

Beitrag zu den Problemen der Karsthydrographie mit besonderer Berücksichtigung der Frage des Erosionsniveaus

Mit 6 Abb. im Text

Von JOSEF ZÖTL

I. Stand der Forschung

Die Beschreibung der karsthydrographischen Phänomene bleibt bis um die Jahrhundertwende ohne spezielle Fragestellung im Rahmen allgemeiner Karstuntersuchungen oder erschöpft sich in der Behandlung örtlicher Probleme, und noch in der Monographie von CVIJIĆ [1893] finden wir das „Grundwasser“ der verkarsteten Gebirge im Zuge der Besprechung von Dolinen, obertägigen Karstflüssen und Poljen nur kurz behandelt¹.

Die Reihe der klassischen karsthydrographischen Arbeiten beginnt mit GRUND's Karsthydrographie [1903]. Auf die Beschreibung der Hydrographie einzelner Landschaften folgen grundsätzliche Überlegungen: Gleichmäßig verteiltes „Karstwasser“ mit vertikalen und horizontalen Bewegungsbahnen fließe ober dem stagnierenden „Grundwasser“ zur Erosionsbasis. Im besonderen Beispiel wird eine vom Meer landeinwärts ansteigende Fläche angenommen, unterhalb deren die ganzen Klüfte mit stagnierendem Wasser erfüllt sind [1903, p. 173]. Durch eine Reihe unzutreffender Verallgemeinerungen, wie der Annahme bis in unbekannte Tiefen gleichmäßiger Klüftung mit stagnierendem Grundwasser [p. 173], Gewißheit von Wassererschotungen durch tiefe Bohrungen [p. 172] und Ignorierung tatsächlich vorhandener Höhlenbäche, hat GRUND seinen späteren Gegnern soviel Material geliefert, daß trotz nachträglicher Richtigstellung wesentliche Prinzipien der Theorie GRUND's durch die Kritik der Gegner zurücktraten. Aber selbst wenn keine einzige Auffassung von GRUND richtig gewesen wäre, bliebe ihm das Verdienst, die Diskussion um die Probleme der Karsthydrographie entfacht zu haben.

Noch im Jahre der Veröffentlichung von GRUND's Karsthydrographie referierte A. PENCK [1904] über das Karstphänomen, wobei er die prinzipiellen Ergebnisse GRUND's unterstrich und wesentlich erweiterte. Die Wirkung der örtlichen Erosionsbasis wurde durch die schematische Skizze der Entwicklungsreihen von Dolinen [p. 16] und durch die Darstellung der Entwicklung eines Höhlenflusses [p. 22 f.] unterstrichen. PENCK's weit über die Darlegungen GRUND's hinausgehenden Ausführungen, wurden in den wesentlichen Grundzügen auch später von den Gegnern der Theorie GRUND's nicht widerlegt.

KNEBEL [1905] setzt mit einer Kritik an GRUND's Versuch, die Klüftigkeit des Karstgesteins aus der bekannten Niederschlagsmenge und der ihr ent-

¹ Bei der Besprechung der Inundation der Poljen bezeichnet CVIJIĆ als Wesen der Grundwasserverhältnisse im Karst, daß hier „das feste Gestein die Grundmasse“ bildet und dazwischen einzelne wasserführende Spalten und Kanäle liegen, während im durchlässigen Terrain das Grundwasser die Hauptmasse darstelle, „in welcher Sand und Gerölle eingestreut sind“ [p. 307].

sprechenden Neigung des Karstwasserspiegels zu ermitteln, an [p. 17 ff.], behält aber die Bezeichnung „Grundwasser“ bei, das sich nach ihm stets über der wasserundurchlässigen Basis der Karbonatsteine bildet [p. 15, 16], bzw. durch die Gleichgewichtslage mit dem Meere sich in eine untere stagnierende und obere strömende Zone scheidet [p. 90 ff.]². Die irrige Ansicht GRUND's bezüglich der Stellung des Dolomites in der Reihe der verkarstungsfähigen Gesteine erfährt die erste berechtigte Korrektur [p. 24—26], und weiters faßt KNEBEL die Ignorierung von tatsächlichen Höhlenflüssen durch GRUND dahingehend auf, daß dieser die Existenz solcher Flüsse „verwerfe“ [p. 53, 99]. KNEBEL's Werk mit seiner überaus sachlichen Kritik kommt schließlich zu einer Ablehnung der Theorie GRUND's, als sich KNEBEL eine fortschreitende Vereinsamung des unterirdischen Systems durchflossener Klüfte vorstellt, weil sich, von den Quellaustritten her zurückschreitend, der Durchfluß entlang einzelner Zerklüftungszonen verstärke. So entstehe aus einem „Grundwasserstrom“ schließlich ein „Höhlenfluß“ [p. 116—137]. Die Betonung der Quellaustritte unterstreicht die Bedeutung des Erosionsniveaus für die Überlegungen KNEBEL's, der in den submarinen Quellen „die Anzeichen einer positiven Strandverschiebung“ sieht [p. 105].

Kurz darauf betont LOZINSKI die Tatsache der unterirdischen Gerinne, anerkennt im übrigen aber die Theorie GRUND's bei seinen Untersuchungen im galizischen Karst [p. 701].

In dem von LUKAS bearbeiteten Nachlaß von E. RICHTER [1907] befaßt sich dieser mit der Wasserbewegung im Karst im besonderen. Von Unwesentlichem abgesehen³, stimmt RICHTER den Auffassungen GRUND's völlig zu. Was den Einfluß der Erosionsbasis betrifft, äußert er sich ganz allgemein dahingehend, daß die Höhe, in welcher das Karstwasser dahinströmt, bestimmt wird durch die Unebenheiten des undurchlässigen Grundgebirges oder durch die Lage des Meeresspiegels, ferner durch die Lage undurchlässiger Schichten, die dem Karstkalk hie und da eingeschaltet sind [p. 475].

Die Landeskunde Istriens gibt KREBS [1907] Gelegenheit, die Ansichten GRUND's und KNEBEL's nach eigenen Erfahrungen zu vergleichen und zu ergänzen, wobei er letzten Endes die vermittelnde Stellung „wenn auch manche Adern dominieren und den Charakter von Flüssen annehmen . . . diese Gewässer doch unterirdisch alle in Verbindung stehen“ [p. 56, 57] bezieht. Seine eindeutige Bejahung der Wirkung des wahren Erosionsniveaus entnehmen wir der Beschreibung des Rekalaufes [p. 46]. Gegen KREBS (und GRUND), der bei einem Bericht über die Versuche von VORTMANN und TIMEUS neuerdings seine positive Stellung zur Theorie GRUND's unterstreicht [KREBS 1908], nimmt KATZER [1908] bereits dahingehend Stellung, daß das Grundelement der Karsthydrographie die unterirdischen Gerinne seien. Bald darauf äußert sich KATZER [1909] eingehend zu den Problemen der Karsthydrographie. KATZER, dessen hypothetische Erklärungen von Karren- und Dolinenbildung wohl widerlegt sind, lehnt jegliches über weitere Flächen in Zusammenhang stehende Grundwasser im tiefen Karst strikt ab [1909, p. 43], geht aber mit seinen „wie Schußlöcher durch gesundes Gestein“ [p. 77] ziehenden Karstgerinnen entschieden zu weit. Für ihn gibt es für die Höhenlage der unterirdischen Karst-

² KNEBEL lehnt GRUND's Bezeichnung „Karstwasser“ für das strömende Grundwasser als irreführend ab [p. 91].

³ RICHTER schlägt z. B. vor, das „Grundwasser“ (in der Auffassung von GRUND) im Karst besser als „Kluftwasser“ zu bezeichnen [1907, p. 476].

gerinne und deren Austritte „keine fixierbare Grenze“ [p. 79], was eine Ablehnung des Einflusses der Erosionsbasis auf die Entwicklung der Karsthydrographie bedeutet. Die von ihm wieder aufgegriffene Scheidung von nacktem und bedecktem Karst, wie die von ihm ausgehende Trennung von seichtem und tiefem Karst fanden jedoch feste Verankerung in der Nomenklatur der Karstliteratur. Eine Vermittlung zwischen seinen Ansichten und den Auffassungen GRUND's lehnt er strikt ab⁴.

In einer längeren Abhandlung beschäftigt sich CVIJIĆ [1909] mit der Morphogenese des Dinarischen Gebirgssystems, die ihn zur Annahme von zwei Entwicklungszyklen im Dinarischen Karst führt. Die Einleitung der zweiten Entwicklungsperiode bindet CVIJIĆ an die Hebung der Landoberfläche [p. 180], d. h. an die Tieferlegung der Erosionsbasis. Wenn man diesen Untersuchungsergebnissen einen allgemeinen Schluß anfügen darf, so jenen, daß die Theorie der zyklischen Entwicklung des Karstes im Zusammenhang mit der Morphogenese des Gebirges nur unter der Voraussetzung einer karsthydrographisch wirksamen Erosionsbasis möglich ist.

SAWICKI [1909] behandelt ebenso wie KREBS [1909] speziell die Frage des Karstzyklus, auf deren Behandlung in diesem Rahmen verzichtet werden muß. Von Belang für die vorliegende Problemstellung ist aber der Versuch SAWICKI's, den Begriff „Evolutionsniveau“ einzuführen [p. 197, 259], worunter der die Rolle der Erosionsbasis übernehmende Spiegel des Karstgrundwassers zu verstehen ist. Sonst nimmt SAWICKI eine vermittelnde Stellung zwischen GRUND und KATZER ein.

Aber nicht nur neue Gedanken zur Entwicklung der Karsthydrographie werden geäußert, es beginnt in Rede und Gegenrede um die Theorie GRUND's eine bedauerliche Schärfe einzusetzen. PERKO [1909] nimmt uneingeschränkt mit KATZER gegen GRUND's Theorie Stellung, HOFFER [1909] wechselt die Stellung, ohne eine selbständige Beweisführung zu versuchen und rechtfertigt sich schließlich damit, daß sein hauptsächliches Arbeitsziel in der Zusammenstellung und Auswertung des statistischen Materials lag [1911]. MARTEL [1910] lehnt in einer erweiterten Besprechung von PERKO's Aufsatz [1909] das Grundwasser („nappe d'eau de fond“, p. 128) im Karst ab.

Während sich KREBS [1910] im zweiten Abschnitt der Besprechung der offenen Fragen der Karstkunde neuerdings um eine vernünftige Verbindung von Karstwasser- und Höhlenflußtheorie bemüht und die Bedeutung der Erosionsbasis betont [p. 141], nimmt WAAGEN [Ztschr. f. prakt. Geologie, 1910] energisch gegen GRUND Stellung und lehnt jegliches Grundwasser im Karst ab, obwohl er andererseits in Küstennähe „Staugrundwasser“ annimmt [p. 232]. Unausgesprochen bleibt die Ablehnung der Wirkung des Erosionsniveaus, doch ist sie den Ausführungen zu entnehmen. Nochmals faßt WAAGEN seine Meinung kurz zusammen [GZ, 1910], wobei er in KATZER's Trennung von seichtem und tiefem Karst einen „Angelpunkt“ [p. 398] für die Beurteilung der Karsthydrographie erblickt. Seichtem Karst gesteht er nunmehr über der wasserstauenden Gesteinschicht im Liegenden Grundwasser im eigentlichen Sinne zu, tiefem Karst aber nicht.

Endlich kommt in diesem überaus fruchtbarem Jahre 1910 auch GRUND selbst noch zweimal zu Wort: In seinen Beiträgen zur Morphologie des

⁴ KATZER und GRUND werden nun die Gegenpole einer sich durch Jahre hinziehenden regen Diskussion. Beide Teile stützen sich übrigens auf die hervorragende Materialsammlung von BALLIF: Wasserbauten in Bosnien und der Herzegowina. Hsg. von der bosnisch-herzegowinischen Landesregierung. I. Bd. Wien 1896, II. Bd. Wien 1900.

Dinarischen Gebirges nimmt er nochmals eingehend zur Karsthydrographie Stellung. Er gibt den Begriff des stagnierenden Grundwassers auf und trennt nur mehr Sickerwasser mit Vertikal- und Karstwasser mit Horizontalbewegung [p. 138]. Sein Versuch, neue Höhlenbezeichnungen zu präzisieren (jama, avens) wird später von CVIJIC [1918] wieder aufgegriffen. Geklärt aber wird, daß GRUND nicht nur die Tatsache vorhandener Höhlenflüsse bestätigt [p. 145 f.], sondern nunmehr auch mit KNEBEL Höhlenbildung von den Quellöffnungen her annimmt. Er lehnt aber KNEBEL's Entwicklungsreihe von der Quelle zum Grundwasserstrom und zum Höhlenfluß entschieden ab. Auch bezüglich der Dolomitverkarstung werden Zugeständnisse gemacht [p. 169]. Das Wesentliche bleibt für GRUND der zusammenhängende Karstwasserkörper und das Bestehen eines Karstwasserspiegels, während er sonst zu allen Konzessionen bereit ist⁵.

Um diesen Karstwasserspiegel oder das „Karstwasserniveau“, [GRUND: „Zur Frage des Grundwassers im Karst“. 1910, p. 612] kristallisiert sich nun weiterhin die Diskussion. So bezieht KEILHACK [1912] eine mit KATZER bezüglich Karsthydrographie und Erosionsniveau völlig übereinstimmende Stellung, und SCHENKEL [1912] kann sich, ohne auf die spezielle Fragestellung einzugehen, mit der Grundwassertheorie „gar nicht befreunden“ [p. 31].

Einem scharfen aber unfruchtbaren Wortwechsel zwischen WAAGEN [1911] und GRUND [1911], wie zwischen KATZER [1912] und GRUND [1912] folgen Veröffentlichungen von BOCK, der, KATZER überbietend, in extremer Weise die Höhlenflußtheorie vertritt. Für die vorliegende Fragestellung ist jedoch bemerkenswert, daß er entgegen seiner sonstigen weitgehenden Übereinstimmung mit KATZER, die Bedeutung der Erosionsbasis („Vorflut“) für die Entwicklung der Karsthydrographie betont, ja sicher zu weit geht, wenn er glaubt, daß die Kanalisierung des Kalkmassives nicht tiefer gehen könne, als der Horizont der oberirdischen Aufnahmebehälter [Mitt., Heft 3, p. 11]. Kann seine Einteilung in echte und falsche Höhlenflüsse, seine Überschätzung der „Efforation“ und seine Gliederung des Karstes in diesem Rahmen übergangen werden, so muß doch darauf hingewiesen werden, daß seine karsthydrographisch-morphologische Beschreibung des Beckens von Semriach [Mitt., Heft 4, p. 14 ff.] eine ausgezeichnete Deutung der Landformung des Raumes bietet, die durch neuere Untersuchungen weitgehend bestätigt wird [vgl. MAURIN 1954].

Die bedeutendste Studie dieser Zeit ist ohne Zweifel die Untersuchung des Gackaflusses im kroatischen Karst durch TERZAGHI [1912/13]. Diese Arbeit ist meines Erachtens die exakteste der durchgeführten Einzelstudien, wodurch den Ausführungen grundlegender Wert zukommt. Wenn daher TERZAGHI mit Einschränkungen⁶ die Karstwassertheorie GRUND's der Annahme geschlossener Karstgerinne vorzieht [p. 317], so kommt dieser bestfundierte Stellungnahme große Bedeutung zu.

