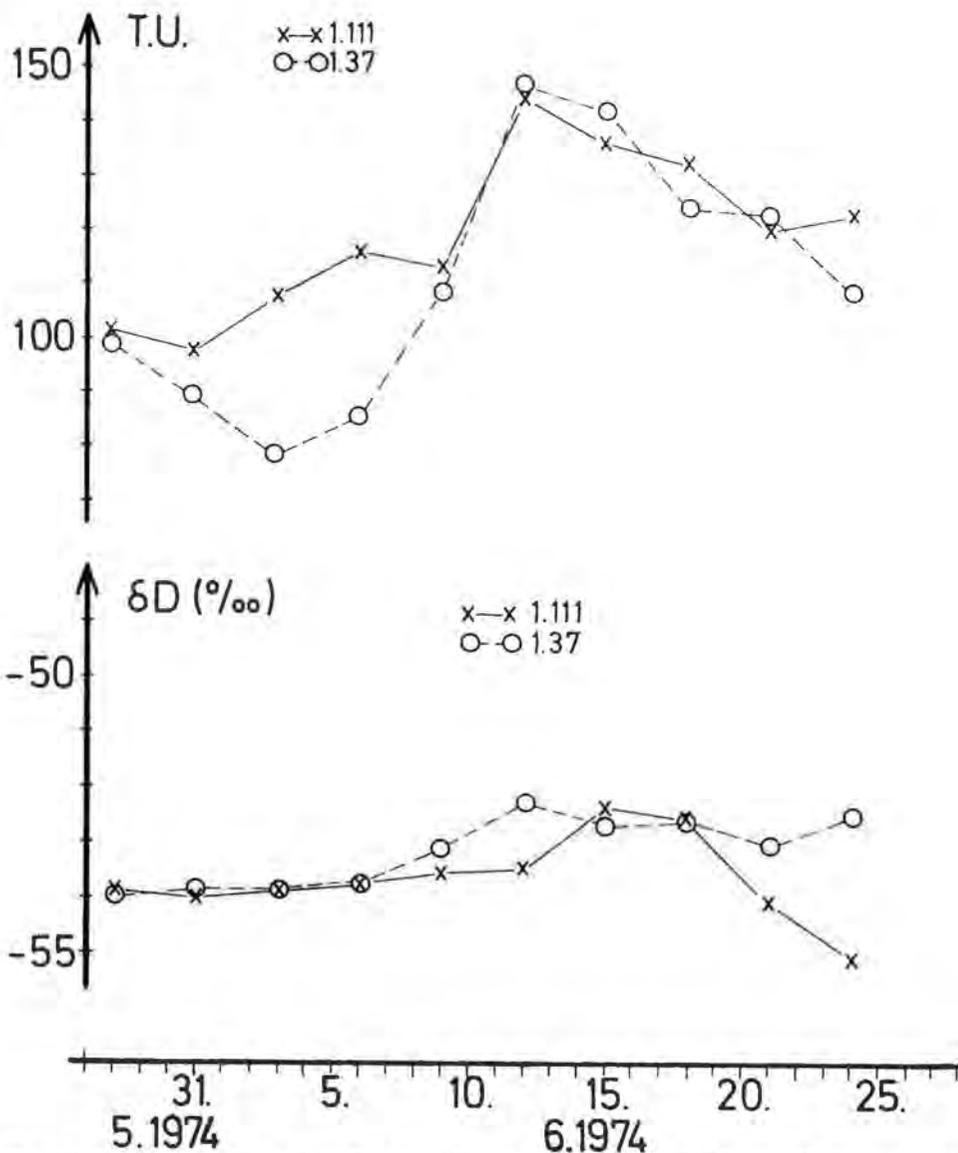


Fig. 40: T- und D-Werte der Probennahmestellen 1.111 und 1.37 im Zeitraum vom 28. 5. bis 24. 6. 1974.

Sl. 40: Krivulje T. U. in δD vrednosti na zajemnih mestih 1.111 in 1.37 v obdobju 28. 5.—24. 6. 1974.

sen Probennahmezeitraum fiel zufällig das oben erwähnte ungewöhnlich hohe T-Maximum des Niederschlags. Fig. 40 gibt den Verlauf des T-Gehalts in den Quellen 1. 111 und 1. 37 wieder. Es ist daraus zu ersehen, daß der ungewöhnlich steile Tritiumanstieg, der zwischen aufeinanderfolgenden Monatsmitteln eine Differenz von ca. 250 T. U. ergab, in den Einzelproben auf einen Tritiumanstieg in den Quellen von ca. 50 T. U. gedämpft wurde. Es ist daraus zu schließen, daß im Normalfall bei wesentlich geringeren Isotopengehaltsschwankungen

die genommenen Einzelproben durchaus repräsentative Werte für den Zeitraum zwischen aufeinanderfolgenden Probennahmen ergeben. Die im gleichen Zeitraum vorliegenden entsprechenden δD -Werte bestätigen diese Aussage.

In der Quelle 1. 37 tritt um den 12. Juni ein Maximum auf; in der Quelle 1. 111 treten dagegen zwei Maxima mit einer Laufzeitdifferenz von einigen Tagen auf, wobei das spätere Maximum etwa die gleiche Laufzeit hat wie das Maximum in 1. 37. Diese Laufzeitdifferenz ist mit dem erwarteten Zeitunterschied zwischen dem Eintreffen der Wässer aus dem Planina-Gebiet und dem Cerknica-Gebiet in den Quellen der Ljubljana zu erklären. Das Amplitudenverhältnis der Maxima zeigt, daß sich die beiden Schüttungsanteile der Quelle 1. 111 zum Zeitpunkt der Messung um weniger als eine Größenordnung unterscheiden. Legt man dem Maximum in 1. 37 die Laufzeit Cerknica—Bistra zugrunde, so kommen für die Speisung von 1. 37 zu diesem Zeitpunkt Wässer aus dem Gebiet von Logatec in Frage. Wässer aus dem Gebiet von Planina mit einer kürzeren Laufzeit können keinen wesentlichen Beitrag liefern, da ein zweites, früheres Maximum nicht beobachtet werden konnte.

Das Verhalten des Tritiumgehalts bei Niedrigstwasser im August 1973

Erhöhte Anteile von Karstwasser, das aus Zeiten erhöhten Tritiumgehalts in den Niederschlägen (aus den Jahren 1962 bis 1970) stammt, ergeben im Quellwasser einen Anstieg des Tritiumgehalts gegenüber dem T-Gehalt des direkt abfließenden Niederschlagswassers. Das Auftreten solcher Anstiege im Niedrigstwasser vom August 1973 bei den Probennahmestellen 2. 11, 2. 21, 2. 3, 2. 41, 3. 1, 3. 43, 6. 45 und schwächer auch bei den Quellen 1. 4 kann daher mit einem erhöhten Schüttungsanteil von gespeichertem älterem Wasser erklärt werden. Freilich ist ein Teil dieser T-Anstiege auch auf Schwankungen des T-Gehalts im Niederschlag zurückzuführen, doch reicht dieser Einfluß allein nicht aus, um etwa den hohen Wert in 2. 31 zu erklären. Im übrigen stimmen diese Beobachtungen mit den Schlußfolgerungen aus den Tritiummittelwerten überein.

Die Thermalquelle 1. 46

Für die in einem Betonbecken gefaßte Thermalquelle 1. 46., die sich unmittelbar neben der Ljubljana befindet, liegt nur ein einjähriger Beobachtungszeitraum vor. Der niedrige Tritiumgehalt läßt darauf schließen, daß das Wasser der Thermalquelle zum großen Teil aus Niederschlägen vor der Kernwaffentestperiode stammt. Andererseits zeigt das Auftreten des Niederschlags-Tritiumpeaks vom Juni 1974, daß die Quelle auch Wasser geringer Verweilzeit, wahrscheinlich infiltrierte Flußwasser, führt. Dies wird auch durch die δD -Ganglinien bestätigt. Der relativ niedere mittlere δD -Wert (ca. -62%) deutet auf ein hochgelegenes Einzugsgebiet hin.

Eine C-14-Analyse im Mai 1975 ergab ein C-14-Modellalter von 16.350 ± 400 Jahren bei einem Tritiumgehalt von $1,3 \pm 0,3$ T.U. Unter Verwendung des entsprechenden Tritiumgehalts im Flußwasser der Ljubljana ergibt sich für den Zeitpunkt der Probennahme eine Mischung aus etwa 98,5% altem (tritiumfreiem) und 1,5% jungem Wasser.

Zusammenhang zwischen δD - und $\delta^{18}O$ -Werten

In Fig. 41 sind sämtliche Wertepaare der auf D und O-18 analysierten Karstwasserproben im δD - $\delta^{18}O$ -Diagramm dargestellt. Man erkennt, daß die überwiegende Mehrzahl der Wässer die Relation $\delta D = 8 \delta^{18}O + 12 \pm 1$ erfüllt und

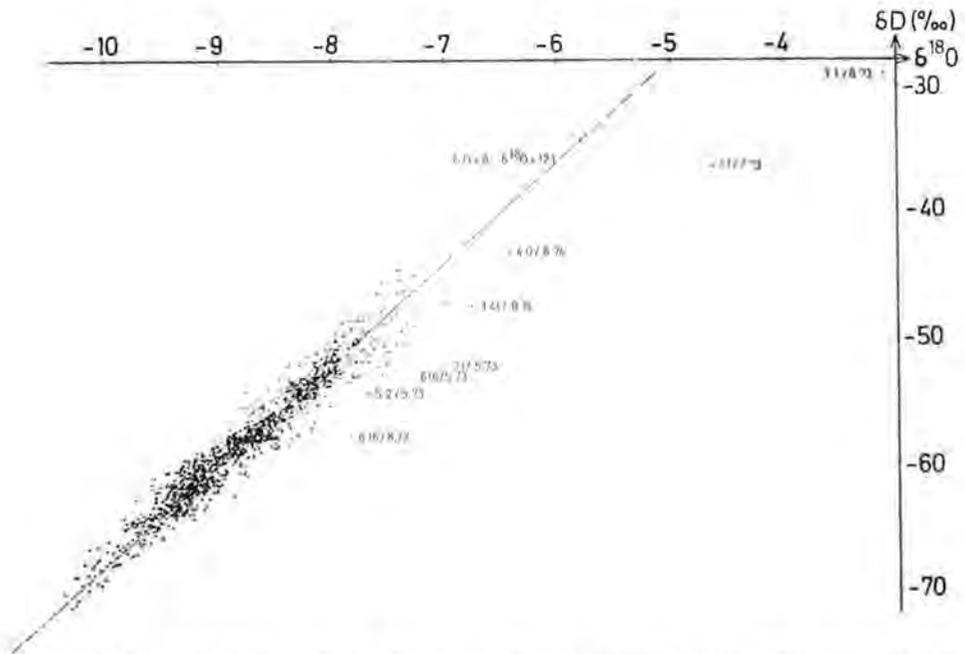


Fig. 41: δD — $\delta^{18}O$ -Relation der Wässer aus dem Untersuchungsgebiet. Die mit der Nummer der Probenahmestelle bezeichneten Punkte weisen auf eine erhöhte Verdunstungsrate hin.

Sl. 41: Razmerje δD ; $\delta^{18}O$ v vodah poskusnega območja. Točke, označene s številko zajemnega mesta, kažejo povišano razmerje evaporacije.

damit der Steigung der mitteleuropäischen Niederschlagsgeraden (s. DANSGAARD 1954) folgt. Der relativ hohe Wert $t = 12$ deutet bereits auf mediterrane klimatische Einflüsse hin.

Einige Werte liegen unterhalb der Ausgleichsgeraden. Dabei handelt es sich um Wässer, die vor der Probenahme einer intensiven Verdunstung in flachen Poljegebieten ausgesetzt waren. Solche Effekte treten demgemäß in den Abflüssen der periodischen Seen von Planina (3. 1) und von Cerknica (6. 16) meist kurz vor dem Trockenfallen der Schluckstellen auf.

Schlußbemerkung

Die Bearbeitung des umfangreichen Datenmaterials ist mit den gegebenen qualitativen Schlußfolgerungen noch nicht abgeschlossen. Der aufgezeigte Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluß und zwischen den einzelnen Karstwasserentnahmestellen und die sich daraus ergebenden hydrologischen Folgerungen für das Karstsystem können als Grundlage für spätere Modellrechnungen dienen.

2. 2. 7. Bakteriologische Untersuchungen (M. TRATNIK)

Einführung

Im Zusammenhang mit dem Studium und der Markierung der unterirdischen Karstwasserwege im Einzugsgebiet der Ljubljana wurden auch bakteriologische Untersuchungen durchgeführt, um die hygienische Situation des Karstwassersystems zu erfassen.

In der verfügbaren Fachliteratur finden sich verschiedene Publikationen, die sich mit dem Selbstreinigungsprozeß von Karstwässern beschäftigen, aber nur wenige können sich auf ein solches Ausmaß systematischer hygienischer Wasserkontrollen stützen, wie sie vom Autor in den Jahren 1974 bis 1975 im Untersuchungsgebiet durchgeführt wurden. Einige Ergebnisse bakteriologischer Untersuchungen betreffend Quellen von Wasserversorgungen und bestehende Wasserentnahmen im Slowenischen Karst wurden von D. NOVAK beschrieben (1969).

Methoden

A) Probennahme:

Die Proben wurden unter Anwendung aseptischer Methoden durch die HMZ-Gruppe Ljubljana gezogen und auf kürzestem Wege in das Labor gebracht. Die Probennahme erfaßte Hoch-, Mittel- und Niederwasserstände.

B) Untersuchungen:

a) die MPN-Bestimmung coliformer Bakterien in 100 ml Wasser erfolgte in drei Phasen:

— präsumptiver Test:

Wasserüberimpfung in Fermentationskanülen mit einem Laktose-Trip-tose-Nährbouillon bei $30 \pm 0,5^\circ \text{C}$ während 48 Std. \pm 2 Std.

— konfirmierter Test:

Überimpfung von selektiven EMB (Eosinmethylenblauagar).

— Endtest:

Identifizierung der coliformen Bakterien mit Hilfe von biochemischen Tests sowie Bestätigung der Präsenz des Fazies-Typus der *Escherichia coli* aufgrund des Eijkman-Tests (Mac Conkey $44,5 \pm 0,2^\circ \text{C}$, 24 ± 2 Std.).

Sämtliche isolierten *E.-coli*-Stämme wurden hinsichtlich der bekannten und häufigsten enteropathogenen *Escherichia* serologisch bestimmt. Zu diesem Behuf wurden die diagnostischen Sera für folgende Serotypen verwendet: 025 : K 11, 020 : K 84, 026 : K 60, 028 : K 73, 055 : K 59, 078 : K 80, 086 : K 61, 0111 : K 58, 0114 : K 90, 0115 : K ?, 0119 : K 69, 0124 : K 72, 0125 : K 70, 0126 : K 71, 0127 : K 63, 0128 : K 67, 0126 : K 78, 0142 : K 86, 0143 : K ?, 0146 : K ?, 0147 : K ?.

Die diagnostischen Sera wurden im Institut für Mikrobiologie der Medizinischen Fakultät der Universität Laibach aufbereitet.

b) Nachweis der Präsenz von Enterococci;

c) Nachweis der Präsenz von *Proteus* genus;

d) Nachweis der Präsenz von sulphitoreduktiver Clostridia;

e) Nachweis der Präsenz der *Pseudomonas aeruginosa*;

f) Bestimmung der Gesamtmenge aerober mesophiler Bakterien in 1 ml Wasser.

C) Bakteriologische Normen:

Als Richtlinie für bakteriologisch reines Wasser fanden nachstehende Kriterien Verwendung:

— MPN coliformer Bakterien: weniger als 161/100 ml; *Escherichia coli* (Eijkman +) : negativ;

— Absenz von *Enterococcus*, *Proteus* sp., sulphitoreduktiver Clostridia, *Pseudomonas aeruginosa*;

— Gesamtmenge der aeroben mesophilen Bakterien: weniger als 300/1 ml.

Resultate

Im Jahr 1974 wurden acht Serien (Jänner, Februar, April, Mai, Juli, August, September, Oktober/November), im Jahre 1975 drei weitere Serien (Februar, März, April) von Wasserproben aus Quellen, Schwinden und Oberflächenwässern des Untersuchungsgebietes gesammelt. Auf diese Weise wurden insgesamt 443 Proben, gezogen an 54 verschiedenen Entnahmestellen, untersucht. Die Meßresultate ergaben eine schlechte hygienische Qualität des Karstwassers. Von den 443 untersuchten Proben erreichten 94,13% nicht die Trinkwasserqualität. Von 54 Entnahmestellen führten nur 4,3% zeitweise nutzbares Wasser. Es ist nicht möglich, positive Schlüsse von dieser örtlich und zeitweilig besseren Qualität zu ziehen, sondern es kann nur festgestellt werden, daß vom hygienischen Standpunkt aus praktisch alle Quellen für eine Nutzung ungeeignet sind. Aus diesem Ergebnis können jedoch keine Schlüsse bezüglich des vermutlichen Zusammenhanges von Ponoren und Quellen gezogen werden.

Die folgende Aufstellung zeigt die Anwesenheit von Indikatoren fäkalischer und von Fäulnisvorgängen ausgehender Verunreinigung und die große Zahl aerobisch mesophiler Bakterien.

Anzahl der Proben	<i>E. coli</i>	<i>Proteus</i> sp.	Enterococcus	Sulphitoreductive clostr.	<i>Pseud. aerug.</i>	Gesamtzahl d. aerob. mes. Bakt. in 1 ml
443	361	44	11	29	7	393
in % der Proben	81,5%	9,9%	2,5%	6,5%	1,6%	88,7%

Die schlechte hygienische Qualität des Wassers ist vor allem der großen Gesamtzahl der aerobisch mesophilen Bakterien (88,7%) und der Kontamination mit dem fäkalen Typ *Escherichia coli* (81,5%) zuzuschreiben. Andere Stämme von Bakterien schienen in den geprüften Proben nur sporadisch bzw. weniger häufig auf, so z. B. *Proteus* sp. in 9,9%, sulphitoreduktive clostridia in 6,5%, *Enterococcus* in 2,5% und *Pseudomonas aeruginosa* in nur 1,6% der Proben. Unter den *Proteus*stämmen herrschten *Proteus vulgaris* und *Proteus mirabilis* vor, *Proteus morganii* wurde nur in drei Proben gefunden.

Alle abgesonderten *E. coli* wurden bezüglich ihrer enteropathogenen Herkunft geprüft. Enteropathogene *E. coli*, die Krankheiten, ja selbst Epidemien größeren Ausmaßes bei Kindern und Erwachsenen verursachen können, wurden in drei Fällen gefunden, nämlich 055 : K 59, 0146 : K ? und 028 : K 73.

Im Rahmen der durchgeführten bakteriologischen Untersuchungen wurden auch die Selbstreinigungsprozesse untersucht, wobei man herauszufinden trachtete, ob die Wasserqualität bei den Quellen besser war als bei den Ponoren. Eine übersichtliche Zusammenfassung der Resultate betreffend die Wasserkontamination (Gesamtzahl der aerobisch mesophilen Bakterien in ml) ergab die Unmöglichkeit eines solchen Vergleiches, da den Quellen das Wasser von verschiedenen Ponoren zufließt, die zur Zeit der Probennahmen unterschiedlich kontaminiert waren. Um einen Durchschnittswert der Kontamination der die Quelle alimentierenden Wässer zu erhalten, müßte man alle Quellen, ihre Kontamination und die gesamte Wassermenge kennen. Die Unterschiede zwischen dem Gesamtmittel der Kontamination aller in die Ponore fließenden Wässer, die die Quelle alimentieren, und der Kontamination der Quelle selbst könnte die Basis einer Anschätzung der Selbstreinigung bilden. Da aber weder alle

unterirdischen Wasserwege noch das Mischungsverhältnis der unterschiedlich kontaminierten Wässer bekannt sind, sind keine Schlüsse bezüglich der Selbstreinigungsprozesse möglich.

Zusammenfassung

443 Wasserproben wurden bakteriologisch untersucht. Die Untersuchungen ergaben eine schlechte hygienische Qualität aller geprüften Wässer. In den meisten Fällen waren coliforme Bakterien und eine exzessiv hohe Zahl aerobisch mesophiler Bakterien vorhanden. Unter den Anzeigen einer fäkalen Kontamination überwog *Escherichia coli*, gefolgt von *Proteus sp.*, sulphit-reduktiven clostridia, *Enterococcus* und *Pseudomonas aeruginosa*. Infolge des verkarsteten Untergrundes waren nicht genügend Daten vorhanden für die Erfassung eventueller Verbindungen zwischen Ponoren und Quellen oder um Aussagen bezüglich der Selbstreinigung der unterirdischen Wässer machen zu können.

2. 2. 8. Virologische Untersuchungen (M. MOZETIČ)

Einleitung

Wasser kann als Überträger pathogener Viren fungieren. Häufig ist es mit den Fäkalien von erkrankten Personen bzw. Virenträgern verunreinigt. Zahlreiche Epidemien wie beispielsweise die Virushepatitis oder Poliomyelitis sind neben sporadischen Infektionen durch Adeno-, Reo- sowie Enteroviren bekannt. Letztere können hämorrhagische Enterocolitis, Hautausschläge, Leberschäden, aseptische Meningitis usw. zur Folge haben.

Die derzeit bestehenden Normen bezüglich der Reinheit des Wassers und der Anzahl der coliformen Bakterien garantieren vom virologischen Standpunkt aus keine volle hygienische Sicherung des zur Verfügung stehenden Trinkwassers. Pathogene Viren können selbst im bakteriologisch einwandfreien Wasser vorkommen. Die Präsenz von Viren in über- bzw. unterirdischen Abwässern sowie im Trinkwasser ist unter Umständen schon ein Beweis fäkalischer Verschmutzung. Virologische Untersuchungen haben daher zunehmende Bedeutung im Rahmen der Erstellung von Bestimmungen der Trinkwassernormen (WHO — 1971).

Das Ljubljanicabecken stellt in jüngsten Jahren ein Problem im Zusammenhang mit der Aufrechterhaltung einer gesunden Trinkwasserversorgung dar. Zu Beginn des Monats November 1971 brach eine auf dieses Wasser zurückzuführende Epidemie von Virushepatitis im Gebiet der Vrhnika und von Logatec aus, die bis zur zweiten Hälfte des Monats Februar 1972 anhielt. Desgleichen sind aber auch Intestinalstörungen bei Kindern häufig. Die Sterblichkeitsrate unter der Bevölkerung von Vrhnika, deren Wasserversorgung vom örtlichen Wasserwerk aus erfolgt, betrug 104,6 von 1000 Einwohnern, während sich die jenes von obiger Wasserversorgung nicht abhängigen Bevölkerungsteiles als wesentlich geringer erwies, nämlich lediglich zwölf von 1000 Einwohnern (OPACIC ET al., 1974).

Material und Methoden

Zellkulturen. Allgemein anerkannte Methoden zur Virusisolierung wurden bei Zellkulturen des primären Amnions des Menschen, der kontinuierlichen Zelllinien simianischen Ursprungs GMK und Verozellen angewandt. Die Präsenz von Viren wurde im Versuch indirekt durch das Auftreten des zytopathischen

Effekts bzw. durch das Auftreten fleckenbildender Einheiten nachgewiesen.

Wasser. Wasserproben wurden im Einklang mit den bestehenden bakteriologischen Untersuchungen entnommen. Bakterien, Algen, Erdteile usw. wurden mit Hilfe eines Filtriervorganges durch Membrane, deren Porosität 1000 bzw. 600 nm betrug, entfernt. Das Filtrieren erfolgte mit elektrischen sowie Vakuumwasserpumpen.

Konzentrationsvorgang. Das gereinigte Filtrat wurde im Anschluß durch einen Membranfilter mit einer Maximalporengröße von 300 nm bzw. einer Minimalporengröße von 200 nm gefiltert (K. E. SCHNEWEIS & G. STIFTER, 1971). Auch wurden Membranfilter mit kleinerer Porengröße für die Konzentration bzw. Adsorption der in der untersuchten Wasserprobe möglicherweise vorhandenen Viren eingesetzt. Diese Filtriereluat wurden in der Folge in Zellkulturen eingimpft und einer Beobachtung von mehreren Tagen bzw. Wochen unterzogen.

Resultate

Die ersten Wasserproben wurden am 5. April 1973, die letzten am 5. Juni 1975 entnommen. 87 Proben zu 1200 ml wurden untersucht, die insgesamt 104,4 l ergaben. Alle Proben stammten aus mehreren Oberflächengerinnen sowie Quellen des Ljubljanicabeckens. Auf diese Weise konnten mehr als 19% aller Ljubljaniaquellen in der Umgebung von Vrhnika von der virologischen Untersuchung erfaßt werden.

Mit Hilfe der beschriebenen Membrankonzentrationsmethode war es möglich, sicherzustellen, daß sich die Mehrheit der Wasserproben — mit Ausnahme des Gorički potok und der Lipsenjščica beim Cerknica Polje — als virologisch negativ erwies.

Gorički potok: In den Jahren 1974/75 wurden dieser Wasserquelle zehn Proben entnommen und einer Untersuchung zugeführt. Die am 27. Februar 1974 entnommene Probe zeigte sich aufgrund der Membrankonzentrationsmethode als virologisch positiv. Dieses Virus zeitigte einen zytopathischen Effekt in den Zellkulturen, der für Enteroviren charakteristisch ist. Aufgrund dessen wurde eine Identifizierung mit verschiedenen überimmunen Antisera angestellt. Die isolierte Agens wurde mit dem Antiserum Poliovirus des Typus 3 zu 100% neutralisiert. Während der Untersuchungsdauer wurde eine obligatorische Polioimpfung bei Kindern durchgeführt und somit der vaccinale Ursprung dieser Agens in Betracht gezogen. Dies wurde auch durch logarithmische Titerunterschiede des isolierten Bakterienstammes, der bei 36° C bzw. 40° C kultiviert worden war, bestätigt, d. h., dessen reproduktive Kapazität bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen und dessen Abschwächung konnten ebenfalls nachgewiesen werden.

Lipsenjščica: Die Membrankonzentrationsmethode ermöglichte den Nachweis des Poliovirus des Typus 3, jedoch mit einem geringeren Titerlogarithmenunterschied, was die Vermutung auf einen Zwischentypus zuläßt. Wahrscheinlich war auch dieser Stamm vaccinalen Ursprungs, der zur selben Zeit wie dessen Vorgänger isoliert worden war.

Die von dem noch verbleibenden Rest wohl verdächtigste Wasserquelle war jene von Rovtarica und Staje in der Umgebung von Vrhnika. Selbst nach mehreren Durchgängen verursachten die Membranfiltereluat beider Gewässer einen zytotoxischen Effekt bei den einzelnen Kulturen, der jedoch zu einem späteren Zeitpunkt wieder verschwand. Das Ergebnis blieb trotz wiederholter Testierungen gleich.

Diskussion

In Anbetracht der erwähnten Problematik bezüglich der Versorgung der Bevölkerung in und um Vrhnika sowie Logatec mit gesundem Trinkwasser wäre es unzulässig, für Markierungsversuche irgendwelche selbst apathogene Viren zu verwenden. Sogar die unbekannt virologische Situation in den einzelnen Gewässern stellte für Markierungen eine Kontraindikation dar, und dennoch war man übereingekommen, daß aufgrund des Auftretens von epidemischer Virushepatitis Viren existent sein müßten. Eine Markierung unterirdischer Gewässer mit apathogenen Viren des Menschen wäre an sich nicht so sehr von der Hand zu weisen, doch ein derartiges Unterfangen in Zeiten allgemeiner Wasserverschmutzung ist ganz und gar unzulässig.

Diese Markierungsart wurde in Glamorshire und Wales eingesetzt, wobei als Markierungsmittel 10 l Bakteriophagen des Typus 2 (bakterielle Viren) für den *Aerobacter aerogenes* mit einer Ausgangskonzentration von 3,04 verwendet wurden. 10^{13} Bakteriophagen/ml kamen zur Anwendung. Diese Gewässer wurden auf einer Länge von 680 m markiert (W. KÄSS, 1975; R. MARTIN & A. THOMAS, 1974). Vom hydrogeologischen Standpunkt aus erwies sich dieses Experiment als durchaus ermutigend, doch unsere Untersuchungen waren lediglich mit der Problematik pathogener Viren des Menschen befaßt, während Bakteriophagen vornehmlich Untersuchungsgegenstand in bakteriologischen Laboratorien sind.

Die Isolierungsergebnisse bei Impfstoffpolioviren aus Gewässern des Ljubljani Beckens wiesen auf eine 8%ige Verunreinigung durch Fäkalien hin. Sollten systematisch virologische Untersuchungen aller Karstwässer im Ljubljani Becken bei Vrhnika angestellt werden, müßte deren Anzahl stark erhöht werden. In diesem Falle könnten die derzeitigen Virenschmutzstoffe zumindest teilweise als Markierungsmittel dienen. Ein Erfolg wäre schon damit erzielt, daß im Kampf gegen fäkalisches Verunreinigung auch gegen unzulässige Kanalisation, ungeeignete Anbringung oder Konstruktion von Senkgruben vorgegangen werden kann.

Während der zweijährigen virologischen Untersuchungen in den übrigen Bereichen, die sich über alle Jahreszeiten erstreckten, konnten selbst während der Sommermonate keine pathogenen Viren entdeckt werden, obwohl in dieser Zeit der Massentourismus einzusetzen pflegt und somit der höchste Prozentsatz an Infektionen durch Enteroviren gegeben ist.

2. 3. Durchführung und Ergebnisse des kombinierten Markierungsversuches 1975

2. 3. 1. Zweck und Programm der Markierung (F. HRIBAR)

Die umfangreichen Untersuchungen des Einzugsgebietes der Ljubljani in den Jahren 1972 bis 1974 haben die engere Auswahl des Gebietes und die Ausarbeitung des genauen Programms für den umfangreichen kombinierten Markierungsversuch der Karstwässer Ende Mai 1975 ermöglicht.

Für die Auswahl der Gebiete und der Markierungsmittel waren die Daten über die vorhergehenden Markierungsversuche, ferner die hydrographischen, hydrochemischen und hydrogeologischen Eigenheiten sowohl des gesamten Flußgebietes als auch dessen Teilgebiete wichtig. Die allseitig in Erwägung

gezogenen Umstände waren die Grundlage für die Ausführung des Versuches mit der Markierung der wichtigsten Ponore in den Poljen von Cerknica, Planina, Logatec und auf dem Plateau von Rovte (siehe Tabelle 13), woher die Gewässer durch den Karstuntergrund direkt in die Quellen der Ljubljana bei Vrhnika fließen.

Mit dem kombinierten Markierungsversuch sollten vor allem

- die Kenntnisse über die unterirdischen Verbindungen zwischen den Ponoren und den Quellen überprüft und vervollständigt werden,
- die Wassermengen, welche von den verschiedenen Ponoren in die einzelnen Quellen bei einer bestimmten hydrologischen Situation fließen, bestimmt werden,
- die Kenntnisse über die hydrologischen und hydrogeologischen Eigenheiten des Karstes zwischen den Poljen von Cerknica, Planina, Logatec, dem Plateau von Rovte und den Quellen der Ljubljana vervollständigt werden,
- die Anwendbarkeit der schon erprobten und der neuen Verfolgungsmethoden und Markierungsmittel verglichen und
- die Methodik der Untersuchung der Karstwässer vervollkommen werden.

Man hat schon früher versucht, die unterirdischen Wasserverbindungen im Einzugsgebiet der Ljubljana mit zahlreichen Färbungsversuchen an einzelnen Ponoren bei verschiedenen hohen Wasserständen kennenzulernen. Die Färbungsversuche sind mit verschiedener Genauigkeit der Konzentrationsbestimmungen durchgeführt worden, die Durchflüsse wurden meistens nur geschätzt. Die Mengen der in den Quellen zutage getretenen Markierungsmittel sind niemals berechnet worden, als Markierungsmittel wurde gewöhnlich Uranin verwendet. Alle vorherigen Markierungsversuche haben daher nur qualitative, nicht aber quantitative Daten geliefert, mit denen allein die Kenntnisse über die Hydrologie dieses Teiles des klassischen Karstes praktisch und theoretisch vervollkommen werden können.

Zwölf verschiedene Ponore sind aufgrund der bisherigen Versuchsuntersuchungen beschildert worden. Unter den größeren Talponoren des Sees von Cerknica, welche das Wasser direkt in die Quellen der Bistra (1. 1), Lubija (1. 2) und Ljubljana (1. 3, 1. 4) ableiten, wurde für den kombinierten Markierungsversuch der bisher noch nie gefärbte Ponor Vodnos (6. 16) ausgesucht. Uranin als das besterprobte Markierungsmittel wurde hier wegen des unbekannteren Wasserabflusses durch den Boden des Sees verwendet.

Das Polje von Planina weist eine ganze Reihe von Ponoren der Unica auf, darunter die größten, doch nur bei hohem Wasserstand aktiven, im Nordteil des Poljes bei Podstene (3. 1). Bei niedrigem Wasserstand verliert sich das Wasser der Unica gänzlich in einer Reihe von Wasserschlängern am Nordostrand des Poljes. Mit der Markierung der wesentlichsten Ponor-Zonen im Polje von Planina wollten wir feststellen, ob alle Gewässer des Poljes von Planina zusammen in die gleichen Quellen fließen oder ob sie unterirdisch getrennt fließen und in verschiedenen Quellen wieder zutage treten. Die Wasserschlänger wurden für die Markierung besonders mit Rücksicht auf ihre Lage ausgesucht. Milavčevi ključi (3. 42) stellt die erste größere Ponorgruppe dar und wurde mit Rhodamin FB markiert. Ribce (3. 43) ist die nächste größere Gruppe mit ähnlicher Funktion, hier wurde die Anwendbarkeit braun und grün gefärbter Sporen erprobt. Dolenje Loke (3. 41) sind die letzten ausgiebigen Wasserschlänger der Unica am Nordostrand des Poljes, sie wurden mit dem bisher im Dinari-schen Karst noch nicht verwendeten Tinopal CBS-X markiert. Für den Wasserschlänger Laška Žaga (3. 21) auf dem Dolomit-Teil des Poljes, etwa 10 m

Tabelle 13: Übersicht über die positiv verlaufenen Markierungsversuche im unmittelbaren Hinterland der Ljubljana-Quellen bis zum Mai 1975 (nach A. ŠERKO 1946, I. GAMS 1965, N. ČADEŽ 1973).

Datum	Ponor	Quelle	erster Durchgang in Stunden	Geschwindigkeit cm/s	Art des Tracers kg
Cerkniško Polje 14. 8. 1957	Ponor 6.21 Q = 0,148 l/s	1.1	132	4,1	Uranin 30
		1.2	159	3,6	
		1.43	177	3,6	
9. 8. 1959	Ponor 6.18 Q = ?	1.1	101	5,1	Uranin 45
		1.2	113	5,5	
		1.22	137	4,1	
		1.4	161	3,6	
28. 8. 1961	Ponor 6.033 Q = ?	1.1	180	3,5	Uranin 35
		1.2	204	3,3	
		1.4	204	3,3	
20. 4. 1964	Ponor 6,0 Q = 3,54 m ³ /s	5.4	19	3,4	Uranin 39
		5.2	17	3,8	
		5.3	41	1,6	
		3.91	53	3,9	
		3.7	47	4,4	
		1.37	138	3,9	
		1.4	101	5,3	
Planinsko Polje 24. 6. 1912	Ponor 3.41 Q = ?	1.3	140	2,5	?
		1.4	119	2,8	
7. 10. 1938	Ponor 3.1 Q = 9,5 m ³ /s	1.36	30	9,1	Uranin 4,5
		1.44	30	8,8	
21. 10. 1938	Ponor 3.42 Q = ?	1.36	167,5	2,1	Uranin 3
		1.45	167,5	2,0	
14. 4. 1965	Ponor 3.42 Q = 17,2 m ³ /s	1.1	62	5,1	Uranin 25
		1.2	62	5,7	
		1.42	49	6,4	
		1.43	49	6,4	
		1.44	67	5,0	
		1.3	91	3,8	
Petkovšičica 23. 9. 1938	Ponor 2.1 Q = 15 l/s	1.31	172,5	1,1	Uranin 1,5
Rovtarica 14. 12. 1938	Ponor 2.2 Q = 45 l/s	1.31	99	2,1	Uranin 1,5
Hotenka 14. 7. 1953	Ponor 2.3 Q = 5 l/s	1.3	348	0,8	Uranin 23,7
		1.4	384	1,0	
		1.21	384	0,9	
Logašičica 29. 4. 1951	Ponor 2.41 Q = ?	1.36	66	2,8	Uranin 7
		1.37	66	2,7	
		1.44	67	2,5	
		1.43	57	3,2	
		1.42	57	3,3	
		1.21	61	3,3	

abseits des Unicaflußbettes, wurden Detergentien als Markierungsmittel bestimmt. Der Ponor Strževice bei Podstene (3.1), der größte mit periodischer Wasserführung, war am Tage der Markierungsversuche der günstigste und wurde mit einer Indium-Lösung markiert. Sicherheitshalber wurde in diesen Ponor noch Lithium-Salz eingespeist.

Der Bach Logašnica versickert im Polje von Logatec in der Ponorgruppe Jačka (2.41) und wurde mit Eosin markiert. Die entfernteste, größere Schwinde Hotenka (2.31) auf dem Plateau von Rovte wurde mit Amidorhodamin G extra markiert. Der ziemlich große Abstand zwischen den beiden Bächen sollte das gleichzeitige Zutreten beider Markierungsstoffe in den Quellen vereiteln. Žejški potok (2.32) und Pikeljšnica (2.51), zwei kleinere Schwinden auf der Wasserscheide zwischen den Flüssen Ljubljana und Idrija, wurden für die Markierung mit roten und blauen Sporen ausgesucht. Zwei nahe den Quellen gelegenen Schwinden, Rovtarica (2.21) und Petkovščica (2.11), wurden mit Stoffen beschickt, die mit Rücksicht auf ihren Preis und ihre Menge für kleinere Durchflüsse am geeignetsten sind, und zwar die Rovtarica mit einer Lösung radioaktiven Chroms, die Petkovščica mit Kaliumsalz.

Die hydrologische Lage des Ponors und seine Entfernung von den Ljubljana-Quellen war für die Auswahl der Art und der Menge der Markierungsstoffe entscheidend. Die beiläufige Zeit des unterirdischen Durchflusses und die durchschnittliche Verdünnung des Markierungsstoffes, beides für ein positives Ergebnis des Versuches von Bedeutung, wurden aufgrund der Resultate älterer Markierungsversuche berechnet. Bei der Verwendung der organischen Farbstoffe wurden auch deren Besonderheiten bezüglich des Nachweises berücksichtigt.

2.3.2. Die meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse während des Markierungsversuches vom 26. Mai bis 10. Juli 1975

(F. BERNOT, F. LEWICKI, A. PIČININ, K. ŽIBRIK)

Die meteorologischen Daten aus Babno polje, Postojna und Vrhnika illustrieren die meteorologischen Verhältnisse des Ljubljana-Flußgebietes.

Im Vergleich zum langjährigen Mittel war der Monat Mai im ganzen Flußgebiet zu warm, der Monat Juni etwas zu kühl. Im Juli war der südliche Teil des Flußgebietes etwas zu kühl, der mittlere und nördliche Teil aber etwas zu warm. Die monatlichen Niederschlagsmengen im Mai, Juni und Juli im Vergleich mit dem langjährigen Mittel zeigt Fig. 42.

Im Mai 1975 war das Ljubljana-Flußgebiet übermäßig feucht. Der südliche und mittlere Teil des Flußgebietes haben im Juni zuwenig Niederschläge erhalten, während der nördliche Teil eine überdurchschnittliche Regenhöhe aufwies. Im Juli fielen im gesamten Flußgebiet reichlich Niederschläge.

Die hydrologischen Untersuchungen sind in der Zeit des kombinierten Markierungsversuches nach der gleichen Methode wie bei den Untersuchungen in den Jahren 1972 bis 1975 vorgenommen worden. Insgesamt sind 710 Durchflüsse gemessen worden, so daß die Ab- und Durchflußverhältnisse der einzelnen Hydrosysteme zur Zeit des Versuches überprüft werden konnten. Die tägliche Schüttung der Quellen diente für die Mengenberechnung der zutage getretenen Markierungsmittel und für die Feststellung, wie die oberflächlichen und unterirdischen Retentionen den Zu- und Abfluß und andere hydrologische Verhältnisse beeinflusst haben. Für die Bestimmung der Abflußkoeffizienten

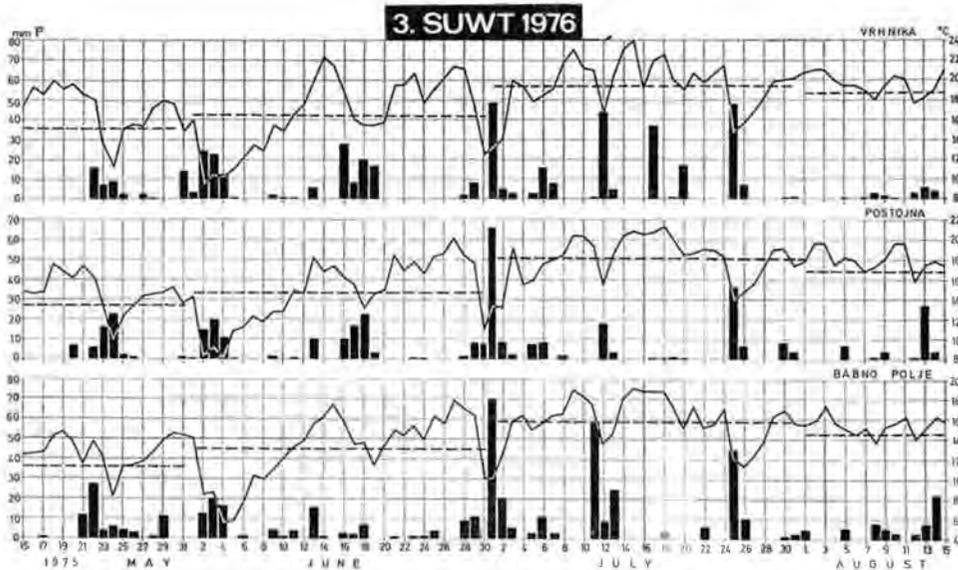


Fig. 42: Lufttemperatur (Tagesmittel) und langjähriges Monatsmittel und tägliche Niederschläge vom 15. Mai bis 15. August 1975, gemessen in den Stationen Vrhnika, Postojna und Babno Polje.

Sl. 42: Srednje dnevne in srednje mesečne temperature zraka ter dnevne količine padavin na Vrhniki, v Postojni in na Babnem polju za čas med sledinim poskusom 1975.

haben wir uns für die einzelnen Hydrosysteme der Messungen in folgenden Niederschlagsgebieten bedient:

1. Das Gebiet von Lož	248,5 mm	46,0 Mill. m ³
2. Das Gebiet von Bloke	244,9 mm	11,5 Mill. m ³
3. Das Gebiet von Cerknica	292,2 mm	70,6 Mill. m ³
4. Das Gebiet des Rak-Baches	292,2 mm	8,0 Mill. m ³
5. Das Gebiet von Pivka und der Javorniki-Zug	265,5 mm	78,3 Mill. m ³
6. Das Gebiet von Planina	306,6 mm	20,7 Mill. m ³
7. Das Gebiet von Logatec und Rovte	311,8 mm	37,4 Mill. m ³
8. Das Gebiet von Menešija mit den Vrhnika-Quellen	297,9 mm	36,8 Mill. m ³

Die Regenperioden und die in diesen Zeiten gemessenen Niederschlagshöhen zeigt Fig. 43.

Die gewonnenen Werte der Abfluskoeffizienten bewegen sich in den Grenzen der Wahrscheinlichkeit.

Die Regenperioden während des Markierungsversuches, und zwar vom 31. Mai bis zum 4. Juni, vom 16. Juni bis zum 19. Juni und vom 28. Juni bis zum 3. Juli haben die Veränderung des Wasserregimes beeinflusst. In den ersten zwei Regenperioden waren die Niederschläge nur im Versuchsgebiet intensiver, während die maximalen Niederschläge am 1. Juli das ganze Untersuchungsgebiet der Ljubljana betrafen. An diesem Tag haben die meteorologischen Stationen um 7 Uhr früh folgende maximale Niederschläge registriert:

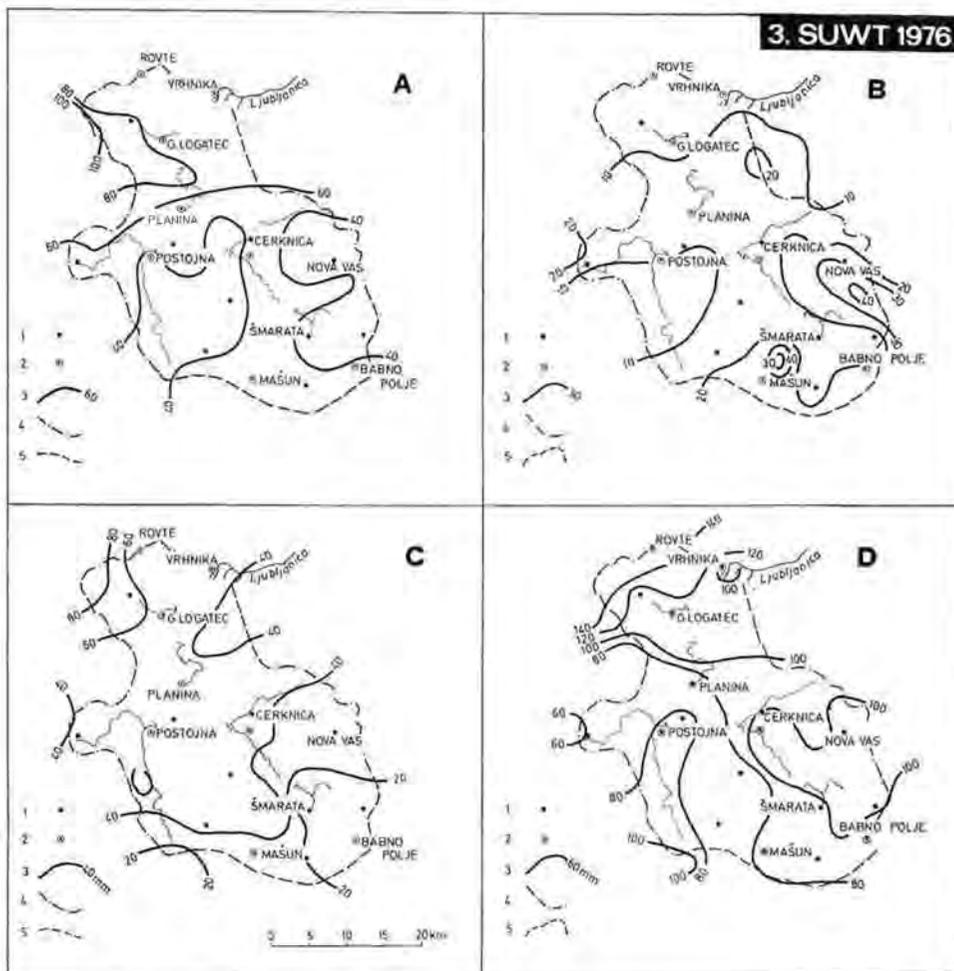


Fig. 43: Niederschlagskarten für Regenperioden während des Versuches 1975. Die zusammengefaßten Regenzeiten sind: 29. 5.—3. 6. (A), 10. 6.—13. 6. (B), 14. 6.—18. 6. (C) und 20. 6.—2. 7. 1975 (D). 1 — Niederschlagsmeßstation, 2 — Meteorologische Meßstation, 3 — Isohyete mit bezeichneter Niederschlagshöhe, 4 — Oberflächliche Wasserscheide, 5 — Karstwasserscheide.

Sl. 43: Padavinske karta (A—D) za deževna obdobja med sledilnim poskusom 1975. 1 — padavinska postaja, 2 — meteorološka postaja, 3 — izohieta z označeno količino padavin, 4 — površinsko razvodje, 5 — kraško razvodje.

	täglich	einstündig
Postojna	65,8 mm	35,4 mm
Dolenje jezero	87,3 mm	36,5 mm
Nova vas	96,0 mm	35,7 mm
Šmarata	76,8 mm	21,5 mm
Babno polje	68,5 mm	34,8 mm
Leskova dolina	62,2 mm	29,4 mm
Mašun	73,9 mm	26,2 mm

Die Niederschläge haben die Durchflüsse vergrößert, die die Tracer aus dem Untergrund ausspülten.

Mit dem gleichen Verfahren wie bei den vorhergehenden hydrologischen Untersuchungen (2. 2. 1.) sind die spezifischen Abflüsse (q in $l/sek \cdot km^2$) für die einzelnen Hydrosysteme bestimmt und ähnliche Abweichungen festgestellt worden. Die Wasserverluste ($E + T$ in mm) für die einzelnen Hydrosysteme und für das ganze Untersuchungsgebiet sind aufgrund der bekannten Niederschläge und Abflüsse ausgerechnet worden. Obwohl der Markierungsversuch vom 26. Mai bis zum 10. Juli dauerte, weshalb eine stärkere Verdunstung erwartet werden konnte, bleiben die Verluste merklich unter den normalen Werten. Teilweise könnte diese Abweichung mit der oberflächlichen und unterirdischen Retention erklärt werden, teilweise liegt dies aber in dem Umstand, daß die Verdunstungshöhe noch nicht genügend bekannt ist (Fig. 44).

Tabelle 14: Der unmittelbare Beitrag der einzelnen Hydrosysteme zu den Ljubljana-Quellen bei Vrhnika.

Hydrosystem	m^3/s	Beitrag Mill. m^3/s	%
1. Das Gebiet von Lož	4,66	18,52	11,7
2. Das Gebiet von Bloke	1,23	4,89	3,1
3. Das Gebiet von Cerknica	8,96	35,60	22,5
4. Das Gebiet des Rak-Baches	0,69	2,74	1,7
5. Das Gebiet von Pivka und der Javornik-Berge	11,74	46,66	29,4
6. Das Gebiet von Planina	2,73	10,85	6,9
7. Das Gebiet von Logatec und Rovte	4,85	19,28	12,2
8. Das Gebiet von Menešija mit den Quellen von Vrhnika	4,99	19,83	12,5
Z u s a m m e n	39,85	158,37	100,0

Die Berechnung des Abflusses aus dem Polje von Cerknica hat gezeigt, daß zur Zeit des Markierungsversuches 29% direkt, 71% aber über Rakov Škocjan in die Ljubljana-Quellen bei Vrhnika abgeflossen sind. Zur Zeit des Versuches war das Polje teilweise überschwemmt, so daß der Abfluß konstant war.

Aus dem Karsthinterland der Ljubljana sind von der gesamten Wassermenge von 158,37 Mill. m^3 in folgende Quellen abgeflossen:

Bistra (1. 1)	35,01 Mill. m^3	oder 22,1%
Lubija (1. 2)	30,28 Mill. m^3	oder 19,1%
Velika Ljubljana (1. 4)	59,89 Mill. m^3	oder 37,8%
Mala Ljubljana (1. 3)	33,19 Mill. m^3	oder 21,0%

Aufgrund der täglichen und gleichzeitigen Messungen der Durchflüsse zur Zeit des Feldversuches sind die täglichen Durchflüsse bei den Schwinden und Quellen des Untersuchungsgebietes bestimmt worden.

Zwecks Vergleiches mit den Ljubljana-Quellen bei Vrhnika werden im folgenden auch die charakteristischen Durchflüsse bei den Schwinden 2. 31 und 2. 32 sowie im Idrijca- und Vipavafluß angeführt:

	Q_n in m^3/s	Q_s in m^3/s	Q_v in m^3/s
1. Logaštica-Schwinde	0,32	0,73	7,18
2. Petkovec-Schwinde	0,06	0,45	6,18
3. Rovtarica-Schwinde	0,10	0,59	9,15
4. Hotenka-Schwinde	0,06	0,39	3,10
5. Idrijca — V. P. Podroteja	2,00	12,1	116
6. Vipava — V. P. Vipava	2,66	6,69	37,4

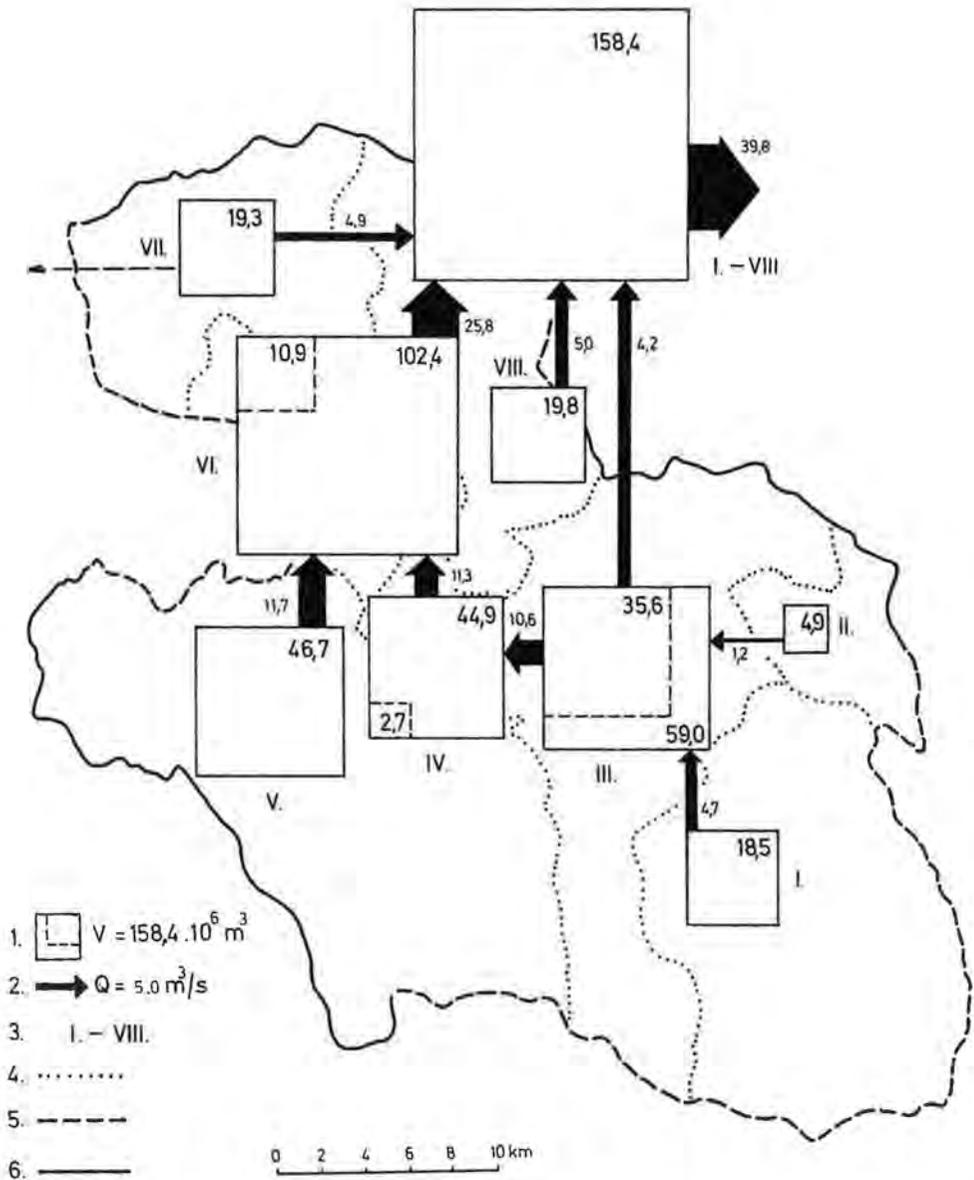


Fig. 44: Der Abfluß aus dem Einzugsgebiet der Ljubljana während der Versuchszeit vom 26. Mai bis zum 10. Juli 1975. 1 — Gesamtabfluß in 10^6 m^3 , 2 — Schüttung in m^3/s , 3 — I—VIII, d. h. berechnete hydrologische Einzugsgebiete, 4 — Abgrenzung der hydrologischen Teilbereiche, 5 — angenommene Wasserscheide in den verkarsteten Gebieten, 6 — effektive Wasserscheide.

Sl. 44: Odtoka voda iz kraškega zaledja Ljubljane v času sledilnega poskusa od 26. 5. do 10. 7. 1975. 1 — celotni odtok $V = 18,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, 2 — pretok $Q = 10,2 \text{ m}^3/\text{s}$, 3 — I—VIII kalkulatívna hidrološka območja, 4 — ... meja hidroloških območij, 5 — kraška razvodnica, domnevna, 6 — površinska razvodnica.

Schlußfolgerung

Die Ergebnisse der hydrologischen Untersuchungen zur Zeit des kombinierten Markierungsversuches bestätigen die Feststellungen der vorhergehenden hydrologischen Untersuchungen. Bei mittlerem Wasserregime im ganzen Untersuchungsgebiet waren für das Experiment günstige Durchflußverhältnisse sowohl auf der Oberfläche als auch im Karstuntergrund vorhanden.

2. 3. 3. Die beschickten Ponore und beobachteten Quellen sowie die angewandten Tracer (F. HRIBAR)

Nach vorheriger Absprache mit den heimischen und auswärtigen Mitarbeitern wurde ein detaillierter Plan für den simultanen Markierungsversuch, der im allgemeinen am 27. Mai 1975 mit den Einspeisungen um ca. 15 Uhr bei den Ponoren begann, ausgearbeitet (Tabelle 15). Die genaue Einspeisungszeit ist bei jedem Ponor separat angeführt.

Die Ponore sind vorher für die ungestörte und schnelle Einspeisung von besonderen Gruppen hergerichtet worden. Andere Gruppen haben alle notwendigen hydrologischen Messungen vorgenommen. Die vorbereiteten Markierungsmittel wurden schon vorher zu den Beschickungsstellen transportiert, so daß eine Kontamination unmöglich war. Über den Verlauf der Einspeisungen ist ein Protokoll geführt worden.

Die Ponore.

6. 16 — Vodonos. Der Ponor befindet sich im Polje von Cerknica beim Dorfe Dolenje Jezero. Er besteht aus mehreren Erdfällen, die sich ständig in den 8 m dicken Quartärablagerungen, die die Malmkalke bedecken, weiterentwickeln. Zur Zeit der Einspeisung waren die Löcher beinahe bis oben mit Wasser gefüllt ($H = 516$ cm). Der Seespiegel mit der Quote 549,43 ist ca. 260 m höher als die Quellen der Bistra und Ljubljana. Es war unmöglich, den unterirdischen Abfluß am Grund des Ponors zu messen. Das Einbringen der Lösung von 51,2 kg Uranin durch ein Rohr in den Grund des am meisten aktiven Loches dauerte von 14.55 bis 15.25 Uhr, wobei die Farbe überhaupt nicht zum Wasserspiegel emporstieg, sondern immer sofort abgeflossen ist. Die Beschickung wurde von den Geologen D. NOVAK, R. VERBOVŠEK und P. KRIVIC vorgenommen.

3. 42 — Milavčevi ključi sind Ponore am Nordostrand des Poljes von Planina, am unmittelbaren Kontakt des Liaskalkes mit dem Triasdolomit an der Verwerfung von Idrija. Die Unica nähert sich hier dem Felsrand des Poljes und das Wasser fließt direkt in die Ponore in den Felsen ab. Zur Zeit der Einspeisung flossen in diese Ponore 4,94 m³/s Wasser ($H = 319$ cm auf der Quote 443,815). Das Wasser wurde zwischen 15.00 und 15.13 Uhr mit 26,4 kg Rhodamin FB an der Stelle gefärbt, wo es am schnellsten in den Untergrund verschwindet. Die Beschickung leitete D. MEDVEŠČEK.

3. 43 — Ribce ist die nächste Ponorgruppe, die sich im Kalk der unteren Kreide ebenfalls in der Zone der Verwerfung von Idrija befindet. Beim Wasserstand $H = 367$ cm betrug der Abfluß in diese Ponore 4,52 m³/s. Die Einspeisung war eigentlich im östlichen Abfluß des Ponores vorgesehen. Da jedoch der Abfluß in dem nahen, 4 m tiefen, ummauerten Wasserschlinger schneller war, wurden hier zwischen 15.00 und 15.40 Uhr eine Suspension 10 kg grüner Sporen in 60 l Wasser und eine Suspension von 10 kg braunen Sporen in 40 l Wasser unter der Leitung von J. ZÖTL und M. KOLBEZEN eingebracht.

3. 41 — Dolenje Loke ist die letzte Ponorgruppe am Nordostrand des Poljes von

Tabelle 15: Die Einspeisungsverhältnisse am 27. Mai 1975.

Tracer		Einspeisungsstelle							
Art	Menge	No.	Name	Q = m³/s	Absolute Höhenlage des Wasserspiegels	Entfernungen zu den Quellen			
						No.	km	m	‰
Uranin A (BASF 73 B 1687)	51,2 kg	6.16	Cerkniško Polje Vodonos	ca 4,24	549,43	1.11	19,1	257,33	13,47
						1.43	20,45	260,09	12,72
						1.37	21,0	260,17	12,39
Rhodamin FB (BASF 73 B 1768)	26,4 kg	3.42	Unica — Milavčevi ključi	4,94	443,815	1.13	12,3	151,61	12,33
						1.43	12,2	154,47	12,66
						1.44	12,1	152,15	12,57
Grüne Sporen Braune Sporen	10 kg 10 kg	3.43	Unica — Ribce	4,52	443,702	1.13	12,2	151,50	12,42
						1.42	12,0	152,85	12,73
						1.37	12,25	154,44	12,61
Tinopal CBS-X	48 kg	3.41	Unica — Dol. Loke	5,67	443,572	1.21	11,8	151,42	12,74
						1.43	11,15	154,49	13,85
						1.37	11,35	154,31	13,59
Detergentien (Marlon Type 375)	40 kg	3.21	Unica — Žaga	0,173	443,132				
LiCl Inj. — 2. 6. 1975	100 kg	3.1	Unica — Podstene	0,487	440,170	1.41	10,6	150,30	14,18
						1.43	10,3	151,10	14,66
Indium	400 gr	3.1	Unica — Podstene	1,406	440,430	1.45	10,2	149,35	14,64
						1.37	10,5	151,17	14,39
Eosin FA (BASF 69 B 8722)	25,5 kg	2.41	Logaščica (Jačka)	0,139	441,371	1.21	7,1	149,22	20,4
						1.43	6,4	152,03	23,7
						1.37	6,3	152,11	24,14
Amidorhodamin G extra	26 kg	2.31	Hotenka	0,042	536,588	1.45	12,8	245,50	19,10
						1.32	12,3	240,14	19,52
						11.1	10,3	208,36	20,23
Rote Sporen	10 kg	2.32	Kmetova jama (Žejski potok)	0,023	546 (po karti)	1.44	12,1	254,34	21,0
						1.32	11,3	249,56	22,1
						11.1	9,7	217,78	22,33
Blaue Sporen	25 kg	2.51	Pikeljska voda	ca 0,020	635	1.3	12,6	343,34	26,41
						1.34	12,1	339,54	27,54
						11.1	8,0	306,78	38,35
⁵¹ Cr	3 Ci (conc. 15 mCi/ml)	2.21	Rovtarica	0,032	568,132	1.32	7,35	271,69	36,96
						1.34	7,4	272,67	36,84
KCl	3000 kg	2.11	Petkovščica	0,019	505,691	1.32	6,3	208,75	33,13
						1.34	6,4	209,73	32,70

* Nummer, Entfernung in km, Höhenunterschied in m, Gefälle in ‰.

Planina. Hier floß die Unica mit $5,67 \text{ m}^3/\text{s}$ in die Spalten des Kalkes der unteren Kreide ($H = 140 \text{ cm}$, absolute Höhe des Wasserspiegels $443,572 \text{ m}$). 48 kg aufgelösten Tinopals CBS-X wurden zwischen 15.00 und 15.30 Uhr in den letzten ummauerten Ponor eingespeist. Das Markierungsmittel floß ohne Stauung in den Ponor. Leiter der Einspeisung waren M. ZUPAN und K. DROBEŽ.

3.21 — Ponor Žaga ist der Abschluß des Seitenbettes der Unica unterhalb des Dorfes Laze. Der Ponor befindet sich in der Quartärablagerung, welche den Triasdolomit bedeckt. 40 kg Detergent Marlon, Type 375, aufgelöst in 350 l Wasser sind bei einem Durchfluß von $0,173 \text{ m}^3/\text{s}$ ($H = 183 \text{ cm}$, provisorischer Wassermesser) eingespeist worden. Das markierte Wasser ist in 4 Minuten abgeflossen. Leiter der Injektion waren W. KÄSS und E. KR PAN.

3.1 — Podstene. Der Fluß Unica hat auf der Nordseite des Poljes von Planina einen sehr unbeständigen Lauf. Das Wasser versickert oft, bevor es die dortigen Ponore erreicht. Für die Einspeisung waren daher jene Ponorlöcher vorgesehen, die zur Zeit des Verfolgungsversuches aktiv waren. Am 27. Mai versickerte die Unica endgültig im Wasserschlinger Štrževica, daher wurde dieser markiert. 400 g Indium in 40 l Wasser aufgelöst wurden als Indium-EDTA-Komplex zwischen 15.00 und 15.05 Uhr bei einem Abfluß von nur $0,050 \text{ m}^3/\text{s}$ ($H = 69 \text{ cm}$ und $Q = 1,406 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen beim v. p. Jakovica) in den Wasserschlinger Štrževica eingespeist. Die Eingabe leiteten R. GOSPODARIČ und R. APEL.

Der Versuch wurde wegen der ungünstigen hydrologischen Situation am 27. Mai 1975 und des noch nicht genügend erprobten Indiums am 2. Juni 1975 um 14.00 Uhr wiederholt, und zwar sind 100 kg im Wasser aufgelösten Lithiumsalzes (LiCl) in den gleichen Ponor eingespeist worden. Leiter der Einspeisung waren R. GOSPODARIČ und B. BRADAČ.

2.41 — Jačka ist die Ponorgruppe im Schlußteil des Schwindenbaches Logaštica im Polje von Logatec. Die Ponore befinden sich mit ihrem oberen Teil in der Quartärablagerung, mit dem unteren im obertriassischen Dolomit. Der am niedrigsten gelegene Wasserschlinger befindet sich auf der Quote $441,371 \text{ m}$. Um den Beobachtern des Markierungsversuches die Besichtigung der Einspeisung zu ermöglichen, ist das Wasser in der Jačka eine Stunde vor der Einspeisung an den anderen Stellen gefärbt worden. $25,5 \text{ kg}$ in 100 l Wasser aufgelösten Eosins wurden bei einem Durchfluß von $0,139 \text{ m}^3/\text{s}$ (v. p. Martin Hrib $H = 84 \text{ cm}$) in vier Minuten eingespeist, in dieser Zeit ist die Lösung vollkommen in den Untergrund verschwunden. Leiter der Einbringung war F. BERNOT.

2.31 — Ponor Hotenka. Der Bach Hotenka verschwindet in einem Wasserschlinger am Schluß seines niedrigen Bettes in der Anschwemmungsebene beim Dorf Hotedrščica. Der Alluvium bedeckt hier den unteren Kreidekalk in der tektonischen Zone der Verwerfung von Idrija. Am Tage der Einspeisung betrug bei der v. p. Hotedrščica ($H = 93,5 \text{ cm}$) der Durchfluß $Q = 0,042 \text{ m}^3/\text{s}$, jedoch den Schlußteil des Bettes erreichten nur $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Wasser wurde daher vorher aufgestaut, um die vorbereitete Lösung von 26 kg Amidorhodamin G extra in 100 l Wasser wegspülen zu können. Da die abdichtende Wand zu früh beseitigt wurde, ist das akkumulierte Wasser zu schnell abgeflossen. Die Einspeisung wurde daher mit Hilfe einer Pumpe in der Zeit von 12.50 bis 14 Uhr vorgenommen. Der beschickte Ponor Hotenka befindet sich auf Quote $536,588$, somit 242 bis 246 m höher als die Quellen der Mala (1.3) und Velika (1.4) Ljubljana. Da die Richtung des Abflusses der unterirdischen Hotenka noch gänzlich unbekannt war und sowohl in die Quellen bei Vrhnika als auch in das Polje von Planina und eventuell auch in die Idrija (?) erfolgen konnte,

wurde trotz des kleinen Durchflusses absichtlich eine ziemlich große Menge des Markierungsstoffes mit einem sehr hohen Nachweisgrad unter Leitung von H. BEHRENS und M. KOGOVŠEK eingespeist.

2. 32 — Der Ponor des Baches Žejski potok befindet sich auf Quote 546, etwa 250 m höher als die Quellen der Mala Ljubljana (1. 3). Das Wasser fließt in die Höhle Kmetova jama im unteren Kreidekalk eines tektonischen Fensters. Der unterirdische Lauf ist noch nie mit einem Markierungsmittel beschickt worden, doch wurde vermutet, daß das Wasser dieser Schwinde in die unterirdische Hotenka mündet. Bei einem Durchfluß von $Q = 0,023 \text{ m}^3/\text{s}$ (v. p. Žejski potok, $H = 66 \text{ cm}$) wurde zwischen 15 und 15.15 Uhr eine Suspension von 10 kg rot gefärbten Sporen und Wasser unter Leitung von H. HÖTZL und der Mitarbeit von Studenten aus Karlsruhe eingespeist.

2. 51 — Der Ponor Pikeljska voda befindet sich im unteren Kreidekalk, der über dem obertriassischen Dolomit als tektonische Decke liegt, auf der Quote 635 und ca. 345 m höher als die Quellen der Ljubljana. Dieser Ponor wurde zusätzlich ausgesucht, weil er zu den höchstgelegenen Ponoren im Gebiet von Rovte liegt und bisher noch nie markiert worden ist. Da die Richtung des unterirdischen Abflusses nicht bekannt war, wurde ein Dienst zwecks Entnahme von Wasserproben auch am Idrijcafluß und zwar an den Quellen Podroteja und Divje jezero organisiert. Zwischen 15.05 und 15.20 Uhr wurden in das Wasser des Ponors bei einem auf $0,020 \text{ m}^3/\text{s}$ geschätzten Durchfluß eine Suspension von 25 kg blau gefärbten Sporen unter der Leitung von V. MAURIN und P. HABIČ eingespeist.

2. 21 — Der Ponor des Baches Rovtarica befindet sich in einem Blindtal mit mehreren unzugänglichen Versickerungen in den Alluvionen, die den Kalk der mittleren Trias bedecken. Mit der Quote 568,132 ist der Ponor gute 273 m höher als die Quellen von Hribščica. Bei einem Durchfluß $Q = 0,032 \text{ m}^3/\text{s}$ ($H = 49 \text{ cm}$ v. p. Rovte) sind in den vorher hergerichteten Ponor 3 Ci Chrom-51 in einer Konzentration von 15 mCi/ml in den Ponor eingespeist worden, wobei 99% der Lösung schon in der ersten Minute in den Ponor abgeronnen sind. Die Eingabe ist von M. PRŠ und M. TOPLIŠEK durchgeführt worden.

2. 11 — Der Ponor des Petkovščica-Baches ist ein 20 m tiefer Wasserschacht im mitteltriassischen Kalk auf der Quote 505,691. Der Ponor ist vorher für die Einspeisung hergerichtet worden, indem vor dem Ponor mit einem provisorischen Damm 500 m³ Wasser für die Abspülung des Markierungsmittels aufgestaut wurden. Bei einem Durchfluß $Q = 0,019 \text{ m}^3/\text{s}$ (v. p. Petkovec $H = 106 \text{ cm}$) sind zwischen 14.30 und 14.50 Uhr 3000 kg Kaliumsalz (57% KCL) injiziert worden. Das Salz ist mit Hilfe des akkumulierten Wassers bis 15.40 Uhr vollkommen in den Ponor eingespült worden bei einem Durchfluß von $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Einspeisung haben B. BRADAČ und seine Mitarbeiter durchgeführt.

Quellen

Der ursprüngliche Plan der Probennahme wurde nur wenig verändert bzw. vervollständigt. Den ursprünglich 26 für die Probennahme bestimmten Quellen sind wegen des Vergleiches und besserer Auswertung der Resultate noch die Wassermeßstationen Bistra (1. 1), Lubija-Verd (1. 2), Mala Ljubljana-Mirke (1. 3), Velika Ljubljana-Krnica (1. 01) und Ljubljana-Vrhnika (1. 02) hinzugefügt worden. Die Daten sind aus der Tabelle 16 ersichtlich.

Planktonnetze für die gefärbten Sporen sind nachträglich noch in die Quelle Hubelj und auch in die Quellen unterhalb Grčarevec eingesetzt worden für

Tabelle 16: Quellenbeobachtungen und Probenahme.

No.	Name	absolute Höhenlage des Wasserspiegels am 27. 5. 1975	Schüttung m ³ /s			Zahl der Probenahmen pro Tag						Gesamt- zahl
			Mindest-	Mittel-	Höchst- sch.	6×	4×	3×	2×	1×	in Interv.	
1.34	Princov studenec	295,46	0,032	0,091	0,43	3	9	—	9	10	4	86
1.32	Kozuhov izvir	296,44	0,20	1,30	7,00	3	9	—	9	10	4	86
1.36	Mali Močilnik	289,74	0,20	1,47	6,48	12	6	1	12	9	4	136
1.37	Vel. Močilnik	289,26	2,20	5,70	10,25	12	6	1	12	9	4	136
1.3	v. p. Mala Ljubljana	287,985	2,98	8,35	22,08	—	16	13	7	8	3	128
1.44	Malo okence	291,08	0,00	2,21	8,30	12	6	—	10	7	5	128
1.45	Veliko okence	291,66	0,00	1,96	11,80	7	6	—	10	11	5	102
1.47	Retovje — bry	—	—	—	—	12	5	1	10	6	5	126
1.43	Izv. pod skalo	290,834	3,80	8,79	24,60	12	6	—	10	9	5	130
1.42	Izv. pod orehom	290,894	0,48	1,66	6,04	12	6	—	10	9	5	130
1.41	Maroltov izvir	290,128	0,30	0,51	0,70	12	6	1	11	9	5	135
1.4	v. p. Vel. Ljubljana	288,478	7,18	15,07	49,0	1	14	3	7	18	3	106
1.24	Smukov izvir	292,817	—	—	—	—	dry	—	1	1	—	2
1.23	Gradarjev izvir	290,581	0,57	1,28	2,90	6	9	4	11	7	5	118
1.21	Jurcov izvir	290,320	2,95	5,15	12,27	6	9	4	11	7	5	118
1.22	Ceglarjev potok	290,397	0,55	1,04	1,83	6	9	4	11	7	5	118
1.2	v. p. Lubija	288,309	4,14	7,62	17,30	1	15	2	7	18	3	107
1.13	Graški izviri	293,428	2,38	2,02	7,00	6	7	—	8	7	10	97
1.12	Zupanovi izviri	292,446	2,60	3,02	4,50	6	7	—	8	7	10	97
1.11	Galetovi izviri	292,643	2,26	2,56	3,45	6	7	—	8	7	10	97
1.15	Pasji studenec	291,278	0	0,0035	0,067	1	4	—	7	4	2	42
1.14	Ribčev studenec	292,265	—	—	—	—	11	2	7	5	2	71
1.1	v. p. Bistra	288,244	7,21	8,81	15,10	1	14	2	7	18	3	103
1.46	Termalni izvir	—	—	—	—	—	—	4	14	9	9	58
1.02	Ljubljana-Vrhnika	287,064	9,96	24,92	81,3	—	12	3	2	5	—	66
1.0	Ljubljana-Komin	285,923	—	—	—	—	8	3	1	6	—	49
1.38	Izv. Staje in Bela	—	—	—	—	—	—	—	—	12+12	—	24
3.48	Jama Logarček	441,03	—	—	—	—	—	—	—	9	—	9
3.0	Najdena jama	412,2	—	—	—	—	—	—	—	9	—	9
2.42	Jama Gradišnica	380,0	—	—	—	—	—	—	2	11	—	15
2.33	Grudnovo brezno	455,857	—	—	—	—	—	—	—	9	—	9
10.2	Izvir Vipave	96,796	2,66	6,69	37,4	—	—	—	—	18	7	25
10.1	Izvir Hublja	—	—	—	—	—	—	—	—	18	7	25
11.1	Izviri Podroteje	—	Idrijca-v. p. Podroteja 2,00 12,1 116,0			—	—	—	—	12	19	31
11.11	Divje jezero	—	Idrijca-v. p. Podroteja 2,00 12,1 116,0			—	—	—	—	19	19	31

den Fall, daß auch diese aktiv werden sollten und um einen eventuellen Abfluß der Hochwässer des Baches Hotenka in das Polje von Planina zu erfassen. Die Zahl der täglichen Probennahmen richtete sich nach dem Erscheinen des Markierungsstoffes in den Quellen. Am 26. Mai wurden zwecks Vergleiches Proben nur einmal entnommen, am 27. und 28. Mai täglich zweimal. Vom 29. Mai bis zum 3. Juni, als aus den Quellen die Hauptwelle des markierten Wassers floß, wurden die Proben täglich sechsmal in regelmäßigen vierstündlichen Intervallen, in einigen Fällen aber sogar achtmal entnommen. Für die Zeit vom 4. bis 14. Juni wurde die Zahl der Proben pro Tag auf vier Proben, vom 15. bis zum 20. Juni auf zwei Proben pro Tag vermindert. In der Zeit vom 21. Juni bis zum 12. Juli wurde täglich nur eine Probe entnommen oder eine Probe mit Tagesintervallen. Als aber ein starker Regenfall bzw. die angeschwollenen Gewässer Ende Juni und in den ersten Julitagen von neuem kleine Mengen Markierungsmittel aus dem Untergrund ausschwemmten, wurden wieder zwei Proben pro Tag entnommen. Die Probennahmen dauerten wegen der ungewöhnlichen meteorologischen Verhältnisse 47 Tage statt der vorgesehenen 36 Tage. Die Planktonnetze und Aktivkohlesäckchen im Hubelj und Podroteja blieben bis zum Oktober 1975 installiert. Das Sammelzentrum für die Proben war das Feldlaboratorium in Vrhnika. Hier wurden jedesmal die organischen Markierungsmittel, Detergentien und KCl und ein Drittel der Proben auf Sporen analysiert. Die übrigen Messungen und die Kontrollanalysen wurden in Ljubljana vorgenommen. Cr-51 wurde im Institut „Jožef Štefan“ in Ljubljana, Indium und LiCl im Institut für Radiohydrometrie in München gemessen. Zwei Drittel der Sporenproben wurden an den technischen Hochschulen in Graz und Karlsruhe untersucht. Die Überprüfung der Aktivkohle wurde F. BAUER in Wien anvertraut.

