

Ergebnisse eines kombinierten Markierungsversuches im Basaltgebiet von Kibwezi (Kenya)

Von

P. HACKER (Wien), H. ZOJER & J. G. ZÖTL (Graz)

Inhalt

	Seite
1. Vorbemerkung	107
2. Allgemeines zur Geographie und Geologie von Kenya	108
3. Die Untersuchungen und das Untersuchungsgebiet	110
3.1. Die geologischen Verhältnisse	110
3.2. Unter- und oberirdische Entwässerung	112
3.3. Die physikalisch-chemischen Daten und die Isotopenwerte	114
4. Der Markierungsversuch	116
4.1. Die eingesetzten Markierungsstoffe und der Zweck des Versuches ..	116
4.2. Die Einspeisung	119
4.3. Die Resultate des Feldexperiments	120
Zusammenfassung	123
Literatur	124
Summary	125

1. Vorbemerkung

Markierungsversuche, d. h. der Einsatz verschiedener Tracer zur Verfolgung der Wege und Laufzeiten unterirdischer Wässer, wurden in dieser Zeitschrift des öfteren und eingehend beschrieben. Das erklärt sich vor allem daraus, daß die Notwendigkeit der Kenntnis dieser Parameter für viele Probleme der technischen Geologie und Hydrogeologie im Tunnel- und Speicherbau, die Wasserprobleme des Bergbaues und Siedlungswasserbaues und letztlich für den Schutz des unterirdischen Wassers immer dringlicher wurde.

Es ergibt sich aus dem geologischen Aufbau Mitteleuropas, daß die Markierungsversuche zunächst in Bereichen der Karbonatgesteine besondere Bedeutung erlangten, weil die Verkarstung mit der Ausbildung großvolumiger Wasserwege besondere Probleme für die obgenannten technischen Bauvorhaben und Eingriffe in den Gebirgskörper nach sich zieht. In letzter Zeit wurden jedoch auch in klastischen Gesteinsfüllungen von Tälern und Becken in zunehmendem Maße Markierungsversuche, insbesondere zur Lösung von Fragen des Wasserschutzes, durchgeführt.

Die Methoden der Markierung unterirdischer Wässer entsprechen zweifelsohne durch die seit mehr als 15 Jahren bestehende gezielte kontinuierliche Kooperation einer

Arbeitsgruppe von Fachleuten aus Deutschland, Jugoslawien, Österreich und der Schweiz in Mittel- und Westeuropa dem modernsten Stand der Forschung. Eine Folge davon ist, daß diese Kenntnisse auch in Form von von der UNESCO und der österreichischen Bundesregierung geförderten Schulungskursen für Postgraduates aus Entwicklungsländern weitergegeben werden.

Eine Schwierigkeit bei den praktischen Übungen dieser Kurse ist der Umstand, daß in manchen Heimatländern der Postgraduates nicht nur andere klimatische Bedingungen herrschen, sondern auch völlig andere geologische Verhältnisse gegeben sind. So sind besonders vulkanische Gesteine in Mitteleuropa auf relativ kleine Flächen beschränkt, während sie in anderen Teilen der Welt große Areale einnehmen. Diese Umstände und organisatorische Faktoren veranlaßten uns, in Ausnahmefällen Workshops mit Schwergewicht auf Geländearbeiten in Gebieten zu halten, in denen zwar die notwendige apparative Ausrüstung für die Laborarbeiten bereits gegeben ist, jedoch völlig von Mitteleuropa abweichende geologische Verhältnisse vorliegen.

Schließlich sei noch auf den besonderen Aspekt des Klimas hingewiesen. Während in Europa die Wassergüte in erster Linie durch Siedlungs- und Industrierwasser beeinträchtigt wird, ist in tropischen Gebieten die Gefährdung durch pathogene Parasiten, die besonders durch Stümpfe und stehende Wässer in Quellen gelangen können, ein bedeutendes Problem. Auch diesbezüglich ist die Kenntnis der Fließgeschwindigkeit der unterirdischen Wässer und der damit zusammenhängenden Verweilzeit im Untergrund notwendig und kann zu einem besonderen Anliegen von Markierungsversuchen werden.

Die aufgezählten Bedingungen führten dazu, daß im Jänner 1980 ein Tracing-Experiment im Bereich von Kibwezi im südlichen Kenya, in einem Gebiet junger Basaltflows, unter tropischen Bedingungen durchgeführt wurde. Für die Laborarbeiten standen Einrichtungen des Geological Department im Ministry for Environment and Natural Resources zur Verfügung.

An dem Workshop nahmen Postgraduates (ausgebildete Geologen mit praktischer Erfahrung) aus Kenya, Äthiopien, Zambia, Tanzania und Uganda teil.

Für die Förderung des Workshops ist vor allem dem Ministry for Environment and Natural Resources (Mines and Geological Department) von Kenya, dem Ministry of Water Development in Kenya, der Universität Nairobi, dem Österreichischen Bundesministerium für Auswärtige Angelegenheiten, der Österreichischen Botschaft in Nairobi und dem UNESCO Regional Office for Science & Technology für Ostafrika in Nairobi und dem persönlichen Einsatz von Dr. Viktor KAHR zu danken.

Unser besonderer Dank gilt der Leitung des Forschungszentrums Graz, insbesondere dem geschäftsführenden Präsidenten Herrn Landesamtsvizepräsident Senator h. c. Wirkl. Hofrat Dr. Werner BLANC, Herrn Direktor Dr. H. RAIMANN sowie dem Leiter der Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Herrn Hofrat Dipl.-Ing. Dr. E. HÜTTNER, deren positive Einstellung (Freistellung der Teilnehmer) dieses Vorhaben erst ermöglichte.

2. Allgemeines zur Geographie und Geologie von Kenya

Das Staatsgebiet von Kenya bedeckt eine Fläche von 582.646 km² und liegt zwischen 34° und 41° östlicher Länge und 4° 30' südlicher und 5° nördlicher Breite (Fig. 1).

Von der Küste des Indischen Ozeans bzw. der Grenze gegen Somalia zeigt die

Topographie einen stufenweisen Anstieg gegen NW und W, wo im Zentrum des Landes seine größte Erhebung, der Mount Kenya (5195 m Seehöhe), liegt. Der Kilimandscharo, der höchste Berg Afrikas (5895 m Seehöhe), ist bereits in Tanzania. Er gehört aber insofern auch zur Landschaft Süd-Kenyas, als seine Schnee- und Eisfelder die Silhouette dieses Gebietes prägen und das Einzugsgebiet von Quellen und Grundwasservorkommen sowohl in Süd-Kenya als auch im nördlichen Tanzania speisen.