Ohne daß eine Annäherung der extremen Standpunkte erfolgt wäre, klingt nunmehr die Diskussion um die Probleme der Karsthydrographie ab. TEPFNER [1913] gibt eine Zusammenfassung ohne selbständige Stellungnahme, GRUND [1914] setzte sich mit SAWICKI's Auffassung des geographischen Zyklus im Karst kritisch auseinander, ohne daß die bereits bekannten Ansichten eine Änderung erfuhren, und CVIJIC [1918] stellt die beiden gegensätzlichen Auffassungen noch-

⁵ So schreibt GRUND a. a. O. p. 158: „Wenn man mir nur den Karstwasserspiegel und die nachfolgenden Tatsachen zugibt, mag man auch weiterhin von Höhlenflüssen oder unterirdischen Gerinnen reden.“

⁶ Besonders und mit vollem Recht weist TERZAGHI die Annahme GRUND's zurück, daß das Karstgebirge in seiner Gänze ziemlich einheitlich geklüftet sei [p. 318].

mals gegenüber und lehnt das stagnierende Karstwasser aber auch KATZER's selbständige Karstgerinne ab [p. 13]. Wenn er bei der Entwicklung der Hydrographie eines Karststockes (von oben her!) das Wasser aller Klüfte zusammenhängen läßt [p. 14 f.], bejaht er letzten Endes einen zusammenhängenden Karstwasserkörper. CVIJIĆ nimmt nunmehr ganz allgemein drei karsthydrographische Stockwerke an, deren unterstes die ständig mit Wasser gefüllten Spalten darstellen. Als Erosionsniveau gilt die jeweils örtliche Erosionsbasis oder das Gleichgewichtsniveau in einer gewissen Tiefe unter dem Meeresspiegel [p. 36].

LINDNER [1922] kommt nach einer Besprechung der Karstwassertheorien, insbesondere der GRUND's und KATZER's, bei seinen Studien aus dem Karstgebiete des Frankenjura zu völlig mit GRUND übereinstimmenden Ergebnissen.

Nochmals bringt die Festschrift für CVIJIĆ eine kurze Belegung des Themas. KREBS [1924] schildert im Raume des Poiktales und des Adelsberger Beckens unterirdische Wasserverhältnisse, die an einem einheitlichen Karstwasserkörper kaum zweifeln lassen [p. 52], ohne das Vorhandensein von Karstgerinnen zu bestreiten [p. 55]. Seine Auffassung bezüglich der Wirkung der Erosionsbasis legt KREBS eindeutig fest, wenn er sagt, daß der raschen Tieferlegung der Erosionsbasis „am Rande der Karstplatte eine Tieferlegung des Quellaustrittes und des Karstwasserniveaus im Karst selbst automatisch folgte“ [p. 69]. Auch A. PENCK [1924] bekennt sich hier ausdrücklich wieder zu beiden Formen der Karstentwässerung, indem er aus dem Gipsgebiete südlich des Harzes den versunkenen Abfluß des Itelteiches „als typischen Höhlenstrang eines Karstflusses“ bezeichnet, aber nachweist, daß es daneben „auch die zu Höhlen ausgearbeiteten Bahnen des Karstwassers gibt“ [p. 181].

Abgesehen von O. LEHMANN [1925], der sich gegen GRUND wendet, aber auch schon hier in erster Linie eine physikalisch-hydraulische Fragestellung einnimmt, werden nunmehr vor allem Einzelfragen untersucht oder die Karsthydrographie im Rahmen allgemeiner Untersuchungen gestreift. So begutachtet GÖTZINGER [1925] die Wasserversorgung des Marktes Weiz und kommt zur Annahme eines größeren zusammenhängenden „Karstgrundwasser“körpers [p. 304, 306, 312 u. a. m.], ohne auf die Problematik der Karsthydrographie Bezug zu nehmen. BIESE [1926] behandelt hauptsächlich tektonisch-hydraulische Fragen mit einer Ablehnung der „Paläotraun“ BOCK's, während dieser [1926] vor allem die Altersfrage der Dachsteinhöhlen mit dem Versuch der Bindung an das entsprechende Vorflutniveau zu klären sucht. CRAMER [1926] widmet sich der Altersfrage der Verkarstung im Fränkischen Jura.

1928 unternimmt KYRLE, der sich in seinem Grundriß der theoretischen Speleologie [1923] unter Anerkennung der Höhlenflüsse und der Efforiation [p. 48 f.] jeder weiteren Stellungnahme zu den Problemen der Karsthydrographie enthalten hat, den Versuch, sichere technische Grundlagen für die Chlorierung von Höhengewässern zu schaffen, ein Unterfangen, das sich durch spätere Untersuchungen allerdings als mißglückt erwies.

Interessant sind weiters Überlegungen von FIALA [1930], der das Pontische Meer als Erosionsbasis für die Entwicklung des südslowakischen Karstes heranzieht [p. 28].

Bei einer Besprechung der Hydrographie souterraine von CVIJIĆ durch LEHMANN [1928] zeichnet sich bereits manche durch letzteren im folgenden Werk vertretene Meinung ab. Er kritisiert die Stellung der Erosionsbasis bei CVIJIĆ ebenso wie die Annahme eines zusammenhängenden Kluftwassersystems,

die ihm „als Zugeständnis an den Standpunkt GRUND's erscheint, ohne daß es näher begründet werde“ [p. 105]. Mit seiner Hydrographie des Karstes beschließt LEHMANN [1932] die Reihe der klassischen Werke der Karsthydrographie deutschsprachiger Literatur und seine Darlegungen blieben bis in die jüngste Zeit im wesentlichen unangefochten. LEHMANN stellte seine Untersuchungen auf die Basis gründlicher Bearbeitung allgemein physikalisch-hydraulischer Gesetzmäßigkeiten der Wasserbewegungen und klärte den Begriff der hydrographischen Wegsamkeit der Klüfte [p. 12 ff.], deren Entwicklung einen Ausgangspunkt in den mehr oder weniger weiten Urhohlräumen tektonischen Ursprungs finde⁷. LEHMANN's hydrophysikalisch unterbaute Ablehnung der Höhlenflußtheorie und insbesondere der „Efforation“ [p. 158 f., 163 ff.] trifft vor allem BOCK, aber auch KATZER, der ja ebenfalls die mechanische Erosion des unterirdischen Wassers stark betont. Gegen GRUND wendet sich LEHMANN vor allem auf Grund von Einzelbeobachtungen (verschiedene Höhenlage der Quellen eines Gebietes usw.), während die gegen einen zusammenhängenden Karstwasserkörper unternommenen Beweisversuche mittels Beispielen aus dem Gebiet der Donauversinkung bei Immendingen [p. 139 ff.] und Ergebnissen von Beobachtungen im Hauptstollen des Spullersee-Werkes nicht anerkannt werden können, ja letztere eher für einen zusammenhängenden Karstwasserkörper sprechen⁸. LEHMANN läßt auch die Ergebnisse der ausgezeichneten Untersuchungen von BERZ [1928] unberücksichtigt, die im Bereich der oberen Donau einen zusammenhängenden Karstwasserkörper bestätigen. LEHMANN's Beurteilung der Färbeversuche [p. 122 ff.] ist weitgehend überholt.

Die starke Betonung der tektonisch geschaffenen wirksamen Karstwasserwege führt LEHMANN zur Ablehnung des Einflusses der Erosionsbasis auf die Entwicklung der Karsthydrographie [p. 20 ff.]⁹, worauf später noch zurückzukommen sein wird.

LEHMANN kommt schließlich zur zusammenfassenden Auffassung von Karstgefäßen beliebiger Form und Größe und Verzweigung, wobei aber ein Zusammenhang selbst eines kleinen Teiles der karsthydrographisch wirksamen Wasserbahnen verneint wird [p. 15].

Obwohl schon GRUND [1912] durch die Forschungsergebnisse der amerikanischen Geologen KING und SLICHTER zu einer Korrektur seiner Ansichten bewogen wurde [1912, p. 138], blieb mit Ausnahme LEHMANN's [1925] die amerikanische Literatur weitgehend unberücksichtigt. Erst CRAMER [1935] vergleicht die Untersuchungen von DAVIS [1930] mit eigenen Untersuchungsergebnissen und den Auffassungen LEHMANN's, bei vorwiegender Betonung der Wasserbewegung in geschlossenen, wassergefüllten Hohlraumssystemen unter dem Talniveau, verbunden mit einer Gegenüberstellung anderer Lehrmeinungen.

DAVIS ist Geomorphologe und versucht einen weiträumigen Entwicklungsgedanken. Er gleicht diesbezüglich am ehesten GRUND, wenn er auch bezüglich

⁷ LEHMANN kommt in Weiterentwicklung des Gedankens der „Urhohlräume“ auch zur Annahme eines häufigen Auftretens von „Spaltentälern“ im Karst Europas [p. 174 f.], vor allem durch MARTEL's Ausführungen in „Nouveau traité des eaux souterraines“, Paris 1921, beeinflusst.

⁸ Es kann in diesem Rahmen unmöglich auf Einzelheiten eingegangen werden, doch muß darauf verwiesen werden, daß LEHMANN bei der Beschreibung der hydrographischen Verhältnisse bei Immendingen sich gerade bei entscheidenden Fragen auf Annahmen stützt, wie auf die unbewiesene Ablehnung der Hochwassertrübung beim zugeschütteten Brunnen bei Nr. 39 [p. 140, 141] und auf eine Beweisführung durch alte Überlieferungen [p. 142].

⁹ Wie weit der großteils unbewiesenen Annahme von großen tektonischen Urhohlräumen gefolgt werden kann, ergibt am ehesten ein Vergleich mit den offenen tektonischen Fugen in den nicht verkarstungsfähigen Gebirgen, denn es ist nicht einzusehen, warum dieses Phänomen gerade in den Karbonatgebirgen so überdimensionale Ausmaße annehmen soll.

der Entwicklung vom ursprünglich verflochtenen Netz unregelmäßiger Kanäle über durch natürliche Auswahl bevorzugte Stränge zu selbständigen Höhlensystemen [p. 485] eine andere Auffassung vertritt. Das Neue aber ist, daß nach DAVIS die Höhlen unter dem Erosionsniveau bzw. unter dem Grundwasserspiegel (water table) entstehen. Das ist sozusagen die Vorfluttheorie BOCK's im Spiegelbild und in keiner Weise mit den Auffassungen LEHMANN's vergleichbar, der bekanntlich jeglichen Einfluß des Vorflutniveaus ablehnt.

DAVIS, der eine zwei- und einzyklische Hypothese der Höhlenentwicklung vorträgt, erfährt bezüglich letzterer eine Ergänzung durch SWINNERTON [1932], der sich auf MATSON beruft und annimmt, daß die seitliche Bewegung des Grundwassers im Bereiche des Grundwasserspiegels eine hinlängliche Erklärung für die Entstehung der Höhlen bietet [p. 665 f.].

Eine planmäßige hydrogeologische Erfassung der Staaten finden wir in den Folgen der "Water-Supply Paper". Dabei werden neben den für die Wasserversorgung maßgeblichen Faktoren auch grundsätzliche Fragen behandelt¹⁰. U. a. beschäftigte sich PIPER [1932] mit Grundwasserproblemen in Tennessee und kommt zu karsthydrographisch höchst bemerkenswerten Ergebnissen. Er scheidet zwei Typen der Porosität des Kalksteins (primär und sekundär, p. 69, 70) und daher zwei Lösungsformen aus. Bezüglich der Zirkulation trifft PIPER eine Scheidung in meteorisches Wasser, das als Regen fällt, zum Grundwasser durchsickert und frei zirkuliert und „connate water“ oder fossiles Wasser, das durch Überdeckung nicht mehr ausfließen kann, nicht zirkuliert und bis in große Tiefen vorkommt [p. 74, 75]. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich auf Nord- und Zentral-Tennessee. Übereinstimmend mit MEINZER [1923] kommt PIPER zur Feststellung, daß sich durch Zusammentreffen von Wasser aus vielen Versinkungsstellen unterirdische Flüsse bilden können, die aber — gleich den Oberflächenströmen — ungefähr auf dem Niveau des Grundwasserspiegels fließen. In Überschwemmungszeiten können sie einiges von ihrem Wasser durch Versickerung in kleine Spalten verlieren, aber in tiefen Lagen werden sie genährt durch den Grundwasserkörper, der alle Spalten unterhalb des Grundwasserspiegels einnimmt. Selten gebe es einen Gang durch den Kalkstein, der von einem Ponor, wo das Wasser versinkt, zu einer Austrittsstelle in einem niederen Niveau führe, ohne daß dieser Gang bis zum Grundwasserspiegel hinabreicht [p. 76]¹¹. Daß aber nicht alles austretende Wasser etwa direkt von den Versinkungsstellen zu den Quellen verläuft, beweist PIPER durch genaue Messungen, die u. a. für eine Quelle in Neu Mexiko eine Speicherung von 2 250 Mill. Gallonen ergab [p. 77]¹².

Durch die ins Englische übersetzte Hydrographie souterraine von CUVIÉ kommt PIPER zu selbständigen, höchst anregenden Gedanken über eine zyklische

¹⁰ Diesen Veröffentlichungen kommt insofern eine große Bedeutung zu, als ihnen, von rein praktischen Gesichtspunkten ausgehend, eine vorgefaßte grundsätzliche Meinung in Bezug auf allgemeine Fragen fremd ist. Es ist bemerkenswert, daß dem hier zitierten amerikanischen Schrifttum jede Polemik fehlt, ja die Vertreter gegensätzlicher Meinungen, wie DAVIS und SWINNERTON, fordern zur Diskussion auf, an der sich jeder mit eigenen Beobachtungen beteiligen soll.

¹¹ „In times of flood they may lose some of their water by percolation into their smaller crevices, but at low stages they are fed by the body of groundwater that occupies all crevices, below the water table. Rarely there is a passage through the limestone that leads from a sink hole, where the water is taken in, to a point of discharge at a lower level, without extending down to the water table“ [p. 76].

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß ich völlig unabhängig von dieser Darstellung bereits auf die gleiche Weise die verschiedenen Ergebnisse der Färbeversuche von Beschickungen, die einerseits an zentralen Versinkungsstellen eines Karstmassivs und andererseits an versinkenden Gerinnen durchgeführt wurden, erklärt habe [ZÖTL 1957, Erdkde. p. 115].

¹² 1 Gallone = 4,54 l, das ergibt über 10 Mill. m³.

Entwicklung im Karst, die der Entwicklung einer obertägigen Piedmontfläche nahekommt.

Die Wirkung der Erosionsbasis geht nach PIPER dahin, daß die Zirkulation des unterirdischen Wassers durch die Austrittspunkte in die Oberflächenströme kontrolliert wird. Daher neigen die Grundwasserleitungen dazu, sich an die Oberflächenströme anzugleichen, wenn das Gestein durchwegs gleichmäßig löslich ist [p. 80].

Zur Karsthydrographie und zur Entstehung der Höhlen in den Mississippian Kalksteinregionen von Kentucky nimmt GARDNER [1935] Stellung. Durch Brunnen- und Ölbohrungen ist ihm bekannt, daß Kalksteinformationen poröse Schichten mit statischem Wasser unter hydrostatischem Druck führen (z. T. Salz- oder Schwefelwasser, p. 1258, 1262). Da große Höhlen vielfach an das Schichtfallen geknüpft sind, entwickelt er für diese, insbesondere für die Mammothöhle in Kentucky und die Karlsbadhöhle in Neu Mexiko die Hypothese, daß durch Tieferlegung der Erosionsbasis solche Zonen freigelegt und durch den Wechsel vom unterirdischen statischen Wasser zum „mobilen“ der Höhlenbildung freigegeben werden. Dadurch stehe das Alter einer großen Höhle in direktem Zusammenhang mit dem Alter des Oberflächentaales, mit dem sie in Verbindung steht.