2. 3. 4. Die Markierung mit Fluoreszenztracern

Die Gruppe dieser Markierungsstoffe umfaßte die Fluoreszenzfarbstoffe Uranin A, Eosin, Amidorhodamin G extra und Rhodamin FB sowie den optischen Aufheller Tinopal CBS-X*.

Die Konzentrationen der in den Beobachtungsstellen wieder ausgetretenen Fluoreszenztracer wurden einerseits an entnommenen Proben spektralfluorimetrisch bestimmt. Hierdurch wurden diskrete Meßpunkte für die Darstellung der Indikatordurchgänge gewonnen.

Zum anderen wurden Aktivkohlesäckchen in den Quellen eingesetzt, um so mit einer durch Anreicherung erhöhten Nachweisempfindlichkeit auch noch sonst nicht mehr erfassbare Uraninspuren nachzuweisen. Über diese Aufgabstellung hinaus konnten mit der Aktivkohlemethode ebenfalls Aussagen über den Wiederaustritt von einigen der anderen Fluoreszenztracer gemacht werden.

2. 3. 4. 1. Methodik und Ergebnisse der Direktmessung der Fluoreszenztracer

(H. BEHRENS, Martina ZUPAN und M. ZUPAN)

Mit der Anwendung der genannten vier Fluoreszenzfarbstoffe und ihrer Analytik waren die beteiligten Arbeitsgruppen durch langjährige Arbeiten mit diesen Tracern bereits vertraut. Dagegen wurde der optische Aufheller Tinopal

* Die Zusätze „A“ bei Uranin A und „extra“ bei Amidorhodamin G extra kennzeichnen lediglich die hier verwendete Handelsqualität und werden im folgenden nicht immer angefügt.

CBS-X hier erstmals eingesetzt und erprobt. Die Eignung solcher optischer Aufheller als hydrologische Tracer wurde von R. R. GLOVER (1972) beschrieben.

2. 3. 4. 1. 1. Wesentliche spektrale Eigenschaften der Fluoreszenztracer

Die Verwendbarkeit mehrerer Fluoreszenztracer nebeneinander in einem Markierungsversuch beruht auf den Unterschieden in ihren spektralen Eigenschaften, die durch die Lage ihrer Anregungs- und Emissionsmaxima charakterisiert werden (Tab. 17).

Tabelle 17: Spektrale Daten der Fluoreszenztracer.

Markierungsstoff	Anregungsmax.	Emissionsmax.
	(mm)	(mm)
Uranin A	492	515
Eosin	515	535
Amidorhodamin G	535	552
Rhodamin FB	555	578
Tinopal CBS-X	355	430

Die relativ breiten Fluoreszenzpeaks der Fluoreszenzfarbstoffe liegen im Spektrum jedoch so nahe beieinander, daß sie sich z. T. überlagern. Daher ist es nicht immer möglich, Mischungen der Fluoreszenztracer nur durch Fluoreszenzmessungen allein zu analysieren. Beispiele für Fluoreszenzspektren von Gemischen verschiedener Fluoreszenztracer sind in Fig. 45 dargestellt.

Ohne eine gegenseitige Störung lassen sich Uranin A und Rhodamin FB in Gemischen mit beliebigen Konzentrationsverhältnissen rein instrumentell bestimmen.

Relativ geringe gegenseitige Störungen treten in folgenden Mischungen auf:

Uranin A / Amidorhodamin G

Eosin / Rhodamin FB

Stärkere gegenseitige Beeinträchtigung des Nachweises sind in folgenden Gemischen zu verzeichnen:

Uranin A / Eosin

Amidorhodamin G / Rhodamin FB

Nur noch sehr begrenzt gelingt der instrumentelle Nachweis von Eosin und Amidorhodamin G in Gemischen dieser beiden Fluoreszenztracer.

Die Anregungs- und Emissionswellenlängen des Tinopal CBS-X unterscheiden sich so grundlegend von denen der anderen Fluoreszenztracer, daß sein Nachweis durch gleichzeitig anwesende Fluoreszenzfarbstoffe überhaupt nicht gestört wird, wie umgekehrt auch Tinopal CBS-X in keiner Weise den Nachweis der Fluoreszenzfarbstoffe stört. Diese Tatsache war ein wesentlicher Grund für die Einbeziehung des Tinopal CBS-X in die Tracerauswahl für den vorliegenden Großmarkierungsversuch, weil wegen der Vielfältigkeit der unterirdischen Verbindungen im untersuchten Karstgebiet möglichst viele unterscheidbare Tracer erwünscht waren.

Wegen der Schwierigkeiten bei der fluorimetrischen Analyse von Gemischen der Fluoreszenzfarbstoffe sind bereits zusätzliche chemische Behandlungsverfahren angewandt worden. F. BAUER (1972) unterdrückte die Fluoreszenz des Uranins in Gemischen mit Sulforhodamin G extra (welches dem Amidorhodamin G extra entspricht) durch Ansäuern. Von J. ROCHAT et al. (1975) wurden aufwendige chemische Trennverfahren entwickelt.

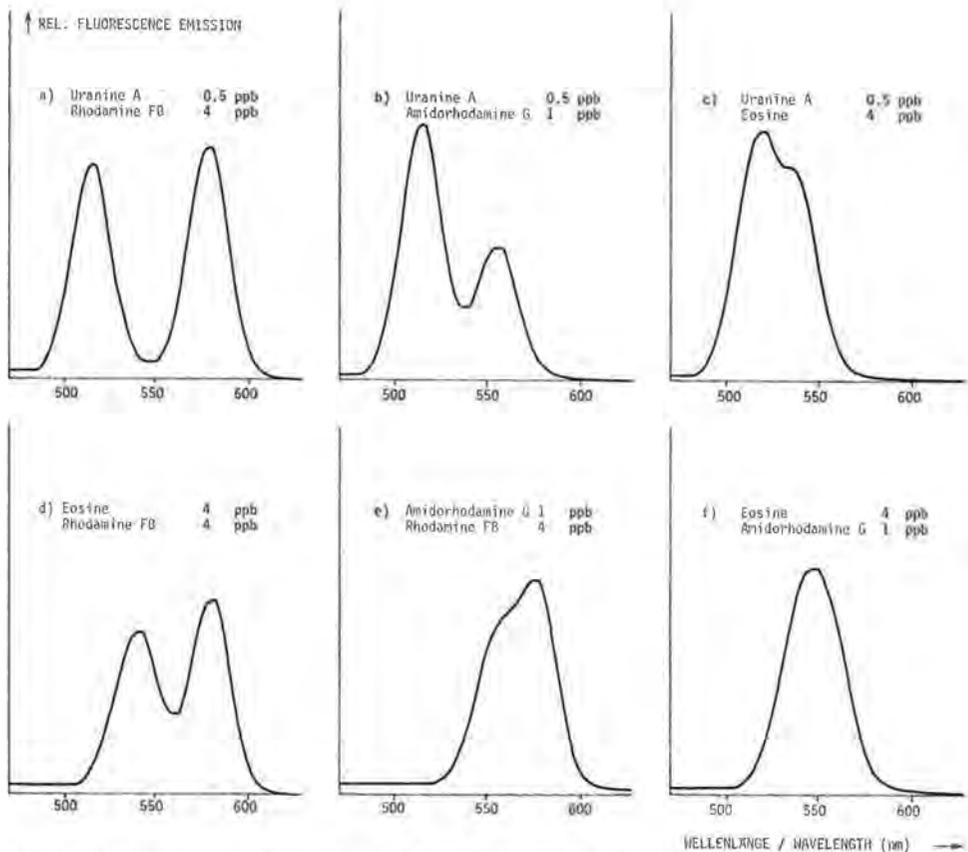


Fig. 45: Fluoreszenzspektren von Mischungen verschiedener Fluoreszenzfarbstoffe in wässriger Lösung; aufgenommen unter gleichzeitiger Verstellung der Anregungs- und Emissionswellenlängen im konstanten Abstand von 25 nm.

Sl. 45: Fluorescenčni spektri mešanic različnih fluorescenčnih barvil v vodni raztopini; posneto pri istočasni prestavi eksitacijskih in emisijskih valovnih dolžin v konstantni razdalji 25 nm.

2.3.4.1.2. Die Auswahl der Fluoreszenztracer und ihre Vorbereitung für die Einspeisung

Unter Heranziehung aller bisherigen Erfahrungen mit Fluoreszenztracern wurden die in Tab. 17 aufgeführten Substanzen für den vorliegenden Markierungsversuch ausgewählt.

Ursprünglich wurde anstelle des Rhodamin FB der Einsatz des in seinen spektralen Daten ähnlichen Amidorhodamin B (Anregungsmaximum bei 560 nm, Emissionsmaximum bei 580 nm) erwogen. Es konnte jedoch nicht verwendet werden, da die gegenwärtig lieferbare Handelsform Amidorhodamin B Konz. eine starke Verunreinigung enthält, deren Fluoreszenz mit der des Amidorhodamin G identisch ist und so dessen Einsatz beeinträchtigt hätte.

Für die Auswahl der Fluoreszenztracer und ihre Zuordnung zu den verschiedenen Einspeisungsstellen waren wesentlich ihre spektralen Eigenschaften ausschlaggebend. Uranin A und Rhodamin FB wurden in die Ponore 6.16 und

3.42 eingespeist, da auf den Fließstrecken von diesen Eingabestellen zu den mutmaßlichen Austrittsstellen auf Grund der früheren Versuche mit einer Durchmischung zu rechnen war. Für die Fließstrecken von den Ponor 2.41 und 2.31 zu den Beobachtungsstellen war ebenfalls die Möglichkeit einer Durchmischung in Betracht zu ziehen. Trotzdem wurden hier die sich gegenseitig störenden Tracer Eosin und Amidorhodamin G extra eingespeist, da ein wesentlich früheres Eintreffen des Tracers vom Ponor 2.41 als vom Ponor 2.31 erwartet wurde, so daß durch die zeitliche Trennung der Tracerpassagen eine Beeinträchtigung weniger wahrscheinlich war. Da bei der Auswahl der Einspeisungsstelle des Tinopal CBS-X keine Rücksicht auf die anderen Fluoreszenztracer genommen werden brauchte, wurde dieser Tracer in den im Zentrum des Untersuchungsgebietes gelegenen Ponor 3.41 injiziert.

Die Fluoreszenztracer wurden zwei Wochen vor der Einspeisung bereits in Wasser gelöst bzw. suspendiert und in Kanister zu je 20 l abgefüllt. Ein Auflösen der pulverigen und z. T. stark staubenden Substanzen erst an der Eingabestelle wurde ausgeschlossen, da dadurch einerseits eine erhöhte Gefahr der Kontamination und Verschleppung der Tracer bestand und andererseits durch den notwendigen Zeitbedarf die Einspeisung möglicherweise verzögert worden wäre.

Die für die Einspeisung präparierten Tracermengen, das dazu verwendete Wasservolumen und die Eingabestellen sind in Tab. 18 wiedergegeben.

Tabelle 18: Mengen und Volumina der eingegebenen Fluoreszenztracer.

Indikator	Menge kg	Wasservolumen l	Eingabestelle
Uranin A	51,2	140	6.16
Eosin	25,5	100	2.41
Amidorhodamin G	26	100	2.31
Rhodamin FB	26,4	100	3.42
Tinopal CBS-X	48	300	3.41

2.3.4.1.3. Der Nachweis der Fluoreszenzindikatoren

Alle Fluoreszenztracer wurden an entnommenen Wasserproben nachgewiesen. Die im Prinzip mögliche direkte Registrierung mit an den Quellen installierten Meßgeräten hätte einen nicht realisierbaren apparativen und personellen Aufwand erfordert. Die Entnahme, der Transport und die Aufbewahrung der Proben für die Bestimmung der Fluoreszenzfarbstoffe geschah in Polyäthylflaschen (Fabrikat: Fa. Kautex, Typ 301) von 50 bzw. 100 ml Inhalt.

Die Messungen der vier Fluoreszenzfarbstoffe wurden parallel von der jugoslawischen Arbeitsgruppe im Feldlabor in Vrhnika und vom Institut für Radiohydrometrie in dessen Münchener Labor vorgenommen, wohin ein Probensatz regelmäßig übersandt wurde. Die Analysen der Proben auf ihren Gehalt an Tinopal CBS-X wurden lediglich von der jugoslawischen Arbeitsgruppe vorgenommen.

Durch die Parallelbestimmung der Fluoreszenzfarbstoffe durch die zwei Arbeitsgruppen sollten die Messungen des vorübergehend in Vrhnika eingerichteten Feldlabors mit denen des fest bestehenden Labors für Fluoreszenzmessungen in München verglichen werden. Im Falle des Feldlabors bestand zwar eine größere Möglichkeit einer Kontamination des Arbeitsraumes und der Ausstattung mit verschleppten Markierungsstoffen, jedoch stand dem der Vor-

zug gegenüber, aufgrund der erhaltenen Meßergebnisse sehr schnell das Probenahmeprogramm optimal den Erfordernissen anzupassen.

Alle Fluoreszenzmessungen erfolgten mit den Spektralfluorimetern PERKIN-ELMER-203 (Institut für Radiohydrometrie) und PERKIN-ELMER-204 (Feldlabor Vrhnika), die in ihrem optischen Teil identisch sind und sich lediglich in der Mechanik der Wellenlängeneinstellung unterscheiden.

Zum Nachweis der Fluoreszenzfarbstoffe Uranin A, Eosin, Amidorhodamin G extra und Rhodamin FB stand ein verbessertes spektralfluorimetrisches Meßverfahren (H. BEHRENS 1971 und 1973) zur Verfügung, das auf der 2. Internationalen Fachtagung zur Untersuchung unterirdischer Wasserwege 1970 erstmals vorgestellt worden war.

Hierbei werden im Gegensatz zum herkömmlichen Verfahren zur Aufnahme von Fluoreszenzspektren sowohl Anregungs- wie Emissionsmonochromator gleichzeitig in einem voneinander konstanten Abstand (beim Nachweis der Fluoreszenzfarbstoffe: 25 nm) im interessierenden Spektralbereich variiert (λ Anregung: 455 bis 605 nm; λ Emission: 480 bis 630 nm). Mit dem Verfahren wird eine verbesserte spektrale Auflösung bei weitgehender Ausschaltung der Rayleigh- und Raman-Streuung erhalten. Außerdem muß zur Kontrolle von Proben auf alle vier Fluoreszenzfarbstoffe mit optimaler Nachweisempfindlichkeit lediglich ein Spektrum aufgenommen werden. Auf diese Weise konnten die mehr als 3000 Proben von den verschiedenen Entnahmestellen rationell und zügig zur Messung gebracht werden. Zur Messung nach dem beschriebenen Verfahren waren beide Fluorimeter so modifiziert worden, daß sich Anregungs- und Emissionsmonochromator gleichzeitig und mit konstantbleibendem Wellenlängenabstand scannen ließen.

Die auf diese Weise in nicht kontaminierten Quellwässern aus dem Untersuchungsgebiet erreichbaren Nachweisgrenzen sind in Tab. 19 dargestellt.

Tabelle 19: Nachweisgrenzen für die Fluoreszenzfarbstoffe bei Messung mit konstantem Abstand zwischen Anregungs- und Emissionswellenlänge ($\Delta \lambda = 25 \text{ nm}$).

Farbstoff	Nachweisgrenze
Uranin A	0,005 ppb
Eosin	0,1 ppb
Amidorhodamin G extra	0,008 ppb
Rhodamin FB	0,01 ppb

Tinopal CBS-X wurde im Unterschied zu den Fluoreszenzfarbstoffen in den gleichen Proben mit dem herkömmlichen Verfahren zur Aufnahme von Fluoreszenzspektren bestimmt (Anregung mit festbleibender Wellenlänge). Da bei der Anregung im Anregungsmaximum bei 355 nm eine störende Überdeckung des Emissionspeaks durch die Raman-Streuung des Wassers eintritt, wurden die Messungen mit Anregung bei 320 nm vorgenommen. Durch die so vorgenommene Verschiebung des Raman-Streupeaks wird trotz der Herabsetzung der Fluoreszenzanregung eine bessere Nachweisempfindlichkeit erreicht (Fig. 46).

Die Nachweisgrenze für das auf diese Weise in nicht kontaminierten Quellwässern bestimmte Tinopal CBS-X betrug 0,01 ppb.

Obwohl durch die Auswahl der Fluoreszenztracer für die verschiedenen Eingabestellen spektrale Überlagerungen von mehreren Markierungsstoffen in den Proben weitgehend ausgeschaltet werden sollten, ließen sie sich in der prak-

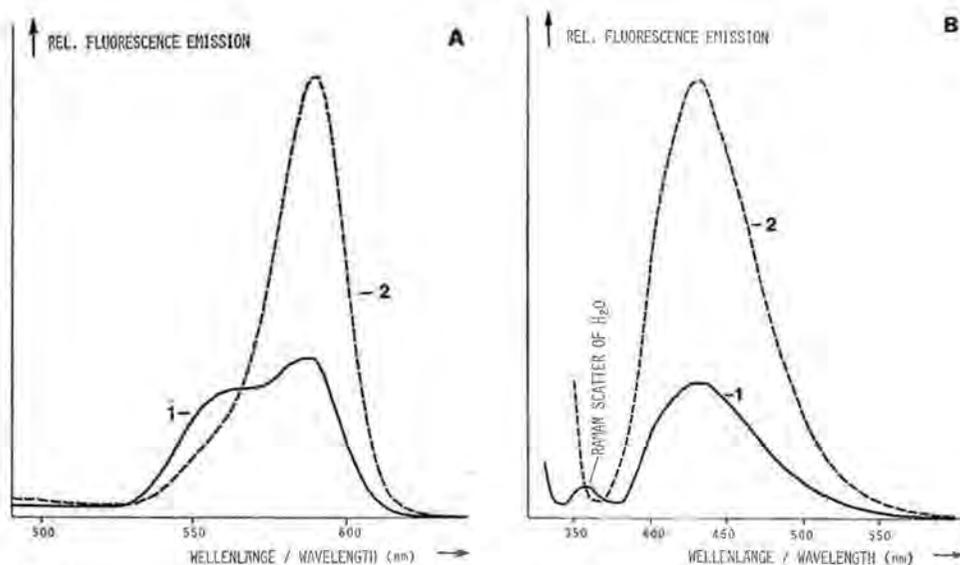


Fig. 46: A — Fluoreszenzspektren von Amidorhodamin-B-Lösungen; aufgenommen unter gleichzeitiger Verstellung der Anregungs- und Emissionswellenlängen im Abstand von 25 nm. 1 — Amidorhodamin B konzentriert, 10 ppb, 2 — Amidorhodamin B extra, 10 ppb.
 B — Fluoreszenzspektren einer Tinopal-CBS-X-Lösung (10 ppb). 1 — Anregungswellenlänge 340 nm, 2 — Anregungswellenlänge 320 nm.

Sl. 46: A Fluorescenčni spektri raztopin amidorodamina B; posneto pri istočasni prestavi eksitacijskih in emisijskih valovnih dolžin v razdalji 25 nm; 1 — amidorodamin B konc., 10 ppb, 2 — amidorodamin B extra, 10 ppb.
 B Fluorescenčni spektri raztopine tinopala CBS-X (10 ppb); 1 — eksitacijska valovna dolžina 340 nm, 2 — eksitacijska valovna dolžina 320 nm.

tischen Durchführung des Versuches infolge der Komplexizität des Untersuchungsgebietes dann doch nicht vermeiden.

So traten in verschiedenen Proben Eosin und Amidorhodamin G, in anderen Proben Uranin A und und Eosin gleichzeitig auf. Die Anwesenheit von kleinen Mengen Eosin neben Amidorhodamin G oder von kleinen Mengen Amidorhodamin G neben Eosin wurde aus der Verschiebung des Fluoreszenzmaximums zu kürzeren bzw. längeren Wellenlängen hin erkennbar. In gleicher Weise zeichnet sich die Anwesenheit von kleinen Mengen Uranin neben Eosin (bzw. umgekehrt) ab. Allein mit Hilfe der Fluoreszenzspektren waren solche Gemische nicht mehr analysierbar. Von beiden beteiligten Laboratorien wurden daher zusätzliche Maßnahmen zur Trennung der Gemische ergriffen.

Von der jugoslawischen Arbeitsgruppe wurde dazu ein papierchromatographisches Trennverfahren entwickelt. Hierbei werden 10 ml der Probe unter herabgesetztem Druck bei einer Temperatur von 30 bis 40° C bis zur Trockene eingedampft. Die Wände des Eindampfgefäßes werden mit Äthanol gewaschen und die Lösung erneut bis auf ein Volumen von einigen Tropfen eingedunstet. Dieser Lösungsrest wird mit einer Kapillare auf Chromatographiepapier (Ederol 202) übertragen und mit dem Gemisch Wasser-Äthanol-Amylalkohol (100 : 10 : 1) entwickelt. Die R_f Werte betragen für Uranin 0,71, für Eosin 0,17 und für Amidorhodamin G 0,42. Unter den angegebenen Bedingungen können die ungefähren Konzentrationen der angegebenen Farbstoffe bis herab zu einer

Grenze von 1 mg/m^3 bestimmt werden. Etwas genauere Werte wurden erhalten, indem gemäß den mit der Papierchromatographie ermittelten Konzentrationen Modellmischungen der Fluoreszenzfarbstoffe hergestellt und deren Verschiebung der Fluoreszenzpeaks mit den Spektren verglichen wurden. Die Genauigkeit dieser Analysen, die sich sicherlich noch verbessern läßt, kann mit $\pm 10\%$ bewertet werden. Jedoch ist das Verfahren für seinen unumschränkten Einsatz bei ausgedehnten Untersuchungsprogrammen wie der Markierung des unterirdischen Wassers wegen der großen Probenzahl zu zeitraubend.

Vom Institut für Radiohydrometrie wurden Gemische von Eosin und Amidorhodamin G auf folgende Weise analysiert: Zur störungsfreien Bestimmung der Amidorhodamin-G-Konzentrationen in Wasserproben wurde die Fluoreszenz des Eosins durch Ansäuern mit Schwefelsäure unterdrückt. Zur Bestimmung des Eosins wurde gleichzeitig anwesendes Amidorhodamin G durch Filtration über kleine mit Kieselgel gefüllte Chromatographiesäulen aus den Lösungen entfernt. Eosin passiert solche Säulen ohne Veränderung seiner Konzentration, während Amidorhodamin G darauf zurückbleibt.

2.3.4.1.4. Betrachtung der Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse und daraus gewonnene Erkenntnisse über die Stabilität der Fluoreszenztracer in den entnommenen Proben

Die Bestimmung der Fluoreszenzfarbstoff-Konzentrationen durch zwei verschiedene Laboratorien bot zusätzlich die Möglichkeit, die Reproduzierbarkeit der Messungen zu überprüfen. Im großen und ganzen war die Übereinstimmung der Meßergebnisse recht befriedigend. Bei höheren Konzentrationen und bei solchen Farbstoffgemischen, die sich spektral nicht überlagern, betrug die Abweichungen bis zu ca. 10% . Als Beispiel sind in Fig. 47 die in Vrhnika und in München ermittelten Uranin-A- und Rhodamin-FB-Konzentrationen in Proben der Entnahmestelle 1.22 dargestellt.

Auch bei den Fluoreszenzfarbstoffen Eosin und Amidorhodamin G war gute Übereinstimmung zwischen den Messungen beider Laboratorien festzustellen. Lediglich wenn diese beiden Tracer gleichzeitig in Proben vorhanden waren, traten zwischen den Messungen der beiden Laboratorien Unterschiede bis zum Faktor 3 auf. Als Beispiel für einen solchen Fall sind die in Proben der Entnahmestelle 1.44 ermittelten Werte in Fig. 48 dargestellt. Als wahrscheinlichste Ursache für diese Differenzen müssen vorerst die Unterschiede in der Probenbehandlung durch die beiden Laboratorien angesehen werden.

Im Fall des Uranins traten z. T. krasse Unterschiede zwischen den Messungen des Feldlabors in Vrhnika und denen des Instituts für Radiohydrometrie auf. Als Beispiel werden die Ergebnisse der Uraninbestimmungen in Proben der Entnahmestelle 1.13 in Fig. 49 dargestellt. In den bald nach der Entnahme vorgenommenen Messungen weichen bei im ganzen gegebener Übereinstimmung einzelne Meßwerte des einen wie des anderen Labors nach unten ab. Nachmessungen, die wegen dieser Abweichungen im November 1975 im Institut für Radiohydrometrie vorgenommen wurden, ergaben generell niedrigere Uraninkonzentrationen als diejenigen Messungen, die zur Zeit des Markierungsversuches vorgenommen worden waren. Dagegen zeigten dann weitere Nachmessungen im Jänner 1976 bis auf einzelne Ausnahmen vollständige Übereinstimmung mit den Meßergebnissen vom November 1975.

In Ljubljana ebenfalls wiederholte Messungen ergaben ein gleiches Bild wie die in München vorgenommenen Nachmessungen (Fig. 50). In diesem Zusam-

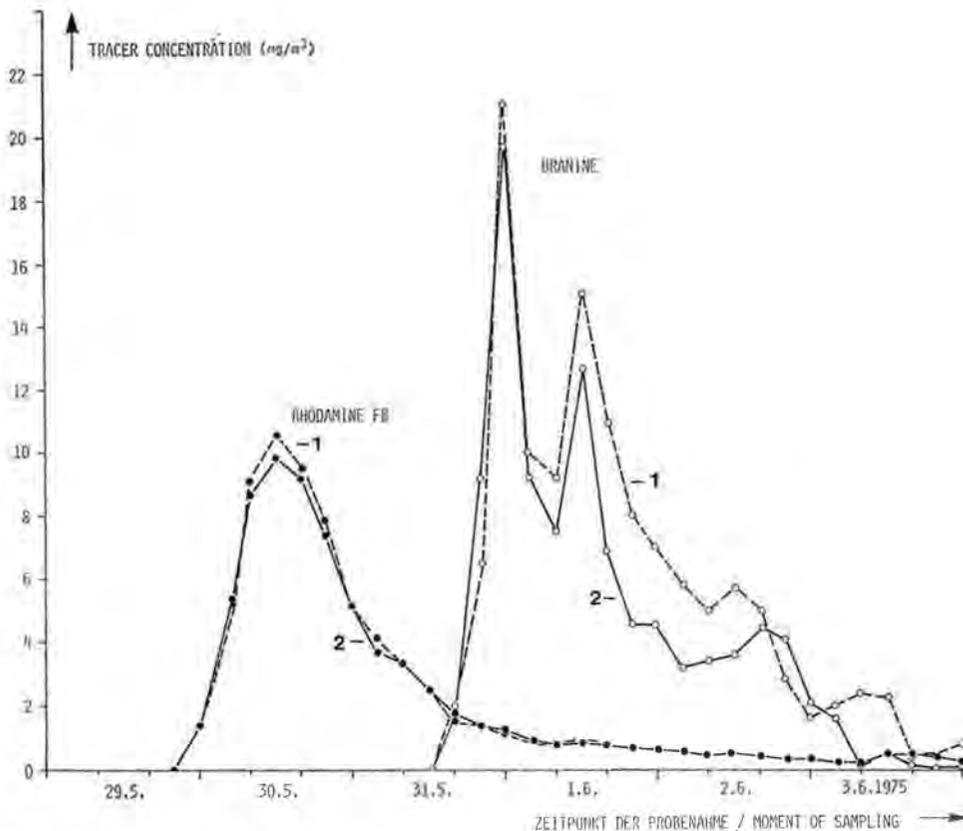


Fig. 47: Uranin- und Rhodamin-FB-Durchgangskurven in der Meßstelle 1.22; Vergleich der Messungen beider beteiligter Laboratorien, 1 — Messungen in Vrhnika, Mai/Juni 1975, 2 — Messungen in München, Mai/Juni 1975.

Sl. 47: Uranje-rodamin FB pri izviru 1.22; primerjava meritev obeh sodelujočih laboratorijev; 1 — meritve na Vrhniki, maj/junij 1975, 2 — meritve v Münchnu, maj/junij 1975.

menhang lassen sich weitere interessante Details anführen: die in Fig. 51 dargestellten Ergebnisse der Uraninbestimmung in der Quelle 1.11 zeigen relativ gute Übereinstimmung zwischen den Messungen beider Laboratorien. Bis zum März 1976 gingen die Uraninkonzentrationen in den aufbewahrten Proben um ca. 25% zurück. In Proben der Quelle 1.12, deren Meßergebnisse zwischen beiden Laboratorien stärker differieren, nahmen die Uraninkonzentrationen bis zum November 1976 um ca. 40% ab, und in Proben der Quelle 1.13 betrug die Konzentrationsabnahme im gleichen Zeitraum bis zu 80%.

Im Zusammenhang mit dieser Beobachtung fallen Unterschiede in der Anordnung der Probennahmepunkte an diesen drei Quellen auf. Bei der Quelle 1.11 wurden die Proben unmittelbar nach dem Quellsprung entnommen, während die Probennahmestellen 1.12 und 1.13 etwas weiter vom Quellsprung entfernt waren. Zwischen den Austrittsstellen und den Entnahmepunkten bei den letztgenannten Quellen befinden sich Bebauungen, von denen aus Abwässer in die Quellbäche abgeleitet werden. Außerdem fällt auf, daß in den bei Tag ent-

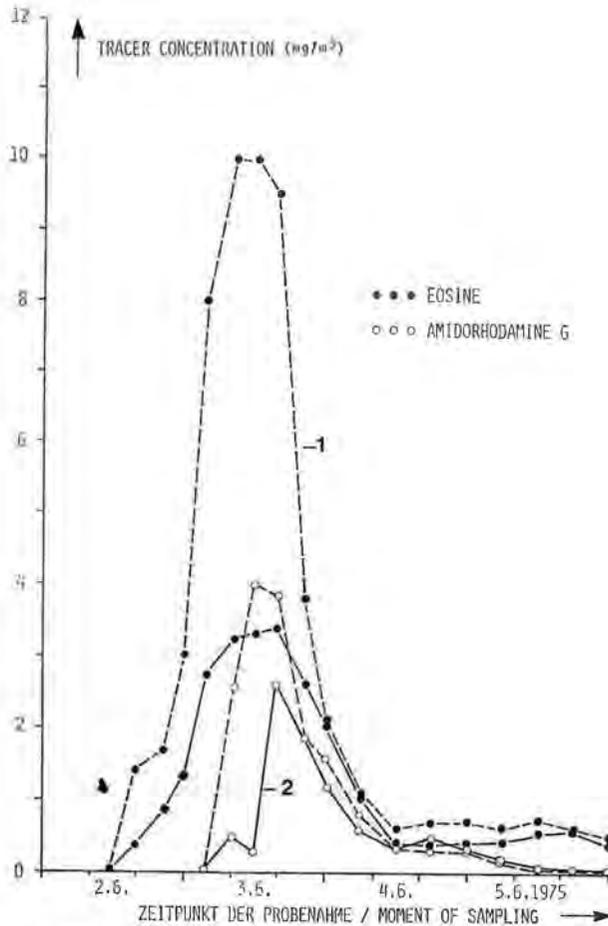


Fig. 48: Eosin- und Amidorhodamin-G-Durchgangskurven in der Meßstelle 1.44; Vergleich der Messungen beider beteiligter Laboratorien. 1 — Messungen in Vrhnika, Mai/Juni 1975, 2 — Messungen in München, Mai/Juni 1975.

Sl. 48: Prehodne krivulje eozina in amidorodamina G pri izviri 1.44; primerjava meritev obeh sodelujočih laboratorijev; 1 — meritve na Vrhniki, maj/junij 1975, 2 — meritve v Münchnu, maj/junij 1975.

genommenen Proben die Abnahmen der Uraninkonzentrationen größer sind als in den bei Nacht entnommenen Proben.

Dieser Befund läßt sich nach all dem so deuten, daß in den entnommenen Proben Uranin in einem von Einzelprobe zu Einzelprobe unterschiedlichen Maß verlorenght. Offenbar kommt dieser Prozeß nach einiger Zeit zum Stillstand und entspricht möglicherweise den von F. BAUER (1975) bereits in systematischen Untersuchungen gemachten Beobachtungen¹. Danach geht die Uraninkonzentration in Proben von verschmutzten Wässern allmählich zurück, während sie in sauberen Wässern (z. B. von Quellen im Hochgebirge) unverändert bleibt.

¹ Persönliche Mitteilung über Untersuchungen zur Stabilität von Uranin in unterschiedlich verschmutzten Wasserproben bei der Aufbewahrung.

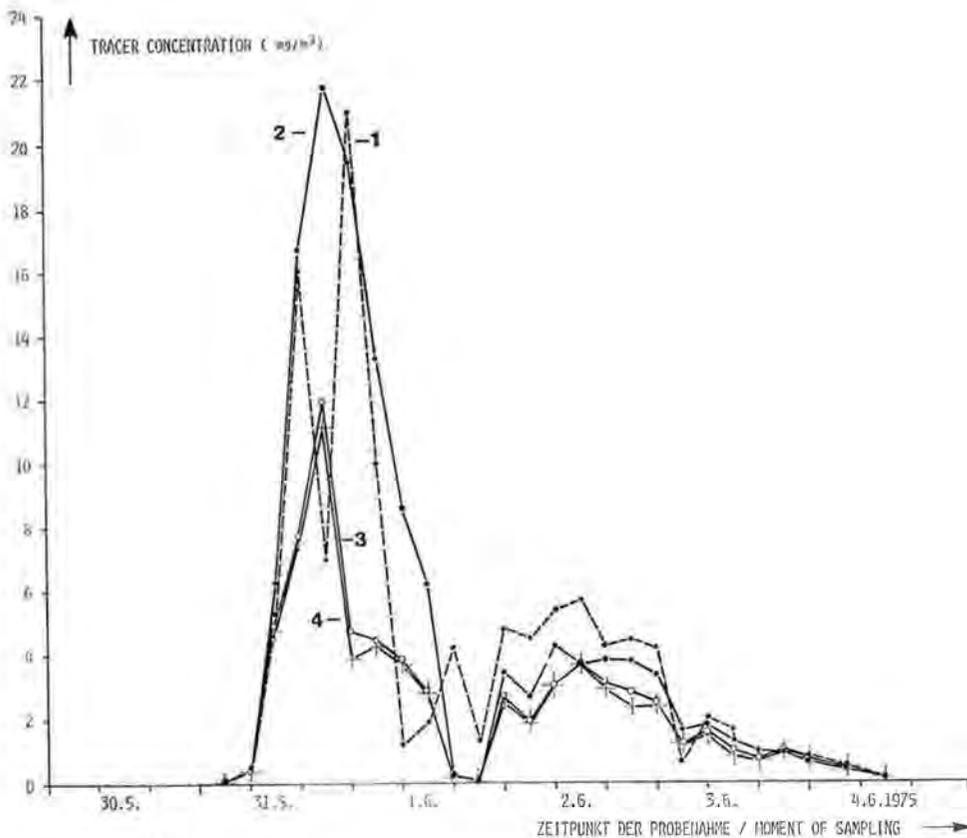


Fig. 49: Ermittelte Uranin-Konzentrationen in Proben der Meßstelle 1.13. 1 — Messungen in Vrhniko, Mai/Juni 1975, 2 — Messungen in München, Juni 1975, 3 — Nachmessung in München, November 1975, 4 — Nachmessung in München, Januar 1976.

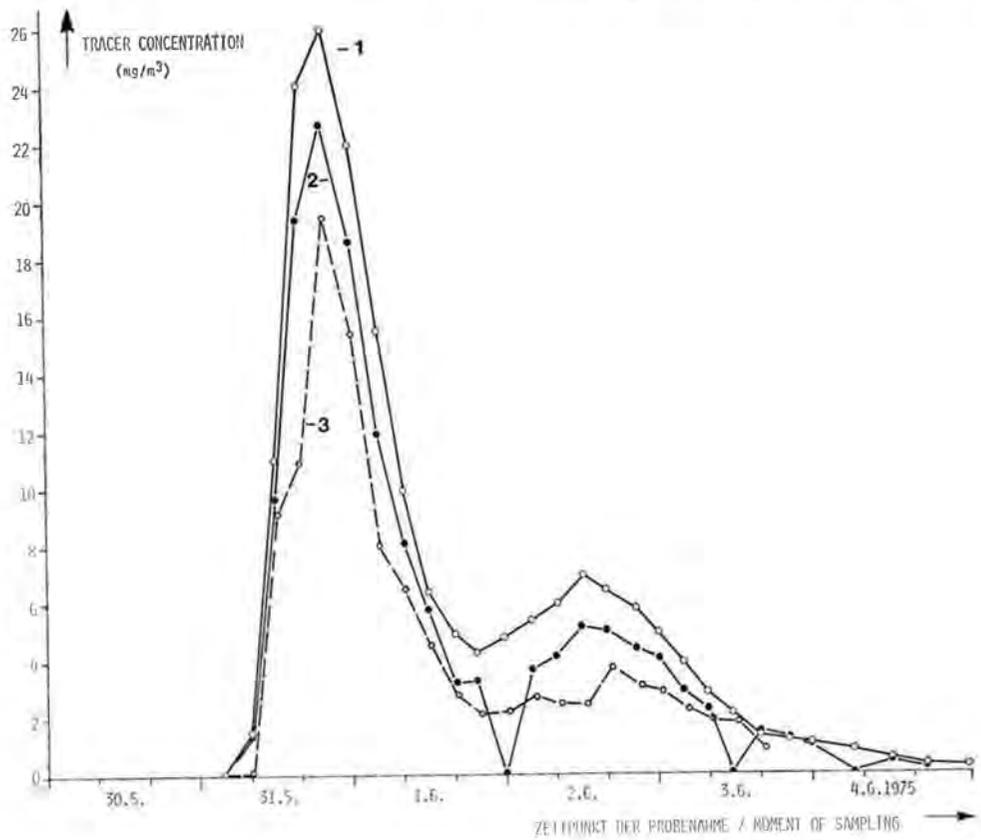
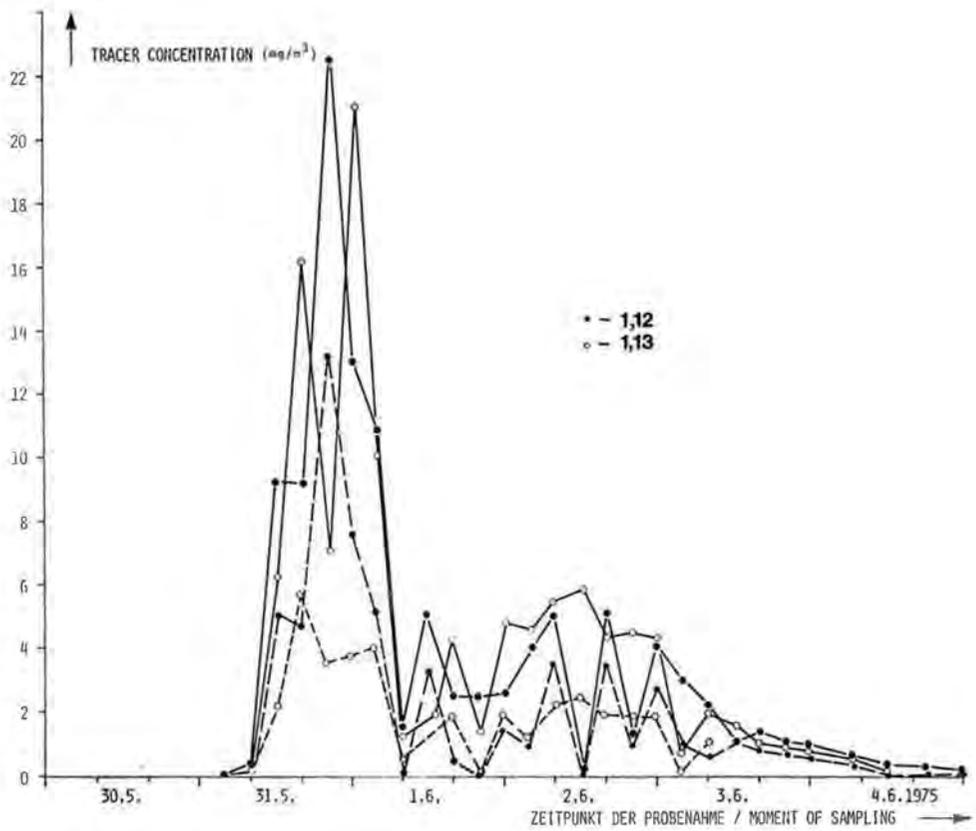
Sl. 49: Ugotovljene koncentracije uranina v vzorcih izvira 1.13; 1 — meritve na Vrhniku, maj/junij 1975, 2 — meritve v Münchnu, junij 1975, 3 — ponovne meritve v Münchnu, november 1975, 4 — ponovne meritve v Münchnu, januar 1976.

Fig. 50: Ermittelte Uranin-Konzentrationen in Proben der Meßstellen 1.12 und 1.13. Messungen in Vrhniko bzw. in Ljubljana. Die durchgezogenen Kurven repräsentieren die Messungen im Mai/Juni 1975; die unterbrochenen Kurven zeigen die Meßergebnisse vom Oktober bzw. November 1975.

Sl. 50: Ugotovljene koncentracije uranina v vzorcih izvira 1.12 in 1.13, meritve na Vrhniku, oziroma v Münchnu. Izvečene krivulje predstavljajo meritve maj/junij 1975; prekinjene krivulje pa rezultate meritev oktobra oziroma novembra 1975.

Fig. 51: Ermittelte Uranin-Konzentrationen in Proben der Meßstelle 1.11. 1 — Messungen in Vrhniko, Mai/Juni 1975, 2 — Messungen in München, Juni 1975, 3 — Nachmessung in Ljubljana, März 1976.

Sl. 51: Ugotovljene koncentracije uranina v vzorcih izvira 1.11; 1 — meritve na Vrhniku, maj/junij 1975, 2 — meritve v Münchnu, junij 1975, 3 — ponovne meritve v Ljubljani, marec 1976.



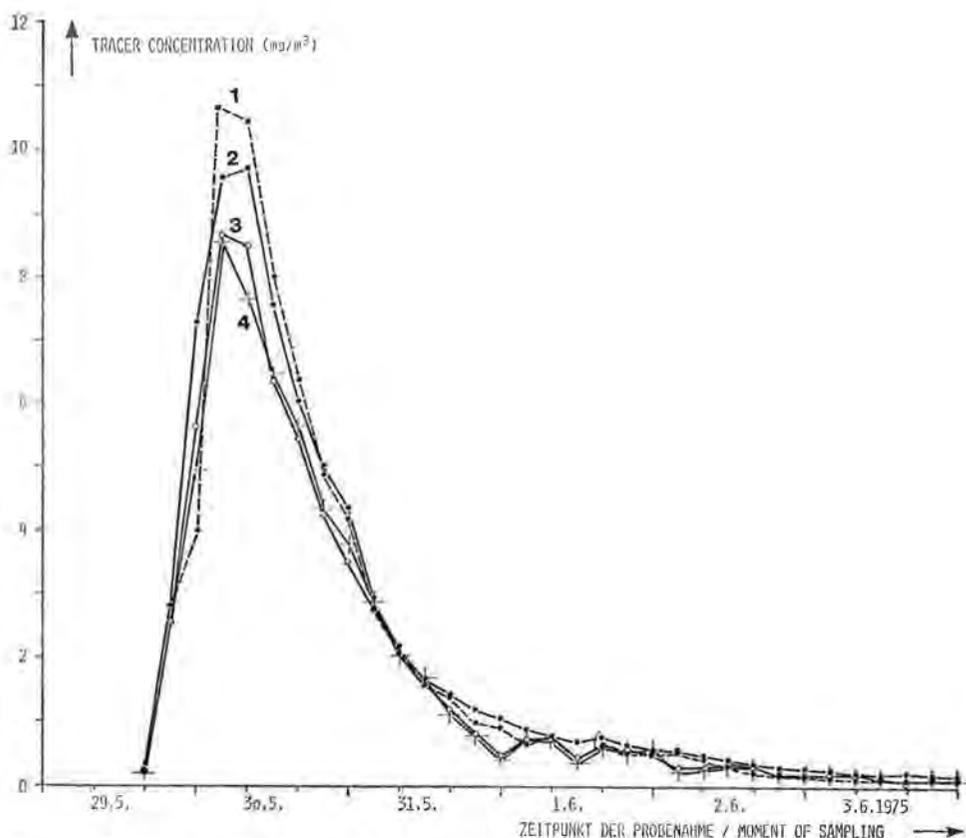


Fig. 52: Ermittelte Rhodamin-FB-Konzentrationen in Proben der Meßstelle 1.13. 1 — Messungen in Vrhnika, Mai/Juni 1975, 2 — Messungen in München, Juni 1975, 3 — Nachmessung in München, November 1975, 4 — Nachmessung in München, Januar 1976.

Sl. 52: Ugotovljene koncentracije rodamina FB v vzorcih izvira 1.13; 1 — meritve na Vrhniki, maj/junij 1975, 2 — meritve v Münchnu, junij 1975, 3 — ponovne meritve Münchnu, november 1975, 4 — ponovne meritve v Münchnu, januar 1976.

Aufgrund dieser Feststellungen schien es sinnvoll zu sein, die von beiden Laboratorien jeweils gemessenen höchsten Werte der Uraninkonzentrationen für die Versuchsauswertung heranzuziehen. Das gilt insbesondere für die Fälle, in denen Meßwerte kraß nach unten aus den Durchgangskurven herausfallen.

Bei den Fluoreszenzfarbstoffen Eosin, Amidorhodamin G und Rhodamin FB traten Abbauvorgänge in den Proben wie beim Uranin nicht deutlich ein. Bis zum Jänner 1976 waren leichte Konzentrationsabnahmen zu verzeichnen, die von Probe zu Probe gleichmäßig waren und maximal bis zu etwa 10% betragen. Als Beispiel sind die zu unterschiedlichen Zeiten nach der Entnahme gemessenen Rhodamin-FB-Werte in Proben aus der Entnahmestelle 1.13 in Fig. 52 dargestellt.

Das Verhalten des Tinopals CBS-X in Proben der Entnahmestelle 1.42 ist in Fig. 53 dargestellt. Bis zum Dezember 1975 nahmen die Konzentrationen um 15 bis 30% und bis zum März 1976 bis um 50% ab. Offensichtlich kommt die Zersetzung des Tinopals nicht zum Stillstand wie die des Uranins.

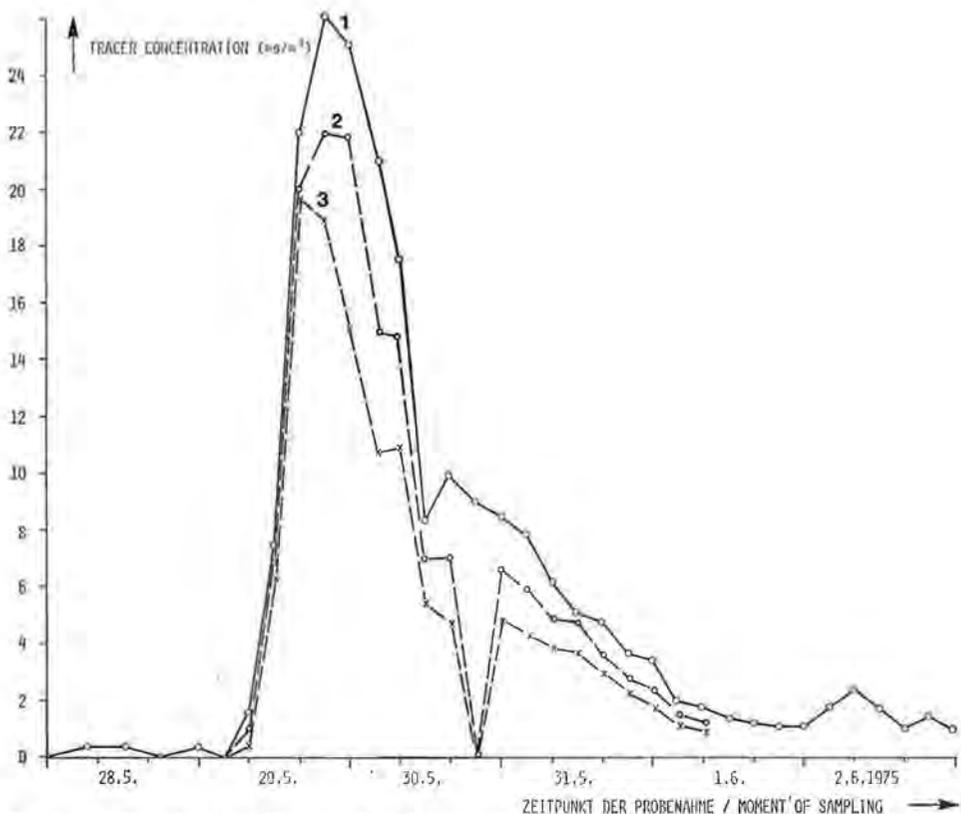


Fig. 53: Ermittelte Tinopal-CBS-X-Konzentrationen in Proben der Meßstelle 1.42. Messungen in Vrhnika, Mai/Juni 1975, 2 — Nachmessung in Ljubljana, Dezember 1975, 3 — Nachmessung in Ljubljana, März 1976.

Sl. 53: Ugotovljene koncentracije tinopala CBS-X v vzorcih izvira 1.42; 1 — meritve na Vrhniki, maj/junij 1975, 2 — ponovne meritve v Ljubljani, december 1975, 3 — ponovne meritve v Ljubljani, marec 1976.

2. 3. 4. 1. 5. Die zusammenfassende Darstellung der mit Fluoreszenztracern erhaltenen Ergebnisse

Ein Überblick über die mit Fluoreszenztracern nachgewiesenen Verbindungen wird in Fig. 54 gegeben. Sie zeigt in schematischer Weise die Fließwege von den Einspeisungsstellen zu den Quellen der Ljubljanica und ihrer Zubringer sowie die ebenfalls nachgewiesenen Verbindungen vom Hotenka-Ponor (2. 31) nach Podroteja (11. 1) und Divje jezero (11. 11). Die wesentlichen Daten der Tracer-austritte werden in Tabellenform (Tab. 20 bis 24) für die einzelnen Tracer zusammengefaßt. Es werden aufgeführt:

- die Bezeichnung der Beobachtungsstellen
- die Fließzeit bis zum ersten Indikatornachweis
- die Fließzeit bis zur Passage des Indikatormaximums
- die maximalen Tracerkonzentrationen.

Die Reihenfolge der Entnahmestellen in diesen Tabellen entspricht etwa ihrer geographischen Lage längs einer Verbindungslinie von den Quellen des

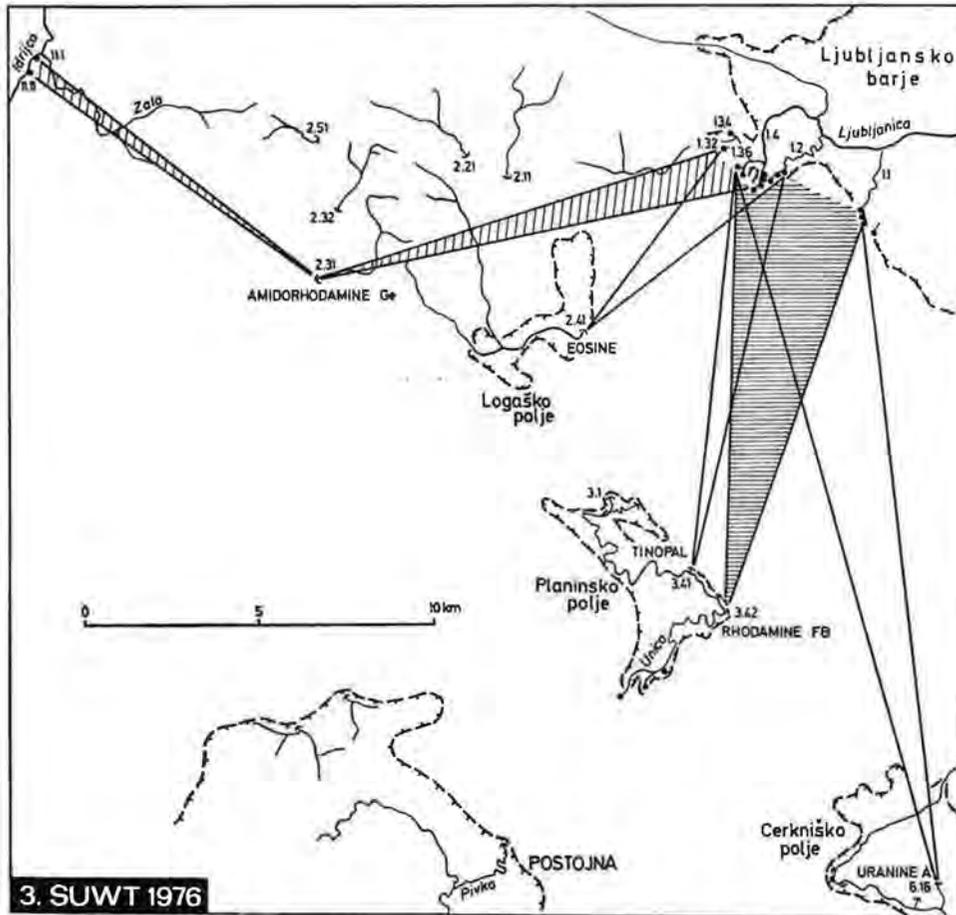


Fig. 54: Überblick über die im Versuchsgebiet nachgewiesene Ausbreitung der Fluoreszenztracer.

Sl. 54: Razpored ugotovljenih fluorescenčnih sledil v poskusnem območju.

Primcov studenec im Nordwesten über die Quellen im Mali-Mecilnik und Veliki-Mocilnik, über die Quellen im Retovje und die der Ljubija bis zum Quellgebiet der Bistra im Südosten. Die Anordnung in dieser Reihenfolge soll den zeitlichen und räumlichen Verlauf der Tracerausbreitung anschaulich machen.

Die Kurven der Fig. 55—61 zeigen den Zeitverlauf der Konzentrationen der Fluoreszenztracer. Für Rhodamin FB und Uranin wurden Mittelwerte aus den Messungen beider Laboratorien verwendet. In denjenigen Fällen, in denen aufgrund des Uraninabbaues die Meßwerte offensichtlich unrichtig sind (siehe Abschnitt 2.3.4.1.4.), wurde jeweils die höhere festgestellte Konzentration berücksichtigt. Für das Eosin und das Amidorhodamin G wurden ebenfalls Mittelwerte aus den Messungen beider Laboratorien verwendet. Wenn jedoch Eosin gleichzeitig mit Amidorhodamin G in Proben auftrat, so sind die Meßergebnisse beider Laboratorien gesondert angeführt, da sie sich in diesen Fällen sehr stark unterscheiden.

2. 3. 4. 1. 5. 1. Die mit Uranin A erhaltenen Ergebnisse

Durch das Uranin A werden die Verbindungen zwischen der Eingabestelle 6. 16. (Vodonos) und dem Quellgebiet der Ljubljana repräsentiert. Die charakteristischen Daten der Tracernachweise sind in Tab. 20 aufgeführt.

Tabelle 20: Daten der mit Uranin A registrierten Tracerdurchgänge.

Beobachtungs- stelle	Zeit bis zum ersten Tracernachweis (h)	Zeit bis zum Durchgang des Tracermax. (h)	Konz. im Tracer- max. (Mittelwert) (mg/m ³)
1. 34	./.	./.	./.
1. 32	./.	./.	./.
1. 36	125	141	0,4
1. 37	97	117	0,5
1. 44	125	141	0,3
1. 45*	141	149	1,5
1. 43	77	97—101	8,8
1. 42	77	101	10,6
1. 41	77	101	9,4
1. 23	81	101	9,3
1. 21	85	109	24
1. 22	93	105	20,5
1. 13	85	101	21,9
1. 12	85	101	21,8
1. 11	85	101	24,3
1. 15	135	141	3,6
1. 14	./.	./.	./.

./. = der Tracer Uranin A war nicht nachweisbar

* = Die Quelle war nicht ständig aktiv

Aus der Tab. 20 ist erkennbar, daß die Hauptverbindungen zwischen dem Ponor 6.16 und dem Quellgebiet der Bistra (1.1) bzw. der Lubija (1.2) bestehen.

Uranin ist zunächst in den Quellen der Retovje (1.4, 1.42, 1.43) und dann acht Stunden später mit noch höheren Konzentrationen in den Quellen der Bistra (1.11, 1.12, 1.13) wieder ausgetreten. Die Quellen der Ljubija (1.21, 1.22, 1.23) zeigen aufgrund der Tracerdurchgänge entweder mit den Quellen der Bistra oder mit den Quellen der Retovje Verwandtschaft.

Westlich bzw. nordwestlich der Quelle 1.23 nehmen die erreichten Uraninkonzentrationen mit zunehmender Entfernung vom Hauptaustrittsgebiet stetig ab. Die Fließzeiten des Tracers bis zu den einzelnen Beobachtungspunkten der Hauptaustrittsstellen sind relativ einheitlich, was sicherlich darauf zurückzuführen ist, daß die Kette der Beobachtungsstellen seitlich (von Süden her) angeströmt wird. Zu den im Nordwesten gelegenen Quellen hin nehmen dann die Fließzeiten mit abnehmenden Uraninkonzentrationen zu.

Die Durchgangskurven des Uranins an den Hauptaustrittsstellen zeigen am 1. bzw. 2. Juni 1975 deutliche Minima der Konzentrationen und darauffolgende neue Maxima. Die erneuten Konzentrationsanstiege lassen sich mit starken Niederschlägen in dieser Zeit in einen Zusammenhang bringen.

URANINE A

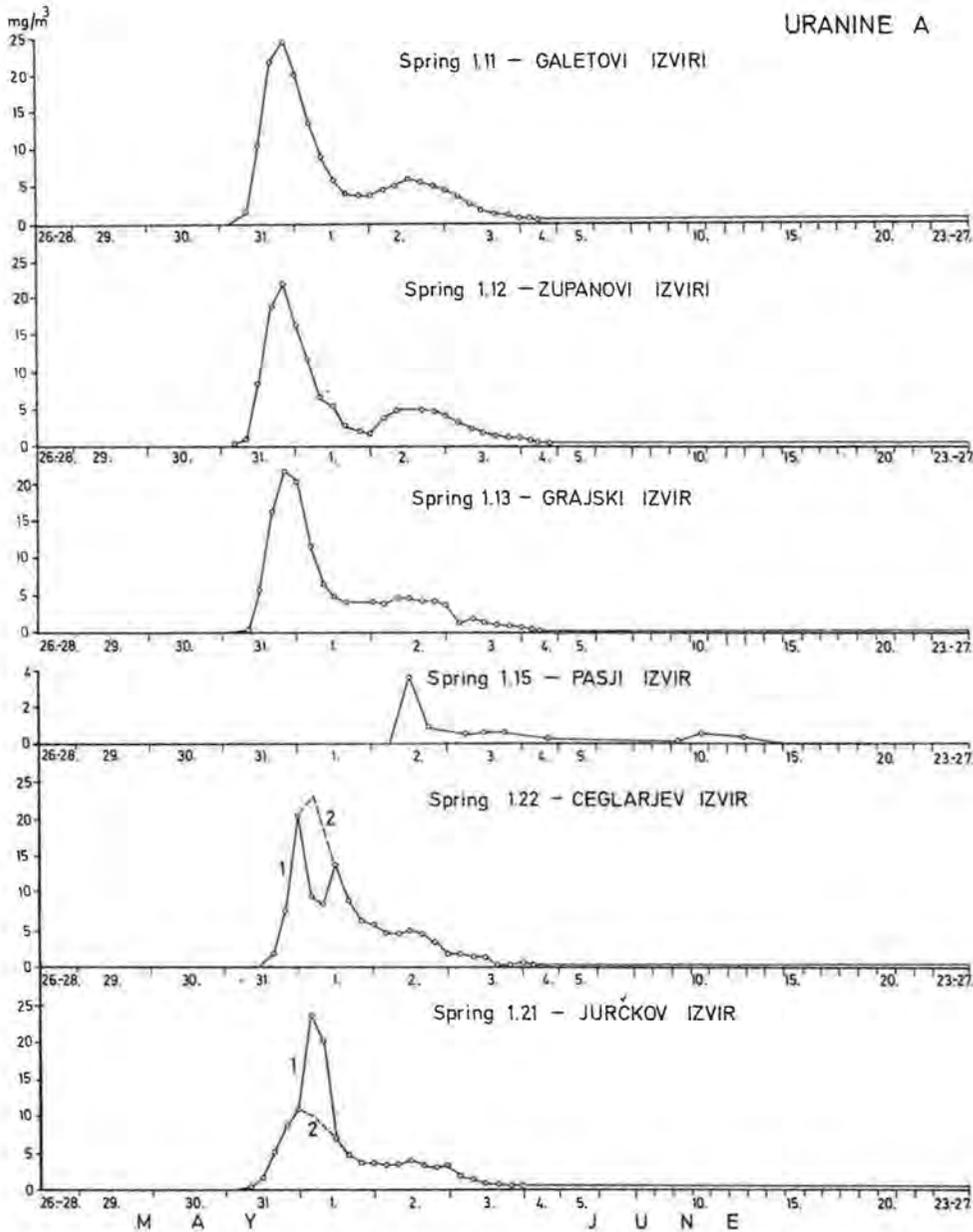


Fig. 55: Tracer-Durchgangskurven des Uranin A in den Quellen 1.11, 1.12, 1.13, 1.15, 1.22 und 1.21. Bei den Quellen 1.21 und 1.22 bedeuten: 1 — gemessene Konzentrationen, 2 — berichtigte Konzentrationen wegen der vermutlichen Probenverwechslung am 1. 5. 1975.

Sl. 55: Krivulje koncentracij uranina A v izvirih 1.11, 1.12, 1.13, 1.15, 1.22 in 1.21. Pri izvirih 1.21 in 1.22 so 1 — merjene koncentracije, 2 — popravljene koncentracije zaradi domnevne zamenjave vzorcev, dne 1. junija 1975.

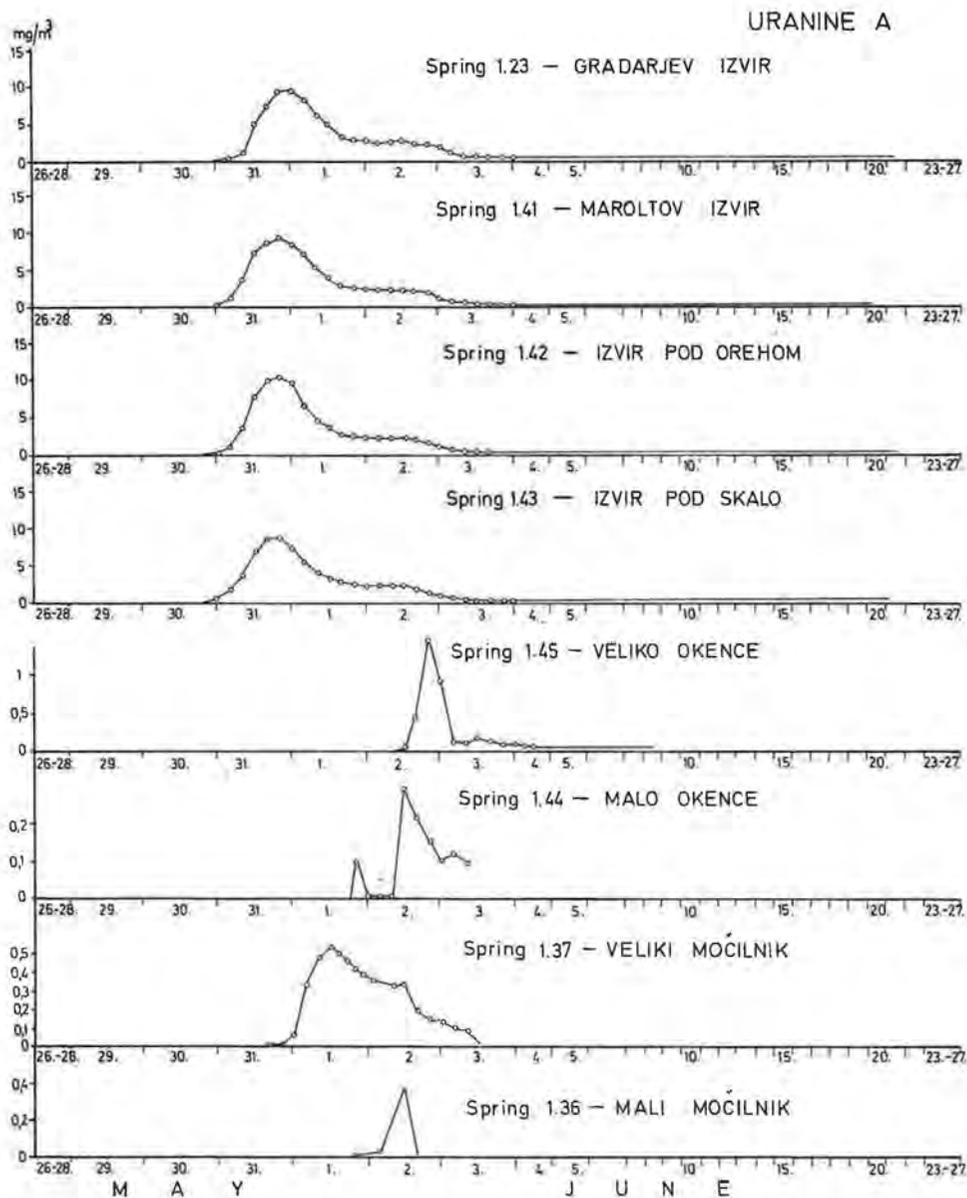


Fig. 56: Tracer-Durchgangskurven des Uranin A in den Quellen 1.23, 1.41, 1.42, 1.43, 1.45, 1.44, 1.37 und 1.36.

Sl. 56: Krivulje koncentracij uranina A v izvirih 1.23, 1.41, 1.42, 1.43, 1.45, 1.44, 1.37, 1.36.

2. 3. 4. 1. 5. 2. Die mit Rhodamin FB erhaltenen Ergebnisse

Durch das Rhodamin FB werden die Verbindungen zwischen der Eingabestelle 3. 42 im Planinsko Polje und dem Quellgebiet der Ljubljana repräsentiert. Die charakteristischen Daten der Tracernachweise sind in Tab. 21 aufgeführt.

Die Hauptaustrittsstellen des Rhodamin FB reichen vom Gebiet der Bistraquellen (1. 1) bis in das Quellgebiet der Mala Ljubljana (1. 4) und entsprechen denen des Uranin A. Die Fließzeiten des Rhodamin FB zwischen der Einspeisung und den Wiederaustritten sind entsprechend den kürzeren Fließstrecken kleiner als die des Uranins. Deutlicher als beim Uranin kommt bei der Beobachtung des Rhodamin FB das Fortschreiten der „Tracerwolke“ längs der Linie von der Quelle 1. 43 bis zur Quelle 1. 22 mit zunehmenden Fließzeiten bis zum Durchgang des Tracermaximums zum Ausdruck. Die Durchgangskurven sind stetig und weisen jeweils nur ein Maximum auf, so daß keine erkennbaren Verzweigungen im Fließweg vorliegen.

Tabelle 21: Daten der mit Rhodamin FB registrierten Tracerdurchgänge.

Beobachtungs- stelle	Zeit bis zum ersten Tracernachweis (h)	Zeit bis zum Durchgang des Tracermax. (h)	Konz. im Tracer- max. Mittelwert (mg/m ³)
1. 34	./.	./.	./.
1. 32	./.	./.	./.
1. 36	93	105	0,11
1. 37	61	81	0,6
1. 44	117	141	0,06
1. 45*	145	145	0,48
1. 43	41	53—57	4,1
1. 42	41	57	4,8
1. 41	41	57—61	4,7
1. 23	45	61—65	5,2
1. 21	49—53	65	4,4
1. 22	53	69	10,9
1. 13	49	61—65	10,2
1. 12	49	61	9,1
1. 11	49	61	8,1
1. 15	105	141	1,4
1. 14	./.	./.	./.

./. = Der Tracer Rhodamin FB war nicht nachweisbar

* = Die Quelle war nicht ständig aktiv

2. 3. 4. 1. 5. 3. Die mit Eosin erhaltenen Ergebnisse

Durch das Eosin werden die Verbindungen zwischen der Eingabestelle 2. 41 (Logasko Polje) und dem Quellgebiet der Ljubljana repräsentiert. Die charakteristischen Daten der Tracernachweise sind in Tab. 22 aufgeführt.

Die Lagen der Eosin-Austrittsstellen unterscheiden sich deutlich von den Uranin- und Rhodamin-FB-Austrittsgebieten. Sie reichen vom Quellgebiet der Mala Ljubljana (1. 36) bis zur Quelle 1. 21 in der Ljubija. Längs dieser Strecke läßt sich eine geringfügige Zunahme der Fließzeiten registrieren. Im Quellgebiet der Bistra wurden keine Spuren des Tracers Eosin festgestellt. Abgesehen von der Quelle 1. 36 trat Eosin mit den höchsten Konzentrationen in den Quellen 1. 44 und 1. 45 aus, in denen nur niedrige bis mäßige Konzentrationen an Uranin A und an Rhodamin FB zu verzeichnen waren.

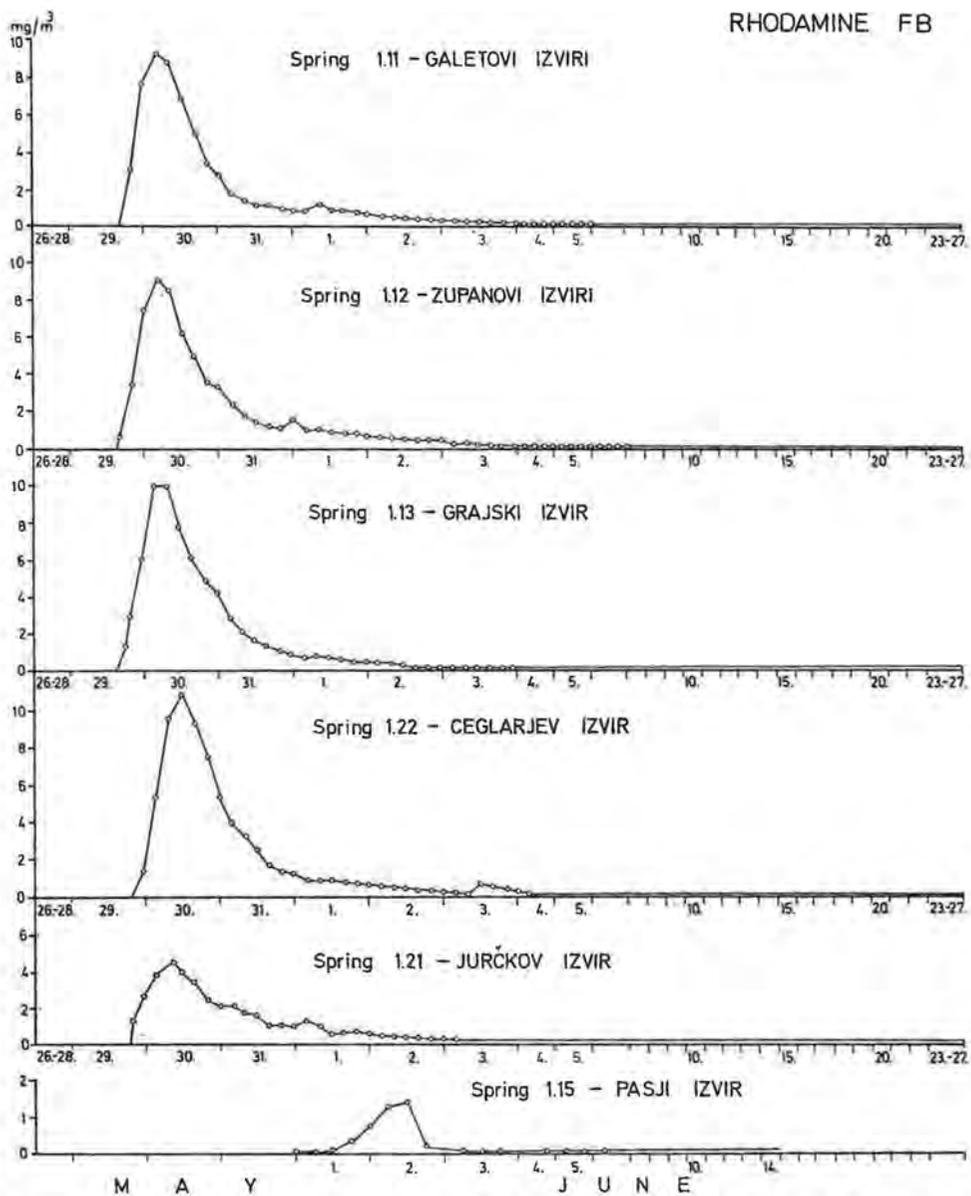


Fig. 57: Tracer-Durchgangskurven des Rhodamin FB in den Quellen Bistra (1.1) und Lubija (1.2).

Sl. 57: Krivulje koncentracij rodamina FB v izvirih Bistre (1.1) in Lubije (1.2).