Am Äquator gelegen, gehört Kenya zwar zu den tropischen Ländern, die Tempe-

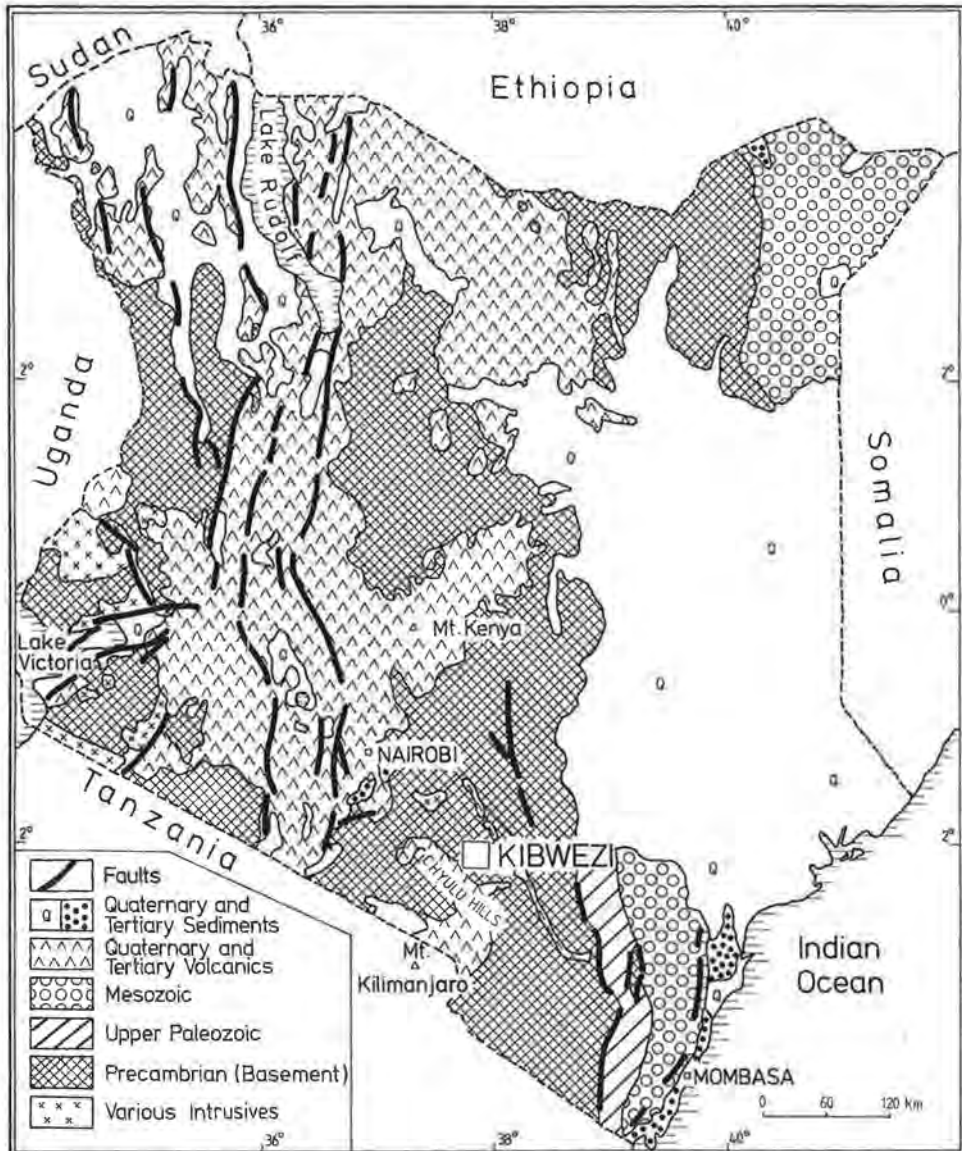


Fig. 1: Generalisierte geologische Karte von Kenya.

raturen und damit auch die Vegetation werden aber durch die jeweilige Höhenlage stark beeinflusst.

Die Regenzeiten treten im Frühling und Herbst auf. Wie die Lufttemperatur sind auch Niederschlagshöhe, Intensität der Niederschläge und Luftfeuchtigkeit stark von der Höhenlage abhängig. So weist der Raum um Nairobi (ca. 1700 m Seehöhe) eine durchschnittliche jährliche Niederschlagshöhe von 960 mm auf, die Tagestemperaturen erreichen selten 27° C und fallen in den Nächten bis 10° C. Die Hafenstadt Mombasa hat einen durchschnittlichen Jahresniederschlag von 1200 mm, hohe Luftfeuchtigkeit und Temperaturen um 25° C auch während der Nacht.

Diesen klimatischen Unterschieden entsprechend sind auch die Vegetationszonen. Die höhergelegenen Bereiche werden durch die Baumsavanne mit den bekannten Wildreservaten beherrscht. Unter 1000 m Seehöhe beginnen Buschwerk und Bäume immer mehr zu dominieren, und in Bereichen oberflächennahen Grundwassers und von Oberflächengerinnen gibt es Sümpfe und Dschungel. Pavianherden, Schlangen und die Tsetsefliege sind ein arges Handikap für geologische Kartierungen und Felduntersuchungen. Junge Basaltflows mit dichter Vegetation sind praktisch unpassierbar.

27% der Gesamtfläche Kenyas werden von vulkanischen Gesteinen eingenommen, wobei 50% davon Basalte quartären Alters sind.

Das weltweit bekannte tektonische Phänomen des Ostafrikanischen Grabens quert Kenya auf einer Länge von ca. 700 km in 36° östlicher Länge von Norden nach Süden.

3. Die Untersuchungen und das Untersuchungsgebiet

3.1. Die geologischen Verhältnisse

Das präkambrische Grundgebirge im Simba-Kibwezi-Gebiet wird hauptsächlich aus Gneisen, Granuliten, Schieferen und kristallinen Kalken aufgebaut. Zwischen der Kreide und dem mittleren Tertiär unterlag dieses Gebiet einer Einebnungsphase. Etwa ab dem Miozän kam es zu den ersten vulkanischen Aktivitäten. In dieser Zeit war es auch, als sich im ehemaligen Yattatal ein phonolitischer Lavaström talwärts wälzte. Durch die inzwischen eingetretene Reliefumkehr ist es heute als weithin sichtbares Yattaplateau im E von Kibwezi bekannt.

Im frühen Pleistozän nahmen die vulkanischen Aktivitäten stark zu. Aus zahllosen Vulkanschloten im Sultan-Hamud-Simba-Gebiet ergoß sich die Lava. Bis in historische Zeit hinein folgten weitere vulkanische Ereignisse. Eindrucksvolle Zeugen sind hier die Vulkankegel der Chyulu-Kette. Von diesen Vulkanen flossen Lavaströme die alten Flußtäler zwischen Kiboko und Kibwezi manchmal bis zu 30 km hinab, bevor sie erstarrten. Viele dieser Vulkanschlote liegen entlang von Bruchlinien, und es ist belegt, daß Bruchbildungen auch noch während und nach der Eruptionsperiode eintraten. Im Hinterland von Kibwezi konnten mehr als 70 Lavaströme gezählt werden, deren Mächtigkeit von wenigen Metern bis zu mehr als 15 m schwankt. Bis heute kreuzt kein Tal dieses Chyulu-Kiboko-Kibwezi-Lavafeld, und eine Durchquerung wird zudem noch durch eine dichte tropische Vegetation verhindert. Der Regen, der dort fällt, versickert rasch in den Untergrund, um später an den Lavastirnseiten in Kiboko, Makindu, Umani (Umgebung von Kibwezi) und Kibwezi in ergiebigen Quellen wieder auszutreten (Fig. 2, 3).

Drei Arten von Olivin-Basalten können in diesem Gebiet unterschieden werden, wovon die Pahoehoe- und die Aa-Basalte die verbreitetsten sind. Soweit bekannt, sind

diese nie miteinander verzahnt beobachtet worden. Beide Lavatypen zeigen Säulenbildungen (manchmal hexagonal) sowie zahlreiche Brüche parallel zur Oberfläche.

Die Chyulu-Pahoehoe-Lava, von der es gute Beispiele auch in Kibwezi gibt, wird durch ihre ebene, gut geklüftete Oberfläche und die gleichförmigen Blasen charakterisiert. In den jüngsten Pahoehoe-Lavaströmen wurden Kanäle und Röhren beobachtet.

Die Aa-Lava, die einen Großteil des Kibwezi gebiets bedeckt, ist bekannt für die unregelmäßige Form ihrer Blasen und ihre raue Oberfläche. Im Gegensatz zur Pahoehoe-Lava ist sie unter der Oberfläche viel dichter, und die Kontraktionsspalten