In einer Stellungnahme zur Zyklientheorie von DAVIS bemerkt GARDNER, daß man bei Bohrungen zwar tatsächlich häufig auf Höhlen treffe, aber in allen Fällen, die dem Autor bekannt sind oder berichtet wurden, waren sie oberhalb des Grundwasserspiegels. Darüber hinaus treffe man bei solchen Bohrungen häufig auf Schwefel- oder Salzwasser unter hydrostatischem Druck, das keine ausreichende Zirkulationsmöglichkeit besitze, um den aufgelösten Fels abführen zu können [p. 1266].

LIVINGSTONE, SAYRE und WHITE [1936] haben in Teilen von Texas die hydrologischen Bedingungen der Wasserversorgung bearbeitet.

Im Norden der Bexar und Medina Counties (Texas) stehen Kalke an, die gegen Süden und Südosten unter jüngere Formationen eintauchen. Flüsse, die das Anstehende queren, verlieren große Mengen Wasser in den Untergrund und alimentieren den Karstwasserkörper (common reservoir), der bei St. Antonio in 400—1000 Fuß Tiefe erbohrt wurde¹³.

Bezüglich des Karstwasserkörpers ist bemerkenswert, daß die Berichte der einzelnen Stationen ein gleichförmiges Steigen und Fallen über große Areale sowohl in zeitlicher Hinsicht wie auch im Ausmaß ergaben [p. 59], wobei Daten von 1915 bis 1935 herangezogen wurden. LIVINGSTONE, SAYRE und WHITE verzichten auf Vergleiche mit allgemeinen Hypothesen und beschränken sich auf die Zusammenfassung von markantem Beobachtungsmaterial.

Trotz der breiten Wirkung des Werkes von LEHMANN [1932] im mitteleuropäischen Raum, nehmen einzelne Untersuchungen auch zu Problemen der Karsthydrographie weiterhin selbständig Stellung. So verneint HAASE [1936] bei einer Untersuchung des Südharz-Vorlandes bei dem fortgesetzten Wechsel kleinflächiger Schollen im allgemeinen eine gemeinsame Grundwasserfläche, konnte aber bei dem größten geschlossenen Dolomitstock von Tettenborn einen Grundwasserspiegel ermitteln, der im wesentlichen die Formen der Oberfläche abbildet und mit dem Schichtfallen abfällt [p. 210].

¹³ „The Edward limestone is more soluble . . . and has become honeycombed or cavernous . . . and there openings are interconnected for long distances and form extensive underground reservoir systems“ [p. 72].

SCHWABE [1939] kommt bei einer Untersuchung der Piedmontflächen im Berner Jura zur Feststellung, daß „die Erosionsbasis nur wenig tiefer lag, so daß die Kalke mit Grundwasser gefüllt waren“ [p. 72]. STINI, der schon 1933 [„Die Quellen“, p. 37, 45, 148] Fragen der Karsthydrographie streift, geht in einem technischen Referat [1949] auch auf den Einfluß der Entstehungsgeschichte des Baugeländes auf die Wasserwegigkeit ein [p. 70 ff.]. Die Erfahrungen des Baugeologen, daß die Hebung einer Kalkscholle, deren alte Wasserwege höherschaltet und ihre Ausmündungen „hoch über der Talsohle in die Luft austreichen läßt“, daß der obertägige Tiefenschurf rascher arbeiten kann als die unterirdische Verkarstung¹⁴ und daß „Zeitmangel“ zuweilen den inneren Kern der Bergmasse noch undurchlöchert gelassen hat [p. 73], sprechen ohne theoretische Erwägungen bezüglich der hier erörterten Probleme eine zu klare Sprache, als daß sie weiterhin unbeachtet blieben. Den hier wie auch in der Tunnelbaugeologie [1950] geäußerten Erfahrungen¹⁵ [STINI 1948, Abb. 8, 1950, p. 81, 82] fügen sich die Ergebnisse der eigenen Sporentriftversuche treffend an.

Im folgenden drängt sich bei einer Reihe von Arbeiten das Problem der Erosionsbasis in spezieller Fragestellung zur Höhlenbildung in den Vordergrund. Bei einem Bericht über neue karst- und quellengeologische Forschungen im Toten Gebirge vertritt LECHNER [1949] die Auffassung, daß die Höhenlage der Höhlen durchaus nicht willkürlich sei, sich in bestimmten Höhenlagen verdichte und mit Verebnungssystemen in Beziehung gebracht werden könne [p. 35]. Dieselbe Auffassung vertritt ABEL [1950]. Bei der 5. Vollversammlung der Bundeshöhlenkommission in Peggau bewegte sich die Diskussion durch ein Referat von WICHE [Protokoll 1950] neuerdings um das Problem „Höhlenbildung und Erosionsniveau“. WICHE, der eine Verbindung der beiden Begriffe im allgemeinen ablehnte, machte jedoch wesentliche Einschränkungen, auf die noch zurückzukommen sein wird¹⁶.

MAURIN [1953] stellt fest, daß sich die einzelnen Niveaus der Lurgrotte, besonders die jüngeren, gut mit den Obertagterrassen der näheren Umgebung parallelisieren lassen [p. 216].

WILTHUM [1954], der aufbauend auf WINKLER-HERMADEN [1950] eine morphotektonische Beurteilung der Umgebung der Dachsteinhöhlen versucht¹⁷, spricht die Dachsteinhöhlen als „selbständige Karstgefäße ohne Vorflutbeziehung“ an [p. 89]. Für KRIEG [1954] ist der Begriff der „Vorflut“ und des „stagnierenden Karstwassers“ unter dem „Vorflutniveau“ gesichert [p. 3, 4], wogegen ARNBERGER [1955] und TRIMMEL [1955] Stellung nahmen, während KRIEG [1955] seinen Standpunkt beibehielt und TRIMMEL [1957] nochmals eine ablehnende Haltung einnahm. Sehr wesentlich ist die Ansicht von SCHAUBERGER [1956]. Dieser ordnet jedem „Höhlenniveau“ ein bestimmtes „Höhlenintervall“ zu und erinnert mit seinen Höhlenstockwerken an Auffassungen von CVIJIĆ [1918]. Sein Schaubild (Tafel 1), ein Diagramm über die Verbreitung der Karsthöhlen im Toten Gebirge, Dachstein und Tennengebirge, läßt tatsächlich eine durchziehende Stockwerkgliederung der Karsthöhlen dieses Raumes

¹⁴ Vgl. die Ergebnisse der Quellenaufnahme im Dachsteingebiet [ZÖTL, Mitt. Nat. Ver. 1957 Abb. 5].

¹⁵ Die Bergerfahrung STINI's beleuchtet u. a. die Tatsache, daß er allein auf S. 82—104 der „Tunnelbaugeologie“ Ergebnisse von mehr als 20 Tunnelbauten in Kalkgebirgen als Beispiele besprechen kann.

¹⁶ Vgl. auch: WICHE, Höhlenkunde und Hochgebirgsmorphologie, Mitt. Geogr. Ges. Wien, Bd. 92, p. 158.

¹⁷ Wesentliche Korrekturen dazu s. WINKLER-HERMADEN, Geol. Kräftespiel... p. 585.

klar erkennen und der Versuch, mit den Verebnungen und Talsystemen eine Übereinstimmung darzulegen, fand zumindest noch keine sachlich unterbaute Widerlegung.

Im Zeitraum der eben wiedergegebenen Diskussion wurde die zweite Chlorierung des Lurbaches unter Leitung von MAURIN [1952] durchgeführt. Es wurde damit nicht nur ein Zusammenhang des Lurbaches mit der Hammerbachquelle nachgewiesen, sondern ein technisches Musterbeispiel einer Chlorierung geliefert, das eine Monographie KYRLE's gegenstandslos machte und die Beurteilung der Färbeversuche durch LEHMANN erschütterte.

Beim Intern. Speläologenkongreß 1953 befaßten sich einzelne Referate auch mit den Problemen der Karsthydrographie. LAVAUR [1953] beschreibt überaus interessante Färbeversuche in der Causse de Gramat, MISTARDIS [1953] aber kommt bei seinen Untersuchungen im südlichen Griechenland zur eindeutigen Auffassung einer niveaugebundenen Entwicklung des Karstsystems [p. 251 ff.].

Gestützt auf die Ergebnisse von Wasserbohrungen und zahlreiche Quellenuntersuchungen im Jura, gibt WEIDENBACH [1954] eine interessante Erläuterung zum Karstwasserproblem der Schwäbischen Alb. Seine Untersuchungen sind deshalb besonders wertvoll, weil er über Einzelfphänomene — verunreinigte Quellwässer neben reinem Karstwasser, Hungerbrunnen neben kaum schwankendem Karstwasser — die immer wieder als Argumente gegen einen zusammenhängenden Karstwasserkörper auftauchen, durch exakte Verfolgung über weite Räume zum Ergebnis eines zusammenhängenden Karstwasserkörpers gelangt, wobei er neben der Trennung von seichtem und tiefem Karst, für letzteren eine „überdeckte“, eine „innere“ und eine „äußere Zone“ ausscheidet (schematische Darstellung, p. 68) ¹⁸.

In einer populärwissenschaftlichen Höhlenkunde spricht KELLER [1957, p. 20 f.] von einem einheitlichen Karstwasserkörper der Schwäbischen Alb, im gegebenen Fall wohl auf den Untersuchungen von BERZ [1928] fußend.

Abschließend ist noch auf die Ergebnisse einiger neuerer Färbeversuche hinzuweisen. EISSELE [1957] führte Färbeversuche mit Uranin an Karstquellen der Schwäbischen Alb durch, von denen die Versuche zwischen Würtingen und dem Uracher Wasserfall, zwischen Trailfingen und Ermsursprung und zwischen Laichingen und Blautopf den zu erwartenden Wiederaustritt an den stärksten Quellen ergab und der Versuch beim Lager St. Johann eine sektorenartige Streuung erbrachte. Einen „aufschlußreichen Färbeversuch“ nennt mit Recht CARLÉ [1956] die Ergebnisse seines Färbeversuches im Landkreis Mergentheim. CARLÉ konnte trotz der geringen Farbmenge (2 kg Uranin) den Wiederaustritt in fünf Quellen nachweisen, wobei er eine Streuung über einen Sektor von 120° erzielte. CARLÉ erkannte zwei Karstwasserstockwerke, beide durch Kamine verbunden, von denen das untere am wasserreichsten und am ausdauerndsten ist [p. 131].

Den bedeutendsten Färbeversuch mit Uranin aber hat DOSCH [1955] durchgeführt. Er beschickte zur Klärung der Schutzgebietsfrage im Bereich der 1. Wiener Wasserleitung im Gebiet des Hochschneebergs im Juni 1955 eine zentral im Ochsenboden gelegene Doline mit einer Lösung von 9,5 kg Uranin, und bewies, daß faktisch sämtliche am Fuße dieses Kalkmassivs austretenden Quellen von der Farbeinspeisung betroffen wurden.

¹⁸ WEIDENBACH irrt aber, wenn er die Einführung der Begriffe „seichter“ und „tiefer“ Karst GRUND [1903] zuschreibt (p. 66), sie wurden durch KATZER [1909] eingeführt.

*II. Neue Untersuchungen zur Hydrographie alpiner Karstgebirge***1. Karsthydrographische Untersuchungen im östlichen Dachsteingebiet**

Das durch die Untersuchung erfaßte östliche Dachsteingebiet liegt zwischen der oberen Traun und dem Ennstal und gehört mit der Plateaufläche „Auf dem Stein“ in 1800 bis 2200 m a. H. noch den zentralen Teilen des Dachsteinmassivs an, dessen Gipfel (Hoher Dachstein, 2996 m a. H.) die höchste Erhebung der massigen Kalkstöcke der Nördlichen Kalkalpen östlich der Saalach bildet.

Die wie Bastionen dem Massiv vorlagernden, orographisch sehr selbständigen Gebirgsstöcke des Koppen (Zinken, 1854 m) und Kammspitz (2141 m) drücken mit ihren über 1000 Meter steil abfallenden Hängen auch den Ausläufern des Dachsteinmassivs den allgemein abweisenden Charakter des gesamten Stockes auf, der im wesentlichen aus Dachsteinkalk, Riffkalk und Hauptdolomit aufgebaut wird. Nur gegen Nordosten, gegen das Becken von Mitterndorf, läuft das über 280 km² große Untersuchungsgebiet etwas ruhiger aus.

In diesem Raum (s. Abb. 1) wurde in den Sommermonaten 1954 und 1955 eine hydrologische Aufnahme durchgeführt¹⁹. Diese fand ihren Niederschlag zunächst in der Anlage eines Quellenkatasters und einer hydrographischen Übersichtskarte [ZÖRL 1957, Mitt. Natw. Ver. Tafel XVI]. Damit war ein relativ großes Gebiet systematisch erfaßt. Allein diese systematische Aufzeichnung der Quellen ließ schon gewisse Zusammenhänge erkennen. So zeigte sich neben der bekannten Wasserarmut der Hochfläche eine unverkennbare Reihung kleiner Quellen in dem im allgemeinen auf weite Flächen wasserlosen Plateaubereich. Eine nähere Untersuchung ergab, daß nicht nur Schuttquellen, sondern auch kleine Spaltenquellen einer alten Talung im Plateaubereich folgen, die durch Ablagerungen deutlich erkennen läßt, daß während der Rückzugsstadien der letzten Eiszeit hier noch eine größere Gletscherzunge lag. Dasselbe gilt für hochgelegene Kare oder den kurzen steilen Tälern. Die abschmelzenden Gletscherreste verstopften durch Einschwemmung einesteils kleine Klüfte und Spalten, wie sie andererseits durch die Abdichtung von Hohlformen kleine undurchlässige Areale mit Sümpfen und Seelein schufen. An den Rändern dieser abgedichteten Flächen liegen die kleinen Quellen, deren Abflüsse nach kurzem Lauf wieder versinken. Faßt man derartige, an den Rändern von abgedichteten Flächen auftretende Spaltenquellen näher ins Auge, so sieht man, daß es sich durchwegs um Quellen unter 0,1 l/sec Schüttung handelt, die nur deshalb den Sommer über fließen, weil niederschlagsfreie Zeitspannen von mehr als 10 Tagen in den Monaten Juli und August sehr selten sind (1947 bis 1954 nur einmal aufgetreten). Wie die abgedichteten Flächen selbst, so ist wohl auch der Großteil der an ihrem Rand aus den Gesteinsspalten austretenden kleinen Quellen glazialer Entstehung. Diesen Schluß bekräftigt folgende Beobachtung:

Die in den abgedichteten Wannern stehenden winzigen „Seelein“ haben nach der Schneeschmelze und nach Regenfällen einen mehr oder minder starken Abfluß. Bei den bereits stark verkarsteten Plateauflächen treffen diese Abflüsse meist unmittelbar nach dem Verlassen der ausgeschmierten Hohlform auf einen in die Tiefe führenden Weg, worin sie versinken (Zündellacke, Mai-

¹⁹ Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden zum größten Teil im Auftrage des Speläologischen Institutes Wien, Vorstand Sekt.-Chef Dr. R. SAAR, durchgeführt. An der Vorbereitung der Versuche hatte Dr. F. BAUER maßgeblichen Anteil.