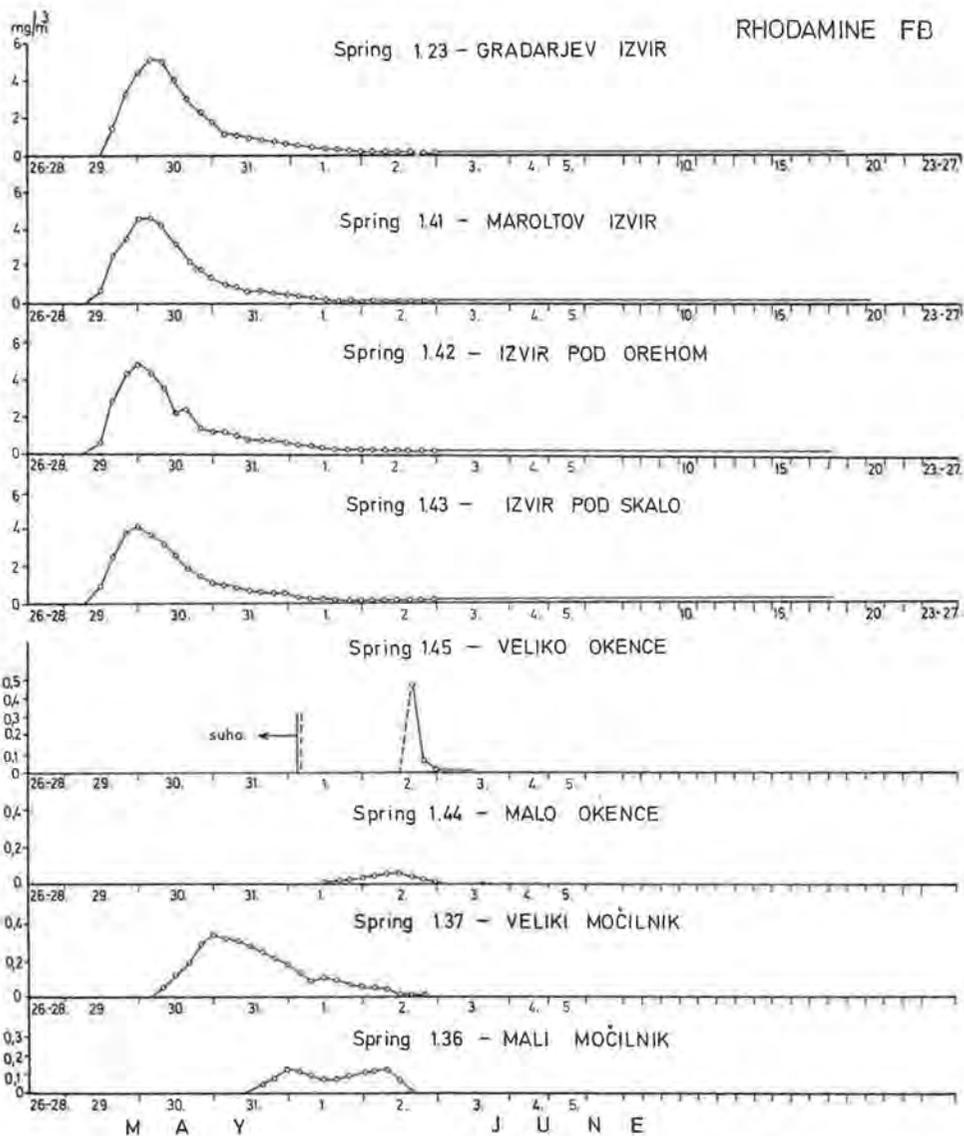


Fig. 58: Tracer-Durchgangskurven des Rhodamin FB in den Quellen Lubija (1.23) und Ljubljana (1.4 und 1.3).

Sl. 58: Krivulje koncentracij rodamina FB v izviri Lubije (1.23) in Ljubljane (1.4 in 1.3).

Fig. 59: Tracer-Durchgangskurven des Eosin in den Quellen Ljubljana und Lubija. x — Messungen in Vrhnika, o — Messungen in München.

Sl. 59: Krivulje koncentracij eozina v izviri Ljubljane in Lubije. x — po meritvah HMZ na Vrhniki, o — po meritvah Inštituta za radiohidrometrijo v Münchnu.

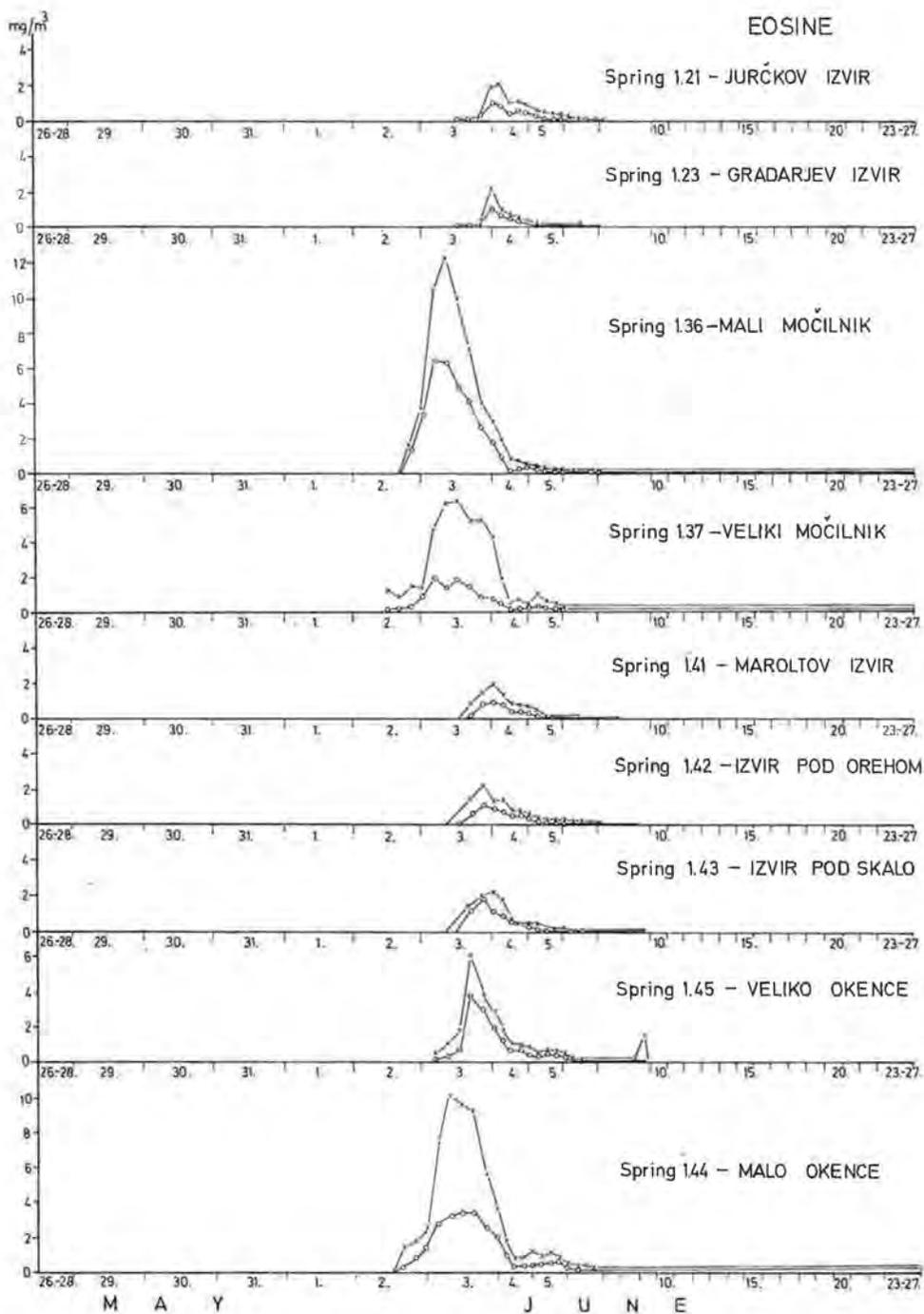


Tabelle 22: Daten der mit Eosin registrierten Tracerdurchgänge.

Beobachtungs- stelle	Zeit bis zum ersten Tracernachweis (h)	Zeit bis zum Durchgang des Tracermax. (h)	Konz. im Tracer- maximum (mg/m ³)	
			M.	V.
1. 34	./.	./.	./.	./.
1. 32	./.	./.	./.	./.
1. 36	150	158	6,4	12,5
1. 37	142	166	1,8	6,2
1. 44	146	162—170	3,4	10,0
1. 45*	142	170	3,7	6,0
1. 43	162	174	2,0	2,4
1. 42	162	174	1,1	2,2
1. 41	162	174	1,0	2,0
1. 23	166	178	1,1	2,3
1. 21	166	178—184	1,1	2,2
1. 22	./.	./.	./.	./.
1. 13	./.	./.	./.	./.
1. 12	./.	./.	./.	./.
1. 11	./.	./.	./.	./.
1. 15	./.	./.	./.	./.
1. 14	./.	./.	./.	./.

./. = Der Tracer Eosin war nicht nachweisbar

M = Analyse aus München, V = Analyse aus Vrhnika

* = Die Quelle war nicht ständig aktiv

2. 3. 4. 1. 5. 4. Die mit Amidorhodamin G erhaltenen Ergebnisse

Durch das Amidorhodamin G werden die Verbindungen zwischen der Eingabestelle 2. 31 (Hotenka Ponor) und dem Quellgebiet der Ljubljana repräsentiert. Die charakteristischen Daten der Tracernachweise sind in Tab. 23 aufgeführt.

Entsprechend der Lage der Eingabestelle finden sich die Wiederaustritte des Amidorhodamin G im Nordwesten des Quellgebietes der Ljubljana zwischen den Quellen 1. 32 (Kozuhov Izvir) und 1. 44 (Malo Okence). Entlang dieser Linie nehmen auch die Fließzeiten zwischen Tracereinspeisung und Durchgang der Konzentrationsmaxima zu. In keiner Quelle der Ljubija oder der Bistra konnte Amidorhodamin G nachgewiesen werden.

Außer den so markierten Verbindungen zwischen dem Hotenka ponor und dem Quellgebiet der Ljubljana ließen sich auch Verbindungen zu den Beobachtungsstellen 11. 1 und 11. 11, die zum Quellgebiet des Idrijca-Flusses gehören, erkennen.

Fig. 60: Tracer-Durchgangskurven des Amidorhodamin in den Quellen Ljubljana und Idrijca.

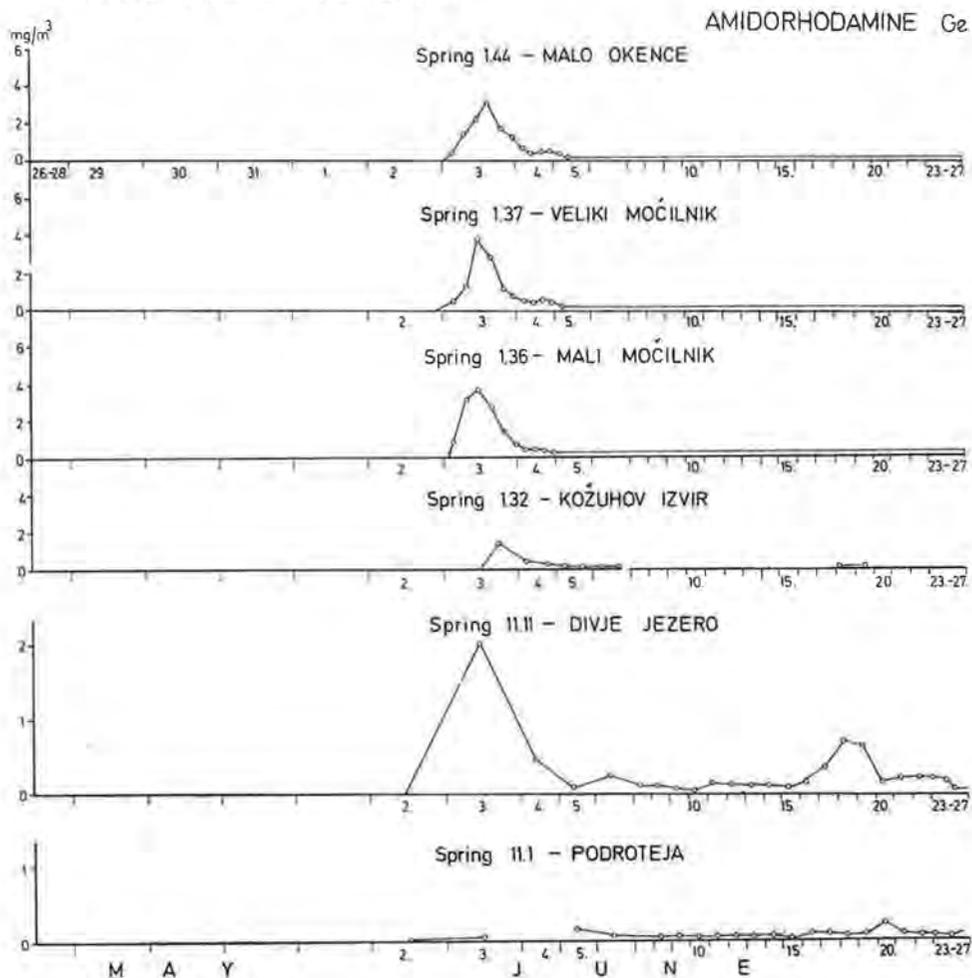
Sl. 60: Krivulje koncentracij amidorodamina v izviri Ljubljane in Idrijce.

Tabelle 23: Daten der mit Amidorhodamin G registrierten Tracerdurchgänge.

Beobachtungs- stelle	Zeit bis zum ersten Tracernach- weis (h)	Zeit bis zum Durchgang des Tracermaximums (h)	Konz. im Tracer- maximalmittel- wert (mg/m ³)
1. 34	./.	./.	1,3
1. 32	167	173	3,7
1. 36	155	167	3,8
1. 37	155	167	3,2
1. 44	159	167	./.
1. 45*	./.	./.	./.
1. 43	./.	./.	./.
1. 42	./.	./.	./.
1. 41	./.	./.	./.
1. 23	./.	./.	./.
1. 21	./.	./.	./.
1. 22	./.	./.	./.
1. 13	./.	./.	./.
1. 12	./.	./.	./.
1. 11	./.	./.	./.
1. 15	./.	./.	./.
1. 14	./.	./.	./.
11. 1	143	215	0,14
11. 11	143	167	2,0

./. = Der Tracer Amidorhodamin G war nicht nachweisbar

* = Die Quelle war nicht ständig aktiv



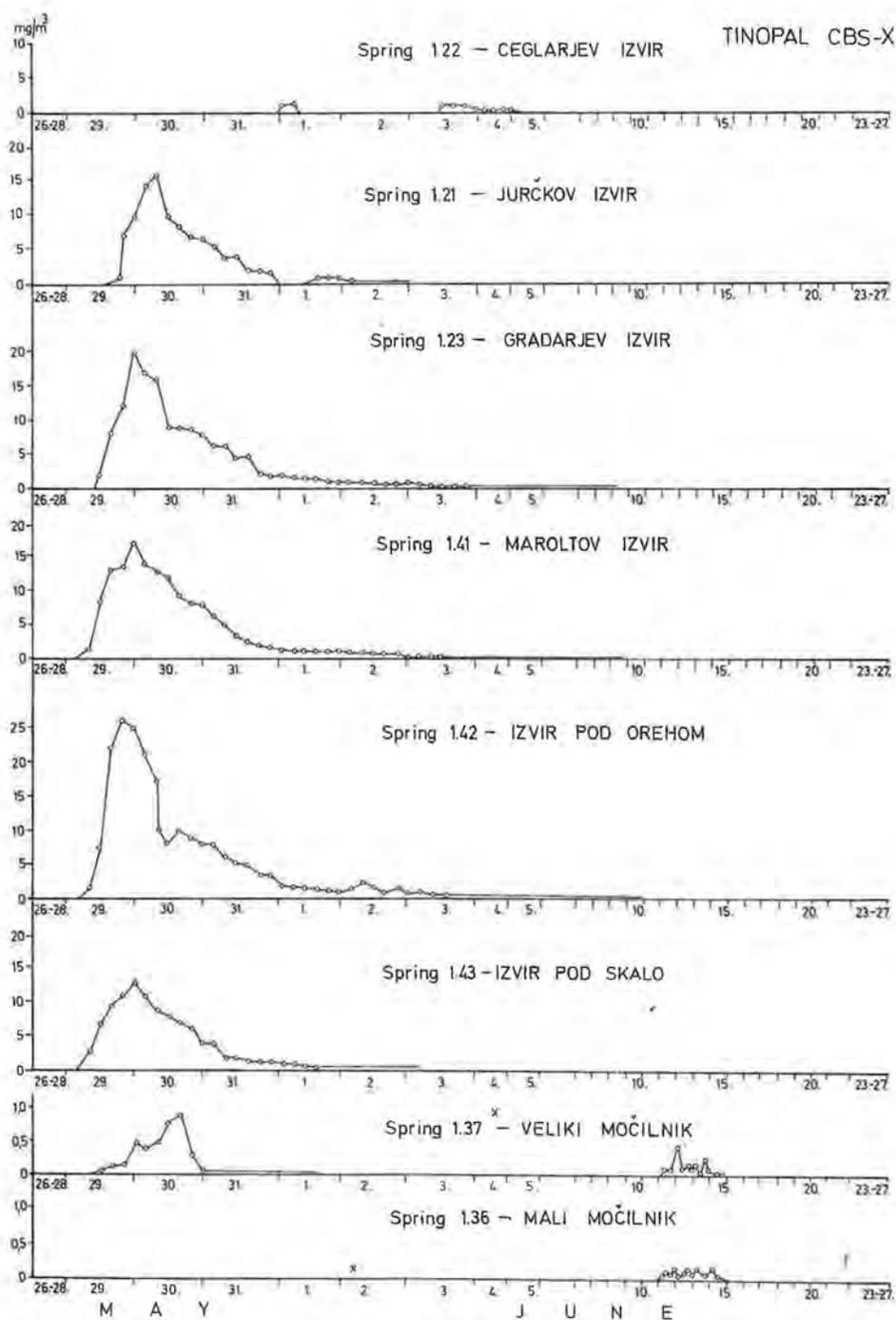


Fig. 61: Tracer-Durchgangskurven des Tinopal CBS-X in den Quellen Ljubljana.
 Sl. 61: Krivulje koncentracij tinopala CBS-X v izviroh Ljubljane.

2. 3. 4. 1. 5. 5. Die mit Tinopal CBS-X erhaltenen Ergebnisse

Entgegen den Erwartungen, die auf Grund der günstigen Beurteilung des Tinopal CBS-X als hydrologischer Tracer durch R. R. GLOVER (1972) an diesen Markierungsstoff gestellt wurden, ergaben sich beim Markierungsversuch im Gebiet der Ljubljana auch einige Nachteile:

- infolge der hohen Härte der Karstwässer im Gebiet der Ljubljana ist die Löslichkeit des Tinopal CBS-X in diesem Wasser sehr gering.
- durch die Einleitung von Abwässern aus Industrie und Haushalten liegen relativ hohe Blindwerte in den verschiedenen Proben vor, so daß die erreichbare hohe Nachweisempfindlichkeit ($0,001 \text{ mg/m}^3$ bei Anregung auf 320 nm) bei weitem nicht ausgenutzt werden kann. Tinopal-CBS-X-Konzentrationen unter $0,01 \text{ mg/m}^3$ können in diesen Wässern nicht mehr erkannt werden. Als gesichert wurden Analysenergebnisse erst ab 1 mg/m^3 angesehen.

Die Daten der durch das Tinopal CBS-X repräsentierten Verbindungen zwischen der Einspeisungsstelle 3. 41 (Dolenja Loka) und dem Quellgebiet der Ljubljana sind in Tab. 24 wiedergegeben.

Sichere Tracerdurchgänge des optischen Aufhellers waren in den Quellen 1. 21, 1. 23, 1. 41, 1. 42 und 1. 43 zu verzeichnen. Der Markierungsstoff wurde auch in der Höhle von Logarcek (3. 43) in Konzentrationen bis 200 mg/m^3 beobachtet. In der Quellengruppe der Bistra (1. 1) erschien kein Tinopal CBS-X. Als Besonderheit erscheint der Austritt des Tracers in der Quelle 1. 22, in der kein zusammenhängender Tracerdurchgang zu registrieren war. Der Tracer zeigte sich nur in zwei Proben am 1. und 3. Juni. Dieser Tracernachweis könnte mit Niederschlägen in dieser Zeit in einem Zusammenhang stehen. Eine andere Ursache wäre aber auch in der Verwechslung von Proben zu sehen, da in den korrespondierenden Proben der Entnahmestelle 1. 21 der zu erwartende Tracer fehlte. In geringen Konzentrationen wurde Tinopal CBS-X auch in den Quellen 1. 44, 1. 37 und 1. 36 gefunden. In diesem Fall könnte aber auch eine vorübergehende Erhöhung der Untergrundwerte der Quellwässer eingetreten sein, weshalb nicht sicher auf das Vorliegen einer hydraulischen Verbindung mit der Tinopal-Einspeisungsstelle geschlossen werden kann.

Schließlich soll noch auf einen verspätet eingetretenen positiven Nachweis des optischen Aufhellers in der zweiten Junihälfte und in der ersten Julihälfte in der Quellengruppe der Bistra (1. 1) hingewiesen werden. Dies könnte mit einer Freisetzung zuvor am Karstgrundwasser adsorbierten Tinopals durch eine Hochwasserwelle erklärt werden. Ebenso ist aber auch eine vorübergehende Zunahme der Untergrundwerte in diesen Quellwässern denkbar.

Tabelle auf nächster Seite

2. 3. 4. 2. Ergebnisse des Fluoreszenztracer-Nachweises mittels Aktivkohle (F. BAUER)

Mit Hilfe der Aktivkohlemethode (F. BAUER, 1967 und 1972) sollten in den Quellen allfällige Uraninaustritte, die durch Direktmessung der Wasserproben nicht erfaßbar waren, festgestellt werden.

Zur Bestimmung des Blindwertes wurden bereits im Februar und im April 1975 an den später beobachteten Quellen jeweils eine Woche lang Aktivkohlesäckchen eingesetzt.

Während des Versuches wurden an den Quellen Aktivkohlesäckchen mit durchschnittlich drei- bis fünftägiger Einhängedauer eingesetzt, auf die sich die folgenden Auswertungen beziehen. (Durch diese Kohleproben wurden folgende

Tabelle 24: Daten der mit Tinopal CBS-X registrierten Tracerdurchgänge.

Beobachtungs- stelle	Zeit bis zum ersten Tracer- nachweis (h)	Zeit bis zum Durchgang des Tracermaximums (h)	Konz. im Tracer- maximalmittel- wert (mg/m ³)
1. 34	./.	./.	—
1. 32	./.	./.	
1. 36	133	133	0,15
1. 37	69	97	0,9
1. 44	141	141	0,05
1. 45*	145	145	1,2
1. 43	41	53—57	13
1. 42	41	53	26
1. 41	41	57	17
1. 23	45	57	20
1. 21	49	65	16
1. 22	109	109	1,5
1. 13	./.	./.	./.
1. 12	./.	./.	./.
1. 11	./.	./.	./.
1. 15	./.	./.	./.
1. 14	./.	./.	./.
3. 48	4	9	200

./. = Der Tracer Tinopal CBS-X war nicht nachweisbar

* = Die Quelle war nicht ständig aktiv

Einzel-Zeitabschnitte erfaßt: 27. bis 30. Mai, 30. Mai bis 2. Juni, 2. bis 5. Juni, 5. bis 9. Juni, 9. bis 12. Juni, 12. bis 16. Juni, 16. bis 21. Juni und 21. bis 25. Juni. In einer Kohleprobe festgestellte Uraningehalte zeigen nur an, daß im angegebenen Zeitraum in der Quelle Uranin ausgetreten ist, ohne daß ein Rückschluß auf den exakten Zeitpunkt des Uraninaustrittes möglich wäre.) Parallel dazu waren zur Kontrolle auch Aktivkohlesäckchen mit neun- bis elftägiger Einhängedauer eingesetzt, die keine zusätzlichen weiteren Ergebnisse erbrachten und daher in diesem Bericht nicht berücksichtigt wurden. Die Beobachtung mit Aktivkohle erstreckte sich vorerst auf den Zeitraum vom 27. Mai bis 25. Juni 1975. Da in einigen der am 25. Juni entnommenen Aktivkohleproben noch Uranin nachweisbar war, wurden in der Zeit vom 7. Juli bis 20. August 1975 nochmals Aktivkohlesäckchen mit 5- bis 16tägiger Einhängedauer eingesetzt.

Die von den Beobachtern entnommenen Aktivkohlesäckchen wurden der Bundesanstalt für Wasserhaushalt von Karstgebieten in bestimmten zeitlichen Abständen übermittelt.

Zur Untersuchung der Aktivkohleproben auf Uraningehalte wurde die von F. BAUER (1967 und 1972) beschriebene Methode modifiziert angewendet. Je 2 g Kohle wurden mit je 8 ml Alkohol-Kalilaugengemisch versetzt und in halbstündigen Abständen dreimal geschüttelt. Nach zweitägigem Stehen im Dunkeln wurden die Fluoreszenzspektren mit einem hierfür adaptierten PERKIN ELMER Spectrofluorometer 204 aufgenommen. In Anlehnung an die von H. BEHKENS (1971 und 1973) beschriebene Methode wurden Anregungs- und Emissionsmonochromator mit Hilfe eines Zusatzgerätes mit einem gleichmäßigen Abstand von 30 nm bewegt. Auf diese Art wurden die Emissionsspektren von 480 bis 560 nm aufgenommen. Die Auswertung der Fluoreszenzkurven erfolgte unter Zugrundelegung der Fluoreszenzkurven der Blindwertproben. Infolge der hohen, meist stark schwankenden Background-Fluoreszenz der Kohleextrakte lag die Nachweisgrenze im Extrakt bei etwa 1 mg/m³. (In früheren Veröffent-

lichungen wurde der Begriff „Kohle-Eluate“ gebraucht, der richtiger durch „Kohle-Extrakte“ ersetzt wird.)

Folgende 18 Quellen wurden mittels Aktivkohle auf Uraninaustritte beobachtet: 1. 11 bis 1. 15, 1. 21 bis 1. 23, 1. 32, 1. 34, 1. 36, 1. 37 und 1. 41 bis 1. 46.

An den Quellen 1. 14, 1. 32, 1. 34 und 1. 46 war mittels Aktivkohle kein gesicherter Uraninnachweis möglich.

Eindeutige Uraninnachweise konnten bei den Quellen 1. 11 bis 1. 13, 1. 15, 1. 21 bis 1. 23, 1. 36, 1. 37 und 1. 41 bis 1. 45 erbracht werden.

In allen positiven Quellen war der erste eindeutige Uraninaustritt in den vom 30. Mai bis 2. Juni eingehängt gewesenen Kohlen nachweisbar. Die maximalen Uraninkonzentrationen in den Kohleextrakten waren bei fast allen Quellen ebenfalls vom 30. Mai bis 2. Juni festzustellen. Ausnahmen bildeten nur die Quellen 1. 15 (zwei Maxima: 2. bis 5. Juni und 9. bis 12. Juni) sowie 1. 44 und 1. 45 (Maxima 2. bis 5. Juni).

Bei einigen Kohleproben der Quellen 1. 36, 1. 37 und 1. 44 war der Uraninnachweis durch störende Eosingehalte beeinträchtigt.

Die in den Kohleextrakten gemessenen Uraninkonzentrationen sind in Tabelle 25 ausgewiesen.

Die Gänge der in den Aktivkohleextrakten gemessenen Uraninkonzentrationen wurden mit den vom Institut für Radiohydrometrie in München/Neuherberg durch Direktmessung der Wasserproben ermittelten Konzentrationsgängen verglichen. Hierbei ergab sich bezüglich des Verlaufes der Uraninaustritte an den einzelnen Quellen eine weitgehende Übereinstimmung (Fig. 62).

Die in den Extrakten der durchschnittlich drei- bis fünftägig eingehängt gewesenen Aktivkohlen gemessenen Konzentrationen waren im Durchschnitt 100-

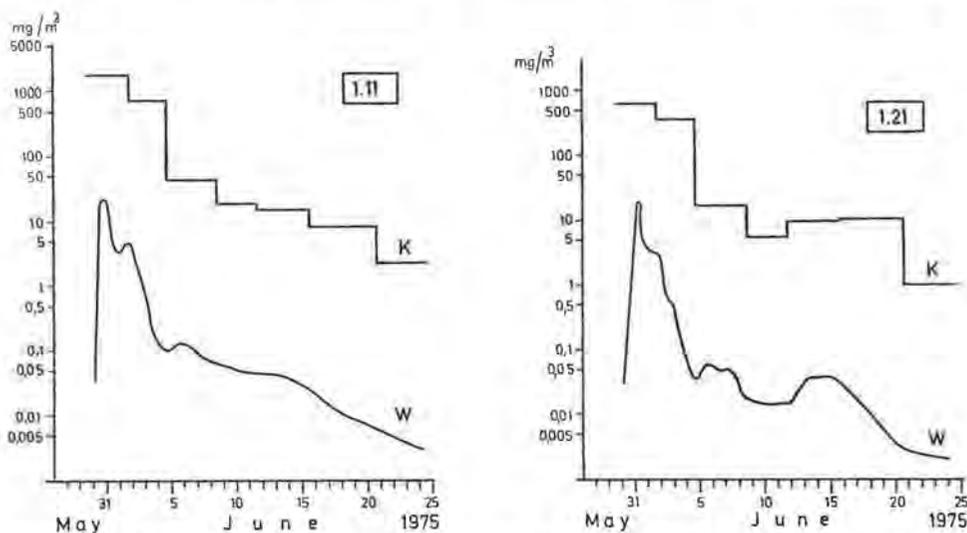


Fig. 62: In den Aktivkohleextrakten (K) und in den Wasserproben (W) der Quellen 1.11 und 1.21 gemessene Uraninkonzentrationen. Die Längen der horizontalen Striche von K geben die Einhängedauer der Aktivkohlesäckchen im Quellwasser an.

Sl. 62: Koncentracije uranina v ekstraktih (K) aktivnega oglja v vzorcih vode (W) izvirov 1.11 in 1.21. Dolžine vodoravnih linij (K) kažejo, kako dolgo so bile v izvorni vodi izobešene vrečke aktivnega oglja.

bis 1000mal höher als die Durchschnittswerte der in den Wasserproben derselben Zeiträume gemessenen Konzentrationen.

Allerdings wurde der Uraninnachweis mit Aktivkohle bei diesem Versuchsprogramm durch die starke Verunreinigung der Quellwässer, die einen erhöhten Background der Kohleextrakte zur Folge hatte, bedeutend beeinträchtigt. Bei reinen Quellwässern hochalpiner Karstgebiete liegt die Nachweisempfindlichkeit nach den bisherigen Erfahrungen merklich höher.

In den nach dem 7. Juli eingesetzt gewesenen Aktivkohleproben waren keine Uraningehalte mehr feststellbar.

In den Kohleproben einzelner Quellen konnte neben Uranin auch Eosin nachgewiesen werden, und zwar in den Quellen 1.36 (2. bis 25. Juni), 1.37 (2. bis 21. Juni), 1.44 (2. bis 9. Juni und 16. bis 21. Juni) und 1.45 (unsicherer Nachweis 5. bis 12. Juni). Die höchste Eosinkonzentration wurde im Extrakt der Kohleprobe von Quelle 1.36 vom Zeitraum 2. bis 5. Juni mit 220 mg/m³ festgestellt.

Rhodamin FB war in den Kohleextrakten der Quellen 1.11 bis 1.13, 1.21 bis 1.23 und 1.41 bis 1.43 im Zeitraum vom 27. bis 30. Mai nachweisbar. Die höchste Konzentration wurde im Extrakt der Kohleprobe von Quelle 1.12 mit 12 mg/m³ festgestellt.

Tabelle 25: In den Aktivkohleextrakten gemessene Uraninkonzentrationen (in mg/m³).

	Einhängedauer der Aktivkohlesäckchen							
	30.—2.	Juni 1975						
	30.—2.	2.—5.	5.—9.	9.—12.	12.—16.	16.—21.	21.—25.	
Nummern der Beobachtungsstellen	1.11	1800	720	42	19	16	8	2
	1.12	2000	600	42	19	12	11	2
	1.13	1600	620	31	61	11	85	2
	1.15	67	220	120	240	76	—	6
	1.21	630	370	16	5	9	10	(1)
	1.22	1500	610	51	13	18	13	2
	1.23	580	280	21	1	—	—	—
	1.36	11	*)	(0,3)	(0,9)	1	?	0
	1.37	54	(27)	(0,9)	(0,5)	1	?	0
	1.41	990	170	13	6	10	9	(0,9)
	1.42	1100	180	8	5	9	8	(0,3)
	1.43	1100	130	—	5	8	7	(0,7)
	1.44	5	(38)	1	—	(1)	(0,9)	(0,3)
	1.45	2	92	3	(0,9)	(1)	(1)	?

- 0 kein Uranin nachweisbar
- keine Aktivkohleprobe
- () unsichere Werte
- *) Messung der Uraninkonzentration wegen hoher Eosingehalte nicht möglich
- ? unsichere Uraninspuren

Amidorhodamin G und Tinopal CBS-X konnten mit dieser Extraktionsmethode in keiner Kohleprobe nachgewiesen werden.

Daß auch Eosin mit der hier angewandten Extraktionsmethode in den Kohleproben nachweisbar war, liegt wohl in der chemischen Ähnlichkeit der Farbstoffe Uranin und Eosin begründet.

Nicht ohne weiteres ist der Nachweis des Rhodamin FB verständlich. Jene Kohlen, in denen Rhodamin FB nachweisbar war, wurden am 30. Mai während

des Konzentrationsmaximums des Rhodamin FB aus den Quellen entnommen. Möglicherweise war das in den Extrakten nachgewiesene Rhodamin FB nicht adsorptiv an die Kohle gebunden, sondern lag als freier Lösungsrest vor, der durch das Extraktionsgemisch ausgewaschen wurde.

Es war nicht Aufgabe dieser Untersuchungen, mittels Aktivkohle außer Uranin auch Eosin, Amidorhodamin G, Rhodamin FB und Tinopal CBS-X nachzuweisen. Die hier angewandte Extraktionsmethode eignet sich in erster Linie nur für den Nachweis von Uranin, in zweiter Linie kann mit ihr (allerdings nur in weit geringerem Ausmaß als Uranin) auch Eosin nachgewiesen werden.

Eine nach Abschluß dieser Untersuchungen an der Bundesanstalt für Wasserhaushalt von Karstgebieten von W. PERLEGA (1976) neu ausgearbeitete Extraktionsmethode gestattet auch den Nachweis von Eosin, Amidorhodamin G, Rhodamin FB und Tinopal CBS-X mittels Aktivkohle, doch konnte diese neue Methode aus zeitlichen Gründen zur Untersuchung der Aktivkohleproben dieses Versuchsprogrammes nicht mehr herangezogen werden.

2. 3. 5. Die Markierung mit Sporen (H. HÖTZL, V. MAURIN und J. G. ZÖTL)

Die Triftung gefärbter Sporen von *Lycopodium clavatum* im Rahmen karsthydrologischer Untersuchungen hat sich bei zahlreichen Großversuchen seit über 20 Jahren bewährt. Die meisten dieser Experimente fanden in den Ostalpen statt, aber auch im Dinarischen Karst kam die Sporenriftmethode mit mehr oder weniger befriedigendem Erfolg zum Einsatz, so z. B. im Jahre 1965 von F. BAUER in der Herzegowina im Einzugsgebiet der Trebišnjica und von V. MAURIN und J. ZÖTL im Livanjsko Polje in Bosnien, 1966 von I. GAMS im Raume Cerknica—Planina sowie 1967 von R. GOSPODARIČ und P. HABIČ im Trnovski gozd (Ternovener Wald). Über die Durchführung und Auswertung von Sporenriftversuchen wurde bereits an anderen Stellen ausführlich berichtet (V. MAURIN & J. ZÖTL 1959, F. BAUER 1967, J. G. ZÖTL 1974, u. a.).

Dem Entschluß, auch beim kombinierten Markierungsversuch 1975 Sporen als Triftkörper einzusetzen, lagen folgende Überlegungen zugrunde:

- a) Zu überprüfen, ob die spezifischen hydrogeologischen Verhältnisse des nordwestdinarischen Karstes einen erkennbaren Einfluß auf die Versuchsergebnisse ausüben;
- b) einen nochmaligen Vergleich der Durchgangsgeschwindigkeiten, der Wiederausbringung (bzw. Sedimentation) und der Beobachtbarkeit zu den übrigen Markierungstoffen in Abhängigkeit von den lokalen karsthydrographischen Bedingungen anzustellen;
- c) sollte die Gelegenheit wahrgenommen werden, nach einem neuen Verfahren präparierte *Lycopodium*sporen in ihrem Triftverhalten im Vergleich zu jenen nach alter Art gefärbten zu testen (s. hierzu M. DECHANT, 2. 3. 5. 1.); und
- d) lag der Gedanke nahe, die bekannte Tatsache zu nutzen, daß unter günstigen Umständen mit Triftkörpern auch dort noch unterirdische Verbindungen nachgewiesen werden können, wo andere Markierungsstoffe wegen zu starker Verdünnung versagen (s. u. a. Donau-Aach-Versuch 1969, H. BATSCHKE et al. 1970). Ein Teil der Sporeneinspeisungen wurde daher an die Peripherie des vermutlichen Einzugsgebietes der Ljubljana verlegt und das Beobachtungsnetz bis in die Flußgebiete der Idrija und der Vipava ausgedehnt.

Insgesamt wurden drei Ponore mit vier verschiedenen Sporenfarben beschickt. Das Einspeisen erfolgte in der üblichen Weise, d. h. die trocken angelieferten Sporen (mit Ausnahme der braun gefärbten, s. unten) wurden zunächst mit Wasser zu einem dicken Sporenbrei aufbereitet und anschließend unter weiterer Wasserzugabe mit Hilfe eines Trichters mit einem engmaschigen Drahtnetz und einem Gummischlauch direkt in die Schwinden eingebracht. Sie zogen überall ohne Stauungen ab, irgendwelche Schwierigkeiten traten nicht auf. Wie geplant, konnten die Injizierungen an allen Ponoren am 27. Mai 1975 um 15 Uhr beginnen. Das Wetter war trocken, der Himmel größtenteils bedeckt. Aus den Einspeisprotokollen lassen sich folgende Einzelheiten entnehmen:

Ponor Ribce (3. 43) am rechten Ufer der Unica:

Seehöhe: 440,03 m

Höhe des Wasserspiegels: 443,59 m

Wasserführung der Unica: 9,90 m³/s (der Abfluß in den Ponor betrug etwa 4,50 m³/s)

Einspeismengen: 10 kg grün gefärbte Sporen und 10 kg braun gefärbte Sporen (die braunen Sporen wurden in einer wässrigen Suspension von insgesamt 25 l angeliefert und vor der Einspeisung auf 50 l aufgefüllt)

Injizierung: grüne Sporen 15 bis 15.20 Uhr, braune Sporen 15.20 bis 15.40 Uhr (wegen des hohen Wasserstandes wurde von der eigentlichen Schluckstelle ein Plastikrohr bis an das Ufer hochgezogen)

Leiter: M. KOLBEZEN und J. ZÖTL

Ponor Žejski potok (2. 32):

Seehöhe: ca. 546 m (nach der Karte)

Pegelstand: 66 cm

Abfluß in den Ponor: 0,023 m³/s

Einspeismenge: 10 kg rot gefärbte Sporen

Injizierung: 15 bis 15.15 Uhr

Leiter: H. HÖTZL

Ponor Pikeljška voda (2. 51):

Seehöhe: ca. 635 m (nach der Karte)

Abfluß in den Ponor: ca. 0,02 m³/s

Einspeismenge: 25 kg blau gefärbte Sporen

Injizierung: 15.05 bis 15.20 Uhr

Leiter: P. HABIČ und V. MAURIN

Als Hilfskräfte bei den Einspeisungen wirkten Studenten aus Karlsruhe und Ljubljana mit, die am weiteren Versuch nicht mehr beteiligt waren.

Die Planktonnetze für die **Beprobung** wurden an allen 21 hierfür vorgesehenen Abflüssen bereits im Laufe des 26. Mai 1975 eingesetzt und bei dieser Gelegenheit auch gleich die Beobachter eingewiesen.

An den Quellen im **Einzugsgebiet der Ljubljanica** wurde am Vormittag des 27. Mai je eine Leerprobe gezogen, die erste reguläre Probe am Vormittag des 28. Mai — also etwa 20 Stunden nach den Einspeisungen — entnommen. Die weitere Beprobung wurde zweimal am Tag, und zwar bei den Kontrollstellen 1. 32, 1. 34, 1. 36 und 1. 37 bis zum 8. Juni, in allen anderen Quellen (1. 11 bis 1. 14, 1. 21 bis 1. 23 und 1. 41 bis 1. 45) nur bis zum 3. Juni durchgeführt; in der Folge einmal täglich, bei der erstgenannten Gruppe bis zum 10. Juni, bei

allen anderen Quellen bis zum 7. Juni. In der darauffolgenden Zeit wurden die Planktonnetzproben nur mehr stichprobenweise in zwei- bis mehrtägigem Abstand gezogen. Die letzte Beprobung erfolgte am 25. Juni 1975.

Auf eine Kontrolle der Quelle 1.15 im Flußgebiet der Bistra wurde wegen zu ungünstiger Beobachtungsbedingungen verzichtet. Auch ein in einem unterirdischen Wasserlauf in der Höhle Grudnovo breznv (1.33) auf halber Strecke zwischen Hotedršica und Dol.-Logatec probeweise eingesetztes Planktonnetz mußte wegen der stark schwankenden Wasserführung wieder eingezogen werden.

Im **Einzugsgebiet der Idrija** standen der Abfluß des Divje jezero (Wildsee, 11.11) sowie die für die Wasserversorgung von Idrija genutzte Quelle Podroteja (11.1) unter Kontrolle. Die Beprobung erfolgte vom 28. Mai bis zum 26. Juni 1975 im allgemeinen täglich, bei 11.1 noch bis zum 22. September und bei 11.11 bis zum 11. Juli fallweise. Bei letzterer Quelle trat in der Zeit zwischen dem 2. und 5. Juni wegen eines extremen Hochwassers eine Unterbrechung der Beobachtung ein.

Obwohl eine Verbindung der mit Lycopodiumsporen beschickten Schwinden mit dem **Flußgebiet der Vipava** von vornherein unwahrscheinlich war, wurde doch je ein Planktonnetz in einem der großen Abflüsse der Quellgruppe in Vipava sowie in die Quelle Hubelj bei Ajdovščina eingesetzt. Damit sollte auch der „negative Rahmen“ (V. MAURIN 1967) für die Beobachtung abgesteckt werden. Die Kontrollen liefen bis zum 25. September 1975.

In der folgenden Zusammenstellung (Tab. 26) werden die Ergebnisse der positiven Planktonnetzproben aufgegliedert nach Fluß- bzw. Quellgebieten wiedergegeben. Zu bemerken ist dabei, daß die Beprobung im Gelände wegen Netzverlusten oder -beschädigungen durch Hochwässer und Kinder beeinträchtigt war. Auch der zum Teil stark wechselnde Wasserstand erschwerte die Beobachtung. So fielen einige Quellen zeitweise trocken oder hatten einen nicht mehr erfaßbaren Abfluß. Die mikroskopische Untersuchung der Proben erfolgte in Graz, Karlsruhe und Ljubljana. Durch ein Mißgeschick wurden die in Jugoslawien bearbeiteten Proben nur zum Teil ausgewertet, so daß die bei diesen angeführten Sporenzahlen noch zu erhöhen wären.

Die **Auswertung der Planktonnetzproben** brachte — trotz der erwähnten Schwierigkeiten — im ganzen gesehen ein durchaus befriedigendes Ergebnis.

Die Beobachtungen im **Bereich von Vipava** verliefen negativ. In keiner einzigen Probe konnten gefärbte Sporen nachgewiesen werden. Dadurch wird die schon bisher auf Grund geologischer, morphotektonischer und hydrogeologischer Befunde bestehende Ansicht, daß das unterirdische Einzugsgebiet der Vipava nicht bis in den Bereich der großen Störungszone von Idrija zurückreicht, bekräftigt (I. GAMS 1965, P. HABIČ 1968, 1970, R. GOSPODARIČ 1969, P. HABIČ & R. GOSPODARIČ 1972, F. HABE 1972).

Dagegen wurden alle **Quellbezirke der Ljubljana** (1.1, 1.2, 1.4. und 1.3) von der Sporenriftung betroffen.

Da die Sporenrift bekanntlich keine quantitative Aussage über das Volumen der markierten Wassermengen oder den Prozentsatz der Wiederausbringung zuläßt, muß sich die Diskussion auf das erste Auftreten der Sporen und den Verlauf des Durchganges sowie auf einen Vergleich mit den anderen Markierungsstoffen beschränken.

In den Quellgruppen 1.1, 1.2 und 1.4 traten — mit Ausnahme der Quelle 1.44 — nur grüne und braune Sporen auf. Da diese bekanntlich gemeinsam in

1.1 BISTRA						1.2 LUBIJA						1.4 V. LJUBLJANICA											
Dat.	Zeit	gr	br	ro	bl	Dat.	Zeit	gr	br	ro	bl	Dat.	Zeit	gr	br	ro	bl	Dat.	Zeit	gr	br	ro	bl
1.11						1.21						1.41						1.43					
29.5.	17.00	-	1	-	-	30.5.	10.30	40	20	-	-	29.5.	18.30	14	-	-	-	29.5.	11.45	2	2	-	-
30.5.	10.00	7	8	-	-		18.40	55	21	-	-	30.5.	12.05	51	38	-	-		10.15	27	17	-	-
	18.10	110	63	-	-	31.5.	9.10*	3	3	-	-		19.25	50	26	-	-	30.5.	11.50	83	45	-	-
31.5.	9.30*	34	17	-	-		17.15*	2	6	-	-	31.5.	9.00*	7	7	-	-		19.10	121	46	-	-
	17.15*	18	12	-	-	1.6.	10.25	98	18	-	-		18.30*	61	48	-	-	31.5.	8.50*	52	47	-	-
1.6.	9.35	76	9	-	-		18.45	61	11	-	-	1.6.	10.50	223	134	-	-		18.20*	145	33	-	-
	18.05	34	15	-	-	2.6.	11.00	40	5	-	-		19.40	42	12	-	-	1.6.	11.10	41	14	-	-
2.6.	10.35	45	17	-	-		17.55	69	4	-	-	3.6.	11.15	16	4	-	-		19.30	19	5	-	-
	18.20	68	25	-	-	3.6.	10.40*	8	6	-	-		17.35	20	13	-	-	2.6.	11.25	28	14	-	-
3.6.	10.10*	-	1	-	-		18.40*	8	5	-	-	1.6.	11.40*	-	2	-	-		17.15	36	8	-	-
	18.00*	1	-	-	-	4.6.	18.40	17	11	-	-	4.6.	17.40	19	9	-	-	3.6.	11.30*	-	2	-	-
4.6.	18.10	41	8	-	-	5.6.	17.55	12	4	-	-	5.6.	18.45	8	5	-	-		19.35*	4	1	-	-
5.6.	17.30	36	4	-	-	6.6.	18.25	7	3	-	-	6.6.	19.30	7	2	-	-	4.6.	17.30*	4	1	-	-
7.6.	17.20*	9	2	-	-	12.6.	16.30	1	-	-	-	7.6.	18.40*	13	3	-	-	5.6.	18.25	114	30	-	-
12.6.	18.30*	4	-	-	-	16.6.	17.15	2	1	-	-	8.6.	11.30	9	6	-	-	6.6.	19.10	34	7	-	-
16.6.	18.25	7	3	-	-	1.22						9.6.	10.35*	2	2	-	-	7.6.	18.20*	39	15	-	-
25.6.	18.20	3	1	-	-	29.5.	17.30	-	-	-	-	10.6.	13.55	10	3	-	-	8.6.	11.10	63	16	-	-
1.12						30.5.	10.40	5	-	-	-	12.6.	18.50*	2	-	-	-	9.6.	11.10*	27	11	-	-
30.5.	10.10	67	22	-	-		18.40	58	31	-	-	14.6.	10.10	10	3	-	-	10.6.	15.45	60	12	-	-
	18.15	71	24	-	-	31.5.	8.05*	20	33	-	-	16.6.	17.30	20	11	-	-	12.6.	17.05*	13	8	-	-
31.5.	9.40*	12	19	-	-		17.40*	7	6	-	-	18.6.	16.15*	2	-	-	-	14.6.	9.40	31	9	-	-
	17.20*	12	25	-	-	1.6.	10.20	161	38	-	-	1.42						1.44*					
1.6.	9.40	83	22	-	-	2.6.	18.40	321	103	-	-	29.5.	18.00	2	2	-	-	3.6.	19.30*	-	-	2	-
	18.20	39	6	-	-	3.6.	10.55	269	56	-	-	30.5.	12.00	252	219	-	-	4.6.	17.15	1	-	204	-
2.6.	10.30	59	14	-	-	4.6.	10.30	139	24	-	-		19.15	323	162	-	-	5.6.	10.20	1	-	329	2
	18.30	57	9	-	-	5.6.	10.45*	8	12	-	-	31.5.	8.55	392	124	-	-	6.6.	19.00	2	-	167	1
3.6.	10.15*	11	7	-	-	6.6.	18.35	75	13	-	-	1.6.	10.55	469	172	-	-	7.6.	18.15*	-	-	151	5
	18.15	47	12	-	-	7.6.	18.45	2	1	-	-		19.35	286	94	-	-	8.6.	11.20	1	-	91	1
5.6.	17.25	77	15	-	-	8.6.	18.45	40	11	-	-	1.45*											
6.6.	18.10	16	2	-	-	9.6.	18.30	14	3	-	-	3.6.	19.10*	63	27	-	-						
7.6.	17.25	10	13	-	-	10.6.	17.50	10	2	-	-	4.6.	17.15	80	13	-	-						
12.6.	16.30	4	1	-	-	12.6.	15.25*	3	1	-	-	5.6.	18.15	43	9	-	-						
16.6.	18.25	4	1	-	-	16.6.	17.10	29	7	-	-	7.6.	18.10*	25	5	-	-						
						20.6.	15.50	31	5	-	-	8.6.	11.05	11	1	-	-						
1.13						25.6.	16.30	28	4	-	-	1.45*											
29.5.	17.20	-	2	-	-	1.23						4.6.	17.25	108	75	-	-						
30.5.	10.20	20	16	-	-	29.5.	17.45	3	3	-	-	5.6.	18.40	90	24	-	-						
	18.20	193	81	-	-	30.5.	11.05	73	36	-	-	6.6.	19.20	27	6	-	-						
31.5.	15.50*	27	12	-	-		18.50	53	2	-	-	7.6.	18.30*	54	14	-	-						
	17.30*	6	12	-	-	31.5.	9.20*	-	1	-	-	8.6.	11.15	63	33	-	-						
1.6.	10.00	72	29	-	-		10.30	49	16	-	-	9.6.	10.20*	15	3	-	-						
2.6.	10.45	87	21	-	-	1.6.	10.50	29	11	-	-	10.6.	15.50	27	8	-	-						
	18.40	46	16	-	-	3.6.	11.10	19	3	-	-	12.6.	16.55*	36	11	-	-						
3.6.	10.20*	4	-	-	-	4.6.	18.10	31	5	-	-	14.6.	9.95	59	14	-	-						
	18.20*	5	2	-	-	5.6.	18.55*	10	2	-	-	16.6.	17.35	74	10	-	-						
1.6.	18.20	4	2	-	-	6.6.	18.50	38	16	-	-	18.6.	18.25*	3	-	-	-						
5.6.	17.40	19	2	-	-	8.6.	18.00	52	6	-	-	20.6.	17.35	4	1	-	-						
6.6.	18.20	6	2	-	-	10.6.	18.40	20	4	-	-												
12.6.	18.05*	3	-	-	-																		
16.6.	18.50	6	3	-	-																		
25.6.	16.30	4	1	-	-																		
1.14																							
29.5.	17.00	1	-	-	-																		
Σ 1.1		2132		-		Σ 1.2		1507		-		Σ 1.4		7424		944		11					

den Ponor Ribce (3.43) im Becken von Planina zur Einspeisung gelangten, können sie auch hier zusammen als ein Tracer behandelt werden.

Während die am Vormittag des 29. Mai 1975 zwischen 10.25 und 11.50 Uhr gezogenen Proben nur bei Quelle 1.43 vier Sporen führten, brachten die Nachmittagsproben (17.05 bis 18.30 Uhr) mit Ausnahme von 1.12 und 1.21 bereits allgemein kleinere Sporenmengen (s. Tab. 26). Nur in der Quelle 1.42 konnten zu diesem Zeitpunkt schon über 100 Lycopodiumsporen nachgewiesen werden.

I. 3 M. LJUBLJANICA						IDRIJCA					
Dat.	Zeit	gr	br	ro	bl	Dat.	Zeit	gr	br	ro	bl
1.32						1.1					
4.6.	9.50	-	-	1	-	7.6.	18.00	-	-	-	2
	19.00	-	-	3	-	10.6.	18.00	-	-	-	1
5.6.	9.50	-	-	15	-	17.6.	18.00	-	-	-	1
	19.30	-	-	178	1	19.6.	18.00	-	-	6	10
6.6.	10.45	-	-	59	-	20.6.	18.00	-	-	6	7
	17.00	-	-	39	1	21.6.	18.00	-	-	1	2
7.6.	10.45*	-	-	32	-	22.6.	19.00	-	-	2	2
	19.05*	-	-	25	1	23.6.	18.00	-	-	1	4
8.6.	10.10	-	-	78	2	24.6.	18.00	-	-	1	1
	17.50	-	-	2	-	26.6.	18.00	-	-	1	2
9.6.	11.35*	-	-	1	-	27.6.	20.00	-	-	2	1
10.6.	10.45	-	-	11	-	28.6.	18.10	-	-	2	1
11.6.	10.50	-	-	1	-	29.6.	18.00	-	-	1	2
12.6.	17.25	-	-	5	-	18.7.	18.30	-	-	7	-
25.6.	18.00	-	-	1	-	22.7.	19.00	-	-	3	3
						7.8.	17.00	-	-	2	-
						14.8.	18.00	-	-	1	-
1.34						1.11**					
2.6.	12.15	-	-	-	23	6.6.	13.00*	-	-	-	1
	19.30	-	-	-	5	10.6.	12.00	-	-	5	2
1.6.	10.05	-	-	2	-	19.6.	12.00	-	-	12	17
1.36						1.12					
29.5.	16.45	-	1	-	-	20.6.	12.00	-	-	3	2
3.6.	9.35	-	-	108	-	31.6.	12.00	-	-	1	0
4.6.	19.25	-	-	261	-	25.6.v	12.00	-	-	-	1
5.6.	9.30*	-	-	8	-	27.v	13.00	-	-	9	24
6.6.	11.00	-	-	317	70	31.7.	13.00*	-	-	-	1
7.6.	18.45*	-	-	198	6	4.7.	8.00	-	-	1	1
8.6.	10.30	-	-	65	1	6.7.	13.00	-	-	-	1
	17.15	-	-	26	-						
9.6.	11.45*	-	-	1	-						
10.6.	16.20	-	-	23	-						
11.6.	10.48	-	-	1	-						
12.6.	18.30	-	-	2	-						
13.6.	12.55*	-	-	1	-						
20.6.	11.30	-	-	1	-						
1.37						1.13					
29.5.v	12.05	-	2	-	-						
7.6.	11.50	-	5	-	-						
1.6.	20.10*	-	-	1	-						
4.6.	9.40	-	-	86	-						
	19.40	1	-	133	-						
5.6.	9.30	-	-	136	1						
	19.10	-	-	107	-						
6.6.	11.10	-	-	21	-						
	17.40	-	-	41	2						
7.6.	10.30*	-	-	27	1						
	18.55*	-	-	51	5						
8.6.	10.30	-	-	60	9						
	17.30	-	-	6	-						
9.6.	11.55*	-	-	8	-						
10.6.	16.30	-	-	11	-						
12.6.	17.20*	-	-	1	-						
14.6.	11.00	-	-	2	-						
16.6.	18.30	-	-	3	-						
18.6.	16.05*	-	-	1	-						
20.6.	18.40	-	-	17	-						
25.6.	17.45	-	-	2	-						
Σ 1.3		8		2240	59	Σ 1.13				66	100

Tabelle 26: Aufstellung der in den Einzugsgebieten der Ljubljana und der Idrija nachgewiesenen positiven Planktonnetzproben. Proben ohne Sporenhalt oder solche bei stark gestörter Entnahme sind nicht angeführt. Mit * bezeichnete Proben weisen wegen unvollständiger Untersuchung (s. Text) wahrscheinlich zu niedrige Werte aus. In der Tabelle bedeutet:
 Dat. = Tag der Entnahme, Zeit = Uhrzeit der Entnahme, gr = grün, br = braun, ro = rot, bl = blaugefärbte *Lycopodium*sporen, + = Quelle war nicht ständig aktiv.

Alle am 30. Mai entnommenen Proben weisen bereits erhöhte Sporenzahlen auf (bei 1.12 und 1.21 erstmalig). Diese Beobachtung könnte man so interpretieren, daß der Sporendurchgang etwa am Mittag des 29. Mai begann; bei 1.43 allerdings bereits vor 11.45 Uhr. Daraus läßt sich eine maximale Triftgeschwindigkeit von etwa 7,6 cm/s errechnen. Dies würde größenordnungsmäßig ganz gut mit den maximalen Durchgangszeiten von Rhodamin FB in der

Quellgruppe 1.4 übereinstimmen (bei 1.43 8,3 cm/s; s. hierzu auch Tab. 31 in Kap. 2.4.1.).¹

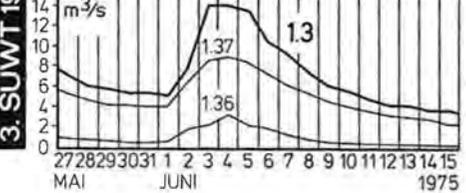
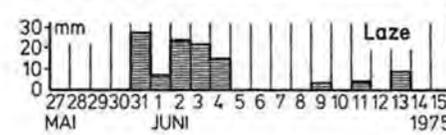
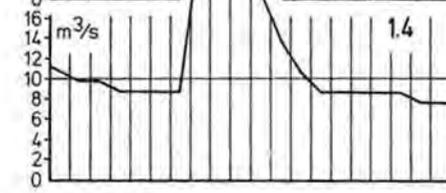
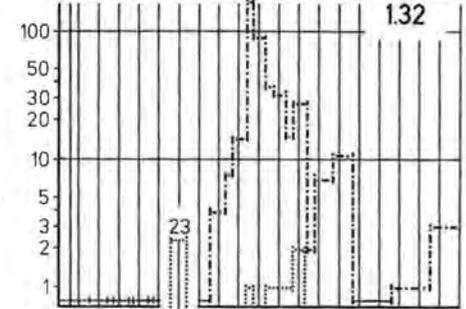
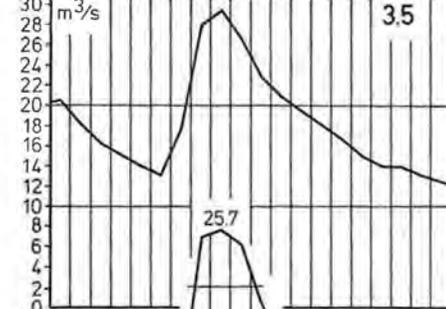
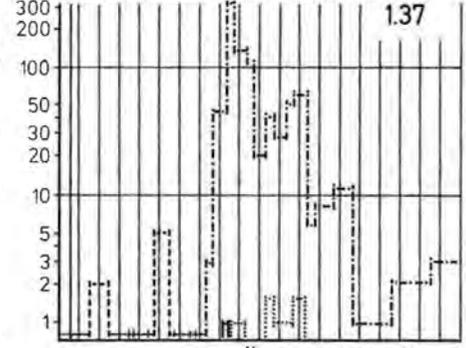
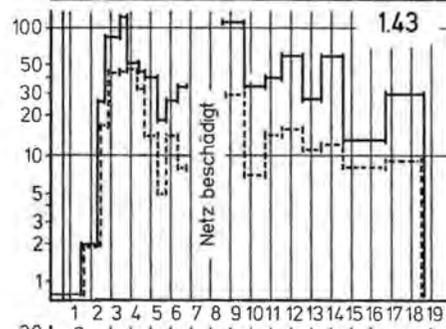
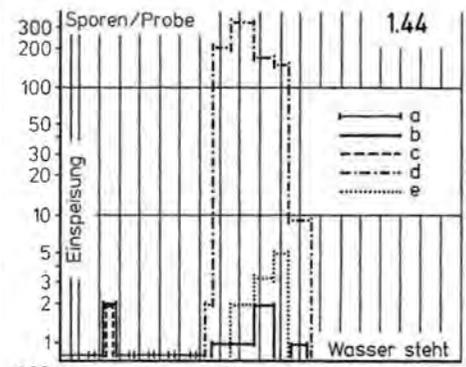
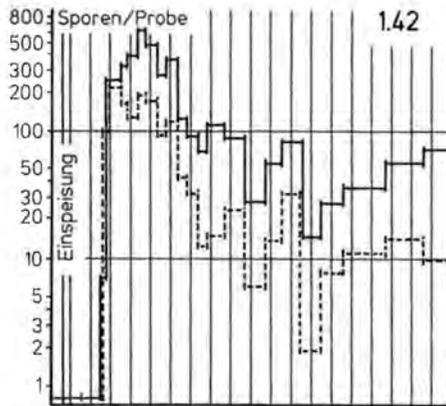
Fast einheitlich zeigen die Nachmittagsproben vom 30. Mai ein erstes Maximum des Sporendurchganges, weitere Kulminationen treten um den 1./2. Juni sowie um den 4./5. Juni auf. Da, wie schon erwähnt, bei der Gewinnung und Auswertung der Planktonnetzproben z. T. Schwierigkeiten bestanden, ist die Deutung dieser Peaks problematisch. Die in Kap. 2.4.1. für den Hauptdurchgang berechneten Abstandsgeschwindigkeiten sind daher für die Sporenrift unter diesem Vorbehalt zu betrachten.

Am vollständigsten verlief die Beobachtung der Sporendurchgänge bei den Quellen 1.42 und 1.43. Diese Ergebnisse sind auf der linken Seite von Fig. 63 graphisch dargestellt und dem Durchfluß der Unica an der Pegelstelle Hasberk (v. p. 3.5) und der Velika Ljubljana (1.4, v. p. Mirke) sowie den Niederschlagswerten an der Station Laze gegenübergestellt. Daraus ist klar ersichtlich, daß in den ersten Tagen nach den Einspeisungen keine wesentlichen Nie-

¹ Bei der Angabe und dem Vergleich von Triftgeschwindigkeiten mit den Durchgängen von Farbstoffen, Salzen usw. ist zu bedenken, daß es sich bei den Planktonnetzproben um Sammelproben über die ganze Einhängdauer des Netzes handelt. Es ist daher nicht feststellbar, ob die registrierten Sporen am Anfang oder gegen Ende dieser Zeitspanne aufgefangen wurden. Außerdem garantiert diese Methode nicht die genaue Erfassung des Beginns des Sporendurchganges, da bei großen Quellen ja nur ein Bruchteil der Gesamtschüttung durch das Netz fließt. Beim Versuch 1975 kommt noch dazu, daß die Farbstoffproben in den ersten Tagen der Untersuchungen sechsmal täglich, die Planktonnetzproben aber nur zweimal täglich in 24 Stunden gezogen wurden. Die für die Sporen angegebenen Durchgangszeiten sind also immer als Mindestwerte zu betrachten.

Fig. 63: Darstellung der Sporendurchgänge an den Quellen der Ljubljana an einigen ausgewählten Beispielen. 1.42 und 1.43 sind charakteristisch für die Quellgruppen 1.2 (Lubija) und 1.4 (Velika Ljubljana). Bei all diesen Quellen traten, mit Ausnahme von 1.44, nur grüne und braune *Lycopodium*sporen aus dem Polje von Planina (Ponor 3.43) auf. In der Quellgruppe 1.3 (und in 1.44) hingegen dominierten die roten (2.32) und die blauen Sporen (2.51) aus dem Hinterland von Hotedršica. In 1.32 und 1.34 wurden nur rote und blaue Sporen registriert. Die Signaturen der Durchgangsdigramme bedeuten: a = Einhängedauer der Planktonnetze, b = grün, c = braun, d = rot, e = blau gefärbte Sporen. An der Basis der Durchgangsdigramme in fortlaufender Numerierung die Tage nach der Einspeisung. Zur Ergänzung sind noch einige hydrologische und meteorologische Daten aus dem Versuchsgebiet einzutragen: 3.5 = Durchfluß der Unica (v. p. Hasberk), 1.4 = Abfluß der Velika Ljubljana, 1.3 = Abfluß der Mala Ljubljana, Laze = Niederschläge in der Station Laze im Becken von Planina.

Sl. 63: Na podlagi nekaterih izbranih primerov sestavljeni diagrami pojavljana trosov v izviri Ljubljane. 1.42 in 1.43 so značilni za skupino izvirov 1.2 (Lubija) in 1.4 (Velika Ljubljana). V vseh teh izviri (z izjemo 1.44) so se pojavili samo zeleni in rjavi trosi iz Planinskega polja (3.43). V skupini izvirov 1.3 (in v 1.44) nasprotno prevladujejo rdeče (iz ponora 2.32) in modri trosi (iz ponora 2.51) iz območja Hotedršice. V izviri 1.32 in 1.34 so bili ugotovljeni le rdeči in modri trosi. Oznake na diagramu pomenijo: a — obdobje, ko je bila v vodi obešena planktonska mrežica, b — zeleni, c — rjavi, d — rdeči, e — modri trosi. Na abscisi diagrama so navedeni zaporedni dnevi po injiciranju. Diagram dopolnjujejo nekateri hidrološki in meteorološki podatki iz poskusnega območja in sicer 3.5 — pretok Unice (v. p. Hasberk), 1.4 — odtok izvirov Velike Ljubljane, 1.3 — odtok izvirov Male Ljubljane, Laze — padavine v postaji Laze na Planinskem polju.



3. SUWT 1976

derschläge fielen (dies gilt auch für die übrigen Stationen im unmittelbaren Einzugsgebiet) und sowohl die Durchflüsse in den Schwinden im Polje von Planina als auch die Schüttung der Quellen bei Vrhnika eine fallende bzw. stagnierende Tendenz aufwiesen. Die erste Durchgangswelle der grünen und braunen Lycopodiumsporen ist also als witterungsunabhängig zu betrachten. Erst die späteren Kulminationen können auf Schwankungen der Wasserführung zurückgeführt werden. Welche Ausmaße diese erreichen konnten, zeigt am besten Quelle 1. 45, die in der Zeit zwischen 29. Mai und 2. Juni sowie ab dem 10. Juni praktisch trocken fiel, so daß eine Beprobung in diesem Zeitraum unmöglich war. Dasselbe gilt auch für 1. 44 ab 10. Juni 1975.

Problematisch ist das Ergebnis der Sporentrift bei Quelle 1. 14. Sie liegt am äußersten östlichen Rand des beobachteten Areals im Quellgebiet der Bistra. Kein einziger der übrigen Markierungsstoffe konnte in ihr nachgewiesen werden. Lediglich in der Planktonnetzprobe vom 29. Mai, 17.00 Uhr, fand sich eine einzige grün gefärbte Spore. Bei der nicht vollständig auszuschließenden Gefahr einer Kontaminierung bei der Verwendung von Triftkörpern würde man zunächst einer einzigen Spore keine Beweiskraft zubilligen. Bei Quelle 1. 14 stimmt aber der Umstand nachdenklich, daß diese positive Probe mit dem ersten Auftreten von grünen und braunen Sporen bei fast allen anderen kontrollierten Quellen in der Umgebung von Vrhnika zusammenfällt. Auch bei den übrigen Beobachtungsstellen sind es meist nur sehr niedere Sporenzahlen, und bei einigen Quellen tritt danach eine Unterbrechung der Ausbringung von grünen oder braunen Sporen ein, so z. B. bei 1. 44 und 1. 37. Bei der letzterer benachbart gelegenen Quelle 1. 36 blieb es ebenfalls bei einer einzigen braunen Spore in der Probe vom 29. Mai, 16.45 Uhr (s. Tab. 26). Bei all diesen Quellen sind aber die mit grünen und braunen Lycopodiumsporen markierten Verbindungen auch noch durch andere Tracer abgesichert.

Die Einspeisungen erfolgten bekanntlich bei abnehmender Wasserführung (s. Fig. 63, v. p. 3. 5, Hasberk). Man könnte sich nun vorstellen, daß in den ersten Tagen des Versuches noch höher liegende und damit auch noch weiter an die Peripherie dieses Karstwassersystems heranreichende Wasserwege von einem Teil der Sickerwässer der Unica benutzt wurden. Bei sinkendem Karstwasserstand wurden diese Verbindungen aber unterbrochen. Ganz analoge Verhältnisse konnten auch in anderen Karstsystemen festgestellt werden. Es sei hier noch daran erinnert, daß beim großen kombinierten Donauversuch 1969 einzig und allein durch Triftkörper (Lycopodiumsporen und *Serratia marcescens*) insgesamt acht Wiederaustrittsstellen von Donauwasser festgestellt wurden, während alle zwölf weiteren Markierungsstoffe lediglich in der Aachquelle nachgewiesen werden konnten (s. H. BATSCHKE et al. 1970, Fig. 72 u. S. 153 ff.).

Man muß natürlich auch die andere Möglichkeit im Auge behalten, daß die in 1. 14 aufgetretene Spore wirklich verschleppt wurde. Die Quelle hätte dann eben nur ein lokal begrenztes Einzugsgebiet oder würde vielleicht noch in beschränktem Maße aus dem Becken von Cerknica alimentiert. Im Zusammenhang mit dieser Frage ist es besonders bedauerlich, daß von einer Kontrolle der unmittelbar benachbarten Quelle 1. 15 auf Sporenführung abgesehen wurde, denn auch sie fällt aus dem übrigen Rahmen. Während nämlich Rhodamin FB in den Quellen 1. 11 bis 1. 13 in den Proben 49 Stunden nach der Einspeisung (also etwa gleichzeitig mit den Sporen = 50 Stunden) erstmals auftrat, konnte dieser Farbstoff in 1. 15 erst nach 105 Stunden nachgewiesen werden. Ähnlich verhält es sich auch mit dem Auftreten von Uranin A aus dem Becken von

Cerknica (Eingabestelle 6.16): 1.11 bis 1.13 nach 85 Stunden, 1.15 erst nach 135 Stunden.

Der von den Wasseraustritten 1.14 und 1.15 gespeiste Quellast der Bistra scheint — wohl wegen seiner peripheren Lage — in stärkerem Maße von der jeweiligen Wasserführung in diesem Karstsystem abhängig zu sein als die übrigen Quellen. Details wären hier noch abzuklären.

Die Quelle 1.44 (Malo Okence), an der linken Seite der hinteren Quellnische der Velika Ljubljana gelegen, ist die einzige der Gruppe 1.4, die außer einer geringen Anzahl grüner und brauner Sporen auch blaue und vor allem rot gefärbte Lycopodiumsporen führte (s. Tab. 26 u. Fig. 26). Während die Ausspülung der aus dem Polje von Planina stammenden Sporen wie bei den meisten anderen Quellen dieser Gruppe bereits am 29. Mai begann, traten die roten erst am 3. Juni und die blauen Sporen am 5. Juni auf. Vor allem die roten Lycopodiumsporen brachten eine sehr schöne Durchgangskurve.

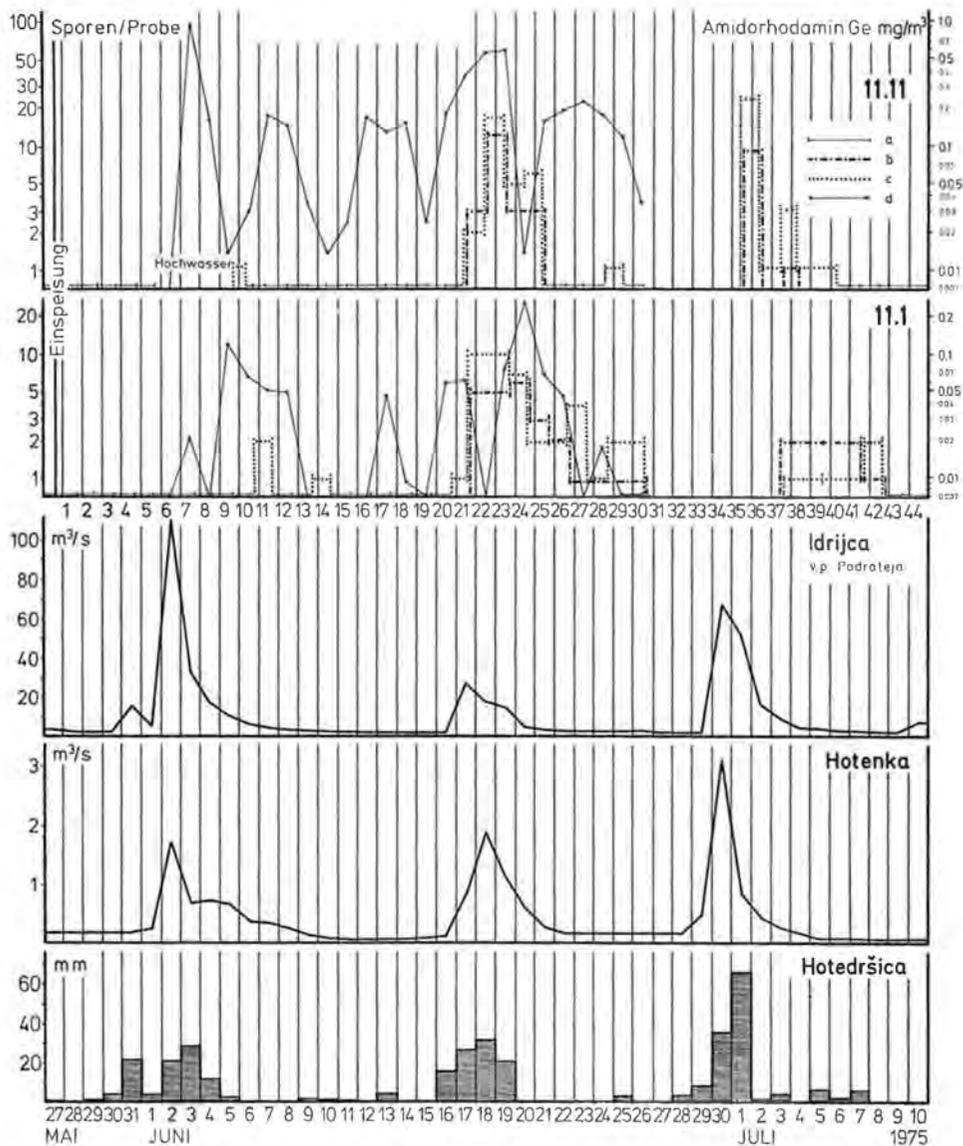
Bemerkenswert ist, daß in 1.44 wie auch in den unmittelbar benachbarten Quellen 1.37 und 1.36 der Mala Ljubljana fast alle eingesetzten Tracer (Uranin A aus 6.16, Rhodamin FB aus 3.42, Tinopal aus 3.41, Lithiumchlorid aus 3.1, Eosin aus 2.41, Amidorhodamin Ge aus 2.31 sowie rote Sporen aus 2.32 und blaue Sporen aus 2.51) nachgewiesen werden konnten. Nur Kaliumchlorid und Chrom-51 traten nicht auf, was wahrscheinlich mit der randlichen Lage der mit diesen Markierungsmitteln beschickten Bäche von Rovte (2.11 u. 2.21) zusammenhängt. Die Tatsache, daß in der oben erwähnten Quellgruppe Mischwässer aus dem gesamten Einzugsgebiet der Ljubljana (Seewasser aus Cerknica, unterirdische Abflüsse der Unica [und damit auch der Pivka] sowie Sickerwässer aus den Bereichen von Logatec und Hotedršica) gemeinsam abfließen, gehört zu den wesentlichen karsthydrologischen Erkenntnissen des kombinierten Markierungsversuches 1975.