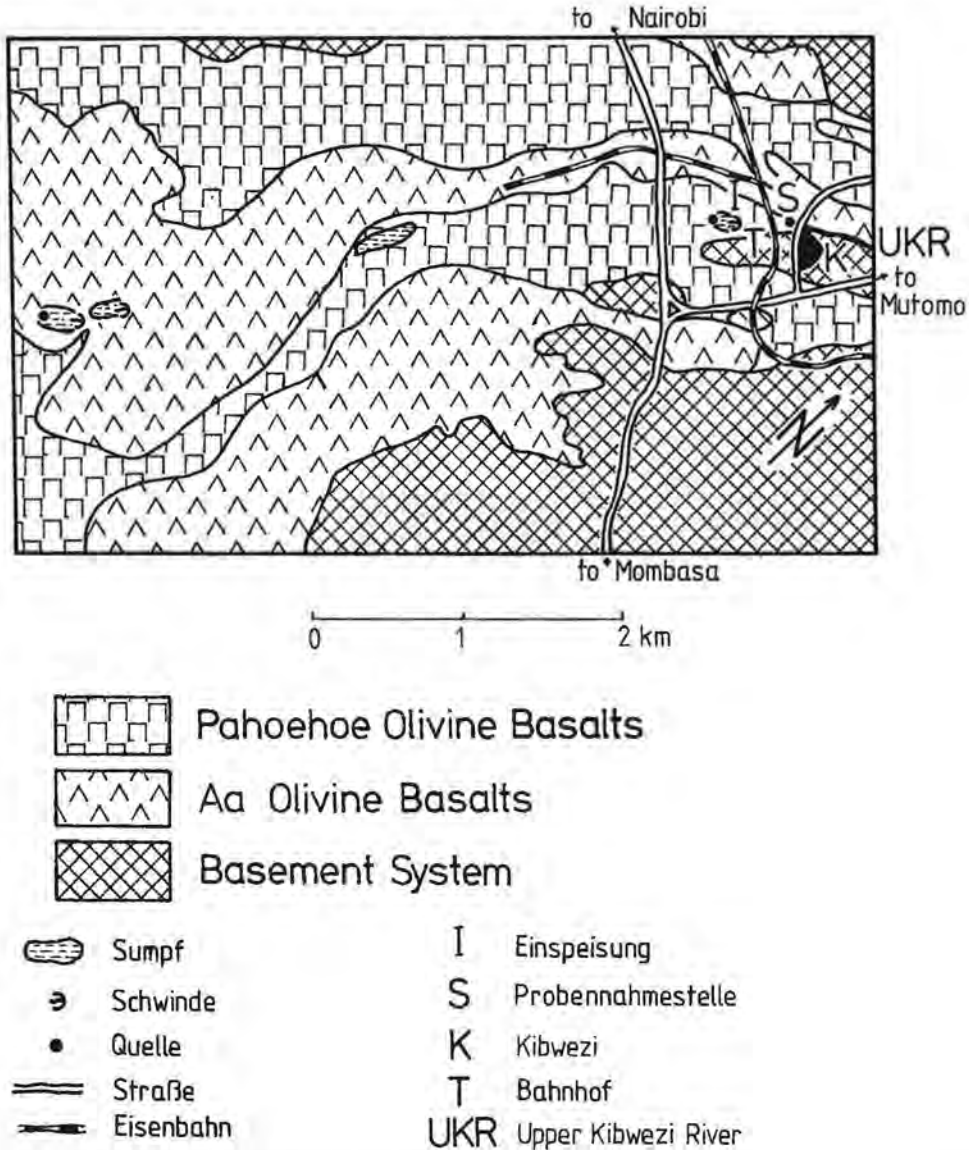


Fig. 2: Geologie des Gebietes von Kibwezi (nach E. P. SAGGERSON, 1963).



Fig. 3: Umaniquellen, der Ursprung des Kibwezi-Flusses (Foto: P. HACKER, 1979).

sind seltener. Die Aa-Lava im Bereich Kibwezi zeichnet sich außerdem durch geringmächtige Schlacken- und Blockbildungen an der Deckfläche aus.

Die Durchlässigkeit der Basalte ist extrem hoch, wobei die der Pahoehoe relativ höher ist als die der Aa-Basalte. An einigen Aufschlüssen ist zu beobachten, wie an der Basis der Lava und aus der gesättigten Zone durch zahllose Spalten und Klüfte Wasser austritt.

3.2. Unter- und oberirdische Entwässerung

Wenn die Lavaflows nicht zu mächtig sind und das Gefälle der flachen Täler im Basement, denen die Lavaströme folgten, nicht zu groß ist, so findet sich bei seichtem Grundwasserspiegel vielfach eine sich wiederholende Folge von Quellen und Sümpfen, von denen das Wasser wieder in den blockigen Basaltstrom abzieht. Ein typisches Beispiel für diesen Wechsel von ober- und unterirdischem Abfluß entlang eines Basaltflows ist das Gebiet westlich von Kibwezi (Fig. 2).

Die ersten größeren Quellen dieses Systems sind die Umani-Quellen, die am Fuße der Chyulu Hills in 975 m Seehöhe entspringen. Sie liegen etwa 9 km Luftlinie südwestlich von Kibwezi (s. Geological map of the Simba-Kibwezi area, E. P. SAG-

GERSON, 1963). Diese Quellen speisen einen kleinen See am Rande des Dschungels, dessen Abfluß am Ostufer unterirdisch in Spalten des Basalts erfolgt (Fig. 3). Die sehr dichte Vegetation (Dschungel) auf dem Basaltflow bezeugt den seichtliegenden Grundwasserspiegel, weil auf der Oberfläche des wulstig-blockigen Basalts jungquartären Alters faktisch noch keine Bodenbildung erfolgte.

Talabwärts tritt in Mulden des Basaltflows das seichtliegende Grundwasser immer wieder zutage und bildet Sumpftümpel, die von einem dichten grünen Algenteppich überzogen und undurchdringbarem Dschungel umgeben sind. Versucht man, auf Pfaden mit geländegängigen Fahrzeugen auch nur in den Randbereich einzudringen, so wird man von Tsetsefliegen umschwirrt, und zähnefletschende Familienväter von Pavianhorden weichen nur drohend zur Seite. Selbst mit Tropenverhältnissen seit langem vertraute Geologen schreiben: "It is unwise to penetrate for greater distances into the forests without the assistance of local guides" (E. P. SAGGERSON, 1963, S. 35).

Der talabwärts letzte Dschungeltümpel dieser Art liegt in dem bei Kibwezi endenden Basaltflow, einige hundert Meter südwestlich der Bahnstation Kibwezi (Fig. 2). Am Ende des Basaltflows und am Rand des Dschungels tritt der Grundwasserstrom schließlich in Quellen aus, die den Ursprung des perennierenden Oberflächengerinnes, den Oberen Kibwezifluß bilden. Es handelt sich um malerisch gelegene Wasseraustritte entlang der Schichtfläche zweier verschieden alter Basaltflows (Fig. 4), die von der Bevölkerung genutzt werden. Ihre Verbindung mit den Schwinden des nahegelegenen Dschungeltümpels sollte durch einen Markierungsversuch geklärt werden, der im Rahmen des eingangs zitierten Workshops durchgeführt wurde.

Das Gelände war sowohl aufgrund der nicht zu großen Entfernung von Schwinden



Fig. 4: Wasseraustritt im Quellbezirk von Kibwezi (Foto: H. ZOJER, 1980).

und Quelle als auch der klaren hygienischen Fragestellung für eine Demonstration hervorragend geeignet. Die gegebenen geologischen Verhältnisse – offene Spalten und Fließschläuche im Basalt und das Gefälle des Grundwasserstromes (zwischen 2 und 5%) – ließen einen raschen Durchgang der eingesetzten Markierungsmittel (Tracer) erwarten.

3.3. Die physikalisch-chemischen Daten und die Isotopenwerte

Vor Beginn des Markierungsversuches wurde das Grundwasser auf seine physikalisch-chemischen Kennwerte sowie auf seine Isotopenzusammensetzung analysiert. Die vorhandenen chemischen Daten waren nicht sehr umfangreich (Tab. 1), zeigen aber dennoch, daß das Grundwasser des Untersuchungsgebietes nur schwach mineralisiert ist. Die Wässer, die als Hydrogenkarbonatwässer klassifiziert werden können, sind aufgrund ihres Ca/Mg-Verhältnisses und ihres relativ hohen SiO₂-Gehaltes typisch für Basaltgebiete.

Bevor ein kombinierter Markierungsversuch durchgeführt wird, müssen physikalisch-chemische Analysen deshalb erfolgen, weil

- bereits ihre Ergebnisse zeigen, welche der Proben derselben oder einer ähnlichen Grundwassergruppe angehören (es können daher die ersten Schlußfolgerungen gezogen werden),
- der natürliche, ungestörte chemische Hintergrund des Grundwassers im Untersuchungsgebiet bekannt wird (von speziellem Interesse sind die Ionen Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻),
- aufgrund dieser Kenntnis sowohl die Menge des einzuspeisenden Markierungsmaterials angeschätzt als auch der richtige Hintergrund bei der Auswertung abgezogen werden kann,
- es wichtig ist, zu wissen, ob das Grundwasser bereits mit Abwässern belastet ist, die Farbtracer enthalten, und
- man dadurch Absorptionvorgänge in den Griff bekommt, die sich während des Tracerdurchganges ereignen können. Daraus sind wieder Schlußfolgerungen über die Geologie des Untergrundes, die Zusammensetzung des Gesteins/Sediments (z. B. Tonminerale) des Entwässerungssystems ableitbar.