Sporentriftversuche Dachstein 1956

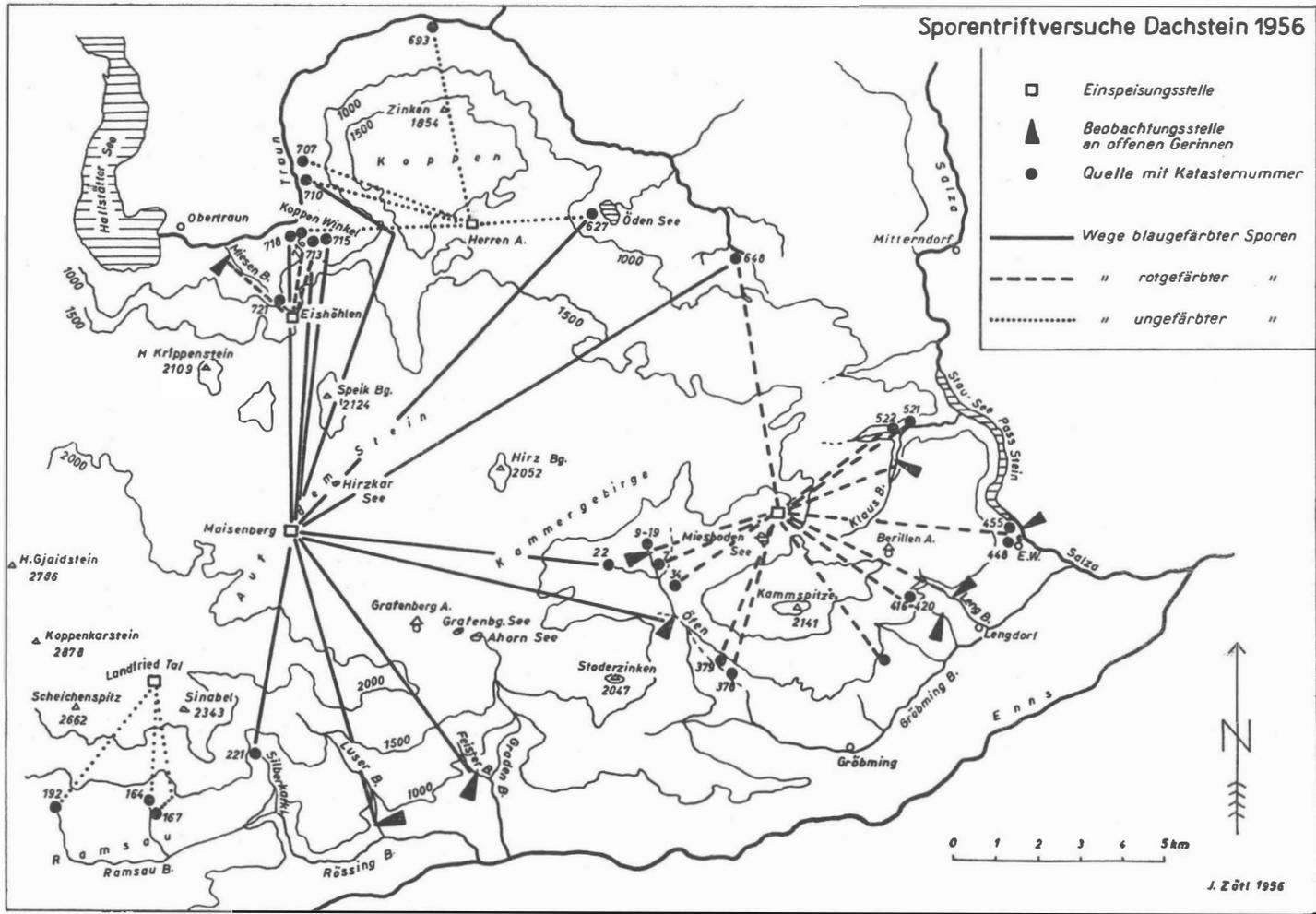


Abb. 1.

senberg Lacke, Grafenberg und Schildenwang „Fluß“, Miesboden See u. a.). Eine Ausnahme bildet der Hirzkar See, der in die nächst tiefergelegene abgedichtete Hohlform, das Wurzkar, überfließt. Es ist deutlich zu verfolgen, daß sich dieses Überfließen einst oberirdisch vollzog. Heute finden wir diese Abflußstrecke durch eine Reihe von Folgequellen markiert, deren unterste derzeit noch an den abgedichteten Boden des Wurzkars gebunden ist. Neben dem Altersnachweis für diese Quellen ist damit der Hinweis auf den Einfluß einer kleinen lokalen Erosionsbasis zum Quellaustritt gegeben, dies um so mehr, als der bei den höher gelegenen Folgequellen bedeutend schwächere Wasseraustritt rasch nach jedem Regenfall wieder versiegt, man aber hören kann, wie das Wasser unterirdisch zum Quellaustritt im Wurzkar zieht.

Folgequellen in großer Zahl treffen wir weiterhin in den unteren Hangbereichen gegen die Ennstalfurche. Die Hauptmasse der Quellen tritt hier an der Grenze zu den wasserstauenden Werfener Schichten im Liegenden der Kalke und Dolomite auf. Vielfach versinken diese Quellaustritte wieder im vorgelagerten Hangschutt und treten erst am Hangfuß neuerdings aus. Derartige Folgequellen entsprechen jenen in den nicht verkarstungsfähigen Gebirgen.

Folgequellen direkt aus dem Kalk bzw. Dolomit, ohne die Einwirkung stauender Gesteinschichten austretend, finden wir aber in den stark eingerissenen kurzen Tälchen gegen die Ramsau, in der Silberkarklamm, beim Luserbach, besonders eindrucksvoll zwischen Grafenberg See — Ahorn See und Gradenbachursprung, dann ober den Öfen, bei der Salza und im Klausgraben.

Die eindeutige Häufung der z. T. Zehner von Metern über den örtlichen Talböden austretenden starken Spaltenquellen und ihrer schwächeren, aus noch engen Klüften dringenden, bodennahen Folgequellen läßt erkennen, daß in den erwähnten tiefeingerissenen Furchen die obertägige (hauptsächlich mechanische) Erosion der unterirdischen (hauptsächlich chemischen) vorausgeeilt ist. Da überdies die Quellaustritte talaufwärts allmählich höherrücken, ist anzunehmen, daß im Süden des Dachsteingebietes die Zone des fließenden Karstwassers gegen das Berginnere zu rasch ansteigt. Undurchsichtiger sind die Verhältnisse am Nordrand des Massivs, wo besonders südlich und dann westlich der Koppenbrüller Höhle junge Ablagerungen die einst tieferen Täler aufgeschottert haben und tiefergelegene Quellaustritte verhüllen, so daß größtenteils nur die Überfallquellen sichtbar sind, während das in der stark durchlässigen Talfüllung relativ rasch fließende Grundwasser bzw. der Hallstätter See einen großen Teil des unter Druck aus den verdeckten Spalten drängenden Karstwassers aufnehmen.

Im Sommer 1956 wurden im östlichen Dachsteingebiet fünf Sporentriftversuche durchgeführt [ZÖTL, Erdkunde, 1957]²⁰. Die Versuche ergaben, daß dem Gebirgsstock eine radiale Entwässerung eigen ist (Abb. 1).

Im allgemeinen vergrößert sich der Streuungswinkel mit der wachsenden Entfernung der beschickten Schwinde von den Rändern des Massivs. So kamen die in den Eishöhlen am Nordrand des Dachsteinstockes eingebrachten Sporen ebenso wie die nahe dem Südrand in eine Schwinde im Landfried Tal eingespeisten über einen Winkel von 50° nicht hinaus. Die in die Schwinde bei der Herren Alm (Koppenstock) und im Miesboden hinter dem Kammspitz eingesetzten Triftkörper wirkten bereits in einem übermäßig großen Winkel, was mit

²⁰ Zur Methode dieser Versuche s. MAYR [1953, 1954]; ZÖTL, Erdkunde [1957]. Ständiger Mitarbeiter bei den Versuchen war Herr Hauptschuloberlehrer A. HOFER (Mikroskopie).

der Lage der Schwinden hinter den, dem Massiv vorragenden Gebirgsstöcken gut übereinstimmt.

Mit Ausnahme der weit gegen Westen gerückten Einspeisung im Landfried Tal liegen alle durch die Sporenwege begrenzten Bereiche der in den Randgebieten durchgeführten Versuche innerhalb des durch die Einspeisung im Zentrum des Gebietes betroffenen Arealen. Es zeigt sich eine Ineinanderschaltung von Sektoren und die Ausbildung eines Scheitels im Karstwasserkörper. Der obere Saum des fließenden Karstwassers weist von den zentralen Teilen des Massivs weg nach allen Richtungen ein Gefälle auf²¹.

2. Hydrogeologische Untersuchungen im Raume der Tauplitz

Im Nordosten des Dachsteinstockes liegt das Tote Gebirge, das mit seinen wüstenhaften, verkarsteten Hochflächen jene des Dachsteinstockes an Ausdehnung und Öde übertrifft. Zwischen den beiden Gebirgen weitet sich in freundlichen Becken das steirische Salzkammergut mit seinen Hauptorten Bad Aussee und Mitterndorf. Seen und die Gebirgskulisse sorgen im Sommer für einen Strom von Besuchern, während ihn der Wintersport zur kalten Jahreszeit ins Land bringt. Die im weiten Umkreis günstigsten Schneeverhältnisse bietet das Gebiet der Tauplitz Alm.

Noch zu den Ausläufern des südöstlichen Toten Gebirges zählend, liegen die Almflächen der Tauplitz zwischen 1600 und 1700 m a. H., überragt vom Schneider Kogel (1762 m) und dem westlich davon aufsteigenden Lawenstein (1961 m). Ihre sanfteren Formen im Vergleich zum Hochgebirge im Norden verdankt die weitere Umgebung der Tauplitz vor allem dem Umstand, daß mit Ausnahme des Lawensteins (Dachsteinkalk) das Gebiet vor allem aus Dolomiten aufgebaut wird. Nichtsdestotrotz sind die Almflächen stark verkarstet, wasserlos und mit Dolinen übersät. Nur am äußersten Nordrand des Gebietes treten zwei wasserstauende Horizonte — Werfener Schichten und ein schmales Band von Carditaschichten — hydrologisch in Wirksamkeit und führen zu örtlichen Quellaustritten (Abb. 2, Quellen Nr. 2, 3, 4, 5), die z. T. der Wasserversorgung von Unterkunftshäusern dienen.

Zwecks Klärung des Abwasserproblems wurden im Juli 1957 in diesem Raume umfangreiche Triftversuche durchgeführt. Ihnen ging eine hydrologische Detailaufnahme voraus, die auch die talnahen Hangbereiche gegen die Salza, das Mitterndorfer Becken und den Grimming Bach erfaßte. Dabei wurden 27 Quellaustritte mit über 1 l/sec und ca. 160 Quellen unter 1 l/sec Schüttung festgelegt. Die stärkste Einzelquelle des Gebietes ist Quelle Nr. 17 (Abb. 2) mit einer stark schwankenden Schüttung von 100 l/sec bis über 1 m³/sec. Den Charakter eines Wallers verdankt diese Quelle dem Umstand, daß der einst

²¹ Diese Aussage kann gemacht werden, obwohl der Westen des Dachsteinstockes nicht unter Beobachtung stand und das tatsächliche Zentrum des Massivs weiter im Westen liegt. Daß diese Folgerung nicht leichtfertig gezogen wurde, beweist der Versuch von DOSCH im Hochschneeberg (s. o.).

Die Erkenntnis von verschiedenen großen Streuungswinkeln je nach der Entfernung der Schwinden vom Massivrand ist der Verwendung von gefärbten Lycopodiumsporen zu verdanken. Der Einsatz verschieden gefärbter Sporen gestattet eine gleichzeitige Durchführung mehrerer Versuche in einem Arbeitsgang und Arbeitsraum. Durch die Beschickung ausgewählter Schwinden mit verschieden gefärbten Sporen können spezielle Fragen der unterirdischen Wasserbewegung eines Gebietes nunmehr bis ins Detail verfolgt werden.

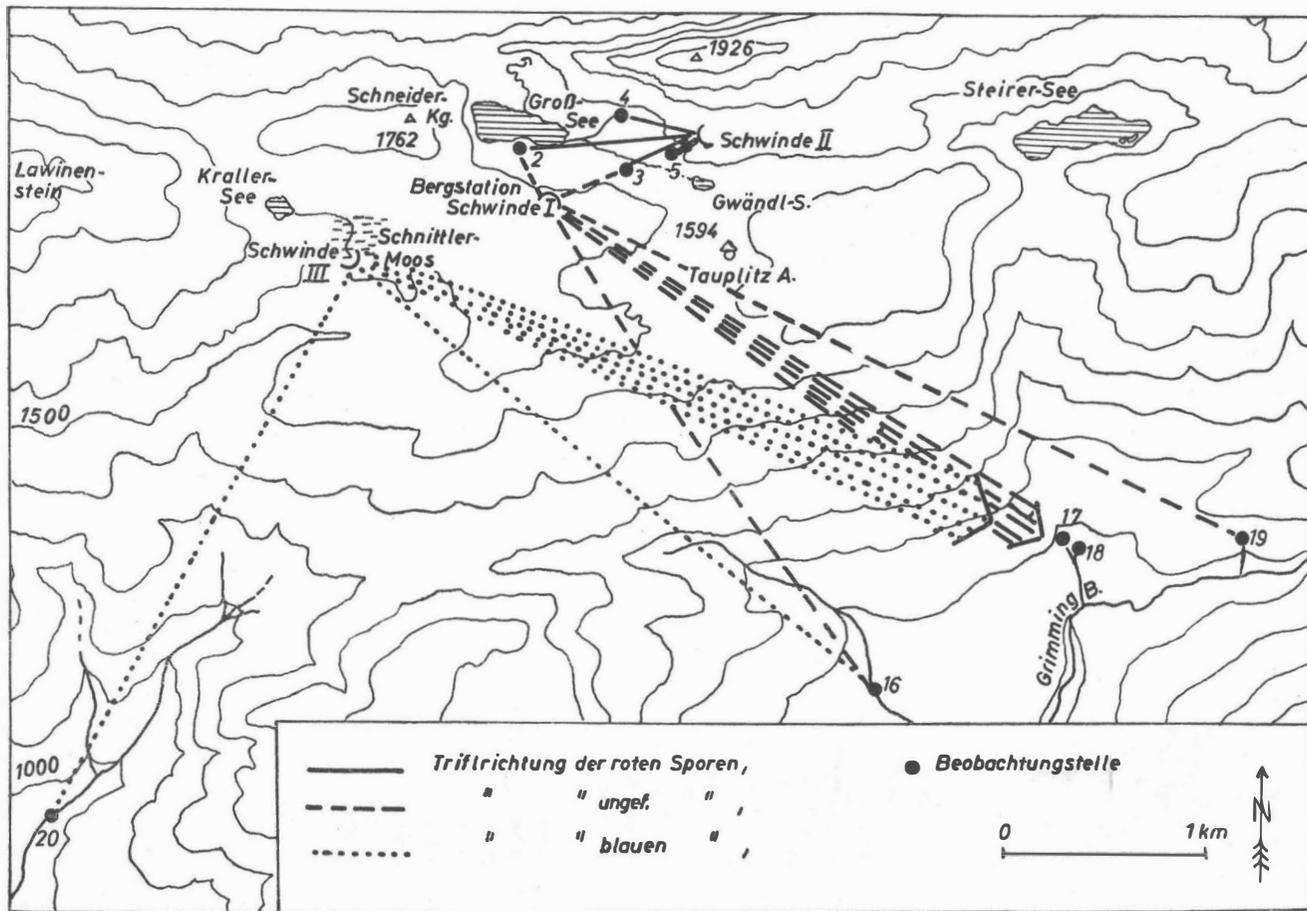


Abb. 2. Sporenriftversuch im Raume der Tauplitz.

tiefgelegene Quellaustritt durch eine Moräne abgedichtet wurde, an deren Oberkante nun das Wasser aufstößt. Auch hier gilt im ganzen Gebiet die Regel, daß die Abflüsse hochliegender Quellen tiefgelegene Folgequellen speisen.