Aus dem Bereich von Hotedršica, mit den Einspeisstellen der roten (2.32) und der blauen Sporen (2.51) wurden vor allem die Quellen der Mala Ljubljana (1.3) betroffen. Während bei 1.36 und 1.37 ab 29. Mai 1975 noch vereinzelt braune und grüne Sporen auftraten, dominierten bei diesen Quellen, wie auch bei 1.32 und 1.44, ab 3. bzw. 4. Juni die roten Sporen. Sie wurden durchwegs bis zum Ende der Beobachtung registriert und ergaben schöne Durchgangskurven (s. Tab. 26 u. Fig. 63). Für das erste Auftreten der roten Sporen errechnet sich eine Triftgeschwindigkeit von etwa 1,9 cm/s, für das Maximum der Durchgänge von etwa 1,5 cm/s.

Bei allen genannten Quellen scheinen ab 5. bzw. 6. Juni auch blaugefärbte Sporen in geringer Zahl sporadisch auf. Für ihr erstes Auftreten kann eine Triftgeschwindigkeit von etwa 1,6 cm/s angenommen werden. Ergänzend sei hier auf das in Fig. 64 dargestellte Niederschlagsdiagramm der Station Hotedršica hingewiesen.

Ein abweichendes Verhalten zeigte die am weitesten in Westnordwesten liegende Quelle 1.34. Sie führte nur am 2. und 3. Juni 1975 Sporen (27 blaue und 2 rote; s. dazu auch Tab. 26 u. Fig. 63). Der Durchgang war also sehr kurz, und es überwiegt hier die Ausbringung der blauen Sporen. Die maximale Triftgeschwindigkeit läßt sich mit etwa 2,4 cm/s angeben. Die Quellen 1.34 und 1.32 waren auch die einzigen, in denen die Tracer Chrom-51 und Kaliumchlorid nachgewiesen werden konnten, nicht aber das in 2.31 eingespeiste Amidorhodamin Ge.

Das regional interessanteste Ergebnis des Markierungsversuches ist aber der Nachweis von roten und blauen Sporen sowie von Amidorhodamin Ge im Ein-



zugsgebiet der Idrijca jenseits der orographischen Wasserscheide zwischen der Adria und dem Schwarzen Meer. Beobachtet wurden die großen Quellen Divje jezero (Wildsee, 11.11) und Podroteja (11.1) wenige Kilometer oberhalb der Stadt Idrijca. Die Ergebnisse sind in Fig. 64 graphisch dargestellt. Neben den nachgewiesenen Sporen ist hier auch noch die vom Institut für Radiohydrometrie in München festgestellte Konzentration von Amidorhodamin Ge in den täglich gezogenen Wasserproben wiedergegeben. Außerdem wurden die in der Station Hotedršica, in unmittelbarer Nähe der Einspeisstellen 2.31 (25 kg Amidorhodamin Ge), 2.32 (10 kg rote Sporen) und 2.51 (25 kg blaue Sporen) gemessenen Niederschlagswerte sowie der Abfluß in den Ponor Hotenka (2.31)

und der Durchfluß der Idrijca im Bereich der Pegelstelle Podroteja in das Sammeldiagramm aufgenommen.

Die Beobachtung des Sporendurchganges im Abfluß des Divje jezero (11.11) wurde durch eine am 1. Juni einsetzende und am darauffolgenden Tag ihren Höhepunkt erreichende Hochwasserwelle erheblich gestört. Das Wasser stammte dabei in erster Linie aus dem Quellsiphon des Wildsees, dessen Wasserspiegel um nahezu zwei Meter anstieg. Im Gefolge (!) dieser Schüttungsspitze erreichte die Farbstoffkonzentration am 3. Juni 1975 bereits ihren höchsten Peak. Die erste geregelte Planktonnetzprobe konnte erst wieder am 6. Juni gewonnen werden und brachte mit einer blauen Spore den ersten Nachweis dieser Triftkörper. Ob während des Hochwassers bereits Sporen ausgeschwemmt wurden, läßt sich nicht mehr eruieren. In der darauffolgenden relativ trockenen Periode bis einschließlich 15. Juni konnten keine Sporen registriert werden, der Farbdurchgang hielt aber mit einigen Schwankungen weiter an. Eine Änderung brachten erst am 16. Juni einsetzende Niederschläge und ein damit verbundener Schüttungsanstieg. Erstmals treten nun auch rote Sporen in etwas größerer Zahl aus, der schon vorher kräftig einsetzende Farbstoffdurchgang klingt aber bereits am 2. Juni wieder ab, um im Anschluß bis zum Ende der Farbstoffkontrolle (26. Juni 1975) wieder etwas anzusteigen.

Leider wurden die gesamten Beobachtungen in der darauffolgenden Zeit bis einschließlich 30. Juni vollständig unterbrochen. Schon die erste am 2. Juli wieder gezogene Planktonnetz-Tagesprobe brachte mit 9 roten und 24 blauen Sporen das Maximum des beobachteten Sporendurchgangs (s. Tab. 26 u. Fig. 64). Diese vermehrte Ausschwemmung von Triftkörpern läßt sich wieder eindeutig auf eine am 30. Juni einsetzende Hochwasserwelle zurückführen.

Die Kontrolle der Podroteja (11.1) gestaltete sich einfacher. Hier war es nämlich möglich, die Planktonnetze im Brunnenhaus in die Wasserleitung einzusetzen. Die Beobachtung lief also auch während der ersten Hochwasserwelle ungestört weiter. Die Sporenführung zeigt in dieser Quelle keine wesentlichen Abweichungen gegenüber dem Divje jezero — wenn man zunächst von den ersten sporadisch auftretenden blauen Sporen absieht. Überraschend ist aber



Fig. 64: Darstellung der Sporendurchgänge sowie der vom Institut für Radiohydro-metrie in München festgestellten Konzentrationen von Amidorhodamin Ge in den Quellen Divje jezero (11.11) und Podroteja (11.1) bei Idrija. Es bedeutet: a = Einhängedauer der Planktonnetze, b = rot, c = blau gefärbte Sporen, d = Amidorhodamin Ge. An der Basis der Durchgangsdigramme in fortlaufender Numerierung die Tage nach der Einspeisung. Zur Ergänzung sind noch einige hydrologische und meteorologische Daten aus dem Versuchsgebiet einzutragen: Idrijca = Durchfluß der Idrijca an der Pegelstelle Podroteja, unterhalb der beiden Großquellen 11.11 und 11.1, Hotenka = Abfluß des Baches Hotenka in den Ponor 2.31, der Einspeisestelle des Amidorhodamin Ge, Hotedrišica = Niederschläge an der gleichnamigen Meßstelle.

Sl. 64: Diagrami pojavljanja torsov in koncentracij amidorodamina Ge (po podatkih iz Münchna) v izviri Divje jezero (11.11) in Podroteja (11.1) pri Idriji. Znaki pomenijo sledeče: a — obdobje, ko je bila v vodi obežena planktonska mrežica, b — rdeči, c — modri trosi, d — amidorodamin. Na abscisi so navedeni zaporedni dnevi po injiciranju. Diagrame dopolnjujejo še nekateri hidrološki in meteorološki podatki iz poskusnega območja in sicer: Idrijca — pretok Idrijce na vodomeru Podroteje nizvodno od izvirov 11.11 in 11.1; Hotenka — odtoka ponicalnice Hotenka v ponor 2.31, injicirno mesto za amidorodamina; Hotedrišica — padavine na istoimenski merski postaji.

ein Vergleich des Farbdurchgangs. In der Tendenz gleichlaufend sind die Hochs und Tiefs der Konzentrationskurve jeweils um ein bis zwei Tage verschoben, so daß sie im Detail genau entgegengesetzte Werte aufweisen können. In diesem Licht lassen sich auch die Ergebnisse der Sporentrift (wenn auch nicht so aussagekräftig) ähnlich interpretieren.

Die Deutung dieser Phänomene, wie überhaupt des Übertrittes von Karstwasser aus dem Bereich Hotedršica in das Flußgebiet der Idrija ist nur aus den besonderen tektonischen und lithologischen Verhältnissen heraus möglich.

Die Gerinne, die in die Schwinden 2.31, 2.32 und 2.51 abfließen, entwässern ein hauptsächlich aus mittel- und obertriadischen Dolomiten der Čekovnik- bzw. der höheren Idrija-Decke aufgebautes Gebiet. Die Schwinden liegen am Nordwest- bzw. Südostrand des tektonischen Fensters von Strnad, in dem unterkretazische Kalke der parautochthonen Koševnik-Decke in einer Sattelstruktur auftauchen. Sie unterlagern im Westen und Norden entsprechend der normalen tektonischen Abfolge die Gesteine der Čekovnik-Decke, während im Osten das Fenster unter Fehlen dieser Decke direkt von paläozoisch/triadischen Gesteinen der höheren Idrija-Decke umrahmt wird.

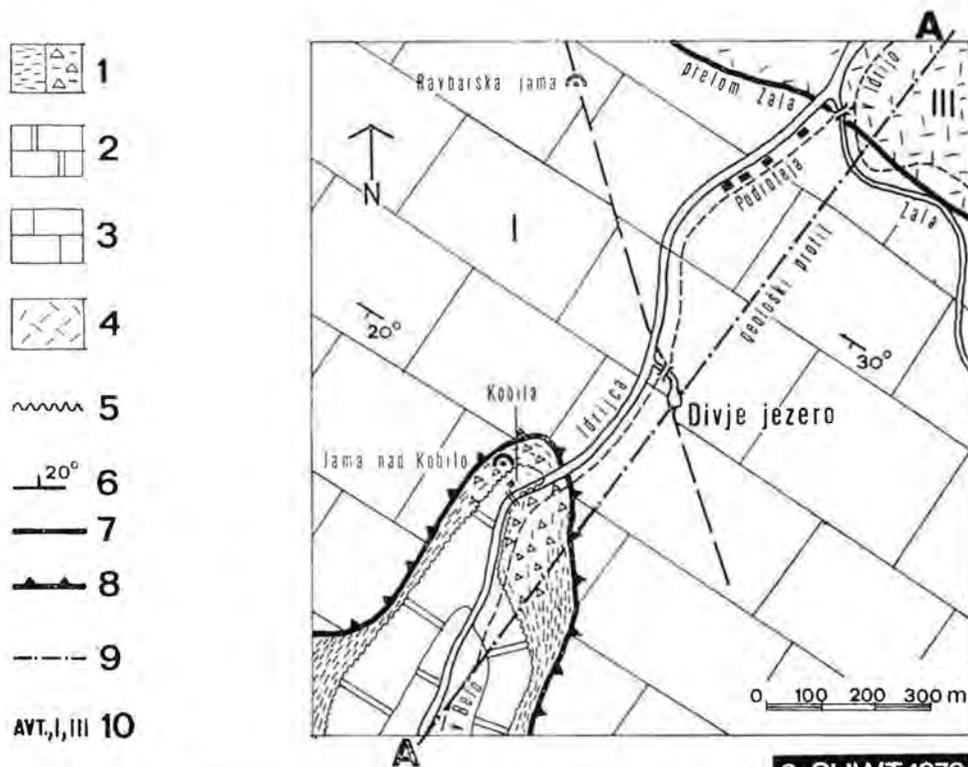
Der unterirdische Abfluß von den Schwinden nach Osten zu den Quellen von Vrhnika und nach Nordwesten zu den Quellen bei Idrija ergibt sich aus dem geologischen Bau. Von der Sattelstruktur des Fensters von Strnad tauchen die kretazischen Kalke der parautochthonen Koševnik-Decke unter die Idrija-Decke im Gebiet von Ozemlje, die hier eine flache weitgespannte Mulde bildet (I. MLAKAR 1969). Die Koševnik-Decke liegt hier direkt ohne Zwischenschaltung von Flysch den Kreide- und Jurakalken des Autochthons auf, aus denen die Karstwässer im Raum von Vrhnika zutage treten.

Ähnlich ist die Situation im Westen, wo allerdings der Deckenbau durch die Idrijalinie und die dazu parallelen Störungen eine zusätzliche Zerstückelung in NW—SE ausgerichtete Schollen aufweist. Die nachgewiesenen unterirdischen Verbindungen von den Schwinden nördlich von Hotedršica zu den Quellen bei Idrija queren zwar dieses Störungssystem, dürften im Hinblick auf die eigentlichen Wasserwege aber im wesentlichen diesen Störungen sowie den dazu parallelen Zerklüftungszonen folgen.

Nach den Profilen von I. MLAKAR (1969) sowie den geologischen Karten 1 : 100.000 werden zwar die kretazischen Kalke des Parautochthons im Fenster von Strnad nach Westen in einer schmalen flachen Mulde von triadischen Dolomiten der Čekovnik-Decke überlagert, tauchen aber in dem nachfolgenden Sattel an der Idrijalinie wieder auf. Zwischen Hotedršica und Godovič stehen die kretazischen Kalke beiderseits des Störungssystems in direkter Verbindung.

Die Austritte der Karstwässer aus den Kalken der Koševnik-Decke und des Autochthons liegen in dem zum Störungssystem quer verlaufenden Teil des tiefen Einschnittes der Idrija (Divje jezero und Podroteja). Beide Quellen dürften daher Wasser sowohl aus den Kalken der Koševnik-Decke als auch aus dem tieferen Autochthon enthalten, welches außerdem weiter nach Südwesten, Idrija-aufwärts, im Fenster von Strug (nach I. MLAKAR, 1969/1972), obertags austreicht.

Das unterschiedliche Schüttungsverhalten von Divje jezero und Podroteja geht wohl auf die lokalen Verhältnisse zurück. In beiden Fällen steigt ein Teil des Wassers wahrscheinlich aus den Oberkreidekalken des Autochthons auf. Während sich aber am Divje jezero entlang einer NNW-streichenden Störung ein über 50 m tiefer Quelltrichter entwickeln konnte, sind die Aufstiegswege bei der Podroteja englumiger (s. Fig. 65). Als Folge davon ist die Schüttung



3. SUWT 1976

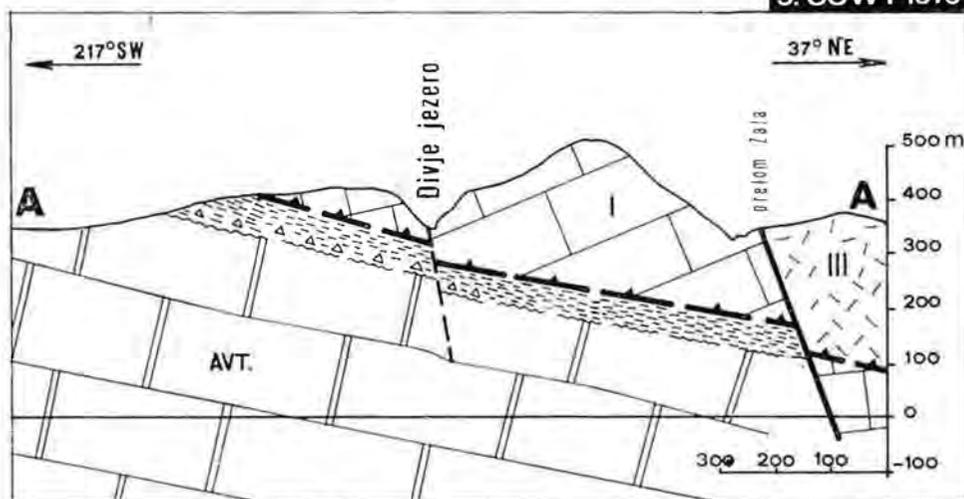


Fig. 65: Skizze der geologischen Situation in der Umgebung von Divje jezero (11.11) und Podroteja (11.1) nach I. Mlakar (1972). Es bedeutet: I = eozoner Flysch; Mergel, z. T. Basisbrekzien, 2 = Oberkreidekalke, 3 = Unterkreidekalke, 4 = triadische Dolomite, 5 = Erosionsdiskordanz, 6 = Überschiebung, 7 = Störungen, 8 = Schichtlagerungen, 9 = geologisches Profil, 10 = tektonische Einheiten (AUT = Autochthon, I = Koševnik-Decke, III = Idrija-Decke).

Sl. 65: Geološka skica okolice Divjega jezera (11.11) in Podroteje (11.1) po I. Mlakar (1972) 1 — eocenski fliš (lapor, delno breča), 2 — apnenec zgornje krede, 3 — apnenec spodnje krede, 4 — triasti dolomit, 5 — erozijska diskordanca, 6 — nariv, 7 — prelom, 8 — položaj plasti, 9 — geološki profil, 10 — pokrovi (AUT — avtohton, I — Koševniški pokrov, III — Idrijski pokrov).

dieser Quelle wesentlich ausgeglichener ($Q_{\max} 10 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\min} 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, Schwankungsziffer 12,5), Schüttungsanstiege werden verzögert. Der Divje jezero hingegen wirkt mit seinem ausgefahrenen Quellsiphon als Hochwasserventil, was oft auch in der stärkeren Trübung zum Ausdruck kommt. Die Schwankungsbreite des Wildsees ist außerordentlich. Während extreme Hochwässer bis zu $60 \text{ m}^3/\text{s}$ bringen können, fällt der Wasserspiegel des Quellsees nach einer längeren Trocken- oder Frostperiode bis unter die Überfallkante ab. Tritt in einer solchen Situation, durch lokale Verhältnisse bedingt, eine Hochwasserwelle im Oberlauf der Idrija auf, so kann der Quellsiphon vorübergehend sogar als Schlinger fungieren.

Was die unterirdischen Fließgeschwindigkeiten zwischen den beschickten Ponoren und diesen beiden Großquellen betrifft, so läßt sich für die Sporentrift nur ein Bezug zur ausgeprägten Durchgangsspitze 23 Tage nach der Einspeisung herstellen. Es würde sich daraus eine Triftgeschwindigkeit von etwa $0,6 \text{ cm/s}$ ergeben. Nimmt man aber das in beiden Quellen etwa gleichzeitig wenn auch nicht gleich stark einsetzende Auftreten von Amidorhodamin Ge, so errechnet sich die maximale Fließgeschwindigkeit während des Versuches mit $1,9 \text{ cm/s}$.

Mit diesem erfolgreichen Markierungsversuch konnte ein Beitrag zur Frage der Abgrenzung der europäischen Hauptwasserscheide zwischen der Adria und dem Schwarzen Meer geleistet werden. Durch einen glücklichen Umstand erfolgte die Injizierung von drei Tracern in die Scheitelung des Karstwasserkörpers, so daß die eingebrachten Markierungsmittel sowohl zu den Quellen der Ljubljana als auch nach Idrija verfrachtet werden konnten. Wir haben es hier, begünstigt durch die tektonischen Verhältnisse, mit einem kleinen Detail im großen Kampf der Natur um das einstmals viel umfangreichere Einzugsgebiet der Donau zu tun, eine Verschiebung zugunsten der Nordsee und der Adria, die sich unaufhaltsam von Südwestdeutschland bis nach Bosnien vollzieht.

Ein Problem steht hier noch offen. Während größere Mengen der nur 10 kg umfassenden rot gefärbten Lycopodiumsporen in den Quellgruppen 1.3 und 1.4 wieder ausgeschwemmt wurden, bleibt die gesamte Ausbringung der 25 kg blauen Sporen äußerst bescheiden (insgesamt nur 170 Stück; davon allein 100 in 11.11 und 11.1). Die blauen Sporen könnten, bedingt durch ungünstige lithologische oder hydrologische Verhältnisse im Untergrund sedimentiert oder auch nur vorübergehend deponiert worden sein. Es besteht auch die Möglichkeit, daß noch andere, bisher nicht bekannte Abflußwege im Karstkörper vorhanden sind. Es würde sich also lohnen, dieser offenen Frage nachzugehen.

Eine Enttäuschung brachte der probeweise Einsatz von 10 kg nach einer neuen Methode präparierter braun gefärbter Lycopodiumsporen. Sie wurden — wie schon erwähnt — zusammen mit 10 kg nach „alter Art“ grün gefärbter Sporen gemeinsam getriftet, in Planktonnetzen aufgefangen und untersucht. Die Wiederausbringung lag im Verhältnis zu den grünen Sporen in der Quellgruppe 1.1 bei 37% , in 1.2 bei 28% und 1.4 bei 41% ; im gesamten Durchschnitt also bei nur 37% . Auf die mit diesem Test zusammenhängende Problematik wird M. DECHANT in Kap. 2.3.5.1. selbst näher eingehen.

2.3.5.1. Die Präparation von Lycopodiumsporen in Form einer Suspension (M. DECHANT)

Der kombinierte Markierungsversuch 1975 im Einzugsgebiet der Ljubljana wurde zum Anlaß genommen, gefärbte Lycopodiumsporen in einer neuen Art zu präparieren und nicht mehr wie bisher in getrocknetem Zustand, sondern in

Form einer Suspension für die Einspeisung anzuliefern. Als Testgebiet wurde der Bereich zwischen dem Polje von Planina und den Quellen bei Vrhnika gewählt, in dem bereits bei früheren Versuchen gut durchfließbare unterirdische Wasserwege nachgewiesen wurden, und wo beim kombinierten Markierungsversuch eine größere Zahl von gleichzeitig ablaufenden Einspeisungen stattfinden sollte. Die Injizierung der Sporen erfolgte in den Ponor Ribce (3.43) am rechten Ufer der Unica (Näheres siehe Kap. 2.3.5.). Eingbracht wurden unmittelbar hintereinander 10 kg nach herkömmlicher Art grün gefärbte und an Ort und Stelle mit etwa 60 l Wasser angeschlämmte Sporen sowie 10 kg braun gefärbte Sporen in Form einer 25 l umfassenden Suspension, die vor der Einspeisung auf 50 l mit dem Wasser der Unica verdünnt wurde. Beide Präparate wurden in der üblichen Weise mit Hilfe eines mit einem engmaschigen Netz versehenen Trichters und eines Rohres dem in den Ponor abfließenden Wasser gleichmäßig beigemischt, so daß die Einspeisbedingungen als völlig gleichwertig zu bezeichnen sind. Dasselbe gilt auch für die Beobachtung, da die Kontrolle der Quellen sowie auch die Untersuchung der Planktonnetzproben ja für beide Sporenarten in einem erfolgte.

Wie schon in Kap. 2.3.5. ausgeführt, war das Ergebnis dieses Vergleichstests unbefriedigend. Während sich die Färbung der in den Planktonnetzen aufgefangenen braunen Sporen als gleichmäßig und intensiv erwies, betrug ihre Ausbringung im Vergleich zu den grün gefärbten Sporen aber insgesamt nur 37 Prozent (s. Tab. 26).

Dieses Ergebnis stand und steht noch immer im Widerspruch zu den vor der Triftung und auch danach angestellten Sedimentationsversuchen im Labormaßstab, die mit einer abgenommenen Probe der damals hergestellten Suspension stets positiv ausgefallen sind. Werden nämlich in zwei Glaszylinder gleiche Mengen der beiden Sporenriftmittel durch intensives Schütteln in Wasser suspendiert, so ist die Sedimentationsgeschwindigkeit der frisch angeschlämmten grünen Sporen etwa um die Hälfte größer als die der suspendierten braunen Sporen (8 bis 10 cm gegenüber 5 bis 6 cm pro Stunde). Hat sich z. B. nach einer Stunde der Großteil der grünen Sporen am Boden des Glaszylinders abgesetzt, steht im anderen Zylinder noch eine Wolke von braunen, sehr fein verteilten Sporen über dem Bodensatz. Selbst im für das Auge klaren darüberstehenden Wasser sind dann mittels eines seitlich eingestrahlt Lichtkegels gegen einen dunklen Hintergrund noch braune Sporen zu beobachten. Ein geringfügiges Bewegen beider Zylinder läßt augenblicklich die braunen Sporen nach oben steigen. Es wäre daher durchaus denkbar, daß aufgrund der feinen Verteilung und leichteren Beweglichkeit der suspendierten Sporen diese weniger gut mittels der Planktonnetze aufgefangen bzw. bei Turbulenz wieder ausgespült werden können.

Diese Annahme wird auch durch eine immer wieder gemachte Beobachtung bekräftigt, nach der die nach der bisherigen Methode gefärbten und angeschlämmten Sporen auch im wäßrigen Medium durch elektrostatische Aufladung zu Agglomerationen neigen und gut sichtbare „Sporenverbände“ bilden. Diese könnten schon aufgrund des vergrößerten Teilchens bevorzugt in den Netzen aufgefangen werden. Demnach wäre eine 100prozentige Verteilung in Einzelsporen in der Suspension unter den gegebenen Umständen gar nicht wünschenswert.

Aus diesen Eigenschaften der suspendierten Sporen, leichtere Beweglichkeit und Aufhebung ihrer elektrostatischen Eigenschaften, ließen sich vielleicht die schlechten Ergebnisse beim Großversuch erklären. Für alle weiteren Schritte

wird es jedoch notwendig sein, gerade diesen Punkt einer Klärung zuzuführen.

Nach diesen Darlegungen erhebt sich die Frage, warum überhaupt an eine Änderung der an sich bewährten bisherigen Präparationsmethode gedacht wurde. Die Gründe dafür liegen in der Eigenschaft der Sporen, sehr stark zu verstäuben und bei Nichtbeachtung aller nur erdenklichen Vorsichtsmaßregeln Versuchsergebnisse ernsthaft in Frage zu stellen:

- a) Beim Anschlämmen der trocken gelieferten Sporen ist eine Kontaminierung der mit der Einspeisung betrauten Personen kaum vermeidbar.
- b) Das mittels des Anschlämmens zu erzielende Suspendieren ist von der Sorgfalt der mit der Durchführung betrauten Personen und von noch vielen anderen Faktoren abhängig. Ein vollständiges Suspendieren ist meist nicht erreichbar, so daß eine große Anzahl gefärbter Sporen zusammengeballt bleibt, rasch zu Boden sinkt und — nach unserer bisherigen Auffassung — dem Triftversuch verlorengeht.

Außerdem sollte die Verwendung einer Sporensuspension neben dem Vorteil einer bequemeren Handhabung weitere für die Aussagekraft der Methode wichtige Voraussetzungen schaffen:

- a) Eine Fehlinterpretation der Ergebnisse infolge verstäubter Sporen könnte weitgehend ausgeschlossen werden. Der Einspeisvorgang wäre unabhängig von Wind und Wetter, eine Verseuchung des Versuchsgebietes dürfte bei Einhaltung minimaler Vorsichtsmaßregeln nicht möglich sein. Der Versuchsleiter könnte persönlich die Einspeisung überwachen.
- b) Es wurde erwartet, daß der Prozentsatz der wieder ausgebrachten Sporen höher liegt. Eine größere Sporenanzahl würde aber die Ergebnisse, die Beweiskraft mancher Triftuntersuchungen bei extrem schwierigen hydrogeologischen Verhältnissen sichern bzw. erhärten.

Um die vorgenannten Bedingungen zu erreichen, haben wir die hergebrachte Sporenfärbemethode grundlegend geändert. Bei dem bisherigen Verfahren ist es notwendig, die Sporen in der Siedehitze zu färben, wobei sie einen Quellvorgang durchmachen. Dabei erfolgt eine Art Hydrophilierung der Sporenoberfläche, welche auch den getrockneten Sporen verbleibt. Diese Eigenschaft ist für die erheblich größere Wasseraufnahme der gefärbten getrockneten Sporen verantwortlich, die allerdings mit einer gesteigerten Sedimentation während des Versuchsablaufes verbunden ist. Daher wurde in einem nicht-wässrigen Medium gefärbt, um die erste und wirkungsvollste Hydrophilierungsphase zu umgehen. Das Sedimentieren während des Versuches im Gerinne sollte, wenn es schon nicht zu verhindern war, als gesteuerter, langsam ablaufender Vorgang der Wasser- und damit Gewichtsaufnahme erfolgen. Daß diese Überlegungen in erster Näherung richtig waren, bewiesen die Sedimentationsversuche.

Nun zur Färbung selbst: 10 kg Sporen werden mit 27 l Methanol übergossen und unter häufigem Durchrühren 24 Stunden sich selbst überlassen. Danach wird die überschüssige Methanolvolumen abgesaugt, darin 300 g Vesuvin unter Rühren gelöst und über die methanolfeuchte Masse gegossen. Unter ständigem Durchmischen wird der Sporenbrei während einer Einwirkungszeit von 40 Stunden gefärbt. Die Farbstofflösung wird bis zur Trocknung abgesaugt und das restliche Methanol in einem Trockenraum mit Absaugvorrichtung entfernt. Die Sporenmasse wird mit der erforderlichen Wassermenge unter Zusatz von 85 ml Extran angerührt und auf ein Volumen von 25 l gebracht. Die Masse wird zweckmäßigerweise auf zwei Kunststoffbehälter zu je 25 l verteilt, so daß am Einspeisungspunkt nur mehr mit dem vorhandenen Wasser die Behälter

auf 25 l aufgefüllt werden müssen. Dieser Vorgang wird deswegen unterteilt, um das Gewicht während des Transportes zu verringern. Somit enthält jeder Behälter 5 kg Sporen, auf Trockensubstanz berechnet.

Aus den beim Großversuch 1975 gesammelten Erfahrungen ergaben sich bereits einige Änderungen dieses Verfahrens, die aber noch entsprechend überprüft werden müßten. Wieweit und ob sie vom gewünschten Erfolg begleitet sind, steht noch offen. Doch sollte in Anbetracht der positiven Aspekte des Einsatzes einer geeigneten Suspension für die Sporentriftmethode dieser Gedanke weiter verfolgt werden.

2. 3. 6. Die Markierung mit Salzen (H. BEHRENS & MARTINA ZUPAN)

2. 3. 6. 1. Kaliumchlorid (MARTINA ZUPAN)

Probennahme und Analysen

Von allen Quellen im Bereich von Vrhnika wurden wenigstens einmal täglich Bestimmungen von Cl und K durchgeführt. Die häufigsten Probennahmen (sechsmal täglich) erfolgten bei den Quellen 1. 32 und 1. 34 und (viermal täglich) bei den Quellen 1. 37 und 1. 36, jeweils bis zum 3. Juni 1975. Die Zahl wurde nach dem 3. Juni schrittweise verringert und die Probennahme schließlich am 4. Juli 1975 eingestellt.

Von den Proben wurden sowohl der K- als auch Cl-Gehalt bestimmt. Die Messung des Kaliums erfolgte mittels eines Flammenphotometers EEL, während die Chloridgehalte durch Titration bestimmt wurden. Alle Analysen wurden in einem provisorischen Labor in Vrhnika durchgeführt. Die Meßgenauigkeit betrug für beide Parameter 0,1 mg/l.

In allen Quellen im Bereich von Vrhnika waren die Blindwerte für K und Cl relativ hoch (Tabelle 27).

Tabelle 27: Der natürliche Hintergrund (Blindwert) von K und Cl in Wässern des Bereiches um Vrhnika.

Quelle	mg Cl/l	mg K/l	Anmerkung
1. 32	1,8—4,8 3,7—7,4	0,4 —1,3 0,55—1,77	mehrere Messungen vor Beginn des Markierungsversuches
1. 34	1,8—6,0 3,6—5,5	0,2 —3,5 0,5 —1,55	
1. 36	2,1—8,1	0,3 —1,9	
1. 37	2,1—5,9	0,2 —1,0	

Schwankungen innerhalb dieser Grenzen wurden in den Quellen 1. 36 und 1. 37 auch während des Markierungsversuches gemessen.

Für das Kaliumchlorid als Tracer wurden zunächst alle über diesem natürlichen Hintergrund liegenden Werte herangezogen. In Betracht gezogen wurden aber auch ein parallel verlaufendes An- und Absteigen, da gleichlaufende Oszillationen der Blindwerte selten sind. Parallele Zu- und Abnahmen von K und Cl unter der oberen Grenze des natürlichen Hintergrundes sind daher mit großer Wahrscheinlichkeit auf den künstlichen Tracer zurückzuführen.

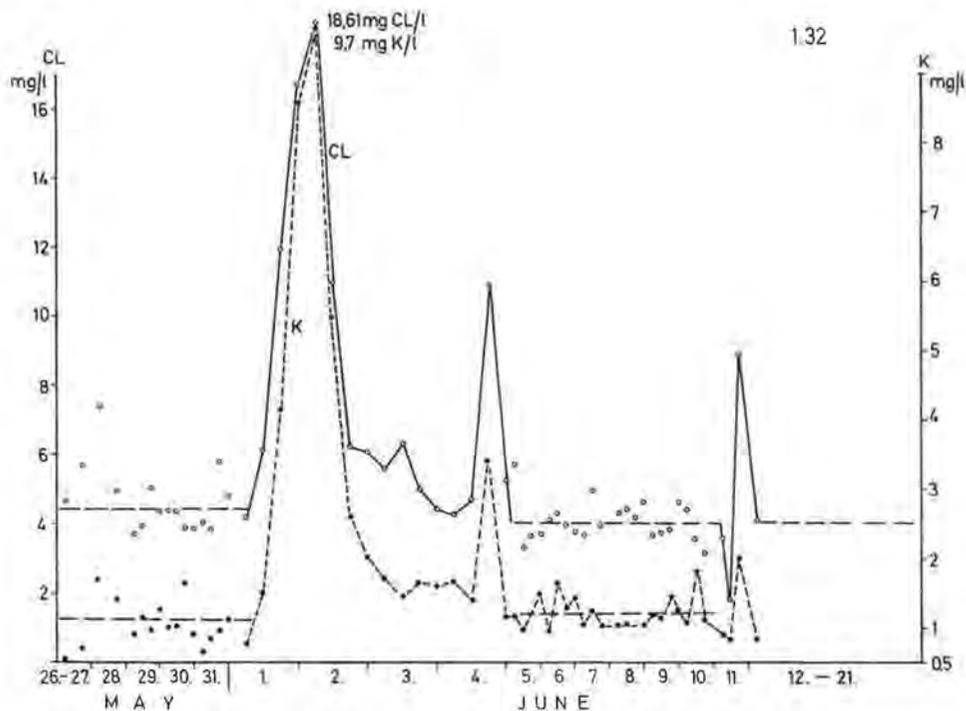


Fig. 66: K- und Cl-Konzentrationskurven in der Quelle Kožuhov izvir (1.32).

Sl. 66: Krivulje koncentracij K in Cl v Kožuhovem izviru (1.32).

Ergebnisse

Den zeitlichen Ablauf der Cl- und K-Konzentrationen (d. h. des Tracerdurchganges) zeigt Fig. 66. In der Quelle 1.32 trat das KCl erstmals 123 Stunden nach der Einspeisung auf und erreichte die maximale Konzentration (9,7 mg K/l und 18,6 mg Cl/l) nach 135 Stunden. Ein zweites Maximum wurde am 4. Juni um 18 Uhr, ein drittes, kleineres am 11. Juni um 18 Uhr gemessen. Das erste Maximum umfaßte 30, die folgenden zwei nur wenige Stunden.

In der Quelle 1.34 wurden erhöhte K- und Cl-Werte 135 Stunden nach der Einspeisung gemessen. Das erste Maximum (4,3 mg K/l und 8,7 mg Cl/l) trat 147 Stunden, gefolgt von einem zweiten Maximum 159 Stunden nach der Einspeisung, auf. Der zweifache Peak ist wahrscheinlich auf die in dieser Zeit gefallenen Niederschläge zurückzuführen. Es ist zu vermerken, daß die analysierten Wasserproben in einiger Entfernung vom Quellaustritt gezogen wurden, so daß das Wasser u. U. bereits mit Regenwasser vermischt war. Das nächste Maximum trat am 4. Juni auf. Für den letzten Anstieg ist nicht mehr mit Sicherheit zu sagen, ob er auf den künstlichen Tracer zurückzuführen ist. In der Quelle 1.34. ist wegen der geringen Blindwertoszillationen der künstliche Anstieg der K-Konzentration sicher.

Fig. 66 und 67 zeigen ein stärkeres Ansteigen der Chloridwerte im Vergleich zum Kalium, obwohl die Kurven parallel laufen, der Grund ist in einem Ionenaustausch von Kalium mit Kalzium und Magnesium zu suchen.

Der Berechnung der Wiederausbringung wurden folgende mittlere Blindwerte zugrundegelegt:

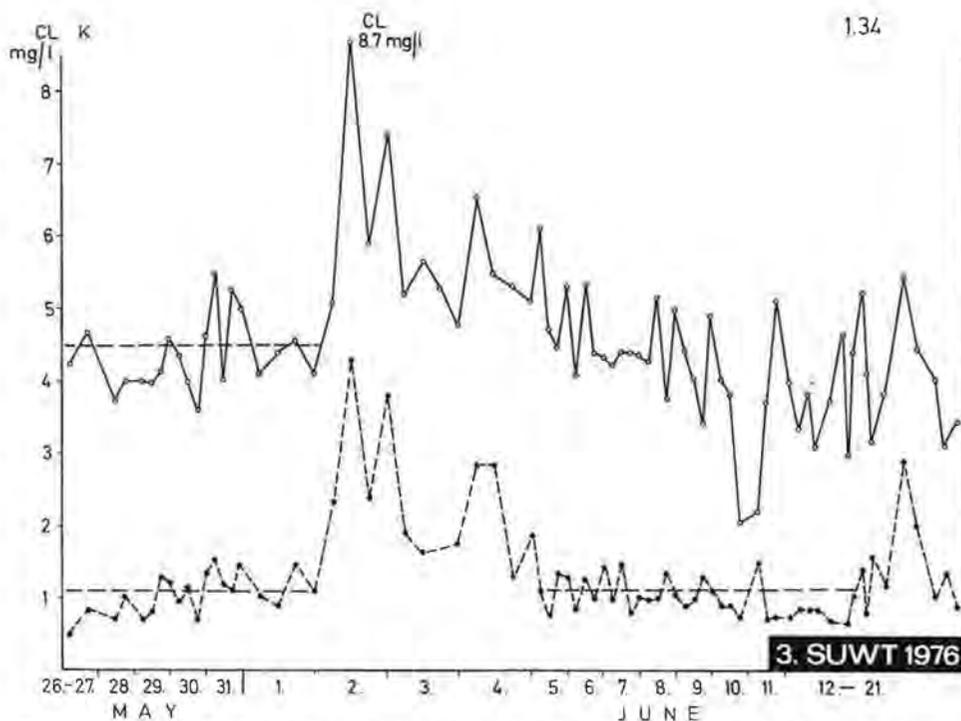


Fig. 67: K- und Cl-Konzentrationskurven in der Quelle Primcov izvir (1.34).
 Sl. 67: Krivulje koncentracij K in Cl v Primcovem izviru (1.34).

Quelle 1. 32	4,4 mg Cl/l	1,2 mg K/l
Quelle 1. 34	4,5 mg Cl/l	1,1 mg K/l

Die auf dieser Basis errechnete Wiederausbringung ist zu hoch. Dieses Mißverhältnis resultiert aus nicht erfaßten (höheren) Blindwerten. Eine Farbwelle ergab z. B. für die Quelle 1. 32 871.000 m³ Wasser. Ist für diesen Fall der angenommene Blindwert nur um 0,5 mg Cl/l zu gering, so ergibt dies 435,5 kg Cl. Eher akzeptabel ist die Berechnung der wiederausgebrachten Menge des Kaliums, für das auch der Schwankungsbereich kleiner ist. Darum wurde auch die Wiederausbringung des KCl mit Hilfe der K-Werte durchgeführt, wobei sich eine Menge von 2749 kg ergab, das sind 95,5% des eingespeisten Kaliumchlorides.

Schlußfolgerungen

Aus den Ergebnissen wird geschlossen, daß KCl nicht zu den wirksamsten Tracern für die Verfolgung unterirdischer Wässer zählt. Trotz der kurzen Entfernung (6,2 km Luftlinie) und des großen Höhenunterschiedes (225 m) betrug die maximale Konzentration in Quelle 1. 32 nur wenig mehr als das Doppelte des höchsten Blindwertes, und dies, obwohl diese Quelle den Hauptaustritt der im beschickten Ponor versickernden Wässer darstellt. Wenn die K- und Cl-Oszillationen nicht über den höchsten Blindwert reichen, kann nicht mit Sicherheit auf ein Auftreten des künstlichen eingebrachten Tracers geschlossen werden. So wurde durch den Einsatz 1975 zwar die unterirdische Verbindung zwischen dem Ponor 1. 22 und den Quellen 1. 32 und 1. 34 durch das einge-

setzle KCl ausreichend belegt, die Verbindung mit anderen Quellen wie vielleicht 1. 36 und 1. 37 bleibt jedoch ungewiß.

2. 3. 6. 2. Die Markierung mit Lithium (H. BEHRENS und Martina ZUPAN)

Aufgrund seines relativ seltenen Vorkommens in der Natur erfüllt Lithium die an Tracersubstanzen zu stellende Anforderung eines niedrigen Untergrundes in Gewässern. Daher wurde Lithium, in der Form des Lithium-Chlorids, zur Ergänzung der Tracerauswahl beim Markierungsversuch 1975 im Gebiet der Ljubljana als Markierungsstoff verwendet.

Allerdings darf der Lithium-Untergrund in natürlichen Wässern bei Markierungsversuchen nicht vollkommen außer Betracht gelassen werden. Er beträgt in vielen Grundwässern einige mg/m^3 (s. a. Meßergebnisse der Quelle 1. 46, Abschn. a). Nur in oberflächennahen Grundwässern liegen die Lithium-Gehalte gewöhnlich unter 1 mg/m^3 .

Da die vorgesehene Lithium-Bestimmung im Feldlabor in Vrhnika wegen der niedrigen Tracerkonzentrationen mit dem dort vorhandenen Flammenphotometer nicht vorgenommen werden konnte, wurde ein Probesatz (ca. 900 Proben) nach München gesandt und im Institut für Radiohydrometrie auf den Tracergehalt untersucht. Parallel dazu wurden in ca. 170 ausgewählten Proben die Lithium-Gehalte im Chemischen Institut BORIS KIDRIČ (Ljubljana) ermittelt.

Die Meßmethodik

In beiden Instituten wurden für die Messungen Atomabsorptions-Spektralphotometer eingesetzt (Leitz-Unicam SP 90 in München, Yarell-Ash-Gerät in Ljubljana), die beide auch für empfindliche Flammen-Emissionsmessungen verwendbar sind.

Bei den Messungen in München wurde zunächst mit der störungsarmen Atomabsorptionsmethode eine Nachweisgrenze von 5 mg/m^3 erreicht. Dagegen ließ sich mit der Flammenemission bei einer Aufnahme des Emissionsspektrums über den Spektralbereich von 640 bis 700 nm eine Nachweisgrenze von ca. $0,5 \text{ mg/m}^3$ Lithium erreichen.

Dazu war es allerdings notwendig, das Calcium aus den Proben als Calcium-Oxalat abzutrennen. Durch umfangreiche Testanalysen und durch Überprüfung der Calcium-Oxalat-Niederschläge wurde sichergestellt, daß kein Lithium durch die Ausfällung des Calciums verloren ging. Weiterhin wurde das von 640 bis 700 nm steil abfallende Untergrundspektrum durch eine mit dem Wellenlängen-antrieb gekuppelte Spaltbreiten-Änderung in einen annähernd horizontalen Verlauf gebracht.

Die erforderlichen Eichlösungen wurden in üblicher Weise durch Auflösen von Lithium-Karbonat hergestellt. Beispiele der Emissionsspektren sind in Fig. 68 dargestellt.

Bei den Messungen in Ljubljana wurde eine Nachweisgrenze von 2 mg/m^3 erreicht. Die hier festgestellten Meßwerte lagen um den Faktor 1. 65 höher als die in München ermittelten Ergebnisse. Diese Abweichungen könnten dadurch hervorgerufen sein, daß hier durch die Verwendung des hygroskopischen Lithium-Chlorids Eichlösungen mit einem zu niedrigen Lithium-Gehalt gewonnen wurden.

Die Meßergebnisse

a) Die Bestimmung des Lithium-Untergrundes

Zu Beginn des Markierungsversuches mit Lithium war angenommen worden, daß der Lithium-Untergrund bedeutungslos niedrig für die Meßergebnisse wäre.

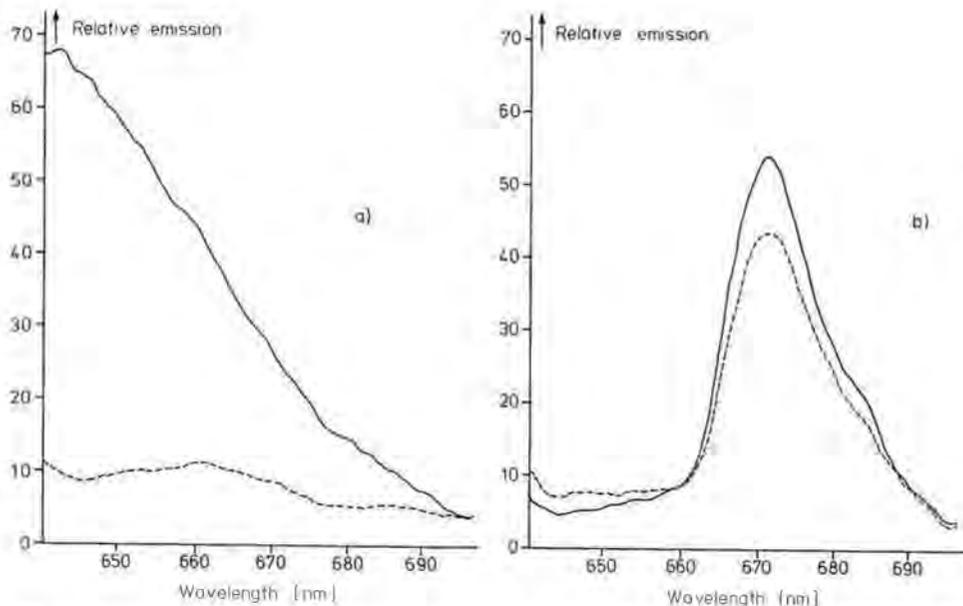


Fig. 68: Flammenemissions-Spektren zum Nachweis des Lithiums in Wasserproben. a) Untergrundspektren nach Ausfällung des Calciums ohne Spaltbreitenveränderung (—) und mit Spaltbreitenveränderung (---). b) Spektren einer Eichlösung mit $10 \text{ mg/m}^3 \text{ Li}$ (—) und einer Probe aus der Beobachtungsstelle 1.45 vom 4. 6. 1975/24.00 Uhr (---); Spektren aufgenommen am 29. 4. 1976.

Sl. 68: Emisijski spektri za določitev litija v vzorcih vode. a — spektri ozadja po izločitvi kalcija brez spremembe širine zaslonke (—) in s spremenjeno širino zaslonke (---). b — Spektri umeritvene krivulje z $10 \text{ mg/m}^3 \text{ li}$ (—) in enega vzorca iz 1.45 z dne 4.6 1975/240.0 (---); spektri posneti 29. 4. 1976.

Die Auswertung des Markierungsversuches ergab jedoch, daß auf Grund der Meßergebnisse die Lithium-Ausbringung über der eingespeisten Lithiummenge lag. Daraufhin wurden durch das Laboratorium in München an den relativ kleinen Proben des Markierungsversuches (ca. 100 ml) erste Bestimmungen des Lithium-Untergrundes vorgenommen. Sie erbrachten Lithium-Gehalte um $0,3 \text{ mg/m}^3$. Später waren dann zur Bestimmung des Lithium-Untergrundes, für die eine Anreicherung dieses Spurenelementes erforderlich ist, noch größere Proben (500 ml) von einigen Beobachtungsstellen verfügbar, an denen die in Tab. 28 wiedergegebenen Lithium-Konzentrationen festgestellt wurden.

Tabelle 28: Untersuchungen des Lithium-Untergrundes an ausgewählten Quellwässern.

Quelle/Probe	Lithium (mg/m^3)
1. 21/29. 5. 1975	0,23
1. 36/29. 5. 1975	0,16
1. 37/29. 5. 1975	0,22
1. 43/29. 5. 1975	0,29
1. 45/31. 5. 1975	0,22

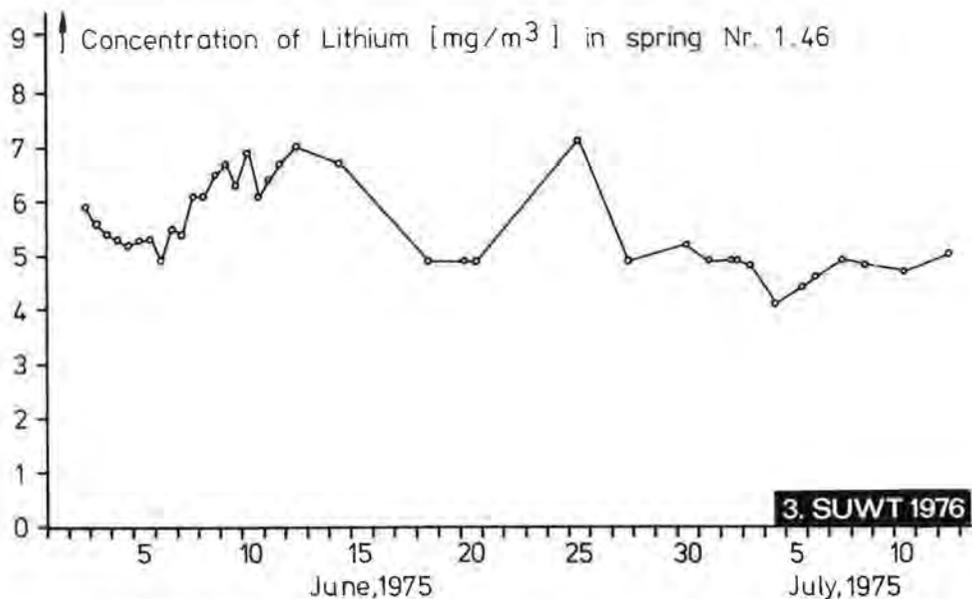


Fig. 69: Gang der Lithium-Konzentration in der Beobachtungsstelle Furlanove toplice (1.46) während des Markierungsversuches 1975.

Sl. 69: Krivulja koncentracije litija v izviru Furlanove toplice (1.46) med sledilnim poskusom 1975.

Die wenigen untersuchten Proben gestatten keine Aussage darüber, wie stark und in welchem Bereich die Lithium-Gehalte der einzelnen Quellen schwanken. Jedenfalls bewirken diese Lithium-Konzentrationen aber eine nicht vernachlässigbare Lithium-Ausbringung in den Beobachtungsstellen, die von der gemessenen Tracerausbringung abgezogen werden muß. Solange keine detaillierten Meßwerte über die zeitliche Variation des Lithium-Gehaltes vorliegen, müssen die wenigen bisher bekannten Lithium-Untergundkonzentrationen als Mittelwerte betrachtet und verwendet werden.

In der Quelle Furlanove toplice (1.46), die sich der Herkunft ihres Wassers nach grundlegend von allen übrigen Karstquellen der Ljubljana unterscheidet, wurde ein wesentlich höherer Lithium-Untergund festgestellt. Der Verlauf der Lithium-Konzentrationen dieser Quelle während der Versuchsdauer ist in Fig. 69 dargestellt. Das leichte Maximum im Juni 1975 könnte einem Tracerdurchgang zugeordnet werden. Es kann sich dabei aber auch um eine Schwankung des natürlichen Untergrundes handeln.

b) Gehaltsbestimmung des eingespeisten Lithium-Chlorids

Proben des eingespeisten Lithium-Chlorids wurden ebenfalls flammenphotometrisch auf ihren Gehalt an Lithium untersucht. Es wurden Werte zwischen 16,05 und 16,35% erhalten, entsprechend einem Gehalt an Lithium-Chlorid von 98 bis 100%. Bei diesen Untersuchungen nahm das sehr hygroskopische Lithium-Chlorid immer etwas Feuchtigkeit aus der Luft auf. Daher kann davon ausgegangen werden, daß das eingespeiste Lithiumsalz zu annähernd 100% seiner chemischen Formel entspricht.

c) Die mit Lithium nachgewiesenen Verbindungen im Einzugsgebiet der Ljubljana

Durch das Lithium werden die Verbindungen zwischen der Eingabestelle 3. 2 (Strzerca—Planinskopolje) und dem Quellgebiet der Ljubljana repräsentiert. Die Daten des Tracernachweises sind in Tab. 29 aufgeführt. Die erhaltenen Tracer-Durchgangskurven sind in Fig. 70 dargestellt.

Bisher ist nicht bekannt, in welchem Maße die Untergrundwerte des Lithium-Gehaltes in den einzelnen Beobachtungsstellen schwanken und welche Werte während des Markierungsversuches vorgelegen haben können. Daher wurden von den nachgewiesenen Lithium-Konzentrationen die in Tab. 28 aufgeführten Werte abgezogen. Von den Meßwerten derjenigen Quellen, von denen bisher keine Untergrundbestimmungen vorliegen, wurde als Untergrundgehalt generell 0,25 mg/m³ Lithium abgezogen.

Tabelle 29: Daten der Lithium-Nachweise im Quellgebiet der Ljubljana.

Beobachtungs- stelle	Zeit bis zum ersten Tracernachweis (h)	Zeit bis zum Durch- gang des Tracermax. (h)	Konzentration im Tracermaximum (mg/m ³)
1. 34	/.	/.	/.
1. 32	118	124	1. 55
1. 36	54	58	2. 25
1. 37	54	64	2. 25
1. 44	58	62	2. 45
1. 45*	50	58	7. 2
1. 43	54	62	3. 7
1. 42	58	62	3. 45
1. 41	58	66	2. 95
1. 23	58	64	2. 65
1. 21	58	64	2. 95
1. 22	82	86	0. 35
1. 13	/.	/.	/.
1. 12	/.	/.	/.
1. 11	/.	/.	/.

* = die Quelle war nicht ständig aktiv

/.

Eine zunehmende Lithiumkonzentration wurde also in den Quellen Lubija, Retovje, Močilnik und einmal in Kožuhov izvir festgestellt.

Durch die um eine Woche spätere Einspeisung des LiCl wurde diese Markierung durch die inzwischen gefallenen Niederschläge und die zunehmende Schüttung der Quellen beeinflusst. Es wurden dadurch wahrscheinlich sowohl das erste Auftreten des Tracers als auch der Hauptdurchgang beschleunigt und damit die Durchgangszeit im Vergleich zu den am 27. Mai eingesetzten anderen Tracern verkürzt.

Der erste Peak von Lithium trat in Veliko okence (1. 45) auf. Die Quellen nahe Veliko okence können bezüglich des Auftretens von Lithium in zwei Gruppen geteilt werden. Zur ersten Gruppe gehören Izvir pod skalo (1. 43), Izvir pod orehom (1. 42), Maroltov izvir (1. 4), Gradarjev izvir (1. 23) und Jurčev izvir (1. 21), wo die maximalen Konzentrationen größer und die Dauer der Durchgangswelle kürzer war. Zur zweiten Gruppe gehören Malo okence (1. 44), Veliki (1. 37) und Mali Močilnik (1. 36), wo die maximale Konzentration gerin-

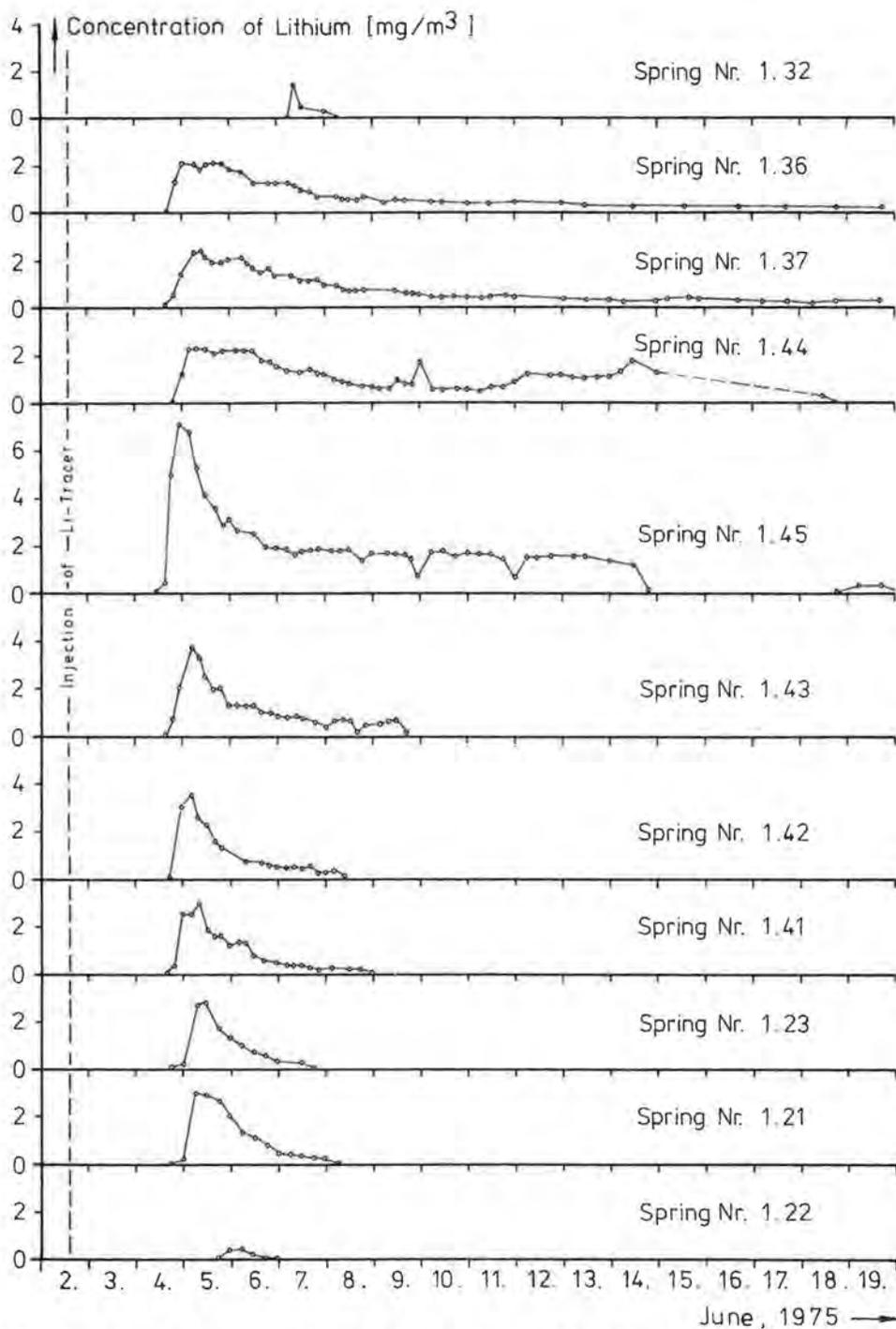


Fig. 70: Lithium-Durchgangskurven in Quellen der Ljublanica beim Markierungsversuch 1975.

Sl. 70: Krivulje koncentracije litija v izviri Ljublanice pri sledilnem poskusu 1975.

ger war, die Tracerwelle aber teilweise zeitlich länger war. Zwischen allen diesen Quellen sind jedoch keine großen Unterschiede, was das erste Auftreten von Li betrifft. Es ist jedoch erstaunlich, daß der Maximalwert von Lithium früher in Mali als in Veliki Hočilnik auftrat.

Die Lithiummessung in Ceglarjev izvir (1. 22) ist problematisch, da der Maximalwert nur $0,6 \text{ mg/m}^3$ betrug und dies ohne Abzug des natürlichen Hintergrundes. Diese Konzentration liegt schon nahe der Nachweisgrenze, sie kann aber nicht unerwähnt bleiben, da sie in mehreren aufeinanderfolgenden Proben gemessen wurde. Ein ähnlicher Fall ist Kožuhov izvir (1. 32), wo in einer Probe $1,55 \text{ mg Li pro m}^3$ Wasser gemessen wurde (Probe vom 7. Juni, 8 Uhr); in der Probe zuvor und jener danach konnten nur Spuren von Li festgestellt werden. Es ist daher nicht sicher, daß diese Verbindungen tatsächlich existieren, andererseits sind sie nicht gänzlich auszuschließen.

d) Die Wiederausbringung des eingespeisten Lithiumtracers

Die in die Schwinde Stržera—Planinsko Polje (3. 2) eingespeisten 100 kg Lithium-Chlorid enthielten $16,37 \text{ kg}$ des Tracer-Elements. Dagegen wurde aus den gemessenen Lithiumkonzentrationen der Tracerdurchgänge und aus der Wasserführung eine Lithiumausbringung von ca. 23 kg berechnet. Die durch die Messung erhaltenen Lithiumkonzentrationen sind jedoch wiederum um die Lithium-Untergrundwerte erhöht, die ihrerseits nur unzulänglich bekannt sind und während der Tracerdurchgänge überhaupt nicht ermittelt werden können. Es wurde daher die Lithium-Ausbringung mit Konzentrationswerten berechnet, in denen die obgenannten Untergrundwerte berücksichtigt sind (s. Tabelle 30, Spalte a). Auch mit diesen Netto-Konzentrationswerten wird noch eine ausgebrachte Lithiummenge erhalten, die über der eingespeisten Lithiummenge liegt. Setzt man jedoch geringfügig höhere Untergrundwerte an (Tabelle 30, Spalte b—d), so erhält man mit dem Untergrundwert $0,4 \text{ mg/m}^3$ eine Lithiumausbringung in der Größenordnung der eingespeisten Lithiummenge, und mit dem Untergrundwert $0,5 \text{ mg/m}^3$ eine unter der Einspeisungsmenge liegende Lithium-Ausbringung. Aus diesen Befunden muß gefolgert werden, daß die eingespeiste Menge von Lithium zu gering war, um eine exakte Berechnung der Wiederausbringung zu gestatten, wenn bereits so geringe Änderungen des Untergrundwertes so große Unterschiede in der Bestimmung der Wiederausbringung zur Folge haben. Da nach den bisherigen Analysen Untergrundwerte von mehr als ca. $0,4 \text{ mg/m}^3$ verhältnismäßig unwahrscheinlich sind, darf angenommen werden, daß der eingespeiste Lithium-Tracer weitgehend vollständig in den Karstquellen der Ljubljana wieder ausgetreten ist.

Schlußfolgerungen

LiCl erwies sich als relativ gut brauchbarer Tracer. Die eingespeiste Menge von 100 kg war in Anbetracht der hohen Verdünnung des Tracers und des natürlichen Untergrundgehalts der Karstwässer an Lithium gerade noch ausreichend, um die Verbindungen der Ponore im Nordteil des Poljes von Planina mit den Quellen von Vrhnika gut nachzuweisen. Es traten an keiner Stelle in irgendeiner Weise schädliche Tracerkonzentrationen auf. Der Aufwand für den Lithium-Nachweis in den Proben war zwar höher als der Aufwand für den Nachweis der Fluoreszenztracer, aber immer noch deutlich niedriger als derjenige für den Nachweis der radioanalytischen Tracer.

Tabelle 30: Daten zur Wiederausbringung des Lithiumtracers.

Quelle	ausgebrachte Lithiummenge im Tracerdurchgang (g)			
	a	b	c	d
1. 21	2.102	1.950	1.733	1.516
1. 22	24	19	11	3
1. 23	302	282	242	202
1. 32	25	23	19	15
1. 36	972	836	739	641
1. 37	4.536	4.243	3.877	3.511
1. 41	125	114	92	70
1. 42	820	800	760	720
1. 43	4.147	4.108	3.718	3.328
1. 44	1.904	1.866	1.790	1.714
1. 45	3.953	3.743	3.480	3.218
	18.910	17.984	16.461	14.938

a: bei Li-Untergrund nach 3. 1

b: bei Li-Untergrund von 0,3 mg/m³

c: bei Li-Untergrund von 0,4 mg/m³

d: bei Li-Untergrund von 0,5 mg/m³

2. 3. 7. Der Markierungsversuch mit Cr-51 (M. PIRŠ)

Beim Ponor 2. 21 wurde anlässlich des Markierungsversuches das radioaktive Isotop Cr-51 (Halbwertszeit = 27,8 d) als Tracer eingesetzt. Seine Toxizität ist relativ gering, die maximal zulässige Konzentration für Trinkwasser ist $5 \cdot 10^{-7}$ Ci/l. Als Nachteile dieses Tracers müssen der verhältnismäßig hohe Preis, die aufwendigen Meßgeräte und die Tatsache, daß nur 10% der tatsächlichen Zerfälle nachgewiesen werden können, erwähnt werden.

Das Zählgerät. Für den Nachweis des Cr-51 in Wasserproben wurde ein 1024-Kanal-Analysator MMC, Modell CN 1024, verwendet. Mit diesem Gerät kann durch entsprechende Wahl des Energiebereiches das gesuchte Isotop auch bei Vorhandensein anderer Aktivitäten einwandfrei nachgewiesen werden. Für die Messung des Cr-51, das eine Strahlungsenergie von 320 keV hat, wurden die Kanäle von 60 bis 100 benützt, die den Energiebereich von 250 bis 400 keV bestreichen. Im selben Bereich liegt aber auch die Strahlungsenergie des Pb-214, das in der Quelle 1. 34 deutlich nachweisbar war. Fig. 71 zeigt das Schema der Zählordnung.

Die Eichung des Zählgerätes. Das Zählgerät wurde hinsichtlich seiner Empfindlichkeit und Leistungsfähigkeit geeicht. Dies erfolgte durch Verwendung von Cr-51 Standards mit 5,1 bis 5,7% nachweisbaren Zerfällen, abhängig von der Impulszahl. Die Nachweisgrenze in reinem Wasser betrug 500 pCi/l zufolge der Anwesenheit von Pb-214 und von Radon unterschiedlicher Herkunft. Durch Verwendung von Aktivkohle (200 g/10 l Wasser) kann als Folge der Sorption des Cr-51 die Nachweisgrenze auf 100 pCi/l erhöht werden. Der mittlere Zählfehler betrug $\pm 10\%$, während bei Verwendung von Aktivkohle der Fehler größer sein kann, da die Empfindlichkeit des NaJ-Kristalles mit dem Quadrat der Entfernung Probe—Kristall zu- oder abnimmt.

Durchführung des Markierungsversuches. Am 27. Mai 1975 wurden 3 Ci Cr-51 EDTA gelöst in 200 ml Wasser in eine kleine Spalte des Ponors 2. 21 injiziert. Die Injektion dauerte eine Minute. Danach wurde die Flasche mit 5 l Wasser ausgespült. Dieser Vorgang dauerte etwa 10 Minuten.

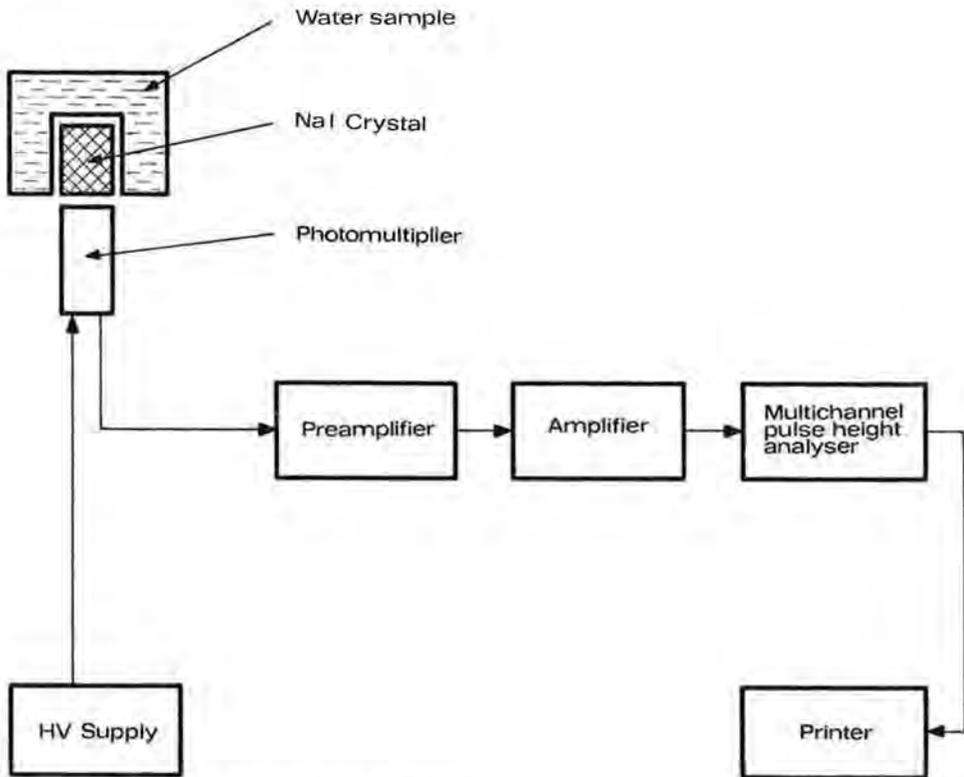


Fig. 71: Schema des Scintillations-Spektrometers.

Sl. 71: Blokdiagram scintilacijskega spektrometra.

Bei den Quellen 1.34, 1.32, 1.36 und 1.37 wurden in der Folge Wasserproben von jeweils 2 Liter entnommen und gemessen, und zwar auch noch bis 10 Tage nach der ersten negativen Reaktion. 117 Stunden nach der Injektion wurde Cr-51 in den Quellen 1.34 und 1.32 gleichzeitig nachgewiesen. In der Quelle 1.34 konnte das Cr-51 nur in einer Probe in einer Konzentration von 500 pCi/l beobachtet werden. Alle übrigen Proben dieser Quelle waren negativ. Bei der Quelle 1.32 stieg die Konzentration laufend an und erreichte ihr Maximum nach 133 Stunden. Dann nahm sie wieder ab, um nach 141 Stunden ein zweites, kleines Maximum zu erreichen und in der Folge dann auf Null zurückzugehen.

In den Quellen 1.36 und 1.37 wurden keine Proben auf Cr-51 untersucht, da die injizierte Aktivitätsmenge bzw. die vorgegebene Nachweisgrenze im Verhältnis zur Schüttung der Quellen zu gering war.

Insgesamt konnten in der Quelle 1.32 vom eingesetzten Cr-51 1,91 Ci nachgewiesen werden. Dies entspricht einer Ausbeute von 63,7%.

Die Ergebnisse der Quellschüttung sowie die Werte der gemessenen Cr-51-Mengen sind in Fig. 72 dargestellt. Die Meßergebnisse der Fig. 72 des Cr-51 wurden selbstverständlich auf den am Injektionstag bestehenden Wert von 3 Ci unter Berücksichtigung des natürlichen Zerfalles korrigiert. Durch den strichlierten Teil der Cr-51-Konzentrationskurve ist der mögliche Fehler ersichtlich.

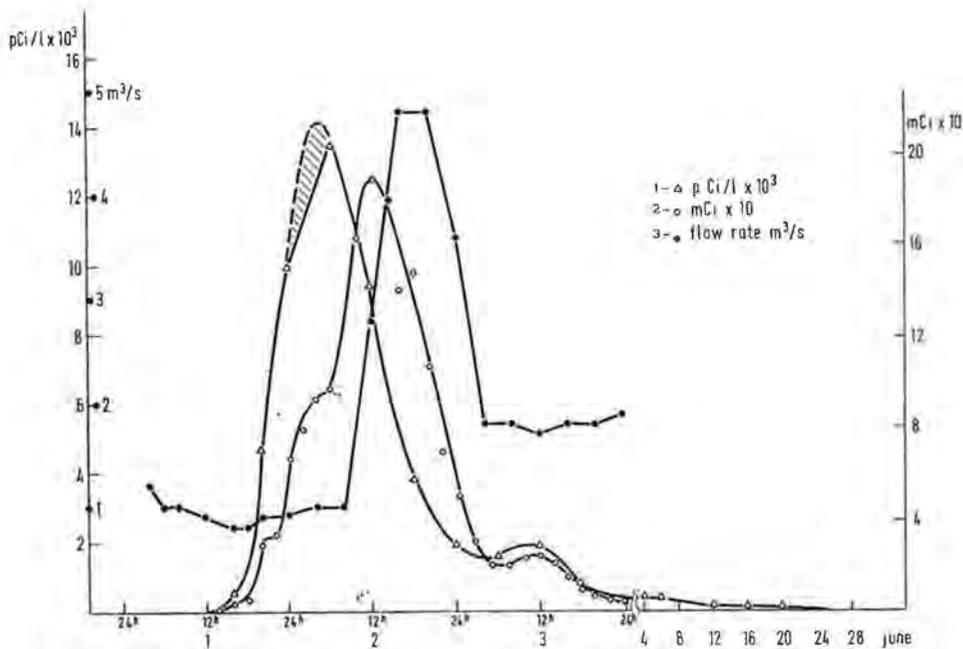


Fig. 72: Markierungsergebnisse mit Cr-51 in der Quelle 1.32. 1 — Tracer-Durchgangskurve von Cr-51 in $\text{pCi/l} \times 10^3$, 2 — Konzentration des Tracers Cr-51 (in $\text{mCi} \times 10$) in der Quelle, 3 — Durchfluß in der Quelle in m^3/s .

Sl. 72: Rezultati sledenja s Cr-51 v izviru 1.32. 1 — krivulja koncentracije $\text{pCi/l} \times 10^3$, 2 — skupna količina sledila Cr-51 v $\text{mCi} \times 10$ v izviru, 3 — pretok v izviru 1.32.

Ergebnisse. Der Markierungsversuch hat gezeigt, daß der größte Teil des Wassers vom Ponor 2. 21 zur Quelle 1. 32 fließt. Zwischen dem Ponor 2. 21 und der Quelle 1. 34 besteht nur eine schwache Verbindung. Das Wasser von 1. 34 hat einen anderen Ursprung als das Wasser des Ponors 2. 21, wie die Werte des gemessenen Radon-Gehaltes zeigen:

100—200	pCi/l in 1. 34
10	pCi/l in 1. 32
30	pCi/l in 2. 11
0	pCi/l in 2. 21

Durch den Markierungsversuch mit Cr-51 konnte auch eine geringe (und nur zeitweilige?) Verbindung zwischen dem Ponor 2. 21 und der Quelle 1. 34 festgestellt werden. Sie besteht vermutlich nur bei einem bestimmten Wasserstand, wobei eine geringe Menge Wasser von 2. 21 nach 1. 34 fließt. Es handelt sich dabei aber nur um einige 0,1% der Schüttung von 1. 34.

2. 3. 8. Die Markierung mit Detergentien (W. Käss)

Einspeismaterial: 50 kg harte Detergentien, Typ Marlon A 375, gespendet von den Chemischen Werken Hüls in Marl. Feuchtigkeitsverlust bei $120^\circ \text{C} = 22\%$, also etwa 39 kg Trockensubstanz. Vor der Einspeisung in 300 l Wasser gelöst.

Einspeisort: Schwinde 3. 21 bei der ehemaligen Sägmühle bei Laze. Laufende Versickerung von rund 50 l/s.

Einspeiszeitpunkt: 27. Mai 1975, 15 Uhr.

Beobachtungszeitraum: 26. Mai bis 19. Juni 1975.

Beobachtungsstellen und Probenzahl:

1. 21	52
1. 22	53
1. 23	51
1. 36	52
1. 37	56
1. 4	46
1. 40	3
1. 42	45
1. 43	46
1. 44	47
1. 45	30
1. 46	29
1. 47	43
2. 42	8
3. 00	10
3. 48	13
<hr/>	
zusammen:	584 Proben

Untersuchungsverfahren: Aktivierung mit Methylenblau nach den Deutschen Einheitsverfahren.

Untersuchungen in Laibach: alle 584 Proben.

Untersuchungen in Freiburg (Außenstelle des Instituts für Wasser und Abfall/Karlsruhe):

Hauptaustritte	1. 21	30
	1. 22	8
	1. 37	32
	1. 42	40
	3. 48	11
<hr/>		
zusammen		121 Proben

Ergebnisse: Die im Feldlaboratorium in Vrhnika festgestellten Detergentiengehalte lagen in den weitaus meisten Fällen an oder unter der Erfassungsgrenze von 10 mg/cbm. Es werden diejenigen Werte aufgeführt, die darüber lagen:

Der höchste Wert wurde demnach am 30. Mai um 20 Uhr bei der Entnahmestelle 1. 36 (Mali Močilnik) mit 34 mg/cbm gemessen. Es ist der einzige Wert, der auf die Einspeisung zurückgeführt werden kann. Die Werte, die dort vorher (16 Uhr) und nachher (24 Uhr) festgestellt wurden, lagen unter der Nachweisgrenze. Obwohl die für die Messungen in Freiburg vorgesehenen Proben mit Sublimat konserviert worden sind, ergaben die fünf Serien Werte zwischen 105 und 0 mg/cbm. Ein Ausreißer (1. 37 vom 29. Mai, 20 Uhr) lag sogar bei 270 mg/cbm. Die übrigen Werte sind unregelmäßig verteilt und lassen überhaupt keinen sinnvollen Gang erkennen.

Tag	Entnahmestelle	Zeit	Detergentiengehalt (mg/cbm)
26. Mai	1. 45	12.00	13
	1. 46	12.00	13
27. Mai	3. 48	24.00	18
	1. 36	6.00	16
	1. 22	12.00	17
	1. 37	12.00	20
	1. 42	12.00	17
	1. 46	12.00	21
28. Mai	1. 46	12.00	13
29. Mai	1. 37	20.00	20
30. Mai	1. 36	20.00	34
1. Juni	1. 37	12.00	19
	1. 45	12.00	16
2. Juni	1. 44	20.00	14
3. Juni	1. 45	12.00	19
5. Juni	1. 23	12.00	12
10. Juni	1. 23	18.00	31

Zusammenfassung: Detergentien waren bei der verwendeten Menge im Versuchsgebiet als hydrologisches Markierungsmittel nicht geeignet. Durch andere Verunreinigungen schwankten offenbar die Grundlasten in den einzelnen Quellen so stark, daß ein eindeutiger Detergentienaustritt nicht erfaßbar war. Will man mit Detergentien doch das Karstwasser markieren, müssen wesentlich größere Mengen eingesetzt und die analytischen Methoden durch Anpassung an die Grundlasten verbessert werden.

2. 4. Neue hydrogeologische Erkenntnisse

2. 4. 1. Karsthydrographische Auswertung (P. HABIČ)

Festgestellte unterirdische Wasserverbindungen

Die Ergebnisse für jedes einzelne Markierungsmittel im Hinblick auf die zwischen den einzelnen Ponoren und den zugehörigen Quellen festgestellten Wasserverbindungen sind im Kapitel 2. 3. beschrieben. Im folgenden soll durch einen Vergleich dieser Angaben die Vorstellung über die Verflechtung der unterirdischen Wasserwege und den Abfluß der unterirdischen Gewässer im Karsteinzugsgebiet des Ljubljanica-Flusses vervollkommen werden.

Der Markierungsversuch des Jahres 1975 hat die Resultate früherer Versuche in großem Maße vervollständigt. Neben den erwarteten Wasserverbindungen konnten einige bisher unbekannte Verbindungen zwischen Ponoren und zugehörigen Quellen nachgewiesen werden.

Das wichtigste Ergebnis ist dabei, daß die Bäche Hotenka (2. 31), Žejski potok (2. 32) und Pikeljščica (2. 51) in die Quellen sowohl der Ljubljanica (1. 3) als auch des Idrijca-Flusses (11. 1 und 11. 11) abfließen. Es handelt sich in diesem Fall um eine interessante Karst-Wasserscheide zwischen den Flußgebieten des

Adriatischen und Schwarzen Meeres. Ebenfalls wichtig ist die Feststellung des unmittelbaren, direkten Abflusses des Wassers aus dem Polje von Cerknica (6.16) nicht nur in die Quellen Lubija (1.2) und Bistra (1.1), sondern auch in die anderen Quellen der Velika Ljubljana (1.4) und Mala Ljubljana (1.3). Bemerkenswert sind auch die gefundenen Verbindungen der unterirdischen Wässer des Poljes von Planina (3.0) und des Poljes von Logatec (2.4) als auch des Gebietes der Sickerbäche von Rovte (2.1—2.3), die in die Quellen 1.3 und 1.4, in den Bach Hribščica (1.32) und die Quelle Primcov studence (1.34) fließen. Außer dieser qualitativen Ergänzung ist noch eine Reihe von Details über die Abflußverhältnisse in den unterirdischen Kanälen und den zugehörigen Quellen ermittelt worden.

Fließgeschwindigkeiten des Karstwassers

Die Fließzeit vom Ponor bis zum ersten Auftauchen des markierten Wassers und bis zum Maximum der Tracerkonzentration ist separat für jede Quelle in den Tabellen der Kapitel 2.3. angegeben. Aus diesen Angaben und den Entfernungen in Luftlinie zwischen den Ponoren und den zugehörigen Quellen ist die maximale und die häufigste Fließgeschwindigkeit des markierten Wassers in cm/s berechnet. Die Geschwindigkeiten für die einzelnen Tracer sind in folgenden Tabellen 31 und 32 angegeben. Im folgenden wird im allgemeinen nur die Maximalgeschwindigkeit diskutiert.

Tabelle 31: Die maximale Fließgeschwindigkeit der Tracer (cm/s).

Tracer Ponor	6.16 — Uranin	3.42 — Rhodamin	3.43 — G+B Sporen	3.41 — Tinopal	3.1 — LiCl	2.41 — Eosin	2.31 — Amidorhodamin	2.32 — Rote Sporen	2.51 — Blaue Sporen	2.21 — Cr-51	2.11 — KCl
Quelle	6.16	3.42	3.43	3.41	3.1	2.41	2.31	2.32	2.51	2.21	2.11
1.34	—	—	—	—	—	—	—	1.9	2.4	1.7	1.3
1.32	—	—	—	—	—	—	—	1.8	1.6	1.8	1.3
1.36	4.8	3.8	6.8	2.5	5.5	1.2	2.2	1.8	1.5	—	—
1.37	5.9	5.6	7.4	4.9	5.3	1.2	2.2	1.9	1.7	—	—
1.44	—	—	6.5	—	4.9	1.2	2.2	1.9	1.6	—	—
1.45	—	—	(1.9)	—	5.6	1.2	—	—	—	—	—
1.43	7.4	8.3	7.6	8.3	5.3	1.1	—	—	—	—	—
1.42	7.4	8.4	6.5	8.4	5.3	1.1	—	—	—	—	—
1.41	7.4	8.4	6.5	8.4	5.4	1.1	—	—	—	—	—
1.23	7.0	7.6	6.7	8.4	5.1	1.1	—	—	—	—	—
1.21	6.8	6.9	5.0	7.1	5.2	1.1	—	—	—	—	—
1.22	6.2	6.7	6.7	3.2	3.7	—	—	—	—	—	—
1.13	6.3	6.9	6.7	—	—	—	—	—	—	—	—
1.12	6.5	6.8	5.0	—	—	—	—	—	—	—	—
1.11	6.2	6.9	6.7	—	—	—	—	—	—	—	—
1.15	3.8	3.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.14	—	—	6.7	—	—	—	—	—	—	—	—
3.48	—	—	—	1.4	—	—	—	—	—	—	—
11.1	—	—	—	—	—	—	1.9	0.5	0.9	—	—
11.1	—	—	—	—	—	—	1.9	0.5	0.9	—	—

Anmerkung: () = Geschwindigkeit aus verschiedenen Gründen nicht vergleichbar.

Die größte Geschwindigkeit ist zwischen dem Ponor Dolenje loka (3. 41) und der Höhle Logarček (3. 48) festgestellt worden: Tinopal brauchte für die Zurücklegung der Entfernung von 1500 m vier Stunden, was einer Geschwindigkeit von 11,4 cm/s entspricht. Geschwindigkeiten zwischen 4 bis 8 cm/s herrschen vor allem in den Hauptkanälen zwischen den Poljen von Cerknica und Planina und den Quellen der Ljubljana vor. Die Gewässer vom Rovte-Plateau fließen langsamer (1—2 cm/s), in der Richtung gegen Idrija noch langsamer (0,5—1 cm/s).

Tabelle 32: Fließgeschwindigkeiten der Tracer (cm/s), berechnet nach dem Peak der Konzentration-Zeit-Kurve.

Tracer Ponor	6.16 — Uranin	3.42 — Rhodamin	3.43 — G + B Sporen	3.41 — Tinopal	3.1 — LiCl	2.41 — Eosin	2.31 — Amidorhodamin	2.32 — Rote Sporen	2.51 — Blaue Sporen	2.21 — Cr-51	2.11 — KCl
1.34	—	—	—	—	—	—	—	1.9	2.4	1.7	1.2
1.32	—	—	—	—	2.5	—	2.0	1.5	1.2	1.5	1.3
1.36	4.2	4.4	6.8	2.4	5.1	1.13	2.1	1.4	1.4	—	—
1.37	4.9	4.2	2.4	3.2	4.5	1.04	2.1	1.7	1.3	—	—
1.44	(4.0)	(2.4)	(6.5)	(2.2)	4.6	1.02	2.1	1.5	1.3	—	—
1.45	(3.8)	(2.3)	(1.7)	(2.1)	4.8	1.00	—	—	—	—	—
1.43	5.7	6.0	4.4	5.4	4.6	1.02	—	—	—	—	—
1.42	5.6	6.0	4.3	5.9	4.7	1.04	—	—	—	—	—
1.41	5.6	6.0	2.9	5.5	4.4	1.05	—	—	—	—	—
1.23	5.6	5.5	4.9	5.5	4.6	1.06	—	—	—	—	—
1.21	5.3	5.4	2.9	5.5	4.7	1.06	—	—	—	—	—
1.22	5.5	5.1	2.7	5.2	3.7	—	—	—	—	—	—
1.13	5.3	5.4	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—
1.12	5.3	5.3	2.9	—	—	—	—	—	—	—	—
1.11	5.2	5.3	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—
1.15	3.7	2.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.14	—	—	(6.7)	—	—	—	—	—	—	—	—
3.48	—	—	—	4.0	—	—	—	—	—	—	—
11.1	—	—	—	—	—	—	1.3	0.4	0.4	—	—
11.11	—	—	—	—	—	—	1.7	0.5	0.4	—	—

Anmerkung: () = Geschwindigkeit aus verschiedenen Gründen nicht vergleichbar.

Eine solche Verteilung der Geschwindigkeiten ist in großem Maße durch den geologischen Aufbau und das System des Durchflusses bedingt, handelt es sich doch um überwiegend autochthone Gewässer, die aus den Wasserscheidegebieten unmittelbar in die Quellen abfließen. Bei den Gewässern von Cerknica (6. 16) und Planina (3. 0) sind geschlossene Wasserläufe in größeren Gängen vorhanden, zu denen die Karstgewässer durch Kluffkanäle der benachbarten Gebiete zusammenlaufen. Die hydrogeologischen Verhältnisse beeinflussen zweifellos die Geschwindigkeiten des unterirdischen Durchflusses mehr als das durchschnittliche Gefälle zwischen dem Ponor und der zugehörigen Quelle. So sind im Einzugsgebiet der Ljubljana die Geschwindigkeiten und das Gefälle zueinander umgekehrt proportional, d. h., bei größerem Gefälle treten kleinere Geschwindigkeiten auf und umgekehrt.

Das Wasser aus dem Polje von Cerknica (6. 16), mit Uranin markiert, fließt am schnellsten (7,4 cm/s) in Richtung der Quellen 1. 4, etwas langsamer (6,3 cm/s) zu den Quellen 1. 1, noch langsamer zu den Quellen 1. 37 (5,9 cm/s) und 1. 36 (4,8 cm/s). Die kleinste Geschwindigkeit (3,8 cm/s) wurde zur Quelle Pasji studenec (1. 15), einer Seitenquelle der Bistra, beobachtet. Die Geschwindigkeit des ersten Auftauchens des Markierungsmittels und des Maximums der Tracerdurchgangskurve ist bei den einzelnen Quellen verschieden. Die Unterschiede entstehen wahrscheinlich vor allem infolge der verschiedenen Abflüsse sowie der Art und der Länge der vom Tracer durchflossenen isolierten Gänge bis zu den Quellen.

Der Abfluß des Unica-Flusses (3. 42), mit Rhodamin markiert, vom Polje von Planina ist etwas schneller als der Abfluß vom Polje von Cerknica (6. 16). Die größten Geschwindigkeiten werden auch in diesem Falle in Richtung gegen die Quelle 1. 4 (8,4 cm/s), etwas kleinere zu Quellen 1. 1 (6,8 cm/s) beobachtet. Größere Unterschiede im Vergleich mit dem Wasser aus dem Polje von Cerknica (6. 16) treten in den seitlichen Quellen (1. 37 — 3,8 cm/s, 1. 15 — 3,1 cm/s) auf, wo das Rhodamin den Weg anscheinend langsamer als das Uranin zurücklegte. Die höhere Geschwindigkeit des Uranins könnte vielleicht durch den verstärkten Abfluß bedingt sein, der erst dann auftrat, als das Rhodamin bereits aus dem Untergrund abgeflossen war.

Die Geschwindigkeiten des mit Tinopal markierten Wassers im Hauptkanal gegen die Quellen 1. 4 zu unterscheidet sich nicht von der Geschwindigkeit des Rhodamins, allerdings ist Tinopal in der Quelle 1. 1 nicht nachgewiesen worden und hatte in Richtung gegen die Quelle 1. 3 eine noch geringere Geschwindigkeit (2,5 cm/s) als Rhodamin. Relativ groß sind hier die Unterschiede zwischen dem ersten Auftauchen des Markierungsmittels und dem Maximum der Tracerdurchgangskurve, was wahrscheinlich der größeren Sorption des Tinopals im Untergrund zuzuschreiben ist. Das mit Lithiumchlorid markierte Wasser vom Nordrand des Poljes von Planina (3. 1) war auf seinem Weg zu den Ljubljana-Quellen etwas langsamer als das Wasser aus den Ponoren der Unica am Ostrand des Poljes (3. 41—3. 43). Das ist wahrscheinlich mit dem niedrigen Wasserstand in Hauptflußkanälen während des Markierungsversuches verbunden, weil sonst durch den Nordrand des Poljes 10 mal mehr Wasser abfließt.

Interessanterweise sind die größten Geschwindigkeiten in Richtung gegen die Quellen 1. 36 (5,5 cm/s) und 1. 45 (5,6 cm/s) festgestellt worden, während die Geschwindigkeiten gegen die Quellen 1. 4 zu etwas geringer waren (5,3 cm/s). Ähnlich wie bei den anderen Markierungsmitteln sind kleinere Geschwindigkeiten in den beiden äußersten Quellen 1. 32 (2,7 cm/s) und 1. 22 (3,7 cm/s) beobachtet worden. Die Markierung mit LiCl ist fünf Tage später als mit den anderen Tracern vorgenommen worden. In dieser Zwischenzeit hatte es etwas geregnet, so daß die Quellen 1. 44 und 1. 45 des Hauptabflusses eine ansteigende Wasserführung hatten.

Die niedrigsten Geschwindigkeiten im Einzugsgebiet der Ljubljana-Quellen weisen die mit Eosin markierten Gewässer, die vom Polje von Logatec (2. 41) abfließen, auf. Diese betragen kaum 1 cm/s, wobei zwischen den einzelnen Quellen kein wesentlicher Unterschied vorhanden ist. Abweichungen wurden lediglich bei den Quellen 1. 36 mit einer etwas höheren Fließgeschwindigkeit gegenüber den Nachbarquellen 1. 3 und 1. 4 festgestellt. Die verhältnismäßig niedrigen Geschwindigkeiten sind überraschend, besonders im Vergleich mit dem Wasser, das vom Polje von Planina abfließt und in den gleichen Quellen zum

Vorschein kommt und dessen Geschwindigkeit vier- bis fünfmal größer ist. Da sogar das Wasser des Ponors 2. 31 und anderer weiter entfernter Ponore (2. 32, 2. 51) doppelt so schnell als das des Ponors 2. 41 abfließt, dürften die Gründe dafür eher hydraulischer als hydrogeologischer Natur sein. Es ist vielleicht anzunehmen, daß die Wässer aus dem Polje von Logatec während des zurückgehenden Abflusses aus den nördlichen Ponoren des Poljes von Planina solange unterirdisch zurückgehalten werden, bis die höhere unterirdische Unica sie mitnimmt.

Der unterirdische Abfluß des Baches 2. 31 weist, wie aus der Markierung mit Amidorhodamin hervorgeht, in Richtung gegen die Ljubljana-Quellen eine maximale Geschwindigkeit um 2,2 cm/s, in Richtung gegen die Idrijca-Quellen eine etwas geringere (1,9 cm/s) auf. Ähnliche Geschwindigkeiten sind mit Hilfe der Markierung mit Cr-51 und KCl auch für die unterirdischen Abflüsse der Ponore 2. 21 (1,8 cm/s) und 2. 11 (1,3 cm/s) beobachtet worden.

Ein ziemlich übereinstimmendes Bild über die Geschwindigkeiten der Abflüsse geben die Sporen. Mit Ausnahmen hat sich gezeigt, daß die Fließgeschwindigkeit der mit Sporen markierten Durchflüsse etwas kleiner als jene der mit anderen Tracern markierten sind, auch wenn es sich um ein und denselben mit Sporen und anderen Tracern gleichzeitig markierten Wasserlauf handelt. Die Fließgeschwindigkeiten des Wassers aus den Ponoren 2. 32 (1,7 cm/s), 2. 51 (1,5 bis 2,4 cm/s) und 2. 31 (2,2 cm/s) stimmen überein. Der Ponor 2. 51 dürfte in einen Kanal münden, der unmittelbar zur Quelle 1. 34 (2,4 cm/s) führt; zusätzlich fließt jedoch das Wasser noch in einen anderen Kanal, der sich mit den Bächen von Ponor 2. 31 und 2. 32 (1,5 bis 1,6 cm/s) verbindet. Die kleinsten Geschwindigkeiten (0,5 bis 0,9 cm/s) sind beim Abfluß der Bäche 2. 32 und 2. 51 in Richtung gegen Idrijca zu beobachtet worden.

Die Verteilung der Tracer in den Quellen

Aus dem Vergleich der Maximalkonzentration der einzelnen Markierungsmittel und der Form der Tracerdurchgangskurve können Schlüsse auf gemeinsame Wasserwege gezogen werden. Dies ist im Einzugsgebiet der Ljubljana am besten bei den mit Uranin und Rhodamin markierten Wässern gelungen. Die höchste Konzentration dieser beiden Tracer wurde in den Quellen 1. 1 gemessen, eine um die Hälfte kleinere in den Quellen 1. 4 und 1. 2. Umgekehrt aber weisen die Wässer der beiden Quellen 1. 4 und 1. 2 eine größere Fließgeschwindigkeit als die der Quellen 1. 1 auf. Gewisse Unterschiede in der Konzentration können allerdings auch der Probennahmehäufigkeit zugeschrieben werden, nämlich dann, wenn die höchsten Konzentrationen gerade in der Zeit zwischen den Probennahmen auftreten. Kleinere Unterschiede können auch durch eine Aufspaltung in Kanäle mit verschiedenen Abflüssen und Fließgeschwindigkeiten des Wassers erklärt werden.

Die Ljubljana-Quellen können nach den Tracerkonzentrationen, ohne ins Detail zu gehen, in drei Hauptgruppen eingeteilt werden, die von mehr oder weniger abgeschlossenen Wasserläufen gespeist werden. Neben den Konzentrationen wurde auch die Fließgeschwindigkeit des unterirdischen Wasserlaufes und die Verteilung der Markierungsmittel in den Quellen für diese Gruppierung herangezogen. Insgesamt zeigen sich danach folgende Quellengruppen:

- Quellengruppe 1 — Bistra (1. 1) mit der Quelle Ceglarjev izvir (1. 22),
- Quellengruppe 2 — Velika Ljubljana (1. 4) mit einem Teil der Lubija (1. 2),
- Quellengruppe 3 — Mala Ljubljana (1. 3) mit der Quelle Malo okence (1. 44).

Bei Gruppe 2 weicht die Quelle 1. 45 etwas in ihrem Verhalten ab; dagegen müssen bei Gruppe 3 die Quellen Kožuhov izvir (1. 32) und Primcov izvir (1. 34) besonders behandelt werden.

Eine wichtige Rolle für die Gruppierung der Quellen spielt in den meisten Fällen auch deren Lage. Ausnahmen sind die Quelle 1. 44, die zwar der Lage nach zu den Quellen 1. 4, nach der Art des Zuflusses aber den Quellen 1. 3 zugezählt werden muß, und die Quelle 1. 22, die der Lage nach zu 1. 4, dem Zufluß entsprechend aber auch mit den Quellen der Gruppe 1. 1 übereinstimmt.

Die Resultate des Markierungsversuches weisen auf eine geringe Verflechtung der Hauptwasseradern, welche die einzelnen Quellengruppen speisen, hin. Die Verflechtung wird am häufigsten durch Veränderungen in den Abflüssen beim Ansteigen oder Fallen des Wasserstandes beeinflußt. Beispiele für die Speisung ein und derselben Quelle aus verschiedenen Wassersymptomen sind die Quellen 1. 22 und 1. 21.

Die Tracerdurchgangskurve des Uranins in Quelle 1. 22 zeigt deutlich zwei Maxima. Dies könnte in einfacher Weise mit einem verzweigten Kanal erklärt werden, wofür auch sprechen würde, daß das zweite Maximum der Kurve niedriger liegt als das erste. Da jedoch die Konzentration und die Form der Rhodamindurchgangskurve in der Quelle 1. 22 mit jenen in der Quelle 1. 1 übereinstimmen, sollte sich auch der Uranindurchgang in der Quelle 1. 22 gleich verhalten. Dies ist jedoch nicht der Fall. Die Konzentration des Uranins in der Quelle 1. 22 hat sich, statt sich zu vergrößern, verkleinert, gleichzeitig erschien ein geringer Durchgang des Tinopals, das bisher weder in dieser Quelle noch in den Quellen 1. 1 vorhanden war. Daraus ist zu schließen, daß im Einzugsgebiet der Quellen 1. 22 eine kurzdauernde Veränderung der Zuspeisung aus dem gemeinsamen Kanal der Quellen 1. 1 eingetreten war, und zwar in der Weise, daß nun in der Quelle 1. 22 gleiches Wasser wie in den anderen Quellen der Gruppe 1. 2 und 1. 4 auftritt.

Die Ergebnisse im Einzugsgebiet der Quelle 1. 22 sind möglicherweise mit den Verhältnissen bei 1. 21 zu erklären. Bei der Quelle 1. 21 treten nämlich normal die gleichen Konzentrationen der Tracer wie in den Quellen 1. 4 auf. Auch der Konzentrationsverlauf des Uranins stimmt zu Beginn des Tracerdurchganges in den Quellen 1. 41 bis 1. 43 überein. Am 1. Juni tritt jedoch eine rasche Erhöhung der Konzentrationen des Uranins bis zu dem Wert ein, welcher bisher nur in der Quelle 1. 1 beobachtet worden war. Zeitlich stimmt diese Erscheinung mit der Erniedrigung der Konzentrationen des Uranins in der Quelle 1. 22 überein. Zugleich tritt eine Erniedrigung der Konzentration des Tinopals bei maximaler Konzentration des Uranins ein. Daraus wäre zu schließen, daß die Quelle 1. 21 den Abfluß in die Quelle 1. 22 überführt, letztere aber das Wasser der Nachbarquelle 1. 21 übernimmt. Eine solche Kreuzung von Wasseradern, bei der es nicht zu einer Mischung, sondern zu einer vollkommenen Auswechslung des Wassers kommt, ist nicht vorstellbar; es ist nicht auszuschließen, daß eine irrtümliche Vertauschung von Proben vorliegt.

Die Quellen 1. 1 besitzen beinahe gleich hohe Konzentrationen. Die Form der Tracerdurchgangskurve weist auf die Speisung aus einem geschlossenen Wasserlauf hin, der sich erst vor den Quellen in einzelne Wasseradern verzweigt. Die Quelle 1. 15 stellt eine dem Abfluß nach unbedeutende Seitenader dar, in deren Einzugsgebiet sich ein Teil des Wassers aus Cerknica mit Wasser unbekannter Herkunft mischt.

Die Bewertung einer einzigen grünen Spore in 1.14 ist problematisch (siehe Kapitel 2.3.5.).

Der gleiche Wasserlauf, der die Quellen 1.1 speist, kommt auch in der Quelle 1.22 zum Vorschein, wo ebenfalls kleinere Konzentrationen derselben Tracer wie in den Quellen 1.21 und 1.4 gefunden wurden. In den Quellen 1.4 traten fast um die Hälfte kleinere Konzentrationen von Uranin und Rhodamin auf als in den Quellen 1.1; in den Quellen 1.4 herrschen Tinopal und LiCl vor, die in den Quellen 1.1 nicht nachgewiesen worden sind. Die Quellen 1.21 bis 1.43 unterscheiden sich bezüglich des Auftretens und der Konzentrationen nicht wesentlich, da sie zweifellos vom gleichen System gespeist werden. Von dieser Quellengruppe unterscheiden sich aber untereinander die Quellen 1.45 und 1.44. Nach dem Ergebnis der Markierung ist die Quelle 1.45 (nur bei höherem Wasserstand aktiv) eher den Quellen 1.4 zuzuordnen. Die Quelle 1.44 stimmt nach dem Auftreten und der Konzentration der Markierungsmittel vollkommen mit den Quellen 1.37 und 1.36 überein. Sie unterscheiden sich jedoch untereinander durch verschiedene Aktivität; so ist z.B. 1.44 nur bei höherem Wasserstand aktiv, während 1.36 und 1.37 ständig fließen. Die Quelle 1.45 war in den ersten Tagen des Markierungsversuches nicht aktiv; daher sind die Angaben über das erste Auftreten von Rhodamin, Uranin, Tinopal sowie der grünen und braunen Sporen im ganzen nicht direkt vergleichbar.

Bei der Markierung der nördlichen Ponore (3.1) am Polje von Planina mit LiCl (fünf Tage nach der Haupteinspeisung) waren die Wasserstände in diesem Polje günstiger, und LiCl ist am schnellsten und auch in der größten Konzentration in der Quelle 1.45 erschienen. So wurde für diese Quelle die unmittelbare Verbindung mit den Ponoren 3.1 der Unica bestätigt. Die anderen Quellen 1.43 bis 1.22, 1.44, 1.36 und 1.37 haben eine fast um die Hälfte niedrigere Konzentration. Der LiCl-Durchgang in Quelle 1.3 war von längerer Dauer als der in Quelle 1.4. Ein Teil des Wassers aus dem Ponor 3.1 erreichte mit eintägiger Verspätung und ziemlich niedriger Konzentration auch die Quelle 1.22, vier Tage später aber die Quelle 1.32 in nicht viel kleinerer Konzentration als in Quelle 1.36. Diese hydraulische Verbindung ist zum erstenmal beobachtet worden und dürfte für eine Nutzung der Quelle 1.32 bedeutsam sein.

Die geringen festgestellten Mengen des Uranins und Rhodamins in den Quellen 1.3 sind die Folge eines kleinen Wasserabflusses aus den Ponoren von Cerknica (6.16) und am östlichen Teil des Poljes von Planina (3.42). Die besondere Form des Li-Durchganges im Wasser aus dem Ponor 3.1 bestätigt die Existenz einer eigenen Wasserader, welche die Quellen von 1.44 bis 1.32 speist. Interessanterweise sind nur in diesen Quellen auch Amidorhodamin aus dem Hotenka-Bach (2.31) und blaue und rote Sporen aus den Bächen 2.51 und 2.32 erschienen. Ein solches Auftreten der Markierungsmittel deutet eine überwiegende Speisung der Quellen 1.3 und 1.44 aus dem westlichen Teil des Ljubljana-Einzugsgebietes an.

Das im Bach Logašica (2.41) eingesetzte Eosin ist in den Quellen 1.4 und 1.3 (Ausnahme 1.34) zum Vorschein gekommen, wobei in der Quelle 1.3 höhere Eosinkonzentrationen und Fließgeschwindigkeiten beobachtet wurden. Bereits im Jahre 1953 hatte eine Färbung des Baches 2.31 die Verbindung mit den Quellen 1.4 bewiesen. Beim Markierungsversuch 1975 erfolgte ein zuverlässiger Amidorhodaminnachweis bei den Quellen 1.44, 1.37 und 1.36.

Die Verbindungen, die durch die Markierung mit Eosin, Amidorhodamin, blauen und roten Sporen gefunden wurden, unterscheiden sich teilweise von den mit radioaktivem Cr-51 und KCl festgestellten Verbindungen. Die Ponore 2. 21 und 2. 11 speisen demnach nur die Quellen 1. 32 und 1. 34. Vielleicht ist dies aber auf eine zu kleine Konzentration dieser beiden Markierungsmittel zurückzuführen.

Es ist interessant, daß die blauen Sporen, die in den Bach 2. 51 mit dem entferntesten Ponor im westlichen Einzugsgebiet der Quellen eingespeist wurden, zuerst in der Quelle 1. 34, wo einen Tag später auch die roten Sporen aus 2. 32 gefunden wurden, erschienen sind. Da die Sporen eine qualitative Bestimmung der Verbindungen nicht ermöglichen, kann das Auftreten der blauen Sporen in 1. 34 nur mit einer direkten Verbindung dieser Quelle mit dem Ponor 2. 51 und auch 2. 32 erklärt werden. Gleichzeitig fließt ein Teil des Wassers des Ponors 2. 51 mittelbar in die Quelle 1. 3, zusammen mit dem Wasser der Bäche 2. 31 und 2. 32, deren Wasser aber auch in den Quellen der Idrijca-Quellen austritt. Eine solche Verteilung der Wasseradern wird auch durch die Fließgeschwindigkeiten bestätigt.

Der Nachweis der angewandten Markierungsmittel in den Quellen 1. 36, 1. 37 und 1. 44 ist ein Abbild der weitreichenden Verflechtung aller unterirdischen Wasserläufe im Einzugsgebiet der Ljubljana. Eine Bestimmung der Abflußanteile der verschiedenen Gewässer ist schwierig, da wahrscheinlich auch die Mischungsverhältnisse nicht immer die gleichen sind. Die Mischungen werden offensichtlich von den hydraulischen Verhältnissen im Untergrund und in den Ponoren beeinflusst.

Mit dem Nachweis von Amidorhodamin sowie der blauen und roten Sporen in den gleichen Quellengruppen der Ljubljana und Idrijca ist zum erstenmal eine Gabelung der unterirdischen Wasserläufe, die aus den Bächen 2. 31, 2. 32 und 2. 51 gespeist werden, und damit eine Wasserscheide zwischen dem Adriatischen und dem Schwarzen Meer lokalisiert worden. Auch die durchschnittlichen Wassergeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Ponoren und zugehörigen Quellen stimmen ziemlich überein, so daß man einen gemeinsamen Wasserabfluß aus allen drei Ponoren sowohl in der Richtung gegen den Idrijca-Fluß als auch gegen den Ljubljana-Fluß annehmen kann. Leider kann man wegen mangelnder hydrologischer Angaben das Verhältnis der Wassermengen, die in das eine und das andere Flußgebiet abfließen, nicht abschätzen. Nach der Zahl der Sporen, den Konzentrationen und den Geschwindigkeiten zu urteilen, kann man jedoch darauf schließen, daß der größere Teil des Wassers in die Ljubljana fließt.

Eine Übersicht stellen die Tabellen 33—43 dar¹.

¹ Die Tabellen 33—43 wurden der Schriftleitung der Steirischen Beiträge zur Hydrogeologie nur in Form von Klischees und erst nach Fertigstellung des gesamten Satzes übermittelt. Eine Neufassung in deutscher Sprache war aus zeitlichen Gründen nicht mehr möglich. Da die Tabellen, obgleich zum Teil problematisch, eine vereinfachte übersichtliche Zusammenfassung darstellen, wurden sie in diese Ausgabe einbezogen. Als Erläuterung sei angeführt: D = Entfernung zwischen den Ponoren (Einspeisstellen) und den Quellen, H = Höhenunterschied zwischen Ponoren und Quellen, T-1 = Zeit bis zum ersten Tracernachweis in Stunden (h), T-2 = Zeit von der Einspeisung bis zum Auftreten des Tracer-Maximums (in h).

Tabelle 33

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Conc. (mg/m ³)
6.16 VODONOS - CERKNIŠKO JEZERO								
				1.34	-	-	-	-
				1.32	-	-	-	-
			4.2	1.36	3.5	125	141	0.35
	0.85		4.9	1.37	82.6	97	117	0.5
			4.0	1.44	(13.9)	(125)	(141)	(0.24)
D=18,8-21,15 km								
URANINE A 51,2 kg H = 260 m								
			3.8	1.45	(1.3)	(141)	(149)	(1.2)
			5.7	1.43	44.9	77	99	9.6
	47.5		5.6	1.42	10.8	77	101	12.0
			5.6	1.41	3.6	77	101	9.5
			5.6	1.23	7.5	81	101	9.5
			5.3	1.21	36.4	85	109	26
	5.10		5.5	1.22	-	93	105	20
			5.3	1.13	29.1	85	101	21.9
	46.56		5.3	1.12	35.6	81	101	21.5
			5.2	1.11	35.3	85	101	22.6
			3.7	1.15	0.07	135	141	4.0

Tabelle 34

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	MAX. Conc. (mg/m ³)
3.42 MILAVCOVI KIJUČI-PLANINSKO POLJE								
				1.32	-	-	-	-
				1.34	-	-	-	-
			4.4	1.36	5.0	93	105	0.13
	1.42		4.2	1.37	91.2	61	81	0.82
			(2.4)	1.44	(3.7)	(117)	(141)	(0.07)
D=11,8-13,35 km								
RHODAMINE FB, 26,4 kg H = 155 m								
			(2.3)	1.45	(0.3)	(145)	(145)	(0.47)
			6.0	1.43	49.7	41	57	4.0
	42.71		6.0	1.42	6.3	41	57	5.7
			6.0	1.41	5.1	41	57	5.7
			5.5	1.23	13.0	45	63	5.2
			5.4	1.21	25.5	51	65	4.4
	5.97		5.1	1.22	-	53	69	9.9
			5.4	1.13	42.4	49	63	9.7
	49.89		5.3	1.12	35.7	49	63	9.1
			5.3	1.11	21.9	49	63	9.6
			2.3	1.15	0.04	105	141	1.5

Tabelle 35

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Conc. (mg/m ³)
3.43 RIBCE-PLANINSKO POLJE								
				1.34	-	-	-	-
				1.32	-	-	-	-
			(6.8)	1.36	5.5	49	(49)	1
	0.1		2.4	1.37	44.5	45	140	5
			(6.5)	1.44	50.0	51	(51)	4
D=11,5-12,3 km								
			(1.7)	1.45	(3.3)	(172)	(194)	93
			4.4	1.43	14.1	44	76	167
GREEN SPORES 10 kg	69.3		3.4	1.42	59.6	51	99	835
BROWN SPORES 10 kg			2.9	1.41	11.1	51	115	357
			4.9	1.23	4.8	50	68	65
			2.9	1.21	7.1	67	115	116
H = 155 m								
	13.1		2.7	1.22	100	50	123	424
			4.4	1.13	32.9	50	75	276
	17.5		2.9	1.12	35.3	67	114	105
			4.4	1.11	31.7	50	75	173
			-	1.15	-	-	-	-
			6.7	1.14	0.1	50	(50)	1

Tabelle 36

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Conc. (mg/m ³)
3.41 DOLENJE LOKE-PLANINSKO POLJE								
				1.34	-	-	-	-
				1.32	-	-	-	-
			2.4	1.36	2.5	93	133	0.15
	1.5		3.2	1.37	95.0	61	97	0.9
			(2.2)	1.44	(2.5)	(117)	(141)	(0.05)
D=10,9-11,65 km								
			(2.1)	1.45	(0.5)	(145)	(145)	(1.2)
			5.4	1.43	47.7	41	55	13
TINOPAL 48.0 kg	97.9		5.9	1.42	12.3	41	53	26
			5.5	1.41	5.1	41	55	17
			5.5	1.23	13.9	45	57	20
			5.5	1.21	20.3	51	65	16
H = 155 m								
	0.6		5.2	1.22		105	109	1.5
				1.13	-	-	-	-
				1.12	-	-	-	-
				1.11	-	-	-	-
				1.15	-	-	-	-

Tabelle 37

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Conc. (mg/m ³)
3.2 STRŽEVCA - PLANINSKO POLJE								
D=10.05-11.05 km	37.8	37.8	2.5	1.34	-	-	-	-
			5.1	1.32	0.7	110	114	1.8
			4.5	1.36	18.7	54	58	2.4
			4.5	1.37	54.9	54	64	4.9
			4.6	1.44	25.7	58	62	2.7
	61.8	61.8	4.8	1.45	27.9	50	58	7.4
			4.6	1.43	16.5	54	62	3.5
			4.7	1.42	7.8	54	62	3.7
			4.4	1.41	1.7	54	66	3.2
			4.6	1.23	2.7	58	64	3.0
0.3	0.3	3.7	1.21	17.8	58	64	3.2	
		-	1.22	-	82	82	0.6	
-	-	-	-	1.13	-	-	-	-
			-	1.12	-	-	-	-
			-	1.11	-	-	-	-
			-	1.15	-	-	-	-

Tabelle 38

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Conc. (mg/m ³)
2.41 JAČKA - LOGAŠČICA								
D=6.15-7.05 km	67.25	67.25	1.13	1.34	-	-	-	-
			1.04	1.32	-	-	-	-
			1.03	1.36	22.6	150	158	12.5
			1.03	1.37	45.3	142	166	6.2
32.75	32.75	1.0	1.44	32.1	146	166	10.0	
		1.0	1.45	28.1	142	170	6.0	
		1.02	1.43	42.9	162	174	2.4	
		1.04	1.42	5.6	162	174	2.4	
		1.05	1.41	1.1	162	174	2.2	
		1.06	1.23	1.7	166	178	2.3	
		1.06	1.21	20.5	166	181	2.2	
-	-	-	-	1.22	-	-	-	-
			-	1.13	-	-	-	-
-	-	-	-	1.12	-	-	-	-
			-	1.11	-	-	-	-
			-	1.15	-	-	-	-

Tabelle 39

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Conc. (mg/m^3)
2.31 HOTENKA		-	1.3	11.1	-	-	215	0.14
			1.7	11.11			167	2.0
D=10.0-12.5 km								
AMIDORHODAMINE Ge 26 kg		-	2.0	1.34	-	-	-	-
			2.1	1.32	3	171	171	1.3
			2.1	1.36	22	157	165	3.7
			2.1	1.37	50	157	165	3.8
			2.1	1.44	25	157	165	3.2
H = 215 - 245 m						169	trace	

Tabelle 40

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Conc. (mg/m^3)
2.32 ŽEJSKI POTOK		2.0	0.4	11.1	53	559	579	6
			0.5	11.11	47	525	549	12
D=9.5-11.9 km								
RED SPORES 10 kg		98.0	1.9	1.34	0.1	173	(173)	2
			1.5	1.32	14.0	186	220	178
			1.4	1.36	29.0	186	236	307
			1.7	1.37	26.7	173	196	325
			1.5	1.44	29.6	172	219	329
H = 220-250 m								

Tabelle 41

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	Returned tracer %	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Conc. (mg/m^3)
2.51 PIKELJŠČICA		58.8	0.4	11.1	39	267	555	10
			0.4	11.11	61	243	552	24
D=8.3-12.7 km								
BLUE SPORES 25 kg		41.2	2.4	1.34	40	141	141	23
			1.2	1.32	7.1	220	283	2
			1.4	1.36	24.3	236	236	10
			1.3	1.37	12.9	210	267	3
			1.3	1.44	15.7	219	267	5

Tabelle 42

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. Cont.
2.21 KOVČARICA D=7.3 - 7.4 km 51 Cr-3Cl B = 273 m		0.5	1.7	1.34	117	117	500 µCi
		99.5	1.5	1.32	117	134	14.500 µCi

Tabelle 43

No. Ponor-Tracer	Connection	Returned tracer %	Peak velocity (cm/s)	Spring No.	T-1 (h)	T-2 (h)	Max. C. A. (mg/l)	Max. C. C1 (mg/l)
7.11 PETROVŠČICA D=6.35 - 6.55 km 3Cl 3.000 kg (57 g K ₂ O) B = 273 m		10.4	1.2	1.34	135	147	4.3	8.7
		89.6	1.3	1.32	123	135	9.7	16.6

Die Verflechtung der unterirdischen Wasserwege

Aus den Abflüssen und den Konzentrationen der Tracer wurden vom Hydrologischen Dienst in Ljubljana die Anteile der Markierungsmittel berechnet, die in den einzelnen Quellen ausgebracht wurden. Wenn diese Werte der einzelnen Quellen nun in Gruppen zusammengefaßt werden, die sich aufgrund ähnlicher Konzentrationen, Fließgeschwindigkeiten und Lagen ergeben, so läßt sich daraus ein Bild der Hauptadern zwischen den Ponoren und den Quellen ermitteln.

In Tab. 46 sind die Werte für die einzelnen Tracer angeführt. Neben den eingesetzten Mengen und ausgebrachten Anteilen sind noch andere Angaben, die die Darstellung der unterirdischen Verbindungen ergänzen, angegeben. In Fig. 73 ist die Verteilung der Wässer von den Ponoren zu den Quellen zur Zeit des Markierungsversuches dargestellt. Danach ist ungefähr ein Viertel des gesamten Karstwassers aus den Quellen 1.3, ebensoviel aus den Quellen 1.1 einschließlich der Quelle 1.22, die Hälfte des Wassers aber aus den Quellen 1.4 und 1.2 ausgetreten.

Fig. 74 vereinigt die Daten aller Tracerversuche in ein einheitliches Schema der Abflüsse zwischen den Ponoren und den Quellen. Sie zeigt auch die Verteilung der Hauptwasseradern, welche die einzelnen Quellengruppen speisen. Bedeutsam sind die sogenannten „kritischen Punkte“, wo die einzelnen unterirdischen Strömungen sich vereinigen oder sich scheiden. Hydrogeologische und andere Untersuchungen werden die räumliche Verteilung dieser Stellen definieren.

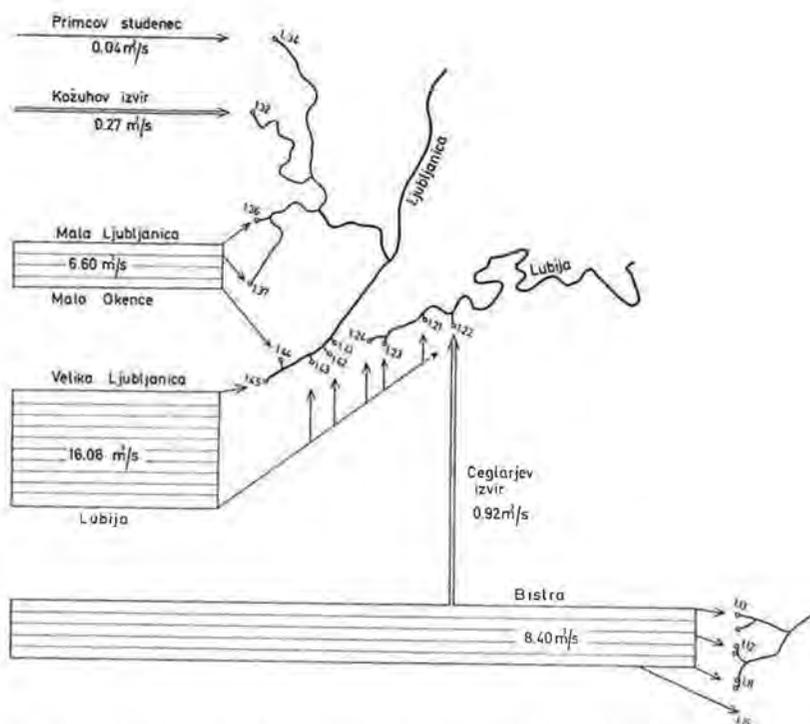


Fig. 73: Durchflüsse in den Ljubljana-Quellen am Beginn des Markierungsversuches am 27. 5. 1975 (nach Angaben von HMZ Ljubljana).

Sl. 73: Pretoki v izviri Ljubljane ob začetku sledenja, 27. maja 1975, po podatkih HMZ.

Aus der Verteilung des Uranins und Rhodamins in den Ljubljana-Quellen ist zu schließen, daß sich die Strömungen aus den Bodenponoren des Poljes von Cerknica (6. 16) und aus den östlichen Ponoren der Unica im Polje von Planina (3. 42) in eine einheitliche Strömung vereinigen. Aus der Zeitdifferenz zwischen dem Auftreten der beiden Tracer kann geschlossen werden, daß das Wasser von Cerknica den unterirdischen Abfluß der Unica nach 36 bis 40 Stunden erreicht. Nach diesem Zusammentreffen fließt die erste Hälfte des markierten Wassers zu den Quellen 1. 4, 1. 3 und teilweise 1. 2. Von dem mit Tinopal markierten Unica-Ponor 3. 41 erreicht das Wasser die gegen 1. 4 gerichtete Strömung noch vor der Gabelung zu 1. 1. Die Tracer haben sich in Richtung 1. 1 geringer verdünnt als in Richtung 1. 4 und 1. 3, zu welcher noch Zuflüsse von den Ponoren 3. 41 und 3. 1 kommen (bewiesen mit Tinopal und LiCl).

Die Unterschiede in der Verteilung des Tinopals, LiCl und Eosins in den Quellen 1. 4 und 1. 3 können mit der entsprechenden Verteilung in den zugehörigen Teilströmungen erklärt werden. Die unterirdische Unica (3. 1) fließt anfangs in einem eigenen Kanal, in welchen die mit Eosin markierte Logaštica (2. 41) einmündet. Nach diesem Zusammenfluß treffen diese Gewässer auf jenen Teil des Wassers von Cerknica und Planina, das in Richtung der Quellen 1. 2 bis 1. 4 fließt. Bald nach diesem bedeutsamen unterirdischen Zusammenfluß folgt eine Gabelung der gemeinsamen Strömung in zwei Systeme,

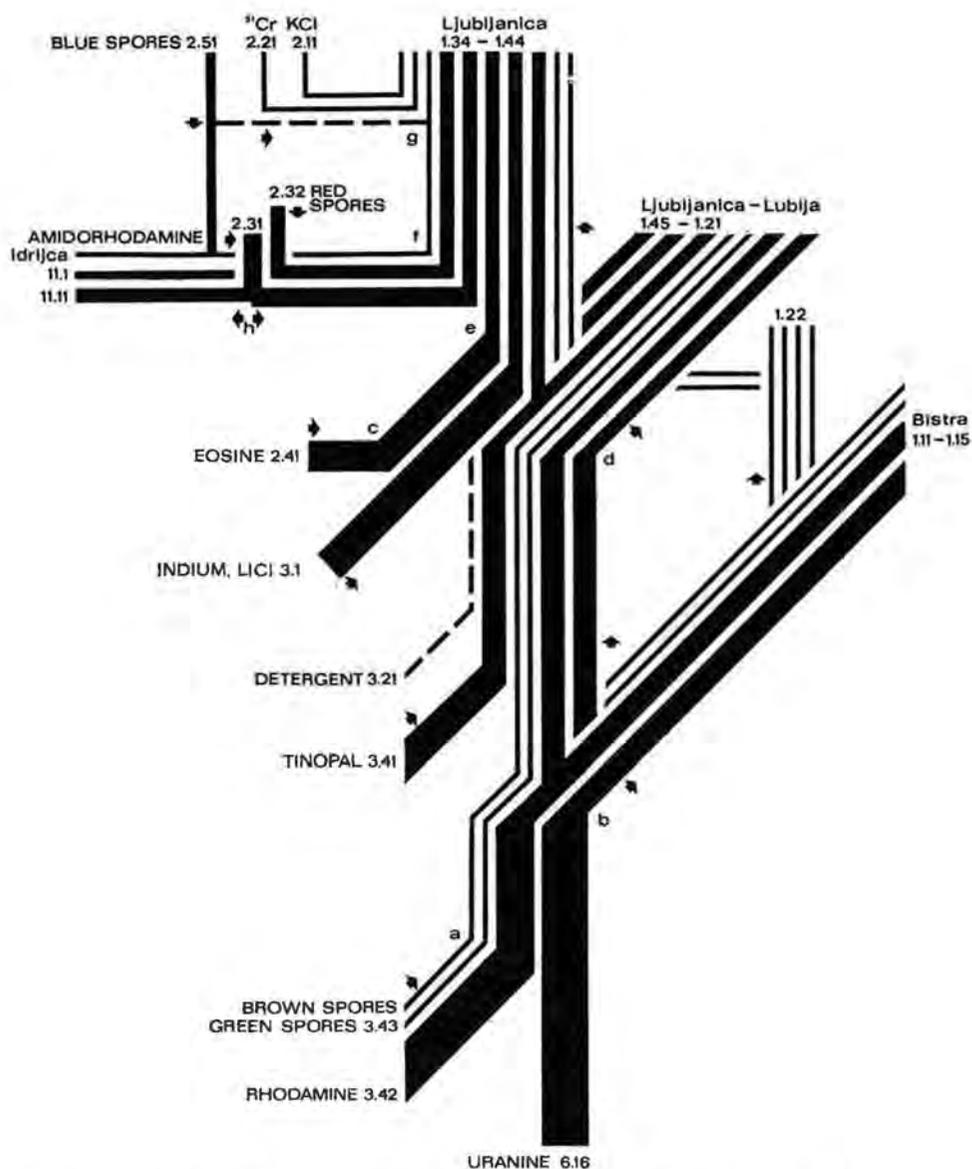


Fig. 74: Schema der unterirdischen Wasserverbindungen nach den Ergebnissen des Markierungsversuches 1975; a bis h — kritische Hauptpunkte in dem unterirdischen Durchflußsystem, wo sich die Wasserwege vereinigen und verzweigen.

Sl. 74: Shema podzemeljskih vodnih zvez po rezultatih sledilnega poskusa 1975, a do h — glavne kritične točke v sistemu podzemeljskega pretakanja, kjer se podzemeljski tokovi združujejo in členijo.

von welchen das stärkere die Quellen 1. 4 und teilweise 1. 2, das schwächere aber die Quellen 1. 44, 1. 37, 1. 36 und 1. 32 speist.

Die unterirdische Strömung der Bäche 2. 31, 2. 32 und 2. 51 mündet in jenes Netz, das in den Quellen 1. 44 und 1. 3 austritt. Die unterirdische Strömung von 2. 21 und 2. 11 fließt wahrscheinlich unmittelbar zu den Quellen 1. 32 und 1. 34, zu dieser Strömung gesellt sich auch ein Teil des direkten Abflusses von 2. 51 und 2. 32, was durch die Anwesenheit der blauen Sporen in 1. 34 bezeugt wird.

Damit sind folgende Stellen für die Verteilung der Tracer in den Quellen und den Beitrag der Ponore wesentlich:

- a) der Zusammenfluß des Wassers von Cerknica (6. 16) und vom östlichen Teil von Planina (3. 4 und 3. 43);
- b) die Gabelung des Wassers von Cerknica (6. 16) und vom östlichen Teil von Planina in die Quellen 1. 1 und 1. 22;
- c) der Zusammenfluß des Wassers vom nördlichen Teil von Planina (3. 1) und des Wassers von Logatec (2. 41);
- d) der Zusammenfluß eines Teiles des Wassers von Cerknica und vom östlichen Teil von Planina mit dem Wasser vom nördlichen Teil von Planina und Logatec;
- e) die Gabelung der gemeinsamen Strömung in die Richtung gegen die Quellen 1. 4 (mit 1. 2) und 1. 3 und 1. 44;
- f) der Zusammenfluß des Wassers der Ponore 2. 31 und 2. 51 mit der Strömung zu den Quellen 1. 3 und 1. 44;
- g) der Zusammenfluß der Strömung vom Ponor 2. 21 und 2. 11 mit dem Wasser, das bei den Quellen 1. 32 und 1. 34 austritt;
- h) die Gabelung des Wassers der Ponore 2. 3 und 2. 51 zur Ljubljana und Idrija.

Die dargestellten Zusammenflüsse und Gabelungen des Karstwassers werden durch die Verteilung der Tracer in den Hauptsystemen bestätigt. Auf die Verteilung der Tracer in den einzelnen Quellen hat allerdings noch die Gliederung der Hauptadern des Wassers unmittelbar vor den Quellen, in kleinerem Maße auch die Mischung des Wassers zweier Adern unmittelbar vor den Grenz- oder Nachbarquellen, Einfluß.

Der Beitrag der Ponore zu den einzelnen Quellengruppen

Aus der Verteilung der Markierungsmittel und der Abflüsse der Quellen und aus dem Abfluß des Ponorwassers wurde der Beitrag der Ponore zu den einzelnen Quellengruppen berechnet (Tabelle 44). Dabei ist vorausgesetzt, daß die Markierung unter stationären hydraulischen Verhältnissen erfolgt ist und daß die Anteile der ausgebrachten Markierungsmittel in den Quellen auch die Abflußanteile widerspiegeln, welche die Ponore zu diesen Quellen beitragen.

Aus den Abflüssen und den Anteilen der ausgebrachten Tracer von den Poljen von Cerknica (6. 16) und Planina (3. 42) in den Quellen 1. 1 wurde der Abfluß des Wassers vom Polje von Cerknica in die Quellen 1. 3, 1. 4, 1. 2 und 1. 1 berechnet. Dabei ergab sich, daß die Quellen 1. 1 mit einem Durchfluß von 8,4 cm³/s zur Zeit des Markierungsversuches das Wasser vor allem aus dem Polje von Cerknica und den östlichen Ponoren der Unica im Polje von Planina bekommen haben. Von den Unica-ponoren 3. 42 und 3. 43 haben die Quellen 1. 1 48,7% oder 5,26 m³/s Wasser erhalten. Der Rest von 3,14 m³/s stammt aus dem Polje von Cerknica, womit 42,1% des gesamten Abflusses dieses Sees unmittelbar in die Ljubljana abfließen. Der Gesamtabfluß mit allen Zwischenzuflüssen

Tabelle 44: Die Abflußmengen in die Ponore und der Anteil dieser Wässer an der Schüttung der Quellen in m³/s zur Zeit des Markierungsversuches (berechnet von P. HABIČ).

Ponor Tracer		6.16 Uran.	3.42 Rhod.	3.41 Tin.	3.1 LiCl	2.41 Eosin	2.31 Am.-Rh.R.Sp.	2.32	2.51 Bl.Sp.	2.21 Cr-51	2.11 KCl	sQ	dQ
Spring	QpQi	7,460	10,800	5,400	4,500	0,140	0,040	0,020	0,020	0,030	0,020	28,430	
1,34	0,040	—	—	—	—	—	—	—	0,004	0,0003	0,002	0,006	0,034
1,32	0,270	—	—	—	0,009	—	—	0,003	0,001	0,029	0,018	0,060	0,210
1,36—1,44	6,600	0,060	0,065	0,080	1,700	0,090	?	0,017	0,003	—	—	2,015	4,585
1,45—1,21	16,080	3,925	4,666	5,290	2,780	0,054	—	—	—	—	—	16,715	—0,635
1,22	0,920	0,328	0,800	0,027	0,014	—	—	—	—	—	—	1,170	—0,250
1,11—1,15	8,400	3,140	5,260	—	—	—	—	—	—	—	—	8,400	—
11,1—11,11	?	—	—	—	—	—	?	?	?	—	—	0,064	?
Total	32,310											28,430	3,944

Qi = Anteil an der Quellschüttung in m³/ssQ = Summe des Abflusses in m³/sQp = Abfluß in den Ponore in m³/s

dQ = Differenzen der Wassermengen

? = keine quantitative Berechnung

Tab. 45: Zufluß von den Schwinden zu den Quellen zur Zeit des Versuches (berechnet von K. ŽIBRIK et al.).

Ponor	Abfluß 10 ⁶ m ³	sQ m ³ /s	Quellen									
			1.1		1.2		1.4		1.3		(11) Johijca	
			10 ⁶ m ³	%								
6.16	16,86	4,24	7,85	46,56	4,10	24,30	4,79	28,42	0,12	0,73	—	—
3.42	23,49	5,90	11,72	49,89	5,32	22,63	6,13	26,09	0,32	1,38		
3.43	20,59	5,17	3,64	17,67	4,40	21,38	12,50	60,72	0,01	0,06		
3.41	24,16	6,10	—	—	8,24	34,11	15,57	64,44	0,35	1,45		
3.1	34,18	8,60			4,44	12,99	20,10	58,81	9,60	28,10		
2.41	3,94	0,73			0,27	6,94	1,87	47,36	1,80	45,69		
2.11	1,90	0,45							1,90	100,0		
2.21	2,15	0,59							2,15	100,0		
2.31*	1,55	0,39										
2.32	1,15	0,29					0,33	29,05	0,79	68,92	0,03	2,03
2.51	0,44	0,11					0,03	6,47	0,15	34,70	0,26	58,82
andere Zuflüsse	28,25	7,1	11,8		3,51		—1,07		16,0			
Σ	158,38	39,85	35,01		30,28		59,89		33,19			0,29

* Zufluß zu den Quellen ist nicht festgestellt.

Tab. 26: Anordnungen der in den Quellen zutage getretenen Tracer in % (berechnet von F. HRIBAR).

Ponor	6.16	3.42	3.43	3.41	3.1	2.41	2.31	2.32	2.51	2.21	2.11	
Quelle	6.16	3.42	3.43	3.41	3.1	2.41	2.31	2.32	2.51	2.21	2.11	
Tracer	Uranin	Rhodamin	Sporen		LiCl	Eosin	Amido-	Sporen	Sporen	Cr-51	KCl	
			gr	br	Tinopal		rhodamin	r	bl			
eingespeiste						100 kg					3000 kg	
Menge kg	51,2 kg	26,4 kg	10 + 10 kg	48,0	(16,4 Li)	25,5 kg	26,0	10 kg	25 kg	3 Ci	(15,73 k)	
ausgebrachte						Ljubljana	München			1,910.400		
Menge kg	37,063	16,816	12,060	24,331	26,661	19,147	11,183	3,705	Vrhnika	3,250	17,0	
											1,910.400	
											pCi	
											14,77	
%	72,4	63,7	—	50,7	162,6*	75,1	43,8	**	—	—	63,7	92,0*
1,15	0,03	0,02	—									
1,11	16,10	14,17	5,61									
1,12	15,66	17,84	6,24									
1,13	14,77	17,86	5,82									
Σ 1,1	46,56	49,89	17,67									
1,22	5,10	5,97	13,03	0,58	0,32	—	—	—	—	—	—	—
1,21	15,00	11,62	4,98	19,90	11,02	6,33	10,84					
1,23	4,20	5,04	3,37	13,63	1,65	0,61	1,04					
Σ 1,2	24,30	22,63	21,38	34,11	12,99	6,94	11,88	—	—	—	—	—
1,41	1,86	1,88	6,92	5,11	1,03	0,37	0,63	—	—	—	—	—
1,42	3,10	2,55	41,58	12,05	4,81	1,82	3,11	—	—	—	—	—
1,43	22,63	21,35	9,83	46,69	26,06	13,67	23,42	—	—	—	—	—
1,44	0,12	0,04	0,07	0,04	9,74	21,58	15,35	25,83	29,05	6,47		
1,45	0,71	0,27	2,32	0,55	17,27	9,92	16,98	—	—	—		
Σ 1,4	28,42	26,09	60,72	64,44	58,81	47,36	59,49	25,83	29,05	6,47		
1,37	0,70	1,32	0,05	1,41	20,78	30,45	14,15	50,09	26,71	5,29		
1,36	0,03	0,06	0,01	0,04	7,06	15,24	14,47	20,27	28,43	10,00		
1,32	—	—	—	—	0,26	—	—	3,81	13,72	2,94	99,5	89,56
1,34	—	—	—	—	—	—	—	—	0,06	16,47	0,5	10,44
Σ 1,3	0,73	1,38	0,06	1,45	28,10	45,69	28,62	74,17	68,92	34,70	100,00	100,00
11,1								**	Menge nicht ausgewertet	1,08	22,94	
11,11								**		0,95	35,88	
Σ Idrija	—	—	—	—	—	—	—	**		2,03	58,82	—

* Teilweise problematische Ergebnisse infolge des stark veränderlichen natürlichen Hintergrundes.

** An den Idrija-Quellen sind die Schüttungen (Q) nicht gleichzeitig mit den Konzentrationen des Amidorhodamins gemessen worden.

beträgt demnach 7,46 m³/s. Dies kann mittelbar dem Gesamtabfluß der Bodenponore von Cerknica Polje zur Zeit des Markierungsversuches gleichgesetzt werden (s. Tab. 44). Der Wert stimmt mit den Messungen und den Berechnungen, die vor Jahren am See selbst vorgenommen wurden, gut überein. Damals wurde der Abfluß auf 6 m³/s geschätzt (P. HABIČ, 1972).

Bei dieser Wasserbilanz ergibt sich für die Quellen 1. 3 und 1. 4 ein größerer Abfluß, als er sich aus den Konzentrationsmessungen der Tracer und den Abflüssen der Ponore ergibt. Für die Quelle 1. 4 und 1. 2 sind dagegen die so berechneten Abflüsse etwas höher als die aus den Tracermessungen ermittelten Werte. Insgesamt führen die Quellen 1. 1 bis 1. 4 um ungefähr 4 m³/s mehr Wasser, als sich aufgrund der Summierung der Anteile aus den zugehörigen Ponoren ergibt, was etwas über 10% des Gesamtabflusses der Quellen entspricht. Dieser Unterschied dürfte vor allem in den Quellen 1. 44 und 1. 3 aus unbestimmten Karsteinzugsgebieten des Logatec und Rovte-Plateaus sowie unbekannter Teile des Hrušica-Plateaus abfließen. Weitere Berechnungen sind den Tabellen 45 und 46 zu entnehmen¹.

K. ŽIBRIK, F. LEWICKI und A. PRČININ, die mit den hydrologischen Untersuchungen betraut waren, haben mit der gleichen Berechnungsmethode wie für die Wasserbilanz im Kapitel 2. 2. 1. die Beiträge der markierten Schwinde zu den Ljubljana-Quellen neu kalkuliert. Sie haben dabei mit den gesamten Wassermengen in den einzelnen Schwinden und Quellen zur Zeit des Verfolgungsversuches zwischen dem 26. Mai und dem 10. Juli 1975 gerechnet. Die Quellen sind nicht in Gruppen eingeteilt worden, wie dies in diesem Kapitel behandelt worden ist. Dessenungeachtet stimmen die Resultate mit den in den Tabellen angeführten ziemlich überein. Ein größerer Unterschied ist nur bei der Bewertung des unmittelbaren Abflusses aus dem See von Cerknica vorhanden, während bei der Mala Ljubljana (1. 3) fast der gleiche Zufluß des Karstwassers aus unbekanntem Hinterland wie mit unseren Methoden festgestellt worden ist.

Die Beiträge der Schwinden zu den entsprechenden Quellen konnten trotz ziemlicher Schwierigkeiten bei der Messung einiger Durchflüsse und der Konzentrationen der einzelnen Markierungsmittel wie z. B. der Sporen und Detergente trotz der Veränderlichkeit des „background“ wie beim Kalium- und Lithiumsalz doch zufriedenstellend bewertet werden. Die Unterschiede in der Menge der wieder zutage getretenen Markierungsmittel waren kein besonderes Hindernis. Der Beitrag der einzelnen Schwinden ändert sich natürlich bei verschiedenen hydrologischen Situationen. Mit den beschriebenen Untersuchungen und dem Verfolgungsversuch ist es durchaus gelungen, die Darstellung der unterirdischen Wasserverbindungen und der Wasserbeiträge aus verschiedenen Schwinden und auch aus unbekanntem Einzugsgebieten in die Ljubljana-Quellen wesentlich zu vervollständigen.

¹ Auch diese Tabellen erreichten trotz dankenswerter Bemühungen der Kollegen in Postojna die Redaktion der Steirischen Beiträge zur Hydrogeologie erst nach der Korrektur des ersten Bürstenabzuges. Sie werden daher weitgehend kommentarlos übernommen. Der Schriftleiter ist jedoch der Meinung, daß es nicht möglich ist, auf Ergebnisse der Sporenrift quantitative Berechnungen aufzubauen. Daß die redaktionellen Arbeiten stark unter Zeitdruck gerieten, liegt an Verzögerungen, die nicht der gemeinsamen Schriftleitung anzulasten sind.

2. 4. 2. Hydrogeologische Interpretation der unterirdischen Wasserverbindungen (R. GOSPODARIČ, P. KRIVIC und R. VERBOVŠEK)

Der unterirdische Abfluß der in die Ponore in den Poljen von Cerknica, Planina und Logatec versinkenden und beim Versuch 1975 markierten Wässer zu den Quellen der Ljubljana wurde in hydrologischer Hinsicht bereits in Kap. 2. 4. 1. besprochen. Dort finden sich auch detaillierte Darstellungen über die beschickten Ponorabflüsse im Bereich des Karstplateaus Rovtarska planota sowie des Blindtales Hotensko podolje, die sowohl in einigen Quellen der Ljubljana als auch der Idrijca nachgewiesen werden konnten. Die Richtung der unterirdischen Wasserläufe — nicht aber auch die tatsächliche Breite dieser besonders leitfähigen Zonen — sind in der „Hydrogeologischen Karte“ (s. Beilage) eingetragen.

In der nachfolgenden Darstellung wird nun versucht, die durch die Ergebnisse des kombinierten Markierungsversuches vorgegebenen Richtungen und Verbindungen der beschickten Ponorwässer mit den Quellen der Ljubljana und der Idrijca hydrogeologisch zu interpretieren. Dabei sollen aber die anderen Karstwässer in den hydrogeologischen Einheiten, die zwar ebenfalls die Wasserläufe und Quellen speisen, vom Markierungsversuch aber nur teilweise betroffen waren, hier **nicht** behandelt werden. Aus dem geologischen Bau können bereits Hinweise auf die allgemeine Fließrichtung der Wässer in den verkarsteten Gesteinen entnommen werden. Dieser Bau (Lithologie und Tektonik) spielt auch eine wichtige Rolle für das gesamte hydrologische Regime (s. dazu Kap. 2. 1.). Die geologische Situation kann auch die Verteilung und Konzentration der Tracer in den einzelnen Quellen wesentlich beeinflussen, wie bereits in Kap. 2. 3. 5. aufgezeigt wurde. Weil aber der Schwerpunkt dieses Markierungsversuches auf der Feststellung der Verbindungen zwischen den beschickten Ponoren und den Quellwässern lag, wurde die Problematik der Zirkulation des allgemeinen Karstwässers für spätere Studien zurückgestellt. Aus diesem Grund wird auch nicht über die verschiedenen Theorien der Karsthydrographie diskutiert.

Aus dem Cerkniško Polje (6. 16) fließt ein Teil des Ponorwassers gegen Norden den Quellen der Bistra (1. 1) zu. Das ist der östlichste unterirdische Wasserlauf, der die Möglichkeit hat, den gegen Norden gerichteten Schichten der jurassischen Kalke zu folgen. Hydrogeologisch problematisch ist nur der Durchbruch durch die obertriassischen Dolomite bei Cerknica. Hier ist nicht bekannt, ob das Ponorwasser durch Kanäle im Dolomit oder im jurassischen Kalk, der unter den hier tektonisch aufgeschobenen Dolomiten ansteht, fließt. Die bis jetzt durchgeführten Bohrungen im Dolomit waren nicht tief genug, um dieses Strukturproblem abklären zu können (M. PLENIČAR 1954, M. BREZNIK 1962). In den Bohrungen in einer Tiefe von 100 m angetroffene Kavernen waren mit Wasser gefüllt, jedoch ist unklar, woher dieses stammt.

Die bisher bekannten geologischen Details weisen darauf hin, daß der Abfluß aus den Bodenponoren des Cerkniško Polje an eine tektonisch begünstigte Zone gebunden ist. Die relative Wasserbarriere der obertriassischen Dolomite ist bei Cerknica am engsten. Die Breite der Abflußzone und die Abflußrichtung wird auch durch die Verteilung der Bodenponore angedeutet, die in der Mitte des Poljes in einer etwa einen Kilometer breiten, NNW-SSE verlaufenden Zone angeordnet sind. Bei allen bis jetzt gefärbten Bodenponoren wurde der unmittelbare Abfluß zu den Quellen der Ljubljana nachgewiesen (s. Kap. 2. 3.). Es besteht daher die Wahrscheinlichkeit, daß das ganze Ponorwasser gegen

Norden durch Kanäle von begrenzter Durchlässigkeit (ca. 6 bis 7 m³/s) durch den Dolomit bei Cerknica abfließt. Weitere Hinweise auf diese Abflußrichtung gibt auch die Anordnung der Einsturzdolinen nördlich von Cerknica.

Geomorphologische, hydrologische und speläologische Beobachtungen zeigen, daß sich der Ponorbereich des Planinsko Polje an der nordöstlichen und an der nördlichen Seite, wo die verkarsteten, dickbankigen Unterkreide- und Cenomanikalke an der Nordostseite der Idrija-Verwerfungszone anstehen, erstreckt. Der Poljeboden selbst liegt in obertriassischen Dolomiten an der Südwestseite dieser Zone. Im Bereich der Ponore fallen die Gesteinsschichten gegen Norden ein, südlich vom Dorf Laze aber auch gegen Nordosten. Kleintektonische Untersuchungen haben gezeigt, daß hier die NNE-SSW-Kluftrichtung vorherrscht, aber einzelne NW-SE und NE-SW verlaufende Blattverschiebungen in gewissen Abständen die Kalke in Blöcke zerteilen. Die in Gruppen angeordneten Ponore sind an die mehr oder weniger tektonisch beanspruchten Bereiche des Poljerrandes geknüpft.

Obwohl wir dem Ponorwasser durch die engen Abflußkanäle nicht folgen können, ist es doch möglich, aufgrund der in den nahe liegenden Höhlen Logarček und Mačkovica auftretenden hohen Wasserstände zu sagen, daß sich das Ponorwasser schon in der Nähe der Schwinden in gemeinsamen Wasserläufen vereinigt. Dabei vergrößert sich die Erosionsfähigkeit der Wässer so sehr, daß auch die Klüfte in den Dolomiten zwischen den Jura- und Unterkreidekalken beträchtlich ausgeweitet werden konnten. Es ist höchst wahrscheinlich, daß auch die Obermalmdolomite auf dem Karstplateau Logaška planota für diese vereinigten Wasserläufe keine Sperrschicht darstellen und das Zusammenfließen der Wässer aus den Poljen von Cerknica und von Planina nicht behindern. Eine ähnliche Vereinigung der Ponorkanäle ist in den besser zugänglichen Ponorhöhlen am Rande des Cerknisko Polje und im Pivkabecken bekannt (R. GOSPODARIČ 1970, 1976). Dort vereinigen sich die zuerst getrennten Ponorwasserkanäle in gemeinsame, ausgedehnte und besser wasserführende Höhlengänge in einer gewissen Entfernung vom Ponorrand. In dieser Hinsicht bildet wahrscheinlich auch das Planinsko Polje keine Ausnahme.

Das Ponorwasser vom Rand des Planinsko Polje vereinigt sich ebenfalls in gemeinsamen Kanälen im Bereich der Höhle „Najdena jama“. Hier fließen die Wässer durch die Oberkreidekalke, die ganz allgemein die am intensivsten verkarsteten Gesteine dieses Teiles des Dinarischen Karstes darstellen. Zahlreiche Karstdolinen geben auch Zeugnis für die bemerkenswerte korrosive Umformung der Oberfläche. Die Korrosion ist aber auch unter der Decke der Flyschschichten im Gebiet Kališe wirksam. Viele Einsturzdolinen zeugen vom Verfall ausgehnter unterirdischer Höhlengänge. Sowohl die Sickerwässer als auch die oszillierenden unterirdischen Wasserläufe arbeiten durch Korrosion und Erosion ständig an der Weiterentwicklung des hiesigen Karstes. Im engeren Bereich zwischen dem Planinsko Polje und dem Logaško Polje vereinigen sich demnach Merkmale der rezenten und der älteren Verkarstungsprozesse und schaffen so den am meisten durchhöhlten Teil des Karstes im Einzugsgebiet der Ljubljana. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn sich hier der bedeutendste Kreuzungspunkt (kritischer Punkt d) des unterirdischen Flußnetzes befindet. Für eine solche Konzentration der Wässer ist aber auch die lithologische Zusammensetzung und die tektonische Zerbrechung der Gesteine besonders günstig.

Eine entsprechend detaillierte Darstellung der unterirdischen Wasserläufe hinsichtlich ihrer Beziehung zu den tektonischen Strukturen ist aber nördlich des behandelten Bereiches nicht möglich, weil dort keine eingehenderen speläo-

logischen Studien, die für solche Bestimmungen maßgebend sind, vorliegen. Man muß sich daher hier auf die hydrologischen Daten und auf die bekannten geomorphologischen und geologischen Verhältnisse der Umrahmung der Ljubljana-Quellen stützen.

Die hydrologischen Beobachtungen lassen eine Bifurkation der Wasserläufe im Karstuntergrund schon einige Kilometer vor den Quellen vermuten. In diesem Bereich ist ein Trockental mit zahlreichen Einsturzdolinen in NNE-SSW-Richtung bekannt. Diese Talung folgt einer ausgeprägten Verwerfungszone. Durch die Einstürze wurden ältere Höhlengänge zerstört, und die unterirdischen Wasserläufe wurden so gezwungen, sich weiter einzutiefen. Die unter diesen Einsturzdolinen fließenden Wasser speisen einerseits die Retovje- und Lubija-Quellen und andererseits die Močilnik-Quellen.

Der kombinierte Markierungsversuch hat gezeigt, daß sich die Wasserläufe von der schon beschriebenen Abflußrichtung auch gegen Nordosten hin aufspalten. Diese Richtung quert die liassischen Kalke, und das Wasser strebt in den Bereich weniger gut verkarstungsfähiger Gesteinsschichten zur Dolomitbarriere hin. Für diese Abflußrichtung müssen also die Kanäle besonders an die Verwerfungen und/oder an die Klüfte der NE-SW- oder E-W-Richtung gebunden sein. Die kleintektonische Analyse zeigt zwar, daß auf der Oberfläche so gerichtete Rupturen nur selten auftreten, es ist aber damit nicht gesagt, daß sie sich im Horizont der Hauptwasserbewegung nicht geltend machen können. Die ausgeprägte nordöstliche und östliche Orientierung dieser jüngeren Wasserkanäle wurde zweifellos durch die tektonische Senkung des Ljubljansko barje (Laibacher Moor) im jüngeren Pleistozän und im Holozän beeinflusst.

Die Ponore der Bäche Pikeljščica und Žejski potok liegen in Unterkreidekalken der Koševnik-Decke, die im Bereich der Schwinden kuppelförmig in einem tektonischen Fenster freigelegt sind. Die umliegenden Dolomite und Schiefer sowie andere der Trias angehörige Gesteine sind Bestandteil der Čekovnik-Decke und teilweise auch der Idrija-Decke, die auch in der Tiefe einen größeren Umfang einnehmen. Die Dolomite der höheren Decke dünnen nur gegen Süden, zur Hotedršica hin, aus. Dorthin ist auch ein teilweise verkarstetes Flußtal orientiert, desgleichen das Fallen der Kalkschichten der unteren Kreide. Deshalb fließen wahrscheinlich die Ponorwasser zuerst gegen die Talung Hotensko podolje, wo sich ihnen dann noch der Ponorfluß Hotenka anschließt. Vom kuppelartigen Bau der Decken fließt jetzt das Wasser gegen Osten und Westen. Die Wasserläufe können hier in dem gut verkarstungsfähigen Unterkreidekalk der Koševnik-Decke abfließen, die an der Idrija-Verwerfungszone ihre geologische Position so ändert, daß die Gesteinsschichten nach Nordwesten einfallen, was dem unterirdischen Wasserlauf zu den Quellen der Idrija entspricht.

Der überwiegende Teil des Wassers fließt aber trotzdem durch die Kalke der unteren Kreide an der Idrija-Verwerfungszone, unter dem Dolomit und unter den anderen Gesteinen der Koševnik-Decke gegen Osten den Quellen der Ljubljana zu. Irgendwo im Bereich des Logaško Polje berühren sich unter dieser Decke Kalke der Koševnik-Decke und die Kalke des Autochthons des Karstplateaus von Logatec. Von diesem Bereich an sind die unterirdischen Wasserläufe zu den Quellen bei Vrhnika hin orientiert. Diese Wasserläufe sind schon durch das Karstwasser des Hrušica-Karstplateaus und durch den Ponorfluß Logaščica verstärkt, so daß sie erfolgreich durch die quer zur Abflußrichtung liegenden Gesteinsschichten der Unterkreide- und Jurakalke und des dazwischenliegenden Dolomits durchfließen können. Auch diese Abflußrichtung

wird durch NE-SW-orientierte Rupturen ermöglicht, an denen jüngere Wasserkanäle mit beschränkter Durchlässigkeit entstanden sind. Diese nimmt erst in der Nähe der Quellen zu, wo die Jurakalkblöcke durch das normale Bruchsystem so stark zerbrochen sind, daß sich eine hydrologische Kommunikation zwischen den Quellen entwickeln konnte.

In den westlichen Quellen der Ljubljana erscheinen auch die Wässer der Ponorbäche Rovtarica und Petkovščica. Nach ihrem Eintritt in die Schwinden fließen beide Bäche zuerst in obertriassischen Kalken der Idrija-Decke, dann aber vermutlich unter dem Nordrand des Logaško Polje, um in selbständigen Wasserläufen die erwähnten Quellen zu erreichen.

Eine genauere hydrogeologische Beschreibung der Ponorbäche bei Rovte bzw. des Gebietes zwischen den Schwinden und den Quellen ist einstweilen unmöglich, vor allem wegen des komplizierten geologischen Baues und wegen der weniger ausgeprägten oberflächlichen und unterirdischen Karstphänomene, die im Karst zwischen Vrhnika, Planina und Cerknica für die Auswertung eine wesentliche Hilfe waren.

Die hydrologische Analyse des Markierungsversuches (Kap. 2. 4. 1.) zeigt, daß sich der gegen Osten abfließende Teil des Ponorwassers des Baches Pikeljščica zweimal schneller bewegt als jener Teil, der gegen Westen gerichtet ist. Das stimmt auf den ersten Blick mit den hydrogeologischen Gegebenheiten nicht überein, ist ja doch gegen die Idrija hin der Unterkreidekalk der Koševnik-Decke bedeutend geschlossener und ausgedehnter als gegen die Ljubljana zu, wo der verkarstete Unterkreidekalk unter den höher gelegenen Decken auskeilt. Deswegen können die verschiedenen Geschwindigkeiten nur so erklärt werden, daß die Wasserkanäle gegen die Idrija weniger durchlässig sind als die Kanäle zur Ljubljana. Die Entwicklung der Kanäle und ihrer Durchlässigkeit ist auf der einen Seite von der Wassermenge, auf der anderen aber auch von den geologischen Bedingungen und von der allgemeinen Orientierung des unterirdischen hydrographischen Netzes abhängig. Geomorphologische Analysen zeigen nämlich, daß sich das oberflächliche und das unterirdische verkarstete Einzugsgebiet der Idrija auf Kosten des Einzugsgebietes der Ljubljana vor allem im Quartär ausbreitete, und es ist daher wahrscheinlich, daß die Wasserwege gegen die Quellen der Idrija jünger sind als jene, die zur Ljubljana führen.

Die hydrogeologischen Probleme der unterirdischen Wasserverbindungen zwischen den Quellen und Schwinden des Einzugsgebietes der Ljubljana betreffen so die Fragen über die paläohydrographische Entwicklung dieses Bereiches im Holozän, Pleistozän und sogar im Pliozän. In dieser Hinsicht sind aber die bisherigen Kenntnisse über die Neotektonik, Speläogenese und Geomorphologie des Karsteinzugsgebietes der Ljubljana noch nicht ausreichend abgeklärt. Der im Jahre 1975 durchgeführte kombinierte Markierungsversuch und die umfangreichen Voruntersuchungen haben aufs neue die Notwendigkeit diesbezüglicher Studien im Bereich des klassischen Karstes aufgezeigt.

3. Die Anwendbarkeit künstlicher Markierungsstoffe in Karstgebieten

Markierungsstoffe (Tracer) müssen folgenden Anforderungen entsprechen:

- a) Tracer müssen im zu markierenden Wasser löslich sein. Wenn sie nur in Suspension angewendet werden können, muß die Sedimentationsgeschwindigkeit möglichst gering sein.
- b) Tracer dürfen im Einzugsbereich des untersuchten Gewässersystems nicht auftreten.
- c) Auf dem unterirdischen Abflußweg darf kein merklicher Verlust (Rückhalt) des Tracers etwa durch Sorption, chemische Reaktionen mit dem Gestein, Ionentausch oder Sedimentation erfolgen.
- d) Durch den Tracer dürfen die hydraulischen Eigenschaften (wie Dichte oder Viskosität) des markierten Wassers nicht derart verändert werden, daß sie eine Änderung der natürlichen Abflußverhältnisse zur Folge haben können.
- e) Die Stabilität der Tracer etwa gegen physikalische, chemische, photochemische oder biologische Einwirkungen muß (allenfalls durch geeignete Maßnahmen) gewährleistet sein.
- f) Die Nachweisbarkeit und Selektivität der Tracer sowie die Reproduzierbarkeit der Meßwerte muß den durch die jeweilige Fragestellung gegebenen Anforderungen entsprechen.
- g) Tracer dürfen in den bei Markierungsversuchen auftretenden Konzentrationen keine toxischen Eigenschaften haben und den Brauchwert des Wassers nicht vermindern.
- h) Tracer und Nachweismethoden müssen eine wirtschaftliche Durchführung von Markierungsversuchen ermöglichen.

Die bei der Planung und Durchführung von Markierungsversuchen besonders zu beachtenden Eigenschaften der derzeit hauptsächlich verwendeten Tracer und die beim Markierungsversuch 1975 im Einzugsbereich der Ljubljana mit den dort angewendeten Tracern gewonnenen Erfahrungen werden in der Folge dargelegt.

3. 1. Fluoreszenztracer (F. BAUER, H. BEHRENS, Martina ZUPAN)

3. 1. 1. Allgemeine Angaben über Fluoreszenztracer

Infolge ihrer guten Tracereigenschaften (hohe Nachweisempfindlichkeit und rasche Nachweisbarkeit mittels Spektralfluorometer) kommt den Fluoreszenztracern bei Markierungsversuchen die größte Bedeutung zu.

Die für die praktische Anwendung wesentlichsten Eigenschaften der derzeit hauptsächlich verwendeten Fluoreszenztracer sind in Tabelle 47 zusammengefaßt.

Tabelle 47

Bezeichnung des Fluoreszenztracers	Löslichkeit 2)	Verluste durch Rückhalt im Untergrund	Nachweisempfindlichkeit in mg/m ³ 5)	Beeinflussung der Messung durch		Störung der Messung durch andere Fluoreszenztracer
				Temperatur	ph-Wert	
Uranin	sehr gut	sehr gering	0,01—0,002	gering	stark	Eosin: stark
Eosin			0,2—0,05			mäßig
Amidorhodamin G (= ARG)	schwer löslich	mäßig	0,2—0,005	extrem gering	gering	Eosin: sehr stark ARB, RFB u. RWT: stark
Amidorhodamin B (= ARB) 1)			0,2—0,05			schließen einander aus
Rhodamin FB (= RFB)	gut löslich	stark	0,05—0,01	stark	gering	
Rhodamin WT (= RWT) 1)		mäßig	0,05—0,01 6)			
Tinopal CBS-X	schwer löslich 4)	mäßig bis stark 8)	0,1—0,01 7)	?		

¹ Beim Markierungsversuch 1975 im Einzugsbereich der Ljubljana nicht verwendet.

² Diese Angaben beziehen sich auf die Lösbarkeit des Tracers in Wasser unter den üblichen Einspeisungsbedingungen und nicht auf die Löslichkeit in chemisch-physikalischem Sinne.

³ In höheren Konzentrationen nur als Suspension, die bei Verdünnung in eine echte Lösung übergeht.

⁴ Bei niedrigen Temperaturen sehr schwer löslich; flockt mit Erdalkalien aus.

⁵ Optimal möglicher Nachweis in reinen natürlichen Wässern. Messung mit PERKIN ELMER Spectrofluorometer 203 bzw. 204 nach der von H. Behrens (1971 u. 1973) beschriebenen Methode. Die Differenz zwischen Anregungs- und Emissionswellenlänge beträgt bei Tinopal 80 nm, bei allen übrigen Messungen 25 nm.

⁶ Bezogen auf Trockensubstanz.

⁷ In destilliertem Wasser noch unter 0,01 mg/m³.

⁸ Ausfällung stark konzentrierter Lösungen durch Erdalkalien; spätere Remobilisierung möglich (es liegen noch wenige Erfahrungen vor).

Die dort angegebenen Nachweisempfindlichkeiten beziehen sich auf das alleinige Auftreten des jeweiligen Fluoreszenztracers in reinen natürlichen Wässern ohne Störung ihrer spektralfluorometrischen Nachweisbarkeit durch andere Fluoreszenztracer. Treten einander in der Nachweisbarkeit störende Fluoreszenztracer gleichzeitig im Gewässer auf, dann kann durch (zum Teil aufwendige) Trennverfahren in vielen Fällen auch hier eine quantitative Bestimmung der einzelnen Fluoreszenztracer ermöglicht werden.

Mit Ausnahme des Tinopals, dessen Nachweis durch Fluoreszenzen in natürlichen Wässern auftretender organischer Stoffe gestört wird, wird die Messung der übrigen hier erwähnten Fluoreszenztracer in der Regel durch keine natürlichen Fremdfloreszenzen beeinträchtigt.

Ein wesentlicher Vorteil der Fluoreszenztracer besteht darin, daß infolge der guten Nachweisbarkeit meist nur geringe Mengen eingespeist werden müssen, durch die die Dichte des Wassers im unterirdischen Abflußsystem nicht wesentlich verändert wird. Eine Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des markierten Wassers ist daher nur im nächsten Bereich der Einspeisungsstelle selbst zu erwarten, und dies auch nur dann, wenn die Durchflußmenge des markierten Wassers an der Einspeisungsstelle gering ist.

Nicht alle Fluoreszenztracer werden von den Erzeugerfirmen als reine Trokensubstanz geliefert. So enthält Amidorhodamin G (Farbwerke Hoechst) 15 bis 20% Dextrin. Das handelsübliche Amidorhodamin B „konz.“ (Farbwerke Hoechst) enthält Verunreinigungen, die eine dem Amidorhodamin G entsprechende Fluoreszenz aufweisen. (Das derzeit nicht lieferbare Amidorhodamin B „extra“ führt diese Verunreinigungen nicht.) Rhodamin WT (Du Pont de Nemours) wird in 20%iger wässriger Lösung geliefert.

Von wesentlicher Bedeutung für ihre Verwendbarkeit ist die Stabilität der in Lösung befindlichen Fluoreszenztracer. So unterliegt Uranin einer Zerstörung durch photochemische Prozesse (Einfluß von UV-Licht bzw. des kurzwelligen Anteiles des Tageslichtes) und durch Oxydationsmittel (Ozon, Chlor). In verunreinigten Proben wurden Uraninverluste festgestellt, die möglicherweise auf biologische Prozesse zurückzuführen sind. Von Eosin liegen noch wenig Erfahrungen vor, doch ist es photochemisch empfindlicher als Uranin. Amidorhodamin G und Amidorhodamin B sind photochemisch mäßig empfindlich und gegen Oxydationsmittel sowie biologische Einwirkungen gering empfindlich. Rhodamin FB und Rhodamin WT sind photochemisch und gegen Oxydationsmittel (und anscheinend auch gegen biologische Einwirkungen) gering empfindlich. Tinopal CBS-X unterliegt in PAE-Flaschen z. T. nicht unbedeutenden Adsorptionsverlusten. (Weitere Erfahrungen liegen von Tinopal nicht vor.)

Infolge der hohen Nachweisempfindlichkeit der Fluoreszenztracer können diese bei der Eingabe so dosiert werden, daß in den Quellwässern nur selten (und dann nur kurzfristig) Maximalkonzentrationen von 100 mg/m^3 zu erwarten sind. Die Durchschnittskonzentrationen liegen bei sachgemäßer Versuchsdurchführung meist um 1 mg/m^3 und darunter. Dies ist für die Abschätzung der hygienischen Unbedenklichkeit von wesentlicher Bedeutung. So werden z. B. in der Augenheilkunde zu diagnostischen Zwecken 3 bis 5 ml einer 20%igen Uraninlösung intravenös oder ins Bindehautnetz verabreicht. Bei dieser Applikationsart und Dosierung konnte gelegentlich das Eintreten einer kurzfristigen Übelkeit, sonst aber keinerlei Nachwirkung oder Nebenerscheinung beobachtet werden. Um die gleiche Menge Uranin über Trinkwasser zu inkorporieren, müßte eine Person 10.000 Liter Wasser mit einem Uraningehalt von 100 mg/m^3 (= kurzfristige Maximalkonzentration bei Markierungsversuchen!) trinken.

Die größten Erfahrungen liegen bisher vom Fluoreszenzfarbstoff Uranin vor, der nach wie vor als der empfindlichste und am allgemeinsten anwendbare Markierungsstoff überhaupt anzusehen ist.

Die quantitative Bestimmung der Fluoreszenztracer erfolgt durch spektrofluorometrische Direktmessung der Wasserproben, wobei die von H. BEHRENS (1971 und 1973) beschriebene Methode die besten Ergebnisse liefert. Darüber hinaus können Fluoreszenztracer mit hoher Nachweisempfindlichkeit durch Adsorption an Aktivkohle und nachfolgende Extraktion in den gewonnenen Extrakten nachgewiesen werden, doch gibt die Aktivkohlemethode derzeit nur qualitative Ergebnisse und allenfalls höchstens halbquantitative Hinweise auf den Gang des Traceraustrittes im beobachteten Gewässer. Der Vorteil der Aktivkohlemethode besteht darin, daß die im Gewässer auftretenden Fluoreszenztracer von der in ihm mehrstündig bis mehrtägig exponierten Aktivkohle aufgenommen werden und dann in deren Extrakten nachgewiesen werden können, womit ein qualitativer Nachweis eines Traceraustrittes auch ohne kontinuierliche Entnahme von Wasserproben möglich ist. (F. BAUER 1967 und 1972, W. PERLEGA 1976).

3. 1. 2. Erfahrungen mit Fluoreszenztracern beim Markierungsversuch 1975 im Einzugsbereich der Ljubljana

Im Einzugsbereich der Ljubljana waren die Fluoreszenztracer Uranin, Eosin, Amidorhodamin G, Rhodamin FB und Tinopal CBS-X eingespeist worden.

Die Messungen der Tracerkonzentrationen in den Quellwässern wurden an gleichzeitig entnommenen Proben durch das Institut für Radiohydrometrie in München und das Labor in Vrhnika mit im wesentlichen gleichartiger Meßtechnik und Meßempfindlichkeit durchgeführt. Wo bei Auftreten von Farbstoffgemischen in den Quellwässern eine Probenvorbehandlung nötig war, wurden von beiden Labors unterschiedliche Methoden zur Trennung der Farbstoffe angewendet, was in solchen Fällen die von den beiden Labors gemessenen unterschiedlich hohen Konzentrationswerte zur Folge gehabt haben kann. Zum Teil könnten unterschiedlich hohe Meßwerte auch darauf zurückzuführen sein, daß infolge der Probenversanddauer die gleichen Proben in München erst zu einem späteren Zeitpunkt als in Vrhnika gemessen werden konnten. (Siehe auch Abschnitte 2. 3. 4. 1. 3. und 2. 3. 4. 1. 4.).

Die in den Quellen ausgebrachten Tracermengen wurden einerseits aus den in München und in Vrhnika gemessenen Konzentrationen der Gesamtabflüsse der einzelnen Quellgruppen berechnet. Daß die aus den Gesamtabflüssen errechneten Ausbringungswerte zum Teil nicht mit den aus den Quellmeßwerten berechneten Werten übereinstimmen, mag in der unterschiedlichen Qualität der einzelnen Abflußmeßstellen begründet sein.

Uranin und **Rhodamin FB** sind in zwei Schwinden eingespeist worden, von denen ein starker Abflußweg mit 5 bis 10 m³/s zu einer breiten Reihe von Quellen mit einem Gesamtabfluß von 30 m³/s anzunehmen war. Die Entfernung von den Schwinden zu den Quellen betrug 10 bis 20 km, das Gefälle 20 bis 30‰. Die ausgebrachte Uraninmenge wurde aus den Quellwassermengen mit 68% (München) bzw. 77% (Vrhnika) berechnet. (Bezüglich der in einzelnen Proben festgestellten Uraninverluste wird auf Abschnitt 2. 3. 4. 1. 4. verwiesen.) Aus den in Vrhnika gemessenen Konzentrationen der Gesamtabflüsse der Quellgruppen wurde die Ausbringung mit 86% berechnet.

Eosin und **Amidorhodamin G** wurden in die zwei von derselben Quellgruppe verschieden weit entfernten Ponore der Bäche Hotenka (13 km) und Logaštica (7 km) eingespeist, woraus die Austritte in der Quellgruppe zu verschiedenen Zeitpunkten zu erwarten gewesen wären. Aus ungeklärten hydrologischen Gründen sind jedoch beide Tracer gleichzeitig in den Quellen zum Austritt gelangt (zum Teil zusammen mit Uranin und Rhodamin FB). Da die Messung von Eosin und Amidorhodamin G in Gemischen mit bedeutenden Schwierigkeiten verbunden ist und von den Labors in München und Vrhnika verschiedene Trennmethoden zum Nachweis angewendet worden sind, unterscheiden sich die von den beiden Stellen gemessenen Eosinkonzentrationen erheblich, während die Werte des Amidorhodamin G besser übereinstimmen. Demnach wurde die Ausbringungsmenge des Eosins mit 37% (München) bzw. 82% (Vrhnika) errechnet. Die Ausbringungsmenge des Amidorhodamin G konnte nur für die Ljubljaniqa-Quellen mit 11,5% (München) bzw. 18% (Vrhnika) bestimmt werden, da von den Quellen des Idrijca-Flusses (wo ebenfalls Amidorhodamin G austrat) keine Abflußwerte vorliegen.

Tinopal CBS-X wurde im dinarischen Karst zum erstenmal als Tracer eingesetzt. Da sich dieser Tracer im Anregungs- und auch im Emissionsspektrum deutlich von anderen Fluoreszenztracern unterscheidet, wird er durch diese in seiner Nachweisbarkeit nicht beeinträchtigt. Die in reinen Wässern an und für sich hohe Nachweisempfindlichkeit wurde jedoch bei diesem Markierungsversuch durch die im Einzugsbereich der Quellen von Haushalten und Industrie anfallenden starken Verunreinigungen, die gleiche oder ähnliche Fluoreszenzeigenschaften wie Tinopal zeigen, bedeutend vermindert. Als Nachteil des Tinopals hat sich auch seine geringe Löslichkeit in harten Karstwässern erwiesen: Das ungelöst sedimentierte oder von Kalkfels adsorbierte Tinopal kann später (vor allem durch Hochwässer) mobilisiert und den Quellen (etwa in Form eines zweiten Durchganges) zugeführt werden, wodurch die an den Quellen festgestellten Durchgangskurven an hydrologischem Aussagewert verlieren. Aus den ausschließlich vom Labor in Vrhnika gemessenen Konzentrationswerten konnte allein für den Primärdurchgang eine Ausbringung von 51% (Quellmeßwerte) bzw. 53% (Quellgruppenmeßwerte) errechnet werden. Für den gesamten Beobachtungszeitraum ergab sich eine Ausbringung von 102% (Quellmeßwerte) bzw. 92% (Quellgruppenmeßwerte). Diese zweifellos zu hohen Werte zeigen, daß eine quantitative hydrologische Interpretation der unter diesen Versuchsbedingungen gemessenen Tinopalwerte nicht möglich ist.

3. 2. Salze (Martina ZUPAN)

Verschiedene Salze werden schon lange für die Verfolgung der Karstwässer und des Porengrundwassers verwendet. G. TIMEUS (1911, 1924) hat im Jahre 1907 die Flüsse Notranjska Reka (Timavo) und Vipava mit Lithium-, Caesium- und Strontium-Chlorid erfolgreich, dagegen die unterirdische Pivka ohne Erfolg mit Lithium-Chlorid verfolgt (A. ŠERKO 1946).

G. KYRLE (1928) hatte keinen Erfolg mit Natrium-Chlorid im alpinen Karst, während andererseits sowohl Natrium-Chlorid (NaCl) als auch Kaliumchlorid (KCl) häufig mit Erfolg eingesetzt wurden (vgl. V. MAURIN & J. ZÖTL 1959, H. BATSCHKE et al. 1967, W. KÄSS 1972). Ein wesentlicher Fortschritt in der Vervollkommnung dieser Markierungsmethode ist bei den kombinierten Feldversuchen im Jahre 1966 in der Umgebung von Graz und im Jahre 1969 bei der

Donauversickerung (W. Käss 1972) erreicht worden. Die Salze wurden mit Erfolg als Markierungsmittel auch beim Porengrundwasser verwendet (W. Käss 1967, 1972 a), was auch der erfolgreiche Versuch im Quartär bei Celje im Jahre 1973 bestätigt hat (siehe Kapitel B).

Die bisherigen Erfahrungen haben sowohl die Vorzüge als auch die Nachteile der Salze als Markierungsmittel aufgezeigt. Zur umfangreichen Kenntnis über diese Problematik wollen wir noch unsere Erkenntnisse über die Markierungsmittel Kalium- und Lithiumchlorid, zu denen wir beim kombinierten Markierungsversuch im Karstgebiet der Ljubljana gekommen sind, hinzufügen.

Der wesentliche Unterschied zwischen KCl bzw. NaCl und LiCl besteht in der Methode deren Bestimmung. Im Kalium- und Natriumchlorid wird Kalium und Natrium mit dem Flammenphotometer, Chlorid aber volumetrisch bestimmt. Die Analysen sind gegen Bestimmungen anderer selektiv. Die Genauigkeit der Analysen für Na^+ , K^+ und Cl^- beträgt 0,1 mg/l. Die analytischen Methoden sind einfach, sie können auch in weniger gut ausgestatteten Laboratorien ausgeführt werden. Die Genauigkeit der Analysen und die Nachweisgrenzen sind hinreichend, da infolge des gewöhnlich hohen natürlichen Hintergrundes an Na^+ , K^+ und Cl^- hohe maximale Konzentrationen der Markierungsmittel in den Quellen notwendig sind (in unseren Karstgewässern muß man mit wenigstens 30 mg KCl bzw. NaCl pro Liter Wasser rechnen). Zum hohen natürlichen Hintergrund kommen noch die erheblichen Schwankungen im Laufe des Tages hinzu, so daß eine genaue Grenze zwischen der Konzentration des Markierungsmittels und dem natürlichen Hintergrund im Quellenwasser nicht bestimmt werden kann. Eine Folge dieses Umstandes sind Fehler bei der Berechnung der gesamten wiederausgebrachten Tracermenge und bei der Berechnung des Verhältnisses der wiederausgebrachten Tracer zwischen einzelnen Quellen (je größer die Schwankungen des Hintergrundes in den einzelnen Quellen sind, um so größer können auch die Fehler sein).

Die Auflösbarkeit des KCl und NaCl ist gut. Da aber für das Einspeisen große Mengen von Salz (einige Tonnen) notwendig sind, müssen beim Ponor auch große Wassermengen zur Verfügung stehen (für eine Tonne Salz wenigstens 50 m³ Wasser). Die Konzentrationen beim Ponor erreichen solche Werte, daß einige physikalische Eigenschaften des Wassers (Dichte, Viskosität) verändert werden. Dadurch werden im Wasser des Ponors alle lebendigen Lebewesen und Organismen gefährdet, das biologische Gleichgewicht ist gestört.

Bei der Quelle sind die Konzentrationen des NaCl oder KCl so niedrig, daß die Toxizität für die Lebewesen im Wasser und für den Menschen gleich null ist. Na- und K-Salze sind im Quellwasser nicht sichtbar, die Stabilität des Na^+ , K^+ und Cl^- in den entnommenen Wasserproben ist aber gut.

Lithiumchlorid als Markierungsmittel besitzt im Vergleich zu NaCl und KCl bessere Eigenschaften, da es mit empfindlicheren analytischen Methoden leicht bestimmt werden kann und weil unsere Karstgewässer nur solche Mengen an natürlichem Lithium besitzen, die unterhalb der Nachweisgrenze der angewandten analytischen Methode liegen. Lithium wird mit Instrumenten zur Messung der Atomabsorption nach dem Emissionsprinzip mit der Detektionsgrenze von 1 µg/l und der Genauigkeit von 0,1 bis 0,2 µg/l gemessen (dieses Instrument besitzt eine viel empfindlichere Optik als die Flammenphotometer). Die Bestimmung des Lithiums nach dieser Methode ist selektiv.

Für die Einspeisung werden bei gleicher Wassermenge (Verdünnung) ungefähr 150mal geringere Mengen LiCl als KCl benötigt. Im Wasser des Ponors werden praktisch weder die Eigenschaften des Wassers noch das biologische

Gleichgewicht verändert (bei der Einspeisung von 100 kg LiCl in den Ponor mit einem Durchfluß von 1 m³/s und der Einspeisungsdauer von 15 Minuten beträgt die durchschnittliche Konzentration des LiCl 0,11 g/l). LiCl ist noch etwas besser löslich als NaCl und KCl und ist nicht toxisch. In der pharmazeutischen Industrie wird LiCl für die Zubereitung von Beruhigungsmitteln verwendet, so daß jede Gefahr einer Gesundheitsschädigung wegen der so geringen Konzentrationen, die in den Quellen benötigt werden, entfällt. Auch LiCl ist in den Quellen nicht sichtbar, in den Wasserproben aber stabil. Wie für alle Alkali-metalle ist ein starker Ionenaustausch mit Erdalkalien charakteristisch.

Die jetzigen Anschaffungspreise in Jugoslawien für die behandelten Salze sind folgende:

1,5 t KCl	ca. 3000 Din.	} inklusive Transport zum Ponor
1,5 t NaCl	2400 Din.	
10 kg LiCl	1500 Din.	

Der Preis der Analyse K⁺ bzw. Na⁺ und Cl⁻ beträgt ca. 30 Din., Li⁺ ca. 50 Din.

Wesentliche Unterschiede in den Kosten zwischen den Salzen sind eigentlich nicht vorhanden, doch sind die Resultate mit Lithiumchlorid unvergleichlich besser als die mit Kalium- oder Natriumchlorid festgestellten. Allerdings ist beim LiCl die analytische Methode instrumental anspruchsvoller.

H. BEHRENS gibt für die Beurteilung der Tracereigenschaften von LiCl folgende Zusammenfassung:

- Löslichkeit:** Sehr gut.
- Untergrund:** Relativ gering, jedoch nicht vernachlässigbar.
- Rückhaltung:** In Karst und Oberflächengewässern relativ gering. Bei Filtration durch Lockergesteine ist jedoch beträchtlicher Rückhalt zu erwarten.
- Veränderung der hydraulischen Eigenschaften:** Relativ gering, wenn bei der Einspeisung ausreichende Verdünnung vorgenommen werden kann.
- Stabilität in Proben:** Sehr gut.
- Nachweis:** Die Nachweisgrenze kann bis zu ca. 1 mg/m³ herabgesetzt werden. Der Nachweis erfolgt sehr selektiv. Von Konzentrationen ab 5 bis 10 mg/m³ kann eine gute Meßgenauigkeit erzielt werden.
- Toxizität:** Im üblichen Konzentrationsbereich keine.
- Kosten:** Die Tracerkosten erscheinen meist zunächst gering; jedoch muß berücksichtigt werden, daß z. B. 100 kg Lithium-Chlorid nur 16,37 kg Lithium enthalten. Der Nachweis erfordert mäßig teure Ausstattungen und ist personell nicht zu aufwendig.

Gesamtbeurteilung:

Lithium ist ein brauchbarer Tracer für Anwendungen, in denen keine zu großen Wasservolumina markiert werden müssen, vorausgesetzt, daß keine chemische Beeinträchtigung eintritt (Adsorption etc.).

Unter den Bedingungen des Markierungsversuches 1975 im Gebiet der Ljubljana brachte der Nachweis Schwierigkeiten mit sich, weil die Tracermenge für das markierte Wasservolumen und im Hinblick auf den Lithium-Untergrund zu gering war. Eine ausreichende Lithium-Tracermenge wäre aber außerordentlich kostenaufwendig gewesen, wie ein Vergleich z. B. mit Fluoreszenztracern zeigt:

	Lithium	Uranin
Nachweisgrenze	1 mg/m ³	0,01 mg/m ³
Untergrund	ca. 0,3 mg/m ³	< 0,001 mg/m ³
Preis	ca. 60 DM/kg	ca. 60 DM/kg

Zur sicheren Markierung muß also kostenmäßig bei Lithium ein ca. um zwei Größenordnungen höherer Aufwand betrieben werden als bei der Markierung mit Uranin.

3. 3. Durch Radioaktivitätsmessung nachweisbare Stoffe (H. BEHRENS)

Diese Gruppe umfaßt:

- Tracer, die bereits als radioaktive Stoffe eingespeist werden („radioaktive“ Tracer).
- Tracer, die als inaktive Stoffe eingespeist werden und erst nachträglich an entnommenen Proben durch Kernumwandlungen, vorzugsweise durch Bestrahlung mit Neutronen, in radioaktive Stoffe überführt werden („aktivierungsanalytische“ Tracer).

Beiden Tracerarten ist gemeinsam:

- die Nachweisempfindlichkeiten sind sehr hoch, so daß relativ kleine Substanzmengen mit entsprechend geringer Beeinflussung der hydraulischen Verhältnisse des Grundwassersystems einzuspeisen sind,
- als chemische Verbindungen, die keine störenden Wechselwirkungen mit dem Grundwasserleiter oder mit dem hydrochemischen Milieu zeigen, kommen neben den einfachen Anionen (z. B. Bromid) anionische Komplexe von Metallen, insbesondere EDTA-Komplexe, zum Einsatz,
- während die Kosten für die Tracer im allgemeinen relativ niedrig sind, erfordert der exakte Nachweis aufwendige Meßeinrichtungen und spezialisiertes Personal sowie im Falle der aktivierungsanalytischen Tracer Möglichkeiten zur Aktivierung, z. B. an einem Forschungsreaktor. Daher erfolgt die Anwendung dieser Tracer zweckmäßig in Zusammenarbeit mit entsprechend ausgestatteten Instituten.

3. 3. 1. Radioaktive Tracer

Die Anwendbarkeit dieser Tracer wird vor allem durch Strahlenschutzrück-sichten (maximal handhabbare Aktivitäten bei der Einspeisung, maximal zulässige Konzentrationen nach der Verdünnung im Grundwasser) und durch die Berücksichtigung physikalischer Gesichtspunkte (Strahlungsart, Halbwertszeit) sowie der chemischen Eigenschaften bestimmt. Allgemein werden γ -Strahler wegen des aus großvolumigen Proben möglichen Nachweises bevorzugt.

Die Genauigkeit des Nachweises radioaktiver Tracer kann bei der Registrierung einer ausreichenden Anzahl von Zerfällen sehr hoch sein. In der Praxis ist sie durch die starke Verdünnung der Tracer, durch den immer vorhandenen unspezifischen Radioaktivitäts-Background und die begrenzten Meßzeiten pro Probe meist limitiert.

Durch geeignete Anreicherung mittels Adsorptions-, Fäll-, Eindampf- u. ä. Verfahren kann eine Verbesserung der Nachweisempfindlichkeit erzielt werden und gegebenenfalls gleichzeitig auch eine Abtrennung von störenden Radionukliden bewirkt werden (H. BEHRENS, 1967; J. MOLINARI & J. GUIZERIX, 1967).

Die chemische Toxizität der radioaktiven Tracer ist, soweit sie überhaupt als Giftstoffe anzusprechen sind, relativ gering, da die verwendeten Substanzmengen klein sind und durch die im Grundwasserstrom eintretende Verdünnung außerordentlich niedrige Konzentrationen erreicht werden. Hingegen muß die

Tabelle 48: Gebräuchliche radioaktive Tracer zur Grundwassermarkierung.

Radio-nuklid	Halbwertszeit	gemessene Strahlung			Chemische Verbindung des Tracers	Maximal zulässige Konzentration in Abwasser (uCi/ml)	Anwendungsbeispiele
		Art	Energie	Zerfallsanteil			
³ H	12,35 a	β	0,018 MeV (max)	100 %	³ H ₂ O (Wasser)	3 · 10 ⁻²	D. J. BURDON et al. (1963)
⁵¹ Cr	27,8 d	γ	0,320 MeV	9 %	EDTA-Komplex	2 · 10 ⁻³	G. KNUTSON et al. (1963) G. KNUTSON (1967)
⁵⁸ Co	71 d	γ	0,810 MeV	99,5%	Co (CN) ₆ ³⁻ Co (CN) ₆ ²⁻	9 · 10 ⁻⁴ 3 · 10 ⁻⁴	E. HALEVY & A. NIR (1962)
⁶⁰ Co	5,26 a	γ	1,332 MeV	100 %			
⁸² Br	35,6 h	γ	1,173 MeV	100 %	Br- (Bromid)	4 · 10 ⁻⁴	
		γ	1,475 MeV	17 %			
		γ	0,777 MeV	83 %			
		γ	0,619 MeV	41 %			
¹³¹ I	8,05 d	γ	0,554 MeV	66 %	I- (Jodid)	1 · 10 ⁻³	D. B. SMITH & W. E. CLARK (1963) H. BATSCHKE et al. (1967)
		γ	0,364 MeV	82 %			

Tabelle 49: Aktivierungsanalytische Tracer zur Grundwassermarkierung.

Tracer-Element	Chemische Verbindung	Aktivierungsprodukt	Halbwertszeit	gemessene γ-Strahlung	Anwendungsbeispiele
Brom	Bromid (Br-)	Brom-80	17,6 min	0,618 MeV	K. BUCHTELA et al. (1964)
Indium	EDTA-Komplex	Indium-116 m	54 min	0,416 MeV	K. BUCHTELA (1970) K. BUCHTELA & C. JOB (1970)
Mangan	EDTA-Komplex	Mangan-56	2,57 h	0,845 MeV	H. BATSCHKE et al. (1967)
Lanthan	EDTA-Komplex	Lanthan-140	40,2 h	1,597 MeV	H. BATSCHKE et al. (1970)

Radiotoxizität beachtet werden. Als Beurteilungsgrundlage können die für Abwasser geltenden maximal zulässigen Konzentrationen, z. B. der Euratom-Norm (s. Tabelle 48), herangezogen werden; 1/30 dieser Konzentrationen gilt nach gegenwärtigen Strahlenschutzkenntnissen als zulässig für Trinkwasser.

Ein Überblick über gebräuchliche radioaktive Tracer zur Grundwassermarkierung wird in Tabelle 48 gegeben.

Tritium nimmt unter den radioaktiven Tracern eine Sonderstellung ein, da es als tritiiertes Wasser (^3HHO) chemisch identisch mit dem zu markierenden Grundwasser ist und so optimal dessen Fließvorgänge repräsentiert. Sein Nachweis weicht von den übrigen gebräuchlichen radioaktiven Tracern insofern ab, als er über die Messung der niederenergetischen β -Strahlung erfolgen muß (W. RAUERT 1971). Allerdings kann die Verwendung des Tritiums als hydrologischer Tracer nur mit Einschränkungen und größter Vorsicht erfolgen, damit nicht die Aussagemöglichkeiten des natürlichen Tritiumgehaltes (einschließlich des Bombentritiums) im Wasserkreislauf beeinträchtigt werden.

Chrom-51 in der chemischen Form als EDTA-Komplex hat in zahlreichen Anwendungen im Grundwasser sehr gute Tracereigenschaften gezeigt. Wesentliche Adsorptionsvorgänge, die zur Verfälschung der Meßergebnisse führen würden, wurden bisher nicht beobachtet. Die chemische Stabilität des EDTA-Komplexes ist nach allen bisherigen Beobachtungen sehr gut; auch bei längerer Aufbewahrung von Proben konnte keine nachteilige Zersetzung beobachtet werden.

Die Tatsache, daß nur bei 9% der Zerfälle des Chrom-51 das zur Messung herangezogene γ -Quant von 0,320 MeV ausgesendet wird, ist nicht als prinzipieller Nachteil anzusehen; die Berücksichtigung dieser Tatsache kommt in der relativ hohen maximal zulässigen Konzentration im Abwasser zum Ausdruck.

Kobalt-58 und **Kobalt-60** als Hexacyano-Komplexe besitzen ebenfalls gute Tracereigenschaften mit geringer Tendenz zur Adsorption. Insbesondere Kobalt-60 kann aufgrund seiner relativ großen Halbwertszeit für Untersuchungen herangezogen werden, die sich über längere Zeiträume erstrecken.

Brom-82 besitzt in der Form des Bromids (Br^-) als einfaches und chemisch sehr stabiles Anion ausgezeichnete Tracereigenschaften. Die kurze Halbwertszeit gestattet allerdings nur rasch ablaufende Untersuchungen. Andererseits ist dadurch aber auch die wiederholte Anwendung in einem Versuchsgebiet möglich, da der Tracer durch den radioaktiven Zerfall von selbst verschwindet.

Jod-131, das bisher in zahlreichen Anwendungen als Jodid (J^-) eingesetzt wurde, hat widersprüchliche Tracerqualitäten gezeigt. Während in vielen Fällen das Tracerverhalten auf Grund der Versuchsergebnisse repräsentativ für die Fließvorgänge des Wassers war, traten andererseits (H. BATSCHKE 1967) unerklärliche Tracerverluste auf. Offenbar spielt das labile Redox-Verhalten des Jods hierbei eine Rolle. Aus diesem Grunde und auch wegen der relativ hohen Radiotoxizität des Jod-131 kann es als radioaktiver Tracer nicht uneingeschränkt empfohlen werden und wurde deshalb auch im Markierungsversuch 1975 im Gebiet der Ljubljana nicht verwendet.

3. 3. 2. Aktivierungsanalytische Tracer

Für die sinnvolle Verwendbarkeit chemischer Elemente in dieser Tracergruppe ist ein möglichst geringer Untergrund im untersuchten System ausschlaggebend. Dabei muß berücksichtigt werden, daß das zum Nachweis heran-

gezogene Radionuklid auch aus einem anderen als dem eigentlichen Tracerelement gebildet werden kann, wie das folgende Beispiel zeigt: Lanthan als aktivierungsanalytischer Tracer wird durch Aktivierung zum Lanthan-140 nachgewiesen. Bei der Bestrahlung der Proben im Kernreaktor wird aus Uranspuren, die in den meisten Wässern enthalten sind, durch Kernspaltung ebenfalls Lanthan-140 gebildet (J. SCHMITZ et al. 1972).

In der Praxis geht der Bestrahlung (z. B. im Kernreaktor) gewöhnlich eine Abtrennung der Wasserinhaltsstoffe durch Eindampfen, Ausfällen, Ionenaustausch u. a. vom Wasser selbst voran. Auch nach der Bestrahlung können radiochemische Trennungen erforderlich sein, um die Messung störende Radionuklide (z. B. Natrium-24 oder Chlor-38), die aus Hauptinhaltsstoffen der Wasserprobe gebildet wurden, abzutrennen (J. SCHNEIDER & R. GEISLER 1973).

Eine wesentliche Bedeutung für den Nachweis aktivierungsanalytischer Tracer hat die hoch auflösende γ -Spektrometrie mit Ge(Li)-Halbleiterdetektoren gewonnen. Hierdurch können die erforderlichen chemischen Abtrennungsarbeiten auf ein Minimum reduziert werden. Die im Prinzip hohe Meßgenauigkeit der Radioaktivitätsmessungen kommt bei der Aktivierungsanalyse nicht zur Geltung, da durch den Anschluß an ebenfalls zu bestrahlende Standards Meßfehler von ca. $\pm 5\%$ kaum zu unterschreiten sind.

Ein Überblick über bisher im Grundwasser eingesetzte aktivierungsanalytische Tracer wird in Tabelle 49 gegeben.

Brom wird auch für den aktivierungsanalytischen Nachweis als Bromid eingesetzt, womit die günstigen Tracereigenschaften gültig bleiben. Da Brom kein ausgesprochenes Spurenelement ist, muß der Background beachtet werden und eine ausreichend hohe Dosierung gewählt werden, damit eindeutig über den Nullwerten liegende Meßwerte gewährleistet sind. Die Kosten für diesen Tracer liegen sehr niedrig. Es bestehen keine Bedenken gegen den Einsatz dieses Tracers aus toxikologischer Sicht. Der Tracer ist im Grundwasser und in entnommenen Proben praktisch unbegrenzt stabil.

Der **Indium-EDTA-Komplex** besitzt ähnlich gute Tracereigenschaften wie der Chrom-EDTA-Komplex. Als ausgesprochenes Spurenelement weist Indium außerordentlich niedrige Nullwerte auf, die normalerweise unter den Nachweiskontrollen für die Meßbedingungen bei Tracerexperimenten liegen. Indium ist zwar ein mäßig giftiges Element, jedoch sind die für Tracerexperimente notwendigen Mengen so klein, daß nach der Verdünnung im Grundwasser bei zweckmäßiger Versuchsdurchführung keine gesundheitlich bedenklichen Konzentrationen auftreten können.

Der **Mangan-EDTA-Komplex** und der **Lanthan-EDTA-Komplex** zeigten bei den bisherigen Anwendungen kein eindeutig befriedigendes Tracerverhalten. Wahrscheinlich trat bei beiden Tracern Adsorption an Feststoffen ein. Möglicherweise sind die EDTA-Komplexe dieser beiden Elemente nicht ausreichend stabil, um eine allmähliche Dissoziation der Komplexe und Verluste der Tracerelemente auszuschließen. Die deutlichen Unterschiede ihrer Komplexbeständigkeitskonstanten zu denen der „vollkommenen“ Tracer Chrom-EDTA und Indium-EDTA geben darauf einen Hinweis:

$$\text{Chrom-EDTA: } K_D = 10^{24}$$

$$\text{Indium-EDTA: } K_D = 10^{25}$$

$$\text{Mangan-EDTA: } K_D = 10^{14}$$

$$\text{Lanthan-EDTA: } K_D = 10^{15}$$

3. 3. 3. Erfahrungen mit durch Radioaktivitätsnachweis festgestellten Tracern beim Markierungsversuch 1975 im Einzugsbereich der Ljubljana

Die mit dem **Chrom-51-EDTA-Tracer** erhaltenen Ergebnisse bestätigten erneut die guten Tracereigenschaften dieses Markierungsstoffes. Allerdings war die Aussagekraft der Meßergebnisse durch die Beschränkung der Einspeisungsmenge auf 3 Ci begrenzt. Aus dieser Tracermenge und der erreichten Nachweisgrenze von 100 pCi/l ergibt sich ein Verhältnis von $3 \cdot 10^{10}$, das auf den Fluoreszenztracer Uranin mit der Nachweisgrenze von 10^{-8} g/l übertragen einen Vergleich ermöglicht. Danach wären mit 300 g dieses Fluoreszenztracers vergleichbare Ergebnisse erhältlich gewesen wie mit 3 Ci Chrom-51.

In der Quelle 1. 36 wurde der Chrom-51-Nachweis durch den relativ hohen Gehalt an Radon (mit seinen Folgeprodukten Blei-214 und Wismut-214) gestört. Eine solche Beeinträchtigung ließe sich jedoch durch eine entsprechende Wartezeit zwischen Probenahme und Messung ausschalten, da die Halbwertszeiten ($T_{1/2}$ für Chrom-51: 27,8 Tage; $T_{1/2}$ für Radon: 3,8 Tage) sich genügend unterscheiden, um ein Abklingen des Radons ohne allzu hohe (und berechenbare) Chrom-51-Verluste zu gestatten.

Die Preise für den Chrom-51-EDTA-Tracer im Handel liegen sehr hoch. Die Kosten für den Tracer lassen sich aber beträchtlich herabsetzen, wenn er vom Anwender selbst präpariert wird (Arbeitsvorschrift bei G. KNUTSON 1967).

Das für diesen Markierungsversuch konzipierte Abtrennverfahren für **Indium** aus den Wasserproben durch Mitfällung an Wismuthydroxid hat sich bewährt. Es konnten so geometrisch gut reproduzierbare Bestrahlungspräparate unter gleichzeitiger Ausschaltung der Hauptstörelemente Natrium und Chlor gewonnen werden.

Mit der erreichten Nachweisgrenze von ca. 0,1 ng in Proben von 100 ml hätte anstelle der eingespeisten Indiummenge von ca. 400 g eine Uraninmenge von 4000 g zur Erzielung der gleichen relativen Nachweisempfindlichkeit verwendet werden müssen.

Somit liegen auch die reinen Tracerkosten für den Indium-EDTA-Tracer in der gleichen Größenordnung wie die Kosten für die Fluoreszenztracer. Der Kostenvergleich fällt allerdings für den aktivierungsanalytischen Tracer wesentlich ungünstiger aus, wenn der Aufwand für den Nachweis (Geräte und Arbeitszeit) mit einbezogen wird.

Aus Gründen der Arbeitskapazität konnten daher auch die Indium-Bestimmungen vom Institut für Radiohydrometrie nur mit großer zeitlicher Verzögerung vorgenommen werden.

Die eingesetzten radioanalytischen Tracer zeigten als EDTA-Komplexe ein gutes Tracerverhalten im Grundwassersystem. Jedoch macht der Vergleich mit den Fluoreszenztracern anschaulich, daß die Verwendung von radioaktiven Tracern und erst recht von aktivierungsanalytischen Tracern beim gegenwärtigen Stand der Nachweistchnik nur dann sinnvoll erscheint, wenn die Palette anderer effektiver Tracer bereits ausgeschöpft ist oder wenn andere, ganz spezielle Gesichtspunkte für den Einsatz der radioanalytischen Tracer sprechen.

3. 4. Triftstoffe (V. MAURIN und J. G. ZÖTL)

Von den in der Vergangenheit für Grundwassermarkierungen verwendeten Triftkörpern (Korkschnitzel, Sporen, Pilze, Bakterien, Viren u. dgl.) konnten sich in der Praxis nur wenige durchsetzen. Gefärbte Bärlappsporen (*Lycopodium clavatum*) haben sich bisher in zahlreichen Großversuchen bewährt (J. ZÖTL 1957, F. BAUER et al. 1959, V. MAURIN & J. ZÖTL 1964, H. BATSCHKE et al. 1970, B. TOUSSAINT 1972, u. a.).

Die schon vor Jahrzehnten für lokale Untersuchungen verwendeten (siehe J. VORNATSCHE 1962) naturbelassenen (ungefärbten) *Lycopodium*sporen hatten den Nachteil, daß sie nur schwer benetzbar waren und daher bei der vor der Einspeisung erforderlichen Aufschlammung Schwierigkeiten bereiteten. Weiters konnte man sie von eventuell im Untersuchungsgebiet natürlich vorkommenden Bärlappsporen beim Mikroskopieren nicht unterscheiden. Beide Nachteile wurden durch die von M. DECHANT entwickelte Methode der Sporenfärbung behoben (M. DECHANT et al. 1958, M. DECHANT 1959). Die damit gegebene Möglichkeit, Sporen in fünf verschiedenen Farben gleichzeitig in mehrere Schwinden eines Untersuchungsgebietes einzubringen und damit in einem Arbeitsgang sowohl die Beobachtung durch Planktonnetze als auch das Mikroskopieren der Proben zu bewerkstelligen, bedeutete einen wesentlichen Fortschritt.

Nicht zu unterschätzen ist die Tatsache, daß so die gleichzeitige Beschickung mehrerer Schwinden in einem ausgedehnten Untersuchungsgebiet unter denselben hydrologischen und hydrometeorologischen Bedingungen erfolgt und damit die umfassende Abklärung der karsthydrologischen Verhältnisse eines Raumes entscheidend begünstigt. Dieser Vorteil wurde auch beim kombinierten Markierungsversuch 1975 genutzt, was wesentlich zur Abklärung der Karsthydrographie dieses Gebietes beitrug. Weiters waren die *Lycopodium*sporen das einzige Markierungsmittel, das zur Abgrenzung der Einzugsgebiete aller untersuchten Quellen (mit Ausnahme der in den Bodensiphonen versickernden Wässer des Cerknjiško jezero) in einem Arbeitsgang geeignet war.

Was die hydraulischen Eigenschaften des Wassers betrifft, so werden diese durch den Einsatz von *Lycopodium*sporen nicht beeinträchtigt.

Grenzen können der Verwendung dieses Markierungsmittels jedoch durch hydrogeologische und lithologische Verhältnisse des Untergrundes gesetzt sein. Die im Mittel 30 bis 35 μ Durchmesser aufweisenden *Lycopodium*sporen erfordern ausreichend große Wasserwege, die in klastischen Sedimenten meist nicht gegeben sind. Die Anwendung der Sporentrift beschränkt sich daher fast ausschließlich auf kluftwasserführende Gesteine und hier insbesondere auf verkarstete Areale.

Die praktisch unbeschränkte Haltbarkeit der Sporen ist einerseits ein wesentlicher Vorteil. So hat sich z. B. bei einem Versuch im Warscheneck (Nördliche Kalkalpen) ergeben, daß die Sporen in erst nach Jahresfrist untersuchten Planktonnetzproben keinerlei Beeinträchtigung ihrer Färbung aufwiesen. Diese große Stabilität wird andererseits dort zum Nachteil, wo eine Wiederholung eines Triftversuches geplant ist, da damit gerechnet werden muß, daß im Untergrund sedimentierte Sporen durch stärkere Wasserführung auch nach langer Zeit wieder ausgeschwemmt werden können (siehe F. BAUER 1967). In einem solchen Fall ist eine einwandfreie Deutung der Ergebnisse nur dann möglich, wenn die Sporenfarbe gewechselt wird oder eine eindeutige, auf den aktuellen Versuch beziehbare Durchgangskurve erzielt wird. Einzelsporen sind in einem solchen Fall nicht mehr aussagekräftig. Auch im Untersuchungsgebiet wurde

1966 von I. GAMS im Bereich Cerknica—Planina ein Sporentriftversuch durchgeführt (siehe Kapitel 2.3.5.). Sowohl die bei allen Quellen zu Beginn des Versuches 1975 sporennegativen Proben als auch das praktisch schlagartige Einsetzen der Sporenführung am 29. Mai 1975 und die sich daran anschließenden Durchgangskurven lassen aber keinen Zweifel an der Zugehörigkeit dieser Sporen zum Versuch 1975 aufkommen. Ein nicht zu behebender Nachteil des Einsatzes von Lycopodiumsporen wie auch aller anderen Triftmittel (z. B. Bakterien) ist die bestenfalls halbquantitative Auswertungsmöglichkeit. So lassen sich zwar Durchgangskurven erzielen, eine Berechnung der markierten Wassermengen ist jedoch nicht möglich.

Sollen hydrogeologische Zusammenhänge im Bereich von Wasserversorgungen untersucht werden, so hat sich die völlige Unbedenklichkeit der Verwendung von Lycopodiumsporen — sie wurden und werden auch heute noch in der Pharmazie als Trägersubstanz für Medikamente verwendet — als auch ihre Unsichtbarkeit für das freie Auge als Vorteil erwiesen. Damit bringt auch der Einsatz größerer Mengen von Lycopodiumsporen keine Beunruhigung der Bevölkerung mit sich, wie dies bei der Verwendung von Farben schon der Fall war.

Wenn bei Großversuchen auf eine vollquantitative Auswertung verzichtet werden kann, so hat sich der Einsatz verschieden gefärbter Lycopodiumsporen sehr oft am kostengünstigsten erwiesen.

Vereinzelt wurden neben Lycopodiumsporen auch Bakterien (*Serratia marcescens*) als Triftmittel zur Grundwasseruntersuchung verwendet. Mit Erfolg war dies z. B. auch bei den kombinierten Karstwasseruntersuchungen im Donau-Aach-Gebiet 1969 der Fall (siehe H. DOMBROWSKI in H. BATSCHKE et al. 1970, p. 128 ff.). Bei großräumigen Untersuchungen besteht aber die Schwierigkeit, daß die Wasserproben sofort aufbereitet werden müssen und spezielle Laboreinrichtungen erforderlich sind. Beim kombinierten Markierungsversuch 1975 wurde aufgrund von Empfehlungen der Gesundheitsbehörden Sloweniens von einer Verwendung von Bakterien Abstand genommen. Wohl aber kam *Serratia marcescens* bei den Porengrundwasseruntersuchungen im Quartär des Savinjetales 1973 mit Erfolg zum Einsatz (siehe dazu Abschnitt B, Kap. 3.1.). Bakterien haben außerdem den Vorteil, daß durch sie neben dem Nachweis einer unterirdischen Verbindung gleichzeitig auch noch eine Aussage über die Filterfähigkeit des Grundwasserleiters und damit eine Wertung in hygienischer Hinsicht ermöglicht wird. Dies gilt natürlich in noch höherem Maße für den Durchgang von Lycopodiumsporen.

3. 5. Sonstige Markierungsmittel (R. GOSPODARIČ)

Noch verschiedene andere chemische, mechanische und biologische Markierungsmittel sind bei den regionalen und lokalen hydrographischen und hydrogeologischen Forschungen verwendet worden, so z. B. Schaum- und Duftstoffe oder harte und weiche Detergentien beim Markierungsversuch der Donau im Jahre 1969. Diese Markierungsmittel aber waren infolge ihres nicht entsprechenden Verhaltens im Karst und in den Lockergesteinen und mit Rücksicht auf die schwierigen Analysen nicht überall erfolgreich. Sie haben sich zum großen Teil nur zur Bestimmung der qualitativen unterirdischen Verbindungen zwischen den Ponoren und den Quellen auf kurze Entfernungen bewährt. Harte Detergentien sind beim Markierungsversuch der Ljublanica in Anwendung

gekommen, da sie bei einem ähnlichen kombinierten Versuch im Jahre 1969 (W. Käss 1972) verhältnismäßig positive Resultate gezeigt haben.

Wie aus dem Abschnitt 2. 3. 8. ersichtlich ist, wurden mit Detergentien im Flußgebiet der Ljubljana keine positiven Ergebnisse erzielt, obwohl sie zusammen mit Farbstoffen, Sporen und Tinopal, die sich vorzüglich bewährt haben, unter günstigen Bedingungen im Ponorgebiet des Poljes von Planina eingesetzt worden sind.

Mit dem Fortschritt der Forschungsarbeiten und analytischen Methoden kann man aber erwarten, daß neue Markierungsmittel, die wir bis jetzt noch nicht technisch beherrschen, bei weiteren hydrologischen Untersuchungen in Anwendung kommen werden.

B. Markierung von Porengrundwässern

W. Käss mit Beiträgen von F. DROBNE und B. BUKVIČ

1. Untersuchungen im Quartär des Savinja-Tals 1973

Im Rahmen des „3rd International Symposium of Groundwater Tracing“ wurden sowohl im Karstgebiet der Ljubljana als auch im Porengrundwasser des Savinja-Tals westlich Celje Markierungsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche, bei denen die neuesten Methoden angewandt wurden, sollen bei der Fachtagung vorgetragen und möglichst an Ort und Stelle diskutiert werden.

Die Versuche wurden von der Firma NIVO — Splošna vodna skupnost Savinja — in Celje angeregt, finanziert und unterstützt. Der Geološki zavod in Ljubljana lieferte die geologischen und hydrogeologischen Grundlagen und war bei der Probennahme während der Versuche behilflich. Das Geologische Landesamt Freiburg war fachlich bei dem Entwurf und der Ausführung der Versuche beteiligt und lieferte auch die Auswertung der Ergebnisse. Der Hidrometeorološki zavod in Ljubljana (jetzt Zveza vodnih skupnosti — hidrologija und meteorološki zavod) stellte die meteorologischen Unterlagen und die Wasseranalysen zur Verfügung und übernahm schließlich die große Aufgabe der chemischen Bestimmung der Markierungsstoffe. Herr DDr. H. DOMBROWSKY vom Institut für Balneologie und Klimaphysiologie an der Universität Freiburg machte die Untersuchungen mit Bakterien als Triftstoff. Das Zavod za zdravstveno varstvo (Gesundheitsamt) in Celje stellte ihm dafür dankenswerterweise Untersuchungsräume zur Verfügung.

Allen Beteiligten sei für ihre Mitarbeit herzlichst gedankt.

1. 1. Hydrogeologischer Überblick

Das Versuchsfeld liegt in einem Becken, das von der Savinja durchflossen wird und an dessen Ostende Celje liegt. Dieses Becken ist rund 15 km lang und im Durchschnitt 3 km breit (Tafel III). Die Savinja fließt, von Nordwesten kommend, zunächst quer durch das Becken und dann am Beckensüdrand entlang. Im Stadtgebiet von Celje biegt sie nach Süden um und mündet nach 25 km in die Save.

Das untere Savinjatal oder Becken von Celje liegt geologisch zwischen den Savinjske-Alpen und den Savafalten. Das tektonisch im jüngeren Tertiär ent-

standene Becken ist mit pliozänen und quartären Ablagerungen ausgefüllt. Im Norden und Süden ist das Becken durch Verwerfungen begrenzt. Den geophysikalischen Untersuchungen nach ist die vortertiäre Unterlage des Beckens verschieden tief.

Die größte Tiefe (rund 1400 m) liegt im Ostteil bei Ostrožno und Ljubečno, geringere Tiefen (ca. 500 m) aber sind bei Mozirje und Okonina in der Westseite des Beckens festgestellt worden. Die bisher ausgeführten Bohrungen haben ergeben, daß die Beckenunterlage morphologisch sehr uneben ist. Das alte Flußbett der Savinja und Ložnica haben wir in Mergeln und Tuffen des Oligozäns nachgewiesen. Das Becken selbst ist sonst mit sandigen und kiesigen Ablagerungen pliozänen und quartären Alters ausgefüllt. Das Becken ist im Norden und Süden mit Hügeln aus undurchlässigen Gesteinen tertiären und vortertiären Alters umgeben. Die meistens verkarsteten mesozoischen Karbonatgesteine sind tektonisch in die undurchlässigen Gesteine eingeklemmt. Hier ist Karstwasser vorhanden.

Die lehmig-kiesigen Ablagerungen pliozänen Alters reichen stellenweise bis 20 m unter Terrain. Sie haben aufgrund ihrer Tonkomponente keine wirtschaftliche Bedeutung. Die darüberliegenden lehmarmen bis lehmfreien Kiese pleistozänen Alters sind der bedeutsame Grundwasserkollektor. Diese Ablagerungen sind im Mittel- und Ostteil des Beckens bis zu 16 m mächtig, im Westteil geringer. Dort befindet sich der Grundwasserspiegel auch tiefer unter der Erdoberfläche als im übrigen Becken. Am westlichen Ausläufer des Beckens wird bei niedrigen Grundwasserständen ein aus Tertiärtonen bestehender Rücken als Grundwasserscheide wirksam, so daß sich zwischen Latkova vas und Novo mesto am rechten Ufer der Savinja ein eigener Grundwasserkörper bildet.

Das Grundwasser erneuern außer den Niederschlägen auch die Flüsse Savinja und Ložnica, die Bäche Trnava und Dolsko und schließlich auch die Karstquellen am Fuße der Karsthochebene Dobrovlje.

Das Grundwasserspiegel-Gefälle beträgt auf 14 km etwa 45 m, also rund 3,2%. Die Grundwassergleichen verlaufen im allgemeinen so, daß eine Einspeisung vom Beckennordrand her zu erwarten ist. Nur bei der Einmündung des Bolskaflusses in die Savinja südöstlich Latkova vas muß man nach den Grundwassergleichen auf einen Zufluß von Savinjawasser nach Norden in den Grundwasserkörper rechnen.

Die hydrochemischen Messungen des Grundwassers in den Quartärablagerungen des Beckens weisen auf Mg-Ca-HCO₃-Wasser hin mit lokalen Erhöhungen von SO₄, Na und Cl in der Nähe der Ortschaften Grušovje und Levec. Bei Grušovje sind im Wasser 21,4 mval SO₄ und 10,3 mval Cl enthalten, was auf eine lokale Verunreinigung durch die intensive Landwirtschaft und Abfallwasser zurückzuführen ist. Die Wasserhärte steigt von Westen (9,2 bis 15,4 °dH bei Letuš und Pariželj) nach Osten (20,6 bis 24,2 °dH bei Levec).

1. 2. Situation und Voruntersuchungen im Versuchsfeld

Im Savinja-Becken sind zwar eine größere Anzahl von Bohrungen abgeteuft worden, die den Grundwasserkörper erschlossen haben. Es sind auch eine Reihe von Pumpversuchen durchgeführt worden, die über die Ergiebigkeit der grundwasserführenden Schichten Auskunft geben. Über die Grundwasserbewegung, insbesondere über die Fließgeschwindigkeit, ist man aber bislang im unklaren

gewesen. Es wurde daher ein Versuchsfeld für Markierungsversuche eingerichtet. Folgende Anforderungen waren an das Feld zu stellen:

1. Die wasserführende Schicht sollte eine möglichst große Mächtigkeit aufweisen,
2. der Grundwasserspiegel sollte in nicht zu großer Tiefe anstehen, damit die Probennahme nicht zu sehr erschwert war,
3. die Grundwassergleichen sollten in der Umgebung des Versuchsfeldes parallel verlaufen,
4. Oberflächengewässer und Wasserentnahmestellen sollten weiter als 200 m entfernt sein.

Ein Gelände, das diese Bedingungen erfüllt, wurde beim Dorf Drešinja vas, rund 5 km WNW von Celje gefunden.

Es wurde eine 8-Punkte-Anordnung in zwei verschiedenen Tiefen gewählt. Da sich bei früheren Versuchen herausgestellt hatte, daß eine vollkommene Abdichtung von verschiedenen Filterstrecken gegeneinander nur schwierig durchführbar ist, wurden einfachheitshalber Doppelpegel gesetzt. Nach den geologischen und geoelektrischen Profilen durch das Savinja-Becken war beim vorgesehenen Versuchsfeld mit einer Mächtigkeit der wasserführenden Schichten von 5 bis 6 m zu rechnen. Diese Annahme bestätigte sich dann auch, als die Pegel im Versuchsfeld gesetzt wurden (Fig. 75, 76). Diese Mächtigkeit des Grundwasserleiters bot Gelegenheit zu Markierungsversuchen in zwei verschiedenen Tiefenlagen.

Mit Bohrungen ist ein wasserführender Horizont mit der Mächtigkeit von 7,5 m festgestellt worden. Dieser Horizont ist im ganzen mit einer 1,8 m dicken sandigen Lehmdecke überdeckt, die eine direkte Verunreinigung des Grundwassers von der Oberfläche her verhindert. Die Sohle des wasserführenden Horizonts aus konsolidiertem Lehm, Sand und Kies pliozänen Alters ist auch als hydrogeologische Barriere zu betrachten. Der im einzelnen zusammenhängende Horizont ist aus dem hydrogeologischen Profil ersichtlich.

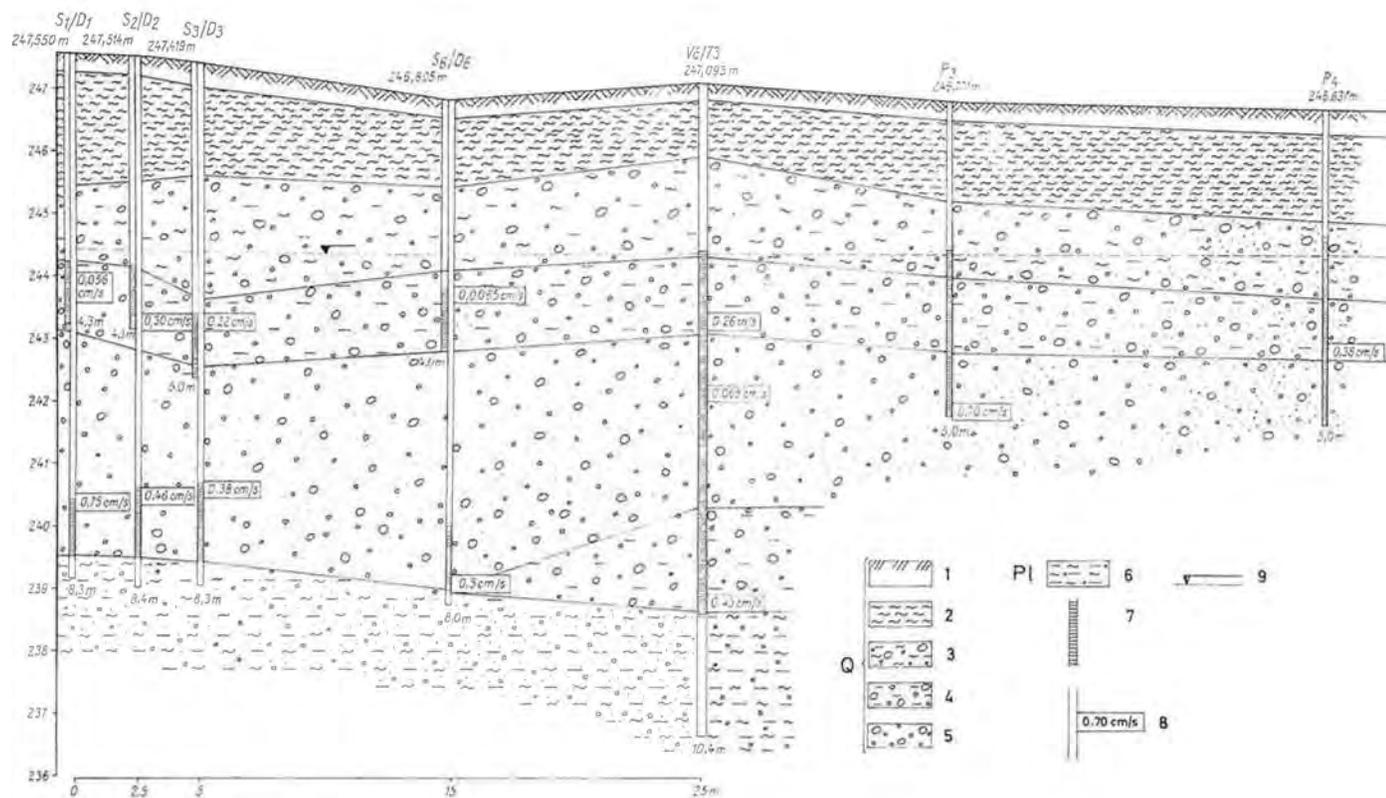
Proben für granulometrische Analysen sind den Bohrungen entnommen worden. Nach der Gleichung $USBRK = 0,36 \cdot d^{2,3}_{10}$ cm/s ist der Durchlässigkeitskoeffizient K errechnet worden.

Man entschloß sich zur Anlage eines Pegelfeldes in einer 8-Punkte-Anordnung, d. h., Grundwasser-stromabwärts des Eingabepegels liegen in 2,5, 5 und 15 m Entfernung Beobachtungspegel; bei 5 und 15 m liegen jeweils 5 m links und rechts der Pegelfeldachse vier weitere Doppelpegel.

Zur Ergänzung der Markierungsversuche wurde noch die Brunnenbohrung Vč-73 25 m unterhalb der Einspeisestelle abgeteuft, in der ein Pumpversuch gefahren wurde. Ferner wurden schräg unterstromig links und rechts der Brunnenbohrung noch in 10 und 25 m Entfernung vier Beobachtungspegel (Piezometerbohrungen) gesetzt.

Die acht Pegel, die den oberen Teil des wasserführenden Quartärs erschlossen (S 1 bis S 8), wurden bis 4 bis 5 m unter Gelände gebohrt und im untersten Meter als Filterstrecken ausgebaut. Bei den acht Pegeln zur Erschließung des unteren Horizontes (D 1 bis D 8) reichte die 1-m-Filterstrecke von 7,70 bis 8,10 m unter Gelände. Die S- und D-Pegel hatten einen lichten Durchmesser von 50 mm.

Bei der Brunnenbohrung Vč-73 wurden die wasserführenden Schichten zwischen 2,80 m und 8,40 m unter Gelände erfaßt und durch den Einbau von 200-mm-Filterrohren erschlossen. Die Endteufe betrug 10,40 m und reichte rund 2 m in das verlehnte Pliozän.



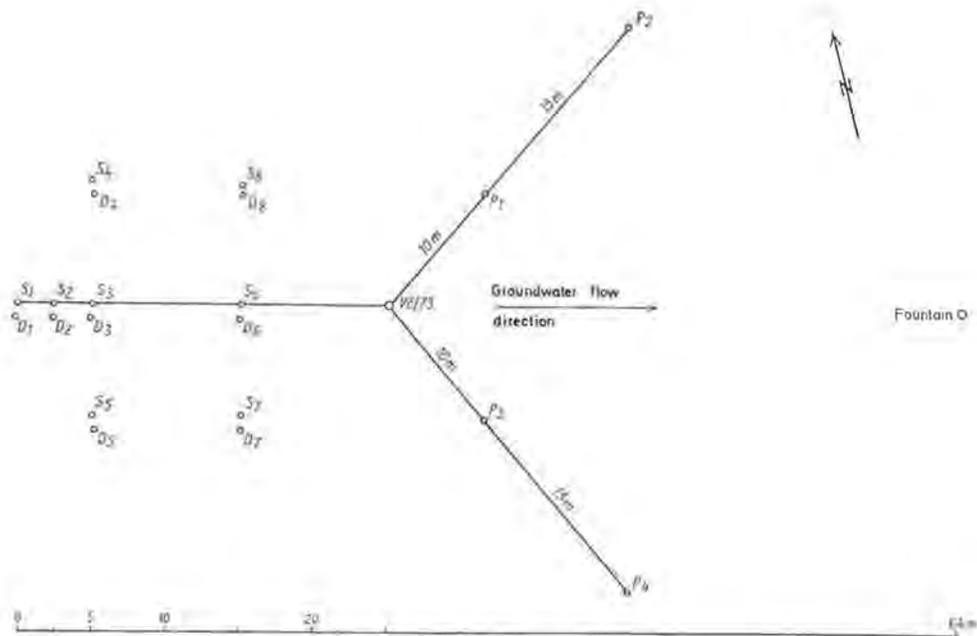


Fig. 76: Anlage des Versuchsfeldes bei Celje (vgl. Fig. 75 und Tafel III).

Sl. 76: Lega poskusnega polja.

Die 4 P-Bohrungen reichten durchwegs bis 5 m unter die Geländeoberfläche, also etwa bis zur Mitte des Grundwasserleiters. Die Bohrlöcher tragen Filterstrecken von 50 mm Durchmesser und 2,2 bis 3,0 m Länge.

1. 2. 1. Pumpversuch in der Brunnenbohrung Vč-73

Zwischen dem 9. und 11. Juli 1973 wurde ein Pumpversuch mit drei verschiedenen Förderstufen gefahren. Die Förderung wurde jeweils so lange beibehalten, bis ein gleichbleibend abgesenkter Wasserspiegel in der Brunnenbohrung erreicht war:

Fig. 75: Querprofil durch das Versuchsgebiet. 1 — Bodendecke, 2 — brauner sandiger Ton, 3 — Schotter mit Sand, Schluff und Ton, 4 — schlecht sortierte Schotter mit Sand und Schluff, 5 — schlecht sortierte Schotter mit Sand und etwas Schluff, 6 — schluffiger Ton mit Sand und Feinkies, 7 — perforierter Teil der Piezometer, 8 — Permeabilitätskoeffizient, berechnet durch Kornanalysen, 9 — Grundwasserstand im Juli 1974.

Sl. 75: Prerez poskusnega polja. 1 — humus, 2 — rjava peščena glina, 3 — prod s peskom, meljem in glino, 4 — slabo granuliran prod s peskom in meljem, 5 — slabo granuliran prod s peskom in malo melja, 6 — meljasta glina s peskom in drobnim prodom, 7 — perforirani del piezometra, 8 — koeficient propustnosti, izračunan iz sejalnih analiz, 9 — višina podtalnice julija 1974.

Tag	Zeit	Förderleistung (l/s)	Absenkung (m)
9. Juli	8.10 (Beginn)	0	0
10. Juli	7.00	8,5	0,72
10. Juli	20.00	3,0	0,15
11. Juli	8.30	7,0	0,55

Die Absenkung in einigen Beobachtungspegeln machte folgende Werte aus (m):

Tag	Zeit	D 6	D 3	D 2	D 1
Entfernung (m)		10	20	22,5	25
10. Juli	7.00	0,06	0,03	0,025	0,025
10. Juli	20.00	0,02	0,005	0,005	0
11. Juli	8.30	0,03	0,02	0,015	0,01

Eine von Geološki zavod vorgenommene Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes k nach DUPUIT ergab 0,65 (cm/s).

Die Lage des Grundwassers am Versuchsfeld ist von Juni bis September mehrere Male gemessen worden. In dieser wetterbeständigen Zeit waren nur kleine Grundwasserspiegelschwankungen zu beobachten. Diese Situation dauerte auch während des Versuches an, nur am Ende derselben haben Niederschläge eine schwache Erhöhung des Grundwasserspiegels verursacht, was der die Bohrung Vč-73 eingestellte Lymnigraph gemessen hat.

In der Gegend der Bohrungen betrug der hydraulische Gradient 0,002, die Geschwindigkeit des Grundwassers in den wasserführenden Horizont aber $5,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s.

1. 3. Die Durchführung der Markierungsversuche

Im Versuchsfeld, das mit seinen Bohrungen in der Achse in Richtung der großräumigen Fließrichtung angeordnet wurde, standen neben den zwei Eingabestellen S 1 und D 1 insgesamt 19 Grundwasseraufschlüsse zur Verfügung (Fig. 76). S 1 war als Eingabebohrung für das obere, D 1 für das tiefere Grundwasserstockwerk vorgesehen. S 2 bis D 2 und S 8 bis D 8 waren Doppelpegel analog den Eingabepegeln mit jeweils getrenntem Ausbau für das höhere und tiefere Stockwerk (Fig. 75). Neben dieser 8-Punkte-Anordnung für die gezielte Beobachtung der getrennt erfaßbaren Tiefenlagen wurden aber auch die Brunnenbohrung Vč-73 sowie die vier Piezometerbohrungen in die Markierungsversuche mit einbezogen.

Die Eingabe der Markierungsmittel geschah nach folgendem Plan:

Eingabestelle	18. September 1973	19. September 1973
S 1 (oberes Stockwerk)	Serratia marcescens	1 kg Uranin
D 1 (unteres Stockwerk)	2 kg Eosin Kaliumchlorid	

Ursprünglich war am 19. September noch die Einspeisung von 40 kg harten Detergentien im unteren Stockwerk vorgesehen. Die Verwendung dieses an anderen Stellen bewährten Markierungsmittels scheiterte jedoch am Bedenken der verantwortlichen Hygieniker.

Die Einspülung der Aufschlämmung mit *Serratia marcescens* erfolgte durch H. DOMBROWSKI am 18. September um 17.05 Uhr in den Pegel S 1 mit 25 l Wasser als Nachspülung.

In den Tiefpegel D 1 wurde zwischen 17.07 und 17.17 Uhr eine konzentrierte Lösung von **2 kg Eosin** in 50 l Wasser eingespült. Das Eosin wurde von der Firma G. SIEGLE in Besigheim/Württemberg als Artikel-Nr. 65 a 439 225 bezogen.

Hochprozentiges **Kalidüngesalz** stand nicht zur Verfügung. Daher wurde auf 50 kg Mischdünger der Firma Zorka/Subotica zurückgegriffen. Das eingespeiste Düngesalz „kompleksno djubrivo“ enthielt neben Kaliumchlorid noch Ammoniumsulfat, Superphosphat, Karbamid und Nitrate. Der Kaliumgehalt konnte nicht ermittelt werden. Der Dünger wurde in 200 l Wasser angerührt und ab 17.27 Uhr in den Pegel D 1 eingeleitet. Bis 18.20 Uhr waren davon 170 l in das Grundwasser eingespült worden. Wegen des erheblichen Anteils an Unlöslichem darf damit gerechnet werden, daß der weitaus größte Teil der Kalisalze zu diesem Zeitpunkt in den Untergrund eingebracht worden ist. Die Einspeisung verlangsamte sich dann. Die restlichen 30 l wurden nochmals mit Wasser aufgeschlämmt. Bis zum anderen Morgen, am 19. September, 9.40 Uhr, war das Düngesalz restlos in das Eingabeloch gebracht.

Am 19. September, zwischen 17.16 und 17.22 Uhr, wurde **1 kg Uranin**, aufgelöst in 25 l Wasser, in das Bohrloch S 1 eingegeben und mit 50 l Wasser nachgespült. Das Uranin wurde von der Firma Kemika in Zagreb bezogen.

Die Eingabe der Markierungsmittel wurde nach folgenden Grundsätzen vorgenommen: Bakterien und Salz sowie Detergentien sollten möglichst voneinander getrennt eingegeben werden. Da Salzlösungen wegen der größeren Dichte unter Umständen in die Tiefe absinken können, wurde das Kalisalz in den Tiefpegel eingespeist. Erfahrungsgemäß werden Bakterien von der Art *Serratia marcescens* durch Uranin nicht beeinflusst. Daher wurde dieses Markierungsmittel — mit einem Tag Abstand — oben eingespeist.

Die Entnahme der Wasserproben erfolgte mit einer von H. BEHRENS konstruierten und vom Institut für Radiohydrometrie in München freundlicherweise zur Verfügung gestellten batteriebetriebenen Mehrfach-Schlauchpumpe. Die Pumpe wurde in einer Grube 80 cm unter der Erdoberfläche aufgestellt, um die beträchtlichen Ansaughöhen zwischen 3,62 und 2,94 m zu vermindern. Als Standort der Mehrfachpumpe wurde die Mitte zwischen den Pegeln 3 und 6 gewählt. Von dort aus verliefen insgesamt 14 Schläuche zu den Entnahmestellen S 2 bis S 8, D 2 bis D 8 sowie zwei Schläuche zur Bohrung Vč-73 „oben“ bei 4 m Tiefe und „unten“ bei 7 m Tiefe. Die Ansaugschläuche waren mit Beschwerden in die Löcher eingehängt und trugen im untersten Meter Perforationen. Die Polyäthylenschläuche hatten einen Außendurchmesser von 8 mm und einen Innendurchmesser von 5 mm. Die Schlauchpumpe arbeitete an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit in bezug auf Ansaughöhen und Ansaugmengen. Die Verzögerungen, die durch die Verweildauer der Wässer in den Schläuchen eintraten, lagen zwischen 15 und 32 Minuten. Sie sind also im Vergleich zu den unterirdischen Fließzeiten unwesentlich.

1. 3. 1. Ergebnisse mit *Serratia marcescens*

Die Untersuchung der Wasserproben auf das Bakterium *Serratia marcescens* erfolgte im Gesundheitsamt in Celje unter der Leitung von H. DOMBROWSKI. Aus den acht Beobachtungsstellen S 2 bis S 8 und aus der Versuchsbohrung Vč-73

(oberer Horizont) wurden 15 Minuten vor der Einspeisung Blindproben gezogen, die bei jeweils zweifacher Bebrütung sämtlich negativ ausfielen. Zwischen dem 18. September, 18.00 Uhr, und dem 25. September, 7.00 Uhr, wurden 23 mal aus den acht Beobachtungsstellen Proben entnommen. Von allen Proben sind zwei Kulturen angesetzt worden. Eine Keimzahlbestimmung erfolgte nicht, sondern nur eine Unterscheidung zwischen positiven und negativen *Serratia marcescens*-Befunden. Die Ergebnisse der Bakterien-Trift sind in Fig. 77 dargestellt.

Außer den acht Bohrungen wurde auch der Brunnen des bäuerlichen Anwesens 64 m unterhalb der Eingabestelle am 24. September, 20.00 Uhr, und am 25. September, 8.30 Uhr, beprobt. Beide Doppelproben waren negativ.

Aus den Ergebnissen ist zu entnehmen, daß die beiden links (= nördlich) der Versuchsschneise gelegenen Pegel S 4 und S 8 nie beeinflußt waren. Ferner geht daraus hervor, daß bereits drei Stunden nach der Einspeisung im seitlichen Pegel S 5 *Serratia marcescens* zuerst auftrat. Das letzte Auftreten von *Serratia marcescens* war in der Versuchsbohrung bei der vorletzten Probennahme am 24. September, 17.00 Uhr, also 142 Stunden nach der Einspeisung, zu verzeichnen. Diese Beobachtungsstelle hatte auch die größte Anzahl von positiven Befunden, nämlich 27, und lag damit noch vor dem der Eingabestelle nächsten Pegel S 2 mit fünf und dem zweitnächsten Pegel S 3 mit 26 *Serratia marcescens*-Befunden.

W	8	10	21	22	23	24	25
52							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I
54							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I I I
54							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I I I
55							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I I I
58							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I I I
60							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I I I
74							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I I I
8(21)							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I I I
7							
III I	I I I I	I I I I	I I	I I	I I	I I	I I I

Fig. 77: Ergebnisse mit *Serratia marcescens*. II — negative Doppelprobe, I — negative Einzelprobe; + — positive Einzelprobe, + — positive Doppelprobe.

Sl. 77: Rezultati sledenja s *Serratia marcescens*. II = dvakratna negativna ugotovitev, I = enkratna negativna ugotovitev, X = enkratna pozitivna ugotovitev, X = dvojna pozitivna ugotovitev.

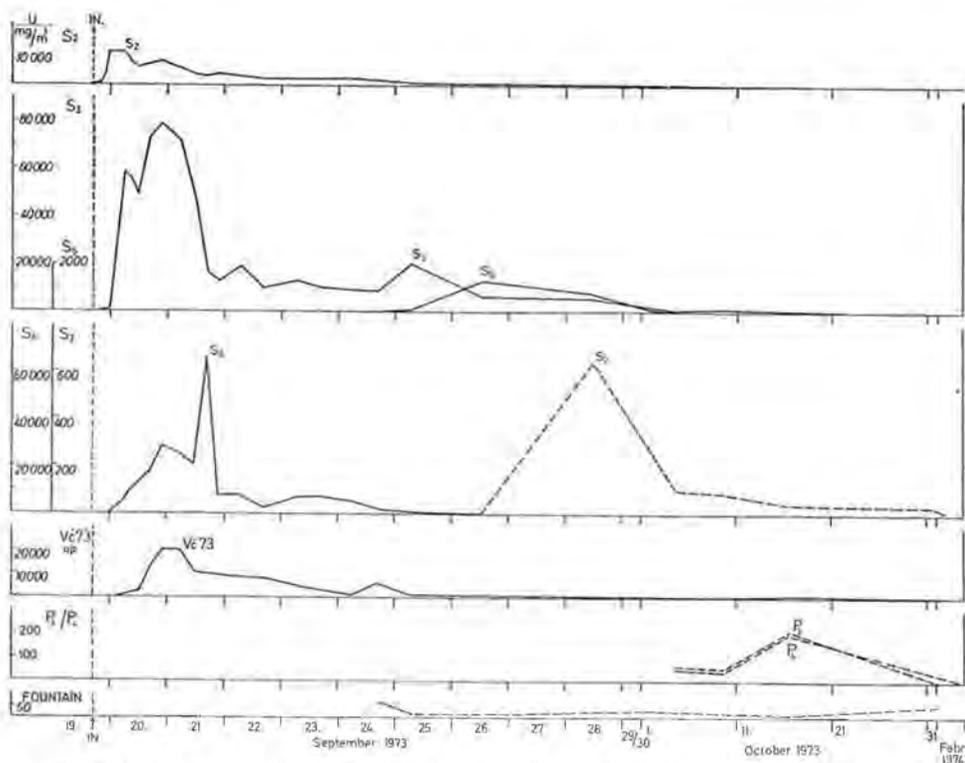


Fig. 78: Uranin-Konzentration-Zeit-Kurven in den Piezometern S 2, S 3, S 6, S 7, Vč-73, P 3, P 4 und in der Quelle. IN = Zeitpunkt der Einspeisung. Man beachte den verschiedenen Zeitmaßstab für 19. bis 28. September bzw. 29. September und 31. Oktober 1973.

Sl. 78: Krivulje koncentracije za uraninje v piezometrih S 2, S 3, S 5, S 6, S 7, Vč-73, P 3 in P 4 in v studencu. IN — čas injiciranja za uranin. Opozarjamo na različno časovno skalo za 19.—28. september in 29. september do 31. oktober 1973.

1. 3. 2. Ergebnisse mit Uranin

Die Untersuchung auf Uranin erfolgte durch Frau M. ZUPAN im Laboratorium des Hidrometeorološki zavod in Ljubljana. Die Bestimmung erfolgte spektral-fluorimetrisch mit einem Perkin-Elmer-Spektralphotometer, Modell 203. Die Erfassungsgrenze lag bei rund 5×10^{-10} oder 0,5 mg/cbm.

Der Verlauf der Uranin-Konzentration ist in Fig. 78 aufgezeichnet. Demnach trat in dem der Eingabestelle S 1 nächstgelegenen Pegel S 2 schon sehr früh das Uranin wieder auf. Die Probe um 18.00 Uhr war noch uraninfrei, die Probe um 20.00 Uhr zeigte bereits 790 mg/cbm und in der folgenden Nacht war bereits das Maximum erreicht. Noch stärker als Pegel S 2, jedoch mit Verzögerungen, waren die Pegel S 3 und S 6 beeinflusst. Auch die Brunnenordnung Vč zeigte im oberen Teil erhebliche Uraninkonzentrationen. Die nördlich der Versuchsfeldachse gelegenen Bohrungen S 4, S 8, P 1 und P 2 waren von Uranin nicht betroffen. Die rund 200 m unterstromig, jedoch etwas nördlich der Versuchsfeldachse gelegene Bohrung V 35 hatte bei der einzigen Beprobung am 26. September kein Uranin. Dagegen zeigte die Bohrung Vč-17 in einer Entfernung von 900 m vom Versuchsfeld am 9. Oktober 1973 kein, im Februar 1974 5,0 mg Uranin/

cbm. Die Bohrung V 32 und die Brunnen beim Flugplatz Levec waren nie beeinflusst. Auch in den D-Bohrungen und im tieferen Teil der Brunnenbohrung Vč-73 trat Uranin nie auf.

Diese Ergebnisse decken sich weitgehend mit denen des Bakterienträftversuches vom 18. September 1973, bei dem auch die nördlich der Versuchsfeld-Achse liegenden Bohrungen nicht beeinflusst worden sind. Durch das Auftreten in den südwärts gelegenen Bohrungen S 5, S 7, P 3 und P 4 ist erwiesen, daß die Grundwasserströmungsrichtung etwa Ost-südost verläuft.

Zur Ermittlung der für die hydrologische Bewertung maßgeblichen Grundwasser-Fließgeschwindigkeit wird am zweckmäßigsten die Strecke Eingabestelle—Pegel S 6 (15 m) herangezogen.

Der **mittige Schwerpunkt der Ausbringung** des Farbstoffes läßt sich an Hand der Farbgangkurve auf etwa 21. September, 12.00 Uhr, festlegen. Das sind rund 43 Stunden Fließzeit oder eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 0,35 m/Std. oder 8,4 m/Tag.

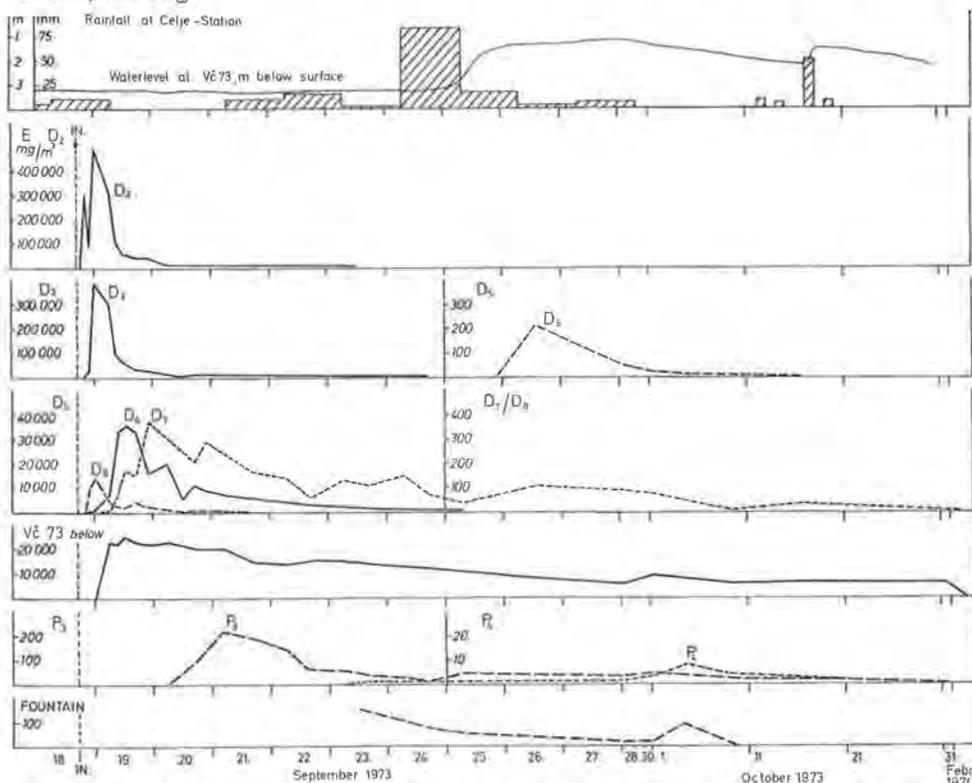


Fig. 79: Durchgangskurven des Eosins in den Piezometern D 2, D 3, D 6—D 8, Vč-73, P 4 und in der Quelle. IN = Einspeisungszeit. Man beachte den verschiedenen Zeitmaßstab für 19. bis 27. September und 28. September bis 31. Oktober 1973. Oberste Reihe: Wasserspiegelschwankungen in Vč 73 in m unter Terrain und Niederschläge in mm, gemessen in der meteorologischen Station Celje.

Sl. 79: Krivulje koncentracije za eozin v piezometrih D 2, D 3, D 6—D 8, Vč-73, P 4 in v studencu. IN — čas injiciranja za eozin; opozarjamo na različno časovno skalo za 19.—27. september in 29. september—31. oktober 1973; zgoraj gladina vode v piezometru Vč 73 v m in padavine v mm po meteorološki postaji Celje.

1. 3. 3. Ergebnisse mit Eosin

Uranin sowie Eosin wurden in Ljubljana durch Frau M. ZUPAN fluorimetrisch bestimmt. Der Gang der Eosin-Konzentrationen in den einzelnen Beobachtungsstellen ist in Fig. 79 aufgetragen. Die Pegel D 4 und P 1 sowie P 2 wurden von Eosin nie betroffen. Auch in den Brunnenbohrungen weiter unterhalb des Versuchsfeldes V 35, V 32, V 17 und beim Flugplatz trat Eosin nie auf.

In dem der Eingabestelle nächstgelegenen Entnahmepegel D 2 trat Eosin zwischen 17.30 und 18.00 Uhr, also etwa bereits eine halbe Stunde nach der Eingabe auf. Die höchste Konzentration trat bereits um 24.00 Uhr auf. Im Gegensatz zum Färbversuch mit Uranin im oberen Horizont erschien Eosin auch im nordwärts gelegenen Pegel D 8, hier allerdings nur in Spuren.

Für den 15 m entfernten Pegel D 6 läßt sich eine mittlere Fließzeit von rund 42 Stunden ermitteln, die Fließgeschwindigkeit beträgt also 0,36 m/Std. oder 8,8 m/Tag. In Fig. 79 sind außerdem oben sowohl die Niederschläge der Wetterstation Celje als auch die Wasserstände in der Brunnenbohrung Vč-73 aufgetragen. Man erkennt, daß die erste Versuchswoche bei schwachen Niederschlägen und bei einem Grundwasserstand von durchschnittlich 3,3 m unter Gelände verlief. Vom 24./25. September gingen ungewöhnlich hohe Niederschläge über Slowenien nieder — die höchsten des Jahres 1973 — so daß in den folgenden Tagen der Grundwasserspiegel bis auf 1,1 m unter Gelände anstieg. Auf die Markierungsversuche scheinen diese Niederschläge und der Grundwasseranstieg jedoch keinen Einfluß gehabt zu haben.

1. 3. 4. Ergebnisse mit Kaliumchlorid

Für den Markierungsversuch mit kaliumchloridhaltigem Düngesalz wurden die entnommenen Wasserproben sowohl auf Kalium als auch auf Chlorid untersucht. Die zusammengefaßten Untersuchungsergebnisse sind in Fig. 80 dargestellt. Beeinflußt wurden die Pegel D 2, D 3, D e, D 7, die Bohrung Vč-73 unten und der Pegel P I.

Da das Kaliumchlorid kurz nach dem Eosin an derselben Stelle eingegeben wurde, verlief dieser Versuch im wesentlichen wie der Eosin-Versuch. Allerdings waren in den Pegeln D 5, D 8, P 3 und P 4 sowie im Hausbrunnen keine Einflüsse von Kaliumchlorid nachweisbar. Dafür traten im Pegel P I zwischen dem 24. und 28. September Kalium- und Chloriderhöhungen auf.

Es fällt auf, daß bis auf den schwach beeinflussten Pegel D 7 die Chloridanstiege von rund 0,55 mval/l = rund 19 mg/l überall ähnliche Konzentrationen zwischen 4 und 6 mval/l erreichten. Der höchste Chloridanstieg war im Pegel D 6 am 20. September, 6.00 Uhr, mit 5,97 mval/l = 211,5 mg/l zu verzeichnen.

Zum besseren Vergleich sind in Fig. 80 nicht die Gewichts-, sondern die Äquivalentkonzentrationen aufgetragen. Aus der Darstellung ist ohne Schwierigkeit abzulesen, daß die Chloridäquivalente stets mindestens den doppelten Betrag der Kaliumäquivalente ausmachen. Je weiter die Beobachtungsstelle von der Eingabestelle entfernt liegt, desto geringer wird der Kaliumanteil. Daraus ist zu folgern, daß im Untergrund ein Ionenaustausch wirksam wird. Kalium wird also beim Fließen im Porengrundwasserleiter gegen andere Kationen ausgetauscht. Die ausgetauschten Kationen sind überwiegend die Härtebildner Calcium und Magnesium. Die in Fig. 80 eingetragenen Stichproben der Gesamthärtebestimmung zeigen eine deutliche Zunahme der Gesamthärte beim Salzdurchgang. Generell gesehen ist die Härtezunahme um so größer, je weiter der

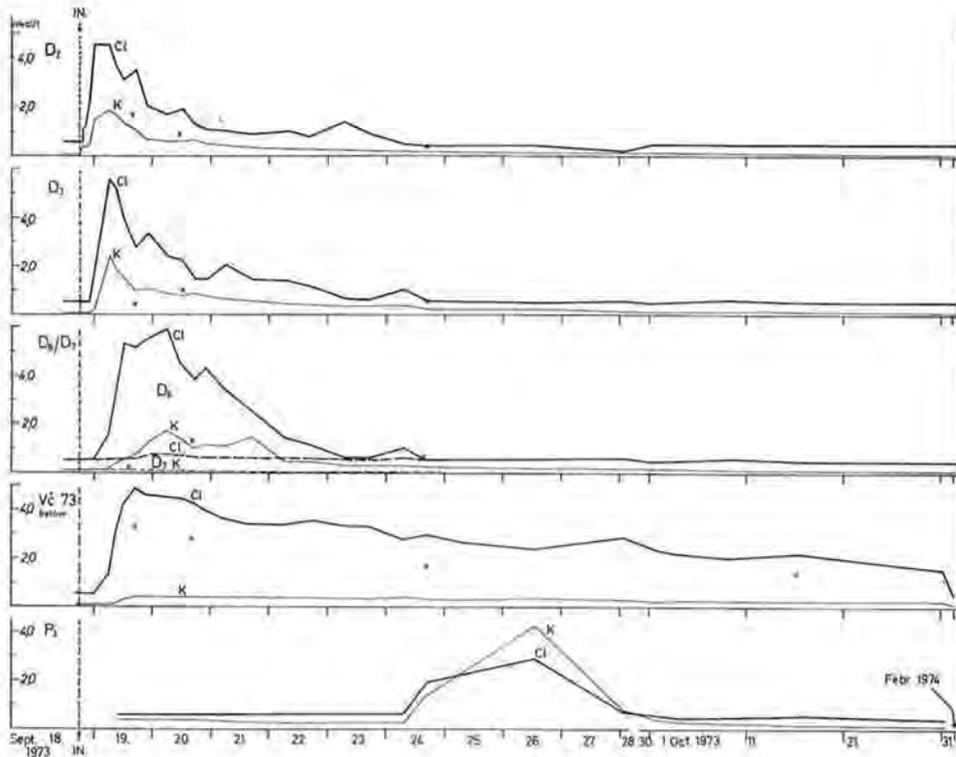


Fig. 80: Durchgangskurven von Kalium und Chlorid in den Piezometern D 2, D 3, D 6, D 7, Vč 73 und P 1. D 7 strichliert Zunahme der Gesamthärte (mval/l) im Vergleich zu den Anfangswerten. IN = Einspeisungszeit des Kalisalzes.

Sl. 80: Krivulje koncentracije za kalij in klor v piezometrih D 2, D 3, D 6, D 7, Vč 73 in P 1; krivulja za klor — debelo, za kalij tanko izvlečena; vrednosti v piezometru D 7 črtkasto; križci = zvišanje totalne trdote v mval/l v primerjavi z začetno vrednostjo; IN — čas injiciranja kalijeve soli.

Wanderweg des Salzes ist. Diese Beobachtung stimmt völlig mit dem geringeren Kaliumanteil bei den entfernteren Beobachtungsstellen überein.

Unklar ist das Auftreten von Kalium und Chlorid im Pegel P 1, der nördlich der Versuchsfeldachse liegt, wo sonst keines der Markierungsmittel in Erscheinung trat. Bemerkenswert ist das zeitweilige Überwiegen des Kaliums über das Chlorid, was sonst nie vorkommt. Ein Einfluß durch die Eingabestelle ist unwahrscheinlich, zumal das Eosin dort nicht auftrat. Vielleicht liegt eine Einschwemmung durch die überaus starken Niederschläge vor, die mit dem Auftreten zusammenfielen. Andererseits ist nicht einzusehen, warum sich die Niederschläge nur in diesem Pegel und nicht auch bei den anderen Beobachtungsstellen bemerkbar machten. Eine Erhöhung der Gesamthärte während des erhöhten Kalium- und Chlorauftretens im P 1 liegt nicht vor.

Beim Pegel D 6, der 15 m unterhalb der Eingabestelle liegt, wird ein Flächenschwerpunkt für die Chlorid-Konzentrationskurve für den 20. September, 11.00 Uhr, ermittelt. Das sind 41 Stunden Fließzeit oder eine Fließgeschwindigkeit von $0,37 \text{ m/h} = 9,0 \text{ m/Tag}$.

2. Vergleich mit Markierungsversuchen im Lockergestein in anderen Gebieten

Bislang sind nur wenige Markierungsversuche im Lockergestein durchgeführt worden, die nach den hier angewandten Grundsätzen ausgewertet worden sind. Sofern die Ergebnisse dieser Versuche miteinander vergleichbar sind, werden sie hier aufgeführt (Tabelle 50). Aus der Zusammenstellung ist ersichtlich, daß im Savinja-Becken im Vergleich zu anderen Lockergesteins-Grundwasserleitern mittlere Grundwassergeschwindigkeiten und mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte bei hohem Gefälle vorliegen.

Die Markierungsversuche erlauben konkrete Angaben über die Grundwasserbewegung nach Geschwindigkeit und Richtung sowie über den Durchlässigkeitsbeiwert (K) des Grundwasserleiters. Alle diese Versuche wurden im nicht abgesenkten Zustand vorgenommen. Bei einer möglichen Grundwassernutzung dienen diese Werte zur Berechnung der Ergiebigkeit.

Tabelle 50: Ergebnisse verschiedener Markierungsversuche im Lockergestein.

Ort	Grundwasserkörper	Zeit	Gefälle	k-Wert
Celje	Savinja-Becken, Grobschotter	1973	2,08 ⁰ / ₀₀	rd. 1 cm/s
Tannheim	Illertal, Grobkies	1972	2,45 ⁰ / ₀₀	1,79 cm/s
Erolzheim	Illertal, Grobkies	1972/73	2,03 ⁰ / ₀₀	1,64 cm/s
Graben-Neudorf	Obertheinthal, Kiessand	1967	2,0 ⁰ / ₀₀	0,17 cm/s
Riegeler Pforte	Breisgau, Kiessand			
	6 m Tiefe	1970	1,3 ⁰ / ₀₀	0,11 cm/s
	22 m Tiefe	1970	1,6 ⁰ / ₀₀	0,06 cm/s
	44 m Tiefe	1970	1,9 ⁰ / ₀₀	0,012 cm/s
Karlsruhe-Knielingen	Obertheinthal, Kiessand	1975	0,54 ⁰ / ₀₀	0,07 cm/s
	Geschwindigkeit	Schrifttum		
Celje	8,8 m/Tag			
Tannheim	21 m/Tag	unveröffentlicht		
Erolzheim	16 m/Tag	unveröffentlicht		
Graben-Neudorf	1,2 m/Tag	J. BARTZ & W. KÄSS (1972)		
Riegeler Pforte	0,5 m/Tag	W. Käss (1972)		
	0,33 m/Tag	W. Käss (1972)		
	0,07 m/Tag	W. Käss (1972)		
Karlsruhe-Knielingen	0,16 m/Tag	unveröffentlicht		

3. Zusammenfassung

Bei einem kombinierten Grundwasser-Markierungsversuch im Savinja-Becken westlich Celje wurden Bakterien von der Art *Serratia marcescens*, die beiden Farbstoffe Uranin und Eosin sowie Kaliumchlorid eingesetzt.

Die im oberen Horizont eingespeisten Bakterien waren noch 25 m unterhalb der Eingabestelle vom 2. bis zum 7. Versuchstag nachweisbar. Für das erste Auftreten läßt sich eine Fließgeschwindigkeit von rund 2 m/Std. oder 47 m/Tag ermitteln. Wollte man für diesen Wert eine Schutzgebietsberechnung nach den bundesdeutschen Richtlinien für die Zone II anstellen, so käme man im nicht abgesenkten Zustand auf eine Ausdehnung von 2350 m in Grundwasserfließrichtung!

Indessen wäre eine solche Schutzgebietsausdehnung nur bei ungeschützten Grundwasserleitern zu rechtfertigen. Da jedoch in der weiteren Umgebung des Versuchsfeldes der stark bindige Aulehm überall mächtiger als 1,5 m ist, stellt dieser eine gut gegen Fremdstoffe schützende Überdeckung dar. Nach neueren Erkenntnissen hemmt eine so beschaffene Lehmdecke die Einsickerung von nicht adsorbierbaren Farbstoffen und nicht austauschfähigen Anionen um mindestens mehrere Tage, zu Trockenzeiten um mehrere Monate. Wegen des hohen Rückhaltevermögens von Tonmineralien für die meisten Schadstoffe und für Bakterien kann ohne Bedenken die nach dem Bakterien-Trift-Versuch ermittelte 50-Tage-Fließstrecke von 2350 m auf einen Bruchteil verringert werden.

Neben den Bakterien haben alle anderen Markierungsmittel ebenfalls mit dieser Geschwindigkeit die 25-m-Beobachtungsstelle Vč-73 erreicht, so daß damit die Ergebnisse des Bakterientriftversuches erhärtet werden.

Die Farbstoffe und das Kaliumchlorid waren beim Abschluß der regelmäßigen Beobachtung Ende Oktober, also nach etwa sechswöchiger Versuchsdauer, in z. T. noch beträchtlicher Konzentration in der Bohrung Vč-73 nachweisbar. Eine Berechnung der hydrologisch maßgeblichen „Mittleren Fließgeschwindigkeit“ muß daher bei den Pegeln S 6 und D 6 erfolgen, die nur 15 m von den Eingabepegeln entfernt liegen. Sie betragen für

Uranin (oberer Horizont): 0,35 m/Std. = 8,4 m/Tag,
 Eosin (unterer Horizont): 0,36 m/Std. = 8,8 m/Tag,
 Chlorid (unterer Horizont): 0,37 m/Std. = 9,0 m/Tag.

Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten zwischen dem oberen und unteren Horizont scheinen nicht zu bestehen.

Das Grundwassergefälle im Versuchsfeld betrug am 18. September 1973 zwischen dem mittleren Wasserstand in den beiden Eingabepegeln S 1 und D 1 (243,912 und 243,896 m Seehöhe) und der Versuchsbohrung Vč-73 (243,852 m Seehöhe) 2,08‰.

Bei der Annahme eines Porenvolumens von 25% und unter Zuhilfenahme einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,36 m/Std. = 0,01 cm/s sowie des Gefälles von 0,00208 läßt sich ein Durchlässigkeitsbeiwert

$$k_f = \frac{V_m \cdot P}{i} = \frac{0,01 \cdot 0,25}{0,00208} = 1,20 \text{ (cm/s)}$$

ermitteln.

Aus der Korngrößenverteilung im Grundwasserleiter in den 16 Pegelbohrungen S 1 bis S 8, D 1 bis D 8 und in den vier Piezometerbohrungen P 1 bis P 4 (je eine Probe) und in der Versuchsbohrung Vč-73 (drei Proben) wurden Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen 0,0065 (S 6) und 2,3 cm/s (D 8) errechnet. Da sich das Fließverhalten des Grundwassers in erster Linie nach den größten Durchlässigkeiten richtet, wäre es müßig, einen Durchschnittswert aus den Einzelbestimmungen mit Hilfe der Korngrößen abzuleiten. Alle drei Arten der Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes zeigen gute Übereinstimmung.

k_f -Werte aus:

Pumpversuchsergebnissen	0,65	cm/s
Markierungsversuchen	1,2	cm/s
Korngrößen	0,0065—2,3	cm/s

Beim Einsatz von Kaliumchlorid als hydrogeologisches Markierungsmittel erfolgt ein merklicher Austausch des Kaliumions gegen die Härtebildner Kalzium und Magnesium, wobei weder das erstere noch das letztere bevorzugt

wird. Da die Zusammensetzung des eingesetzten Kalidüngesalzes nicht bekannt ist, kann nur die **Veränderung** des Verhältnisses der Äquivalente von Cl zu K zwischen dem Pegel D 2 (Fließstrecke 2,5 m) und der Versuchsbohrung Vč-73 unten (Fließstrecke 25 m) angegeben werden. Der Anteil von Kalium nimmt auf diesen 22,5 m von etwa $\frac{1}{2}$ auf $\frac{1}{10}$ ab. Gegenüber anderen Versuchen in vorwiegend nichtkalkigen und feinerkörnigen Grundwasserleitern erfolgt der Ionenaustausch hier sehr langsam.

Aus den Versuchsergebnissen ist eine Fließrichtung des Grundwassers in Richtung Ostsüdost, also etwas südlicher als die Versuchsfeldachse verlaufend, zu folgern.

Literatur

- BACK, W., 1963: Preliminary Results of a Study of Calcium Carbonate Saturation of Ground Water in Central Florida. *Bull. Hydrologie scient.*, **8**, 3, 43—51.
- BACK, W., R. N. CHERRY, B. B. HANSHAW, 1966: Chemical Equilibrium Between the Water and Minerals of a Carbonate Aquifer. *Nat. Speleolog. Soc. Bull.*, **28**, 3, 119—126, Washington.
- BACK, W., J. G. ZÖTL, 1975: Application of Geochemical Principles, Isotopic Methodology, and Artificial Tracers to Karst Hydrology. In A. BURGER and L. DUBERTRET: *Hydrogeology of Karstic Terrains*, IAH, Paris.
- BAKALOWICZ, M., A. AMINOT, 1974: Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. III. Premiers résultats obtenus sur le système karstique du Baget durant le cycle hydrologique 1973. *Ann. Spéléol.*, **29**, 4, 484—493.
- BANKWITZ, P., 1966: Über Klüfte. II. Die Bildung der Klufffläche und eine Systematik ihrer Strukturen. *Geologie*, **15**, 8, 896—941, Berlin.
- BARTZ, J., W. KÄSS, 1972: Heizölversickerungsversuche in der Oberrheinebene. *Abh. geol. Landesamt Baden-Württemberg*, **7**, 65, Freiburg/Br.
- BATSCHKE, H. et al.; 1967: Vergleichende Markierungsversuche im Mittelsteirischen Karst 1966. *Steir. Beitr. zur Hydrogeologie*, **18/19**, 331—413, Graz.
- BATSCHKE, H., F. BAUER, H. BEHRENS, K. BUCHTELA, H. J. DOMBROWSKI, R. GEISLER, M. A. GEYH, H. HÖTZL, F. HRIBAR, W. KÄSS, J. MAIRHOFER, V. MAURIN, H. MOSER, F. NEUMAIER, J. SCHMITZ, W. A. SCHNITZLER, A. SCHREINER, H. VÖGG, J. ZÖTL, 1970: Kombinierte Karstwasseruntersuchungen im Gebiet der Donauversickerung (Baden-Württemberg) in den Jahren 1967 bis 1969. *Steir. Beitr. zur Hydrogeologie*, **55**, 5—165, Graz.
- BATSCHKE, H., H. MOSER, W. STICHLER, 1972: Messungen des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalts in Karstwässern. *Geol. Jahrb.*, C 2, 275—288, Hannover.
- BAUER, F., J. ZÖTL, A. MAYR, 1958: Neue karsthydrographische Forschungen und ihre Bedeutung für Wasserwirtschaft und Quellschutz. *Wasser und Abwasser*, 1—19, Wien.
- BAUER, F., 1967: Die Durchführung und Auswertung von Sporentriftversuchen. *Steir. Beitr. Hydrogeologie*, **18/19**, 249—266, Graz.
- BAUER, F., 1970: Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. *Steir. Beitr. zur Hydrogeologie*, **22**, 121—123, Graz.
- BAUER, F., 1972: Weitere Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. *Geol. Jahrb.*, C 2, Hannover.
- BAUER, F., V. RAJNER, D. RANK, 1975: Ungewöhnliche Tritiumverteilung im Niederschlag in den Ostalpen. *Naturwiss.*, **63**, 526, Wien.
- BEHRENS, H., 1967: Zur Anreicherung von radioaktiven Indikatoren. *Steir. Beitr. zur Hydrogeologie*, **18/19**, 79—86, Graz.
- BEHRENS, H., 1971: Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen bei ihrer Anwendung als hydrologische Markierungsstoffe. *Geol. Bavarica*, **64**, München.
- BEHRENS, H., 1973: Eine verbesserte Nachweismethode für Fluoreszenzindikatoren und ihre Anwendung zur Feststellung von Fließwegen im Grundwasser. *Z. Deutsch. Geol. Ges.*, **124**, 535—544, Hannover.
- BERNER, R. A., 1971: *Principles of Chemical Sedimentology*. McGraw-Hill, **240**, New York.

- BIDOVEC, F., 1968: The Investigation of the Karst Underground Water Systems and Hydrology. Actes IV. CIS, 1965, 3, 279—285, Ljubljana.
- BREZNIK, M., 1961: Akumulacija na Cerkniskem in Planinskem polju. Geologija, 7, 119—149, Ljubljana.
- BRODAR, S., 1952: Prispevek k stratigrafiji kraških jam Pivške kotline, posebej Parske globine. Geogr. vestnik, 24, 43—76, Ljubljana.
- BUCHTELA, K. et al., 1964: Vergleichende Untersuchungen an neueren Methoden zur Verfolgung unterirdischer Wässer. Die Wasserwirtschaft, 54, 260—270.
- BUCHTELA, K., 1970: Aktivierungsanalyse in der Hydrogeologie. Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, 22, 189—198, Graz.
- BUCHTELA, K., C. JOB, 1970: Vergleichende Markierungsversuche mit Indium-ÄdE und Kalisalz in einem Bergsturzgelände bei Badgastein. Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, 22, 199—206, Graz.
- BURDON, D. J. et al., 1963: The Use of Tritium in Tracing Groundwater in Greece. IAEA, Radioisotopes in Hydrology, 309—321, Wien.
- BUSER, S., 1965: Geološka zgradba južnega dela Ljubljanskega Barja in njegovega obrobja. Geologija, 8, 34—57, Ljubljana.
- BUSER, S., 1973: Tolmač k osnovni geološki karti, 1. Gorica. 1—50, Beograd.
- CHRISTOFER, N., 1975: The Use of Saturation Index and Potassium — Sodium Ratio as Indicators of Speleological Potential with Special Reference to Derbyshire. Trans. British Cave Research Ass., 2, 1, 29—34.
- ČADEŽ-NOVAK, N., 1973: Dosedanji sledilni poskusi v porečju Ljubljanice. Poročila, 1, 3. SUWT, Postojna.
- DANSGAARD, W., 1964: Stable Isotopes in Precipitation. Tellus, 16, 436—468.
- DECHANT, M., V. MAURIN, J. ZÖTL, 1958: Die Triftung gefärbter Sporen, eine neue Methode zur Untersuchung unterirdischer Karstgerinne. Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, 8/9, 44—51, Graz.
- DECHANT, M., 1959: Das Anfärben von Lycopodiumsporen. Beitr. zur Hydrogeologie, 10/11, 145—149, Graz.
- DELBROUCK, R., 1969: De l'influence des acides humiques sur la corrosion des roches calcaires. Actes 5e Congr. intern. spél., 3, 52/1—52/7, Stuttgart.
- DINGER, T., B. R. PAYNE, C. K. YEN, J. ZÖTL, 1972: Das Tote Gebirge als Entwässerungstypus der Karstmassive der nordöstlichen Kalkhochalpen (Ergebnisse von Isotopenmessungen). Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, 24, 71—109, Graz.
- DROST, W., H. MOSER, F. NEUMAIER, W. RAUERT, 1972: Isotopenmethoden in der Grundwasserkunde. Information pamphlet of the Euroisotop Office, Bruxelles.
- ERIKSSON, E., V. KHUNAKASEM, 1966: The Chemistry of Ground Waters. Ground Water Problems. Wenner-Gren Center International Symposium Series, 11, 89—122.
- FETH, J. H., C. E. ROBERTSON, W. L. POLZER, 1964: Sources of Mineral Constituents in Water from Granitic Rocks. Sierra Nevada, California and Nevada. US Geol. Survey Water-Supply Paper, 1535-I, 70.
- FRICHLIN, N., 1583: De lacu Circnitio ad Gasparum Godesch, Circnitianum, Carmen. Po Valvasor-ju, Bd. 4, 450.
- GAMS, I., P. HABIČ, 1961: Brezno pod Grudnom. Proteus, 24, 2, 58—60, Ljubljana.
- GAMS, I., 1963: Der Einfluß der Schichtenlage auf die Richtung der Höhlengänge und auf die Querschnitte in den längsten Höhlen Sloweniens. Dritter Intern. Kongr. Spél., 2, 215—219, Wien.
- GAMS, I., 1963a: Logarček. Acta carsologica SAZU, 3, 7—83, Ljubljana.
- GAMS, I., 1965: Aperçu sur l'hydrologie du Karst slovene et sur ses communications souterraines. Naše jame, 7, 51—60, Ljubljana.
- GAMS, I., 1965a: H kvartarni geomorfogenezi ozemlja med Postojnskim, Planinskim in Cerkniskim poljem. Geogr. vestnik, 37, 61—101, Ljubljana.
- GAMS, I., 1966: K hidrologiji ozemlja med Postojnskim, Planinskim in Cerkniskim poljem. Acta carsologica SAZU, 4, 5—54, Ljubljana.
- GAMS, I., 1970: Maksimiranost kraških podzemeljskih pretokov na primeru ozemlja med Cerkniskim in Planinskim poljem. Acta carsologica SAZU, 5, 171—187, Ljubljana.
- GAMS, I., 1974: Kras. Slovenska matica, 1—358, Ljubljana.
- GARRELS, R. M., C. L. CHRIST, 1967: Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Gauthier-Villars, 335, Paris.
- GÄRTNER, H., R. V. SCHNURREIN, 1964: Untersuchungsergebnisse zur Poliomyelitisvirus-Anreicherung aus Wasser und Abwasser. Arch. Hyg., 148, 183—187, Berlin.

- GAT, J., 1976: Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes in Hydrology. IAEA-Monograph (in preparation).
- GEOLOŠKI ZAVOD SRŠ, 1967, 1970: Osnovna geološka karta SFRJ, 1. Postojna, 1 : 100.000 s tolmačem. Beograd.
- GLOVER, R. R., 1972: Optical Brighteners — a new Water Tracing Reagent. Trans. Cave Research Group of Great Britain, 14, 2, 84—88.
- GOSPODARIČ, R., P. HABIČ, 1966: Črni potok in Lekinka v sistemu podzemeljskega odtoka iz Pivške kotline. Naše jame, 8, 1—2, 12—32, Ljubljana.
- GOSPODARIČ, R., 1968: Über einige klastische Sedimente im Slowenischen Karst. Actes IV. CIS (1965), 3, 139—146, Ljubljana.
- GOSPODARIČ, R., 1969: Probleme der Bruchtektonik der NW-Dinariden. Geol. Rundsch., 59, 1, 308—322, Stuttgart.
- GOSPODARIČ, R., 1970: Speleološke raziskave Cerkniskega jamskega sistema. Acta carsologica SAZU, 5, 111—169, Ljubljana.
- GOSPODARIČ, R., 1973: Preučevanje razpok s pomočjo njihovih struktur. 7. Congres Geol. Jug. (1971), 1, 485—502, Zagreb.
- GOSPODARIČ, R., 1976: Razvoj jam med Pivško kotlino in Planinskim poljem v kvarterju. Acta carsologica SAZU, 7, 8—139, Ljubljana.
- GRAD, K., 1962: O starosti fliša pri Kališah. Geologija, 7, 261—264, Ljubljana.
- GRUBER, T., 1781: Briefe hydrographischen und physikalischen Inhalts aus Krain. Izdal J. P. Kraus, 1—159, Wien.
- GUILBAULT, G. G., 1973: Practical Fluorescence Theory, Methods, Techniques. Marcel Dekker, New York.
- HABE, F., 1963: Hidrološki problemi severnega roba Pivške kotline. Treči jug. spel. kongres, 77—84, Sarajevo.
- HABE, F., 1968: Luka Čeč, odkritelj Postojnske jame. 150-let Postojnske jame, 1818 bis 1968, 9—17, Postojna.
- HABE, F., 1970: Predjamski podzemeljski svet. Acta carsologica SAZU, 6, 5—94, Ljubljana.
- HABE, F., 1972: Das Pivkabecken als hydrographisches Dach des Innerkrainer Karstes. Festschr. für Hans Tollner zum 70. Geburtstag, 229—248, Salzburg.
- HABIČ, P., 1968: Kraški svet med Idrijo in Vipavo, prispevek k poznavanju razvoja kraškega reliefa. Dela Inštituta za geografijo LAZU, 21, 1—239, Ljubljana.
- HABIČ, P., 1969: Javorniški podzemeljski tok in oskrba Postojne z vodo. Naše jame, 10 (1968), 47—54, Ljubljana.
- HABIČ, P., 1970: Hidrogeološke značilnosti Visokega krasa v odvisnosti od geomorfološkega razvoja. First Colloquium on Geology of Dinaric Alps, 2, 125—133, Ljubljana.
- HABIČ P., R. GOSPODARIČ, 1972: Die hydrologische Problematik und die Erkundung der Zusammenhänge unterirdischer Wässer im Karst der NW-Dinariden. Geol. Jb., C 2, 213—226, Hannover.
- HABIČ, P., 1974: Tesnenje požiralnikov in presihanje Cerkniskega jezera. Acta carsologica SAZU, 6, 35—56, Ljubljana.
- HACQUET, B., 1778: Oryctographia Carniolica oder physikalische Erdbeschreibung des Herzogthums Krain, Istrien und zum Theil der benachbarten Länder. J. S. I. Breitkopf, 1, XVI, 162, Leipzig.
- HALEVY, E., A. NIR, 1962: The Determination of Aquifer Parameters with Aid of Radioactive Tracers. J. geophys. Res., 67, 2403—2409.
- HARDER, H., W. FLEHMIG, 1970: Quarzsynthese bei tiefen Temperaturen. Geochim. Cosmochim. Acta, 34, 295—305.
- HARMON, R. S., J. W. HESS, R. W. JACOBSON, E. T. SHUSTER, C. HAYGOOD, W. B. WHITE, 1972: Chemistry of Carbonate Denudation in North America. Trans. Cave Research Great Britain, 14, 2, 96—103.
- HERAK, M., L. T. STRINGFIELD, 1972: Karst. Important Karst Regions of the Northern Hemisphere. Elsevier Publ. Comp., Amsterdam—London—New York.
- IAEA, 1968: Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. Vienna.
- JENKO, F., 1959: Hidrologija in vodno gospodarstvo krasa. Državna založba Slovenije, 1—237, Ljubljana.
- KÄSS, W., 1967: Salzversuche mit Kalisalz. Steir. Beitr. zur Hydrogeol., 18, 19, 275 bis 279, Graz.
- KÄSS, W., 1972: Grundwasser-Markierungsversuche im Pleistozän der Freiburger Bucht. Geol. Jb., C 2, 119—151, Hannover.

- KÄSS, W., 1972a: Die Versickerung der oberen Donau, ihre Erforschung und die Versuche 1969. Geol. Jb., C 2, 13—18, Hannover.
- KIRCHER, A., 1665: *Mundus subterraneus*. 487, Amsterdam.
- KNUTSSON, G. et al., 1963: Field and Laboratory Tests of chromium-51-EDTA and Tritium Water as a Double Tracer for Groundwater Flow. IAEA, *Radioisotopes in Hydrology*, 347—365, Wien.
- KNUTSSON, G., 1967: Tracing Groundwater Flow in Sand and Gravel Using Radioactive Isotopes. *Steir. Beitr. zur Hydrogeologie*, 18/19, 13—31, Graz.
- KOSSMAT, F., 1905: Erläuterungen zur geologischen Karte Haidenschaft und Adelsberg. 1—56, Wien.
- KOSSMAT, F., 1913: Die adriatische Umrandung in der alpinen Faltenregion, *Mitt. Geol. Ges.*, 6, 61—163, Wien.
- KOSSMAT, F., 1916: Die morphologische Entwicklung der Gebirge im Isonzo und oberen Savegebiet. *Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin*, 9, 576—602; 10, 645—675, Berlin.
- KRIVIC, P., A. PRAPROTNIK, 1973: Jamsko potapljanje v Sloveniji. *Naše jame*, 14 (1972) 3—14, Ljubljana.
- KYRLE, G., 1928: Kombinierte Chlorierung von Höhlengewässern. *Speläologische Monographien*, 12, Wien.
- LIEPMANN, F., 1973: *Sedimentary Carbonate Minerals*. Springer-Verlag, 228, Berlin.
- MARGRITA, R., J. EVIN, J. FLANDRIN, H. PALOC, 1970: Contribution des mesures isotopiques à l'étude de la Fontaine de Vaucluse. *Isotope Hydrology IAEA*, 333—347, Vienna.
- MARTEL, E. A., 1894: *Les abimes*. Libr. Ch. Delgrave, 1—578, Paris.
- MARTIN, R., A. THOMAS, 1974: An Example of Use of Bacteriophage as a Groundwater Tracer. *J. of Hydrology*, 23, 73—78.
- MAURIN, V., J. ZÖTL, 1959: Die Untersuchung der Zusammenhänge unterirdischer Wässer mit besonderer Berücksichtigung der Karstverhältnisse. *Steir. Beitr. Hydrogeologie*, 10/11, 5—184, Graz.
- MAURIN, V., J. ZÖTL, 1964: Karsthydrologische Untersuchungen im Toten Gebirge. *Österr. Wasserwirtschaft*, 16, 112—123, Wien.
- MAURIN, V., 1967: Vorbereitung und Organisation größerer Markierungsversuche zur Verfolgung unterirdischer Wässer. *Steir. Beitr. Hydrogeologie*, 18/19, 311—320, Graz.
- MAURIN, V., J. ZÖTL, 1967: Vergleichende Markierungsversuche im Mittelsteirischen Karst 1966. *Steir. Beitr. Hydrogeologie*, 18/19, 1966/67, 331—407, Graz.
- MELIK, A., 1928: Pliocensko porečje Ljubljaniče. *Geogr. vestnik*, 4, 69—88, Ljubljana.
- MELIK, A., 1952: Zasnova Ljubljaničinega porečja. *Geogr. zbornik*, 1, 5—31, Ljubljana.
- MELIK, A., 1955: Kraška polja Slovenije v pleistocenu. *Dela Inštituta za geografijo SAZU*, 7, 3, Ljubljana.
- MICHLER, I., 1955: Rakov rokav Planinske jame. *Acta carsologica SAZU*, 1, 75—90, Ljubljana.
- MISEREZ, J. J., 1973: *Géochimie des eaux du karst jurassien (Contribution physico-chimique à l'étude des altérations)*. Thèse, 1—313, Neuchâtel.
- MISEREZ, J. J., 1975: Variations chimiques de sources karstiques et bilan de l'altération. Exemple de l'Areuse et de la Noiraigue, Jura neuchâtelois. *Ann. de Spél.*, 30/2, 241—254.
- MITCHELL, R., 1972: *Waterpollution Microbiology*. Wolea Interscience.
- MLAKAR, I., 1969: Krovna zgradba idrijsko-žirovskega ozemlja. *Geologija*, 12, 5—72, Ljubljana.
- MLAKAR, I., P. HABIČ et al., 1972: Divje jezero. *Kulturni in naravni spomeniki Slovenije. Zbirka vodnikov*. 1—30, Ljubljana.
- MOLINARI, J., J. GUIZERIX, 1967: Application de la méthode d'intégration sur charbon actif dans les eaux. IAEA, *Radioisotopes in Hydrology*, 653—667, Wien.
- NAGEL, J. A., 1748: Beschreibung deren auf allerhöchsten Befehl Ihro Röm. Kayserl. königl. Mayst. Nationalbibl. Wien, Handschr. Nr. 7854.
- NOVAK, D., 1969: Bacteriological Properties of Underground Waters in Slovenian Karst. *Nova proizvodnja*, 1—2, 26—27, Ljubljana.
- OPAČIĆ, S., D. MARKIČ, 1974: Epidemic of Virus Hepatitis at Vrhnika in 1971—1972. *Epidemiological Analysis. Zdravstveni vestnik*, 43, 15—17, Ljubljana.
- OSOLE, F., 1968: Jamski sedimenti Notranjsko Primorskega krasa kot posledica pleistocenskih klimatskih nihanj. Prvi kolokvij o geologiji Dinaridov (1966), 1, 197—201, Ljubljana.

- PAYNE, B. R., 1967: Contribution of Isotope Technique in the Study of Some Hydrological Problems. *Geophys. Monogr.*, **11**; Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle, AGU, 62—68, Washington.
- PERLEGA, W., 1976: Der Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen mittels Aktivkohle. Communication, 3. SUWT, Ljubljana.
- PITTY, A. F., 1968: Some Notes on the Use of Calcium Hardness Measurements in Studies of Cave Hydrology. *Trans. Cave Research Gr., G. B.*, **10**, 2, 115—120.
- PLACER, J., J. ČAR, 1975: Rekonstrukcija srednjetriadnih razmer na idrijskem prostoru. *Geologija*, **18**, 197—209, Ljubljana.
- PLENIČAR, M., 1954: Prispevek h geologiji Cerkniškega polja. *Geologija*, **1**, 111—119, Ljubljana.
- POCHON, M., 1974: Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse. Phénomènes d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide. Thèse. 325, Neuchâtel (to be published).
- PUC, M., 1964: Lippertova in Najdena jama, Naše jame, **5** (1963), 37—43, Ljubljana.
- PUC, M., 1965: Nova odkritja v Najdeni jami. Naše jame, **6** (1964), 11—17, Ljubljana.
- PUTICK, W., 1887: Die unterirdischen Flußläufe von Innerkrain. *Mitt. K. K. Geogr. Ges. Wien*, **XXX**, 283, Wien.
- PUTICK, W., 1888: Die Ursachen der Überschwemmungen in den Kesselthälern von Innerkrain. *Wochenschr. österr. Ing. Arch.-Vereines*, **34/35**, 3—10, Wien.
- RAKOVEC, I., 1956: Geološka zgodovina ljubljanskih tal. *Zgodovina Ljubljane*. 11—207, Ljubljana.
- RAKOVEC, I., 1956: Pregled tektonske zgradbe Slovenije. Prvi jug. geol. kongres (1954), 73—83, Ljubljana.
- RAUERT, W., 1971: Über Messungen von Tritium und Kohlenstoff-14 bei hydrologischen Untersuchungen. *Geologica Bavarica*, **64**, 36—74.
- ROCHAT, J., J. ALARY, J. MOLINARI, R. CHARRIERE, 1975: Séparations physico-chimiques de colorants xauténiques utilisés comme traceurs. *J. Hydrology*, **26**, 277—293.
- ROQUES, H., 1963: Sur la répartition du CO₂ dans les karsts (2me mémoire). *Ann. de Spél.*, **18**, 2, 141—184.
- ROTH, E., L. MERLIVAT, G. COURTOIS, R. CORMIET, J. GUIZERIX, R. MARGRITA, J. MOLINARI, R. GRAS, 1972: Application des isotopes stables et radioactifs dans le domaine de l'hydrologie et de la sédimentologie. *Peaceful Uses of Atomic Energy, IAEA*, **14**, 425—440, Vienna.
- RUS, J., 1925: Morfogenetske skice iz notranjskih strani. I. in II. del. *Geogr. vestnik*, **1**, 2, 29—33, 105—112, Ljubljana.
- SCHMIDL, A., 1854: Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas. Gedruckt. Leop. Sommer, 1—316, Wien.
- SCHMITZ, J. et al., 1972: Die Anwendung der Neutronenaktivierungsanalyse in Hydrologie. *Gas-Wasserfach, Wasser/Abwasser*, **113**, 318.
- SCHNEIDER, J., R. GEISLER, 1973: Spurenelementbestimmung in verschiedenen natürlichen Wasserproben mittels Neutronen-Aktivierungsanalyse. *Z. Anal. Chem.*, **267**, 270—273, Wien.
- SCHNEWEIS, K. E., G. STIFTER, 1971: Virusnachweis im Wasser mit Hilfe von Membranfiltern. *Zbl., Bakt., L. Abt. Orig.*, **216**, 128—139.
- SHUSTER, E. T., W. B. WHITE, 1971: Seasonal Fluctuations in the Chemistry of Limestone Springs: A Possible means for Characterizing Carbonate Aquifers. *Jour. Hydrology*, **14**, 2, 93—128.
- SIEGENTHALER, U., G. OESCHGER, E. TONGIORGI, 1970: Tritium and Oxygen-18 in Natural Water Samples from Switzerland. *Isotope Hydrology, IAEA*, 373—385, Vienna.
- SIEGENTHALER, U., 1971: Sauerstoff-18, Deuterium und Tritium im Wasserkreislauf, Beiträge zu Meßtechnik, Modellrechnung und Anwendung. Universität Bern, Thesis.
- SMITH, D. B., W. E. CLARK, 1963: An Investigation of the Hydraulics of an Underground Pool with Iodine-131. *IAEA, Isotopes in Hydrology*, 77—89, Wien.
- STANDARD Methods for the Examination of Water and Waste-water, 13th Edition, 1971, Washington.
- STEINBERG, F. A., 1758: Gründliche Nachricht von dem in den Inner-Krain gelegenen Zirknitzer See. A. E. Reichhardtin, 1—235, Ljubljana.
- ŠERCELJ, A., 1966: Pelodne analize pleistocenskih in holocenskih sedimentov. *Razprave SAZU*, **9**, 431—472, Ljubljana.
- ŠERCELJ, A., 1968: Rezultati pelodnih analiz vzorcev vrtin pri Logatcu. Inštitut za raziskovanje krasa, Postojna, rokopis.

- SERKO, A., 1946: Barvanje ponikalnic v Sloveniji. Geogr. vestnik, **18**, 1—4, 125—139, Ljubljana.
- SERKO, A., 1949: Kotlina Rakov Škocjan. Geogr. vestnik, **20—21**, 195—202, Ljubljana.
- SERKO, A., 1951: Ljubljana (geološki in kraški opis). Geogr. vestnik, **23**, 3—16, Ljubljana.
- ŠUŠTERŠIČ, F., M. PUC, 1972: Kraško podzemlje ob severovzhodnem kotu Planinskega polja. Acta carsologica SAZU, **5**, 205—270, Ljubljana.
- ŠUŠTERŠIČ, F., 1973: K problematiki udornic in sorodnih oblik Visoke Notranjske. Geogr. vestnik, **45**, 17—86, Ljubljana.
- TIMEUS, G., 1911: Sui mezzi d'indagine nell'idrologia sotterranea. Boll. Soc. Adr. Sci. Nat., **15**, 2, 217—231, Trieste.
- TIMEUS, G., 1924: Le indagini sull'origine delle acque sotterranee con i metodi fisici, chimici, biologici. Boll. Soc. Adr. Sci. Nat., 191—293, Trieste.
- TROMBE, F., 1952: Traité de spéléologie. Payot, 1—376, Paris.
- TOUSSAINT, B., 1971: Hydrogeologie und Karstgenese des Tennengebirges (Salzburger Kalkalpen). Steir. Beitr. Hydrogeologie, **23**, 5—115, Graz.
- USDOWSKI, H. E., 1967: Die Genese von Dolomit in Sedimenten. Springer-Verlag, 228, Berlin.
- VALVASOR, J., 1689: Die Ehre des Herzogthums Crain. Bd. 1—4, Laybach.
- VICENTINI, R., 1875: Bonificio della valli di Laas, Zirknitz, Planina e Lubiana. Arhiv Savske elektrarne, Ljubljana.
- VORNATSCHEK, J., 1962: Einige Bemerkungen zur Sporentrift. Die Höhle, **13**, 82—84, Wien.
- WHITE, W. B., 1967: Modifications of Fluorescein Dye Groundwater Tracing Techniques. Steir. Beiträge z. Hydrogeologie, **18/19**, 151—158, Graz.
- World Health Organization, 1971: International Standards for Drinking Water. Virological Examination, 26—27, Geneva.
- ZOJER, H., J. ZÖTL, 1974: Die Bedeutung von Isotopenmessungen im Rahmen kombinierter Karstwasseruntersuchungen, dargestellt an einem Beispiel aus dem Mittelsteirischen Karst. Österr. Wasserwirtschaft, **26**, 62—70, Wien.
- ZÖTL, J., 1957: Neue Ergebnisse der Karsthydrologie. Erdkunde, **9**, 107—117, Bonn.
- ZÖTL, J., 1974: Karsthydrogeologie. Springer-Verlag, 1—291, Wien.

SLEDENJE PODZEMELJSKIH VODA

Raziskave v Sloveniji 1972—1975

A. SLEDENJE KRAŠKIH VODA

1. Uvod

Metode sledenja podzemeljskih voda se postopoma izpopolnjujejo tako v izbiri najprimernejših snovi, kot tudi v natančnosti detekcije sledil in interpretaciji rezultatov. Uspešnost raziskovanja kraških voda pa je zelo odvisna od organiziranega sodelovanja strokovnjakov različnih znanstvenih disciplin. K hitrejši izmenjavi izkušenj prispevajo strokovne publikacije. Po izkušnjah mednarodnih srečanj v Gradcu 1966 in v Freiburgu 1970 se je krog strokovnjakov iz Jugoslavije, Avstrije, Nemčije in Švice lotil predhodnih raziskav in obsežnega sledilnega poskusa na klasičnem krasu v območju kraške Ljubljane.

Prva tehtnejša spoznanja o povezanosti glavnih ponorov iz izvirov v kraškem porečju Ljubljane je pred skoraj 100 leti objavil W. PUTICK (1887). S poznejšimi sledenji so bile potrjene in dopolnjene njegove domneve. Z raziskavami v letih 1972 do 1975 ter s sledilnim poskusom leta 1975 pa smo dobili vrsto novih spoznanj, ki so podana v naslednjih poglavjih. Zbrani so tudi rezultati sledilnega poskusa podtalnice v Savinjski dolini, ki je bil v okviru priprav na 3. mednarodni simpozij o sledenju podzemeljskih voda izveden že leta 1973. Vsem, ki so sodelovali pri tej publikaciji se v imenu redakcije najlepše zahvaljujemo.

2. Raziskave v porečju Ljubljane

2.1. Prikaz raziskovalnega območja

2.1.1. Geomorfološke in hidrografske značilnosti (P. HABIČ)

Kraško porečje Ljubljane se poleg Tržaškega krasa uvršča med klasične kraške predele ne le v Jugoslaviji, temveč tudi v Evropi (M. HERAK & T. V. STRINGFELD 1972). To območje je že pred več stoletji vzbudilo pozornost s presihajočim Cerkniškim jezerom, ki so ga opisovali številni naravoslovci (N. FRISCHLIN 1583, A. KIRCHER 1665, J. V. VALVASOR 1689, J. A. NAGEL 1748, E. A. STEINBERG 1761, B. HACQUET 1778, T. GRUBER 1781 in drugi). Posebnost tega območja so tudi ponikalnice Pivka, Unica in Logašnica, dalje kraška polja ter številne jame, ki so jih med prvimi opisali A. SCHMIDL (1854), W. PUTICK (1887), E. A. MARTEL (1893). Turistična privlačnost tega krasa pa se je povečala predvsem z odkritjem Postojnske jame (F. HABE 1968). Skoraj stoletna prizadevanja za odpravo poplav na kraških poljih (R. VICENTINI 1875, W. PUTICK 1888), niso bila posebno uspešna. Pa tudi zadrževanje voda na kraških poljih brez obsežnih tehničnih del ni izvedljivo (F. JENKO 1959, M. BREZNIK 1961, P. HABIČ 1974).

Porečje Ljubljane (pril. 1, sl. 1) se razteza v skrajnem NW delu Dinarskega krasa in pripada donavskemu delu črnomskega porečja. Razvodja z jadranskimi pritoki na kraških planotah ni mogoče točno opredeliti, prav tako pa tudi

ne s sosednjo Krko in Kolpo. Velikost prispevnega območja kraške Ljubljanice je zato le ocenjena na 1000 do 1200 km². Orografsko je to površje precej razgibano, saj znaša višinska razlika med najvišjim Snežnikom (1796 m) in izviri Ljubljanice pri Vrhniku (291 m) kar 1505 m.

V geomorfološkem pogledu so značilne predvsem visoke kraške gozdnate in nenaseljene planote v razvodnem predelu, sredi med njimi pa se postopoma proti izvirovni znižuje naseljeno in prometno pomembno osrednje podolje, v katerem so v stopnjah razporejena kraška polja z edinimi površinskimi vodami-ponikalnicami, ki jih predvsem napajajo kraške vode, deloma pa tudi manjši površinski pritoki.

V reliefnih oblikah in ostankih fluvialnih sedimentov so ohranjeni sledovi nekdanjih površinskih tokov, ki so se s postopnim zakrasevanjem prestavili v podzemlje. Prvotno porečje Ljubljanice se je na račun zakrasevanja tudi skrčilo, ker je del voda začelo odtekati podzemeljsko v sosednja porečja (KOSSMAT 1916, A. MELIK 1952, P. HABIČ 1968). Razvoj površja in kraškega podzemlja je delno že pojasnjen (A. MELIK 1955, S. BRODAR 1952, I. GAMS 1963, 1965 a, F. OSOLE 1961, R. GOSPODARIČ & P. HABIČ 1966, R. GOSPODARIČ 1970 in 1976). Slednje razprave so omejene predvsem na območje Postojnske kotline, Planinskega in Cerkniškega polja, dragocene podatke o razvoju pa so prispevale tudi geološke in paleobotanične raziskave na območju Ljubljanskega barja (I. RAKOVEC 1956, A. ŠERCELJ 1966).

Glavne poteze v razvoju krasa so prikazane v podolžnem prerezu osrednjega dela porečja med mlado pleistocensko tektonsko udorino Ljubljanskega barja ter Postojnsko kotlino in Cerkniškim poljem (sl. 2). Zakrasevanje se je še posebej uveljavilo s poglobljanjem Ljubljanskega barja, prvotna površinska in hidrografska mreža je na območju Logaško-rovtarske planote razpadla v več manjših ponikalnic, kar je vplivalo na nadaljnji razvoj Logaškega polja (sl. 3). Obenem je prišlo do poglobitve Planinskega polja, na čigar obrobju so speleološke raziskave (W. PUTICK 1887, I. MICHLER 1955, I. GAMS 1963 a, M. PUC 1965, F. ŠUŠTERŠIČ & M. PUC 1972, R. GOSPODARIČ 1970, 1976) ugotovile tri najbolj izrazite etaže pritočnih in odtočnih kanalov, od katerih je aktivna predvsem najnižja, srednjo pa le občasno zalijejo ponorne vode. Starejši podzemeljski rovi so na več mestih porušeni in zasuti, na površju pa jih nakazujejo številne udornice, zlasti neposredno nad izviri Ljubljanice (sl. 4). Položaj izvirov in površinskih voda v zaledju je podrobno prikazan na priloženi hidrografski karti (pril. 1). Pred začetkom podrobnejših raziskav in kombiniranega sledenja v okviru 3. mednarodnega simpozija o sledenju podzemeljskih voda, je bilo mogoče sestaviti tudi shematični prikaz razporeda podzemeljskih in površinskih voda kot ga prikazuje sl. 5. V hidrološkem pogledu je poleg zvez pomembne še ne dovolj pojasnjeno razmerje med površinskimi kraškimi vodami, ki jih je mogoče izmeriti v izviri Ljubljanice in na površju v njihovem kraškem zaledju.

2. 1. 2. Geologija in hidrogeologija (S. BUSER, F. DROBNE, R. GOSPODARIČ)

Porečje Ljubljanice je geološko razmeroma dobro preiskano (n. pr. F. KOSSMAT 1905, S. BUSER 1965, 1973, M. BREZNIK 1961, K. GRAD 1962, M. PLENIČAR 1954, 1970, I. MLAKAR 1969, L. PLACER in J. ČAR 1975). V hidrogeološkem oziru pa je bilo treba z nekaterimi podrobnejšimi raziskavami še izpopolniti obstoječe znanje. Ozemlje kraškega porečja Ljubljanice pripada večinoma Zunanjim Dinaridom, kjer so razvite plitvomorske karbonatne kamnine jure in krede. Te

imajo tod tudi največji obseg in so tudi najbolj zakrasede. Precejšnji obseg zajemajo tudi zgornjetriasni dolomiti, manjši obseg pa ostale triasne in permokarbonske kamnine.

Tektonska sestava ozemlja kaže krovno zgradbo na zahodni in blokovno zgradbo na vzhodni strani porečja (F. KOSSMAT 1913, I. RAKOVEC 1956, R. GOSPODARIČ 1969, S. BUSER 1965, I. MLAKAR 1969). Hidrogeološko je pomembna cona idrijskega preloma v NW-SE smeri, kjer so dislocirani kraški predeli jurskih in krednih apnencev, med nje pa je vrinjen zgornjetriasni dolomit kot delna hidrogeološka bariera. Ob tej coni so kraška polja Loško, Cerkniško, Unško, Planinsko in Logaško polje. Ob idrijskem in njemu vzporednih prelomih so dislocirani tudi tektonski pokrovi zahodno od Logatca.

Na najbolj pogost sistem prelomov NW-SE in NE-SW v Logaški planoti so pokazale tudi posebne mikrotektonske preiskave (P. BANKWITZ 1966, R. GOSPODARIČ 1973). V jurskem in krednem apnencu (sl. 6) analizirane razpoke so razporejene podobno kot prelomi. Glede hidrogeološke funkcije ruptur pa se kažejo nekatere specifičnosti v južnem obrobju Ljubljanskega barja in ob Planinskem polju (sl. 7 in 8).

Hidrogeološke enote osrednjega dela porečja se ujemajo s tektonskimi enotami, opraviti imamo s štirimi skupinami hidrogeološko podobnih kamnin in sicer:

- dobro propustne kamnine s kraško poroznostjo med Vrhniko, Planino, Logatcem in Cerknico;
- srednje propustne kamnine z razpoklinsko poroznostjo v dolomitu med Rakekom in Cerknico ter zahodno od Vrhnike;
- slabše propustne do nepropustne kamnine v območju krovne zgradbe med Idrijo, Logatcem in Vrhniko ter pri Borovnici in
- usedlinami z medzrnsko in kapilarno poroznostjo na Ljubljanskem barju.

2. 2. Predhodne raziskave 1972—1975

2. 2. 1. Hidrološke raziskave (K. ŽIBRIK, F. LEWICKI, A. PIČININ)

Specifičnost kraškega vodnega režima se odraža v različnem ponikanju vode, v časovno in prostorsko neznanem zadrževanju vode v podzemlju, največkrat pa tudi v neznanem padavinskem zaledju posameznih izvirov. To preprečuje ugotavljanje odtočnih vrednosti in uporabo korelativnih metod, na isti način kot v nekraškem svetu. Kraško porečje Ljubljanice je zaradi vrste ponikalnic in stopnjaste razporeditve kraških polj ter različne vodne komunikacije med njimi še posebej zapleteno. Spoznavanje vodnih razmer je v veliki meri — odvisno od gostote opazovalne mreže in posebnih metod določevanja vodnih količin.

V porečju Ljubljanice je bila v okviru predhodnih raziskav opazovalna mreža zgoščena, celotno kraško porečje pa razdeljeno na 8 hidroloških računskih območij (sl. 9). Na podlagi karakterističnih pretokov v okviru teh območij (tab. 1) so izračunani poprečni hidrološki parametri (tab. 2). Celotne vodne količine po posameznih hidroloških območjih (sl. 10) in njihov delež v izvirih Ljubljanice za obdobje 1972—1975 so prikazani v tab. 3. Posebej je prikazano razmerje med ponornimi in izvirnimi vodami ter med odtokom iz Cerkniškega jezera neposredno v izvire Ljubljanice in posredno preko Rakovega Škocjana ter Planinskega polja (tab. 4, 5). Razpored količin voda v posa-

meznih izviri Ljubljance je podan v tabeli 6. Kraške površinske in podzemeljske retenzije se odražajo v 2—3 krat nižjih konicah visokih voda, kot pri enako velikih nekraških vodotokih. Vpliv krasa na razmerje med nizkimi, srednjimi in visokimi pretoki po pomembnejših porečjih v Sloveniji pa je prikazan v tabeli 7. Kraški vodni režim se pri vsakem vodotoku nekoliko razlikuje, kar je razvidno iz linije trajanja pretokov. Obravnavana vodna bilanca kaže nekatera nerešena vprašanja velikosti celotnega kraškega porečja, problematična pa je tudi notranja razdelitev na hidrološka območja, kar bo treba preveriti in izpopolniti s preučevanjem nizkih in visokih voda.

Za kombinirano sledenje so bile določene kot najugodnejše srednje vode, ko ima Unica (3.5) 23,2 m³/s in Ljubljanka (1.02) 25 m³/s, takšne razmere pa se najpogosteje javljajo med marcem in junijem.

2. 2. 2. Meteorološke raziskave (F. BERNOT)

Slovenija spada v prehodno klimatsko področje med kontinentalnim in mediteranskim klimatom. Prehodnost pride najbolj do izraza prav v porečju Ljubljance, njen vzrok pa so takoimenovana „Postojnska vrata“. Predvsem v hladni polovici leta so glavne dinarske planote Snežnik, Javorniki, Nanos, Hrušica in Trnovski gozd dokaj ostra meja med notranjo Slovenijo, s skoraj kontinentalno ostrimi zimami in toplejšim Primorjem z milejšimi zimami.

V porečju Ljubljance se normalno uveljavljata dva maksimuma in dva minimuma padavin. Primarni maksimum padavin je jeseni (oktober, november), sekundarni maksimum pa na prehodu pomladi v poletje (maj, junij). Primarni padavinski maksimum se dosledno pojavlja februarja, sekundarni pa avgusta oziroma julija, kar je značilno za mediteransko klimo.

Leto 1972 je bilo hladno in prekomerno namočeno, kar kažejo temperaturni poprečki in letne višine padavin v primerjavi z dolgoletnimi vrednostmi v obdobju 1926—1965. Leto 1973 je bilo v splošnem prehladno, padavine pa zelo spremenljive. Leto 1974 je bilo pretoplo, padavine pa različne po vsem porečju (sl. 11, 12, 13). Leto 1975 je bilo tudi pretoplo, padavine pa po vsem porečju enakomerne.

2. 2. 3. Speleohidrološke raziskave (P. HABIČ)

Speleološko je kras v porečju Ljubljance razmeroma dobro raziskan. Znanih je več sto jam in brezen. Skupna dolžina podzemeljskih vodnih in suhih rovov znaša več kot 50 km, od tega pa je v predelu med Planinskim poljem in Ljubljanskim barjem znanih le 8 km rovov. Podori in vodni sifoni zapirajo pot jamarjem globlje v notranjost. Ob ponikalnicah na Logaško-rovtarski planoti so le krajše ponorne jame. Med več kot 150 požiralniki na Planinskem polju pa sta prehodni le dve špranjasti ponorni jami v dolžini 100 do 170 m. Do podzemeljskih voda na odtočni strani Planinskega polja so prišli jamarji le na štirih krajih: V Mačkovici, Logarčku, Najdeni jami in Gradišnici, poleg tega pa je kraška voda dosegljiva tudi v Grudnovem breznu ob vznožju Hrušice (sl. 14, 15, 16). Z občasnimi opazovanji vodnih gladin v teh jamah je bilo mogoče spoznati obseg nihanja vodne gladine in njeno odvisnost od pretokov Unice na Planinskem polju (sl. 17), pa tudi razlike v gladinah med posameznimi jamami. Največja nihanja vode (preko 50 m) so ugotovljena v Gradišnici in v Grudnovem breznu (preko 60 m), medtem ko so razlike vodnih gladin v jamah bliže

Planinskega polja nekoliko manjše. Ob suši se v jamah zadržujejo ujete vode v sifonskih kotanjah nad najnižjimi tokovi, ob visokih vodah pa verjetno podori in manj propustne cone nekje v predelu med Gradišnico in izviri Ljubljaniče zajezujejo odtok ter vplivajo na zastajanje vode v podzemlju pa tudi na površju. V manjši meri je takšno zastajanje pogojeno s podori tudi v neposrednem zaledju izvirov Ljubljaniče (sl. 18). Z umetnim zajezevanjem kot ga predstavljajo zapornice za žage in mlino ob izviroh, pa je možno vplivati na pretoke med posameznimi izviri.

2. 2. 4. Hidrokemijske preiskave (MARTINA ZUPAN, M. KOLBEZEN)

Hidrokemijske preiskave obravnavajo kemijsko sestavo, fizikalno-kemijske lastnosti in kvaliteto vode ter naravna ozadja nekaterih snovi, ki so bila predvidena za iniciranje. S kontrolno kemijskimi in fizikalno kemijskimi analizami 31 serij vzorcev vseh pomembnejših izvirov in ponorov so ugotovljeni številni podatki, ki nakazujejo tudi podzemeljske zveze med ponorno in izvirno vodo, posebej med Planinskim in Cerkniskim poljem ter izviri Ljubljaniče.

Med fizikalno kemijskimi parametri so najbolj primerljive totalne trdote ponorne in izvirne vode (sl. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25). Kvaliteta vode je najboljša pri srednjih, visokih srednjih in nizkih srednjih vodah, tedaj ko ni padavin. Naravno ozadje kloridov in kalija je zmerno pri ustaljenih vremenskih razmerah. Med organskimi barvili pa ima največje ozadje tinopal ($1,15 \text{ mg/m}^3$) in sicer ob izdatnih padavinah, ki sledijo sušnemu obdobju. Ostalih fluorescenčnih barvil pa kraške vode skoraj nimajo, razen uranina, ki se občasno pojavlja tudi v koncentracijah do $0,39 \text{ mg/m}^3$.