Die Kenntnis des pH-Wertes ist eine Voraussetzung für die Wahl der Farbtracer. So sollte z. B. Uranin nicht in Wässern mit einem pH-Wert von weit unter 7 eingesetzt werden.

Das Wasser der Quelle nahe der Einspeisungsstelle wurde weiters auf seinen natürlichen Isotopengehalt untersucht. Bestimmt wurde die Konzentration des instabilen Umweltisotops Tritium (³H oder T) sowie die der stabilen Isotope Sauerstoff-18 (¹⁸O) und Deuterium (²H oder D).

Werden die mittleren δD- und δ¹⁸O-Werte des Niederschlages in den Taita Hills (etwa 120 km südlich von Kibwezi) – das ist ein Niederschlag, der seinen Ursprung im Verdunstungsgebiet des Indischen Ozeans hat – gegeneinander aufgetragen, so liegen die Punkte auf einer Geraden mit der Gleichung

$$\delta D = 7 \delta^{18}O + 9 \quad (\text{Fig. 5}).$$

Da auch die Niederschlagswerte von Dar es Salam/Tansania (IAEA, Vienna 1979) gut in diese Niederschlagsgleichung passen, kann angenommen werden, daß diese Niederschlagslinie (Fig. 5) repräsentativ für diesen Bereich Afrikas und damit für die durch den SE-Passat herangebrachten Niederschläge ist.

Tab. 1: Die Ergebnisse chemischer Analysen an ausgewählten Wässern im Bereich von Kibwezi (in mg/l).

	pH	elektr. Leitf. ($\mu\text{S}/25^\circ\text{C}$)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂
Umani-Quelle	7,8	296	38	26	n. b.	n. b.	0,1	12	38	n. b.	285	35
Quelle nahe der Einspeisestelle	6,8	398	44,1	26,8	73	33	0,1	38,6	10,7	15,3	419	n. b.
Quellen von Chae (3 km NE Kibwezi)	6,9	n. b.	44	29	n. b.	n. b.	0,1	12	32	n. b.	332	30

n. b. = nicht bestimmt

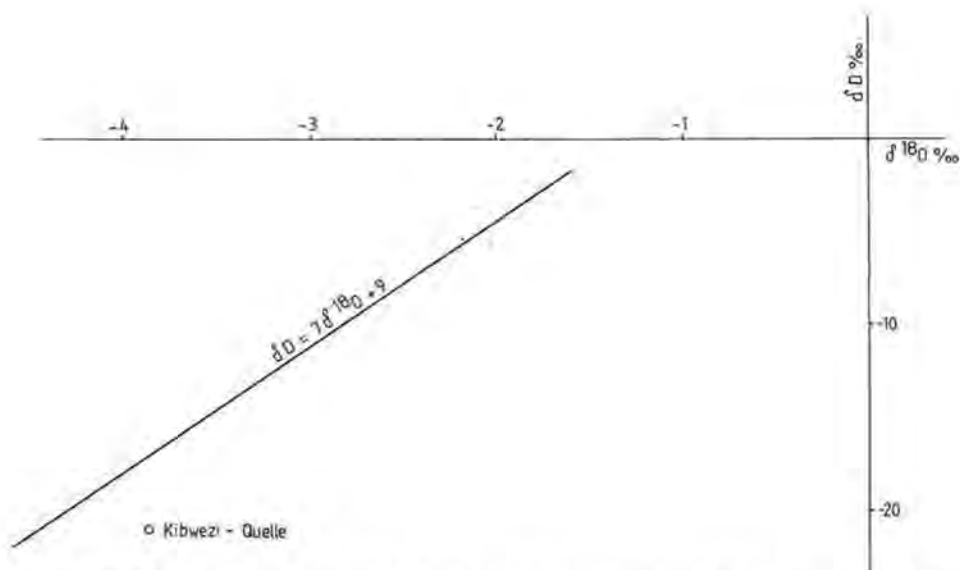


Fig. 5: Verhältnis Deuterium/Sauerstoff-18 des Niederschlagswassers vom Südkenya und der Kibwezi-Quellen.

Die D- und ^{18}O -Werte der Kibwezi-Quelle jedoch liegen eindeutig abseits und unterhalb dieser Niederschlagsgeraden. Im allgemeinen ist das ein Hinweis und die Folge von Evapotranspirationsvorgängen, wobei das D stärker angereichert wird als das ^{18}O . Auch bei den Wässern der Kibwezi-Quelle ist dies gegeben, weil im Hinterland und höchstwahrscheinlich im weiteren Einzugsgebiet der Quelle Sümpfe mit Stellen freier Wasseroberfläche liegen, wo eine Anreicherung der schweren Isotope erfolgt.

Der Tritiumgehalt der Quelle ist mit 5 T.E. niedrig. Da von denselben Niederschlagsstationen in den Taita Hills 3H -Analyseergebnisse verfügbar sind, die Konzentrationen zwischen 5 und 15 T.E. zeigen, scheint eine nur kurze Verweildauer des Grundwassers im Untergrund vorzuliegen.

4. Der Markierungsversuch

4.1. Die eingesetzten Markierungsstoffe und der Zweck des Versuches

Unter den Triftstoffen, die bei Grundwasseruntersuchungen in der Vergangenheit Verwendung fanden (wie Fungi, Bakterien, Viren usw.), erwiesen sich nur wenige als wirklich anwendbar. Einer von diesen ist die Spore der Pflanze *Lycopodium clavatum*. Sie hat eine Tetraederform und ist 26 bis 34 μ groß. Ein Kilo Sporenstaub, der über den Drogeriehandel bezogen werden kann, enthält 100 bis 300 Milliarden Sporen (J. ZÖTL, 1974). Ihr spezifisches Gewicht ist von ihrem Alter und dem Trockenzustand abhängig und beträgt etwa 1,1. Entsprechend diesem günstigen spezifischen Gewicht verbleiben die Sporen sogar in nur mäßig fließendem Wasser für lange Zeit als Suspension. Das ist auch der Grund, weshalb sie überhaupt als Triftstoff im Grundwasser eingesetzt werden können (schwimmende Körper sind nicht verwendbar).

Entscheidend aber für die Anwendung der an sich farblosen Sporen als Tracer war die Entwicklung M. DECHANTS's (1967), die Lycopodium-Sporen zu färben, ohne hierbei deren positive Eigenschaften, wie das Schweben- und Emulsionsvermögen, zu zerstören.

Die Farbgebung kann in fünf Farben erfolgen (rot, blau, grün, violett und braun), wobei selbst konzentrierte Abwässer weder der Konsistenz noch der Brillanz der Farbe schaden.

Die Tatsache, daß nun Sporen in fünf Farben und mit völlig gleichen Eigenschaften gleichzeitig in mehrere Schwinden des Untersuchungsgebietes eingespeist werden können, und daß die Probennahme mit Planktonnetzen sowie die mikroskopische Auszählung der Probe in je einem Arbeitsgang durchgeführt werden können, bedeutet einen enormen Vorteil dieses Tracers. Darüber hinaus besteht somit die Möglichkeit, daß zur Klärung eines komplexen unterirdischen Entwässerungsproblems der Einsatz dieser unterschiedlich gefärbten Sporen zu gleichen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen stattfinden kann.

Wann immer hydrologische Zusammenhänge zu untersuchen und Wasseraustritte für Versorgungsanlagen betroffen sind, der Vorteil der Sporen ist ihre Unsichtbarkeit und Ungefährlichkeit für den Menschen.