Neben zwei Uraninfärbungen und einer Sporentrift mit speziellen Zielen wurden im Juli 1957 in eine Doline ca. 30 m östlich der Bergstation des Sessel-*liftes* (Schwinde I) 4 kg ungefärbtes *Lycopodium*pulver, in eine kleine Schwinde nördlich des Gwändl Seeleins (Schwinde II) 3 kg rotgefärbte Sporen und in eine Schwinde im Schnittler Moos (Schwinde III) 6 kg blaugefärbte Sporen eingebracht (Abb. 2).

Die rotgefärbten *Lycopodium*sporen gelangten entlang der eingeschalteten Werfener Schichten auf relativ seichten Wegen zu den Quellen Nr. 2, 3, 4 und 5; sie liegen alle im Plateaubereich. Von den genannten Quellen aus flossen die Sporen in den Groß See, von wo aus eine weitere Beobachtung nicht mehr erfolgen konnte.

Die ungefärbten Sporen konnten in den Plateauquellen Nr. 2 und 3 und in den Talquellen Nr. 16, 17, 18, 19 und 20 nachgewiesen werden.

Die größte Zahl der ungefärbten Sporen trat bei Quelle Nr. 17 auf, was mit der starken Schüttung dieser Quelle im Einklang steht.

Auch die blaugefärbten Sporen wurden zum weitaus größten Teil bei Quelle Nr. 17 wieder zutage gefördert (Probe vom 28. 7. 1957 465 blaue Sporen), während an den anderen Beobachtungsstellen weitaus geringere Mengen austraten.

Klar ersichtlich ist, daß die jeweils als positiv befundenen Quellen wieder eindeutig einem gewissen Sektor der unterirdischen Wasserbewegung entsprechen. Die Überschneidung entspricht der Lage der Schwinden.

Über die Sektorenbildung hinaus läßt das Untersuchungsergebnis der von Schwinde I weg durchgeführten Triftung mit ungefärbtem Sporenpulver auch im Gebiete der Tauplitz das Bestehen eines Scheitels im Karstwasserkörper erkennen. Das bei den Quellen Nr. 2 und 3 austretende Wasser fließt dem Groß See zu und mit dessen Abfluß gegen Norden, während der andere (überwiegende) Teil des Plateaus gegen Süden entwässert. Daß es sich beim Abfluß nach Norden nicht nur um eine kleinräumige oder gar nur oberflächliche Besonderheit (mit einer Umkehr der Verhältnisse im Untergrund) handelt, beweist unter anderem der Umstand, daß keinerlei rotgefärbte Sporen in den Quellen im Süden auftraten.

Der Hauptteil des Plateaus entwässert allerdings nach Süden, so daß der Scheitel der Zone des fließenden Karstwassers unter dem Tauplitzplateau weit gegen den Nordsaum des Plateaus vorgeschoben zu sein scheint.

Der am Nordrand des Gebietes durchziehende stauende Horizont des Carditabandes ließ um den Schneider Kogel ein lokales, selbständiges, höhergeschaltetes Stockwerk der Karstentwässerung entstehen, das zum Kraller See entwässert. Dadurch, daß der Abfluß dieses Sees in der Schwinde im Schnittler Moos versinkt (Schwinde III), findet dieses karsthydrographische Stockwerk Anschluß an den tieferliegenden allgemeinen Karstwasserkörper.

Daß eine derartige Stockwerkbildung im unterirdischen Karstwasserkörper jedoch keineswegs immer auf die Einschaltung wasserstauender Gesteinsschichten zurückgeführt werden kann und damit einer Erklärung wesentliche Schwierigkeiten zu bieten vermag, kann der folgenden Beschreibung eines Versuches in den Lechtaler Alpen entnommen werden.

3. Ein Sporenriftversuch in den westlichen Lechtaler Alpen

Zur Klärung örtlicher Probleme wurden im August 1957 zwei Schlucker im Formarin See mit verschieden gefärbtem Lycopodiumpulver beschickt und die Sammelgerinne der Quellen sowohl im Großen Walsertal, wie auch im Kloster- und Lechtal unter Kontrolle gestellt.

Der Formarin See liegt in einer Karstwanne in ca. 1800 m Seehöhe in den westlichen Lechtaler Alpen. Im Norden des Sees steigt die Rote Wand als bedeutenste Erhebung der näheren Umgebung bis über 2700 m a. H. an, während im Südwesten und Südosten Höhen von rund 2300 m Seehöhe die Mulde begrenzen (Roggelkopf 2375 m, Saladin Spitze 2232 m). Dazwischen liegen die Einsattelungen, über die die Zugänge zum Becken des Formarin Sees führen (Formarin Alpe 1876 m, Freiburger Hütte 1931 m, In der Enge 2005 m a. H.).

Obwohl Plattenkalk und Hauptdolomit im Aufbau des weiteren Untersuchungsgebietes überwiegen, komplizieren sich die geologischen Verhältnisse gegen den Südfall des Gebirges zum Klostertal, wobei Mergel- und Ton-schieferlagen der Raibler- und Partnachschichten als Stauer auf die unter-tägigen karsthydrographischen Verhältnisse einen entscheidenden Einfluß zu nehmen scheinen.

Die sich aus dem differenzierten Aufbau ergebenden Schwierigkeiten für die Beurteilung der Karsthydrographie des Gebietes im allgemeinen und die unterirdischen Abflüsse des Formarin Sees im besonderen spiegeln sich in einer Dissonanz vorliegender geologischer und hydrographischer Gutachten, die wechselnd den Lech, die Mostrin Quellen, den Radona-, Stelzis- oder Annatobel als Abfluß der Formarinwässer bezeichnen (vgl. Abb. 3).

Für die Untersuchung war es daher notwendig, zu versuchen, das ganze weitere Untersuchungsgebiet unter Kontrolle zu stellen. Bei der Ausdehnung des nunmehr sehr weitgespannten Beobachtungsnetzes war es nicht mehr möglich, die Beobachtungsstationen nur an den Quellen zu errichten; die Beobachtung mußte sich auf die Vorfluter konzentrieren, in denen sich die Wässer der Quellen sammeln. Nur in Ausnahmefällen wurden auch einzelne Quellaustritte beobachtet. Zu dieser Vereinfachung zwang neben der Einsicht, daß der Anzahl der täglich anfallenden Wasserproben eine Grenze gesetzt werden mußte, vor allem die Notwendigkeit, auszuschließen, daß Beobachtungslücken das Untersuchungsergebnis beeinträchtigen. Der sich aus dieser Beobachtungsvereinfachung ergebende Nachteil, daß sich positive Befunde nun auf Quellgruppen bzw. Vorfluter beziehen und die Stellung der einzelnen Quelle offen bleibt, mußte in Kauf genommen werden und kann angesichts der sehr weitgehenden Erfassung des gesamten Untersuchungsgebietes und einer gesicherten Beurteilung des Gesamtgebietes als untergeordnet bezeichnet werden.

Am 26. 8. 1957 wurden durch Taucher 11 kg rotgefärbte Lycopodiumsporen in eine mehrere Meter unter dem Seespiegel liegende offene Schwinde in der Südostecke des Formarin Sees eingespeist (Schwinde I). Der Wasserabzug betrug ca. 100 l/sec. Anschließend wurde am selben Tag eine in der Nordwestecke des Sees liegende Schluckstelle mit 8 kg blaugefärbten Lycopodiumsporen beschickt (Schwinde II).

Die in diesen Tagen einsetzenden starken Niederschläge verursachten einen interessanten Wechsel in der Funktion der mit blaugefärbten Sporen beschickten Schwinde II. Während am 24., 25. und 26. 8. ein leichter Abfluß in diese Schwinde zu verzeichnen war, trat am 27. 8. eine Stagnation ein und am 28. 8.

1957 war statt eines Abflusses aus dem See ein Zufluß zu beobachten, die Schwinde hatte sich in einen Speier verwandelt. Die in Schwinde II eingebrachten blauen Sporen wurden in den See zurückgespült. Während dieser Tage blieb die Schwinde I gleichmäßig als starker Schlucker bestehen.

Die rotgefärbten Sporen traten im Faludrigenbach (Beobachtungsstelle Nr. 2), im Huttlabach (Beobachtungsstelle Nr. 4) und im Lech (Beobachtungsstelle Nr. 17) auf. Auch die Beobachtungsstation Nr. 3 (Marulbach) führte rotgefärbte Sporen, doch läßt die geringe Sporenzahl vermuten, daß westlich des Faludrigenbaches keine Sporen mehr austraten und das Beobachtungsergebnis von Station Nr. 3 nur das verdünnte Abbild des Sporendurchganges bei Station Nr. 2 darstellt (Abb. 3).

Eine Zusammenfassung der Resultate ergibt:

Im Raum der westlichen Lechtaler Alpen zeigte die Beschickung einer starken Schwinde im Formarin See, daß die hier versickernden Gewässer sich über einen nach Norden gerichteten Sektor der unterirdischen Zone fließender Karstwässer verteilen. Der weit nach Süden verschobene unterirdische Scheitel des Karstwasserkörpers findet seine Begründung in den stauenden Raibler- und Partnachschichten, die, an den Hängen zum Kloostertal ausstreichend, gegen Norden einfallen.

Genauere Hinweise, wie die Zone des fließenden Karstwässers gegen das Berginnere ansteigt, fehlen, grundsätzlich aber beweist auch dieser Versuch, daß im Karstwasserkörper ein Gefälle nach außen besteht.

Der Umstand, daß wir zur selben Zeit, da der Abfluß durch die Spalte im Süden des Sees (Schwinde I) unvermindert anhielt, am 27. 8. 1957 bei Schwinde II einen Funktionswechsel zum Speier zu verzeichnen hatten, läßt den Schluß zu, daß im Gebirgsstock zwei verschiedene, übereinandergeschaltete Stockwerke des Karstwassersystems bestehen. Das höhere Stockwerk liegt im Raume der Roten Wand und ist nicht durch stauende Gesteinsschichten bewirkt; es gibt im Berginnern laufend langsam Wasser an den tieferliegenden Karstwasserkörper ab, die Verbindungswege aber scheinen nur eine begrenzte Wassermenge zu fassen, so daß bei stärkerem Wasseranfall (nach der Schneeschmelze und nach stärkeren Niederschlägen) ein Abfluß (Überfall) in den Formarin See erfolgt. Eine ausgezeichnete Illustration zu diesem Phänomen gibt die Beschreibung des Gebietes durch STINI [1952], nach der der See durch eine unterseeische Barre in zwei Becken getrennt wird. Schwinde II befindet sich im nördlichen (größeren) Seebecken, Schwinde I, die dauernd in die Tiefe entwässernde Spalte, im südlichen [vgl. STINI 1952, Abb. 3, p. 264]. Die Annahme, daß die abgedichtete Senke, in der heute der Formarin See liegt, lange Zeit als örtliches Erosionsniveau wirkte (und z. T. noch heute wirkt) und die Ausbildung dieses karsthydrographischen Stockwerkes beeinflusste, ist begründet.

Da die Formarinwässer sowohl in das Große Walsertal wie auch in das Lechtal abfließen, liegt der See an der europäischen Hauptwasserscheide.

4. Hydrogeologische Untersuchungen am Rande des Köflacher Beckens

In den Jahren 1955 bis 1957 beschäftigten sich HIESSLEITNER und MAURIN wiederholt mit hydrogeologischen Problemen im Raume Köflach [MAURIN 1957]. Im April 1957 führte ich gemeinsam mit MAURIN mehrere gleichzeitig ablaufende Sporenriftversuche in diesem Gebiet durch, deren zweckgebundene Zielrichtung immerhin die Schilderung eines dieser Versuche gestattet.

Das Steirische Randgebirge umschließt westlich von Graz mit den Ausläufern der Pack-, Stub- und Gleinalpe das Köflacher Becken. Im Raume von Köflach überschneiden sich verschiedene geologische Einheiten. In einer schalenförmigen Lagerung folgen auf kristalline Schiefer Kalke und Dolomite (Gradenbachtal, Zigöller Kogel, vgl. Abb. 4 und Abb. 6). Diese Folge wird im Becken von Köflach von jungen Sedimenten des Kohlentertiärs überlagert. Die eis- und nacheiszeitlichen Talfüllungen im Gradenbachtal und im Köflacher Becken haben meist nur geringe Mächtigkeit (5 bis max. 15 m).

In der kleinen Karstwanne beim Gehöft Schachner wurden in eine Schwinde 4 kg violettgefärbte Sporen eingespeist und die umliegenden Quellaustritte bzw. Gerinne beobachtet.

Die Hauptmasse der eingespeisten Sporen trat bei der am tiefsten gelegenen Quelle, beim Hemmer Bach, aus, es konnten aber auch bei allen anderen Beobachtungsstellen violette Sporen nachgewiesen werden, so daß sich das gewohnte Bild einer sektorehaften Streuung ergibt.

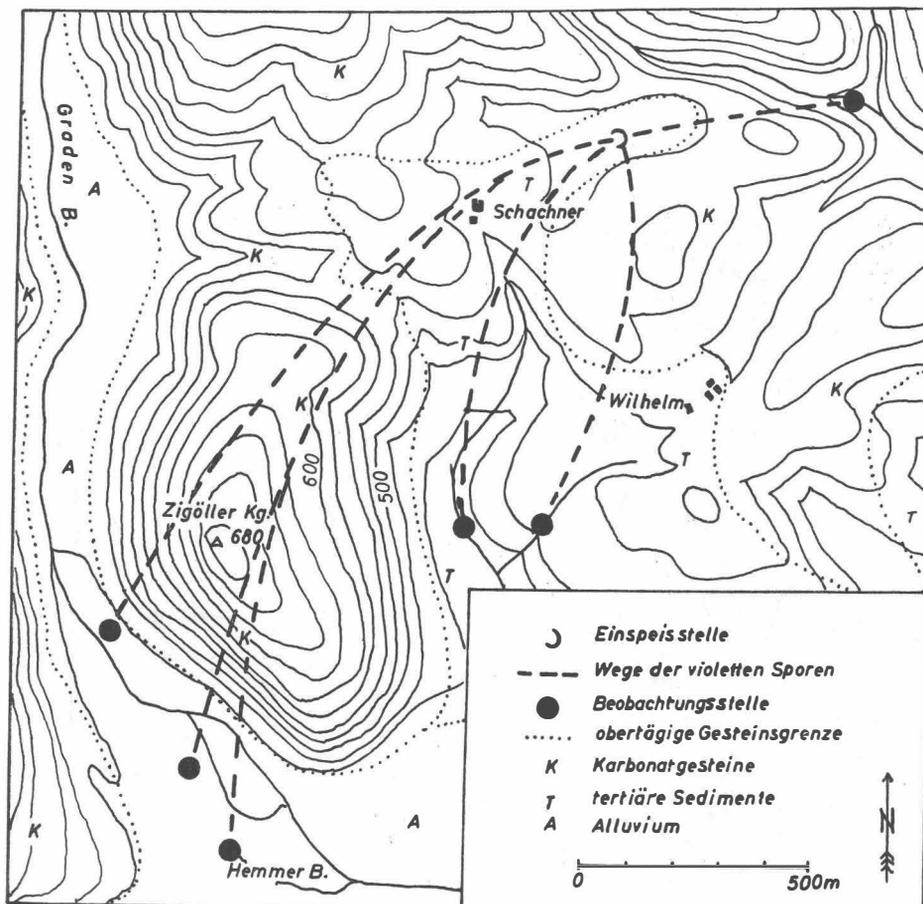


Abb. 4. Sporenriftversuch bei Köflach.