2. 2. 5. Dopnilo k geokemiji vode v kraškem sistemu Ljubljaniče (J. J. MISEREZ)

Prispevek obravnava vlogo in obnašanje pomembnih in spremljajočih kationov Ca, Mg, K, Sr in organskih humuznih snovi v kraških vodah (sl. 26), nadalje podaja kovariacije Ca-Mg in Na-K-Sr glede na onesnaženje kraških voda (sl. 27). Podano je tudi ravnotežno stanje teh ionov glede na karbonate in filo-silikate (sl. 28). S širšega vidika je obravnavana vloga CO_2 in humusnih snovi v procesu kraškega raztapljanja ter sezonsko in občasno spreminjanje kemizma kraške vode (sl. 29, 30, 31).

Kemizem vode kraškega zbirnega območja Ljubljaniče je odvisen od podnebja, geologije in geokemije prsti in kamnin, od hidrogeoloških pogojev, človekove aktivnosti, termodinamike in kinetike vodnih raztopin v stiku z minerali. Glede vzorčevanja je poudariti, da mesečno vzorčevanje zadošča le za spoznavanje prostorskih variacij tekom leta, občasne variacije pa je možno spoznati le z zveznim vzorčevanjem ali pa vzorčevanjem v intervalih.

2. 2. 6. Rezultati meritev vsebnosti deuterija, kisika 18 in tritija v vodnih vzorcih poskusnega ozemlja v dobi 1972—1975 (H. MOSER, V. RAJNER, D. RANK, W. STICHLER)

Tovrstne raziskave so bile na ozemlju porečja Ljubljaniče opravljene prvič v takem obsegu. Namen je bil spoznati vsebnost teh izotopov v kraški vodi ter spoznati razmerja do padavin ter eventuelne zveze med ponorno in izvirno vodo. Tehnika preučevanja in koristnost preučevanja na kraških predelih je

znana iz Švice, Turčije, Avstrije in Nemčije (IAEA 1968, DROST et al. 1972, ZÖTL 1974, PAYNE 1967, GAT 1976, SIEGENTHALER et al. 1970, 1971, MARGITA et al. 1970, ROT et al. 1972, ZOJER in ZÖFL 1974, DINCER et al. 1972). Koristila so tudi spoznanja iz podobnih raziskav v območju ponikanja Donave (BATSCHKE et al. 1970, 1972).

Analitični podatki so prikazani na prilogi II. Razmerje med padavinami in vsebnostjo D, O-18 in tritija pa na slikah 33 do 37. Posebno visoka vsebnost tritija v maju 1974 je ugotovljena tudi drugod po Evropi (F. BAUER, V. RAJNER, D. RANK 1975) in je povezana z nenormalnimi atmosferskimi pogoji (sl. 32). Iz podrobnih podatkov je bilo domnevano, katere izvorne in ponorne vode bile lahko povezane (sl. 39). Analize so pokazale več zanimivih posebnosti glede zveze med močnimi padavinami in visokimi δD vrednostmi septembra 1973, med visoko vsebnostjo tritija v izdatnih padavinah maj/junij 1974 (sl. 43), razmerje med δD in $\delta O-18$ vsebnostmi, ki nakazuje povišano evaporacijo (sl. 41), vsebnost tritija pri nizki vodi avgusta 1973 in o količini tritija v termalnem izviru 1. 46, ki kaže na 16.350 ± 400 let staro vodo. Zanimivi rezultata dajejo napotke za nadaljnje tovrstne raziskave.

2. 2. 7. Bakteriološke preiskave (MARJANA TRATNIK)

V letih 1974 in 1975 po standardih (1970, 1971) preiskane serije vzorcev kraške Ljubljance so pokazale slabo higiensko kakovost teh voda. Slabo kakovost kažeta preseženo MPN število koliformnih bakterij in celokupno število aerobnih bakterij ter nadalje še prisotnost fekalnega tipa *Escherichia coli*, *Proteus* sp., sulfitorreduktivnih klostridijev, *Enterococcus* in *Pseudomonas aeruginosa* (R. MITCHELL 1972, D. NOVAK 1969). V treh vzorcih vode smo našli celo enteropatogene *E. coli* (055 : K 59, 0146 : K ? in 028 : K 73).

Poskus oceniti autopurifikacijo ni dal zadovoljive rezultate.

2. 2. 8. Viruloške preiskave (M. MOZETIČ)

V letih 1973—1975 smo viruloško preiskali nekaj več kot 19% vodotokov v kraškem zaledju Ljubljance. Preiskave smo opravili po standardih WHO (1971) in posebnih postopkih (H. GÄRTNER in R. SCHNURBEIN 1964, K. SCHNIEWEIS in G. STIFTER 1971, R. MARTIN in A. THOMAS 1974). V vodi Goriškega potoka in Lip-senjščice ob Cerkniškem jezeru z dne 27. 2. 1974 (istočasno je potekalo v teh krajih obvezno cepljenje proti poliomielitisu), smo izolirali vakcinalna seva poliovirusa tipa 3. Njihovo pripadnost oz. atenuiranost smo potrdili s testom na temperaturni marker. Izračunali smo, da je bilo 8% preiskanih vodotokov kontaminiranih z vakcinalnimi poliovirusi (S. OZARČIČ, D. MARKIČ 1974).

Sledenje podzemeljskih voda, pa čeprav z apatogenimi virusi ne bi bilo v času splošne polucije dopustno. Pred preiskavami nismo poznali viruloške situacije, po hidrični epidemiji hepatitisa na Vrhniki in v Logatcu ob koncu l. 1971 in začetku 1972, pa smo sklepali, da morajo biti v tukajšnjih kraških vodah prisotni tudi drugi virusi.

V dveh letih, kolikor so trajale naše viruloške preiskave, tudi v poletnih mesecih ob masovni turistični migraciji in kulminaciji enteroviroz, nismo v zbranem materialu odkrili patogenih virusov.

2. 3. Potek in rezultati kombiniranega sledilnega poskusa 1975

2. 3. 1. Namen in program sledenja (F. HRIBAR)

Predhodne raziskave kraškega porečja Ljubljanice v obdobju 1972—1975 ter dosedanje znanje o podzemeljskih zvezah v tem delu klasičnega krasa (tabela 13) so pokazale, da je obsežni kombinirani sledilni poskus najbolj učinkovito izvesti na območju med Cerkniškim, Planinskim, Logaškim poljem in krasom Rovtarske planote, kjer so številni ponori, in južnim obrobjem Ljubljanskega barja pri Vrhniki, kjer so številni izviri Ljubljanice. Prav tako je bilo ugotovljeno, da je optimalni uspeh pričakovati ob sledenju srednje vode, ki v tem območju običajno nastopa konec spomladi.

S kombiniranim sledilnim poskusom naj bi predvsem

- preverili in dopolnili znanje o podzemeljskih zvezah med ponori in izviri,
- ugotovili, koliko vode prispevajo posamezni ponori v posamezne izvire ob določeni hidrološki situaciji,
- dopolnili znanje o hidroloških in hidrogeoloških značilnostih krasa med Cerkniškim, Planinskim in Logaškim poljem in Rovtarsko planoto ter izviri Ljubljanice,
- primerjali uporabnost preizkušenih ter novih sledilnih metod in sredstev ter
- izpopolnili metodologijo sledenja kraških voda.

Prvi sledilni poskus na tem območju je bil opravljen leta 1912, nato pa so številni nadaljnji poskusi do leta 1965, opravljeni ob različnih vodnih stanjih in le z uraninom, pokazali nekaj kvalitativnih podatkov o podzemeljskih zvezah med posameznimi ponori in izviri (A. ŠERKO 1946, I. GAMS 1965, N. ČADEŽ 1973). Ti podatki in prostorska razporeditev ponorov in izvirov so pomagali presoditi, katero vrsto, kolikšno število in množino sledil bomo potrebovali za izvedbo kombiniranega poskusa. Glede na zastavljeno problematiko in razpoložljiva sledilna sredstva smo izbrali skupno 14 različnih tracerjev in sicer

- 5 organskih barvil (uranin A, rodamin FB, amidorodamin G-ekstra, eozin in optično belilo tinopal CBS-X);
- 2 soli (kalijev klorid in litijev klorid),
- 4 vrste obarvanih trosov (zelene, modre, rdeče in rjave),
- 2 radioaktivnih snovi (krom-51 in indij) ter trde detergente.

2. 3. 2. Meteorološke in hidrološke razmere med sledilnim poskusom

26. 5.—10. 7. 1975 (F. BERNOT, K. ŽIBRIK, F. LEWICKI, A. PIČININ)

Splošne temperaturne in padavinske razmere v obdobju sledilnega poskusa so razvidne iz sl. 12, 13 in 42, bolj podrobni podatki glede padavin pa iz padavinskih kart (sl. 43). Tu so navedeni podatki za deževna obdobja (29. 5.—3. 6., 10.—13. 6., 14.—18. 6., 20. 6.—2. 7. 1975) v območju sledilnega poskusa. Ta deževna obdobja v glavnem ustrezajo ciklonalnim singularitetam, ki se sicer redno pojavljajo maja, junija in julija.

Hidrološka opazovanja in meritve so dale pretoke na opazovanih izviri in iniciranih ponorih ter dnevne padavine na kontrolnih postajah celotnega porečja Ljubljanice. Tako je bilo mogoče usmerjati pogostnost odvzemanja vzorcev, pri obdelavi gradiva pa izračunati količino povrnjenega sledila in prispevnost vode iz

posameznih ponorov k posameznim izvirov. Možen je bil tudi izračun, koliko vode posamezni kalkulatивно določeni hidrološki sistemi prispevajo izvirov Ljublanice (sl. 44, tab. 14). Pri tem izračunu so upoštevane padavine v hidroloških sistemih za obdobje sledenja, enourne in dnevne maksimalne padavine 1. julija 1975 ter drugi hidrološki parametri.

Hidrološki izračuni so ponovno pokazali, da dejanski obseg kraškega porečja Ljublanice še ni natanko ugotovljen in znan. To je potrdil kasneje tudi sledilni poskus, saj ponikalnice iz Rovt posredujejo vodo Ljublanici in Idriji.

2. 3. 3. Obeležanje ponorov in opazovanje izvirov (F. HRIBAR)

Po predhodnih dogovorih med vsemi sodelujočimi strokovnjaki, je bil pripravljen podroben načrt sledenja ter določen začetek injiciranja na dan 27. 5. 1975 ob 15,00 uri (tabela 15) in razpored opazovanja na izviroh (tabela 16).

Ker so neposredne predpriprave za sledenje (ureditev ponorov in izvirov, priprava sledil in drugo) bile pravočasno opravljene, se je zastavljeni načrt odvijal brez zastojev. Pri poskusu je sodelovalo neposredno okrog 50 ljudi, Obeležanje so opravili odgovorni vodje (20) za posamezno sledilo. Večina vzorcev je bila sproti analizirana v terenskem laboratoriju na Vrhniki, naknadne in kontrolne analize pa kasneje v Ljubljani in Münchnu. Trosi so bili analizirani na Vrhniki, v Grazu in Karlsruhe.

Na Cerknškem jezeru je bil s 51,2 kg uranina obarvan ponor Vodonos (D. NOVAK, R. VERBOVŠEK, P. KRIVIC), na Planinskem polju pa ponori Unice in sicer Milavcovi ključi s 26,4 kg rodamina (D. MEDVEŠČEK). Ribce z 10 kg rjavih in 10 kg zelenih trosov (J. ZÖTL in M. KOLBEZEN), Dolenje Loke z 48 kg tinopala CBS-X (M. ZUPAN in K. DROBEŽ), Žaga s 40 kg detergentov (W. KÄSS), pri podstenah pa še požiralnik Strževca s 400 g indija (R. GOSPODARIČ in R. APEL) in 6 dni kasneje še s 100 kg litijeve soli (R. GOSPODARIČ, B. BRADAČ).

Na Logaškem polju je bil obarvan ponor Jačka s 25,5 kg eozina (F. BERNOT). V ponor Hotenke smo vlili 26 kg amidorodamina G-ekstra (H. BEHRENS, M. KOGOVŠEK), v ponor Zejskega potoka 10 kg rdečih in v ponor Pikeljščice 10 kg modrih trosov (V. MAURIN, H. HÖTZL, P. HABIČ). Ponor Rovtarice je bil markiran s Cr-51 v koncentraciji 15 mCi/ml (M. PIRŠ), ponor Petkovščice pa s 3000 kg 57^{0/0} kalijeve soli (B. BRADAČ). Opazovanje je bilo organizirano pri 26 izviroh Ljublanice pri Vrhniki, v ključnih vodomerskih postajah in v treh vodnih jamah. Planktonske mrežice za trose so bile vstavljene tudi v izvir Hublja in izvir Vipave ter v Divje jezero in Podrotejo. Zaradi vremenskih razmer se je vzorčevanje podaljšalo od predvidenih 36 na 47 dni, planktonske mrežice in aktivno oglje pa sta bila izpostavljena v nekaterih izviroh do oktobra.

2. 3. 4. Sledenje s fluorescenčnimi sledili

2. 3. 4. 1. Rezultati neposrednega merjenja fluorescentni sladil (H. BEHRENS, MARTINA ZUPAN, MARKO ZUPAN)

Zaradi številnih podzemeljskih zvez je bilo treba uporabiti štiri fluorescenčna barvila (uranin A, amidorodamin G-extra rodamin FB in eozin) poleg tega pa še optično belilo tinopal CBS-X. Kljub temu, da imajo ta fluorescenčna barvila dokaj podobne spektralne lastnosti (sl. 45) jih je bilo možno inicirati istočasno v različnih ponorih, ker so izdelani ustrezni analitični ločitveni postopki

(F. BAUER 1972, ROCHART in drugi 1975). Fluorescenčna spektra tinopala 355 nm oziroma 430 nm sta nižja kot pri omenjenih barvilih, zato je lahko določljiv in primeren kot hidrološko sledilo (R. GLOVER 1972). Fluorescenčni indikatorji so bili po ponorih tako razdeljeni, da bi vendarle čimbolj izključili njihovo medsebojno mešanje v izviri, izbrana so bila tudi barvila z najmanj nečistoče (sl. 46). Za nemoteno odvijanje iniciranja in čim manjšo kontaminacijo so bile prašnate substance barvil pripravljene v vodni raztopini.

Določanje fluorescenčnih indikatorjev sta opravljala dva laboratorija (Vrhnika oziroma Ljubljana in München) na fluorimetrih Perkins Elmer (203 oziroma 204) po izpopolnjeni metodi H. BEHRENSA (1971, 1973). Tinopal je bil analiziran samo v Ljubljani oziroma Vrhniki. Po tej metodi (en spekter za 4 barvila hkrati) je bilo možno racionalno analizirati okoli 3000 vzorcev z mejo detekcije kot sledi: uranin 0,005 ppb, eozin 0,1 ppb, amidorodamin 0,008 ppb, rodamin 0,01 ppb in tinopal 0,001 ppb. Kjer je prišlo do mešanja dveh barvil (posebno eozin/amidorodamin) sta oba laboratorija razvila uspešne ločitvene postopke, ki sta posebej opisana.

Analize v dveh laboratorijih so dale možnost kontrolnih meritev in preučevanja stabilnosti fluorescenčnih sledil v odvzetih vzorcih. Meritve se zadovoljivo skladajo (sl. 47, 48, 52, 53), kljub nekaterim anomalijam posebno pri uraninu (sl. 49, 50, 51).

Skupen prikaz dobljenih rezultatov sledenja s fluorescenčnimi sledili kaže sl. 54, podrobnejši podatki za posamezna sledila pa so razvidni iz tabel 20—24 in slik 55—61. Tako vidimo, da so se uranin iz Cerkniškega polja (Vodonos), rodamin oziroma tinopal s Planinskega polja (Milavcovi ključi oziroma Dolenje Loke), eozin z Logaškega polja (Jačka) pojavili v izvirih Bistre, Lubije in Ljubljanice. Tu je nastopil tudi amidorodamin iz ponora Hotenke, ki pa se je pojavil tudi izviri Divje jezero in Podroteja pri Idriji. Pod vsako tabelo so posebej navedene eventuelne posebnosti. Med nje sodi pojav drugega maksimuma uranina, ki ni prav pojasnjen, zelo jasen prehod rodamina z enim maksimumom, očitno je bilo ugotovljeno zastajanje eozina v podzemlju glede na to, da je inicirani ponor na Logaškem polju najbližji izvirom pri Vrhniki, nadalje nepričakovani istočasni pojav eozina in amidorodamina v istih izviri Ljubljanice in nazadnje pojav neenakomernih koncentracij tinopala, ki nihajo zaradi spremljivega naravnega ozadja tega optičnega belila.

2.3.4.2. Rezultati detekcije fluorescenčnih sledil z aktivnim ogljem (F. BAUER)

Med sledilnim poskusom so bile v izviri Ljubljanice obešene vrečke aktivnega oglja. Laboratorijska ekstrakcija je bila opravljena po metodi F. BAUERJA (1967, 1972), analiza pa po metodi H. BEHRENSA (1971, 1973) na spektrofluorimetru 204 PERKIN ELMER s spodnjo mejo detekcije 1 mg/m³.

S pomočjo aktivnega oglja je bil uranin ugotovljen v izviri 1. 11—1. 13, 1. 15, 1. 21—1. 23, 1. 36, 1. 37 in 1. 41—1. 45 (tabela 25) za čas od 27. maja in 2. junija. Od 7. junija dalje pa so bili ekstrakti negativni. Ugotovljena detekcija se ujema z direktno določenim uraninom, n. pr. v izviri 1. 11 in 1. 21 (sl. 62), s to razliko, da so poprečne koncentracije pri indirektnem merjenju z aktivnim ogljem 100—1000 krat višje.

Določanje uranina je zelo odvisno od čistosti vode in naravnega ozadja fluorescenčnih snovi v vodi.

Eozin je bil ugotovljen v izviri 1. 36, 1. 37, 1. 44 in 1. 45 med 2.—25. junijem, najvišja koncentracija 220 mg/m^3 pa v izviri 1. 36 med 2. in 5. junijem.

Rodamin je bil ugotovljen v izviri 1. 11—1. 13, 1. 21—1. 23, 1. 41—1. 43 med 27. in 30. majem; najvišja koncentracija 12 mg/m^3 pa v izviri 1. 12.

Z uporabljenimi metodami ekstrakcije je možno določati le uranin in eozin. Nova metoda W. PERLEGE (1976) pa dopušča tudi detekcijo amidorodamina G, rodamina FB in tinopala CBS-X, o čemer bo poročano na samem simpoziju septembra 1976 na Bledu.

2. 3. 5. Sledenje s trosi (H. HÖTZL, V. MAURIN, J. G. ZÖTL)

Sledenje podzemeljske vode z obarvanimi trosi *Lycopodium clavatum* se je v zadnjih 20 letih zelo razvilo v alpskem krasu (V. MAURIN in J. ZÖTL 1959, F. BAUER 1967, J. ZÖTL 1974, H. BATSCHE et al. 1970 in drugi avtorji), pa tudi iz dinarskega krasa poznamo nekaj primerov tega sledenja (I. GAMS 1966, neobjavljeni poskusi F. BAUERJA v porečju Trebišnjice in V. MAURINA ter J. ZÖTLA na Livanjskem polju, R. GOSPODARIČA in P. HABIČA v Trnovskem gozdu).

- Pri kombiniranem poskusu v porečju Ljubljani leta 1975 je bil namen
- preizkusiti kako specifične hidrogeološke razmere NW dinarskega krasa vplivajo na tovrstno sledilno metodo,
 - ponovno primerjati pretočne hitrosti, količino povrnjenih oziroma sedimentiranih trosov in njihovo razpoznavanje v razmerju do drugih sledilnih snovi ter v odvisnosti od lokalnih kraškohidrografskih pojavov,
 - testirati plavljenje s trosi, ki so bili pripravljene z novo preparacijsko metodo M. DECHANTA,
 - izkoristiti prednost trosov, da lahko pod ugodnimi pogoji dokažejo podzemeljske zveze tam, kjer druga sledila odpovedo zaradi močnega razredčenja (primer kombinirani sledilni poskus na Donavi).

Iniciranje in opazovanje trosov je bilo zato organizirano pri izviri Ljubljani, Idrijce, Hublja in Vipave. Po pričakovanju (glej literaturo I. GAMS 1965, P. HABIČ 1968, R. GOSPODARIČ 1969, P. HABIČ in R. GOSPODARIČ 1972, F. HABE 1972, V. MAURIN 1967) so bile v izviri Vipave in Hublja analize na trose negativne, zato pa toliko bolj zanesljive in zadovoljive v izviri Ljubljani in Idrijce (tabela 26, sl. 63, 64). Podrobnejši pregled kaže, da so se zeleni in rjavi trosi iz Planinskega polja pojavili v izviri Bistre, Lubije in V. Ljubljani v dveh maksimumih, kar je povezano s hidrološkimi razmerami med sledilnim poskusom (sl. 63). Posebno pomembna ugotovitev kombiniranega sledilnega poskusa 1975 je kraško-hidrološko spoznanje, da se v izviri V. Ljubljani (1. 4) pojavljajo poleg zelenih in rjavih še rdeči in modri trosi iz območja Rovtarskih ponikalnic ter skoraj vsa ostala uporabljena sledila.

Regionalno najbolj interesanten rezultat sledenja s trosi je pojav rdečih in modrih trosov iz ponorov Žejskega potoka in Pikeljščice tudi v izviri Idrijce (Divje jezero, Podroteja) že onkraj orografskega razvodja med Jadranskim in Črnim morjem (sl. 65). Kljub nekaterim hidrološko in tehnično neugodnim okoliščinam, je uspelo s trosi dovolj zanesljivo dokazati pretakanje podzemeljske vode iz hidrogeološko in tektonsko komplicirano zgrajenega območja Rovt v izviri Ljubljani in Idrijce. To je v majhnem primeru, kako se na območju Alp in Dinaridov zmanjšuje nekoč obsežnejše porečje Donave (kot pritoka Črnega morja) ter povečuje porečje Severnega morja (Donava-Ren) in Jadranskega

oziroma Sredozemskega morja. Dva problema ostajata odprta in sicer velika izguba modrih trosov, ki je lahko povezana z veliko sedimentacijo v podzemeljskih vodnih kanalih ali pa z iztoki obeležene vode v izvirih, ki jih nismo pri tem sledilnem poskusu kontrolirali, ter neuspela uporaba suspenzije rjavih trosov, ki so bili preparirani z novo metodo M. DECHANTA.

2. 3. 6. Sledenje s solmi (H. BEHRENS in Martina ZUPAN)

2. 3. 6. 1. Sledenje s kalijevim kloridom (Martina ZUPAN)

Kalijev klorid je bil iniciran v ponor Petkovščice v količini 3000 kg in ugotovljen v izvirih Male Ljubljanice 1. 32 in 1. 34 (sl. 66 in 67). Kalij je bil analiziran s plamenskimi fotometrom, Cl pa volumetrično s Hg nitratom z natančnostjo 0,1 mg/l v laboratoriju na Vrhniki. Izvrednotenje je ovirala relativno visoka naravna vsebnost obeh elementov v vodi (za K do 3,5 mg/l in za Cl do 8,1 mg/l), ki smo jo ugotovili še pred sledilnim poskusom. Pri izračunu povrnjenega KCl-tracerja smo upoštevali poprečne vrednosti naravnega ozadja za čas sledenja v obeh izvirih (za 1. 32. 4,4 mg/l Cl in 1,2 mg/l K, za izvir 1. 34 pa 4,5 mg/l Cl in 1,1 mg/l K) ter dobili približno 95,5% povrnjenega KCl sledila. Zaradi problematičnega in neenakomernega naravnega ozadja v kraški vodi, se KCl ni pokazal kot dobro sledilo.

2. 3. 6. 2. Sledenje z litijem (H. BEHRENS, Martina ZUPAN)

Litijev klorid je bil izbran pri poskusu kot dopolnilno sledilo; iniciran je bil v ponor 3. 2 na severni strani Planinskega polja 5 dni po glavnem iniciranju. Vzorčevanje je bilo opravljeno na izvirih Ljubljanice, analize pa sta opravila Inštitut za radiohidrometrijo v Münchnu (900 vzorcev) in Kemijski inštitut „Boris Kidrič“ v Ljubljani (170 vzorcev) na spektrofotometrih za atomsko absorbcijo, ki so jih priredili za plamensko emisijsko merjenje litija do meje detekcije cca 0,5 nm/m³ (sl. 68). Analize med obema laboratorijema se razlikujejo za faktor 1. 65.

Izvrednotenje poskusa je pokazalo več povrnjenega kot iniciranega litija. Razlog je iskati v naravnem ozadju, ki ga za čas poskusa ne poznamo, pač pa smo ga ugotovili naknadno do vrednosti 0,33 mg/m³. Tudi ob upoštevanju tega ozadja so povrnjene količine previsoke, manjše povrnjene količine dobimo šele pri upoštevanju naravnega ozadja 0,5 mg/m³ (tabela 28 in 30), ki je morda nastopalo med poskusom. Omeniti je, da ima termalna voda izvira 1. 46 visoko vsebnost litija (sl. 69), ki pa z iniciranim litijem nima zveze.

Z litijem je bila dokazana zveza med ponorom 3. 2. na severni strani Planinskega polja in skupinami izvirov Ljubljanice 1. 2, 1. 3 in 1. 4 (tabela 29, sl. 70). Sledenje z litijem je bilo zelo koristno za izvrednotenje celotnega kombiniranega poskusa, ker v isti ponor 3. 2 inicirani indij zaradi nepredvidenih tehničnih težav še ni analiziran.

2. 3. 7. Sledenje s Cr-51 (M. PIRŠ, Metka TOPLIŠEK, H. UDOVČ)

Cr-51-EDTA kompleks je bil iniciran v ponor Rovtarice v skupni količini 3 Ci in koncentraciji 15 m Ci/ml. Vzorčevani so bili izviri Male Ljubljanice (1. 3), analize vzorcev pa opravljene na Inštitutu „Jožef Štefan“ v Ljubljani s

kanalnim analizatorjem TMC model CN 1024 (sl. 71) z mejo detekcije 100 p Ci/l. Inicirani Cr-51 smo ugotovili predvsem v izviru 1. 32 (sl. 72), nekaj pa tudi v izviru 1. 34. Slednji izvir vsebuje 100—200 p Ci/l radona, kar pomeni, da ta izvirna voda ni povezana s ponorno vodo Rovtarice, ki radona nima.

2. 3. 8. Sledenje s trdimi detergenti (W. Käss)

50 kg trdih detergentov (tip Marlon A 735) smo inicirali v ponor Žaga na Planinskem polju ob pretoku vode 0,173 m³/s. Analizirani vzorci (584 vzorcev v laboratoriju na Vrhniku) so pokazali do 34 mg/m³ detergentov v skupinah izvirov Ljubljani 1. 2, 1. 3 in 1. 4, vendar v takem zaporedju, da ni bilo mogoče sestaviti smiselnih prehodnih krivulj, Tudi naknadne in poboljšane analize v Freiburgu (121 vzorcev) so pokazale zelo različne vsebnosti detergentov.

Z uporabljen količino se je detergent pokazal kot neuspešno sledilno sredstvo v poskusnem območju. Za nadaljnjo uporabo je treba poznati naravno ozadje detergentov v tukajšnji kraški vodi in poboljšati analitične metode.

2. 4. Nova hidrogeološka spoznanja

2. 4. 1. Kraško hidrografske izvrednotenje (P. HABIČ)

Poskusno sledenje je potrdilo rezultate prejšnjih sledenj, obenem pa je dalo vrsto novih spoznanj o podzemeljskih vodnih zvezah. Dokazano je raztekanje voda Hotenke, Žejskega potoka in Pikeljščice tako v izvire Ljubljani kot v izvire Idrijce. Gre torej za zanimivo kraško bifurkacijo med Jadranskim in Črnim morjem. Potrjen je neposredni odtok cerkniških voda v izvire Bistre, Lubije, Velike in Male Ljubljani kot tudi zveza Rovtarice in Petkovščice s Kožuhovim izviro in Primcovim studencem. Podrobnejše značilnosti podzemeljskega pretakanja voda med ponori in izviri je mogoče spoznati po času in hitrostih potovanja sledil po podzemlju, tako do prvega pojava v izviru kot tudi do največje koncentracije sledila.

Največje hitrosti so ugotovljene pri vodah, ki odtekajo iz Planinskega polja in iz Cerkniškega polja proti Bistri, Lubiji in Veliki Ljubljani, precej manjše pa so hitrosti podzemeljskih tokov iz Rovtarske planote.

Značaj podzemeljskega pretakanja se razen v navideznih hitrostih kaže tudi v obliki krivulje koncentracij v posameznih izviri (sl. 55—61). Pokazalo se je, da imajo bližnji izviri podobne krivulje, večje pa so razlike v stranskih in bolj oddaljenih izviri. Poleg tega je bilo mogoče tudi po razporeditvi posameznih sledil razvrstiti izvire v tri glavne skupine, ki jih napajajo večji podzemeljski tokovi. Vanje se stekajo in mešajo vode iz različnih predelov in ponorov, nato pa se v različnem razmerju razporede po izviri. Podrobnejši podatki so prikazani v tabelah poglavja 2. 3, za vsako sledilo posebej pa tudi v tabelah 33—43 in sliki 74. Razporeditev vode in sledil iz posameznih ponorov v izviri je odvisna predvsem od glavnih podzemeljskih sovodenj in bolj ali manj sklenjenih vodnih žil. Te sovodnji so označene kot kritične točke v podzemeljskem vodnem sistemu (sl. 74). Podobno pa vpliva na razpored sledil v izviri (tab. 46) tudi členjenje podzemeljskih tokov neposredno pred samimi izviri. Ker pa so vodne žile na več mestih med seboj povezane, je razumljivo, da je količina vode iz posameznega ponora v določenem izviri pri različnem

vodnem stanju različna. Za vodne razmere med sledenjem so izračunane prispevnosti obeleženih ponorov na dva načina. V prvem primeru (tab. 44) so na podlagi razmerja sledil v izviri ne glede na odstotek povrnjenega sledila izračunani pretoki v času obeleženja ponorov s predpostavko, da so bile do pojava sledil v izviri podzemeljske vodne razmere uravnotežene in kolikor toliko stabilne. V drugem primeru pa so v okviru hidrološke službe (kot pri poglavju 2. 2. 3. in 2. 3. 4.) ugotovljene in razporejene po izviri celotne vodne količine, izmerjene v času od obeleženja ponorov do konca sledenja (tab. 45).

2. 4. 2. Hidrogeološka interpretacija podzemeljskih vodnih zvez (R. GOSPODARIČ, P. KRIVIC, R. VERBOVŠEK)

Ugotovljene podzemeljske vodne zveze (glej poglavje 2. 3 ter prilogi 1 in 2) ter hidrografska interpretacija (glej poglavje 2. 4, 1.) kažejo, da markirana voda iz kraških polj (Cerkniškega polja, Planinskega polja in Logaškega polja) odteka v bolj ali manj sklenjenih tokovih skozi prevodne cone Logaške planote v izvire Ljubljani. Te prevodne cone so v hidrografske najbolj propustnih zakraselih kamninah. Le na Cerkniškem polju prebija ponorna voda zgornjetriasni dolomit, ki pa je tektonsko tako sestavljen, da je hidrogeološko propusten (M. PLENIČAR 1954, M. BREZNIK 1961). Ponorna voda Planinskega polja je oblikovana v spodnjekrednem apnencu na NE krilu idrijskega preloma. Številni ozki in recentni ponorni kanali so vezani na rupture NE—SW smeri, ki pa se v neki oddaljenosti od ponornega roba združujejo v skupne kanale. Ti kanali se v primeru Mačkovice, Logarčka in Najdene jame povezujejo tudi vertikalno s fosilnimi vodnimi rovi. Tak povezan sistem recentnih in fosilnih vodnih rogov poznamo tudi iz sosednjih kraških polj (R. GOSPODARIČ 1970, 1976) in je nasploh specifičen za NW del dinarskega krasa. Koncentracijo vodnih tokov v območju Logaške planote med Planinskim poljem in Ljubljanskim barjem nakazujejo številne, pretežno v smeri NE—SW razporejene zelo razsežne udornice (območje Lanskega vrha in Ravnika). Nastanek teh udornic je bil namreč možen pri konstantni hidrološki aktivnosti niže ležečih vodnih rogov. Ti favorizirani pretočni kanali združujejo tudi prenicujočo kraško vodo. Potem ko padavine korozijsko oblikujejo zrelo kraško površje, se po vpadnicah skladov apnenca in rupturah NW—SE in NE—SW spuščajo k prevodnim conam ponorne vode. V obrobju barja pa se tudi samostojno pojavljajo v številnih manjših izviri Ljubljani, ki med sledilnim poskusom niso pokazale sledil.

Hidrološka analiza je pokazala, da se tokovi obeležene vode še pred izviri cepijo v različne kanale. Posebno izrazita je odtočna smer proti severovzhodu k izviro Bistre, tja, kjer že nastopata spodnjeliasni in zgornjetriasni dolomit. S hidrogeološkega stališča je možno pojasniti ta pojav le s tektonsko ugodno razvitimi rupturami, ki so postale hidrološko propustne v povezavi s tektonskim razvojem Ljubljanskega barja v mlajšem kvartarju in holocenu.

Pretakanje vode iz ponikalnic Rovtarske planote proti Ljubljani in Idriji je s hidrogeološkega vidika odlično osvetlil V. MAURIN v sestavku o trosih (2. 3. 5.). K temu je dodati le misel, da je večja hitrost podzemeljske vode k Ljubljani vezana na bolj propustne in starejše kanale, manjša hitrost proti Idriji pa na mlajše manj propustne kanale. To se ujema z znanim dejstvom, da se porečje Idrije šele v mlajši dobi intenzivno povečuje na račun porečja Ljubljani. S tem pa nadaljnja hidrogeološka interpretacija podzemeljskih vodnih zvez med ponori in izviri v porečju Ljubljani zadeva na vprašanja

o paleohidrografskem razvoju porečja v holocenski, kvartarni in celo pliocenski dobi. V tem pogledu dosedanja znanja o neotektoniki, speleogenezi in geomorfologiji obravnavanega porečja še niso dovolj znana in usklajena. Takšna bodoča preučevanja bodo morda pomagala oceniti veljavnost obstoječih teorij o kraški hidrografiji, ki so skoraj vse zasnovane na izkušnjah z Dinarskega krasa.

3. Uporabnost umetnih sledilnih snovi v krasu

Sledilne snovi (tracerji) morajo ustrezati sledečim zahtevam:

1. Sledila morajo biti topljiva v vodi, ki jo obeležujemo. Če jih moremo uporabiti le v suspenziji, naj bo sedimentacijska hitrost čim manjša.
2. Na podzemeljski poti se sledilo ne sme zaznavno izgublјati ali zadrževati zaradi sorpcije, kemičnih reakcij s kamnino, ionske izmenjave ali sedimentacije.
3. Sledila ne smejo nastopati v porečju vodnega sistema, ki ga raziskujemo.
4. Sledila ne smejo spremeniti hidravličnih lastnosti obeležene vode (n. pr. gostoto ali viskoznost), tako da bi se spremenile prirodne pretočne razmere.
5. Zagotoviti je treba stabilnost tracerja proti fizikalnim, kemičnim, fotokemičnim ali biološkim vplivom (vsekakor ob ustreznih ukrepih).
6. Določljivost in selektivnost sledil in ponovljivost meritev mora ustrezati zahtevam vsakokratne problematike, ki jo rešujemo.
7. Tracerji ne smejo imeti toksičnih lastnosti v koncentracijah, ki nastopajo pri sledilnem poskusu, da ne bi s tem zmanjšali uporabne vrednosti vode.
8. Sledila in metode določanja morajo omogočiti gospodarno izvedbo sledilnih poskusov.

3.1. Fluorescenčna sledila (F. BAUER, MARTINA ZUPAN, H. BEHRENS)

Ta sledila imajo dobre sledilne lastnosti, glej tabelo 47. Posebno je pomembno, da jih lahko iniciramo več hkrati in nato uspešno med seboj razlikujemo s pomočjo ločitvenih postopkov. Zaradi visoke občutljivosti določanja jih lahko iniciramo tudi v majhnih količinah, tako da bistveno ne spremenimo hidravličnih lastnosti vode. Lahko jih doziramo tako, da bomo imeli v izvirni vodi le redkokdaj 100 mg/m^3 maksimalne koncentracije; pri strokovni izvedbi poskusov dobimo večinoma 1 mg/m^3 barvila v izvirni vodi.

Fluorescenčna sledila so v vodi zelo stabilna ter le delno občutljiva na biološke in fotokemične procese (predvsem uranin in eozin). Kvantitativno določamo fluorescenčna sledila v vzorcih vode s spektrofotometri, kjer daje najboljše rezultate metoda H. BEHRENSA (1971, 1973). S to metodo je možno meriti ta barvila tudi v ekstraktih iz aktivnega oglja (F. BAUER 1967, 1972, W. PERLEGA 1976).

Dobre lastnosti fluorescenčnih sledil so bile potrjene tudi pri sledilnem poskusu v porečju Ljubljance 1975, kar je razvidno iz podrobnejše obravnave rezultatov v poglavju 2. 3. 4.

3. 2. Soli (MARTINA ZUPAN)

Na klasičnem krasu je l. 1907 F. TIMEUS (1911, 1924) uspešno sledil Notranjsko Reko (Timavo) in Vipavo z litijevim, cezijevim in stroncijevim kloridom ter podzemeljsko Pivko (neuspešno) z litijevim kloridom (A. ŠERKO 1946). Natrijev in kalijev klorid so v alpskem krasu uveljavili G. KYRLE (1928) in kasneje še drugi raziskovalci (V. MAURIN in J. ZÖTL 1959, W. KÄSS 1972 a), uspešna pa je bila uporaba soli tudi pri sledenju podtalnic (W. KÄSS 1967).

Pri sledilnem poskusu l. 1975 v porečju Ljubljani sta bila uporabljena kalijev klorid in litijev klorid.

Kalijev klorid je enostavno analizirati z natančnostjo 0,1 mg/l, na rezultate pa vpliva razmeroma visoko naravno ozadje (do 30 mg/l KCl). Zato je sledenje uspešno tam, kjer je na razpolago dosti vode in so inicirane precejšnje količine sledila. Tedaj pa obstaja nevarnost, da spremenimo hidravlične lastnosti vode. KCl je dobro topen, toksičnost je zelo nizka, stabilnost v vzorcih vode pa precejšnja. Litijev klorid ima boljše lastnosti, ker ima nižjo mejo detekcije (okoli 1 mg/m³), topnost je zelo dobra, ozadje pa relativno nizko (v porečju Ljubljani okoli 0,3 mg/m³). To sledilo se ne zadržuje oziroma adsorbira v kraškem podzemlju in tudi ne spreminja hidravličnih lastnosti vode. Pri običajno uporabljenih koncentracijah sledilo ni toksično.

Pri sledenju v porečju Ljubljani so nastopile težave pri izračunu povrnjene količine sledila, ker je bila glede na markirano količino vode uporabljena premajhna količina. Stroški uporabe LiCl se gibljejo v mejah stroškov za kalijev in natrijev klorid ter fluorescenčnih sledil.

3. 3. Radiometrično določljiva sledila (H. BEHRENS)

Ta sledila imajo visoko občutljivost detekcije, lahko jih iniciramo v relativno majhnih količinah, stroški za sledila so relativno nizki, za analize pa so potrebne zahtevne merilne naprave in izvežbano osebje. Tovrstna sledila iniciramo kot radioaktivne snovi ali pa kot inaktivne snovi, ki jih v vzorcih vode šele naknadno z obsevanjem spremenimo v radioaktivna (aktivirno analitična sledila).

Uporabnost radioaktivnih sledil omejujejo zaščitne mere proti sevanju ter nekatere fizikalne in kemične lastnosti. Natančnost določanja je zelo visoka, v praksi pa omejena zaradi močne razredčitve sledila, radioaktivnega naravnega ozadja in omejenega časa za merjenje (H. BEHRENS 1967, J. MOLINARI in J. GUIZERIX 1967).

Kemična toksičnost je relativno nizka, specifična pa radiotoksičnost. Najbolj pogosto uporabljena radioaktivna sledila in njihove poglavitne lastnosti so navedene na tab. 48. Ta sledila so tricij, krom-51, kobalt-58 in kobalt-60 ter jod 131.

Sledila, ki jih ugotavljamo z aktivacijsko analizo, so uporabna v podzemeljskih vodah, ki imajo nizko naravno ozadje iniciranega radionuklida. Pri obsevanju vzorcev je pogosto potrebno s specialnimi radiokemičnimi postopki odpraviti moteče radionuklide (J. SCHMITZ in drugi 1972, J. SCHNEIDER in G. GEISLER 1973). Določanje sledil te vrste pa se je bistveno izboljšalo s pomočjo γ -spektrometrije in Ge (Li) polprevodnimi detektorji.

Pregled lastnosti sledil, ki jih ugotavljamo z aktivacijsko analizo kaže tabela na strani 213.

Pri sledilnem poskusu 1975 je krom-51 ponovno dokazal dobre sledilne lastnosti. Interpretacija meritev pa je bila povezana z omejeno inicirno količino (3 Ci) ter motena z relativno visoko naravno vsebnostjo radona v izviru 1. 34. Relativno visoke stroške kroma-51 lahko uporabnik občutno zniža, če sledilo sam pripravi (opis pri B. KNUTSON 1967).

Uporabljen je bil tudi indij-EDTA-kompleks, vendar rezultati še niso izvednoteni. Ločitveni postopek za indij iz vzorcev vode s koprecipitacijo na BiO_2 pa se je obnesel.

Stroški za indij-EDTA-kompleks sledilo so v primerjavi s fluorescenčnimi sledili višji zaradi zahtevnih analiz. Na splošno je uporabnost sledil, ki jih določamo z aktivacijsko analizo smiselna tedaj, če so druga cenejša sledila že izčrpana.

3. 4. Plavna sredstva (V. MAURIN, J. G. ZÖTL)

Pri številnih sledilnih poskusih so se med plavili uveljavili le umetno obarvani trosi lisičjaka *Lycopodium clavatum* (J. ZÖTL 1957, F. BAUER in drugi 1959, V. MAURIN in J. ZÖTL 1964, H. BATSCHE in drugi 1970, B. TOUSSANT 1972, I. VORNATSCHER in drugi).

Prednost trosov je predvsem v dejstvu, da lahko markiramo več ponorov obsežnega območja ob istih hidroloških in hidrometeoroloških razmerah, kar je bil primer tudi pri poskusu 1975. Trosi so praktično v vzorcih neomejeno obstojni, kar pa je tudi neugodno za ponovitev poskusa z enako obarvanimi trosi na istem terenu (F. BAUER 1967). Poprečno 30—35 μ veliki trosi zahtevajo zadosti velike vodne poti, kakršne so predvsem v razpokanih in zakraselih kamninah. V klastičnih sedimentih trosi niso uporabni.

Trosi omogočajo v najboljšem primeru le polkvantitativno izvednotenje, na podlagi prehodnih krivulj ni možno izračunati prispevnosti ponora k izviru. Pri preiskavah hidrogeoloških zvez za namene vodne oskrbe imajo trosi pred drugimi sledili to prednost, da jih s prostim očesom ni videti in tudi sicer ni nobenih drugih zadržkov za uporabo. Obeleževanje s trosi je pogosto tudi najcenejše, če seveda kvantitativno hidrološko izvednotenje ni potrebno.

Pri raziskavah podtalnic je bila uspešno uporabljena bakterija *Serratia marcescens* (pri velikem poskusu na Donavi 1969, v kvartarju spodnje Savinjske doline 1973 in drugod). V kraškem porečju Ljubljane 1975 pa te bakterije niso bile inicirane.

3. 5. Druga sledilna sredstva (R. GOSPODARIČ)

Pri regionalnih in lokalnih hidroloških in hidrogeoloških raziskavah so bila uporabljena številna druga kemična, mehanična in biološka sledilna sredstva (n. pr. peneče in dišeče snovi, mehki in trdi detergenti), vendar ne preveč uspešno. Tudi na Planinskem polju inicirani detergenti niso dali pozitivnih rezultatov, kljub precejšnjim izkušnjam (W. KASS 1972). Z napredkom raziskovalnih in analitičnih metod pa je pričakovati, da se bodo pri nadaljnjem hidrogeološkem preučevanju uveljavila nova sledila, ki jih doslej tehnično še ne obvladamo.

B. SLEDENJE PODTALNIC

1. Raziskave v kvartarnih sedimentih Savinjske Doline

(W. KÄSS, F. DROBNE, B. BUKVIČ)

1. V podtalnici Savinjske doline zahodno od Celja (priloga 3, sl. 75) smo izvedli kombinirani sledilni poskus z uraninom in eozinom, kalijevim kloridom in bakterijo *Serratia marcescens*. Na poskusnem polju so bile predhodno opravljene geološke, hidrogeološke in hidrokemične preiskave. Za poskus je bilo navrtanih 19 vrtin v vodonosni sloj (sl. 76).

2. V zgornji horizont vodonosnega sloja inicirane bakterije so se od 2. do 7. dne poskusa pojavljale še v 25 m oddaljenih vrtinah (Vč 73) južno od inicirnega mesta. Za prvi pojav tega sledila smo ugotovili hitrost podtalnice okoli 2 m/uro ali 47 m/dan. Na podlagi tega podatka in ob stabilnem vodostaju bi se po nemških normativih za cono II zaščitno območje raztegnilo 2350 m daleč v smeri toka podtalnice. Tolikšen obseg zaščitnega območja pa bi bil upravičen le pri nezaščitenem vodonosnem sloju. 1,5 m debel sloj glin v širši okolici poskusnega polja pa je dobra zaščitna plast, ki zavre pronicanje tujih snovi v vodonosni sloj za več dni, v suši celo več mesecev. Zato lahko brez pomislekov zmanjšamo zaščitno območje samo na del tistega, ki smo ga izračunali na podlagi poskusa z bakterijo.

3. Tudi ostala sledila so dosegla 25 m oddaljeno opazovalno vrtino Vč 73 s podobno hitrostjo kot bakterije, s čemer so potrjeni rezultati z bakterijo (sl. 77, 78, 79 in 80).

4. Barvila in KCl smo ugotovili delno celo v večjih koncentracijah v vrtini Vč 73 konec oktobra, torej že po rednem opazovanju. Izračun „srednje hitrosti pretoka“ smo morali zato izračunati iz vrtin S 6 in D 6, ki so le 15 m oddaljeni od inicirne vrtine. Dobili smo sledeče vrednosti:

uranin (zgornji horizont): 0,35 m/uro = 8,4 m/dan

eozin (spodnji horizont) : 0,36 m/uro = 8,8 m/dan

klorid (spodnji horizont): 0,37 m/uro = 9,0 m/dan

Izgleda, da med spodnjim in zgornjim horizontom vodonosnega sloja ni razlik v hitrosti pretoka podtalnice.

5. V poskusnem polju je 18. sept. znašal nagib podtalnice med inicirno vrtino S 1 in D 1 (243,912 m in 243,896 m nadm. višine) ter poskusno vrtino Vč 73 (243,852 m nadm. višine) 2,08 promile.

S privzetim pornim volumnom 25‰ in ugotovljeno srednjo hitrostjo pretoka 0,36 m/uro = 0,01 cm/s ter nagibom 0,00208 smo dobili koeficient prevodnosti v vrednosti 1,20 cm/s.

$$K_r = \frac{V_m \cdot P}{i} = \frac{0,01 \cdot 0,25}{0,00208} = 1,20 \text{ cm/s}$$

6. Iz zrnivosti vodonosnega sloja v 16 vrtinah S 1—S 8, D 1—D 8 (vsakič po 1 analiza) in v raziskovalni vrtini Vč 73 (tri analize) izračunan koeficient prevodnosti je znašal med 0,0065 (S 6) in 2,3 cm/s (D 8).

Ker se pretočne razmere podtalnice prilagajajo v prvi vrsti večji propustnosti, je potrebno iz posameznih meritev izračunati srednjo vrednost. Vsi trije načini ugotavljanja propustnosti se dobro skladajo.

k_f vrednosti iz	črpalnega poskusa	0,65 cm/s
	sledilnega poskusa	1,2 cm/s
	zrnivosti	0,0065—2,3 cm/s

7. Pri uporabi KCl kot hidrogeološkega sledila se je pokazala občutna izmenjava kalijevih ionov z ioni kalcija in magnezija, kjer je enkrat prevladal prvi, drugič pa drugi ion. Ker sestava uporabljenega kalijevega sledila ni znana, moremo podati le spremembe v razmerjih ekvivalentnih vrednosti med Cl in K med piezometrom D 2 (pretočna pot 2,5 m) in raziskovalno vrtino Vč 73-spodaj (pretočna pot 25 m). Tu se zmanjša vsebnost kalija na razdalji 22,5 m od polovice na desetino. V primerjavi z drugimi poskusi v pretežno neapnenih in drobnozrnatih vodonosnih slojih je bila ionska zamenjava tu zelo počasna.

8. Rezultati poskusa kažejo na ESE smer pretoka podtalnice, torej južno od osi poskusnega polja.

Znižanje gladine v nekaterih piezometrih je pokazalo sledeče vrednosti (m):

dan	čas	D 6	D 3	D 2	D 1
oddaljenost (M)		10	20	22,5	25
10. 7.	7,00	0,06	0,03	0,025	0,025
10. 7.	20,00	0,02	0,005	0,005	0
11. 7.	8,30	0,03	0,02	0,015	0,01

Izračunani koeficient propustnosti po DUPUIT-u znaša 0,65 cm/s; hitrost podtalnice v vodonosnem sloju pa $5,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s ali 4,5 m/dan pri hidravličnem koeficientu 0,002. Iz vrtin vzeti vzorci za granulometrijsko analizo so omogočili izračunati koeficient propustnosti „K“ po enačbi USBR $K = 0,36 \times d \cdot 0,01$ cm/s. Položaj podtalnice na poskusnem polju je bil med junijem in septembrom večkrat merjen. V tem stabilnem vremenu je gladina le malo nihala. Ta situacija je trajala še med poskusom, le proti koncu poskusa so padavine povzročile dvig gladine, kot je pokazal limnigraf v vodnjaku Vč 73.

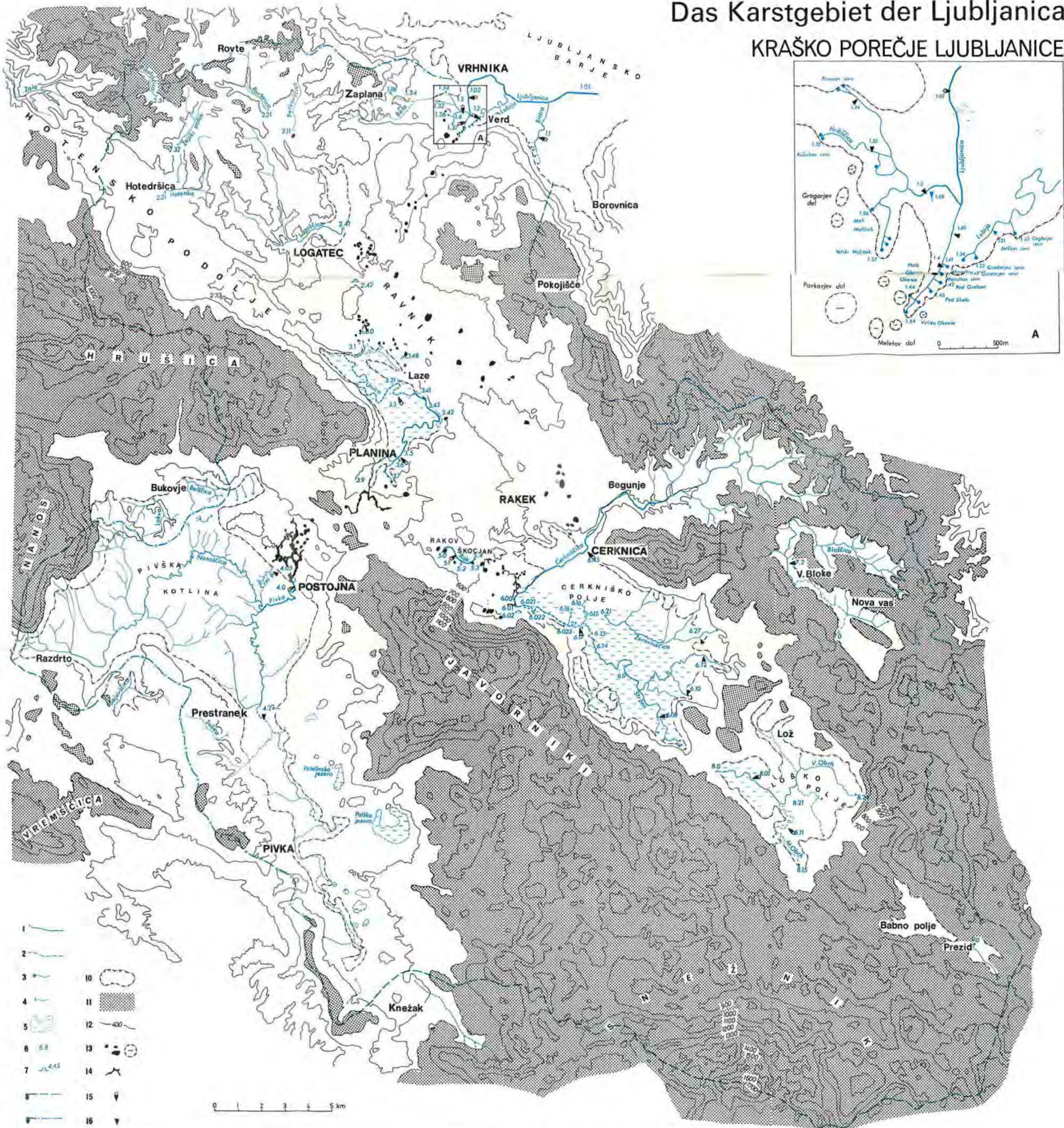
Verzeichnis der Autoren und Mitarbeiter

- BAUER, F., Dr., Bundesanstalt für Wasserhaushalt von Karstgebieten, A-1010 Wien I, Hofburg, Bettlerstiege, Austria.
- BEHRENS, H., Dipl. Phys., Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, D-8042 Neuherberg, Ingolstädter Landstraße 1, BRD.
- BERNOT, F., Dr., Meteorološki zavod Slovenije, YU-61000 Ljubljana, Celjska 1, Yugoslavia.
- BUKVIČ, B., Dipl.-Ing., Nivo, podjetje za urejanje voda, YU-63000 Celje, Škvarčeva 4, Yugoslavia.
- BUSER, S., Dr., Geološki zavod Ljubljana, YU-61000 Ljubljana, Linhartova, Yugoslavia.
- DECHANT, M., Dr., Mandellstraße 1, A-8010 Graz, Austria.
- DROBNE, F., Dipl.-Ing., Geološki zavod Ljubljana, YU-61000 Ljubljana, Linhartova, Yugoslavia.
- GOSPODARIČ, R., Dr., Inštitut za raziskovanje krasa SAZU, YU-66230 Postojna, Titov trg 2, Yugoslavia.
- HABIČ, P., Dr., Inštitut za raziskovanje krasa SAZU, YU-66230 Postojna, Titov trg 2, Yugoslavia.
- HÖTZL, H., Prof. Dr., Lehrstuhl für Geologie und Abteilung für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (TH), D-75, Karlsruhe, Kaiserstraße 12, BRD.
- HRIBAR, F., Prof., Zveza vodnih skupnosti-hidrologija, YU-61000 Ljubljana, Resljeva 18, Yugoslavia.
- KÄSS, W., Dr., Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, D-7800 Freiburg/Br., Albertstraße 5, BRD.

- KOLBEZEN, M., Prof., Zveza vodnih skupnosti-hidrologija, YU-61000 Ljubljana, Resljeva 18, Yugoslavia.
- KRIVIC, P., Dipl.-Ing., Geološki zavod Ljubljana, YU-61000 Ljubljana, Linhartova, Yugoslavia.
- LEWICKI, F., Dipl.-Ing., Zveza vodnih skupnosti-hidrologija, YU-61000 Ljubljana, Resljeva 18, Yugoslavia.
- MAURIN, V., Prof. Dr., Lehrstuhl für Geologie und Abteilung für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (TH), D-75 Karlsruhe, Kaiserstraße 12, BRD.
- MISEREZ, J.-J., Dr., Université de Neuchâtel, Institut de Geologie, Laboratoire de Mineralogie, Petrographie et Geochimie, Neuchâtel, Swiss.
- MOSER, H., Prof. Dr., Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, D-8042 Neuherberg, Ingolstädter Landstraße 1, BRD.
- MOZETIČ, M., Dr., Zavod SR Slovenije za zdravstveno varstvo, YU-61000 Ljubljana, Trubarjeva 2, Yugoslavia.
- PIČININ, A., Dipl.-Ing., Zveza vodnih skupnosti-hidrologija, YU-61000 Ljubljana, Resljeva 18, Yugoslavia.
- PIRŠ, M., Dr., Inštitut „Jožef Štefan“ Ljubljana, YU-61000 Ljubljana, Jamova 39, Yugoslavia.
- RAJNER, V., Geotechnisches Institut der Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, A-1030 Wien III, Objekt 210, Austria.
- RANK, D., Dr., Geotechnisches Institut der Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, A-1030 Wien III, Objekt 210, Austria.
- STICHLER, W., Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, D-8042 Neuherberg, Ingolstädter Landstraße 1, BRD.
- TOPLIŠEK, M., Inštitut „Jožef Štefan“ Ljubljana, YU-61000 Ljubljana, Jamova 39, Yugoslavia.
- TRATNIK, M., Dr. med., Zavod SR Slovenije za zdravstveno varstvo, YU-61000 Ljubljana, Trubarjeva 2, Yugoslavia.
- UDOVČ, H., Inštitut „Jožef Štefan“ Ljubljana, YU-61000 Ljubljana, Jamova 39, Yugoslavia.
- VERBOVŠEK, R., Dipl.-Ing., Geološki zavod Ljubljana, YU-61000 Ljubljana, Linhartova 9, Yugoslavia.
- ZÖTL, J., Prof. Dr., Vereinigung für Hydrogeologische Forschungen in Graz, Rechbauerstraße 12, A-8010 Graz, Austria.
- ZUPAN, M., Dr., FNT Univerza Ljubljana, YU-61000 Ljubljana, Murnikova 6, Yugoslavia.
- ZUPAN, M., Dipl.-Ing., Zveza vodnih skupnosti-hidrologija, YU-61000 Ljubljana, Celjska 1, Yugoslavia.
- ŽIBRIK, K., Dipl.-Ing., Republiški inšpektorat za vode, YU-61000 Ljubljana, Parmova 33, Yugoslavia.

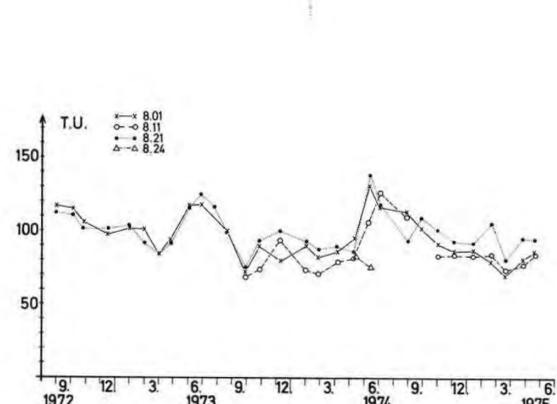
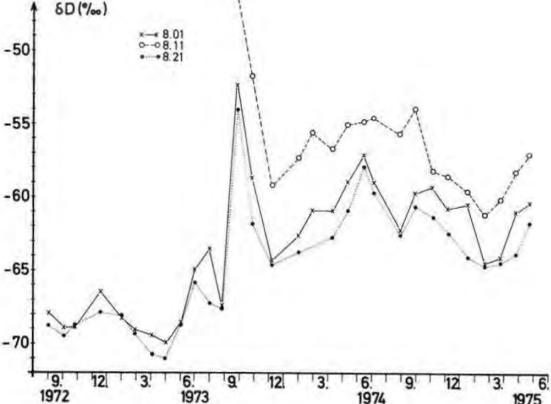
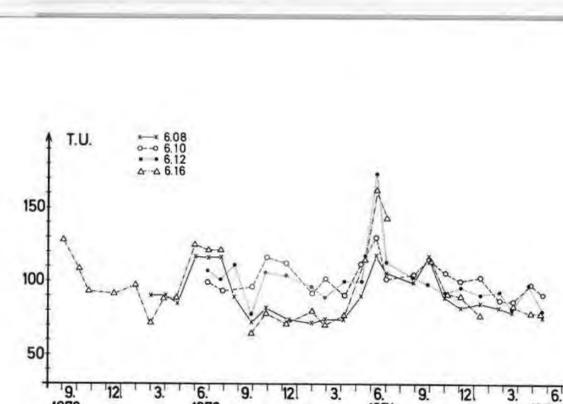
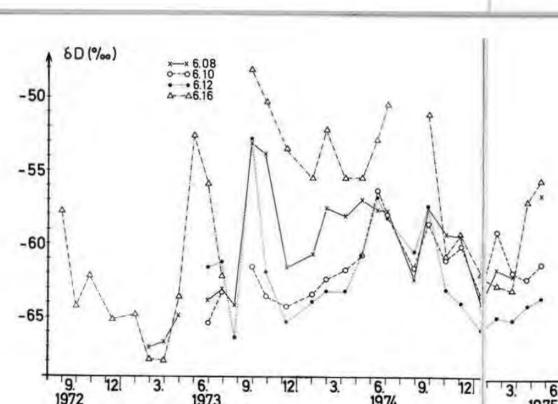
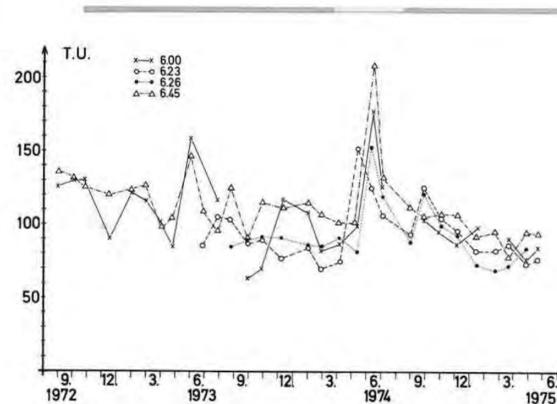
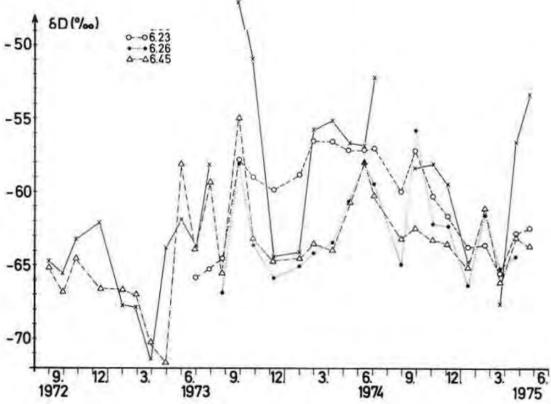
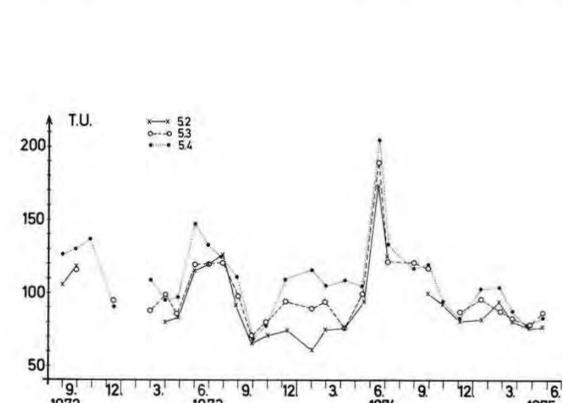
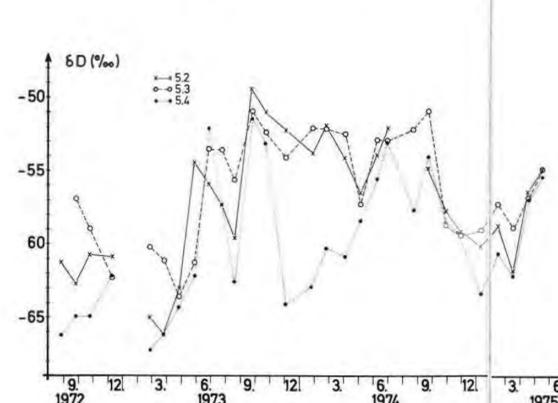
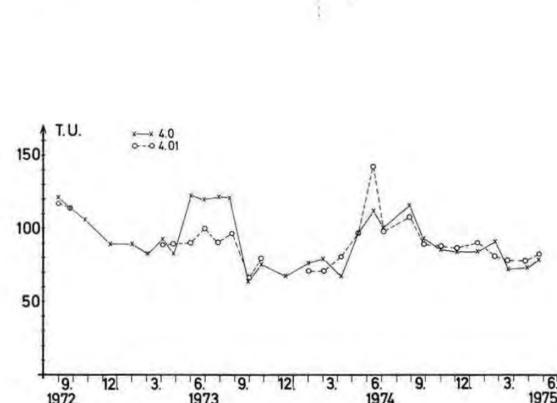
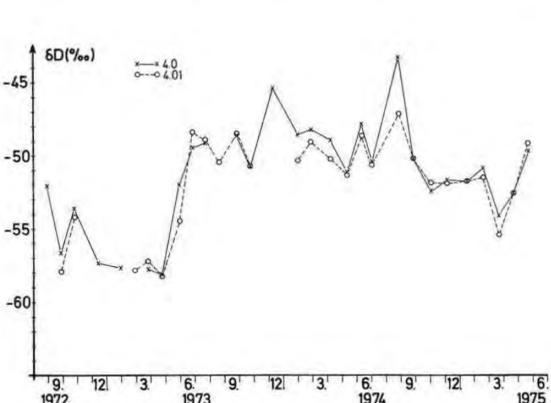
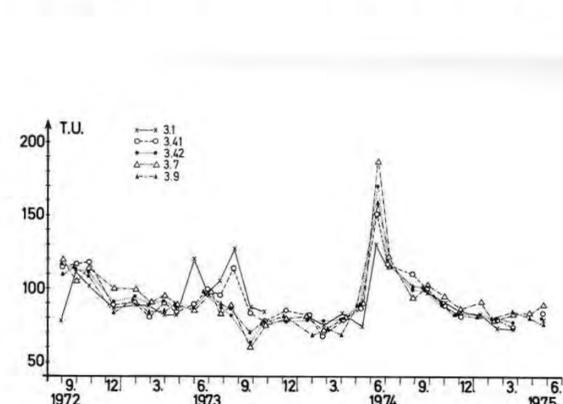
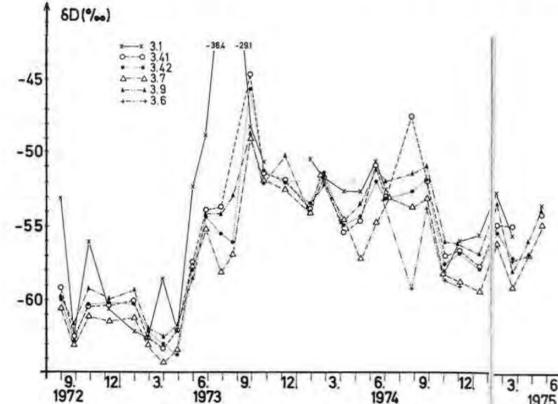
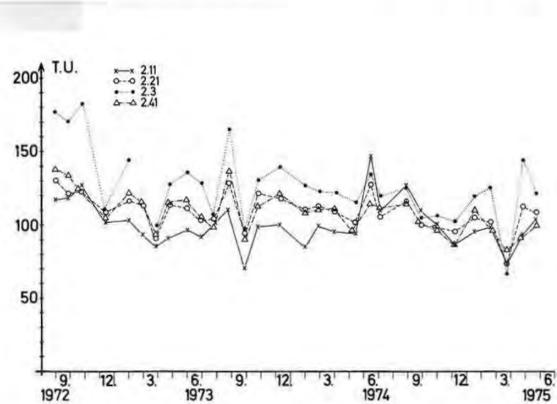
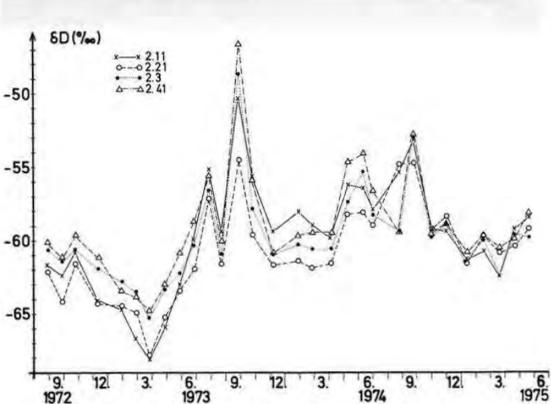
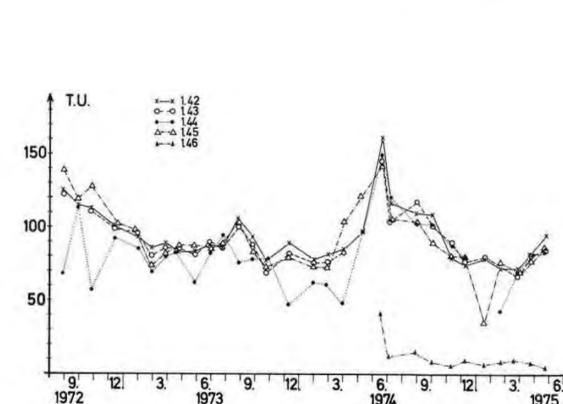
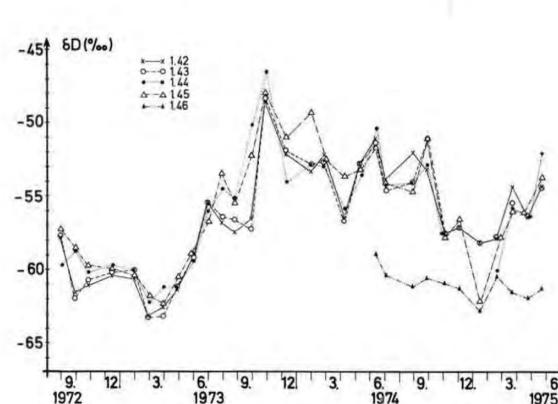
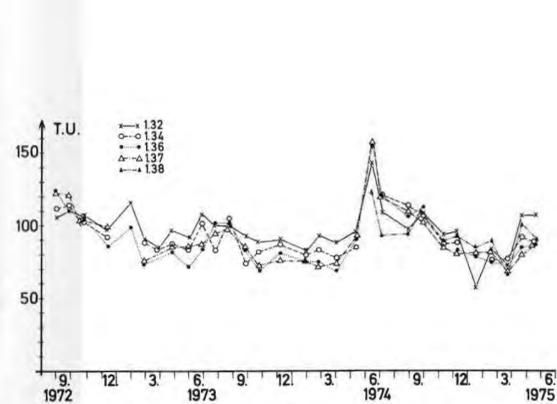
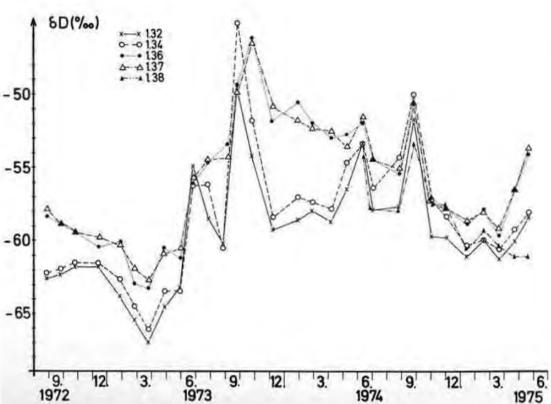
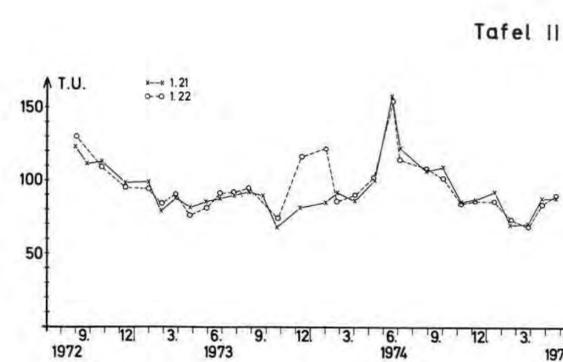
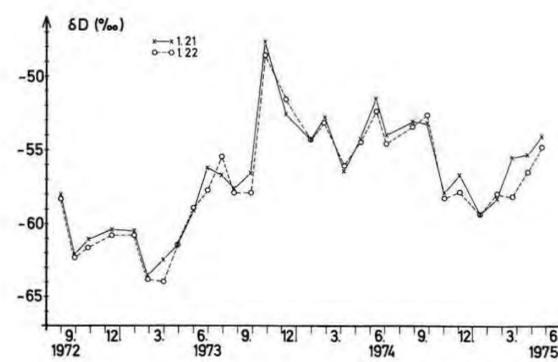
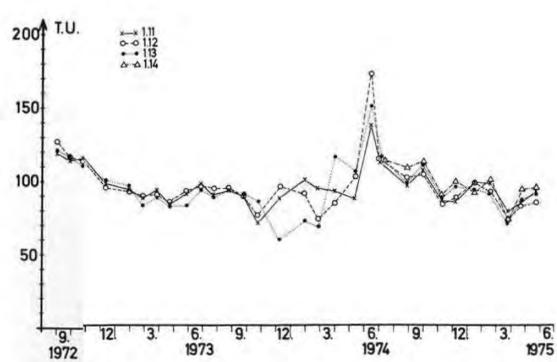
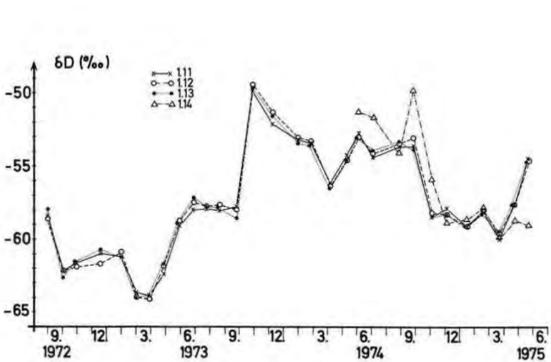
Das Karstgebiet der Ljubljana

KRAŠKO POREČJE LJUBLJANICE



1 — Flüsse und Bäche mit dauernder Wasserführung, 2 — periodischer Oberflächenabfluß, 3 — Karstquelle, 4 — Ponor, 5 — periodisch überflutete Bereiche in Poljen, 6 — Nummern von Quellen, Ponoren und Meßstationen, 7 — Höhlen, in denen die Wasserspiegelschwankungen beobachtet wurden, 8 — vermutete Karstwasserscheide, 9 — bekannte oberflächliche Wasserscheide, 10 — Polje, 11 — Landoberfläche über 700 m Seehöhe, 12 — Isohypse (je 100 Höhenmeter), 13 — Einsturzdolinen, 14 — große Höhlengänge, 15 — Limnigraph, 16 — Pegelstation.

Priloga 1. Hidografska karta. 1 — stalni površinski tok, 2 — občasni površinski tok, 3 — kraški izvir, 4 — ponor, 5 — presihajoče kraško jezero — poplavljenno kraško polje, 6 — oznake izvirov, ponorov in vodomernih postaj, 7 — vodne jame, v katerih je bilo opazovano nihanje vodne glavnice, 8 — domnevno kraško razvodje, 9 — znano površinsko razvodje, 10 — kraško polje, 11 — površje nad 700 m, 12 — izohipse na 100 m, 13 — udornice, 14 — večji jamski rovi, 15 — limnigraf, 16 — vodomerna postaja.



Zeitlicher Verlauf des Deuterium- und Tritiumgehalts
an Wässern des Einzugsgebietes der Ljubljana.
Probennahmestellen siehe Tafel I.

Unteres Savinja Tal – Markierungsversuch 1973