Die einzuspeisenden Mengen von Lycopodium-Pulver können theoretisch unbegrenzt sein, Schüttung und Einzugsgebiet geben aber hierfür gewisse Faustregeln (J. ZÖTL, 1974, S. 60). Auf der anderen Seite gibt ihr Wiederaustritt darüber Gewißheit, daß auch andere Keime und Bakterien nicht gefiltert werden (z. B. der Typhusbazillus mit einer Größe von 7 μ).

Da die einzelne Spore nicht weiter „verdünnt“ werden kann, ist die Chance, eine positive Probe zu finden, immer noch vorhanden, auch wenn andere gelöste Markierungsstoffe versagen, da ihre Konzentration beim Austritt bereits weit unter dem Nachweislimit liegt.

Die Anwendung der Sporen für Grundwasseruntersuchungen ist jedoch begrenzt und hängt von dem hydrogeologischen und lithologischen Aufbau des Aquifers ab. Aufgrund ihres Durchmessers und ihrer festen Konsistenz benötigen die Sporen gut durchflossene Fugen-, Kluft-, Röhren- und Hohlraumssysteme. Alle feinklastischen Sedimente (Sande, Tone, Feinkies usw.) filtern die Sporen ab. Ihre Anwendung ist daher auf Karstgebiete, stark geklüftete Sandsteinareale und, wie der Bericht bestätigt, auch auf bestimmte vulkanische Gesteine beschränkt. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist es, daß nur eine qualitative, im besten Fall eine halbquantitative Auswertung des Tracer-Durchganges möglich ist. Eine Zeit-Konzentrations-Kurve kann zwar erstellt werden, nicht jedoch die Berechnung der Durchgangsmenge.

Weitere in Verwendung stehende Tracer sind die **fluoreszierenden Farbstoffe**. Ihr Vorteil liegt darin, daß zur Einspeisung nur geringe Mengen benötigt werden. Dadurch kommt es zu keiner wesentlichen Änderung der Grundwasserdichte. Bei der Messung dieser Tracer wird das Licht einer bestimmten Wellenlänge durch den Farbstoff absorbiert. Da die Wellenlänge der einzelnen in Betracht kommenden Fluoreszenz-Tracer unterschiedlich ist, können sie zu gleicher Zeit eingesetzt werden.

Ein Tracer dieser Art, der auch in Kibwezi Verwendung fand, ist Uranin (Natriumfluoreszein). In Lösung ist dieser Farbstoff noch mit freiem Auge bis zu einer Konzentration von 10 mg/m³ sichtbar. Die Fluoreszenzstärke von Uranin ist vom pH-Wert des Mediums abhängig, es sollte basisch sein. Uranin wird von den Tonmineralien nicht wesentlich absorbiert, auch ist es für den menschlichen Genuß ungefährlich.

Im Gebiet von Kibwezi wurde auch Natriumchlorid (NaCl) eingespeist. Der

Vorteil dieses Tracers ist seine gute Löslichkeit im Wasser, seine chemische Resistenz, die einfache Bestimmung mit dem Flammenfotometer, der Atomabsorption oder der Titration und die Möglichkeit der quantitativen Auswertung. Auf der anderen Seite müssen große Mengen dieses Markierungsstoffes eingesetzt werden, wodurch Organisationsprobleme für entfernte Gebiete entstehen können. Auch der Kationenaustausch mit Tonen muß bedacht werden.

Der Zweck des kombinierten Markierungsversuches im Basaltgebiet von Kibwezi war es – sieht man von der Vorführung für die Seminarteilnehmer ab –, auch über die Salzung als Tracer-Einsatz im vulkanischen Gestein Erfahrungen zu sammeln. Wie allgemein bekannt ist, können an der Basis eines Lavastromes Hohlräume und sogar Höhlen entstehen, da dort die flüssige Lava ihre hohe Temperatur noch länger behält als nahe der Oberfläche und noch weiter fließt, wenn der Flow an der Oberfläche schon erstarrt ist. Auf diese Weise entstehen Röhren und Höhlen im Basalt, deren Form und Ausdehnung hauptsächlich von der Temperatur und Konsistenz der Lava wie auch von der Morphologie und Vegetation des Untergrundes abhängt. In diesem Grundwasserleiter kann das Grundwasser entweder annähernd laminar oder aber wie in einer Druckröhre fließen.

Im Kibwezi-Gebiet wurden drei unterschiedliche Markierungsstoffe in den Untergrund eingespeist: Lycopodium-Sporen, NaCl und Uranin. Ihre Wahl erfolgte aus folgenden Gründen:

- um die unterschiedlichen Tracerdurchgänge miteinander vergleichen zu können und danach die Grundwasserfließgeschwindigkeit zu berechnen. Die Kenntnis von der wahren Fließgeschwindigkeit vermittelt einen Eindruck über die Grundwasserumsatzrate und das Speicherverhalten des Basaltes;
- um herauszufinden, ob die Struktur der Basaltröhren einen Durchgang der Sporensuspension ermöglicht;
- um der bekannten Tatsache Rechnung zu tragen, daß unter günstigen Bedingungen unterirdische Zusammenhänge mit dem Suspensionsmaterial gefunden werden können, auch dann, wenn andere Tracer fehlschlagen, weil ihre Verdünnung zu hoch ist;
- um das Eingabe-Ausbeute-Verhältnis quantitativ zu errechnen und darüber hinaus auch einige Hinweise über die Speicherkapazität zu erhalten;
- um im Falle eines Sporendurchganges innerhalb einer befristeten Zeit auf die Möglichkeit des Durchganges und Wiederaustrittes von Krankheitserregern schließen zu können.

Der letzte Punkt mag für die Hygiene in den tropischen und subtropischen Ländern Afrikas von besonderem Interesse sein, da hier sanitäre Einrichtungen fehlen oder unterversorgt sind. Neben den bereits erwähnten Typhusbakterien, die ihrer Größe von 7μ wegen auch dort ihren Weg finden, wo dies die Sporen tun, kann die Sporenrift auch bezüglich der Bilharziose, einer zunehmend stärker auftretenden Geißel auf dem afrikanischen Kontinent, Hinweise ergeben.

Sicherlich war es nicht die Aufgabe des Seminars, herauszufinden, ob in der Umgebung von Kibwezi Bilharzia auftritt, doch ergab sich dieser Aspekt zwangsläufig aus dem Ergebnis des Versuches.

Für die Entwicklung der Bilharzia sind Quellen mit einem pH-Wert zwischen 6,8 und 7,8, niedriger Gesamthärte, Wassertemperaturen zwischen 20 und 30° C, Sümpfe mit stagnierendem Wasser und die vorhandenen Wasserschnecken die idealen Bedingungen.

Die Entwicklung der Erreger der noch immer gefürchteten Leber-Darm-Erkrankung verläuft grob skizziert so:

Da Leute, die von der Larve des Saugwurmes *Bilharzia* infiziert sind, nicht nur in der Umgebung der Ortschaft Kibwezi leben, sondern auch im Dschungel des nahen Hinterlandes, können die Eier dieses Saugwurmes deren Körper bei der Exkrementabgabe unkontrolliert verlassen. Unter günstigen, trockenen Umweltbedingungen sind die Eier (etwa 40 μ lang und 60 μ dick) für eine relativ lange Zeit lagerfähig. Der nächste Entwicklungsschritt, das Ausschlüpfen der Larve *MIRACIDIUM*, stellt sich unmittelbar nach Kontakt mit Wasser oder auch bei feuchter Witterung ein. Diese Larve kann nur im Wasser leben. Wird sie in Wasserwege des Lavastroms geschwemmt, hängt ihr Überleben davon ab, ob sie innerhalb von maximal 24 Stunden einen Zwischenwirt, eine Schnecke von der Species *BULINIDAE* findet. Nur innerhalb dieser Zeit kann sie die Schnecke befallen, sonst stirbt die Larve ab. Aus dem *MIRACIDIUM* entwickeln sich nach 3 bis 6 Wochen, je nach den Temperaturbedingungen, zahllose *CERCARIA*. Diese sind etwa 500 μ lang und 50 μ dick und sind aufgrund ihres rotierenden Schwanzes im Wasser sehr beweglich. Trifft nun eine *CERCARIA* innerhalb von maximal 48 Stunden auf einen Menschen oder Affen (wahrscheinlich auch andere Tiere), kann sie durch die Haut in den Blutkreislauf eindringen. Der Kreis der Entwicklung ist damit geschlossen.