Der Höhenunterschied zwischen der Einspeisestelle und den höher gelegenen Quellen südlich des Gehöftes Schachner beträgt 40 bzw. 60 m auf 600 bzw. 800 m Entfernung in der Luftlinie, was auf einen im Berginnern weitgehend hochgezogenen oberen Saum des fließenden Karstwassers schließen läßt.

Die stärkste Quelle (Hemmer Bachl) tritt an der tiefsten Stelle des örtlichen Erosionsniveaus aus. Im Vergleich zu den bisher geschilderten Untersuchungen in den Nördlichen Kalkalpen sind die relativen Höhen zwischen den Quellen an der Erosionsbasis und den Versinkungsstellen im verkarsteten Gebirge nunmehr sehr gering (80 gegen 600 bis 1200 Höhenmetern), dennoch sind weitgehend übereinstimmende Triftergebnisse zu verzeichnen.

5. Hydrologische Untersuchungen im Raume der Voralpe

Vor den ostalpinen Kalkhochalpen liegen die Kalkvoralpen, die in Niederösterreich vorwiegend aus Dolomit aufgebaut sind. Beim Übergang von den Kalkhochalpen zu den Voralpen treffen wir bei der Dreiländerecke von Niederösterreich, Oberösterreich und Steiermark auf den Zug der „Voralpe“ (1728 m), der gegen Südwesten im Raume der Ennsschlinge bei Altenmarkt mit dem Wiesberg (804 m), dem Hainbachstein (814 m) und dem Weinberg (854 m) als seinen letzten Ausläufern ausstreicht.

Im Gebiet dieser Ausläufer der Voralpe wurde zur Klärung der unterirdischen Entwässerung gemeinsam mit MAURIN ein Sporentriftversuch durchgeführt, der auf Grund der ausgezeichneten geologischen Unterlagen, trotz der komplizierten Verhältnisse überaus aufschlußreiche Ergebnisse zeitigte²².

Triassisch-jurassische Kalke streichen von der Voralpe gegen den Weinberg. Sie liegen auf einem mächtigen Zug von Hauptdolomit, dem der Blossenberg und der Wiesberg angehören. Angelagert an die ausstreichenden Kalke, verkleiden Ablagerungen der Gosau den Westfuß des Weinberges. Eine tektonisch selbständige Einheit, eine auf die genannte Folge aufgeschobene Scholle, stellt der Dolomitstock des Hainbachsteines dar, der auf einer relativ dünnen Schicht von Haselgebirge ruht.

Im Bereiche des Ennstales treten noch mehrere Zehner von Metern mächtige, z. T. zu Konglomeraten verfestigte eiszeitliche Terrassensedimente auf; sie nehmen im Bereich der Ennsschlinge um Altenmarkt ein größeres geschlossenes Areal ein.

Die Detailaufnahme der Quellaustritte ergab:

Die Lage der Quellen entspricht im allgemeinen den geologischen Verhältnissen. Jeweils mehrere Quellaustritte liegen einerseits an der stark auslappernden Grenze der von der Voralpe herabziehenden Kalkzüge und der diese im Südwesten diskordant überlagernden Ablagerungen der Gosau, andererseits an der Basis der tektonischen Hainbachsteinscholle und im Bereich des Frenzgrabens. Die stärksten Quellen sind an die Kalk-Gosau-Grenze gebunden (Nr. 1, 2, 3, 4, 6).

Die Abflüsse hochgelegener Quellen sind am schwächsten. Ihnen entsprechen Folgequellen mit zunehmender Schüttung gegen den Talboden (Quelle Nr. 4, 10, 21, 22, 23). Höher liegende stärkere Quellen liegen in tiefeingerissenen Erosionsfurchen, die um so tiefer und länger sind, je höher die Quelle über dem örtlichen Erosionsniveau liegt (Quelle Nr. 6, 27, 29).

²² Neben der geologischen Spezialkarte 1:75.000 von AMPFERER standen eine geologische Detailkarte 1:5000 von HÄUSLER, Bohrprofile und ein geologisches Gutachten von CLAR zur Verfügung. Spezielle Fragen wurden durch Aufnahmen von MAURIN bearbeitet.

Übersichtsskizze zum Sporentriffversuch

im Raume der Voralpe

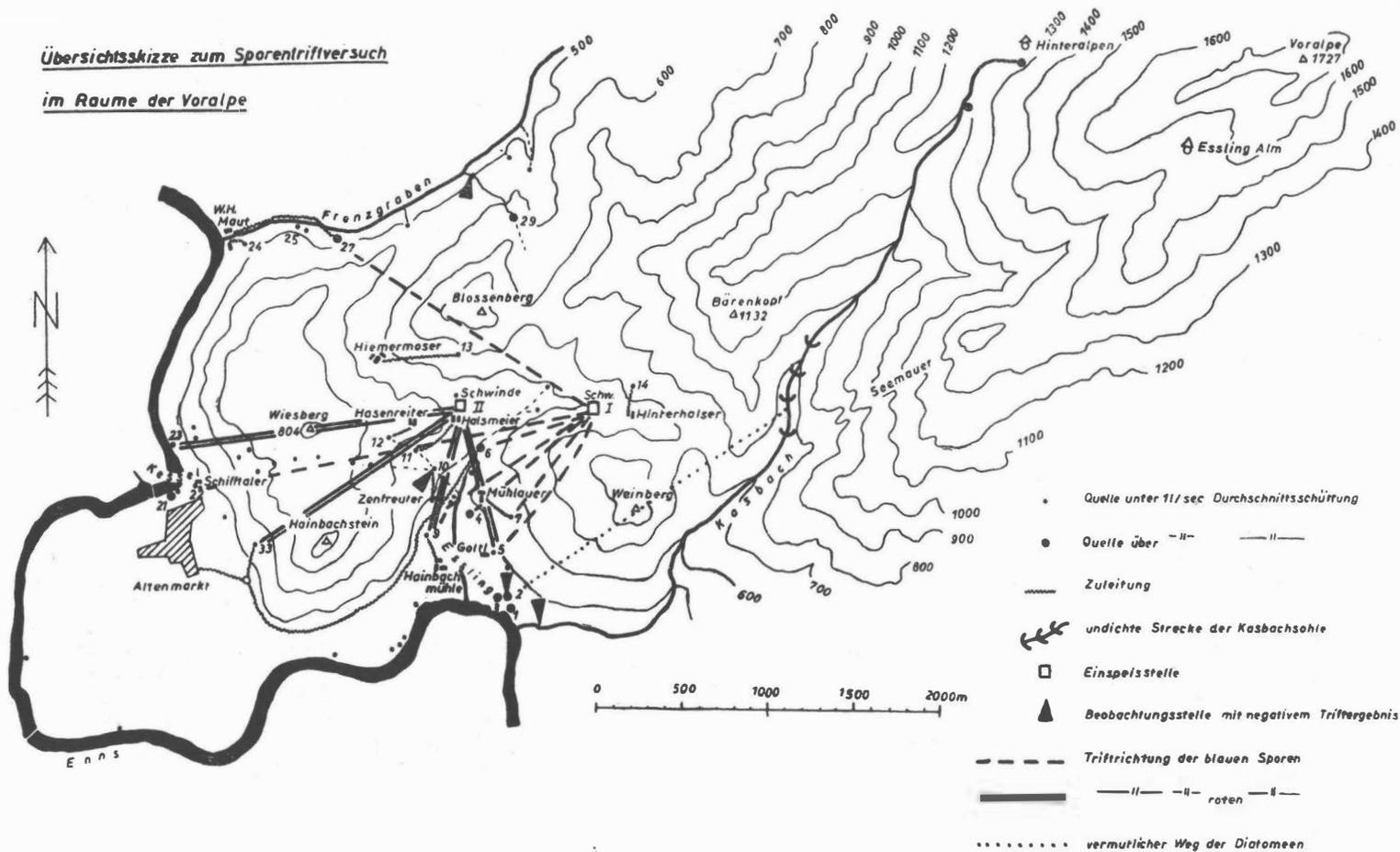


Abb. 5. Sporentriffversuche im Raume der Voralpe.

Eine Ausnahmestellung nehmen die Quellen um Hinteralpen und der Oberlauf des Kasbaches ein, sie treten an in die Kalke eingeschalteten Neokomergeln aus.

Im Zuge des Sporentriftversuches wurden zwei geeignete Karstschächte mit Triftkörpern beschickt. Schwinde I liegt in der Talung, die zwischen dem Weinberg und dem Bärenkopf zum Gehöft Hinterhalser hinaufzieht und ist ein Karstschlot, in dem zur Zeit der Schneeschmelze und bei kräftigen Regengüssen größere Mengen Wasser ungehindert versinken. Hier wurden im Oktober 1957 7 kg blaue gefärbte Lycopodiumsporen eingespeist.

Im Bereich des Hauptdolomites fand sich nördlich des Gehöftes Halsmeier eine geeignete Einspeisstelle (Schwinde II). Hier wurden am selben Tag 6 kg rot gefärbtes Lycopodiumpulver eingebracht (Abb. 5).

Im Sektor zwischen Quelle Nr. 5 (Goltl in Eßling) und Quelle Nr. 27 (Frenzgraben) wurden alle Quellen beobachtet, die zur Kontrolle geeignet waren, sämtliche beobachteten Quellen mit Ausnahme von Quelle Nr. 10 führten Sporen. Für letztere Quelle wurde damit die Vermutung bestätigt, daß es sich um eine Folgequelle der Quellen Nr. 11 und 12 handelt, deren Höhenlage und Einzugsbereich von vornherein eine Sporenführung ausschloß. Die Beobachtung der einzelnen Quellen ergab:

Quelle Nr. 7 ist die höchstgelegene beobachtete Quelle (590 m a. H.) mit positivem Beobachtungsergebnis. Sie tritt an der Kalk-Gosau-Grenze aus und ist wahrscheinlich eine Überfallquelle. Da auch die Einspeisstelle für die blau gefärbten Sporen (Schwinde I, 630 m a. H.) im Kalk liegt, kann das Auftreten blauer Sporen nicht überraschen. Rote Sporen konnten nicht nachgewiesen werden, was auch nicht anzunehmen war, da die Quelle orographisch höher liegt als die Einspeisstelle der roten Sporen (Schwinde II, 575 m a. H.).

Das bei Quelle Nr. 4 abfließende Wasser stammt zum Teil aus der Quellmulde unterhalb Mühlauer und ist als Folgequelle anzusehen, deren eigentlicher Quellmund nicht beobachtbar ist. Im Vergleich zu Quelle Nr. 7 ist ein vermehrter Durchgang blauer Sporen zu verzeichnen, was auf die größere Wasserführung zurückgeführt werden kann. Zum Sporendurchgang bei Quelle Nr. 6 besteht eine wesentliche zeitliche Differenz.

Für Quelle Nr. 6 stimmen die Tatsachen der kürzesten Entfernung zwischen Quelle und Einspeisstelle der blauen Sporen (rd. 800 m) und der großen Schüttungsmenge mit den Ergebnissen des Sporentriftversuches — kürzeste Durchlaufzeit (ca. 16 Stunden) und größte Sporenmenge — sehr gut überein. Wir befinden uns an der Austrittsstelle eines größeren Schlauches aus dem Kalk. Es traten nur blaue Sporen auf. Da sich die Einspeisstelle der blauen Sporen im Bereich der obertriadisch-jurassischen Kalkzüge befindet und Quelle Nr. 6 gerade an deren obertägigen Grenze im Graben zwischen Hainbachstein und Weinberg austritt, ist klar ersichtlich, daß die Quelle ihr Wasser aus den erwähnten Kalkzügen bezieht.

Quelle Nr. 5 liegt eindeutig in der Kreide, sie bezieht aber, wie die Menge und das frühzeitige Auftreten der blauen Sporen beweisen, das Hauptkontingent ihrer Schüttung aus dem Kalkbereich. Erklärt kann dies dadurch werden, daß gerade oberhalb des Gehöftes Goltl die Kreide-Kalk-Grenze sehr weit gegen den Fuß des Weinberges herunterzieht. (Folgequelle?). Das Auftreten der roten Sporen kann folgendermaßen erklärt werden: Während die blauen Sporen aus den Kalken im Liegenden der Kreide kommen, werden die roten Sporen entlang

der stark gestörten Zone des Grabens zwischen dem Hainbachstein und dem Weinberg der Quelle zugeführt. Das verhältnismäßig späte Auftreten der roten Sporen und ihre geringe Anzahl zeigen, daß der mengenmäßige Wasseranteil aus diesem Einzugsbereich gering ist.

Auch bei Quelle Nr. 9 wurden rote und blaue Sporen gemeinsam nachgewiesen. Die Quelle liegt an der durch Haselgebirge und Werfener Schiefer markierten, tektonisch stark durchbewegten Basis der Hainbachsteinscholle.

Quelle Nr. 33 tritt im unteren Teil des Westhanges des Hainbachsteins aus. Das Auftreten roter Sporen an dieser Stelle zeigt, daß das, die Basis der Hainbachsteinscholle bildende Haselgebirge und die Werfener Schiefer nur lückenhaft ausgebildet sind, und so einen Übertritt des Karstwassers aus der tektonischen Liegendfolge in die Hangendscholle des Hainbachsteins gestatten.

Ebenfalls nur rote Sporen traten in der Spaltquelle direkt am Ennsufer unterhalb des Kessels auf (Quelle Nr. 23). Die Austrittsstelle dieser Quelle liegt bereits eindeutig außerhalb der tektonischen Scholle des Hainbachsteins im Dolomit des Weinberges. Die im Kessel unmittelbar beim Hause Schifftaler oberhalb der Enns austretende Quelle Nr. 22 führte hingegen nur blaue Sporen. Sie liegt unmittelbar unterhalb der erwähnten Überschiebungsbahn.

Gleichfalls nur blaue Sporen führte die starke Quelle Nr. 27. Sie tritt 700 m bachaufwärts am linken Ufer des Frenzgrabens, ca. 20 m über der Talsohle, stark schüttend (Überlauf über 1 l/sec) aus dem Dolomit des Wiesberges aus.

Keine Sporen führte eine weiter den Frenzgraben aufwärts am Hang des Blossenberges austretende Quelle (Quelle Nr. 29).

Für die Quellen Nr. 1 und 2 überraschte es, daß der Sporenriftversuch ein negatives Ergebnis zeigte. Andererseits wurde gerade durch die mikroskopische Untersuchung der Wasserproben ersichtlich, daß das Plankton dieser Quellgruppe sich von allen anderen untersuchten Quellen wesentlich unterscheidet. Nur hier konnten Diatomeen — und zwar in großen Mengen — beobachtet werden. Ein ganz gleiches Bild zeigten die Proben aus dem ebenfalls während des Versuches unter Kontrolle stehenden Kasbach (Diatomeen aber keine Lycopodiumsporen). Diese Gruppe von charakteristischen Karstquellen mit mächtiger, aber stark wechselnder Schüttung bezieht ihr Wasser aus der muldenförmig eingefalteten Schichtfolge von Kalken und Mergelzügen, die sich vom Weinberg in nordöstlicher Richtung gegen die Voralpe erstrecken. Im Bereich der Quellen erreicht dieser Faltenzug seine orographisch tiefste Stelle und wird hier nur mehr von einem Mantel von Gosau überdeckt, durch den die Karstwässer einen Weg nach außen gefunden haben.

Der von Hinteralpen (ca. 1500 m a. H.) der Enns zustrebende Kasbach fließt eine lange Strecke in einem steil eingeschnittenen Graben innerhalb dieser nordöstlich streichenden Kalk-Mergelzüge. Unter diesen Verhältnissen läßt sich das Vorkommen der Diatomeen in der genannten Quellgruppe zwanglos als aus dem Gerinne des Kasbaches herrührend erklären. Bei einer Begehung des Grabens wurde bereits vor dem Versuch festgestellt, daß der Bach streckenweise Wasser in den Kalkuntergrund abgibt. Auf Grund der Beobachtungsergebnisse kann zusammengefaßt werden:

Die geringe Höhendifferenz zwischen den Einspeisstellen und den höchstgelegenen Quellaustritten mit Sporenführung zeigt, daß der obere Saum des fließenden Karstwassers verhältnismäßig hoch liegt. So traten die blauen Sporen

bereits 40 Höhenmeter unterhalb des oberen Randes des Einspeisschachtes, und zwar bei Quelle Nr. 7 wieder zutage. Die Höhendifferenz zwischen Schwinde II und Quelle Nr. 33 beträgt ebenfalls nur 55 m.

Diese Tatsache kann im Bereich des Kalkes (Schwinde I — Quelle Nr. 7) darauf zurückgeführt werden, daß die Verkleidung der unteren Hangteile des Weinberges durch die Ablagerungen der Gosau einen Rückstau verursacht.

Besonders lehrreich und klar aber sind die Verhältnisse im Dolomitzbereich: Die Höhendifferenz zwischen der Einspeisstelle und der obersten beobachteten Quelle (Schwinde II — Quelle Nr. 33) ist gering, die tiefliegenden Quellen in der Ennstalfurche sind sämtlich Folgequellen höher gelegener Quellaustritte und Aufschlüsse trafen einen gegen das Berginnere weitgehend dichten Gesteinskörper. Man erkennt, daß die Zone des fließenden Karstwassers von den Rändern und dem am Fuß des Gebirgskörpers austretenden Quellen her sehr rasch gegen das Berginnere ansteigt.

Die Durchgangszeiten der Triftkörper entsprechen im allgemeinen den Entfernungen, sie werden aber auch durch die Wasserführung der Quellen beeinflusst.

Die Darstellung des Sporendurchganges (Abb. 5) zeigt, daß die allgemeine Abflußrichtung in der Zone des fließenden Karstwassers nach Westen bzw. Südwesten gerichtet ist. Die tektonisch selbständige Stellung des Hainbachtsteins wirkte sich dahingehend aus, daß einzelne Quellen nur rote Sporen führten, was damit erklärt werden kann, daß das an der Aufschiebungsfläche lückenhaft erhaltene Haselgebirge nur einzelnen Wasserwegen einen Übertritt vom Dolomit der Basis in den Dolomit der Hangendscholle gestattet. Die Verteilung der roten und blauen Sporen folgt daher trotz der komplizierten geologischen Verhältnisse, im wesentlichen nur der Lage der Einspeisstellen entsprechend, einem äußeren und einem inneren Sektor der unterirdischen Wasserbewegung. Die durch klare geologische Unterlagen begründeten und eingehend geschilderten geologischen und hydrologischen Verhältnisse bestätigen, daß auch in diesem Untersuchungsgebiet die Gesetzmäßigkeit eines zusammenhängenden Karstwasserkörpers besteht. Die Besonderheiten einzelner Quellstränge sind an spezielle geologische Bedingungen geknüpft und stellen kein Kriterium gegen einen zusammenhängenden Karstwasserkörper dar.

Zusammenfassung

Die Frage des Zusammenhanges von Erosionsniveaus mit der Entwicklung eines Karstwassersystems ist ein zentrales Problem der Karsthydrologie.

Die geschilderte Anlage der höchsten Quellaustritte und ihrer Folgequellen an den Abhängen der Karststöcke, der hochliegende obere Saum fließender Karstwässer und der mehr oder minder dichte Kern in jungen gehobenen Karstgebirgen weisen darauf hin, daß die Entwicklung der unterirdischen Karstentwässerung von den Rändern des Massivs und von oben her erfolgt. Das Sickerwasser dringt dabei in bereits vorhandene Spalten und Klüfte ein und erweitert sie. Wesentlich ist, daß die Klüftigkeit des Gesteins „von der Oberfläche nach dem Berginnern zu hinsichtlich Anzahl und Weite der Spalten“ abnimmt [STINI 1951, p. 230]. Die Anzahl und Ausdehnung der „Urhohlräume“ LEHMANN's [1932] ist daher „zumindest stark einzuschränken“ [STINI a. a. O.] und im selben Ausmaß ihr Einfluß auf die Entwicklung der Karsthydrographie. Andererseits soll ihr Vorhandensein nicht gänzlich gelegnet werden, und wo

sie in Verbindung mit dem zirkulierenden Karstwasser stehen, können sie für die Weiterentwicklung der Karsthydrographie örtlich von Bedeutung werden.

Der tiefste Austrittspunkt, dem die Reihe der Folgequellen zustreben kann, ist der örtliche Talboden. Den vorhandenen Klüften entsprechend, werden die einzelnen Quellstränge dieses, je nach dem Längsprofil des Tales örtlich verschieden hoch liegenden Erosionsniveaus, verschieden rasch erreichen, was uns durch die verschieden hohe Lage von Spaltenquellen in jungen Erosionsfurchen trefflich illustriert wird. WICHE [Mitt. Geogr. Ges. Wien 1950, p. 258] hat diese

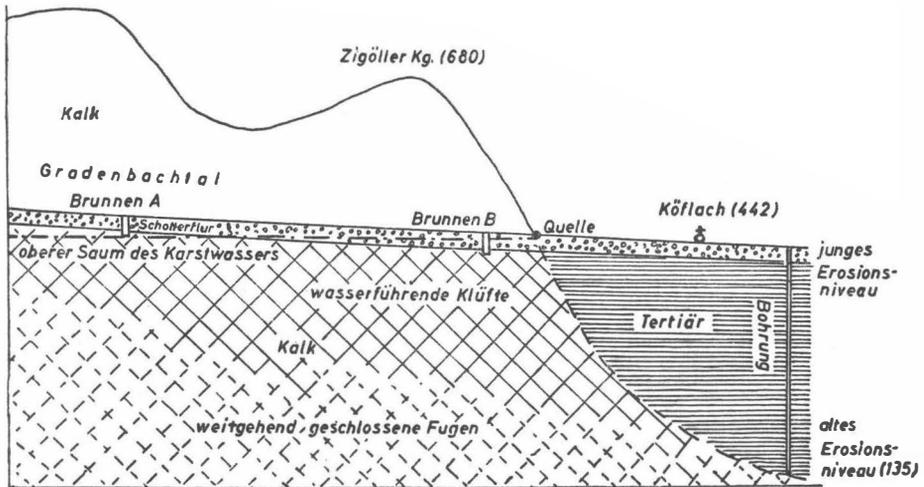


Abb. 6. Stark überhöhtes Profil des unteren Gradenbachtals bei Köflach. Gezeichnet unter Benützung eines Profils von MAURIN (1957).

Funktion der „untersten Grenze“ anerkannt und selbst die Ausnahmestellung der Seen vorweggenommen, der ich den grob durchlässigen Grundwasserführer mit starker Grundwasserbewegung im Lockergestein beifügen möchte.

Diesem untersten Austrittsniveau kommt tatsächlich die Bedeutung einer Grenze zu, die durch die Austrittsstelle keines „Gefäßes“ unterschritten werden kann, gleichgültig welchen Volumens dieses Gefäß ist. Es kann kein Zweifel bestehen, daß bei einer langen Wirkung dieses Niveaus sich die Entwicklung des Karstsystems auf dieses einspielt²³. Das einmal erreichte Niveau wird allerdings keiner starren Linie, sondern — wie die meisten geographischen Grenzen — einem Saum entsprechen.

Verschiedene Stellungnahmen gegen einen Zusammenhang von Karstwasserkörper und Erosionsniveau haben sich auf Quellaustritte unter dem Meeresspiegel [KATZER 1909, LEHMANN 1932] bzw. unter dem Seespiegel berufen. Dazu ist zu sagen, daß die NO-Küste der Adria in junger Zeit eine beträchtliche Absenkung erfuhr. Im nordalpinen Bereich wurde gern mit dem Beispiel von Quellen im Hallstätter See argumentiert [LEHMANN 1932, TRIMMEL 1955]. Dabei wurde nicht beachtet, daß der Boden des Sees, ebenso wie die heute durch Moränen oder Flußschotter überlagerten Talböden, einmal das Erosionsniveau

²³ Vgl. PIPER a. a. O. p. 80: „As circulation is controlled by points of discharge into the surface streams, the equilibrium profile of solution channeling is generally adjusted to the local equilibrium profile of erosion ...“

war. Wir müssen daher in den ostalpinen Karstbereichen — und auf sie beschränken sich die Untersuchungsergebnisse — versuchen, zwischen freiliegenden, ober oder am Erosionsniveau ausmündenden, und verhüllten Partien des Karstwasserkörpers zu unterscheiden. Diese Unterscheidung ist wesentlich, wobei jedoch möglich ist, daß ein Gebirgskörper beide Phänomene birgt, da die wirksamen örtlichen Erosionsbasen, jetzt wie ehemals, keineswegs eine gleiche absolute Höhenlage einnehmen müssen (vgl. Dachsteinstock im SO bzw. N). Überall, wo jüngere Sedimente dem verkarsteten Gebirgskörper anlagern, ist damit zu rechnen, daß ein Karstwassersystem verdeckt wird. Das wird besonders dort sein, wo ein Karstgebirge ein jung aufgefülltes Becken begrenzt, wie im beschriebenen Beispiel von Köflach, wo u. a. auch folgende Beobachtung gemacht wurde (Abb. 6) :

Der durch die junge Talfüllung in den Kalk abgeteufte Schachtbrunnen A schneidet eine wasserführende Kluft. Dasselbst in die Kluft eingeführte *Lycopodium*sporen konnten sowohl im Brunnen B, wie auch in den benachbarten Quellen nachgewiesen werden. Das bestehende Karstwassersystem hat sich unter Ausrichtung auf die alte Erosionsbasis entwickelt und wurde durch die jungtertiäre Auffüllung des Beckens verhüllt, so daß das junge Erosionsniveau den heutigen Überfall bedingt. Es wäre unwirksam, wenn es einen Seespiegel darstellen würde.

Die unzutreffende Beurteilung der Seequellen wie auch die Ergebnisse des Triftversuches bei Altenmarkt mögen davor warnen, Einzelbeispiele ohne Zusammenhang mit der Gesamtlage und ohne genaue Untersuchung heranzuziehen. Die Zahl der auf den ersten Blick irreführenden Einzelheiten ließe sich beliebig vermehren. Wenn z. B. der Eingang zur neu aufgeschlossenen Hierlatzhöhle im Dachsteingebiet nach SCHAUBERGER [1957] in 866 m a. H. trocken lag, während dem Waldbachursprung in 948 m a. H. Wasser entströmte, so scheint das auf den ersten Blick ein schlagender Beweis gegen einen zusammenhängenden Karstwasserkörper zu sein. Erst wenn man berücksichtigt, daß der Karstwasserstrom aus dem Massiv von Südwesten gegen Nordosten in den Hallstätter See fließt, wo schließlich die unterseischen Quellen austreten, so finden wir den scheinbaren Widerspruch mit der Annahme eines Karstwasserkörpers durch dessen Absinken nach Nordosten geklärt.

Streicht die einen verkarstenden Gebirgskörper unterlagernde undurchlässige Schicht ober Tag aus, so übernimmt sie für das Karstwassersystem die Funktion des Erosionsniveaus. Die Trennung der Begriffe des „seichten“ und „tiefen“ Karstes ist daher beizubehalten, wie dies auch weitgehend geschehen ist [SAWICKI 1909, WAAGEN 1910, GRUND 1912, KEILHACK 1912, BOCK 1913, CVIJIĆ 1918, PENCK 1924, WEIDENBACH 1954].

Mit der Anerkennung der Wirkung des Erosionsniveaus ist die Entstehung eines zusammenhängenden Karstwasserkörpers erklärlich. Das hat KATZER erkannt, indem er für den seichten Karst die Möglichkeit eines solchen zugab. Die von den Rändern ausgehende und durch das Talniveau gelenkte Entwicklung führt zu einem zusammenhängenden Netz wasserführender Klüfte, das wir als Karstwasserkörper ansprechen können. Wie durch die geschilderten Triftversuche mehrfach und eindeutig bewiesen werden konnte, besteht im großen gesehen (!) in diesem Karstwasserkörper ein radiales Gefälle, wobei diese gesetzmäßige Wasserbewegung vom Zentrum zu den Rändern unabhängig von den orographischen Einzelheiten eines Karstmassivs erfolgt. Der Vielheit der Verzweigungen eines Karstwasserkörpers entsprechend, wird man aber eher

von einem „oberen Saum“ oder einer oberen Zone des Karstwassers als von einem „Karstwasserspiegel“ sprechen. Daß in diesem Karstwasserkörper ein Gerinne die Funktion eines Flusses übernehmen kann, wie auch durch Färbungen bewiesen wurde, wurde mehrfach erklärt (PENCK 1904, GRUND 1912, PIPER 1932, ZÖTL 1957 u. a.)

Dem von LEHMANN gedachten baumförmigen „Gefäß“ beliebiger Verzweigung wäre so das Bild eines Ringes von Sträuchern entgegenzustellen, deren Astwerk völlig ineinander geht. Es ist bezeichnend, daß LEHMANN die Anzahl der Quellaustritte am Rande eines Karstmassivs als zu gering ansieht und daher auch den „karsthydrographischen Gegensatz“ überschätzt; wenn er schreibt: „Ihnen (den Schlucklöchern) stehen gegenüber an der Außenseite des Toten Gebirges höchstens 12 starke Quellen, einschließlich bedeutender Mengen kalten Auftriebswassers in drei Seen, und die Zahl der unbedeutenden Quellen, die es noch gibt, ist kaum viel größer“ [1932, p. 8], so stimmen diese Zahlen mit den tatsächlichen Verhältnissen nicht überein. GÖTZINGER [1949] berichtet über 99 aufgenommene Quellen in einem Teil des Toten Gebirges, und durch eigene Aufnahmen wurden nur am Südrand des östlichen Teiles, im Raume zwischen dem Ödern- und dem Grimmingtal, mehr als 180 Quellen erfaßt. Durch die Quellenaufnahme im östlichen Dachsteingebiet aber wurden 721 Quellen katastermäßig festgelegt [ZÖTL, Mitt. Natw. Ver. 1957].

Die Bildung von Stockwerken im Karstwassersystem kann analog dem Auftreten von Höhlenstockwerken petrographischen und tektonischen Ursachen zugeschrieben werden [GARDNER 1935, TRIMMEL 1955 u. a.], was sicherlich in Einzelfällen zutrifft. Fehlen diese Bedingungen jedoch, so ist die Stockwerkbildung nur durch die Einwirkung von Erosionsniveaus auf die Entwicklung der Karsthydrographie zu erklären, wie u. a. in den vorliegenden Untersuchungsberichten versucht wurde. Das kann so weit gehen, daß durch junge Abdichtungen in Senken bereits völlig verkarsteter Plateauflächen posthum sekundäre Niveaus entstehen, um die sich junge Karstwassersysteme bilden können. Diese werden aber zu keinem einheitlichen Karstwasserkörper zusammenwachsen können, sondern relativ bald wieder der „sekundären“ Verkarstung, d. h. dem Anschluß an das tiefliegende allgemeine Karstwassersystem erliegen.

Der Versuch einer Herausschälung eines Zyklus im Karst mag vorläufig hypothetisch bleiben, ohne Zweifel aber steht fest, daß auch ein solcher Entwicklungsablauf in den meisten Fällen nicht ohne Einwirkung des Erosionsniveaus erklärt werden kann.

Literatur

- ABEL, G.: Der alpine Karst als Wasserspeicher. — Gas, Wasser, Wärme, 4 (11), 1950.
 — Die Wasserversorgung der Stadt Salzburg und das neue Seilbahnprojekt auf den Untersberg. Mitt. Höhlenkomm. 1955 (1), Wien 1956.
 ARNBERGER, E.: Höhlen und Niveaus. Die Höhle, 6 (1), 1955.
 BERZ, K. C.: Die Grundwasserverhältnisse im Versickerungsgebiete der oberen Donau, ein Beitrag zum Problem der Karsthydrographie. Mitt. Geol. Abt. Württ. Statist. Landesamt., 11, 1928.
 BIESE, W.: Vorläufiger Bericht über Untersuchungen in den Dachsteinhöhlen. Mitt. Höhlen- u. Karstforschung, 1926.
 BOCK, H.: Wasserverhältnisse in verkarsteten Gebieten. Höhlen im Dachstein, Graz 1913.
 — Der Karst und seine Gewässer. Mitt. f. Höhlenkunde, 6 (3), 1913.
 — Charakter des mittelsteirischen Karstes. Mitt. f. Höhlenkunde, 6 (4), 1913.
 — Zur Altersfrage der Dachsteinhöhlen. Mitt. Höhlen- u. Karstforschung, 1926.
 BOURGIN, A.: Hydrographie karstique. La question du niveau de base. Rev. Géogr. Alp., 33, Grenoble 1945.
 CARLE, W.: Ein aufschlußreicher Färberversuch im Karstgebiet. Natw. Monatschrift „Aus der Heimat“, 64 (7/8), 1956.
 CRAMER, H.: Zur Morphologie der fränkischen Höhlen. Mitt. Höhlen- u. Karstforschung, 1926.
 — Höhlenbildung im Karste. PM, 79, 1935.
 — Höhlenbildung und Karsthydrographie. Zeitschr. f. Geomorph., 8 (6), 1935.

- CVIJIĆ, J.: Das Karstphänomen. Geogr. Abh. hsg. A. Penck, 5 (3), 1893.
- Bildung und Dislozierung der Dinarischen Rumpffläche. PM, 55, 1909.
- Hydrographie souterraine et évolution morphologique du Karst. Rec. d. Trav. de l'Inst. de Géogr. Alp., Grenoble 1918.
- DAVIS, W. M.: Origin of limestone caverns. Bull. Geol. Soc. America, 41, 1930.
- DOSCH, F.: Färbeversuch Hochschneeberg 1955. Gas, Wasser, Wärme, 10 (1, 2), 1956.
- EISSELE, K.: Über einige Färbeversuche mit Uranin bei Karstquellen der Schwäbischen Alb. Wasser — Abwasser, 98 (4), 1957.
- FLALA, F.: Několik poznámek k morfologii Jihoslovenského Krasu. Věstník, 6, 1930.
- GARDNER, J. H.: Origin and development of limestone caverns. Bull. Geol. Soc. America, 46, 1935.
- GÖTZINGER, G.: Hydrogeologische Beobachtungen im Weizer Karst. Wasserversorgung des Marktes Weiz. Jahrb. Geol. BA., 75, 1925.
- GRUND, A.: Die Karsthydrographie. Studien aus Westbosnien. Geogr. Abh. hsg. A. Penck, 7 (3), 1903.
- Beiträge zur Morphologie des Dinarischen Gebirges. Geogr. Abh. hsg. A. Penck, 9 (3), 1910.
- Zur Frage des Grundwassers im Karst. Mitt. Geogr. Ges. Wien, 53, 1910.
- Nochmals zur Morphologie und Hydrologie des Karstes. PM, 58/2, 1912.
- Der geographische Zyklus im Karst. Zeitschr. Ges. Erdkde. Berlin, 1914.
- HAASE, H.: Hydrologische Verhältnisse im Versickerungs-Gebiet des Südharz-Vorlandes. Diss., Göttingen 1936.
- HOFFER, M.: Unterirdisch entwässerte Gebiete in den nördlichen Kalkalpen. 1. Teil: Mitt. Geogr. Ges. Wien, 49, 1906, 2. Teil: Mitt. w. o. 52, 1909.
- Unterirdisch entwässerte Gebiete in Innerbosnien. Mitt. Geogr. Ges. Wien, 54, 1911.
- KATZER, Fr.: Zur Karsthydrographie. PM, 54, 1908.
- Karst und Karsthydrographie. Zur Kunde der Balkanhalbinsel, 8, Sarajevo 1909.
- Zur Morphologie des Dinarischen Gebirges. PM, 58, 1912.
- KEILHACK, K.: Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde. Berlin 1912.
- KELLER, M.: Auf unterirdischen Pfaden. Kosmos-Bändchen, Stuttgart 1957.
- KNEBEL, W. v.: Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene. Die Wissenschaft, 15, 1906.
- KREBS, N.: Die Halbinsel Istrien. Geogr. Abh. hsg. A. Penck, 9 (2), 1907.
- Neue Forschungen zur Karsthydrographie. PM, 54, 1908.
- Zur Frage des Karstzyklus. Mitt. Geogr. Ges. Wien, 52, 1909.
- Offene Fragen der Karstkunde. GZ, 16, 1910.
- Die Dachsteingruppe. Ztschr. D.Ö.A.V., 46, 1915.
- Fragmente einer Landeskunde des Innerkärntner Karstes. Rec. Trav. (Festschrift f. M. J. Cvijić) Belgrad 1924.
- KRIEG, W.: Höhlen und Niveaus. Die Höhle, 5 (1), 1954.
- Zu „Höhlen und Niveaus“. Die Höhle, 6 (4), 1955.
- KYRLE, G.: Grundriß der theoretischen Speläologie. Speläolog. Monogr., 1, Wien 1923.
- Kombinierte Chlorierung von Höhlengewässern. Speläol. Monogr., 12, Wien 1928.
- LAVAUR, G. de: Hydrologie souterraine du Causse de Gramat (Lot). Premier Congr. Int. Spel., 2, Paris 1953.
- LECHNER, J.: Neue karst- und quellengeologische Forschungen im Toten Gebirge. Prot. 3. Vollvers. Bundeshöhlenkomm. Wien 1949.
- LEHMANN, O.: Über Grundwasser und Quellen. Geogr. Jber. aus Österr., 13, 1925.
- Das Tote Gebirge als Hochkarst. Mitt. Geogr. Ges. Wien, 70, 1927.
- Cvijić, Hydrographie souterraine... Besprechung in Ztschr. Geomorph. 3, 1928.
- Die Hydrographie des Karstes. Enz. Erdkde. 6 b, 1932.
- LINDNER, H.: Die Wasserführung des Karstes. Mitt. u. Jahrb. Geogr. Ges. Nürnberg, 2, 1921/22.
- LIVINGSTONE, P., SAYRE, A. N. und WHITE, W. N.: Water resources of the Edwards limestone in the San Antonio Area, Texas. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 773-B, 1936.
- LOZINSKI, W. v.: Die Karsterscheinungen in galizisch Podolien. Jahrb. k. k. geol. R.A., 57, 1907.
- MARTEL, E. A.: La théorie de la „Grundwasser“ et les eaux souterraines du Karst. La Géographie, 21, 1910.
- MAURIN, V.: Ein Beitrag zur Hydrogeologie des Lurzhöhlyensystems. Mitt. Natw. Ver. Steiermark, 81/82, 1952.
- Über jüngste Bewegungen im Grazer Paläozoikum. Verh. Geol. B.A., 1953 (4).
- Das Paläozoikum im Raum zwischen Deutschfeistritz und Semriach. Mitt. Natw. Ver. f. Steiermark, 84, 1954.
- Tertiäre, pleistozäne und rezente Verkarstung im Köffler Becken (Steiermark). Mitt. Höhlenkomm. 1955 (2), Wien 1957.
- u. ZÖTL, J.: Bericht über hydrogeologische Untersuchungen im Einzugsgebiet des Wasserwerkes Köfflach. Unveröff. Gutachten, Graz 1957.
- u. ZÖTL, J.: Bericht über hydrogeologische Untersuchungen im Raume der Tauplitz. Unveröff. Gutachten, Graz 1957.
- u. ZÖTL, J.: Bericht über den Sporentriftversuch im Raume Altenmarkt und Deutung der Versuchsergebnisse. Unveröff. Gutachten, Graz 1957.
- MAYER, A.: Neue Wege zur Erforschung von Quellen und Karstwässern. Mitt. Höhlenkomm. 1953 (1), 1954.
- Hydrogeologische Studien im Dachsteingebiet. Unveröff. Diss. Innsbruck 1954.
- MEINZER, O. E.: The occurrence of ground water in the United States. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper, 489, 1923.
- MISTARDIS, G. G.: Sur le drainage karstique dans les régions calcaires côtières de la Grèce méridionale. Premier Congr. Int. Spel. Paris 1953, 2.
- Recherches sur l'hydrologie des massifs calcaires à plusieurs niveaux de base locaux de la Grèce méridionale. Premier Congr. Int. Spel. Paris 1953, 2.
- PENCK, A.: Über das Karstphänomen. Schriften d. Ver. z. Verbreitung natw. Kenntnisse in Wien, 44, 1904.
- Das unterirdische Karstphänomen. Rec. Trav. (Festschrift f. M. J. Cvijić), Belgrad 1924.
- PERKO, G. A.: Die Tropfstein- und Wasserhöhle „Dimnice“ (Rauchgrotte) bei Markovsina in Istrien. Mitt. Geogr. Ges. Wien, 52, 1909.
- PIPER, A. M.: Ground water in North-Central Tennessee. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper, 640, 1932.
- RICHTER, E.: Beiträge zur Landeskunde Bosniens und der Herzegowina. Wiss. Mitt. aus Bosnien und der Herzegowina, 10, 1907.
- SAAR, R. v.: Zur Frage des Einflusses der Großwetterlage auf die Dynamik der Wasserhöhlen. Die Höhle, 8 (2), 1957.
- SAWICKI, L. R. v.: Ein Beitrag zum geographischen Zyklus im Karst. GZ, 15, 1909.

- SCHAUBERGER, O.: Über die vertikale Verteilung der nordalpinen Karsthöhlen. Mitt. Höhlenkomm. 1955 (1), Wien 1956.
- Die Hierlatzhöhle bei Hallstatt (Oberösterreich). Die Höhle, 8 (3), 1957.
- SCHENKEL, Th.: Karstgebiete und ihre Wasserkräfte. Wien-Leipzig 1912.
- SCHWABE, E.: Morphologie der Freiberge. Mitt. Geogr.-Ethn. Ges. Basel, 5, 1935—38, Basel 1939.
- STINI, J.: Die Quellen. Springer, Wien 1933.
- Talsperrenbauten und Speicherbecken im Karstgebirge. Prot. 3. Vollvers. Bundeshöhlenkomm., Wien 1949.
- Tunnelbaugologie. Springer, Wien 1950.
- Randbemerkungen zur Frage der Entstehung der Höhlen. Geologie und Bauwesen, 18 (4), 1951.
- Wasserspeicherung in Karsthohlformen. Geologie und Bauwesen, 19 (4), 1952.
- Zur Frage des Berggrundwassers und des Karstwassers. Österr. Wasserwirtschaft, 9 (11), 1957.
- SWINNERTON, A. C.: Origin of limestone caverns. Bull. Geol. Soc. America, 43, 1932.
- TEPPNER, W.: Die Karstwasserfrage. Geol. Rundsch., 4, 1913.
- TERZAGHI, K. v.: Beitrag zur Hydrographie und Morphologie des Kroatischen Karstes. Mitt. aus dem Jahrb. kg. ung. Geol. Reichsanst., 20, 1912/13.
- TRIMMEL, H.: Höhlen und Niveaus. Die Höhle, 6 (1), 1956.
- Die Probleme der alpinen Karst- und Höhlenforschung. Festschr. Hundertjahrfeier Geogr. Ges. Wien, Wien 1957.
- WAAGEN, L.: Karsthydrographie und Wasserversorgung in Istrien. Zeitschr. f. prakt. Geologie, 18, 1910.
- WAAGEN, L.: Die unterirdische Entwässerung im Karst. GZ, 16, 1910.
- Grundwasser im Karst. Mitt. Geogr. Ges. Wien, 54, 1911.
- WEIDENBACH, F.: Über einige Wasserbohrungen im Jura. Ein Beitrag zum Karstwasserproblem der Schwäbischen Alb. Jahrb. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., NF. 36, 1954.
- WICHE, K.: Neue Ergebnisse über die Formung kalkalpiner Höhlen und über die Beziehungen zwischen Höhlenkunde und Hochgebirgsmorphologie. Prot. 5. Vollvers. Höhlenkomm., Peggau 1950.
- Höhlenkunde und Hochgebirgsmorphologie. Mitt. Geogr. Ges. Wien, 92, 1950.
- WILTHUM, E.: Die Stellung der Dachsteinhöhlen in der Morphotektonik ihrer Umgebung. Mitt. Höhlenkomm. 1953 (1), Wien 1954.
- WINKLER-HERMADEN, A.: Tertiäre Ablagerungen und junge Landformung im Bereiche des Längstales der Enns. Sitzber. Ak. Wiss., math.-natw. Kl., Abt. I., 169, 1950.
- Geologisches Kräftespiel und Landformung. Springer, Wien 1957.
- ZÖTL, J.: Der Einzugsbereich von Quellen im Karstgebirge. Österr. Wasserwirtschaft, 9 (4), 1957.
- Neue Ergebnisse der Karsthydrologie. Erdkde., 9 (2), 1957.
- Hydrologische Untersuchungen im östlichen Dachsteingebiet. Mitt. Natw. Ver. Steiermark, 87, 1957.
- Bericht über hydrologische Untersuchungen im Raume Formarinsee. Unveröff. Gutachten, Graz 1957.