4.2. Die Einspeisung

Fig. 2 zeigt, daß am Ostrand des untersten Urwaldtümpels im Basaltflow westlich der Ortschaft Kibwezi das Wasser in den Untergrund abfließt (Fig. 2, I). Diese Stelle wurde als Einspeisungspunkt ausgewählt. Nach der Freilegung der Versinkungsstelle von Wasserpflanzen und Algen war der Abzug des Wassers zwischen Basaltblöcken einwandfrei sichtbar.

Die Einspeisung erfolgte am 12. Jänner 1980. Die Wetterbedingungen waren wie an den vorhergegangenen und nachfolgenden Tagen heiß und niederschlagsfrei. Eingespeist wurden:

- 15.00–16.30 Uhr: 400 kg NaCl (240 kg Cl und 160 kg Na wurden in ungefähr 5000 l Wasser gelöst).
- 16.30–16.40 Uhr: 5 kg blaugefärbte Sporen, vorgelöst in Wasser. Die Suspension wurde durch ein feinmaschiges Drahtnetz in einem Trichter direkt in eine Schwinde eingegeben.
- 16.40–16.50 Uhr: 2 kg Uranin, in Wasser gelöst.

Die Injektion wurde von einheimischen Hilfskräften unter Aufsicht durchgeführt. Die Tracer zogen rasch und ohne Rückstau in den Untergrund ab.

Nur 350 m Luftlinie von der Einspeisungsstelle entfernt liegt der Quellhorizont von Kibwezi. Die Schüttung betrug zur Versuchszeit insgesamt 50 l/s. Der Quellhorizont liegt zwischen der Straße und der Bahnstation an der Grenze des Basaltflows zur kristallinen Basis, drei Hauptaustritte wurden kartiert.

Um Probleme mit der Dorfbevölkerung zu vermeiden, die die Quelle als Trink- und Brauchwasser nutzt, wurden die Beobachtungseinrichtungen (Planktonnetze etc.) erst während der Einspeisung installiert. Fig. 4 zeigt ein Planktonnetz mit Holzrahmen bei dem als Nr. 1 bezeichneten Quellaustritt. Die Aktivkohlesäckchen für die Uraninadsorption wurden ebenfalls erst zu dieser Zeit in die Quellaustritte eingehängt.

4.3. Die Resultate des Feldexperimentes

Vorproben wurden von allen Quellaustritten bereits am Tag vor der Einspeisung gezogen.

Die reguläre Probennahme begann am 12. Jänner 1980 um 17.30 Uhr. Ab dieser Zeit erfolgte eine 2stündliche Probennahme bis 13. Jänner, 8.00 Uhr. Die zeitliche Begrenzung der Probennahme war möglich, weil der Uranindurchgang mit freiem Auge zu beobachten war. Die Schüttung der Quellen blieb während der ganzen Versuchszeit unverändert.

Die mikroskopische Untersuchung der Planktonnetzproben wurde ebenso wie die Messung von Natrium und Chlorid und des Uraningehaltes der Wasserproben im geochemischen Labor des Department of Mines and Geology in Nairobi durchgeführt. Die Resultate zeigen Tab. 2 und Fig. 6-8.

Von den drei Hauptaustritten innerhalb des Kibwezi-Quellbereiches wurden nur die Nr. 1 und 3 auf den Sporendurchgang beobachtet. Was die eingesetzten Lycopodium-Sporen anbelangt, so war bei Austritt Nr. 1 nur eine Probe positiv. Der Grund ist wohl darin zu sehen, daß hier schon klastische Sedimente über dem Basalt liegen, die den größten Teil der Sporen abfilterten.

Sämtliche vom Wasseraustritt Nr. 3 gezogenen Proben waren tracerpositiv.

Was die Sporen betrifft, so wurde bereits darauf hingewiesen, daß nur halbquantitative Ergebnisse anfallen. Fig. 6, die Zeit-Konzentrations-Kurve des Sporendurchganges, zeigt das erste Auftreten, die Spitze des Sporendurchganges, und den steilen Abfall der Sporenzahlen. Schon die Probe, gezogen eine Stunde nach der Einspeisung, war sporenspezifisch. Daraus ist zu schließen, daß das Maximum der Fließgeschwindigkeit in einzelnen großlumigen Basaltröhren über 400 m/h sein kann. Die mittlere Fließgeschwindigkeit des unterirdischen Wassers in diesem Basaltflow ist aufgrund dieser Durchgangskurve mit 80 m/h anzuschätzen.

Unterschiede ergaben sich im Vergleich von Salz- und Farbdurchgang.

Tab. 2: Anzahl der Sporen und der Gehalt an Chlorid, Natrium und Uranin in den drei Hauptaustritten des Quellbezirkes von Kibwezi während des Feldversuches im Jänner 1980.

Datum	Uhrzeit	Sporen	Quelle 1			Quelle 2			Sporen	Quelle 3		
			Cl ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ur mg/l	Cl ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ur mg/l		Cl ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ur mg/l
12. 1.	17.20	0	140	125	0	242	166	0		429	317	0
	17.50	0	192	147	0,9	234	157	0	1086	354	250	2,0
	18.20	0	160	139	1,1	160	128	2,3		217	172	3,6
	18.50	0	102	113	1,6	116	111	0,8	1030	145	131	1,0
	20.00	352	74	93	0,8	72	94	0	1855	98	99	0
	21.00	0	58	86		62	81	0	4056	73	88	0
	22.00	0	50	79	0,4	56	80	0	4000	64	82	
	23.00	0	45	76		50	76		1170	57	77	
13. 1.	0.00		42	78	0,9	48	73		595	54	78	
	2.00	0	39	74		44	71		320	47	73	
	4.00		36	72		42	73				74	
	6.00	0	37	70		40	70		120	49	75	
	8.00		35	71	0,8	48	70			43	73	
	10.00	0	35	73	0	42	69			42	72	

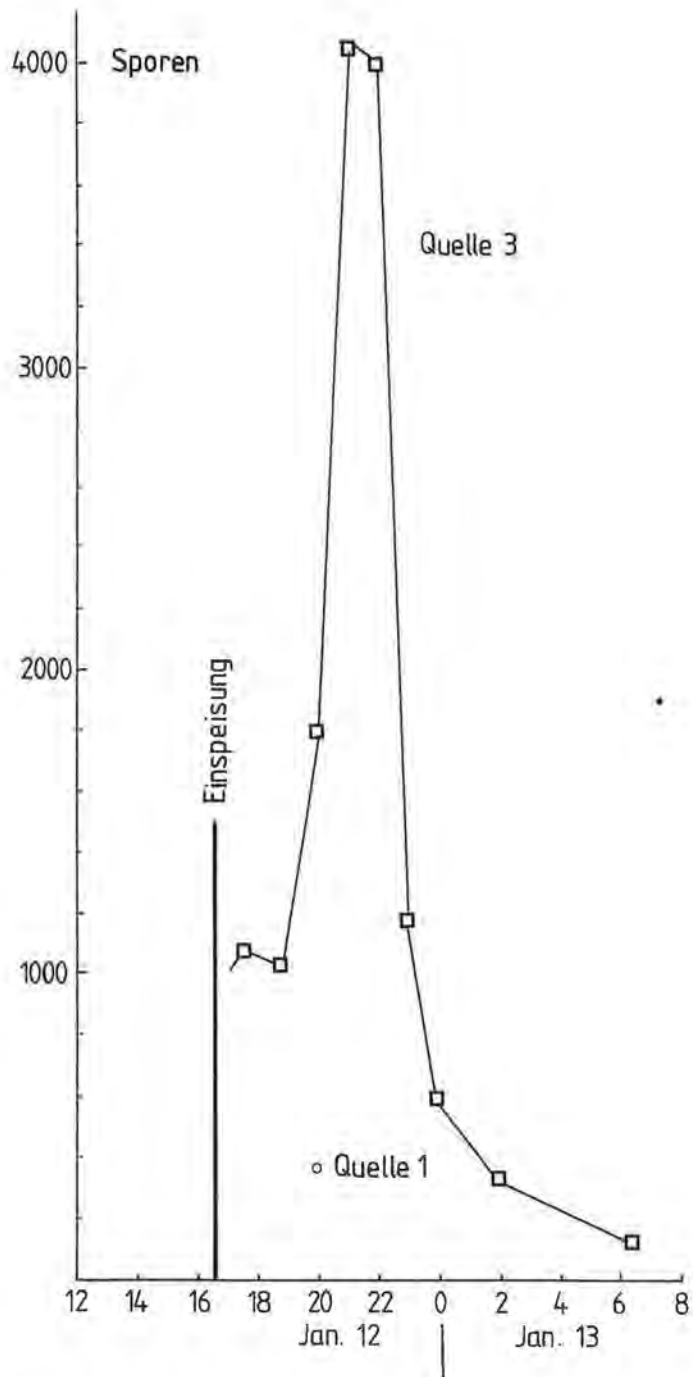


Fig. 6: Durchgangskurve der blauen Lycopodium-Sporen im Austritt 3 der Kibwezi-Quelle (Jänner 1980).

Wie Fig. 7 zeigt, begann die Probennahme für die Natrium- und Chloridmessung infolge der langen Zeit, die die Einspeisung und Lösung erforderte, zu spät, so daß der Beginn des Durchganges nicht erfaßt wurde und eine Extrapolation in Anlehnung an die Uraninkurve notwendig war. Weiters zeigen die Kurven von Fig. 7, daß der Wiederaustritt des Salzes an den verschiedenen Punkten des Quellbereiches nicht gleichzeitig erfolgte, woraus sich eine verschiedene Durchgangszeit in den einzelnen Quellsträngen ergibt (vgl. auch Fig. 8). Aus den verschiedenen Zeiten der Chloridausbringung ergibt sich eine unterirdische Fließgeschwindigkeit von 90 bis 350 m/h.

Diese breite Streuung der Fließgeschwindigkeit hängt nicht nur mit der räumlichen Verteilung der drei Quellaustritte über eine Strecke von ca. 50 m zusammen, auch die relativ lange Einspeisungszeit (z. B. $1\frac{1}{2}$ Stunden für die Salzeinbringung) ist in Betracht zu ziehen und betont deren Einfluß auf die mittlere Durchgangszeit der Tracer.

Die Interpretation der Daten der Fluoreszein-(Uranin-)Konzentration in den Quellaustritten (vgl. Fig. 8) weicht betreffend der unterirdischen Verweildauer des Wassers im Bereich zwischen der Schwinde und der Quelle etwas von den anderen Tracern ab. So ergibt die auf dem Uranindurchgang beruhende Berechnung der höchsten unterirdischen Fließgeschwindigkeit 200 bis 250 m/h. Die hohen Konzentrationen des Uranins konnten sehr genau gemessen werden, was für die niederen Konzentrationen mit den verfügbaren Meßinstrumenten aber nicht der Fall war.

Trotzdem wurde die Brauchbarkeit der Salz- und Farbtracer für Markierungsversuche in Basaltgebieten bestätigt. Auch der Einsatz der Sporen war teils sehr erfolgreich, doch können lokale Verhältnisse sehr wohl den Einsatz dieses Tracers nur in Verbindung mit anderen Markierungsstoffen empfehlenswert machen.

Die Wiederausbringung der eingesetzten Mengen der Markierungsstoffe betrug beim Feldexperiment von Kibwezi für Natrium 62%, Chlorid 72% und Uranin 63%.

Aus diesen Zahlen ist zu ersehen, daß die Fluoreszenzfarbe teilweise absorbiert wurde, wohl vor allem durch Tone, die von der Oberfläche aus in die Wasserwege im Basalt eingeschwemmt wurden. Diese Tone können auch einen Kationenaustausch

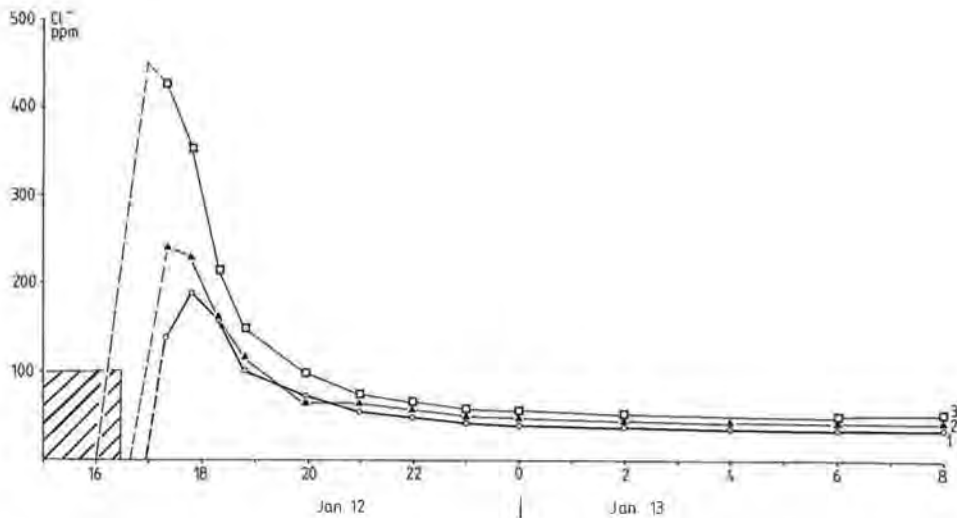


Fig. 7: Durchgangskurve von Chlorid, Kibwezi, Jänner 1980. Schraffiert = Einspeisungszeit.

provoziert haben, der sich in der niedrigeren Natrium-Ausbringung im Vergleich zum Chlorid manifestiert.

Der durchflutete Hohlraum zwischen der Schwinde im Dschungeltümpel und dem Quellbezirk von Kibwezi wird aufgrund dieses Markierungsversuches auf 800 bis 1200 m³ geschätzt.

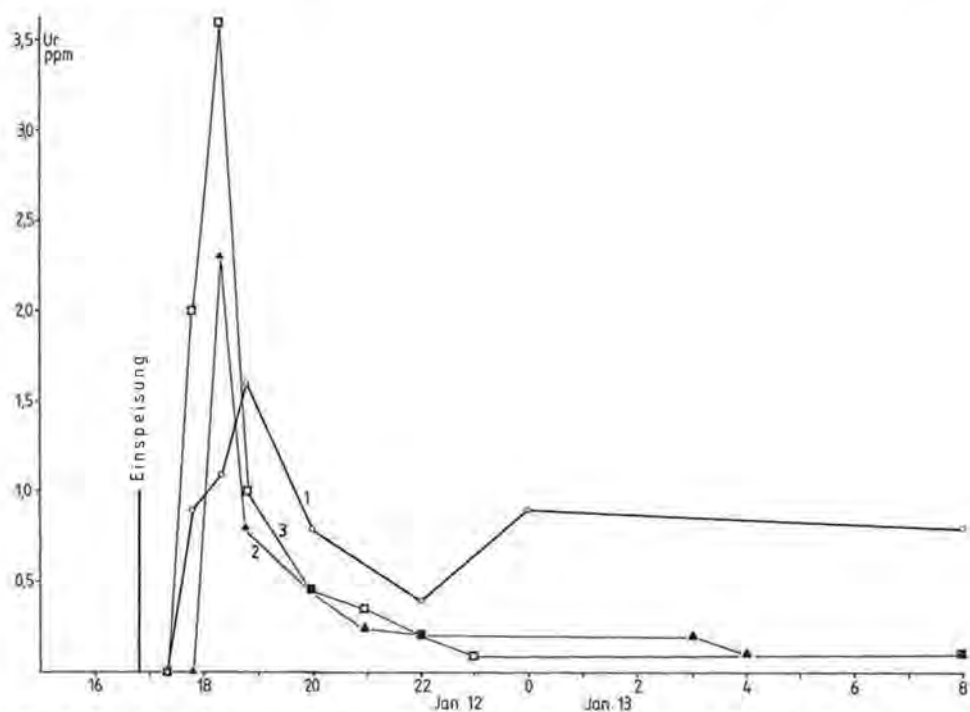


Fig. 8: Durchgangskurve der Fluoreszeinfarbe Uranin. Markierungsversuch Kibwezi, 1980.

Zusammenfassung

Markierungsversuche zur Verfolgung unterirdischer Wasserwege wurden zuerst im mitteleuropäischen Karst mit wissenschaftlicher Zielsetzung angewandt und in den letzten Jahrzehnten hier auch systematisch weiterentwickelt. Neben den Karstgebieten kam der Einsatz von Tracern (Markierungsmitteln) später auch in Grundwässern klastischer Gesteine und nichtkarbonatischer Festgesteine zur Ausübung, wozu Probleme der Siedlungswasserwirtschaft (Schutzzone) ebenso beitrugen wie vermehrte technische Eingriffe in den Bergleib (Tunnelbau).

Die Weitergabe des neuesten Standes der Kenntnisse durch von der UNESCO und der Österr. Bundesregierung geförderte Kurse, die vor allem für Postgraduates durchgeführt werden, stößt nicht nur aufgrund der hohen Reisekosten von Teilnehmern aus weit entfernten Gebieten auf Schwierigkeiten, sondern auch aufgrund gravierender geologisch-petrographischer Unterschiede im geologischen Aufbau der Heimatländer von Kursbewerbern und Mitteleuropa. Auch die Tatsache, daß klimatische Bedingungen und deren Auswirkungen nicht transferiert werden können, beeinflussen die Demonstration der Ausbildungsziele.

Die aufgezählten Gegebenheiten führten dazu, daß im Jänner 1980 versuchsweise in Zusammenarbeit von österreichischen Dienststellen und UNESCO/Paris ein Workshop in Kenya durchgeführt wurde, das den obgenannten Bedingungen wie Aufnahme von Teilnehmern nur aus den Umliegenderstaaten (Äthiopien, Somalia, Tanzania, Zambia, Uganda und natürlich Kenya), Berücksichtigung der Klärung von in tropischem Wasser lebenden pathogenen Parasiten und nicht zuletzt der geologischen Verhältnisse Rechnung trug.

Die wichtigste geologische Gegebenheit war ein geeignetes Versuchsgebiet in jungen vulkanischen Gesteinen (vornehmlich Basalten), die in Mitteleuropa nur sporadisch auftreten.

In Kenya sind junge (tertiäre und quartäre) Basaltflows in allen Höhenlagen zu treffen. Sie folgen meist untiefen Tälern des kristallinen Grundgebirges und führen demnach auch Grundwasserströme, die je nach Mächtigkeit und Unregelmäßigkeit des Flows als algenbedeckte Dschungeltümpel auch an die Oberfläche treten. Der Dschungel endet nicht selten am Ende des Flows, wo auch das austretende Grundwasser den Quellbereich eines beginnenden perennierenden Oberflächengerinnes bildet. Dörfliche Siedlungen erachten diese Gegebenheit nicht selten als bevorzugten Wohnbereich.

In einem solchen Flow im Raume der Ortschaft Kibwezi wurden in die Schwinde eines Dschungeltümpels 400 kg Kochsalz, 5 kg blaugefärbte Lycopodiumsporen und 2 kg Uranin (Natrium-Fluoreszein) eingesetzt und die Wasseraustritte des am Ende des Basaltflows liegenden Quellbezirkes beobachtet.

Eingabestelle und beobachtete Quellaustritte liegen relativ nahe (Luftlinie ca. 350 m), doch wurde bewußt die Versickerung des letzten Oberflächentümpels gewählt, um die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers im Basaltflow zu messen. Dazwischenliegende Tümpel üben je nach Größe eine mehr oder weniger starke Verzögerung aus, die erst durch weitere Untersuchungen zu beobachten wäre.

In der Tat zeigten die Resultate dieses im Jänner 1980 durchgeführten Tests im nicht unterbrochenen unterirdischen Lauf des Basaltflows überraschend hohe Fließgeschwindigkeiten und den Beweis für den Mangel einer Filterwirkung der Röhren und Fugen im Basalt (Durchgang der Lycopodium-Sporen s. Tab. 2). Höchste Fließgeschwindigkeiten um 350 m pro Stunde und ein mittlerer Durchgang von 30 m pro Stunde lassen keinen Zweifel darüber offen, daß keinerlei Schutz des Wassers gegen welche immer geartete Verunreinigung gegeben ist, womit der Verbreitung der Bilharziose Tür und Tor offen stehen.

Auch technisch kann der Markierungsversuch als voller Erfolg gewertet werden, da der Wiederaustritt von 62 bis 72% der eingegebenen Tracer nachgewiesen werden konnte.

Die Zusammenarbeit mit den örtlichen Stellen verlief klaglos und in bestem Einvernehmen.

Literatur

- DECHANT, M. (1967): Die Färbung der Lycopodiumsporen. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 18/19, 241–247, Graz.
- PAYNE, B. R. (1970): Water Balance of Lake Chala and its Relation to Groundwater from Tritium and Stable Isotope Data. — J. of Hydrology, 11, 47–58.
- SAGGERSON, E. P. (1963): Geology of the Simba-Kibwezi Area. — Min. Comm. Ind., Geol. Surv. Kenya, 58, 70 S.
- ZÖRTL, J. (1974): Karsthydrogeologie.— 291 S., Wien (Springer).

Summary

Attempts to mark underground waterways for scientific purposes were first made in Middle European karst, and underwent further systematic development here in recent decades. Besides their use in karst areas, tracers were later applied in the groundwaters of clastic rocks and noncarbonate hard rocks; this was necessitated both by biotopic circumstances (protection areas) and technical operations in the body of the mountain (tunneling).

Primarily postgraduate courses sponsored by the UNESCO and the Austrian Federal Government are intended to provide the very latest information, but there are problems owing to the considerable traveling expenses for participants from distant areas, as well to the substantial geological and petrographic differences between the students' native countries and Middle Europe. Achievement of course aims is also limited by the fact that climatic conditions and their effects are not comparable. For these reasons, Austrian agencies and UNESCO/Paris cooperated to present an experimental workshop in Kenya in January 1980 which took into account the above-mentioned circumstances by admitting participants only from adjacent countries (Ethiopia, Somalia, Tanzania, Zambia, Uganda and of course Kenya), and by covering the clarification of water containing tropical pathogenic parasites, as well as the local geographical situation.

The most important geological matter was a suitable experimental area in young volcanic rocks (mainly basalts) which occur only sporadically in Europe.

In Kenya, young (Tertiary and Quaternary) basalt flows are to be found at all altitudes. They usually follow shallow valleys of the crystalline basement and thus also contain groundwater flows which, depending on the thickness and irregularity of the basalt flow, also appear on the surface as scum-covered jungle pools. Not infrequently, the jungle ends where the flow leaves off, and the emerging groundwater forms the source of a beginning perennial superficial riverlet. Villagers often consider this to be a superior living area.

In one such flow in the vicinity of the locality of Kibwezi, 400 kg sodium chloride, 5 kg blue dyed lycopodium spores and 2 kg uranin (sodium fluorescein) were injected into a sinkhole of a jungle pool, and the water outlets of the source area at the end of the basalt flow observed.

The point of input and the source outlets observed were relatively close together (350 m bee-line), but the seepage of the last surface pool was chosen on purpose to show the flow speed of the groundwater in the basalt flow. Intermediate pools slow the flow to a greater or lesser extent, depending on their size.

The results of this test performed in January 1980 show a surprisingly high flow speed in the noncontinuous underground course of the basalt flow, as well as evidence of lack of a filter effect of the tubes and joints in the basalt (passage of lycopodium spores, see table 2). Maximal flow speeds around 350 m per hour and an average passage of 30 m per hour leave no doubt that the water is in no way protected from pollution of any sort, which paves the way for the spread of bilharziasis.

The marking experiment may also be viewed as a complete technical success, as emergence of 62–72% of the injected tracer could be demonstrated.

Cooperation with local agencies was excellent.

Anschrift der Verfasser:

Dr. P. HACKER, Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Geotechnisches Institut, A-1030 Wien.

Univ.-Doz. Dr. H. ZOJER, Forschungszentrum Graz, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz.

Prof. Dr. J. G. ZÖTL, Forschungszentrum Graz, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz.