

# ENZYKLOPÄDIE DER ERDKUNDE

Unter Mitarbeit von

Prof. Dr. Gustav BRAUN-Greifswald, Prof. Dr. Edgar DACQUÉ-München, Prof. Dr. Friedrich DAHL†, Prof. Dr. Albert DEFANT-Berlin, Dr. Paul FICKELER-München, Prof. Dr. Walter GEISLER-Breslau, Doz. Dr. August GINZBERGER-Wien, Prof. Dr. M. HALTENBERGER-Budapest, Prof. Dr. Hugo HASSINGER-Wien, Prof. Dr. Viktor KRAFT-Wien, Prof. Dr. Felix LAMPE-Berlin, Prof. Dr. Otto LEHMANN-Zürich, Doz. Dr. Norbert LICHTENECKER-Wien, Prof. Dr. Fritz MACHATSCHKEK-Wien, Prof. Dr. Otto MAULL-Graz, Prof. Dr. Robert MAYER-Graz, Assistent Dr. J. MOSCHELES-Prag, Prof. Dr. Otto NORDENSKJÖLD†, Prof. Dr. Erich OBST-Hannover, Prof. Dr. Hans RECK-Berlin, Prof. Oscar SCHMIEDER-Kiel, Dr. A. SCHUMACHER-Hamburg, Doz. Dr. SPREITZER-Hannover, Prof. Dr. Walther TUCKERMANN-Mannheim, Prof. Dr. Willi ULE-Rostock, Prof. Dr. Carl UHLIG-Tübingen, Prof. Dr. Alfred WEGENER†

herausgegeben von

Prof. Dr. Oskar KENDE in Wien

---

Teil:

## DIE HYDROGRAPHIE DES KARSTES

bearbeitet von

Professor Dr. Otto Lehmann

Leipzig und Wien  
Franz Deuticke  
1932

# DIE HYDROGRAPHIE DES KARSTES

Auf einfach entwickelter, physikalischer und hydraulischer Grundlage  
bearbeitet von

Prof. Dr. OTTO LEHMANN

Mit 78 Abbildungen im Text, davon 11 Abbildungen  
auf Kunstdruckpapier und 3 Kartenbeilagen

---

Leipzig und Wien  
Franz Deuticke  
1932



Alle Rechte, besonders das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten

---

Copyright 1932 by Franz Deuticke, Leipzig und Wien

---

Verlags-Nr. 3507

---

## Vorwort.

Dieses Buch muß sein Erscheinen und seinen Inhalt in den Augen aller jener selbst rechtfertigen, welche seinen Titel beachten und einigermaßen die bisherigen Arbeiten überblicken, welche das Auftreten und Verhalten des Wassers in den Karstgebieten der Erde zu erklären suchten. Ich wünsche dem Buche aber auch andere Leser und hoffe vor allem, daß der eine oder andere Vertreter der Physik und Hydraulik es vielleicht doch der Mühe wert finde, wenigstens meinen Versuch zu beurteilen, Ergebnisse dieser Wissenschaften einem weiteren Kreise nahezubringen. Physikern und Hydraulikern gegenüber ist es nicht so leicht, dem Buche die Rechtfertigung des einschlägigen Inhaltes zu überlassen. Darum darf hier erwähnt werden, daß auf dem Gebiet der Karstgewässer heute noch einige gelehrte Schriften und Werke einflußreich sind und wegen der oft schwer zu erneuernden Beobachtungen noch länger gelesen werden müssen, die, vor 20 bis 30 Jahren erschienen, Verstöße gegen selbst einfache Lehren der Hydrophysik enthalten. Inzwischen haben Hydrophysik und Hydraulik großartige Fortschritte gemacht, weil die theoretische Forschung und die praktische einander nähergekommen sind, und es bestand die Gefahr, daß eine auf diese Erfolge gestützte Gewässerlehre gar nicht mehr die Brücke zu jenen älteren Werken finde. Dieser Gefahr habe ich entgegen gearbeitet. Jene Verstöße aber, die heute noch nachwirken, erscheinen im milderen Lichte, wenn man bedenkt, wie stiefmütterlich damals die Hydrophysik auf den Universitäten im Rahmen der ganzen Physik behandelt wurde und daß Geographen und Geologen der Universitäten so gut wie nie Gelegenheit hatten, die naturwissenschaftliche Bedeutung, die auch rein hydraulische Vorlesungen haben können, auf technischen Hochschulen zu erfahren. Damit möge die sehr weitgehende Volkstümlichkeit einzelner Paragraphen dieses Buches entschuldigt sein. Es wird übrigens manchen Hydrophysiker wunderlich anmuten, daraus zu erfahren, daß es für die Anwendung seiner Lehren auf eine Naturerscheinung einen wichtigen Unterschied ausmachen kann, ob ein und derselbe physikalische Elementarversuch mit einem Gefäß oder mit einem Schlauch gezeigt wird — aber es ist so. Ferner habe ich mich der äußersten Anschaulichkeit beflissen. Darauf haben m. E. jene naturwissenschaftlich und sportlich interessierten Kreise Anspruch, welche bei oft gefährvollen Höhlenerkundungen und -vermessungen der Berufsgelehrsamkeit unschätzbare Beobachtungsmaterial beigebracht haben und welche als Pioniere und Führer von streng fachlichen Höhlenbefahrungen dem Fortschritt der Erkenntnis auf dem Grunde unmittelbarer Beobachtung nachhaltig geholfen haben. Nun kann man sowohl auf dem Gebiete der volkstümlichen Darstellung wie auch der Anschaulichkeit danebengreifen und gewiß wäre es auch mir lieber, wir besäßen von seiten eines

Meisters der Hydrophysik oder der Hydraulik eine Einführung in ihre Gebiete für Geographen und andere wissenschaftliche Beobachter der freien Natur — ich meine also nicht ein Lehrbuch für künftige Physiker oder Hydrauliker. Hiezu wäre aber Voraussetzung, daß ein solcher Meister die Leserschaft, die in Betracht kommt, kenne. Und wenn mein Buch diese Bekanntschaft vermittelt und die Anregung gibt zu etwas Besserem, das einige Paragraphen in späterer Zukunft überflüssig macht, so haben auch diese Paragraphen einem guten Zwecke gedient. Um übrigens die Gefahr zu bannen, daß sich neuerdings physikalische Schiefheiten und Fehler in Kreisen von Geographen und Geologen einnisten, habe ich auch diese Seite der Darstellung quellenmäßig gehalten, was bisher in der Hydrographie des Karstes nicht üblich war. Es kann also jeder Fachgenosse und -nachbar, der mit dem Gebotenen nicht einverstanden ist, leicht finden, welche der zitierten Stellen aus physikalischen und hydraulischen Werken ich unrichtig aufgefaßt haben müßte, wenn seine abweichende Ansicht die richtige sein sollte. Ich darf darum solche Leser auch bitten, Einwände quellenmäßig zu belegen. Nur für die zum Vergleich herangezogenen Hinweise auf das Verhalten des Grundwassers in Lockermassen habe ich keine Unterlagen genannt, weil ich die entsprechende Problemstellung nicht gefunden habe. Wohl aber habe ich mich dafür nach Möglichkeit an den Aufsätzen von Prof. J. Kozeny in Wien geschult. Vielleicht beschert dieser Hydrauliker und Hydrophysiker einmal der Allgemeinheit eine Grundwasserkunde, welche leicht die Schwierigkeiten hochspezialistischer Studien vermeiden wird. Ich rede hier nicht etwa einem besonders weitgehenden Abbau der streng quantitativen Betrachtung das Wort, wohl aber einer breiteren, vielleicht darf ich sagen behaglicheren Darlegung der mathematischen Grundlagen.

Lange habe ich geschwankt, ob ich den Ähnlichkeitssatz für Strömungen hätte bringen sollen und habe nicht leicht darauf verzichtet. Denn er scheint mir besonders fruchtbar zu sein für die künftige Harmonie zwischen Hydromechanik und Hydraulik. Im Karst habe ich aber selbst entfernte Anwendungen dieses Satzes auf die Probleme seiner oberirdischen und unterirdischen Gewässer nicht gefunden. Und zum Verständnis der allereinfachsten Grundbeziehungen der Wasserdrucke usw. schien er mir nicht unentbehrlich zu sein. Gerne werde ich mich aber von zuständiger Seite eines Besseren belehren lassen.

Die Notwendigkeit der Abfassung einer neuen Hydrographie des Karstes erkannte ich 1921 als dringend. Und zwar geschah dies unter dem Eindruck der Erfahrungen, die ich als Mitglied der Expedition der Akademie der Wissenschaften in Wien in der gewaltigen, stark verstürzten Höhle der Eisriesenwelt (Tennengebirge, Salzburg) gemacht habe. Ich mußte 1922/23 bei Vorlage meiner morphologischen Ergebnisse schreiben, daß ein kleiner, aber wichtiger Teil der Formen dieser Höhle sich einer befriedigenden Erklärung so lange entzieht, als wir nicht eine allgemeine hydrographische Theorie des Höhlenkarstes haben. Ich habe sie nun im Rahmen meiner Auffassung der gesamten Karstgewässer geboten.

Beim Abschluß dieses Werkes drängt es mich, allen, von denen ich hilfreiche und zeitsparende Auskünfte und sonstige Förderungen empfangen habe, auf das wärmste zu danken. Schon bei den vorbereitenden Arbeiten durfte ich mich der freundlichen Aufklärungen erfreuen, durch welche Herr Hofrat Prof. Dr. Ph. Forch-

heimer mich beim Studium der ersten Auflage seiner „Hydraulik“ unterstützte. Herr Prof. Dr. Adolf Smekal, dzt. Vorstand des Inst. f. theor. Physik in Halle, hat mich noch in Wien in kollegialer Weise durch die Vorführung von Experimenten sowie durch Literaturhinweise gefördert; den direkten Nutzen, den mein Buch aus dem Umgang mit ihm gezogen hat, habe ich an Ort und Stelle dankbar genannt. In gleicher Weise hat mich mein Kollege, Herr Prof. Dr. P. Scherrer, Vorstand des Physikalischen Inst. d. Eidg. Technischen Hochschule gefördert, worüber ebenfalls im Buche selbst das Nähere gesagt ist. Durch jahrelange Leihgaben unveröffentlichten wertvollen Materials geologischer und technischer Art hat es mir der Erbauer des Kraftwerkes für die Arlbergbahn, Herr Oberbaurat Ing. Hans Ascher, möglich gemacht, seinen Erfahrungen neue Seiten abzugewinnen, ein Freundschaftsdienst, für den ich ihm nicht genug danken kann und der um so wertvoller war, als ich dieses Buch vorwärts und zu Ende bringen mußte, während ich mich in einen ganz neuen Wirkungskreis einzuleben und einzuarbeiten hatte. Bei der Beschaffung oder Vermittlung mehrerer Lichtbilder, bzw. der Druckstöcke haben mich unterstützt die Herren Prof. Dr. K. Absolon in Prag, Prof. Dr. K. Gripp, Prof. Dr. G. Gührich, Frl. Erna Mohr in Hamburg, die Herren Prof. Dr. E. Rüst und Prof. Dr. R. Staub in Zürich, Herr Prof. Dr. V. Švambera in Prag und der Generalsekretär des Hauptverbandes deutscher Höhlenforscher, Herr Landgerichtsrat Dr. B. Wolf. Den Herren Helmuth Cramer und Ing. Ernst Schädler verdanke ich wichtige schriftliche Auskünfte. Herr Dr. W. Semmelhack in Hamburg verschaffte mir die Leihgabe der schwer zu bekommenden Arbeit Wiebels über Kephallenia zu monatelanger Benützung in Zürich. Ihnen allen sei aufs verbindlichste gedankt. Eine besondere Stelle in meiner Dankschuld nehmen der Herr Verleger und der Herr Herausgeber ein, welche meinen vielen Wünschen ohne Ausnahme mit größter Freundlichkeit entgegenkamen und es nie an der Geduld fehlen ließen, die ich weitgehend beanspruchen mußte.

Das Manuskript war schon im Juli 1931 abgeschlossen. Nachdem die Fahnen gesetzt waren, haben mich u. a. die neuesten Lehrwerke L. Prandtls zu Ergänzungen und zum teilweisen Umbau zweier Paragraphen veranlaßt, was auch an anderen Stellen eine ziemliche Menge Änderungen im Satz bewirkte. Außer dem Herrn Herausgeber hat dadurch besonders der Prokurist des Verlages, Herr Burkhardt, viele Mühe auf sich genommen und ebenso dankbar bin ich mir des Verständnisses der Drucker bewußt, die unter solchen Umständen ein Satzbild zustande brachten, dessen Vorzüge gewiß nicht mein Verdienst sind. Aber die Rücksicht auf den neuesten Stand grundlegender Hilfswissenschaften und meine eigene fortschreitende Einsicht schien mir wichtiger als die Vermeidung jeder Spur stärkerer Korrekturen. Wo man also solche bemerkt, trifft die Verantwortung mich.

Geograph. Institut der Eidgen. Techn. Hochschule,

Zürich, den 6. Juli 1932.

**Otto Lehmann.**

# Inhaltsgliederung.

	Seite
Einleitung .....	1
I. Die Karstentwässerung als Sonderfall im Kreislauf des Wassers. §§ 1 und 2 .....	1
II. Die maßgebenden Eigenschaften der Karstentwässerung. §§ 3 bis 9 ..	3
§§ 6ff. Der karsthydrographische Gegensatz .....	6
§ 9. Ablehnung der hydrographischen Zonen oder Stockwerke .....	8
Hauptteil .....	11
I. Hydrographische Wegsamkeit und karsthydrographische Wirksamkeit der Hohlräume in Verbindung mit der Löslichkeit der Gesteine. §§ 10 bis 23 .....	11
§ 10. Löslichkeit und Lösungsgeschwindigkeit .....	11
§ 14. Geologische Haarspalten und physikalische Kapillarklüfte .....	15
§ 15. Die Klüftigkeit des Dolomits .....	16
§ 16. Die Klüftigkeit des Gipses .....	17
§ 18. Groß- und überkapillare Urhohlräume sind an keine Vorfluthöhe gebunden .....	20
§ 19. A. Grunds Bewertung der Klüftigkeit wird abgelehnt .....	22
§ 20. Die Ereignisse im Mt. d'Or-Tunnel .....	24
Anhang zum Abschnitt I: Die Löslichkeit der Karstgesteine nach Maß und Zahl. §§ 21 bis 23 ..	28
II. Das allgemeine Verhalten der Karstgewässer im Lichte der physikalisch erfaßten Bewegungsformen des Wassers. §§ 24 bis 62 .....	37
A. Die theoretischen Unterlagen. §§ 24 bis 45 .....	37
§§ 25ff. Die physikalisch hydraulischen Fließweisen .....	38
§§ 28f. Die Größen der kapillaren Saugvorgänge .....	41
§§ 30ff. Vorführung einiger hydromechanischer Grundlehren .....	44
§ 33. Der Begriff der Druckhöhe „schlechtweg“ für ausfließendes Wasser ... Rechenbeispiele für genau zutreffende Figuren .....	51
§§ 34f. Ausfluß aus geneigten Rohren .....	55
§§ 36f. Die Berechnung von Strömungsgeschwindigkeiten nach der Rohr- neigung .....	58
§ 39. Die Geschwindigkeiten laminaren Fließens in Fugen .....	61
§§ 40f. Querschnittsänderungen in Strömungen und ihre Folgen .....	64
§§ 42ff. Saugen und Schlucken im hydrographischen Sinn .....	67
B. Die dynamischen Beziehungen zwischen Karstwasser und Meerwasser. §§ 46 bis 57 .....	71
§ 46. Brackwasserquellen an der Küste und unterseeische Süßwasserquellen .	71
§ 47. Letzte Vorbereitung zum Verständnis der Meeresswinden .....	74



	Seite
§§ 48 bis 57. Zu den Theorien über die Meermühlen von Argostoli.....	75
§ 57. Zusammenfassung über die Meermühlen und -schwinden .....	87
C. Die Entwässerung der geschlossenen Karstpoljen, theoretisch betrachtet.	
§§ 58 bis 62 .....	88
§§ 60f. Brunnen und Poljen. Beseitigung einer gelehrten Suggestion .....	90
III. Die Erläuterung der Karsthydrographie größerer Musterlandschaften. §§ 63 bis 85 .....	98
A. Die Wasserverhältnisse des Poljes von Livno. §§ 63 bis 72 .....	98
§ 67f. Die Messung der Beziehungen zwischen Wasserstand der Überschwemmung und Schlucktätigkeit des Lakalponors .....	105
§§ 70f. Höhenverschiedenheit der gleichzeitigen Karstwasserspiegel in den Ploučaponoren bis zu 30 <i>m</i> .....	110
B. Ph. Ballifs tabellarische Übersicht von 49 Karstpoljen in Bosnien und der Herzegowina, statistisch für ihre Hydrographie ausgewertet. §§ 74 und 75 ..	117
C. Beispiele weithin abesondert verlaufender Wasserstränge im Krainer Karst.	
§ 76 bis 79 .....	122
1. Einleitendes über die Erfolge der Färbeversuche. § 76 .....	122
2. Hydrographisches aus Inner- und Unterkrain nach A. E. Forsters Bericht. §§ 77 bis 79 .....	124
D. Zur Hydrographie im Gebiete der obersten Donau und der Hegauer Aach.	
§§ 80 bis 85 .....	130
§§ 80f. Die Größe der Wassereinbuße der Donau .....	130
§§ 82 bis 84. Ihre Verbindung mit der Aachquelle und das Zwischengebiet. 133	
§ 85. Das trübe und das klare Karstwasser unter dem Donautale selbst... 139	
IV. Die Entwässerung der Karsthöhlen und der engeren unterirdischen Hohlräume. §§ 86 bis 120 .....	143
A. Die Gewässer der zugänglichen Höhlen. §§ 86 bis 103 .....	143
§ 86. Begriff der Höhlen und ihre Bedeutung für den Karstabfluß.....	143
§§ 87f. Die Segeberger Auslaugungshöhle im Gips .....	146
§§ 89f. Theorie der runden Auslaugungsquerschnitte im Kalk .....	148
§ 91. Deckenschlote und Spiegelschwankungen .....	152
§ 92. Verschiedene Anzeichen ruhiger Wasserbewegung .....	153
§§ 93f. Verschiedene Entstehung von Deckenkolken (sog. Druckkolken)....	155
§ 95. Spiraliges Vorschreiten von Röhrenströmungen .....	158
§ 96. Fließweisen „ungeordneter“ Turbulenz .....	159
§ 97. Mißdeutete Auslaugungsquerschnitte .....	160
§§ 98f. Die Efforationsstheorie wird abgelehnt trotz den Geschwindigkeiten der Vauclusequelle .....	162
§§ 100 bis 103. Der Karstabfluß in hohen steilen Spalten.....	166
§ 100. Bonheur- und Bramabiasystem .....	166
§ 101. Die Gewässer der Padirachöhle .....	168
§§ 102f. Die Anerkennung ursprünglicher weiter Spaltenhöhlen führt mit Martel zu jener von Spaltentälern im Karst .....	171
B. Die Entwässerung des Karstes zwischen der Oberfläche und den Höhlen und zwischen diesen selbst. §§ 104 bis 111 .....	176
§ 104f. Die Fließweisen in engen, hochgelegenen Klüften sind grundsätzlich dieselben wie in Höhlen (Beispiele).....	176

## Inhaltsgliederung

XI

	Seite
§ 105. Unterirdische Beziehungen zwischen dem Vordringen der Niederschläge und den Quellen .....	178
§§ 107 bis 109. Luftbewegungen infolge eindringenden Karstwassers.....	180
§ 110. Überflüssigkeit und Nachteile der Trennung eines Sickerwassers vom Karstwasser .....	182
§ 111. Grundsätzliche Bedeutungslosigkeit der Trennung „vertikaler“ und „horizontaler“ Zirkulation .....	184
C. Die Ergebnisse der Beobachtungen und Messungen im Hauptstollen des Spullersee-Werkes. §§ 112 bis 114 .....	185
V. Zusammenfassung §§ 115 bis 120 .....	194

Die Paragrafen ohne eigene Inhaltsangabe lassen eine solche in knappen Worten nicht zu. Meist sind es solche, die Einleitungen oder Zusammenfassungen bringen in enger Anlehnung an die Inhaltsangaben der Haupt- und Nebenabschnitte.

# Literaturverzeichnis.

## A. Karsthydrographische Werke und Schriften.

Die Nummern 1 bis 50 führen Werke auf, zu denen dieses Buch eingehend oder wiederholt Stellung nimmt. Schriften, die für eine einzige Angabe im Text den Beleg boten, sind nur an Ort und Stelle in Fußnoten genannt.

Man vergleiche ferner die in den aufgeführten Arbeiten zitierte Literatur, besonders bei Nr. 30 bis 32.

1. Absolon Karl, Die Macocha und die neuen Tropfsteingrotten, Punkwa und Katharinenhöhle, Punkwa-Wassergrotten. 4. Aufl., Brünn 1925.
2. Ampferer Otto und Ascher Hans, Über geologisch-technische Erfahrungen beim Bau des Spullersee-Werkes. Jahrb. d. Geol. Bundesanstalt, 75. Bd., H. 3 u. 4, 1925. Ascher Hans, siehe Nr. 2.
3. Ballif Ph., Wasserbauten in Bosnien und der Herzegowina. I. Teil: Meliorationsarbeiten usw. im Karstgebiete, Wien 1896.
4. Beiträge zur Hydrographie des Großherzogtums Baden. 7. u. 8. H., Karlsruhe 1893.  
4a. Jahrbuch des Hydrographischen Bureaus der Badischen Wasser- und Straßenbau-Direktion. Mehrere Bände.
5. Berz Karl C., Die Grundwasserverhältnisse im Versinkungsgebiete der oberen Donau, ein Beitrag zum Problem der Karsthydrographie. Mitt. d. Geol. Abt. d. Württ. Stat. Amtes, Nr. 11, 1928.
6. Bock Hermann, Der Karst und seine Gewässer. Mitt. f. Höhlenkunde, 6. Jg., 3. H. 1913.
7. Bock Hermann, Lahner Georg und Gaunersdorfer Gustav, Höhlen im Dachstein. Graz 1913.
8. Cramer Helmut, Untersuchungen über die morphologische Entwicklung des fränkischen Karstgebirges. Abh. Nat.-hist. Ges. zu Nürnberg XXII, 7, 1928.
9. Cvijić Jovan, Das Karstphänomen. Geogr. Abh., herausgegeben v. A. Penck. V, 3, 1893.
10. Derselbe, Morphologische und Glaziale Studien aus Bosnien, der Herzegowina und Montenegro. II. Teil: Die Karstpoljen. Abh. d. kk. Geogr. Ges. Wien. III. Bd., Nr. 2, 1901.
11. Derselbe, Hydrographie souterraine et évolution morphologique du Karst. Rec. d. Trav. de l'Inst. de Géogr. Alpine, Grenoble. Bespr. v. O. L. Zeitschr. f. Geomorphologie III, S. 104, 1918.
12. Endriß K., Die Versinkung der oberen Donau zu Rheinischem Flußgebiet. Stuttgart, Zimmer (E. Mohrmann), 1900.
13. Derselbe, Zur Frage der Aach-Donau-Höhlen. Globus Bd. 94 (1908, II), 1908.
14. Eckert Max, Das Gottesackerplateau, ein Karrenfeld im Allgäu. Wiss. Ergh. d. D. u. Ö. Alpenvereins. I, 3, 1902.

15. Forster A. E., Hydrographische Forschungen in Inner- und Unterkrain. Mitt. d. Geogr. Ges. Wien, Bd. 65, 1922.
16. Fouqué, Rapport sur les tremblements de terre de Céphalonie et de Mételin en 1867. Archives des missions scientifiques et littéraires, publié sous les ausp. du ministère de l'instruction publique, tome IV, Paris, S. 445ff., bes. S. 467 u. 478—82, 1867.
17. Gavazzi, Die Seen des Karstes. I. Teil: Abh. d. kk. Geogr. Ges. Wien, Bd. V, Nr. 2, 1904.
18. Gripp Karl, Über den Gipsberg in Segeberg und die in ihm vorhandene Höhle. Jahrb. d. Hamburgischen Wiss. Anstalten XXX, 1912/13.
19. Derselbe, Steigt das Salz zu Lüneburg, Langenfelde und Segeberg episodisch oder kontinuierlich? Zeitschr. d. D. Geol. Ges., 1920.
20. Grund Alfred, Die Karsthydrographie. Studien aus Westbosnien. Geogr. Abh., herausgegeben v. A. Penck, VII, 3, 1903.
21. Derselbe, Beiträge zur Morphologie des Dinarischen Gebirges. Geogr. Abh., herausgegeben v. A. Penck, IX, 3, 1910.
22. Derselbe, Zur Frage des Grundwassers im Karst. Mitt. d. Geogr. Ges. Wien, 53. Bd., 1910.
23. Derselbe, Der Geographische Zyklus im Karst. Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin, 1914.
24. Hol B. L. Jacoba, Beiträge zur Hydrographie der Ardennen. Jahresbericht des Frankfurter Vereines für Geographie und Statistik. 79. u. 80 Jahrg. 1914 bis 1915 und 1915 bis 1916. 1916.
25. Katzer Franz, Karst und Karsthydrographie. Zur Kunde der Balkanhalbinsel, H. 8, Sarajevo 1909.
26. v. Knebel Walter, Höhlenkunde. Samml. Die Wissenschaft, 15, 1906.
27. Knop A., Über die hydrographischen Beziehungen zwischen der Donau und der Aachquelle im Badischen Oberlande. N. Jahrb. f. Min. Geol. usw., Jg. 1875, S. 942ff., 1875. Schluß: ebenda Jg. 1878, S. 350ff., 1878.
28. Krebs Norbert, Die Halbinsel Istrien, eine landeskundliche Studie. Geogr. Abh., herausgegeben v. A. Penck, IX, 2, 1907.  
Lahner Georg, siehe Nr. 7.
29. Kyrle G., Kombinierte Chlorisierung von Höhlengewässern. Spel. Monogr. XII, 1928, Vgl. Nr. 45.
30. Lehmann O., Die Auswaschungen an Klammwänden und die Richtung des Wasserlaufes (Hinweise für die Deutung der Abflußrichtung ehemaliger Höhlengerinne). Berichte der staatl. Höhlenkommission III, 1, 2, Wien 1922.
31. Derselbe, Morphologische Beobachtungen (in der Höhle der Eisriesenwelt, Tennengebirge). IV. Teil der Ber. über die Ergebnisse der Höhlenexpedition der Akademie der Wiss. in Wien, Speläol. Jahrb. III, 3, 4, 1922.
32. Derselbe, Über Grundwasser und Quellen. Geogr. Jahresber. aus Österr. XIII, 1925.
33. Derselbe, Das Tote Gebirge als Hochkarst. Mitt. Geogr. Ges. Wien, 70. Bd., 1927.
34. Martel Ed. Alfred, Les Abîmes, 1894.
35. Derselbe, Nouveau traité des eaux souterraines. Paris 1921.
36. Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung, Zeitschr. des Hauptverbandes Deutscher Höhlenforscher seit 1925.

37. Partsch Josef, Kephallenia und Ithaka. Ergh. Nr. 98 zu Peterm. M., 1890.
38. Penck Albrecht, Das Karstphänomen. Schr. d. Ver. z. Verbreitung naturwiss. Kenntnisse in Wien, 44, 1902—1904. 1904.
39. Derselbe, Das unterirdische Karstphänomen. Festschrift f. J. Cvijić. (Recueil de travaux usw.) Belgrad 1924.
40. Rehbock Th., Bettbildung, Abfluß und Geschiebebewegung bei Wasserläufen. Zeitschr. d. Deutsch. Geol. Ges., 81. Bd., 1929.
41. Richter Ed., Beiträge zur Landeskunde Bosniens und der Herzegowina. Herausgegeben v. G. A. Lukas. Wiss. Mitt. aus B. u. H., X, S. 383—545, Wien 1907.
42. Schardt H., Geologische und hydrologische Beobachtungen über dem Mt. d'Or-Tunnel und dessen anschließende Gebiete. Schweizerische Bauzeitung 1917/II, 70. Bd., S. 263 ff., 276 ff., 290 ff., 297 ff., 1917.
43. Schaufelberger Paul, Geologische und hydrologische Verhältnisse zwischen der Donauversickerung und der Aachquelle. Mitt. d. Badischen Geol. Landesanstalt, Bd. X, H. 2, S. 563 ff. (Diss. Univ. Zürich), 1929.
44. Soutter F., Entreprise du tunnel du Mont-d'Or, Note sur la construction du raccourci Frasné-Vallorbe, ligne à double voie de 25 km de longueur. Bull. technique de la Suisse romande, 39. Jg., S. 221 ff., 233 ff., 257 ff., 285 ff.. 1913.
45. Speläologisches Institut der Bundeshöhlenkommission. Monographien in zwangloser Folge seit 1923.
46. Stille H., Geologische und hydrologische Verhältnisse im Ursprungsgebiet der Paderquellen zu Paderborn, Abh. d. Preuß. Geol. Landesanstalt, N. F. Nr. 38; 1903.
47. v. Terzaghi Karl, Beiträge zur Hydrographie und Morphologie des Kroatischen Karstes. Mitt. aus dem Jahrb. der kgl. ungar. Geol. Reichsanstalt, XX, 6, 1913.
48. Trampler R., Die Eröffnung zweier Dolinen. Mitt. d. Geogr. Ges. Wien, N. F. XXVI, 1893.
49. Wiebel K. W. M., Die Insel Kephallonia und die Meermühlen von Argostoli. Hamburg 1873.
50. Wilser J. L., Die natürlichen Bedingungen der Donauversickerung und deren wirtschaftlicher Nutzung. Fischer, Freiburg 1924.

#### B. Hilfswissenschaftliche Werke.

Einige ganz spezielle chemische Werke sind an Ort und Stelle in Fußnoten genannt.

51. Boeke H., Eitel W., Grundlagen der physikalisch-chemischen Petrographie. II. Aufl., 1923.
52. Chwolson O. D., Lehrbuch der Physik, II. Auflage, I. Bd., 2. Abt., 1918.
53. Deutsches Met. Jahrbuch, Bände Baden.
54. Forchheimer Philipp, Hydraulik. 1914 (II. Aufl. 1930).
55. Landolt-Börnstein, Physikalisch-chemische Tabellen, 5. Aufl., 1920.
56. v. Mises Richard, Elemente der Technischen Hydromechanik I, 1914.
57. Prandtl-Tietjens, Hydro- und Aeromechanik nach Vorlesungen von L. Prandtl von O. Tietjens, I. Bd. 1929, II. Bd. 1931.
58. Weisbach Julius, Die Experimental-Hydraulik. Freiburg 1855.
59. Derselbe, Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinenmechanik. Braunschweig, I. Teil: Theoretische Mechanik, 5. Aufl., 1875.

Diese und alle neueren Auflagen enthalten die Hydromechanik unverändert. Über einige Vorgänge, die für die Karstwassermechanik wichtig sind, wird man schon aus der ersten Auflage zutreffend aufgeklärt.

Schlußbemerkung.

Literaturangaben, die für verschiedene Zeiträume eine gewisse Vollständigkeit im Hinblick auf die Karstwasserfragen anstreben, findet man an folgenden Stellen zitiert:

Geogr. Jahrbuch: XL, 1924/25, S. 144ff. im Beitrag von J. Sölch.

Ebenda: XLV, 1930, S. 15f. und 41f. im Beitrag von W. Friedrich.

Revue de Géographie Annuelle, t. XI. 1923, Martel E. A., Les récentes explorations souterraines, leurs résultats et conséquences scientifiques.

Lindner H., Die Wasserführung des Karstes. Wissensch. Beilage zum Jahresbericht der Kreisrealschule I in Nürnberg. 1922.

Diese Berichte enthalten nicht alle im Literaturverzeichnis A aufgeführten Werke der betreffenden Berichtsjahre, während sie andererseits mehr Titel bieten. Die älteren Arbeiten, welche das Hin und Her der Meinungen verfolgen lassen, hat Teppner in der Geologischen Rundschau, Bd. IV, 1913, vorgeführt.

## Nachträge und Berichtigungen.

**Zu S. 34, Mitte:** Die nach G. Blöchliger angegebenen Zahlen sind durch Addition der auf Gelatine und auf Nähragar gezählten Keime gewonnen. Aber nur die Addition der Strahlenpilze ist ohne weiteres erlaubt, die übrigen Lebewesen aus verschiedenen Proben derselben Herkunft gehören meist den gleichen Arten an. Ihre Addition ergibt zu große absolute Keimzahlen, u. zw. etwa das Doppelte des Mittels, die im Text gebotenen Zahlen behalten daher ihren Wert nur als Verhältniszahlen, Daran wird auch durch den Umstand nichts geändert, daß die genannten Nährsubstrate nicht erlauben, alle vorgekommenen Bakterien zu erfassen.

**Zu S. 70, Z. 7 v. o.:** Weisbach machte die Versuche mit Röhren von weniger als 5 m Länge und Einschaltung von 3—5 Hindernissen der Strömung, u. zw. waren es plötzliche Querschnittsänderungen und scharfe Kniebüge.

**Auf S. 90, Z. 11 v. o.** ist hinzuzufügen: Bei Wechselschlünden hingegen, u. zw. bei jenen, die zwischen Schlucken und Speien nicht trocken liegen, kündigt sich der Übergang durch Abnahme der Verschluckung bei steigendem Wasserstande an.

**Zu S. 140, Z. 12 v. u.:** Die auf den Isohypsen beruhende Angabe, daß der trübe Brunnen mindestens 4 m höher spiegelte als der benachbarte klare, wurde barometrisch nachgeprüft und erwies sich als übervorsichtig. Es könnte sogar besser stehen „5—6 m“ statt „mindestens 4 m“.

## Corrigenda.

S. 17, Anm. 2 lies	Nr. 31	statt	Nr.
S. 30 u. 31 in den Tabellentiteln	„ CO <sub>2</sub>	„	CO <sub>3</sub> bzw. CO
S. 36, Z. 16 v. u.	„ CO <sub>2</sub>	„	Co <sub>2</sub>
S. 50, vorletzte Zeile	„ 1	„	1
S. 61, Z. 11 v. o.	„ Abb. 72	„	Bild 5
S. 74, Z. 8 v. o.	„ p <sub>0</sub>	„	p
S. 90, Anm., Z. 3 v. u.	„ 32	„	31
S. 146, Z. 2 v. o.	„ Abb. 73	„	Bild 6
S. 149, Z. 7 ff. v. o.	Zu streichen ist der Satz von: „Da den ...“ bis „... zuvor“		
S. 172, Schlußabs. v. § 102, Z. 3 v. o.	lies „Einsturztäler“ statt „Solche Täler“		

# EINLEITUNG.

---

## I. Die Karstentwässerung als Sonderfall im Kreislauf des Wassers.

§ 1. Der Kreislauf des Wassers, diese für jede geographische Betrachtung der Länder grundlegende Tatsache, vollzieht sich teils im freien Luftmeer, teils in Berührung mit der Erdrinde. Der zweite Teil des Vorganges läßt sich mit dem Worte Abfluß zusammenfassen. Diese Bezeichnung wird durch den Umstand nicht berührt, daß in ansehnlichen Gebieten der Erde ein dritter Teil dieses Kreislaufes durch die Lebewesen geht.

In feuchten Gebieten, wo vom felsigen Untergrund kein Wasser verschluckt wird und nur wenig Wasser in der Verwitterungsdecke Raum findet, überwiegt ganz bedeutend der oberirdische Abfluß; das zeigt sich in der großen Zahl offen fließender Gewässer. In aufgeschütteten Lockermassen hängt es von deren Mächtigkeit und von der Niederschlagsmenge ab, ob der unterirdische oder der oberirdische Abfluß überwiegt. Der erste führt den Namen Grundwasserbewegung. Wo das Grundwasser selbst zur Speisung und Aufrechterhaltung eines ganzen Fluß- und Bachnetzes beiträgt, sind wir immer noch im Bereich eines vorwiegend oberirdischen Abflusses. Erst in den Steppengebieten überwiegt der unterirdische Abfluß in den Lockermassen der Anhäufungen, während der oberirdische von einer Trockenzeit unterbrochen sein kann.

Sehr abweichend von allen diesen Abflußverhältnissen vollzieht sich der Kreislauf des Wassers in solchen Landschaften, wo das anstehende Gestein mit und ohne Verwitterungsdecke viel Wasser aufnimmt und darin weiter fließen läßt. Der Abfluß erfolgt in solchen Gegenden größtenteils unterirdisch. Das sind die Karstgebiete. Sie finden sich vor im Bereich der Karbonatgesteine Kalk und Dolomit und des Sulfates Gips (gewöhnlich aus Anhydrit hervorgegangen), ferner in kalkreichen Mergeln. Unterirdischen Abfluß gibt es auch in spaltenreichen Gletschergebieten und in höhlenreichen, erstarrten Lavaströmen, die aber ihrerseits wieder den aufgeschütteten Lockermassen nahestehen.

Nicht alle Kalk- und Dolomitgebiete sind seit jeher auch Karstlandschaften gewesen, aber wo Kalke auftreten, bleibt der Sieg der unterirdischen Entwässerung über eine oberirdische auf die Dauer nicht aus. Auch für den Dolomit gilt dies in vielen Fällen.

Wie sehr die Gewässer an den Bodenformen mitarbeiten, erkennt man daran, daß diese in Karstgebieten ganz eigenartig beschaffen sind. Der Karst, einst nur Eigenname einer Gebirgslandschaft, die alle morphologischen Merkmale der vorwiegend unterirdischen Entwässerung im Kalk besitzt, ist zum Gattungsnamen geworden für morphologisch und hydrographisch verwandte Gebiete. Daher rechnet man Gletschergebiete und höhlenreiche Laven mit ihrem abweichenden Formenschatz nicht zum Karst im eigentlichen Sinne. Man muß deswegen ihre hydrographischen Übereinstimmungen nicht aus dem Auge verlieren. Oben wurden schon jene Gesteine genannt, die außer dem Kalk echte Karstlandschaften tragen. Niederschlagsmangel in den Gebieten von Karstgesteinen steigert wohl die Trockenheit der Oberfläche, hemmt aber die Ausbildung der kennzeichnenden Bodenformen des Karstes. Die Eigenschaften der Karstfelsen, welche zur unterirdischen Entwässerung führen, sind eine bedeutende Klüftigkeit und eine vergleichsweise rasche Lösbarkeit. Das Zusammenwirken beider wird uns noch beschäftigen.

§ 2. Die Verbreitung der Karstentwässerung auf der Erde ist nicht gering zu veranschlagen, auch wenn man von Gletschern und Laven absieht. Die älteren Zusammenstellungen zahlreicher wichtiger Vorkommnisse, die man den Schriften von Cvijić, Grund und Knebel (Nr. 9, 20 u. 26) entnehmen kann, ließen sich heute stark erweitern, ohne daß Vollständigkeit gewährleistet werden könnte.

Hier sei nur erwähnt, daß seither im Somaliland und im südöstlichen Abessinien Höhengewässer zur Kenntnis der Fachwelt gelangten, ebenso wurde eine Karstentwässerung im Katangagebiet und in Südwesafrika gefunden.<sup>1)</sup> Das größte bekannte Karstgebiet, von dem die älteren Hydrographen noch nichts meldeten, liegt im südwestlichen China, wo es von Tonking bis in das Gebiet des mittleren Yangtsekiang reicht und im ganzen 600.000 *qkm* umfaßt, freilich sind dabei Gebiete von undurchlässigen Gesteinen miteingestreut, deren Größe sich nicht hinreichend genau angeben läßt.<sup>2)</sup>

In Nordamerika sind seither in Texas und besonders in Neu-Mexiko Höhlengebiete zu einem Hauptsitz sportlicher Durchforschung geworden. An dem Flächeninhalt wasserarmer Gebiete der Erde haben die Karstländer einen nicht unbedeutlichen Anteil neben den Gebieten mangelnder Niederschläge. Um so mehr Wert hat in jenen Ländern die lebenspendende Flüssigkeit; auch das sichert der Lehre von den Karstgewässern in der Hydrographie einen besonders hohen Rang.

<sup>1)</sup> Vgl. Arn. Hodson: Southern Abyssinia, G. J. 53. Bd., 1919, I., Schwetz: Rivers of Katanga, G. J. 50. Bd., 1917, II., ferner Jaeger F. und Waibel L. Beitr. z. Landesk. von Südwesafrika, Mitt. aus. d. deutschen Schutzgeb. Ergh. Nr. 15, 1921.

<sup>2)</sup> Jene 600000 *qkm* bestimmte ich, indem ich die landeskundlichen und morphologischen Reiseergebnisse des Botanikers und Pflanzengeographen Dr. Handel-Mazzetti in der Provinz Guidschou (Kweitschou) bearbeitete, unter Auswertung der Literatur über SW-China. Am meisten half mir zu obiger Flächenbestimmung das Einzeichnen aller bekannten Vorkommnisse des auch dem ungelehrten Reisenden stets auffallenden Kegelkarstes (calcaire à pitons). Zum Vergleich diene, daß die Gebiete der Karstentwässerung auf der westlichen Balkanhalbinsel (einschließlich Griechenlands) von mir zu rund 100000 *qkm* bestimmt wurden, in einem groben, aber vorsichtigen Überschlagn. Dieser ist gestützt durch die Carte Géol. Intern. de l'Europe, alle Spezialkarten 1:75000 und die vorhandenen geologischen Karten in den einst österreichischen, kroatischen und bosnisch-herzegovinischen Karst- und Küstengebieten.

## II. Die maßgebenden Eigenschaften der Karstentwässerung.

§ 3. Wie schon bemerkt, fehlen dem Karst oberirdische Wasserläufe nicht gänzlich, selbst solche nicht, welche innerhalb der Grenzen der Karstgesteine entspringen; umgekehrt fehlt es auch Gebieten des Nichtkarstes keineswegs an unterirdischem Abfluß, selbst dort, wo es sich nicht um Steppen und Wüsten handelt. Daher entsteht die Frage, ob — hydrographisch betrachtet — vielleicht alle Übergänge zwischen beiden Typen der Abflußgebiete möglich sind. Möglich sind solche Übergänge wohl, aber sie kommen nur sehr selten vor. Ein solcher Fall ist in der Paderborner Gegend eingehend studiert und dargestellt worden,<sup>1)</sup> wo ein oberirdisch entwässertes Gebiet im östlichen Teil der Tieflandsbucht von Münster in W. allmählich vor den Augen der Menschengeschlechter der Verkarstung verfällt, nachdem die Bäche genügend in den klüftigen Fels eingeschnitten haben. Ich lernte dieses Gebiet 1923 unter der Führung von H. Prof. Mecking in Münster kennen.

Der umgekehrte Fall jedoch, daß ein Karst durch allmähliche Entblößung einer undurchlässigen Unterlage in ein oberirdisch entwässertes Gebiet übergeht, ist, abgesehen von mancher Poljenbildung mit undurchlässiger Sohle östlich der Adria, bisher nur theoretisch gefordert worden. Es scheint mir, daß ein solcher Übergang in einigen Teilen der chinesischen Provinz Guidschou (Kweitschou) sich im Großen vollziehe. Abgesehen von diesen seltenen Übergangsstadien im zeitlichen Sinn gibt es förmliche „Zwischenglieder“ zwischen Karst und Nichtkarst höchstens in Gebieten eines vielfachen Wechsels von Karstgesteinen und anderen Felsarten. Die Alpen der Nordostschweiz bieten schöne Beispiele. Hierbei schrumpft aber der Begriff des Karstes oft zu Gruppen von kleinen Zügen auf bescheidenen Flächen zusammen, die fast verschwinden im Vergleich etwa zu den ganz gewöhnlich 100 bis 300 *qkm* messenden Gebieten strengen Karstes in den Ostalpen. Da aber auch in den strengsten Fällen der Karst nur vorwiegend unterirdisch entwässert ist, der Nichtkarst außerhalb der Trockengebiete nur vorwiegend oberirdischen Abfluß hat, ist es gut, den dehnbaren Ausdruck „vorwiegend“ durch Anschauung zu ersetzen. Die ständigen Wasserläufe im unverkarsteten Gebiet werden gespeist je nachdem: aus Gletschern, Seen, Sümpfen und Grundwasserquellen, am häufigsten jedoch aus Regenbächlein und Schuttgerinnen, die beide nur zeitweilig fließen.<sup>2)</sup> Denn in allen Gebieten, wo Gletscher, Sümpfe, Quellseen und ausgedehnte Grundwasserträger fehlen, gewinnen die erwähnten schwachen und unterbrochenen Abflüsse gleichwohl ausschlaggebende Bedeutung. Die Länge der Gerinne des Regen- und Schuttwassers erreicht nach meinen vielfachen Beobachtungen manchmal kaum einen, selten etwas über zwei Kilometer, ehe im Bett der Ort kommt, wo eine ständige Wasserführung der Stammader von jahrelanger Dauer gesichert ist. Im Karst ist es nun so, daß die periodischen Regenbächlein und noch kleinere Wasserläufe meist nicht einmal so lang werden als anderwärts. Sie bleiben fast immer erheblich zurück hinter der Länge eines, ja eines halben Kilometers und sind, von ganz wenigen Ausnahmen abgesehen, längst im Felsuntergrunde verschwunden, ehe sie jene Länge erreichen, wo anderswo die ständigen Wasserläufe erst beginnen. Überdies haben im Karst

<sup>1)</sup> Stille, Abh. d. Preuß. Geol. Landesanstalt, Bd. VII.

<sup>2)</sup> Näher nachgewiesen in den Mitt. der. Geogr. Ges. Wien, 59. Bd., 1918.

auch ansehnliche Gletscher und Seen ganz gewöhnlich unterirdische Abflüsse. Viele Karstseen entleeren sich zeitweise gänzlich, andere haben nur bei ungewöhnlichen Hochständen auch Strecken oberirdischen Abflusses. Die Folge von alledem ist, daß in den Randgebieten einer Karstlandschaft starke Felsquellen auftreten, eine Erscheinung, die in unverkarsteten Gegenden nur selten zustande kommt. Manchmal kommen schon im Inneren der Karstgebiete solche Felsenquellen mit Flußstärke („Stromquellen“) vor, aber sie sind gewöhnlich sehr schwankend in der Wasserführung und ihre Abflüsse sind nach wenigen Kilometern Laufes neuerdings der Unterwelt verfallen; nur bei ungewöhnlich starken Karstflüssen entrinnt ein Teil des Wassers diesem Schicksal. Wir sehen also, daß ein Karstgebiet seine hydrographische Sonderart sehr nachdrücklich und bestimmt behauptet, wenn dies auch die allgemeinste Definition nicht deutlich machen kann, denn sie muß sich notgedrungen dehnbarer Ausdrücke bedienen, um auch seltene Ausnahmen zu berücksichtigen.

§ 4. Glücklichen Umständen verdanke ich eine Beobachtung östlich von Glarus; durch sie wird mehr als eine jener Tatsachen belegt, welche ich soeben als wesentlich für die Eigenart der Karstentwässerung hingestellt habe; und zwar geschieht dies in einer Weise, die ich auch in einem strengen Karst nicht leicht für verwirklicht gehalten hätte. Dort brach in etwa 1400 *m* Höhe am Hange des Schilt, des bescheideneren Nachbars des Glärnisch auf der anderen Talseite, anfangs Juni 1929 zwischen Blockwerk und Fels ein starker Bach hervor, der eine Wassermenge führte von der Größenordnung eines halben bis ganzen Kubikmeters in der Sekunde. Der Bach brachte viel Wasser oberirdisch als „Geißbach“ in das 900 *m* tiefere Linthtal hinab. Dies war Ende Juni nicht mehr der Fall. Die Karstquelle war stark vermindert, brachte aber immer noch vielleicht 15 bis 20 Sekundenliter zum Vorschein. Das Wasser gerät bald auf eine 31° geneigte Strecke, deren schiefe Länge 300 *m* wenig überschreitet. Auf ihr wurde es nun am Ende des Monats von einer Anzahl gar nicht sehr dichter Kluttkarren trotz großer Fließgeschwindigkeit völlig verschluckt. Seltsam lag die 31° geneigte Ebene aus hellem Hochgebirgs-(Malm-)Kalk als einige Meter breiter Streifen zwischen den abschüssigen Gras- und Waldhängen. Nur durch ganz kleine Wasserfälle verriet der Bach zunächst einige Stufungen des ihn schluckenden Untergrundes. Die Karrenklüfte stehen meist mehrere Dezimeter, manchmal über einen Meter weit voneinander ab<sup>1)</sup> und sind sehr eng.

Nun kann man sich das Schicksal eines schwachen Wasserfadens im Karst vorstellen, der nur aus oberirdisch zusammengelaufenen Regentropfen besteht, aber auch das Schicksal von Flüssen daselbst, deren Wasserführung wohl Kubikmeter in der Sekunde beträgt, deren Gefälle man aber nicht in Graden, sondern in wenigen Tausendstel der wagrechten Länge anzugeben pflegt; manchmal sind es weniger als 1<sup>0</sup>/<sub>100</sub>.

§ 5. Die Karstentwässerung hat schon nach dem wenigen, was von ihr bisher berichtet wurde, die Eigenschaft, den Forschungsdrang in besonderem Maße

---

<sup>1)</sup> Dolinen hat dieser Hang nicht. Die Beobachtung wirft ein helles Licht auf die Seltenheit von Dolinen an geneigten Flächen und es bedarf nicht der Theorie, daß die Steilheit und der rasche Abfluß das Versiegen des Regenwassers verhindern, um jene Seltenheit zu erklären. Die Meinung, daß eine größere Anzahl gut ausgebildeter Dolinen an schrägen Hängen durch Schiefstellung in ihre Lage kam, hat nun auch diese Beobachtung für sich.

zu erregen. Schon der große Anteil des unterirdischen Abflusses, der noch dazu in manchen Höhlen der Beobachtung zugänglich ist, erregt die denkende Phantasie und das wenige Wasser an der Oberfläche ist oft so begehrt und ersehnt, daß man sein Verhalten mit ganz anderer Aufmerksamkeit verfolgt als jenes so kleiner und nur zeitweiliger Wasservorkommnisse im Nichtkarst. Man muß sich im Karst nicht nur auf eine große Verborgenheit, sondern auch auf eine große Mannigfaltigkeit des Abflußvorganges gefaßt machen. Aber der menschliche Geist kann nur begreifen, wenn er von Bekanntem und möglichst Einfachem ausgeht. Nach diesem Grundsatz hat man das Schema anderer Abflußvorgänge in die Karsthydrographie eingeführt. Die zugänglichen Strecken der Höhlengewässer haben eine gewisse Ähnlichkeit mit Flüssen und Bächen, ja öfter stellen sie geradezu solche dar. Daher dachte man sich den „Höhlenfluß“ als Hauptträger der Karstentwässerung. Je nach der persönlichen Auffassung wurde der Höhlenfluß bald zum gewaltigen Strom der Unterwelt erhoben, bald nur als unterirdischer Wildbach angesehen. Noch 1918 hielt es Cvijić (Nr. 11) nicht für überflüssig, eine „hydrographie souterraine torrentielle pure et simple“ für den Karst ausdrücklich abzulehnen. Und die weitere Entwicklung erwies die Notwendigkeit dieser Stellungnahme. Dabei war Cvijić keineswegs Anhänger desjenigen Schemas, welches die Gegner der allgemeinen Annahme von Höhlenflüssen auf den Karst angewandt haben: nämlich des Schemas der Grundwasserbewegung in Lockermassen. Es beherrscht bekanntlich die Lehre von A. Grund, die er in einer umfangreichen Abhandlung vorgetragen (Nr. 20) und nach manchem Streit mit Gegnern in einer zweiten mit möglichst wenigen Zugeständnissen zu halten versucht hat. (Nr. 12.)

In gewissem Sinne steht zwischen der Höhlenflußtheorie und derjenigen von A. Grund die Lehre von den Karstgerinnen von F. Katzer (Nr. 24). Für ihn ist das Vorhandensein von Röhrenströmungen im Wechsel mit gelegentlichen weiten Räumen wesentlich, die sich als Gefäße füllen und entleeren. Ob hiebei die herrschende Fließweise für mechanische Arbeit zu langsam ist oder ob sie dafür ausreicht, ob die durchströmten Röhren oder die Gefäße mit bewegtem Wasser alle 10, 20, 100 oder erst alle 500 *m* mit anderen Hohlräumen zusammenhängen, ist für die Grundansicht Katzers, die elastisch ist, ebenfalls nicht von Gewicht. Diese Dinge sind jedoch für die Höhlenflußtheorie nicht gleichgültig. Ihre meisten Vertreter halten die mechanische „Efforation“ (Ausbohrung, § 98) für eine wesentliche Wirkungsweise der unterirdischen Gewässer, ferner ist das häufige Auftreten seitlich verzweigter Hohlräume unbekannter Erstreckung dieser Theorie nicht günstig, ebensowenig der beherrschende Einfluß weiter Gefäße. Der „Höhlenfluß“ im Sinne der Anhänger der Efforation braucht zwar kein Fluß im strengen Sinne zu sein, d. h. er braucht nicht bloß als teilweise Erfüllung der Höhle dem Gefälle ihrer Sohle zu folgen — auch ausgefüllte, unter Druck durchströmte unzugängliche Siphone werden den „Höhlenflüssen“ zugezählt; dabei ist freilich stillschweigend angenommen, daß die unbekannteren Siphonstrecken nicht viel weitreichende Abzweigungen besitzen. Ob die Hohlraumquerschnitte ganz oder nur teilweise mit Wasser erfüllt sind, ist übrigens auch für die Karstgerinne Katzers begrifflich ohne Belang. Katzers Vorstellungen im ganzen bilden eine vorwiegend geologische Theorie, die nach der hydromechanischen Seite nur wenige Hinweise enthält.

§ 6. Waren viele Anhänger der Höhlenflußtheorie offenbar stark von Beobachtungen in zugänglichen Höhlenstrecken und von Stromquellen beeinflusst, so unterlag A. Grund dem Anblick der unzähligen Versickerungsstellen des Regens. Diese verlocken dazu, zwischen einem Karstplateau und einem Schotterfeld eine gewisse Analogie herzustellen. Eine solche Analogie wird durch das Vorkommen von kräftigen Grundwasserquellen an den Rändern einer Schotterterrasse nicht vermindert, im Gegenteil. Was ist aber nun die übergeordnete Tatsache, deren Beachtung eine immer noch einfache mechanische Theorie ermöglichen soll, welche dem Widerstreit der allzu einseitigen Ansichten entrückt ist. Diese übergeordnete Tatsache ist eben der Gegensatz der vielen Schluckstellen des Wassers auf der Einheit der Flächen, welche die Niederschläge empfangen und der außerordentlich wenigen Quellen, bezogen auf die Flächeneinheit der seitlichen Ränder oder Abfälle des Karstes. Legt man einen geraden, senkrechten Schnitt durch ein Karstgebiet, so wird er immer viele Regenschluckstellen, aber selten eine Quelle treffen. Wo das der Fall ist, ergibt sich daraus eine Zusammenfassung der Wasserwege in der Senkrechten. Daß man aber in den Schnitten mit vielen Schwundstellen oft überhaupt keine Quellen trifft, zeigt auch in der Wagrechten eine Vereinigung von Wasseradern an. Die erste kann manchmal durch eine undurchlässige Unterlage hervorgerufen werden. Im Karst kann es aber auch an der Anordnung der wasserführenden Spalten liegen, zwischen denen der Fels überall, auch an der Oberfläche, undurchlässig ist. Das Zusammenlaufen der Wasserwege in der Wagrechten kann in Fällen, wo eine undurchlässige Unterlage des Karstes eine Rolle spielt, von deren muldenförmiger Lagerung abhängen. Es kann aber auch wieder nur an der Anordnung der wasserführenden Sprünge und Klüfte liegen, die gar nicht bis zu einer anderen geologischen Unterlage hinabreichen müssen. Als allgemeinste bekannte Eigenschaft der Karstgebiete darf also der karsthydrographische Gegensatz bezeichnet werden; so wollen wir die besprochenen Verhältnisse nennen. Er ist eine Tatsache von überragender Bedeutung. Für Wasser, das aus dem Inneren kommt, bringt er eine Zusammenfassung zu den Quellen mit sich, für solches, das in den Karst durch Schwundstellen hineinfließt, folgt daraus oft ein unterirdisches Auseinanderfließen, überall belegt, wo Beimengungen im Wasser einer Schwinde an mehreren Stellen als quellartige Wasseraustritte (frz. *résurgences*) wieder zum Vorschein kamen. Der karsthydrographische Gegensatz ist kein Gesetz, aber er ist überwältigend häufig. Die Zukunft erst wird vielleicht lehren, wie eng oder locker jener Gegensatz mit einer karstlithologischen Zusammenfassung der durchlassenden Klüfte zusammenhängt.

§ 7. In bezug auf Zusammenlaufen der Klüfte sollen nur einige Hinweise auf Dinge erfolgen, die nicht einfach als beziehungsloser Zufall gelten können. Schon in den Versuchen, die Daubrée gemacht hat, tritt uns eine Anordnung der Klüfte im Sinne seitlicher Zusammenfassung entgegen. Er hat Glasplatten und Prismen aus Formwachs, jene auf Torsion, diese auf Druck beansprucht. Abb. 68 zeigt auf Torsion beansprucht gewesene Glasplatten, die Häufigkeit der Sprünge im Inneren und auf der breiten Oberfläche, zeigt auch deren Zusammenlaufen zu den schmalen Seiten, welche den Abfällen am Rande vieler Karstgebiete entsprechen. Die Bilder sind Photographien von Wiederholungen der Daubréeschen Versuche durch

H. Schardt und wurden mit freundlicher Erlaubnis von H. Prof. R. Staub aufgenommen. Beanspruchung auf Torsion paßt gut zu manchen geologischen Vorgängen an Schichten, wenn eine Faltung oder Schiefstellung im Streichen eine immer steilere oder flachere Aufrichtung mit sich bringt. Bei Krustenbewegungen gilt ferner der Druck als besonders wichtige Beanspruchung. Die aufrechten Prismen, die Daubrée von oben und unten gepreßt hat, zeigen ebenfalls, daß die dichtesten Risse an den großen Seitenflächen aus dem Inneren hervortreten, während nur einzelne, zum Teil sich verlierende Klüfte gegen die kleinen unmittelbar gedrückten Grundflächen, noch häufiger aber gegen Kanten oder Ecken laufen.<sup>1)</sup> Diese Druckanordnung ist bei der Gebirgsbildung unter der Annahme tangentialer Drucke nur in solchen Felskörpern gegeben, die als einzelne Prismen, durch Blattverschiebungen getrennt, nebeneinander liegen, wobei die längste Dimension in die Druckrichtungen fiel. Es bedürfte einiger Zeichnungen und längerer, hier nicht nützlicher Überlegungen, um zu zeigen, daß auch in dieser Kombination gedrückter Felskörper die flacheren Teile der Landoberfläche die Risse dichter austreichen lassen als die seitlichen Ränder, wenn die Zerreißung den Versuchen Daubrées entspricht. Mit wirklichen Gesteinsproben hat Walter Schmidt Versuche gemacht.<sup>2)</sup> Er hat in einem Schnitt durch ein Prisma oder einen Zylinder deren Zerreißungen abgebildet, wo die senkrechte Höhe des Körpers nur etwa halb so groß ist als der Durchmesser der Grundflächen und wo die Mitte der Gesteinsprobe genau in die Linie der mittleren Angriffspunkte der Drucke fiel. Es zeigt sich, daß die niedrigen Seiten (Mantelfläche) des gedrückten Körpers hier weniger Zerreißungen erlitten als die in jeder Richtung breiten Grundflächen. Dabei ist bemerkenswert, daß in Daubrées Versuch jene ebenfalls von oben und unten gedrückten, aber relativ kleinen Grundflächen des hohen Prismas frei von den Rissen blieben. Allerdings war dort keine genaue Zentrierung der Druckanordnung angestrebt. Obwohl mit natürlichen Gesteinen vorgenommen, entspricht die von W. Schmidt abgebildete Versuchsanordnung nicht leicht einer im Karst wirklich vorkommenden Sachlage, selbst nicht, wo ein saiger gestelltes Schichtpaket horizontal wirksamen Drucken ausgesetzt wird. Sie dient ihm auch nur als Ausgangspunkt zur Widerlegung älterer Irrtümer in der Faltheorie. Hier muß es genügen, daß sich aus dem von Schmidt abgebildeten Versuch mit wirklichen Gesteinen kein Widerspruch zu der Bedeutung der Versuche Daubrées im Rahmen dieses Paragraphen ergibt.

§ 8. In der Natur werden nicht einzelne Schichtplatten und Felsprismen durch die Gebirgsbildung beansprucht, sondern viele Schichtlagen und daraus bestehende Körper. Die Schichtfugen sind an sich noch keine Risse und Sprünge, außer wo sie zu Gleitflächen geworden sind. Nur ein kleiner Teil der Schichtfugen dient zur Begrenzung von Höhlen, die das Wasser geschaffen hat. Unter den Höhlenquerschnitten sind die von einigen Schichtfugen begrenzten aber häufig. Man hat

---

<sup>1)</sup> Von den zehn Abbildungen Daubrées in der Deutschen Ausgabe seiner Synthetischen Studien zur Experimentalgeologie (Braunschweig 1880) hat v. Knebel zwei in seine Höhlenkunde (Nr. 25, S. 123 und 125) aufgenommen.

<sup>2)</sup> Sie gelten aber nicht der Aufklärung des hier dargelegten Problems, sondern anderen Zwecken. Vgl. „Gesteinsumformung“, Denkschriften des Naturhist. Museums, Wien. Bd. 3, 1925.

oft den Eindruck, daß einzelne Schichten rascher gelöst wurden. Betrachten wir hingegen die Klüfte, welche die Schichtfugen kreuzen, so lehrt die Beobachtung, daß sie größtenteils Bahnen des unterirdischen Durchflusses sind, der eben deswegen meistens geringe Wassermengen auf die einzelne Kluft kommen läßt, so daß nur ein Bruchteil stark, d. h. zu Höhlen erweitert wird. In Belgien ist mehrfach ein Gegensatz zwischen den Karstwasser führenden Diaklasen und den wasserlosen Schichtfugen aufgefallen (vgl. Nr. 24 S. 113 f). Zur Erklärung behauptet J. Hol, die Schichtfugen seien immer mehr oder weniger verschmiert. Dies trifft in mir bekannten Karstgebieten so wenig zu, daß die Frage erlaubt ist, wie oft die Verschmierung in Belgien beobachtet wurde und wie man sie gerade in Beschränkung auf Schichtfugen erklären will. Es ist also verständlich, daß das massenhafte Zusammenvorkommen von Schichtfugen und anderen Sprüngen noch nirgends die Ausbildung des karsthydrographischen Gegensatzes nachweislich beeinträchtigt hat, denn viele dieser kleinen Hohlräume kommen nie zu größeren Durchflußmengen. Bevor wir einzelnen Beispielen des karsthydrographischen Gegensatzes nähertreten, ist der auffälligen Tatsache zu gedenken, daß er sich an so vielen Kalkstöcken und -schollen äußert, die erst später durch Erosion oder unmittelbar durch tektonische Vorgänge voneinander abgesondert oder aus dem näheren Zusammenhang gebracht wurden. Wenn nun wirklich dieser Gegensatz auf konvergierender Kluftbildung beruhen sollte, so kann es sich dabei nicht um jene Klüfte handeln, welche durch Gebirgsbewegungen entstanden, als die Kalksedimente noch zusammenhängen, sondern um viel jüngere Zerreißen, die an den späteren Bruch- und Erosionsrändern zusammenlaufen. Und somit würde dann folgender Schluß unvermeidlich: Die letzten Krustenbewegungen, welche mit der Herausbildung des äußeren Reliefs der einzelnen Stöcke und Schollen verbunden waren, schufen erst die hydrographisch wichtigen Klüfte. Als die nördlichen Kalkalpen Österreichs noch eine zusammenhängende Hügelzone waren, wurden sie vorwiegend oberirdisch entwässert und waren daher kein Karst. Das Gesagte gilt natürlich nicht für jung gehobene löcherige Korallenriffe. Ob bei ihnen der karsthydrographische Gegensatz vorherrscht oder überhaupt wesentlich ist, entzieht sich beim gegenwärtigen Stand der Forschung meiner Beurteilung.

§ 9. Das Vorgebrachte soll durch einige Beispiele veranschaulicht werden. Dazu eignet sich u. a. das Tote Gebirge im Salzkammergut. Seine Außenwände sind mindestens 700 bis 800 m hoch und ihr Fuß reicht an der Erdoberfläche meist nicht bis zu einer undurchlässigen Unterlage hinab. Die verkarstete Oberfläche mißt 300 qkm und die Dichte der Regenschluckstellen in den Dolinenlandschaften wurde zu 140 bis 450 auf 1 qkm in Stichproben bestimmt (Nr. 31). Freilich nehmen typisch runde Dolinen und unregelmäßige Karrendolinen zusammen nicht die ganze Oberfläche ein, sondern vielleicht nicht viel über die Hälfte. Der Rest sind 20 bis 30° geneigte Schichtplatten, mit mäßiger Karrendichte. Aber auch diese Gebiete bergen kaum weniger Schluckstellen des Regens als die Dolinenlandschaften geringster Dichte (etwa 140 Schlucktrichter auf 1 qkm). Ihnen allen stehen gegenüber an der Außenseite des Toten Gebirges höchstens 12 starke Karstquellen, einschließlich bedeutender Mengen kalten Auftriebswassers in drei Seen, und die Zahl unbedeutender Quellen, die es noch gibt, ist kaum viel größer. Die Außenseite des Toten Gebirges

stellt in der Form von Steilabfällen eine Fläche von mindestens 80 *qkm* dar, d. i. über ein Viertel seiner Oberseite. Selbst wenn man auch noch alle einstigen Karstquellhöhlen dazu rechnet, die jetzt kein Wasser mehr zutage führen, gibt es, auf gleiche Flächen bezogen, viel weniger Quellöffnungen als ein Tausendstel der heutigen Regenschluckstellen.

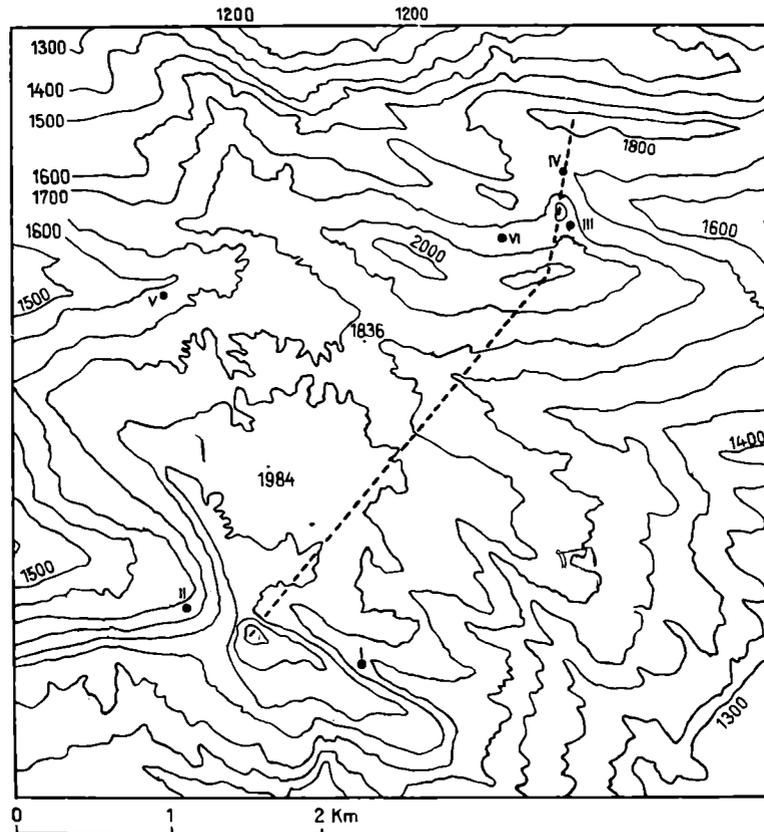


Abb. 1. Schichtenbild des Gottesackerplateaus am Hohen Iken nach Eckerts Kärtchen:  
I—VI: Quellen; gestrichelt: Profil der Abb. 2.

Wie ein Kartenstudium ergab, ist auch das Tennengebirge ein Beispiel, das ziffernmäßig belegt werden kann. Dort gibt es auf rund 100 *qkm* 470 Dolinen von solcher Größe, daß die neue Karte 1:25000 des Kartographischen Institutes in Wien in der etwas kantigen, aber hervorragend plastischen Felszeichnung des Herrn Obersten Popp jede einzeln darstellen konnte.<sup>1)</sup> Natürlich gibt es im Tennen-

<sup>1)</sup> Diese Felszeichnung zeigt, wie weit eine Plastik nackten Gesteins mit geringen Böschungen auch bei senkrechter Beleuchtung gesteigert werden kann. So hat sich durch die Hand des genannten Offiziers und einstigen Mappers in den Adamello-Presanella Alpen erst nach dem Umsturz ein zeichnerischer Stil entfaltet, der auf den alten österreichischen Spezialkarten meist in schablonenhafter Unvollkommenheit stecken geblieben ist und daher von vielen Seiten grundsätzlich abgelehnt wurde.

gebirge mindestens ein Mehrfaches von 470 Regenschluckstellen, deren kleine Mundform weit unter den Kartenmaßstab fällt. Aber wenn hier auch nur durchschnittlich 20 Regenschluckstellen auf 1 *qkm* entfallen würden — also 2000 im ganzen — so stehen ihnen doch bloß 20 Quellen verschiedener Stärke gegenüber. Die Fläche der felsigen Außenabfälle ist hier kaum kleiner als ein Drittel der Fläche des Plateaus. Als Beispiel eignet sich ferner das „Gottesackerplateau“ des Hohen Ifen, an der Grenze von Tirol, Vorarlberg und dem bairischen Allgäu. Es ist eine kleine, sehr wilde Karstfläche von nur 5 *qkm* Ausmaß in durchschnittlich 1935 *m* Höhe. Das Folgende stützt sich auf die Angaben von Blaas im geologischen Führer durch Tirol und die Darstellung M. Eckerts (Nr. 14) und wird durch Abb. 1 und 2 erläutert.

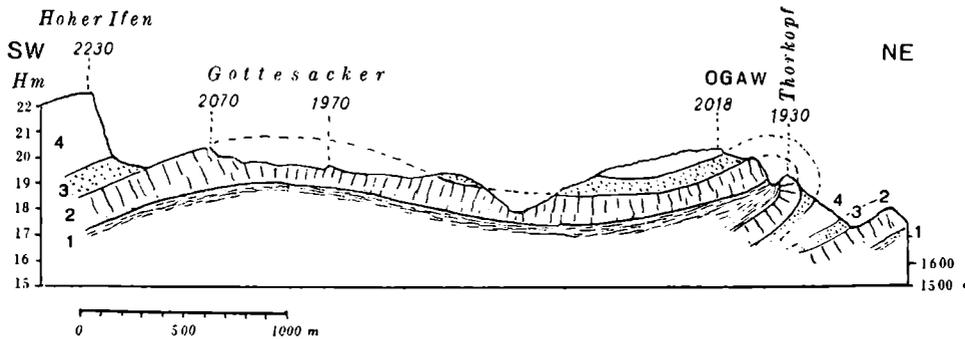


Abb. 2. Geol. Profil durch den Hohen Ifen und das Gottesackerplateau nach Blaas und Eckert. 1. Neokom-Mergel mit Inoceramen. 2. Schrätkalk (Urgon). 3. Gault, Sandsteine. 4. Seewenkalk und Mergel (am Hohen Ifen folgt die Zeichnung Blaas). O G A W = Obere Gottesackerwände.

Unter den Schrätkalken am Hohen Ifen, deren Mächtigkeit nach dem Profil wohl nirgends 150 *m* überschreitet, liegen undurchlässige Mergel. Durch Abtragung haben die Schrätkalke manchmal eine Dicke von erheblich unter 100 *m*. Das Wasser kann dort oben höchstens 20 bis 30 *m* weit fließen, ohne daß es der Untergrund verschluckt. Sogar diese Strecken dürfen bei der Zerrissenheit der Karrenfläche überraschen. Die Schneeflecken verschwinden im Hochsommer bis auf wenige. Immerhin ergeben sich daraus auf den 5 *qkm* des Gottesackers mehrere, wahrscheinlich aber viele hundert Abzugstellen. Im Gegensatz zu dieser Zahl fand Eckert im Umkreise dieses Karrengebietes nur 6 Quellen. Ihre niedere Temperatur weist darauf hin, daß mindestens 5 davon von den Schneeflecken gespeist werden. Sie schwellen nach heftigen Regengüssen sehr stark an.

Die Temperaturen dieser 6 Quellen, deren Verteilung das Kärtchen, Abb. 1, zeigt, waren:

	Höhe, <i>m</i>	Juli, °C	August, °C
I .....	1835	1,8	2,0
II .....	1740	2,2	—
III .....	1854	—	2,3
IV .....	1732	—	2,6
V .....	1675	3,5	—
VI .....	1850	2,5	—

Diese Quellen stellen also eine starke Zusammenfassung der Wasseradern dar, die sich innerhalb 50 bis 150 *m* Tiefe vollzieht, d. h. über der Mergelunterlage. Selbst wenn man darüber nachdenkt, wie weit Unebenheiten der erschlossenen Mergelunterlage bei dieser Zusammenfassung mitwirken, kann man dieselbe Tatsache im größtenteils unergründeten Karst des Toten Gebirges nicht übersehen. Daran stärkt sich die Vorstellung, daß die tiefen Teile eines mächtigen Karststockes sich weithin undurchlässig verhalten. Diese Vorstellung kann sich auf die schon früher in der Literatur aufgetauchte Überlegung stützen, daß der höhere Gebirgsdruck in der Tiefe Schicht- und andere Fugen im Gestein zu eng erhält, so daß keine merklichen Wassermengen eindringen können. Dies aber schließt den Bestand einiger besonders großen Klüfte tektonischer Herkunft in mehreren hundert Metern Tiefe nicht aus und verträgt sich als Ergänzung gut mit der karstlithologischen Zusammenfassung durchlässiger Klüfte; solche größere Hohlräume können entsprechend viel Wasser aufnehmen. Der von ihrem Wasserinhalt ausgeübte Druck kann selbst durch sehr enge Fugen merkliche Wassermengen pressen. Wo sie den Ausweg finden, entstehen allmählich gewisse Quellöffnungen, die später erstarkende Karstquellen entlassen. Nach Regen bemerkt man gewöhnlich, daß auch unbedeutendere und höher gelegene Öffnungen zeitweilig Wasser abgeben. Diese höheren Öffnungen sind oft die Austrittstellen früherer ständiger Quellen. Cvijić hat 1918 (Nr. 11) als wesentlichen Zug einer voll entwickelten Karstentwässerung drei Stockwerke („Zonen“) der Wassererfüllung im Karst unterschieden; das unterste, wo die Hohlräume stets wassererfüllt sind, darüber ein solches, wo die Hohlräume periodisch durchflutet und dann nur in den Engen vollgefüllt werden; zu oberst liegen die ständig trockenen Höhlen. Hier erhebt sich die Frage, wie häufig tiefgelegene Hohlräume in den Pausen zwischen den Regen bei entsprechender Anordnung leerlaufen und die andere, wie jeder Abfluß des Regens eine ständige Wasseransammlung in der Tiefe erreichen soll, wenn er nicht in allen Höhen unter der Oberfläche zeitweilig Hohlräume durchfließt, sei es auch nur in Gestalt von Tropfwasser. Diese Fragen aufwerfen bedeutet bereits, daß man sich dem Zonenschema von Cvijić nicht anschließt.

## HAUPTTEIL.

### I. Hydrographische Wegsamkeit und karsthydrographische Wirksamkeit der Hohlräume in Verbindung mit Löslichkeit der Karstgesteine.

§ 10. Nach dem gewonnenen allgemeinen Begriff von wichtigen Eigenschaften der Klüftigkeit folge eine zunächst ebenfalls ganz allgemeine Würdigung der Lösbarkeit der Karstgesteine. Als Maß der „Löslichkeit“ gelten die Gewichtsteile der gelösten Stoffe in einer bestimmten Gewichtsmenge des Lösungsmittels im Zustande des Gleichgewichtes der Konzentration.<sup>1)</sup> Im Karst kommt es aber nicht

<sup>1)</sup> Den ursprünglich hier verwendeten Ausdruck „Sättigung“ habe ich auf fachmännischen Rat vermieden.

auf die Löslichkeit, sondern auf die Lösungsgeschwindigkeit an, wenn man morphologische und hydrographische Vergleiche der in langen Zeiten erreichten Wirkungen ziehen will. Wo Hohlräume erheblich durch Auslaugung erweitert werden, kommt es gar nicht zu hoher Konzentration des sie durchströmenden Wassers. Über die Beziehungen zwischen Löslichkeit und Lösungsgeschwindigkeit habe ich von Herrn E. Baur, Prof. f. physikalische Chemie an der Eidg. Techn. Hochschule eine klare Auskunft bekommen: Unter sonst gleichen Umständen, d. h. vor allem bei gleicher Differenz zwischen der augenblicklichen und größten möglichen Konzentration steht die Lösungsgeschwindigkeit in einem geraden (arithmetischen) Verhältnis zur Löslichkeit. In der Natur sind nun aber die Umstände sehr ungleich und wechselvoll, so z. B. der Bewegungszustand und Säuregehalt der lösenden Gewässer, die Form und Beschaffenheit der Oberfläche der Höhlenwände. Daher ist für den Karstforscher äußerste Vorsicht und Zurückhaltung gegenüber allen Schlüssen aus der „Löslichkeit“ am Platze. Was die Oberfläche der einer Lösung ausgesetzten Karstgesteine betrifft, so ist besonders zu beachten, daß die Lösungsgeschwindigkeit an den Kristallflächen je nach der Lage und Richtung recht verschieden ist. Man kann nach der Auskunft des Herrn Prof. Baur die öfter berichtete langsamere Lösung kristallisierter Gesteinsteile jeder Art nicht einfach als eine im selben Verhältnis geringere Löslichkeit ansprechen.

Schon früher hat Katzer Zweifel vorgebracht, ob nicht Ed. Richter die Bedeutung der Löslichkeit für die Verkarstung überschätzt habe. Seine Zweifel sind vereinzelt, aber unwiderlegt geblieben (vgl. Nr. 24, S. 10).

§ 11. Klüfte, in denen das Wasser nie fließt, werden auch nicht erweitert, Klüfte, in denen das Wasser zwar fließt, aber dabei verdunstet, werden schließlich durch die zugleich eintretende Sinterbildung verengt und selbst verstopft. Klüfte dieser beiden Arten sind oder werden hydrographisch, d. h. für den Abfluß unwegsam. Nur solche Klüfte werden durch Lösung merklich erweitert, in denen das Wasser dazukommt, mit ungesättigter Lösung hindurchzufließen; nur diese Klüfte und Kluftstrecken sind hydrographisch wegsam. Es liegt schon in der Fassung dieser Begriffe, daß dauernd hydrographisch wegsame Klüfte sich nicht aus unwegsamen entwickeln können. Vielmehr müssen die wegsamen von Haus aus andere Eigenschaften und Stellungen gehabt haben. Die hydrographisch wegsamen Klüfte sind deswegen noch lange nicht karsthydrographisch wirksam, d. h. der Durchfluß in ihnen kann so langsam sein, daß er länger als ein Abflußjahr braucht und durchaus nicht mit den starken kurzfristigen Schwankungen der Karstgewässer auf die jährlichen Niederschlagsperioden innerhalb weniger Tage bis einiger Wochen antwortet. Klüfte, die aber von Anfang an wenigstens hydrographisch wegsam sind, können sich jedoch zur karsthydrographischen Wirksamkeit entwickeln.<sup>1)</sup> Damit eine Kluft wenigstens wegsam im genannten Sinne sei, müssen von Anbeginn zwei Bedingungen erfüllt sein:

1. Ihr oberer Ausgang muß derart beschaffen sein, daß das Wasser hineinfließt.

<sup>1)</sup> Dieser Begriff ist etwas wesentlich anderes, als das, was A. Grund ohne scharfe Fassung als hydrographisch „nutzbar“ bezeichnet hat.

2. Ihre Gestalt und Verbindung mit anderen Klüften muß derart beschaffen sein, daß das hineingeflossene Wasser darin weder stecken bleibt, noch verdunstet, sondern auch herausfließt.

Klüfte, die wenigstens diese zwei Bedingungen erfüllen, können unter Umständen so erweitert werden, daß das Wasser zum Hindurchfließen viel weniger Zeit als ein Abflußjahr braucht, d. h. sie können karsthydrographisch wirksam werden.

§ 12. Unter „Hineinfließen“ in die Klüft ist nicht das bloße kapillare Angesogenwerden von Wasser gemeint. Denn dadurch wird das Wasser von Oberflächenkräften zu einer an sich schon begrenzten Tiefe geführt und dann gegen die Schwere festgehalten. In § 28 wird gezeigt, wie überraschend gering die Wassermengen sind, die auf solche Art in ganze Kubikkilometer Gesteins kommen können. Aber die Karsthydrographie braucht keine Saugwirkungen. Vom heutigen Standpunkt der Physik kann man weniger denn je bezweifeln, daß jede Fuge, sei sie noch so fein, wasserdurchlässig ist, sobald ein wirksamer Druck ausgeübt wird. Alles andere ist dann nur eine Frage der Zeit, die freilich ungeheuer lang werden kann. Die physikalische Durchlässigkeit bedeutet auch sonst noch keine hydrographische Wegsamkeit, auch nicht im bescheidensten Ausmaß. Ein drohendes Hindernis für die Aufrechterhaltung einer von der Schwere eingeleiteten Fließbewegung sind die vorher angesogenen Wasserteilchen selbst, wenn sie, was oft und leicht geschieht, Luftblasen einschließen.<sup>1)</sup> Die Schwere allein kann nicht einmal die Fähigkeit aufbringen, das Wasser in alle Klüfte hineinfließen zu lassen, selbst wenn diese deutlich makroskopisch kapillar sind, von geologischen Haarfugen zu schweigen. Wind und Spaltenfrost oder Wurzeldruck müssen ihm erst helfen, indem sie wenigstens die erste Bedingung der Wegsamkeit am Eingang der Klüfte erfüllen helfen. Denn die genannten Arbeiter schaffen aus Haarfugen die Klüftkarren, in die das Wasser



Abb. 3. Querschnitt durch eine Karrenklüft, in der etwas Regenwasser mit der Druckhöhe  $bc$  auf das Wasser in der Haarfuge darunter drückt. Die Haarfuge ist deutlich und etwas breit gezeichnet. Sie hat Wasser mit der Tiefe  $ba$  angesogen, das durch den Druck auf  $b$  in langsame Bewegung kommt und auch in ihr verharrt, solange die Tiefe des ganzen Wassers den Wert  $ba$  übersteigt. Die Verdunstung, die oben und unten an diesem Wasser zehrt, kann in geographischen Zeiträumen im Karst erheblich ins Gewicht fallen.

<sup>1)</sup> Herr Prof. A. Smekal, derzeit in Halle, hat mir in Wien freundlicherweise mit einem physikalischen Versuch den erstaunlichen Widerstand gezeigt, den Luftblasen in der Wasserfüllung kapillarer Glasröhren jedem Versuch ihrer Verschiebung entgegensetzen. In manchen Fällen braucht es Pumpen, damit das Wasser samt diesen Blasen verschoben werden kann. In rauen, engen Röhren werden Lufteinschlüsse sozusagen unvermeidlich.

ohne weiteres hineinfließen und einen ersten schwachen Druck ausüben kann. (Der Vorgang ist von H. Crammer 1902 in Petermanns Mitteilungen in allen wesentlichen Zügen dargestellt worden, welche Theorie M. Eckert [in Nr. 14] für gewisse Fälle noch mit Einzelheiten ausgestaltet hat.) Diese Kluftkarren sind eine oberflächennahe Erscheinung; das gilt auch von solchen, die gut 10 *m* tief sind, wie ich sie in der Kriwoschije nördlich der Bucht von Cattaro sah, oder auch von einer Tiefe bis 22 *m*, die Eckert vom Gottesackerplateau meldet. Dabei sind diese hohen Werte schon sehr seltene Ausnahmen zwischen massenhaften kleineren. In Karrenklüften fließend, bzw. über den noch unerweiterten Haarfugen ihres Grundes stehend, muß dieses Wasser auf die darunter angesogenen Teile gemäß Abb. 3 drücken. Und wenn keine Lufteinschlüsse im Wege sind, so wird das zunächst bloß angesogene Wasser, der Kleinheit des Druckes entsprechend, äußerst langsam in die Tiefe geschoben. Andernfalls rührt sich gar nichts. Nehmen wir aber an, die ursprünglichen Verhältnisse gestatten die Einleitung und Fortsetzung dieses sehr langsamen Hinabfließens. Sobald nun dieser Vorgang in Verbindung mit einer schwachen Lösung an den Wänden an einer begrenzten Stelle rascher fortschreitet, so entsteht am Grunde der Karrenkluft ein sich langsam vertiefendes Loch als besondere Erweiterung der Haarspalte; man kann es auch einen kleinen Schacht nennen. Damit schwächt sich das Hineinfließen längs aller übrigen Strecken der Haarfuge ab. Denn dieser kleine Schacht verkürzt den Aufenthalt des Wassers in der Nachbarschaft und setzt die ohnehin geringe Druckhöhe im größeren Teil der Karrenkluft herab. Dafür wird das Hinabfließen an dieser einen Stelle begünstigt. Nochmals wird die allgemeine Vertiefung der Karrenkluft und Ausweitung ihrer Haarfuge längs des Grundes geschädigt, wenn der junge kleine Schacht auf einmal unten keinen Boden mehr hat, weil er auf eine schon offene Kluff stößt, in die nun das Wasser leicht hineinrinnen kann. Sobald aber vom Wasser, das so langsam durch kaum erweiterte Haarfugen in die Tiefe dringt, etwas weitere Hohlräume angetroffen werden, muß es an deren Wänden sich ausbreiten, ohne den ganzen Querschnitt zu erfüllen. Die Tiefe und Weite dieser Wandausbauchungen, auf deren Vorhandensein das Wasser keinen Einfluß hat, die Beschaffenheit der Luft an der erweiterten Stelle, entscheiden nun, ob auch die zweite Bedingung der hydrographischen Wegsamkeit erfüllt ist, daß nämlich das Wasser der befeuchteten Kluffwände weder ganz verdunstet, noch so viel Sinter hinterläßt, daß er auf die Dauer den Durchgang verstopft. Wenn sich hingegen die Kluffbahn als wegsam erweist, sei es auch nur in der Form, daß das hinabgeflossene Wasser am Tage wieder irgendwo aus einer Fuge herausschwitzt — selten genug sieht man das unter Tausenden Haarfugen — so ist diese Wegsamkeit nicht das Ergebnis einer Entwicklung; eher würde der Ausdruck „Auslese“ der wegsamen Fugen passen, wenn man nur dabei nicht vergißt, daß das eine Metapher ist, die sprachlich sehr glatt wirkt, aber an sich nichts anderes besagt, als daß ein Teil der Fugen schon ursprünglich die später deutlich gewordene Eigenschaft großer Durchgängigkeit besaß.

Erst die von Haus aus wegsamen Fugen können nun zum Teil eine Entwicklung durchmachen, welche in geologischen Zeiten wenigstens die weiteren davon so stark auslaugt, daß der Durchfluß karsthydrographisch wirksam wird. Haben die betreffenden Klüfte nämlich eine große Erstreckung, so wird das zunächst in der Enge

spärlich vordringende Wasser unterwegs mit Gesteinslösung gesättigt und damit hört die Erweiterung der noch zu durchfließenden Strecken auf. Da aber beim Durchfluß doch Lösung hinausgeschafft wird, so verschiebt sich die Stelle, wo die Auslaugung aufhört, selbst ins Innere, langsamer noch als das Wasser. Von den kapillaren Geschwindigkeiten wird § 39 handeln. Während die einen wegsamen Fugen erst eine lange Zeit der Ausweitung durchlaufen müssen, sind andere von Anbeginn an so weit, daß sie, im Falle der Abfluß sich ihrer bedienen kann, bald die jährlichen Niederschlagsschwankungen in heftiger Weise nachahmend wiedergeben, d. h. solche Klüfte haben von Anfang an die für karsthydrographische Wirksamkeit nötigen Querschnittsgrößen. Die durch Sinter verheilten Spalten an den Wänden großer Höhlen zeigen, wievielen Klüften schließlich die Wegsamkeit versagt wurde, weil die zweite, oben aufgestellte Bedingung nicht erfüllt war. Sie wird gewöhnlich nicht erfüllt in Tiefen, wohin der helfende Spaltenfrost und Wurzeldruck nicht hingelangen. Die vorgenführte Betrachtung ist für den Fall von Kluftkarren abgeleitet worden, ohne wesentliche Änderung ist sie auch gültig, wo Dolinen ihre erste Anlage finden, oder auch am Grunde von Bachbetten, selbst, wenn sie nur periodisch Wasser führen, das auf angesogenes Wasser einen Druck ausübt.

§ 13. Das Vorkommen mehr oder weniger weiter Urhohlräume tektonischen Ursprungs im Karst ist heute erfahrenen Höhlenforschern längst kein fremder Gedanke. Wo große Hohlräume häufig sind, kann der Mitwirkung einiger allmählich erweiterter wegsamer Fugen für die Züge des Karstabflusses nur eine bescheidene Nebenrolle zugeschrieben werden. Wenn die Verkarstung des Kreidemergel- und Kalkgebietes östlich Paderborn in einem hügeligen Land in geringer Meereshöhe seit 200 bis 300 Jahren solche Fortschritte macht, daß man die an den einstigen Bächen trockengelegten Dörfer kennt, so erklärt sich dies dadurch, daß die Gewässer überall klaffende Fugen beim Einschneiden bloßgelegt haben. Es ist ganz unerwiesen, daß alle oder die meisten ursprünglichen Klüfte und Fugen in einem Karstgestein zusammenhängen, es ist nicht einmal wahrscheinlich. Erst recht ist es sehr unwahrscheinlich, daß ein kleiner Teil dieser Hohlräume, nämlich die hydrographisch wegsamen Klüfte in einem Karstgestein alle zusammenhängen. Ganz unwahrscheinlich ist aber ein solcher Zusammenhang aller karsthydrographisch wirksamen Wasserbahnen. Damit verliert die Auffassung, welche uns in A. Pencks Zeichnungen von 1903 (in Nr. 37) entgegentritt, alles Gewicht. Und hinfällig werden die durch sie gestützten Vorstellungen von A. Grund, als ob der Zusammenhang der wasserdurchflossenen Klüfte gewöhnlich ausreiche, um auf die Karsthydrographie weitgehend ein Grundwasserschema zu übertragen.<sup>1)</sup>

§ 14. Der Unterschied zwischen geologischen Haarspalten und -fugen und andererseits den Klüften deckt sich nicht mit der physikalischen Unterscheidung kapillarer und überkapillarer Querschnittsgrößen und beides ist wieder verschieden von dem, was soeben als unwegsam, wegsam und wirksam in einem hydrographischen Sinne vorgeführt wurde. Röhren von 4 bis 6 mm Durchmesser halten noch sehr reines Wasser als angesogenen Tropfen dauernd gegen die Schwerkraft fest. Bei

---

<sup>1)</sup> Ein gedrängter Nachweis hierfür findet sich in Nr. 31.

nicht reinem Wasser können die so wirkenden Durchmesser auf die Hälfte sinken. Damit ist der Grenzbereich gegeben, welcher unter allen Umständen von den kapillaren Querschnitten die überkapillaren im Sinne der Physik scheidet.<sup>1)</sup> Bei geologischen Haarfugen u. dgl. ist man noch tiefer im Bereich der Kapillarität. Hier hat höchstens die Unterscheidung mikroskopischer und makroskopischer Hohlräume einen Sinn. Eine Fuge von 0,5 mm Weite bleibt noch erheblich hinter der oberen Grenze der kapillaren Durchmesser zurück, ist aber doch kaum mehr eine Haarfuge im geologischen Sinne.<sup>2)</sup> So ergibt sich innerhalb der kapillaren Ausmaße (kapillar im Sinne der Physik) eine Scheidung in feinkapillare Durchmesser, zu denen u. a. sowohl sichtbare wie unsichtbare geologische Haarfugen gehören, und in großkapillare Durchmesser. Die Scheidung kann vorläufig u. zw. bei etwa  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{2}$  mm vorgenommen werden. Sie ist für den Physiker bedeutungslos, nicht aber für den Karstforscher. Denn nach dem, was ich von versinterten Schwärmen von Fugen gesehen habe, liegt innerhalb der großkapillaren Weiten bis zu 2 oder 3 mm hinauf jeweils die Trennung hydrographisch unwegsamer und wegsamer Fugen (vgl. § 11). Die künftige Forschung wird diese Grenzen nicht wesentlich mehr verschieben.

§ 15. Daß der Dolomit nicht überall als Karstgestein auftritt, pflegt man mit dessen etwas geringerer Löslichkeit zu erklären, obwohl die viel größeren Unterschiede in der Löslichkeit zwischen Gips und Kalk mit starker Verkarstung keineswegs für eine solche Auffassung sprechen. Kalk und Dolomit müßten dann gemeinsam eine im Vergleich zum Gips sehr wenig entwickelte Verkarstung aufweisen (vgl. §§ 21 bis 23). Auch hier eröffnet die Betrachtung der Klüftigkeit einen viel einleuchtenderen Ausweg. Dolomit in ruhiger oder wenig gestörter Lagerung weist eine echte Karstentwässerung auf, so im Frankenjura und selbst in Einlagen auf dem

<sup>1)</sup> Im § 28 wird dargelegt, daß zwischen Platten, deren Abstand kapillaren Rohrdurchmessern entspricht, die Steighöhe des angesogenen Wassers nur halb so hoch wie in den Röhren ist.

<sup>2)</sup> A. Grund hat mikroskopische Haarspalten von makroskopischen Klüften und Schichtfugen unterschieden (Nr. 22, S. 152). Aber schon der nächste Satz verwischt diese Unterscheidung wieder: darin werden die „Haarspalten“ (nur die mikroskopischen? L.) als hydrographisch nicht „nutzbar“ bezeichnet, weil sie das Wasser in Gestalt der Bodenfeuchtigkeit festhalten. Einige von ihnen sollen „ausgewählt“, „zu Klüften erweitert und dadurch hydrographisch nutzbar“ werden. Was ist nun mit jenen makroskopischen Schichtfugen und selbst Klüften, die ebenfalls eng genug sind, um Bergfeuchtigkeit festzuhalten? Sollte A. Grund von dem Vorkommen solcher nichts gewußt haben? Wenn er es bezweifelte, so war das in einer so wichtigen Sache ausdrücklich hervorzuheben. — Die Grenze der Sichtbarkeit von Gesteinsfugen, die dunklere feine Linien vorstellen, liegt in normaler Sehweite zwischen  $\frac{1}{30}$  und  $\frac{1}{50}$  mm Breite (nach dem Handb. d. Augenheilkunde: Die Untersuchungsmethoden, Bd. I., bearb. v. E. Landolt und Langenhan; 3. Aufl. 1920, S. 426f.). Das Minimum visibile (nicht separabile) des Seh winkels habe ich für obige Werte zwischen 15'' und 45'' angenommen und nach unten abgerundet.<sup>1)</sup> — Wieso eine Anzahl so enger Fugen ausgewählt und zu Klüften erweitert werden könne, selbst wenn man bis zu den schon makroskopischen Werten von 0,1 mm hinaufgeht, und was die hydrographische Nutzbarkeit makroskopischer Klüfte in der Wirklichkeit bedeuten könne, solange es sich um Bruchteile von Millimetern handelt, diese naheliegenden und schwerwiegenden Fragen lassen A. Grund's Werke unerörtert und auch sonst ohne Antwort. Wäre sonst seine Lehre überhaupt aufgestellt worden?

<sup>1)</sup> Herrn Hofrat Prof. Dr. Fuchs, Wien, danke ich für eine freundlich gegebene schriftliche Auskunft, welche mich über mein richtiges Verständnis der betreffenden Stellen des ophthalmologischen Werkes beruhigte.

Toten Gebirge.<sup>1)</sup> In Niederösterreich, wo er vom Deckenschub ergriffen und in Schuppen gelegt wurde, ist er — anders als der Kalk — ganz gewöhnlich in ein tektonisches Trümmerhaufwerk verwandelt worden, das dann meist durch Kalzitnähte im Gebirgsverband zu einem ziemlich deutlichen Brekziendolomit verkittet wurde. Abgesehen davon ist die Zerklüftung nur mäßig. Wo der Kitt fehlt oder geschwunden ist, kann man den anstehenden Dolomit gleich in Kies- und Sandgruben abbauen (so bei Vöslau ssw. von Wien). Der so beschaffene Dolomit hat eine gewöhnliche, oberirdische Entwässerung. Es zeigt sich also, daß die Entstehung zahlloser feiner Fugen bei der tektonischen Zertrümmerung des spröderen Dolomitsfelsens die Wasserzirkulation nur zur Verkittung veranlaßt, also für die Karstentwässerung hinderlich ist. Der Kalk hingegen, der nicht durchwegs so klein zerdrückt wird, kann in seinem Inneren weite tektonische Klüfte leichter offen halten als ein zerdrücktes Haufwerk von Felsscherben verschiedenster Größen. Demgemäß bleibt dem Kalk in diesen großen Klüften eine wesentliche Bedingung zur raschen Durchfuhr größerer Wassermassen in der Tiefe erhalten auch in Gegenden, wo er stärksten Beanspruchungen der Gebirgsbildung ausgesetzt war.<sup>2)</sup> Mit dem Gesagten stimmt es gut überein, daß Fr. Kerner-Marilaun von Dalmatien berichtet, dort sei der Dolomit bald verkarstet, bald nicht. Denn wenn auch die Aufzählung örtlicher Fälle noch aussteht, so weiß man doch, daß in einigen Teilen Dalmatiens die Gesteine nur einen sanften Faltenwurf, in anderen jedoch durchgreifende Überschiebungen mitgemacht haben.<sup>3)</sup>

§ 16. Auch die Klüfte des Gipses sind nicht alle von Haus aus nur geologische Haarspalten. Wo sich nämlich Gips bei Raummangel aus Anhydrit entwickelt hat, mußte er sich fälteln, um sich die durch die Wasseraufnahme bewirkte Volumszunahme zu verschaffen (vgl. Abb. 69). Dabei entstehen ganz ansehnliche, mindestens großkapillare Hohlräume. Das gilt auch dort, wo die Verwandlung des Anhydrites in Gips ohne Fältelung möglich war. Nur sehen dann die Hohlräume etwas anders aus. Ein solcher Fall liegt im „Kalkberg“ bei Segeberg in Holstein vor. Er ist, wie wir durch K. Gripp (Nr. 18) wissen, als Hut eines emporgedrungenen Salzstockes durch Weglösen des Salzes entstanden und mit in das Bereich der Niederschläge und des Wassers im Untergrund emporgehoben worden. Dabei wurden die äußeren

<sup>1)</sup> Der eigentliche Frankendolomit wird von Helmut Cramer (Nr. 8, S. 245) als sehr poröses Gestein geschildert, bestehend aus kleinen Kristallen mit einem Kalkmörtel, der sich schneller löst, so daß die Kristalle als Dolomitasche zurückbleiben. Die Zerklüftung bezeichnet C. als „außerordentlich“. Dadurch werden die bedeutenden Höhlenbildungen verständlich, die anscheinend dem Zerfalle des Muttergesteins vorangehen. Die Dolomitasche ist natürlich selbst wieder löslich und wenn sie auch einem durch Lösung veranlaßten mechanischen Zerfall entstammt, kann es zu Fehlschlüssen führen, von ihr zu erwarten, daß sie sich als „Lösungsrückstand“ immer mehr anhäuft, wie es Cramer (a. a. O. S. 311 in Anm. 42) allem Anscheine nach tut.

<sup>2)</sup> Im Tennengebirge klafft in der Höhle der Eisriesenwelt ein tektonischer Riß, 300 bis 400 m unter der Hochfläche, über 1 km vom Außenabfall entfernt; der Riß ist 5 bis 8 m breit, 250 m lang und 30 bis 60 m hoch. (Länge und Höhe sind Minimalwerte). Diese „Gerade Kluff“ entstand allerdings erst nach Trockenwerden der Höhle. Eben darum ließ sich ihre tektonische Ursprünglichkeit beweisen. Vgl. Nr.

<sup>3)</sup> Quellengeologie von Mitteldalmatien. Jahrb. d. Geol. Reichsanst. Wien, 1917, 46. Bd., 1916.

Teile des Anhydrites ganz in Gips verwandelt. In seinen jetzigen Ausmaßen hob sich der merkwürdige Berg erst seit dem Schwinden der letzten großen Vereisung heraus. Indem sich der Fels dabei durch die Moränendecke emporwölbte, die er heute nach allen Seiten um fast 60 m überragt, wurden seine Schichtfugen steilgestellt, wobei er bedeutende klaffende Risse bekam. Die Oberflächenwässer haben von den Fugen aus, in welche sie eingedrungen sind, den Anhydrit teilweise in Gips verwandelt. Die Volumszunahme konnte sich hier nur in der Verengerung der Fugen des Anhydrits äußern. An Stelle der Fältelung hat vor allem der kaum gehemmte saline Auftrieb dem Raumbedarf Luft gemacht. Im Inneren und Untergrunde dieses Berges wurde 1913 von Kindern eine mit allen Verästelungen 900 m lange Höhle entdeckt, die durch Auslaugung des Gipses entstanden ist (Abb. 4 u. 5).

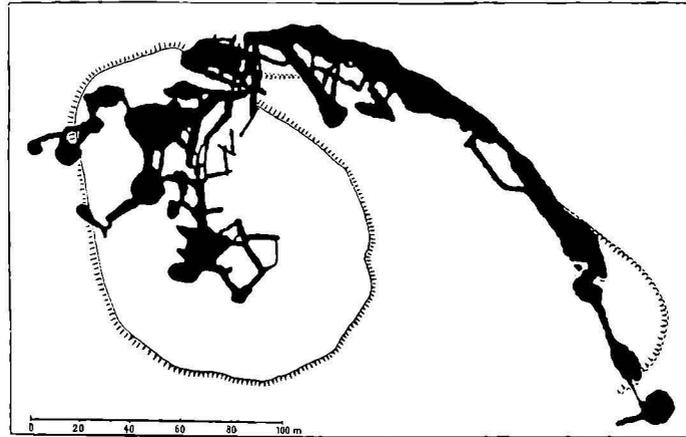


Abb. 4. Plan der Gipshöhle von Segeberg (Holstein). Verkleinert nach dem Plane von E. Hentze (aus Gripp, Nr. 18).

Das auslaugende Gewässer hing wahrscheinlich mit dem benachbarten Moränensee (Kleiner Segeberger See) zusammen, denn in der ganzen Höhle, die geringe Höhenunterschiede aufweist, fanden sich Gehäuse von *Planorbis corneus* und *Limnaea stagnalis*. Heute ist die Höhle, wenigstens in den zugänglichen Teilen, durch weitere Aufbiegung längst von der Verbindung mit dem See abgelöst worden. Die Abb. 70 zeigt die steilstehenden, noch gutenteils anhydritischen Schichten, wo die Westwand des fiskalischen Steinbruches auf Gips weit ins Innere der Erhebung vorgetrieben worden ist. Stellenweise ist in den Gips der Höhle ein Plattendolomit eingeschaltet und im Südostgang zeigt der Gips stehende spitze Falten (keine Fältelung). Zu ihrer Erklärung denkt Gripp (S. 39) daran, daß die Schichten nach ihrer Aufrichtung in sich selbst zusammensanken, denn es handelt sich um eine örtlich beschränkte Ausnahme. Bei der Aufrichtung wurde der Gesteinsverband überhaupt sehr gelockert. Schichtfugen klafften auf und andere Spalten bildeten sich von einer Größe, daß diluviale Ablagerungen hineingelangen und sogar in die Höhle sacken konnten. In dieser selbst läuft „bei fast allen Hallen und Gängen eine mehr oder weniger klaffende, von Sand oder Lehm erfüllte Kluft an der Decke entlang“. Sie ist übrigens auch am

Boden trotz Auffüllung erkennbar (vgl. Abb. 71). „Die Klüfte sind offenbar für die Entstehung der Höhle von großer Bedeutung gewesen.“ Gripp erwähnt auch flachliegende Risse, so daß man versteht, wie sich einst die Höhle im Anschluß an den benachbarten See mit Wasser füllen konnte. Es war stagnierendes Wasser, das nur Dichtekonvektionsströmungen aufwies (vgl. § 87), indem die Wasserteilchen mit mehr konzentrierter Gipslösung untersanken und wie die Erweiterung der Klüfte beweist, auch einen Ausweg hatten. Es ist klar, daß hier enge Fugen des Anhydrits bei der Wasseraufnahme noch enger werden mußten. Wenn sich dennoch 20 bis 30 cm breite Spalten mit Moräne erfüllt vorfinden, und nach der Seite eine Wasserverbindung entstand, die Tiere in die Höhle gelangen ließ, so erkennt man, daß außer Haarfugen schon bei der Entstehung des Berges noch andere vorhanden waren; ihre Ausmaße waren selbst nach der Verengung — die ganze Höhle liegt in Gips mit etwas Dolomit — noch so groß, daß schwache Konvektionsströmungen

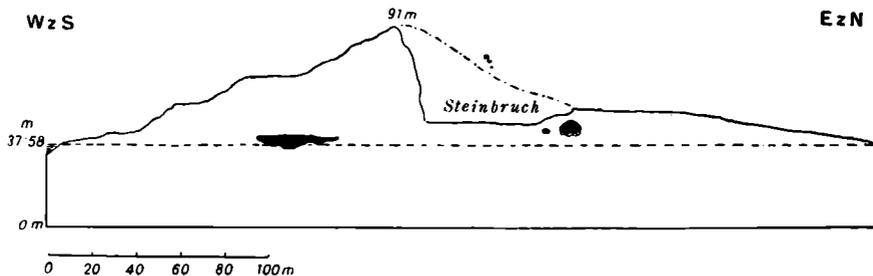


Abb. 5. Durchschnitt durch den Segeberger „Kalkberg“ mit seiner Höhle und dem Steinbruch. Die strichpunktierte Linie ergänzt die Berggestalt nach der Erinnerung; 37·58 m Niveau des Kleinen Segeberger Sees.

seit der Eiszeit daraus Hohlräume mit Querschnitten bis zu  $30 \times 15$  m auslaugen konnten, und zwar in jenem heute schon wieder abgeschlossenen Zeitraum, während dessen die Höhle wassererfüllt war. Die Gestalt des Höhlengrundrisses (Abb. 4) entspricht recht gut den randlichen Zerreibungen, die ein Gesteinskörper nach Saigerstellung seiner Schichten erleiden kann, wenn er mit ungleichmäßig verteilter Stärke pfpfenartig emporgetrieben wird.

Wir sehen also, daß bei keinem Karstgestein die Bildung von ursprünglichen Hohlräumen ausgeschlossen werden kann, deren Durchmesser nach Dezimetern zählt. Sie sind viel spärlicher als die geologischen Haarspalten aller noch möglichen Ausmaße, aber durchaus nicht so selten, daß ihnen ein oft beherrschender Einfluß auf die Karsthydrographie abgesprochen werden dürfte. Denn sie sind von selbst die Kammern, wo an vielen Stellen verschlucktes und versickertes Wasser zusammengefaßt wird. Wie beim Dolomit ist auch beim Sulfat die geringere innere Deformation des ungefältelten Segeberger Gesteins mit dem Vorkommen der weiteren Hohlräume verbunden. Wassererfüllte Höhlen, in denen sich Drucke von mehreren Atmosphären einstellen, können ihrerseits eine „Auslese“ unter den feineren Fugen bewirken. Denn nur die Fugen, welche sich unmittelbar an die Sohlen der wasserreichen Höhlen anschließen, werden samt ihrem Wasserinhalt einem örtlich ver-

stärkten, ständigen Druck ausgesetzt, und dann ist die Aussicht, daß sie in absehbaren Zeiträumen zur karsthydrographischen Wirksamkeit gelangen, doch viel größer als unter den wenigen Zentimetern vergänglicher Wassertiefe in einer Karrenkluft. Wasserhöhlen sind nicht nur die Sammler der Wasseradern bereits wegsamer Klüfte, sondern sie senden solche auch aus, wo die Natur dafür die Voraussetzungen geboten hat. Wo gewisse Höhlenstrecken vom Gehänge angeschnitten werden, ist der Fels der ganzen Umgebung von kleinen Höhlenmündungen durchsiebt. Das mir bekannte schönste Beispiel bietet die Peggauer Wand, links der Mur oberhalb Graz.<sup>1)</sup> Andere Höhlenstrecken sind hingegen so angeschnitten worden, daß lückenloser Fels das Tor umgibt. Solche Gegensätze beweisen, daß es nicht erlaubt ist, in einem zusammenhängenden Karstgebiet mit mehreren Höhlen eine Wasserverbindung zwischen ihnen als sicher anzunehmen.

§ 17. Was hier der Vergleich der natürlichen Ausschnitte verschiedener Höhlen ergab, das lehren uns auch die Beobachtungen in künstlichen Stollen. K. v. Terzaghi (Nr. 44) hat technische Erfahrungen überliefert, nach denen ein Wasserleitungsstollen in Kalk auf Strecken von 200 m Länge bis zu 2 cbm/sek Wasser versitzen ließ. In einem anderen Falle brauchte ein ebenso langer Kraftstollen im Kalkfels keinerlei Verkleidung, weil keine merklichen Wasserverluste eingetreten sind. Ebenso ungleich hat sich z. B. auch Hauptdolomit verhalten, wie die Gegenüberstellung der Erfahrungen lehrt, die beim Bau des Walchenseewerkes und bei dem der Kraftanlage am Spullersee in Vorarlberg gemacht wurden. Diese Kenntnis verdanke ich einer mündlichen Mitteilung meines Freundes, Herrn Oberbergrates Dr. Otto Ampferer. Der Hauptdolomit am Spullersee in Vorarlberg erwies sich als sehr wasserdurchlassend. Die sonstigen wichtigen Beobachtungen, welche das Spullerseewerk der physikalischen Geographie eingetragen hat, sind im § 112 ff nach den Untersuchungen und mündlichen Auskünften des Bauleiters, meines Freundes, Herrn Ingenieur Dr. Hans Ascher verwertet, der ein geologisch-hydrologisches Profil des 1890 m langen Stollens aufgenommen hat (Nr. 2).

§ 18. Aus allen bisher vorgebrachten Beobachtungen und physikalischen Gründen, die die Hohlräume des Karstes betreffen, geht hervor, daß sich klaffende, d. h. die großkapillaren und überkapillaren Fugen und Spalten der Einleitung und ersten Entwicklung der Karsthydrographie darboten. Diese der Erweiterung verfallenen Wasserbahnen reichen oft tiefer hinab als die Quellen. Das Wasser findet dann eben durch eine Art U-Röhre schon bei geringem Überdruck zum Licht empor. Die Höhe der Quellen ist unabhängig von einer oberirdischen Erosionsbasis (Talböden, Seespiegel, Meeresspiegel). Nicht selten sind Wasserfallquellen, die hoch oben am Gehänge entspringen (z. B. der Gollinger Wasserfall im Salztal s. Salzburg, die sieben Brunnen w. vom Titlis in dem zum oberen Aaregebiet gehörenden Genthäl bei der Engstlenalp usw.). In anderen Fällen speisen Quellen, von unten empordringend, Seen mit Auftriebswasser, wie am Fuß des Toten Gebirges. Das Abweichen der Quellhöhen von den äußeren Erosionsbasen ist auch von Felsquellen im Nichtkarst bekannt. Aber gerade in dem Fall, wo eine Quelle genau an einem

<sup>1)</sup> Ein schönes Bild davon zeigt Tafel IX in der Monogr. I des Spel. Inst. der Bundeshöhlenkommission 1923.

Talboden austritt, emporgedrängt durch einen Siphon, sehen wir, daß der Talboden keine Erosionsbasis für die Aushöhlungsarbeit des Wassers in größeren Tiefen ist. Gleichwohl hat man versucht, den Begriff der Erosionsbasis unter dem Namen „Vorflut“ auch in die Karsthydrographie einzuführen. Wir finden bei H. Bock folgende, auch von anderen geglaubte Ansicht.<sup>1)</sup> „Die Kanalisierung des Kalkmassivs kann aber nicht tiefer gehen als der Horizont der oberirdischen Aufnahmebehälter (gemeint sind ausdrücklich Flüsse, Seen oder Meere. L.) es gestattet. Unter diesem Horizont bleibt der Kalk massiv.“ Diese Ansicht ist nicht nur unbegründet, sondern steht nicht in Einklang mit vielen Beobachtungen; man denke nur an die Vauclusequellen oder daran, daß der Grund der Macocha, den doch noch Einsturzreste zum Teil erfüllen, im „Unteren See“ bis 30 *m* unter die Punkvaquelle herabreicht.<sup>2)</sup> Die ganz gewöhnliche Nichtübereinstimmung dieser Vorflutlehre mit den Tatsachen ist Bock nicht entgangen. Er suchte sie, wie folgt, mit seiner Auffassung in Einklang zu bringen: „Tektonische Störungen, Überflutungen durch das Weltmeer, Ablagerung mächtiger Schottermassen vor der Ausmündung und ähnliche Vorgänge können bewirken, daß das untere Ende eines Höhlengerinnes oder auch die ganze untere Strecke tiefer zu liegen kommen als der Wasserspiegel der Vorflut oder des angestauten Quelltopfes.“ Einer dieser beliebig vermehrbaren äußeren Umstände trifft freilich immer zu, besonders gibt es ohne tektonische Störungen überhaupt keinen Abfluß im Lande und damit auch keine Karstgewässer. Man könnte da zunächst sagen, daß eben in jedem Karst Hohlräume unter der Vorflut anzunehmen sind. Bocks Gedankengang meint jedoch, daß nachträgliche tektonische Störungen usw. erst zu einer Art Ersäufung der vorher nur bis zum Niveau einer Vorflut absteigenden Hohlräume führten, wenn wir irgendwo eine Nichtübereinstimmung vorfinden. Diese Meinung geht aus dem in obigen Zitaten genügend beachteten Zusammenhang hervor. Sie ist, wie gesagt, unbegründet und steht einer Beweislast gegenüber, die zu tragen nicht einmal versucht wurde. Die aufs stärkste in die Gneise des Simplongebietes eingefalteten Kalke wurden von Wasseradern durchzogen, die hunderte von Metern über der Höhe des Tunnels Quellen speisten, welche versiegten, als sich die Adern im Tunnel nach unten entleerten. Ebenso versiegten im Waadtländer Jura die Quellen des Baches Bief Rouge, die 80 *m* höher als der Mt d'Or-Tunnel lagen, nach den Wassereinbrüchen darin; sie flossen allmählich wieder, als man die entleerte Kluft vermauerte.<sup>3)</sup> Dieser Tunnel, der den Grenzübergang zwischen Frankreich und der Schweiz bei Vallorbe unterfährt, durchbohrt ein breites Juragewölbe, dessen Malmschichten im Scheitel fast wagrecht, an den Seiten aber scharf und steil abgebogen sind („Koffergewölbe“). In diesen Fällen hat sich die Ausbildung der Karstgewässer tief unter der „Vorflut“ erst nach dem Beginne der tektonischen Störungen vollzogen und da diese wohl sehr lange dauerten, bis die heutige Schichtenlagerung vollendet war, so können inzwischen Bahnen für das Karstwasser ebenso oft geschlossen, umgelegt und ganz neu eröffnet worden sein, worauf die dabei ebenfalls veränderlichen Vorfluten gar keinen Einfluß hatten. Im Vergleich zu diesen Beispielen sind die jungen tektonischen Störungen

<sup>1)</sup> Nr. 6, S. 11.

<sup>2)</sup> Nr. 1, S. 70ff.

<sup>3)</sup> Vgl. Nr. 40 und 43.

im mährischen Karst gering. Gleichwohl wird nach Absolon die Punkvaquelle durch zwei Siphone gespeist, deren Grund bei 12 *m* Tiefe noch nicht erreicht worden ist.<sup>1)</sup> Im Tal der Quelle fehlen selbst die bescheidensten stauenden „Schottermassen“. Die von Bock angeführten nachträglichen Vorgänge gibt es gewiß auch, aber sie schaffen nur einen Sonderfall der Karstentwässerung, welche oft ohnedies zu einer Vorflut weit emporsteigen kann. Das Auf und Nieder, die Zickzackwege und Wellungen unterirdischer Wasserwege in der Senkrechten sind eine gewöhnliche Erscheinung. Kein physikalisches Hindernis verwehrt der Natur, bei der Ausbildung der also verlaufenden hydrographisch wegsamen und wirksamen Hohlräume an einer oder mehreren Stellen den Horizont der Vorflut zu unterschreiten, und zwar unter Umständen ganz erheblich, und das auch dann, wenn die Vorflut dabei ihre Höhe emporschiebt. Wo Hohlräume unter dem Quellniveau durchflossen werden, ist für die Wasserbewegung vor allem der Überdruck, die Differenz von Druck und Gegendruck, maßgebend. Für den Einfluß von Temperaturunterschieden beim Aufsteigen des Wassers tief unter dem Siedepunkt sind meines Wissens bisher keinerlei rechnerisch behandelte Belege in der Natur gefunden. Ganz abzulehnen ist ein Mitwirken von Temperaturunterschieden nicht überall, wenn es auch oft als bloße Vermutung nur ein Requisite der zählebigen Irrlehre ist, daß unter der Höhe der Quellen kein Wasser sich rein hydrodynamisch zu ihnen emporbewegen könne.<sup>2)</sup>

§ 19. A. Grund hat 1903 ein durchschnittliches Raumverhältnis von Klüften und Felsen im Karst als Klüftigkeit bezeichnet und diese Klüftigkeit gleichgesetzt der Wahrscheinlichkeit, durch Bohrungen Wasser anzufahren.<sup>3)</sup> Dies ist ein Denkfehler, in den auch andere verfallen sind. Im Jahre 1910<sup>4)</sup> schrieb A. Grund zwar, daß die Wahrscheinlichkeit, Wasser anzufahren, auch von der Tiefe abhängt, bis zu der die Bohrung weiter getrieben wird, nachdem sie bereits den sozusagen wasserleeren Karst durchsunken hat.<sup>5)</sup> Er sagte dabei keineswegs, daß sich mit der Tiefe auch das Verhältnis von Klüft zu Felsvolumen erhöhe. Nun hängt die Wahrscheinlichkeit, Wasser anzufahren, besonders von der Dichte und Anordnung der Klüfte

<sup>1)</sup> Nr. 1, S. 102. Längsprofil der Punkva.

<sup>2)</sup> Viel Verwandtes mit der Ansicht H. Bocks hat die Meinung v. d. Broecks, welche J. Hol sogar als Gesetz anerkennt (Nr. 24, S. 136): „Das Einschneiden der Täler und die Bildung der anstoßenden Höhlen laufen parallel, ohne daß der eine Prozeß einen wesentlichen Vorsprung vor dem anderen erreicht“. Dies wird zunächst im Hinblick auf die Höhle von Han s. Lesse in Belgien und die anderen Höhlen der Gegend gesagt. Die Höhle von Han reicht, „soweit bekannt“, 6·5 *m* unter den Talboden des oberirdischen Flusses, „aber auch unter diesem Niveau wird selbstverständlich der Kalk durchklüftet und mit Grundwasser angefüllt sein“, meint J. Hol. Das hindert sie nicht, „nennenswerte Höhlenbildung“ unter dem Niveau des Flußbettes für ausgeschlossen zu halten und S. 154 ganz allgemein zu behaupten, daß Höhlenbildung nur bis wenige Meter unter dem „Grundwasserspiegel“ stattfinden könne. Dies stellt eine hinfällige Verallgemeinerung einer selbst im seichten Karst Belgiens und für seine Ponor- und Durchflußhöhlen unsicheren Annahme dar.

<sup>3)</sup> Nr. 20, S. 177.

<sup>4)</sup> Nr. 21, S. 611.

<sup>5)</sup> Er drückte das nicht so vorsichtig aus, sondern nahm einfach eine mit der Tiefe wachsende Wahrscheinlichkeit des Bohrungserfolges an.

ab, in denen es sich bewegt, auch von ihrer Gestalt und Lage, ob sie weit oder eng sind, wagrecht oder senkrecht liegen. Diese Dinge können bei demselben durchschnittlichen Volumsverhältnis sehr wechseln und sie sind nicht gleichgültig für eine Bohrung, die sich ja nicht frei im Raume bewegen kann, sondern einer festen Richtung folgt. Je nach der Tiefe, bis zu der die Bohrung geführt wird, muß sich die Wahrscheinlichkeit, das Wasser zu treffen, im allgemeinen ändern, manchmal auch steigern. Unter den vielen Werten der Wahrscheinlichkeit wird auch jener vorkommen können, der ziffernmäßig der durchschnittlichen Klüftigkeit entspricht. Wie immer man es ansieht, so bezieht sich jedoch die Wahrscheinlichkeit, daß eine Bohrung mit fester Richtung Wasser treffe, im Grunde auf Flächen, sei es die Oberfläche oder seien es tiefere Ebenen, senkrecht zur Bohrrichtung, aber nicht auf den Raum, dessen Inhalt sich auf die durchbohrten Flächen nur projiziert. Die ziffernmäßige Gleichstellung, die A. Grund zwischen Klüftigkeit des wassererfüllten Karstgesteins und Wahrscheinlichkeit von Bohrerfolgen ausgesprochen hat, ist unhaltbar. Das wäre auch dann der Fall, wenn nicht schon der mittlere Klüftigkeitswert überaus problematisch wäre, falls er sich überhaupt irgendwo feststellen läßt. Man bedenke nur, wie wenig irgendwelche Mittelwerte taugen, wo die beiderseitigen Abweichungen und großen Ausschläge das Bild der Dinge allein beherrschen. Was bedeutet ein mittlerer Niederschlag in Wüsten, wo es zwischen ungeheueren Wolkenbrüchen jahrelang gar nicht regnet? So ist es auch mit dem hydrographischen Wert einer durchschnittlichen Klüftigkeit im Karst, wo sich ungezählte Fugen finden, die niemand je anders als trocken gesehen hat und daneben berühmte Riesenquellen. Dabei könnte man öfters einige Meter tiefer den benachbarten Karst anbohren, ohne auf eine wasserführende Kluft zu stoßen. A. Grund hat sogar, als Perko derartige erfolglose Brunnenbohrungen gegen seine Lehre ins Treffen führte, geantwortet:<sup>1)</sup> „Die volle Wahrscheinlichkeit, Wasser zu erbohren, wäre hier (bei Triest. L.) erst erreicht gewesen, wenn man mehrere hundert Meter tief unter den Karstwasserspiegel hinabgebohrt hätte.“ Man kann die Bedeutung eines mittleren Klüftigkeitswertes nicht ärger preisgeben, als es mit diesen Worten unwillkürlich geschehen ist. Wenn aber der wasserlose Fels, der niemals auf hunderte Meter frei von allen Fugen und selbst größeren Hohlräumen ist, diese Wasserlosigkeit bei senkrechten Bohrungen verrät, so können seine wasserlosen Räume auch in anderen Richtungen zwischen wasserreichen sehr ausgedehnt sein. Jeder, der selbst nur ein Gefühl für hydro-mechanische Möglichkeiten hat, die sich unter solchen Umständen einstellen, wird in der Äußerung A. Grunds außerdem eine eigenhändige Zerstörung eines „Karstwasserspiegels“ in ein und demselben Kalkmassiv erblicken, wenn man diesen Karstwasserspiegel begrifflich als so ausdehnbar ansieht wie einen Grundwasserspiegel in Kiesen oder Sanden. Die Erfahrungen im Tunnel des Mont-d'Or zeigen nun, daß die Natur die Phantasie selbst des kühnsten Gegners obiger Lehren A. Grunds überbietet. Der folgende Bericht stützt sich auf eine Darstellung des Chefingenieurs Soutter (Nr. 43) und auf eine solche von Hans Schardt (Nr. 40). Beide Aufsätze ergänzen einander in wertvollster Weise, indem das klar wird, was in jedem für sich unbeantwortet bleibt. Bei kleineren Widersprüchen in Nebendingen

<sup>1)</sup> Nr. 21, S. 611.

folge ich Soutter, dessen Text in solchen Fällen auch mit den Abbildungen und Diagrammen in Einklang ist, welche den Aufsatz Schardots zieren.

§ 20. Abb. 6 und 7 geben die Unterlagen für die Verfolgung der wesentlichen Tatsachen. Von SE aus bohrend, traf man in dem nach NW absteigenden Teil der Malmkalke in mäßig zerklüftetem Fels bei Meter 4123 einige kleine Quellen, nachdem man in einer mächtigen Zwischenschicht von Mergeln in dem Jurakalkgewölbe auf etwa 2 km Länge kein Wasser angetroffen hatte. Zwischen Meter 4273 und 4285 gelangte der Tunnel zu einem spitzwinkeligen Schnitt mit der Kluft A, einer 60 cm breit austreichenden N-S gerichteten Spalte, die mit Lehm erfüllt war. Daraus drang eine ganz unbedeutende Menge Wassers. Als man nach fast drei Wochen den Stollen bis Meter 4366, also um 80 m weiter getrieben hatte, wich auf einmal der sehr feucht gewordene Lehm aus dem nördlichen (rechten) Teil der Spalte und es erfolgte am

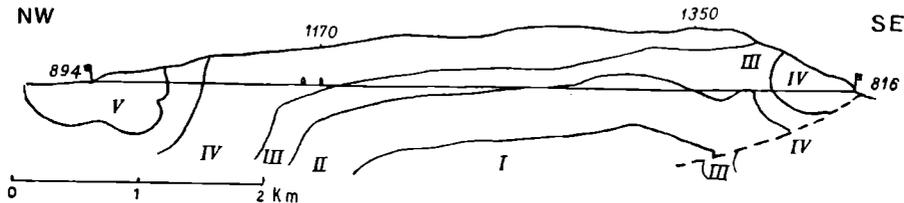


Abb. 6. Die geologischen Hauptzüge im Gewölbe des Mont-d'Or bei Vallorbe, längs der Tunnelstrecke (nicht überhöht). I. Trias und Lias. II. Dogger, meist Rogensteinkalke. III. Argovien, (Malm-) Mergel (undurchlässig). IV. Kalke des oberen Malm mit den Klüften der Wassereinbrüche (bei 872 m). Fähnchen an den Tunnelenden, Strecke der Wassereinbrüche: unter der Oberfläche bei 1170 m.

23. Dezember 1913 ein verheerender Wassereinbruch, der auf 3000 l/sek geschätzt wurde unter 84 m = rund 8 Atmosphären Druck, wie später festgestellt werden konnte. Die Flut ging bis 25. XII. auf 700 l/sek zurück, stieg aber gleich wieder im Gefolge gewaltiger Regengüsse und jähler Schneeschmelze an und erreichte in der Nacht vom 28. auf den 29. XII. schätzungsweise 5000 l/sek. Schon beim ersten Einbruch versiegten die 4 bis 5 km entfernten Quellen des Bief Rouge, der, in einem Längstälichen von NE kommend, sich vor dem französischen Tunnelausgang mit dem Doubs vereinigt. Die heftigen Niederschläge ließen schon am 27. XII. die unterste dieser Quellen (951,5 m gegenüber 872 m der Tunnelsohle bei A) wieder erscheinen. Mit der Abnahme des zweiten Riesenzuflusses im Tunnel verschwand auch diese Quelle wieder. Mitte Januar 1914 hielt sich die Abflußmenge der Kluft A zwischen 300 und 800 l/sek, als man schon daranging, für 9000 l/sek eine den Tunnelbau sichernde Abzugeinrichtung zu schaffen. Damals mauerte man zunächst den Tunnel zwischen Meter 4255 und 4264 zu, die Kluft A und den Richtstollen dahinter dem eindringenden Wasser preisgebend. Ein Durchflußrohr in der Sperrmauer wurde verschließbar gemacht, mit Manometer versehen und am 17. I. der Schieber zugemacht. Zwischen 19. und 23. I. 1914 erschienen alle vier Quellen des Bief Rouge wieder. Regen und Schneefälle in Frankreich ließen den Druck sogar auf 92 m Wasserhöhe steigen. Es war der erste Versuch in der Welt, sagt Soutter, von einem unterirdischen Tiefbau aus 92 m Wasser anzustauen. Alle diese



Meter 4275 und 4283 zugemauert, also dicht unterhalb der Kluft A. Dabei wurde alles für regulierbaren Abzug und Messung des Wasserdruckes hinter der Zumauerung vorgekehrt. Bei Meter 4244 begann man nun einen Umgehungsstollen zu bauen, um erst hinter B bei Meter 4482 die Tunnelachse wieder zu erreichen. Der Umgehungsstollen verlief 20 m südwestlich von der Tunnelachse. Zur Sicherheit wurde er mit einer unteren und oberen Galerie getrennt vorgetrieben. Am 4. VI. 1914 war die Zumauerung bei A vollbracht, als aus dem Tunnelinnern nur 180 l/sek flossen (die Stelle B inbegriffen). Der Druck in der gesperrten Tunnelstrecke stieg langsam und hatte im Umgehungsstollen an zahlreichen Stellen Tropfwasserzutritte zur Folge, obwohl man sich bemüht hatte, alle erkennbaren Klüfte zu zementieren. Der Umgehungsstollen traf schon am 9. VI. bei Meter 4414 mit der unteren Galerie die Kluft BC an der Stelle C, und zwar so, daß sich das Wasser darin aus einer sackartigen Vertiefung<sup>1)</sup> des Höhlenganges von links in den Umgehungsstollen stürzte. Diesmal waren es 4500 l/sek, als eben der Druck bei der Zumauerung des Tunnels vor A auf 81 m Wasser gestiegen war. Der Einbruch floß durch den Umgehungsstollen ab und in 15 Minuten sank der Druck von 81 m auf 0, worauf man bei A das Wasser einfach durch das geöffnete Rohr herausließ. Das war der letzte große Wassereinbruch. Am nächsten Tage konnte man die Kluft BC näher untersuchen. Von Südwest floß ohne Druck ein Bach mit 80 l/sek heran (Quelle  $\beta$  der Abb. 7), im NE lag ein steiler, tiefer Schacht, der mit Wasser gefüllt war. Eine nähere Erforschung ergab, daß aus diesem Schacht durch eine 9 bis 12 m tiefe Spalte Wasser zur Einbruchstelle B empordrang. In Abb. 7, Profil 2 ist es der Schacht mit der Quelle  $\alpha$ . Noch am 11. VI. sperrte man beiderseits vom Umgehungsstollen die Kluft BC ab, so daß der Bach nur bei offenem Schieber eindringen konnte und ein Zudrang aus der vielleicht einmal stark steigenden Schachtfüllung verhindert war. Der Anschwellung ihres Standes arbeitete man später (bei s in Abb. 7) mit einer Pumpe entgegen. Da man den Zusammenhang der Klüfte A und BC schon kannte, so war es klar, daß man alle drei Wassereinbrüche aus demselben schmalen Hohlraumsystem erhalten hatte.<sup>2)</sup> Es blieb zu erforschen, wie der Zusammenhang der Klüfte A und BC im Tunnelbereich beschaffen war. Hierbei wandte man seine Aufmerksamkeit der Spalte D bei Meter 4395 zu, die, mit Lehm verstopft, nur wenig Wasser durchgelassen hatte, was sich selbst damals nicht änderte, als man daran war, 12 m weiter vorn den zu 10000 l/sek ansteigenden Wassereinbruch zu entfesseln. Da in allen großen Klüften die Wasserbewegung gebändigt war, räumte man den Lehm aus der Spalte D. Hierbei erwies es sich, daß das Wasser von unten aufstieg, also mit der Quelle  $\alpha$  in offenbarem Zusammenhang stand. Hinderte man hingegen den Bach  $\beta$  daran, aus seiner Kluft in den Umgehungsstollen einzuströmen, so stürzte Wasser auch von oben in die Spalte D. Nachdem das erkannt war, verschloß man die Spalte D mit einer Betoneinpressung völlig, wie auch inzwischen die Spalte A selbst in der fertigen Tunnelwand gesperrt wurde, wobei aber noch der Druck abgelesen werden konnte. Nun ließ man den Bach  $\beta$  frei ausströmen, sperrte aber am 18. VI. 1914 alle bekannten Ausflußmöglichkeiten der aufsteigenden Quelle  $\alpha$ , nachdem die Pumpe den Spiegel ent-

<sup>1)</sup> Vgl. Profil 2 in Abb. 7.

<sup>2)</sup> Man vergesse aber nicht, daß der größte Einbruch bei B erfolgte, als die Kluft A offenen Abfluß hatte.

sprechend tief gesenkt hatte. Erst  $1\frac{1}{2}$  Stunden später bemerkte man, daß der Druck in der Quelle A stieg, während das Wasser von  $\beta$  immer noch frei und gleichmäßig auf der ihm gewiesenen Bahn abfloß, und zwar auch dann noch, als der Druck des Wassers, das von  $\alpha$  in die Höhe drückte, bei A auf 8 Atmosphären emporgestiegen war und die Quellen des Bief Rouge wieder einmal zu fließen begannen. Die Höhle D und die Kluft BC zwischen dem Umgehungsstollen und dem Schacht waren also tatsächlich bis ganz hinauf zur Höhe der Oberflächenquellen die einzigen natürlichen Verbindungen zwischen den von SW heranfließenden und von NE aufsteigenden Wässern  $\beta$  und  $\alpha$  der Kluft BC, auch zwischen  $\beta$  und A. Dabei besteht das geologische Gewölbe von der Oberfläche bei 1300 m bis unter die Tunnelsohle (870 bis 880 m) im Klüftebereich ausschließlich aus Malmkalken (Sequan, Kimmeridge und Portland). Bemerkenswert ist noch, daß zwischen den Klüften A und BC auch wasserfreie Spalten gefunden wurden, während immerhin der Wasserzufluß und -zudrang aus den großen Klüften nicht aufhörte. Alle die beschriebenen Beobachtungen und erfolgreichen Eingriffe sind bei einem netzförmigen Zusammenhang der Klüfte, welcher in einem Bereich von 100 bis 200 m Durchmesser nur geringe Spiegelunterschiede zuläßt, unmöglich, ja ein netzförmiger Zusammenhang welcher Art immer hat sich im Bereich dieser Tunnelstrecke nicht ergeben und scheint auch außerhalb von ihr in der Tiefe oder im Nordosten nur in Gestalt sehr schmaler Hohlraumstränge kaum angedeutet zu sein. Die Wahrscheinlichkeit, Wasser zu finden, hatte hier mit der mittleren, ziffernmäßig unbekanntem Klüftigkeit nichts zu tun. Sie hängt aber, wie sich zeigte, stark ab von dem Auftreten oder Fehlen von Lehmverstopfungen, die sich bei gegebenen Umständen ganz regelmäßig einstellen. Solche Verstopfungen können selbst einer lang bestandenem hydrographischen Wegsamkeit überkapillarer Klüfte nahezu ein Ende bereiten und förmliche Höhlen karsthydrographisch „unwirksam“ machen. In dieser Beziehung hat die Betonierung der Klüfte A und D den vom Tunnel gestörten Naturzustand wieder hergestellt. Sie bedeutet also keinen naturwidrigen „Eingriff“. Im übrigen können tektonische Verschiebungen auch in der Natur alte Wasserbahnen verriegeln und dem Wasser neue Wege weisen, wie dies bei den Quellen  $\alpha$  und  $\beta$  allerdings künstlich geschah. Verwerfungen und Erosionseinschnitte können auch in der Natur das Verschwinden oder die Umlagerung von Lehmeinschwemmungen mit der Folge dauerhafter großer Wasserstandsunterschiede von Ort zu Ort herbeiführen. Im Mont-d'Or-Gewölbe waren solche Unterschiede, soweit der Tunnel Aufschluß gab, nicht in dem durch die Eingriffe bei s und s' erreichten Ausmaß vorhanden. Dies gilt möglicherweise mit einer Ausnahme, denn die Kluft A, die von Natur auf der nordöstlichen Tunnelwand unter 8 Atmosphären Druck stand, hatte eine südliche Fortsetzung. Gab es hinter dem Lehm noch offene Hohlräume, so waren sie entweder wasserlos oder führten Wasser unter so geringem Druck, daß es nicht in merklichem Maße durch die Sohle des Umgehungsstollens empordrang. Die Lehmlagerungen überhaupt zeigen uns die vorher herrschende stille Wasserbewegung tief unter den Quellen an. An den Wandungen der lehmefüllten Spalten und der noch tätigen Höhlen und Schläuche waren die deutlichsten Spuren der Gesteinsauflösung in Form von Näpfchen, Zapfen und Rippen zu beobachten, einzelne unlösliche Fossilien sind recht schön herausgeätzt. So sagt der Bericht von Schar dt. Höhlenflüsse, gar mechanisch arbeitende, hat es hier

sowenig gegeben wie ein Karstwasser im Sinne A. Grunds. Auch die beobachtete zeitliche Wasserstandsschwankung von 8 m unmittelbar hinter den Quellen des Bief Rouge<sup>1)</sup> konnte durch eigene unterirdische Zuleitungsklüfte in der Höhe der Quellen deren Wasserführung verstärken, ohne die beschriebenen ruhigen Verhältnisse im Innern dieses Gewölbeschnittes zu stören. Was die Ereignisse in diesem Tunnel lehren, ist schon von verschiedenen Karstforschern belegt und vertreten worden. Aber es gibt keinen Fall, wo mit den spärlichen Verbindungen der unterirdischen Wasserbahnen so großartig und daher beweiskräftig experimentiert wurde.

#### Anhang zum Abschnitt I des Hauptteils.

§ 21. In der chemischen Erweiterung der karsthydrographisch wirksamen Klüfte drückt sich ein Lösungserfolg aus. Die Werte der Löslichkeit verschiedener Karstgesteine kann man den Tabellen der folgenden Paragraphen entnehmen. Die darin gebotene Auskunft ist nach dem Stande der chemischen Forschung nur für den Kalk inhaltsreich. Wenn v. Knebel (Nr. 26, S. 24) auf Grund der Analysen des E. v. Gorup-Besanez die Meinung vertritt, daß der Dolomit in der Natur gleiche Löslichkeit besitze wie der Kalk, so ist das nach Boeke und Eitel (Nr. 51, S. 450) nur bei Drucken über 1 Atmosphäre bis 4 Atmosphären der Fall. Unter 1 Atmosphäre Druck fand sich der Kalk löslicher als  $Mg CO_3$ . Dies ist Magnesit. Boeke und Eitel übertrugen die Folgerung auch auf  $Mg Ca (CO_3)_2$ , den Dolomit (vgl. § 23). Die Ansicht v. Knebels könnte aber allgemeiner richtig sein, wenn darin zum Ausdruck kommt, daß in den Gebieten, auf die sich v. Gorup-Besanez' Untersuchungen beziehen, die Lösungsgeschwindigkeit im Kalk und Dolomit praktisch gleich war.

Wenn im folgenden auf die Löslichkeit eingegangen wird, so ist diese vorläufig nur als Notbehelf gewertet, weil man die Lösungsgeschwindigkeiten so schlecht kennt. Vielleicht gewinnt in der Zukunft der Karstforschung die Löslichkeit selbst wieder erhöhte Bedeutung. Auch das rechtfertigt ein gewisses Eingehen auf den Gegenstand. Die Zusammenstellungen für Kalk und Gips entstammen dem von Landolt und Börnstein begründeten großen Tabellenwerk (Nr. 55). Das Doppelsalz Dolomit, das darin fehlt, muß hingegen unter Zuhilfenahme anderer Belege vorgeführt werden.<sup>2)</sup>

§ 22. Sind Wasser und Luft frei von Kohlensäure, so wird bei höheren Temperaturen mehr Kalk gelöst als bei niedrigeren.

Die nachstehenden Zahlen stammen von verschiedenen Chemikern und ihre Versuche fallen in den Zeitraum von 1857 bis 1915. So selten sind Versuche, die sich für den Fall anordnen lassen, daß vom Vorhandensein der Kohlensäure in Luft

<sup>1)</sup> Als der Wasserdruck im Tunnel beim Manometer von A Ende Januar 1914 von 84 auf 92 m answoll.

<sup>2)</sup> Es sind also in § 22 und 23 die den Kalk und Gips betreffenden Angaben, wo nichts anderes gesagt ist, nur dem Tabellenwerk entnommen. Dieses bringt eine geordnete und gesichtete Auswahl aus den oft sehr verschiedenen und zerstreuten Bestimmungen der Löslichkeiten. Ein Geograph kann hieran nur anknüpfen und ich darf kaum hoffen, durch meine Hinweise auf einige chemische Untersuchungen, die zum Teil jünger sind als die Tabellen, Vollständigkeit bei der Vorführung der chemischen Bemühungen zu erreichen.

Tabelle I. (1 Atmosphäre Druck.)

Temp. °C	Bodenkörper	a % anhydritischer Substanz in 100 g Lösung	b Das Gewichts- verhältnis von a) als gemeiner Bruch	c Gramm des gelösten Stoffes in 10 kg Wasser
8,7°	Ca CO <sub>3</sub> gefällt	1,0 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{100.000}$	0,1
16,0°	Ca CO <sub>3</sub> gefällt	1,31 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{76.300}$	0,13
18,0°	Ca CO <sub>3</sub> gefällt	1,30 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{76.900}$	0,13
23,8°	Ca CO <sub>3</sub> gefällt	1,25 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{80.000}$	0,125
25°	Ca CO <sub>3</sub> gefällt	1,43 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{69.800}$	0,143
100°	Ca CO <sub>3</sub> gefällt	2,0 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{50.000}$ *)	0,2

\*) Nach Bineaus Bestimmung. In Doelters Handbuch der Mineralchemie, Bd. I, S. 384, wird Bineau das Ergebnis  $\frac{1}{5000}$  zugeschrieben, was nach obigem offenbar ein Versehen ist. Es wirkt aber in der kurzen Zusammenfassung des Bearbeiters über die extremen Versuchsergebnisse als Fehler weiter.

und Wasser abgesehen werden darf. Die nach dem Mitgeteilten begreiflichen kleinen Unstimmigkeiten geben eine Vorstellung davon, daß gegenwärtig der Einfluß der Wärme auf die Löslichkeit von Kalzit bei nur geringen Temperatursprüngen noch nicht mit der in der Chemie als befriedigend angesehenen Genauigkeit von  $\pm 1\%$  des wahren Wertes erfaßt werden kann. Andererseits sind diese Unstimmigkeiten nicht groß genug, daß daraus ein Anhaltspunkt zu gewinnen wäre gegen die Zunahme der Löslichkeit des Kalzites bei steigenden Temperaturen und Abwesenheit von CO<sub>2</sub>. Die Ziffern unter c in den Tabellen habe ich als Annäherung an die in den Karstuntersuchungen und in der älteren chemischen Literatur üblichen Angaben der gelösten Stoffmenge in 10 l Wasser hinzugefügt. Die Angabe dieser Beziehung hatte trotz der Anschaulichkeit etwas Mißliches an sich, weil die 10 l ein mit den Temperaturen sich änderndes Gewicht haben. Also wurden die Grammwerte für 10 kg Wasser eingeführt. Sie sind in den meisten Fällen, die hierher gehören, praktisch gleich dem Prozentsatz der Kolonnen a) mal 100, so daß sich die Ziffern nicht ändern. Das kommt jedoch nur von der geringen Löslichkeit der Karbonate im chemischen Sinne. In Wirklichkeit sind die Grammwerte, bezogen auf das Wassergewicht, mit dem gelöst wurde, stets verschieden von den entsprechenden Werten der anhydritischen Substanz, bezogen auf die Lösung.<sup>1)</sup> Schon bei Zehnteln Prozent in

<sup>1)</sup> Umrechnungstabellen enthält das erwähnte Werk von Landolt-Börnstein im I. Bd., S. 633.

der Kolonne a) wären in der Kolonne c) nicht nur die Stellenwerte, sondern auch die Ziffern zum Teil andere. Die scheinbare Übereinstimmung in den Fällen, die hier betrachtet werden, kommt also davon, daß bei Tausendstel Prozenten sich die Abweichungen erst in den unter c weggebliebenen Dezimalstellen bemerkbar machen. Wäre die anhydritische Substanz z. B. zu genau 1,9% in 100 g Lösung vorhanden, so würde dies 19,4 Gramm in 10 kg Wasser entsprechen. Ein Betrag von 19% unter a bedeutet bereits 2346 g unter c.

Tabelle II. (1 Atmosphäre Druck ohne freies CO<sub>2</sub>.)

Temp. °C	Bodenkörper	a % anhydritischer Substanz in 100 g Lösung	b Das Gewichts- verhältnis von a) als gemeiner Bruch	c Gramm des gelösten Stoffes in 10 kg Wasser
25°	Kalzit	1,433 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{69.800}$	0,143
	amorpher Kalk	1,455 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{68.700}$	0,146
	Aragonit	1,558 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{65.400}$	0,153

Auch für 50° und 100° hat 1912 Kendall eine größere Stabilität des offenbar kristallinen Kalzites gegenüber den anderen Erscheinungsformen von Ca CO<sub>3</sub> gefunden. Ob man aber auf die dritten Dezimalen obiger Tabelle schwören muß, ist eine andere Frage. Erfolgt die Lösung in Wasser, das mit CO<sub>2</sub> gesättigt ist, so sind die Lösungswerte viel höher; aber nach den alten Versuchen Cossas (1868),<sup>1)</sup> der Marmore (z. B. Carrarischen), Isländischen Doppelspat, künstlich gefällten kohlen-sauren Kalk, Lüneburger Kreide und oolithischen Kalk zu seinen Bestimmungen heranzog, ergibt sich bei ziemlicher Verschiedenheit der Einzelwerte kein klares Überwiegen der Löslichkeit, sei es nach der Seite der großkristallischen, sei es nach der sogenannten amorphen Ausbildung.<sup>2)</sup> Die absoluten Werte Cossas sind nicht in den Tabellen von Landolt und Börnstein enthalten, vielleicht weil sie als überholt galten. Im ganzen ist nun die Sachlage doch so, daß man die Erscheinung eines ausgeprägten Zellenkalkes oder -dolomites nicht sicher auf Unterschiede der Löslichkeit kristallischer und amorpher Teile zurückführen kann, wohl aber auf Unterschiede in der Lösungsgeschwindigkeit an den hervortretenden Kristallflächen. Die Unterschiede der Löslichkeit gemäß Tabelle II überschreiten nicht 7% des geringsten Wertes. Bäckström veröffentlichte 1921 Ergebnisse, wonach in reiner CO<sub>2</sub>-Atmosphäre bei 9° C synthetischer Aragonit um 12% stabiler war als Isländischer Kalkspat.

Der Einfluß dieser Mineralunterschiede ist also sehr bescheiden.

<sup>1)</sup> Vgl. die Anm. später beim Dolomit (§ 23).

<sup>2)</sup> Die Frage, ob es überhaupt amorphen Kalk gibt, oder ob man besser an seiner statt von einem ultramikroskopischen kristallinen spricht, kann heute von Forschern wie Niggli aufgeworfen werden. Damals dachte niemand daran.

Die Tabellen III und IV gelten für die Anwesenheit freier Kohlensäure in der Luft, die der Tabelle V für Wasser, das mit jener gesättigt ist.

Tabelle III. (Teildruck<sup>1)</sup> von CO in der Luft 0,00032, 1 Atmosphäre Druck.)

Temp. °C	Bodenkörper	a % anhydritischer Substanz in 100 g Lösung	b Das Gewichts- verhältnis von a) als gemeiner Bruch	c Gramm des gelösten Stoffes in 10 kg Wasser
0°	Ca CO <sub>3</sub>	8,1 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{12.350}$	0,81
5°	Ca CO <sub>3</sub>	7,5 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{13.330}$	0,75
10°	Ca CO <sub>3</sub>	7,0 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{14.300}$	0,70
15°	Ca CO <sub>3</sub>	6,5 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{15.400}$	0,65
20°	Ca CO <sub>3</sub>	6,0 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{16.700}$	0,60
25°	Ca CO <sub>3</sub>	5,6 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{17.850}$	0,56

Tabelle IV. (Teildruck des CO<sub>2</sub> in der Luft 0,000369, 1 Atmosphäre Druck.)<sup>2)</sup>

25°	Kalzit	4,6 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{21.700}$	0,46
50°	Kalzit	2,9 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{34.200}$	0,29
100°	Kalzit	1,8 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{1}{55.600}$	0,18

Tabelle III stammt von R. C. Wells<sup>3)</sup>, Tabelle IV von Kendall 1912. Bedenkt man den nur wenig größeren CO<sub>2</sub>-Gehalt bei der zweiten Reihe, so passen die beiden Tabellen nicht vollkommen zusammen. Wie weit das an einer Verschiedenheit der Bodenkörper lag (vielleicht künstlich ausgefälltes CaCO<sub>3</sub>?), entzieht sich ebenfalls meiner Beurteilung. Im Hinblick auf die Löslichkeiten der Verbindungen mußte das Landolt-Börnsteinsche Tabellenwerk trotz sorgsamer Auswahl manches aufnehmen, was allem Anschein nach weniger zusammenpaßt

<sup>1)</sup> Die Teildrucke geben zugleich das Volumenverhältnis an: Der obige Wert ergibt also 0,032 Volumprozent.

<sup>2)</sup> In Landolt-Börnsteins Tabellen ist ein 100mal größerer Teildruck angegeben als im zitierten Original steht.

<sup>3)</sup> Das erwähnte Tabellenwerk schreibt die Zahlen von III Johnston und Williamson zu, die aber Wells als Urheber zitieren, der sie im J. Wash. Acad. Sc., 5. Bd., 1915, veröffentlicht hatte.

als Tabelle III und IV. Dieser Anhang kann nicht Unsicherheit und Lücken chemischer Erkenntnis beseitigen. Jedenfalls zeigen die Tabellen III und IV gemeinsam ganz klar, daß bei Anwesenheit von Kohlensäure in der Luft die gelöste Menge des Kalkes im allgemeinen größer ist als nach Tabelle I und II. Es geschieht dies nach Absorption von  $\text{CO}_2$  im Wasser auf dem Wege von  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Diese erhöhte Löslichkeit wird mit zunehmender Temperatur geringer, denn wärmeres Wasser absorbiert weniger  $\text{CO}_2$ . Ein kleiner Hinweis sei noch erlaubt; die geringste Löslichkeit der Tabelle IV bei  $100^\circ\text{C}$  in Gegenwart von  $\text{CO}_2$  beträgt  $0,18\text{ g}$ . Die größte Löslichkeit beim Fehlen von  $\text{CO}_2$  und  $100^\circ\text{C}$  beträgt nach Tabelle I:  $0,2\text{ g}$ . Es ist der aus dem Jahre 1857 stammende Wert. Wenn jemand hier von einer Unstimmigkeit sprechen sollte, dem müßte gesagt werden, daß sie im Hinblick auf die Umstände nur sehr klein ist. Ihre Beseitigung würde eine chemische Originalarbeit erfordern. Die in den Tabellen III und IV herangezogenen Kohlensäuremengen gehören noch einer atembaren Luft an. Erst über einem Gehalt von  $0,05\text{ CO}_2$  hört nach der freundlichen Mitteilung, die ich Herrn Hofrat Prof. Dr. Durig in Wien verdanke, die Atembarkeit der Luft auf.

Hier kann man sich noch fragen, wie sich die Löslichkeit verhält, wenn man bei gleichbleibender Temperatur den Teildruck von  $\text{CO}_2$  verschiedene Werte annehmen läßt. Johnston und Williamson haben ihre Untersuchung auch auf diese Frage ausgedehnt, dabei aber nur den Bereich ganz winziger Spuren von  $\text{CO}_2$  in der Luft herangezogen. Der weitaus höchste Betrag ihrer diesbezüglichen Tabelle ist ein Teildruck der Kohlensäure von  $0,000215 = 2,15 \cdot 10^{-4}$ . Die Forscher fanden, daß die Löslichkeit des Kalkes zwischen den Teildrucken von  $6,07 \cdot 10^{-7}$  und  $2,19 \cdot 10^{-7}\text{ CO}_2$  durch ein Minimum gehe und darüber und darunter größer sei. Vielleicht erklärt sich das besprochene, etwas problematische Zusammenpassen der Tabellen III und IV zum Teil auch dadurch, daß auch in anderen Bereichen der  $\text{CO}_2$ -Gehalte keine gleichsinnige Beziehung zwischen deren Größe und der Löslichkeit des Kalkes besteht. Wo hingegen so viel Kohlensäure in der Luft ist, daß diese nicht mehr atembar ist, geht nach den Versuchen von Schloesing<sup>1)</sup>, die sich bis 98% Kohlensäure in der Luft erstreckten, deren steigende Konzentration ohne Ausnahme mit einem Anwachsen der Löslichkeit Hand in Hand. Diese Bemerkungen sollen einen verkehrten Gebrauch der Tabellen seitens der nicht chemisch Geschulten verhüten, weil die Fortschritte der Karstkunde auch weiterhin Nicht-Chemikern anvertraut sein werden.

Die Versuchsergebnisse Schloesings hat 1926 Wiegner<sup>2)</sup> verwertet, um die Abhängigkeit der Löslichkeit des Kalzits vom  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft nach seiner Formel mit Rücksicht auf die Ionenlehre aufzuzeigen. Daneben sind die Ergebnisse nach der empirischen Formel Schloesings angeordnet. Wiegner hat zugleich wichtige Bemerkungen über die Beschaffenheit des Wassers hinzugefügt.

<sup>1)</sup> C. R. Ac. Sc. Paris 1872. 74. Bd., S. 1555ff., 75. Bd., S. 70ff. Die Kurve der Werte Schloesings durchzieht den ganzen Bereich der  $\text{CO}_2$ -Gehalte bei  $16^\circ$  und nicht nur eine winzige Strecke, deren Wellungen leicht als wirkliche Eigenschaften der betreffenden Abhängigkeit erscheinen. Bei 98%  $\text{CO}_2$  fand Schl. eine Löslichkeit von  $10,9\text{ g}$  auf  $10\text{ kg}$  Wasser, bei  $0,05008\%$   $\text{CO}_2$  eine solche von  $3,6\text{ g}$ .

<sup>2)</sup> Anleitung zum quantitativen agrilkulturchemischen Praktikum S. 154.

Tabelle V. Temp. 16° C., 1 Atmosphäre Druck.

Teildruck von CO <sub>2</sub>	Gramm Ca CO <sub>3</sub> in 10 l gelöst		Bemerkungen
	nach Schloesing berechnet	nach Wiegner berechnet	
0,000	0,131	0,131	in reinem Wasser gelöst
0,0003	0,634	0,627	im Wasser bei mittlerem CO <sub>2</sub> -Gehalt der Luft
0,003	1,334	1,380	im Wasser bei mittlerem CO <sub>2</sub> -Gehalt der Bodenluft
0,01	2,029	2,106	im Wasser bei hohem CO <sub>2</sub> -Gehalt der Bodenluft
0,10	4,700	4,689	
1,00	10,986	10,577	Wässrige Lösung mit CO <sub>2</sub> gesättigt bei Atmosphärendruck der Kohlensäure

Die letzte Zeile entspricht den Bedingungen der folgenden Tabellen bis auf die Temperatur und paßt nicht schlecht zu ihnen.

In der Natur ist öfter das Wasser viel reicher an Kohlensäure als die Luft. Der Einfluß verschiedener Temperaturen hat dann natürlich dieselbe Bedeutung, wie schon folgende Tabelle zeigt.

Tabelle VI. (Mit CO<sub>2</sub> gesättigtes Wasser.)

Temp. °C	Bodenkörper	a % anhydritischer Substanz in 100 g Lösung	b Das Gewichts- verhältnis von a) als gemeiner Bruch	c Gramm des gelösten Stoffes in 10 kg Wasser
0°	Ca CO <sub>3</sub>	1,56 · 10 <sup>-1</sup>	$\frac{1}{640}$	15,6
15°	Ca CO <sub>3</sub>	1,175 · 10 <sup>-1</sup>	$\frac{1}{850}$	11,75

Diese Werte stammen von Cavazzi (1916), Gazzetta chimica italiana, 46. Bd., II. Teil. Landolt-Börnsteins Tabellen bringen durch zwei an unrechte Stellen gesetzte Klammern die Angaben Cavazzis in entstellter und irreführender Weise. Er hat die von ihm in der Lösung festgestellte Menge des Bikarbonates Ca (HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> auf CaCO<sub>3</sub> umgerechnet. Die früheren Werte von Cossa für Carrarischen Marmor passen hiezu zwar nicht absolut, in bezug auf den Einfluß der höheren Temperaturen aber recht gut. Cossa hat folgende Mittelwerte aus mehreren Bestimmungen gefunden:

Tabelle VIa.

Temp.	g auf 10 kg Wasser
7,5—9,5°	11,81
21,5—22°	9,87
26 —28°	8,55

in einem mit  $\text{CO}_2$  gesättigten Wasser. Ein solches löst also bei höheren Temperaturen weniger Kalk, weil dann die Kohlensäure entweicht. Es ergeben also auch die zu A. Grund's Zeit noch nicht vorhanden gewesenen Bestimmungen Cavazzis, daß Grund gegen v. Sawicki recht hatte, als er die Meinung verfocht (Nr. 23, S. 5), daß ein kälteres Klima, wenn mit  $\text{CO}_2$  gesättigtes Wasser auftrete, auch von der chemischen Seite her die Verkarstung mehr fördere als ein wärmeres. Hierbei ist von den klimatisch verschiedenen Einflüssen der Vegetationsdecke abgesehen. A. Grund hatte sogar in mehr Fällen recht, als er damals wußte; dies geht aus den Tabellen III und IV hervor, die für Bedingungen gelten, bei denen das Wasser mit  $\text{CO}_2$  nicht gesättigt war.

Nach den Ergebnissen dieses Abschnittes hat v. Terzaghi (Nr. 46, S. 342) die Löslichkeit des Kalkes mit 15 g in rund 10 kg mit  $\text{CO}_2$  gesättigten Wassers wohl zu hoch angesetzt. Cavazzi ist zu einem solchen Wert nur bei  $0^\circ \text{C}$  und nach mindestens 10 Stunden Umrührens (agitazione) gekommen. K. v. Terzaghi's Ergebnis, daß unter Waldboden der chemische Abtrag in 1000 Jahren mindestens 25 cm betrage, müßte bei bloß anorganischer Wirkung auf etwa 17 cm zurückgeschraubt werden. Hingegen darf man dem Einfluß von Mikroben im Waldboden ein Mehrfaches jener 17 cm zuschreiben. Das geht aus der soeben erschienenen wichtigen Untersuchung Dr. G. Blöchliger's hervor<sup>1)</sup>. Er fand an frischen Steinschlagwänden von unterem Schrattenkalk mit mikroskopischen Feinspalten des Felsens, der die Finger noch nicht staubig macht, als Mittel von 10 Proben im Gramm Gestein 140.000 Keime, davon gegen 10.000 Strahlenpilze, während es im abgeschabten Staube stärker angewitterten Felsens bereits 730.000 Keime, eher noch mehr, waren und an Stücken der Schutthalde 1,58 Millionen auf 1 g. Die meisten der Mikroben erwiesen sich als typische Saprophyten an mikroskopisch feinen Humusstoffen unbekannter Herkunft. Als solche rufen sie Gärungen unter Bildung von  $\text{CO}_2$ , Milch-, Butter- und Essigsäure hervor, welche Stoffe den Kalk sehr angreifen. In den erdigen Teilen der Schutthalde fand Blöchliger bereits 5 Millionen von Keimen im Gramm! Obige Zahlen sind Mittelwerte aus 9 oder 10 Bestimmungen zu allen Jahreszeiten in sehr verschiedenen Jahren.

§ 23. Nur wenig kann über die Löslichkeit des Dolomites (Normaldolomit) ohne Kalkbeimengung:  $\text{Mg Ca}(\text{CO}_3)_2$  und Gipses mitgeteilt werden. Für die Löslichkeit des Dolomites bei Abwesenheit von  $\text{CO}_2$  fand ich keine Angaben, was aber nichts zu besagen hat, da hier nicht alle chemischen Arbeiten lückenlos herangezogen werden können, zumal dies auch unnötig wäre. Bei Drucken von weniger als 1 Atmosphäre und in  $\text{CO}_2$ -haltigem Wasser gilt im Vergleich zum Kalk der Dolomit allgemein als schwerer löslich. Diese Bedingung wäre in den meisten Gebirgen der Erde gegeben. Das geologische Auftreten der sogenannten Dolomitaschen in vielen Höhlenkarsten spricht nicht dagegen. Im Gegenteil: es kann nämlich nicht behauptet werden, daß in allen Fällen nur die Lösungsgeschwindigkeit bei der Dolomitäsche geringer war als die des Kalkes. Eine Zeitlang glaubte Linck auf Grund offenbar mißdeuteter Ergebnisse von Gorup-Besanez aus dem Jahre 1872,

<sup>1)</sup> Mikrobiologische Untersuchungen an verwitternden Schrattenkalkfelsen. Diss. Zürich. Eidg. Techn. Hochsch., 1931.

daß der Dolomit als solcher gar nicht löslich sei, d. h. er verneinte, daß das Verhältnis der Molekulargewichte von Ca und Mg in der Lösung wie im Rückstande gleich 1:1 sei. Er ließ dann aber diese Auffassung durch seinen Schüler K. Grünberg überprüfen, der sie theoretisch und experimentell widerlegte und dessen Ergebnisse auch in das Werk von Boeke und Eitel aufgenommen wurden.<sup>1)</sup> Unter diesen Umständen erübrigt es sich, Stellung zu nehmen zu den sehr verschiedenen Löslichkeiten des Magnesits:  $MgCO_3$  allein, weil daraus nichts für die Löslichkeit des Dolomites folgt. Nach den ältesten Angaben ist Dolomit nur mit etwa dem dritten Teil im Vergleich zum Kalk löslich. Die moderne Angabe von Boeke und Eitel (Nr. 51, S. 449), er sei bei Drucken unter 1 Atmosphäre schwerer löslich, über 4 Atmosphären leichter löslich als Kalk, ist eine Schlußfolgerung aus einer der wenigen Untersuchungen, welche Magnesit schwerer löslich fanden als Kalk. Die große Mehrheit ergab sowohl für wasserfreien Magnesit in reinem Wasser als auch für wasserhaltigen Magnesit in  $CO_2$  führendem Wasser das Gegenteil. Unter diesen Umständen gewinnen neues Gewicht die Werte Cossas am Dolomit selbst. Cossa hat mit Kristallen gearbeitet, die sich durch ihre gekrümmten Flächen als Normaldolomit erwiesen. Er fand, daß die Löslichkeit etwa 0,7 jener des kristallinen Kalkes betrug. Es folge ein kleiner Auszug aus Cossas Ergebnissen.

Tabelle VII.<sup>2)</sup> (Mit  $CO_2$  gesättigtes Wasser.)

Temp. °C	Luftdruck mm	Bodenkörper	Wie in Tafel I—V		
			a	b	c
11,5°	754,6	Undurchsichtiger Dolomit in kleinen Kristallen mit leicht gekrümmten Flächen. . . .	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$\frac{1}{1380}$	7,25 g
11,5°	748,7	Dolomit von Traversella mit halb durchsichtigen Kristallen (primitiven Rhomben). . . .	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$\frac{1}{1540}$	6,54 g

<sup>1)</sup> Lincks preisgegebene Deutung der Ergebnisse v. Gorup-Besanez steht auf S. 125 des I. Bandes von Doelters Handbuch der Mineralchemie. Die Arbeit des älteren Forschers erschien im Supplementband VIII der Ann. f. Chemie und Pharmacie (1872). Was Leitmeier in Doelters Handbuch v. Gorup-Besanez zitiert, ist nur ein Auszug. K. Grünbergs Arbeit erschien in der Zeitschr. f. anorgan. Chemie, 80. Bd., 1913. Schon Gorup-Besanez hat es als sehr wahrscheinlich bewiesen und ausgesprochen, was Grünberg mit vollkommener Methode erhärtet hat.

<sup>2)</sup> Zeitschr. f. analyt. Chemie. 8. Bd. 1869, S. 145ff. Leitmeier berichtet in Doelters Handbuch der Mineralchemie I, S. 384, daß nach dieser Arbeit Cossas in 10 l Wasser, das mit  $CO_2$  gesättigt war, bei gewöhnlichem Druck 3,20 Teile Dolomit gelöst wurden. Cossa zitiert nur ein Ergebnis Bischofs, daß 3149 Gewichtsteile Wasser 1 Teil isländischen Kalkspat lösten. Das ergäbe etwa 3,18 g auf 10 l Wasser. (Cossa selbst fand für isländischen Doppelspat bei 18° C 9,7 g.) Auch die übrigen Angaben des Handbuchs, betreffend Magnesit und Kalk, beziehen sich hier mit Unrecht auf Cossa. Die wirkliche Quelle habe ich nicht gefunden.

Wenn auch noch weitere Untersuchungen wünschenswert sind, damit wir erfahren, was der Dolomit durch Lösung verliert, so darf er jetzt schon als schwerer löslich gelten im Vergleich zum Kalk.

Tabelle VIII. (Löslichkeit des Gipses. 1 Atmosphäre Druck.)

Temp. °C	a	b	c
0°	0,1756‰	$\frac{1}{570}$	17,6 g
10°	0,1926‰	$\frac{1}{520}$	19,3 g
18°	0,2016‰	$\frac{1}{496}$	20,2 g
25°	0,2085‰	$\frac{1}{480}$	20,9 g

Darnach ist der Gips in reinem Wasser bei den Temperaturen der Karstgewässer 5 bis 9 mal löslicher als der Kalk in einem mit CO<sub>2</sub> gesättigten Wasser. Bei 37° bis 38° hat die Löslichkeit des Gipses ein Maximum und sinkt dann wieder.

Der Geograph, der hier vom Chemiker gern recht viele unerschütterliche Größen übernommen hätte, sieht, daß dieser in wichtigen Fragen der Löslichkeit selbst noch nach Wahrheit ringen muß. Man mag über den augenblicklichen Wert dieser Tabellen denken wie man will. Eines lehren sie uns sogleich. Es ist darnach unmöglich, die riesigen Querschnittsänderungen der Karsthohlräume in den Karbonatgesteinen oder innerhalb des Gipskarstes auf deren verschiedene chemische Löslichkeit zurückzuführen. Aber auch mit der Lösungsgeschwindigkeit wird man nicht dazu kommen, Querschnittsänderungen derselben Höhlenstränge von 1 : 50 bis 1 : 150, die gar nicht selten sind, zu erklären. Die Temperatur und der CO<sub>2</sub>-Gehalt ein und desselben Höhlengewässers können sich im Laufe des Jahres wohl ändern, sie können durch Einmündungen auch von Ort zu Ort wechseln. Aber Lösungserfolge derselben Strömung, die von Ort zu Ort sich um das 50 bis 150fache ändern und die dabei bald um so hohe Beträge zunehmen, dann wieder abnehmen, finden im Chemismus nach keiner Richtung einen Halt. Auch die Verunreinigungen durch tonige Beimengungen sind von so geringer Bedeutung, daß kalkreiche Mergel wie bei Paderborn oder in Westbosnien<sup>1)</sup> stärker verkarstet sind als mancher Dolomit. Die weitaus meisten Querschnittsunterschiede, sicher alle, die über das Verhältnis 1 : 25 hinausgehen, müssen als ursprünglich angesehen werden. Die Erweiterung durch Auslaugung des Gesteins kann die ursprünglichen Unterschiede ebensowohl verstärken wie abschwächen. Das Zweite wird das häufigere sein. Nicht so sehr die von der Auslaugung beherrschte Fortbildung der Karstentwässerung als vielmehr ihre von der Klüftigkeit beherrschte Einleitung birgt den Schlüssel zum Verständnis ihrer Hauptprobleme. So konnte A. Penck (Nr. 37) zeigen, wie sich unter dem Buntsandstein des Harzrandes im Gips und unter einst mächtigen Kreidesandsteinen

<sup>1)</sup> Nr. 25, S. 9.

im Frankendolomit des nördlichen Baiern morphologisch wie auch hydrographisch ein „unterirdisches Karstphänomen“ entwickelt hat.<sup>1)</sup> Das zeigt, daß die schwer löslichen Sedimentdecken mit ihren tonigen und kieseligen Bindemitteln des Sandes nicht nur Haarfugen besaßen, sondern Klüfte, welche selbst beim Fortfall merklicher Lösungserfolge die unterirdische Entwässerung zu den verborgenen Karstgesteinen leiteten. Daher kommen auch die sonstigen Anklänge an die Karsthydrographie, die man in Sandsteinen öfter findet, denen eine ausgesprochene Absonderung nach bedeutenden Klüften eigen ist, während ihre Löslichkeit neben derjenigen der Karbonate als verschwindend gelten kann.

## II. Das allgemeine Verhalten der Karstgewässer im Lichte der physikalisch erfaßten Bewegungsformen des Wassers.

### A. Die theoretischen Unterlagen.

§ 24. Der Abfluß der nicht verkarsteten Gebiete vollzieht sich: 1. in Gewässern, die dem Sohlengefälle folgen, und 2. in der Form der kapillaren Gleitbewegungen des Grundwassers, die physikalisch betrachtet, vielfache zusammenhängende Röhrenströmungen unter Druck darstellen;<sup>2)</sup> 3. in der Form der ruhigen Bewegungen in Quell- und Flußseen.

Der Abfluß der voll verkarsteten Gebiete vollzieht sich 1. ebenfalls in Gewässern, die dem Sohlengefälle folgen. Dies geschieht zum Teil oberirdisch, zum Teil aber unterirdisch, hier aber meist nur streckenweise und auch im äußersten Falle nie so weit, wie es im Nichtkarst ganz gewöhnlich ist.

2. Die kapillare Grundwasserbewegung ist in Karstgebieten sowohl in oberirdischen als auch in unterirdischen Schotter- und Sandlagen möglich, doch tritt sie sehr zurück. Dazu kommt im Karst noch die physikalisch gleichartige Kapillarströmung in engen Klüften und Röhren.

3. Die Hauptart des unterirdischen Abflusses ist die überkapillare Röhrenströmung unter Druck, d. h. in ganz wassererfüllten Hohlräumen jeder Größe und Form. Sie ist es, die in den zugänglichen Höhlen in der Form von Siphonen mit jenen Gerinnen abwechselt, die bloß dem Sohlengefälle folgen und die ebenso an 4. Höhlenseen sich anschließt und meist sehr bald dem Vordringen der Menschen über diese Seen hinweg und längs Sohlenbächen ins Höhleninnere ein Ende macht. Die Höhlenseen sind, soweit sie durchströmt werden, im Vergleich zu den hindurchgehenden Wassermassen klein, hierin ganz verschieden von den Seen obertags. Daraus darf man auf eine stärkere Bewegtheit des Wassers solcher unterirdischer Seen schließen. Diese aufgezählten Formen des hydrographischen Auftretens bedeuten nicht einfach auch verschiedene Fließweisen im physikalischen und hydraulischen Sinn. Vielmehr sind sie mit diesen in verschiedenen Kombinationen vereint.

<sup>1)</sup> Für den fränkischen Karst hat H. Cramer (Nr. 8) gezeigt, daß die unterirdische Entwässerung bereits vor Ablagerung der Kreideschichten maßgebende Wirkungen entfaltet hatte, doch ging die Verkarstung auch noch unter der Kreidedecke weiter, was für obige Bewertung der Klüfte im Deckgestein dasselbe bedeutet.

<sup>2)</sup> Vgl. Nr. 30 und die dort angegebenen Schriften.

§ 25. Als physikalisch-hydraulische Fließweisen sollen nun auseinandergehalten und erläutert werden: das Gleiten, das Strömen und das Schießen.<sup>1)</sup> Die gewöhnlichste Art der Fließbewegung, sowohl in Gewässern mit gleichsinnigem Sohlengefälle, wie auch in überkapillaren Hohlraumgewässern unter Druck ist das Strömen, welches in Wirbeln („turbulent“) erfolgt. Das Gleiten ist eine einfachere, aber seltener zu beobachtende Fließweise, es erfolgt ohne Wirbel („laminar“); in geraden Röhren oder Kanälen erfolgt es also mit parallelen Stromfäden. Betrachten wir zunächst näher das Verhältnis von gleitenden zu wirbelnden Fließbewegungen überhaupt.

Wenn die Geschwindigkeit einer turbulenten Strömung unter einen gewissen Wert sinkt, so wird diese laminar. Dieser Wert ist nach Reynolds

$$u = \frac{1000 \nu}{\text{cm. sek} \cdot r} \quad 1$$

Dabei ist  $r$  der lichte Radius in geraden glatten Rohrzylindern,  $\nu$  ist ein von der Temperatur abhängiger Wert mit folgenden Größen nach der Tabelle in Lambs Hydrodynamik (S. 736).

Temp. °C	1000 $\nu$
0°	17,97
5°	15,18
10°	13,07
15°	11,40
20°	10,04

In einem Wasserleitungsrohr von 2 cm Durchmesser ist  $u$  bei 5° etwa 15 cm/sek. Wird  $u$  überschritten, so wächst die Gefahr, daß die Strömung wieder turbulent wird, d. h. eine „kritische“ Geschwindigkeit überschreite. Mit besonderer Vorsicht kann man die Geschwindigkeit  $u$  verzehnfachen, ohne daß die Strömung turbulent wird. Doch kommt eine solche Vorsicht beim Anschwellen der Karstgewässer nicht in Betracht. In rauen und krummen Röhren wird sich die Wirbelbildung schon bei einer geringeren kritischen Geschwindigkeit einstellen als in glatten. Die Formel besagt etwas im Karst sehr Wichtiges: In Hohlräumen, die mehrere Meter Durchmesser haben, wird der Wert  $\frac{1000 \nu}{r}$  sehr klein und schon bei äußerst langsamen Strömungen sind Wirbel möglich.

Spuren von Wirbeln an Höhlenwänden sind also noch kein Beweis raschen Fließens der einstigen Karstgewässer.<sup>2)</sup> Aber das Fehlen solcher Spuren an unzerstörten Wandflächen spricht für eine ungeheure Langsamkeit des zugehörigen Fließens. Im Grundwasser der Schotter und Sande und in entsprechend engen Klüften, wo  $r$  ganz winzig ist, liegt die kritische Geschwindigkeit hoch. Da aber die absoluten Geschwindigkeiten wegen der bescheidenen Druckhöhen nur mäßige sein können,

<sup>1)</sup> Vgl. Nr. 38 und die dort erwähnten Werke.

<sup>2)</sup> Es seien denn bestimmte morphologische Merkmale von Geschwindigkeiten über 1 bis 2 m in der Sekunde vorhanden (Mühlen mit Reibesteinen u. dgl.).

so herrscht längs solcher Wasserbahnen eine gleitende, laminare Bewegung. Eine solche findet auch in weiten Hohlräumen bei winzigen Geschwindigkeiten statt. Wenn ein weites Gefäß sich aus sehr enger Öffnung in Bodennähe entleert, z. B. eine Badewanne, so ist ihr Inhalt in gleitender Bewegung, von dem kleinen Wirbel an der Ausflußöffnung abgesehen. Auslauf sehr weiter Hohlräume durch enge Abzüge kann auch im Karst vorkommen. Es ist der einfachste Fall einer Röhrenströmung unter Druck, wenn man unter Röhre nicht unbedingt einen zylindrischen Raum versteht. Gleiten und Strömen können also sowohl in oberirdischen als auch in unterirdischen Sohlengewässern<sup>1)</sup> vorkommen, ferner auch in Druckbewegungen durch beliebige wassererfüllte Hohlräume bei sehr verschiedenen Querschnitten, je nach der Stärke des Druckes, wobei das Wasser auf längeren Zwischenstrecken auch bergauf fließen kann.

§ 26. Das Schießen zum Unterschied vom Strömen ist nur dadurch definiert, daß dabei das Fließen schneller ist als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen, während das Strömen langsamer ist als diese. Wellen aller Art pflanzen sich in offenen Gewässern mit einer Geschwindigkeit  $v$  fort, die etwa gleich ist  $\sqrt{g t}$ , wobei  $g$  die Schwerebeschleunigung,  $t$  die Tiefe des Wassers ist. Ein tieferes Gewässer kommt also erst bei einer höheren Geschwindigkeit ins Schießen als ein seichteres. Jenes kann noch strömen bei Geschwindigkeiten, unter denen dieses schon schießt. In Röhrenströmungen pflanzen sich Wellen jeder Art ungeheuer viel rascher fort als in offenen Gerinnen, so daß Wasser unter Druck praktisch nie ins Schießen kommen kann.<sup>2)</sup> Das ist für die Beurteilung von Siphonströmungen in Höhlen wesentlich. Wirft man einen Stein in offen strömendes Wasser, so pflanzen sich die Wellenringe noch flußaufwärts fort, wenn auch langsamer als abwärts. In einem schießenden Gewässer treiben sie nur abwärts.<sup>3)</sup> Was von Wellen jeder Art gilt, trifft auch für alle anderen Impulse und Einwirkungen auf die Wasserläufe zu, die sich in der Flüssigkeit nur mit Wellengeschwindigkeit aus dem Erregungsgebiet ausbreiten können. Sie gelangen in schießenden Gewässern nicht flußaufwärts.<sup>4)</sup> Wasserfälle üben daher nur in strömenden Flüssen jenen bekannten „Zug“ oberhalb aus, in schießenden hingegen nicht. Ein strömendes Gewässer antwortet auf eine Einengung des Bettes welcher Art immer durch Spiegelsenkung, Zunahme der Geschwindigkeit und Abnahme der Tiefe, ein schießendes verhält sich in allem entgegengesetzt. Die Erweiterung des Querschnittes beeinflußt ein strömendes Gewässer so wie eine Verengung ein schießendes und umgekehrt. So ist es vor allem der Anblick der Wasser Spiegel und ihres Verhaltens, der dazu geführt hat, vom Strömen das Schießen abzusondern. Alle diese Merkmale könnten in einer Röhrenströmung unter Druck nicht auftreten; aber auch im Hinblick auf die physikalische Definition schießender Geschwindigkeiten sind solche, wie schon hervor-

<sup>1)</sup> So nenne ich Gewässer, die einfach dem Gefälle der Sohle folgen. Häufig nennt man sie Gravitationsgerinne.

<sup>2)</sup> Herr Prof. Meyer-Peter, Zürich, teilte mir als eine Größenordnung der Geschwindigkeit der Wellenfortpflanzung in Druckstollen tausend Meter in der Sekunde mit.

<sup>3)</sup> Man vergleiche die klaren Zeichnungen dieser Wellen, wenn ihre Fortpflanzung  $\ll$  ist als die Fließgeschwindigkeit bei Rehbock (z. B. in Nr. 40, S. 512).

<sup>4)</sup> Vgl. Rehbock (ebenda, S. 510f.).

gehoben, in Röhren und Höhlen des Karstes auf keinen Fall anzunehmen. Der Anblick eines schießenden Gewässers ist eigentümlich strähnig und in ganz glatten geraden Rinnen kann er an gleitende Bewegung erinnern. Die Wirbelbildung tritt zurück, doch sind die Bewegungsbahnen der Wasserteilchen nicht einfach parallel. Vielmehr besteht eine gewisse Ähnlichkeit mit Windbahnen, deren Turbulenz zeitweise zu sehr als echte Wirbelbildung aufgefaßt wurde, nach den neuesten Studien und Versuchen von W. Schmidt in Wien jedoch vorwiegend aus schlierig schwach gewundenen Bahnen besteht. Rehbock betrachtet das „Schießen“ als zweite Art turbulenten Fließens und Herrn Prof. Meyer-Peter verdanke ich die Mitteilung, daß man hierfür dieselben Geschwindigkeitsformeln anwendet wie für das Strömen; hingegen gelten für das laminare Fließen unter der jeweiligen kritischen Geschwindigkeit ganz andere Formeln (vgl. § 39).

§ 27. Wenn die Turbulenz ein gewisses Maß überschreitet, so daß es noch nicht gelungen ist, in der Heftigkeit der Bewegung das Verhalten einzelner Wirbel zu untersuchen, so ist der oft gebrauchte Ausdruck „ungeordnetes Fließen“ verständlich, der aber früher in zu weitgehender Weise angewendet wurde. Es gibt nämlich zahlreiche Wirbel, die sich so regelmäßig verhalten, daß man glaubt, einer Gesetzmäßigkeit auf der Spur zu sein, die in einigen Fällen schon aufgeheilt wurde. Allgemein bekannt, aber meines Wissens noch nicht näher untersucht ist der Ausflußwirbel beim Übergang der laminaren Bewegung eines weiten Gefäßes in die turbulente eines relativ engen Abzugsrohres. Wieder darf an das Leerlaufen einer Badewanne erinnert werden; denn solange darin noch reichlich Wasser ist, macht sich der Wirbel zuerst gar nicht, dann als kleine Vertiefung an der Oberfläche der Wasserfüllung schwach bemerkbar. Es ist erstaunlich, wie verschieden die Austrittsöffnung gestaltet sein kann, wenn dennoch diese einfache Drehbewegung darüber zu schweben scheint. Sie ist auch vorhanden in nicht zu kleinen Waschbecken, ganz gleich, ob der Ausfluß aus kleinen Lücken in der Anordnung eines regelmäßigen Polygons mit einer Lücke in der Mitte besteht, oder ob er einen fünf- oder zehnstrahligem Stern darstellt, dessen Mitte undurchlässig ist. Auch über einem einfachen Rost mit kreisförmigem Umfang und geraden Stegen und Schlitzten oder über einer Kreisöffnung, in der ein konischer Stöpsel quer im Wege lag, wurde der einfache Austrittswirbel von mir beobachtet, wenn die Füllung im übrigen sich selbst überlassen blieb. Diese Drehung muß ein sehr stabiler Bewegungszustand sein. Nur in einem Falle fand ich, daß ein solcher Wirbel sich nicht bilden konnte: wenn nämlich die Ausflußöffnung am Boden des weiten Gefäßes die Form eines schmalen Ringes hatte, entstanden durch das Lüpfen einer kleinen Metallscheibe. Dabei zeigten sich manchmal während des stilleren Leerlaufens über dem Ring zwei bis drei schwache einander ablösende Wirbel, mehrmals zwei zugleich. Jeder einzelne war nur kurzlebig. In auslaufenden Trichtern ergreift hingegen der Wirbel als Drehbewegung deutlich einen großen Teil des Inhaltes, wenn nicht von anfang an den ganzen. Dann ist oder bleibt er nicht der bloße Vermittler zweier ganz ungleicher Bewegungsweisen im weiten und engen Teil des Trichters. Aber immer ist in diesen Fällen ein streckenweise spiralisches Fortschreiten des Wassers vorhanden, eine Bewegungsform, die zugleich ein langsames Vorwärtkommen der gesamten Wassermasse und rasche Bewegung der einzelnen Teilchen längs ihrer gekrümmten Bahnen erlaubt. In Flüssen

bewegt sich der Hauptteil der Wassermasse auch in Spiralen vorwärts, auf geradlinigen Strecken mit einem oben gegen die Mitte gerichteten Doppelwirbel, in Mäanderbögen in einem einfachen, oben gegen die Prallstelle gerichteten Wirbel.<sup>1)</sup> (Spirale um die Längsachse des fließenden Gewässers.) Lorenz<sup>2)</sup> hat neuerdings einen Doppelwirbel, ebenfalls in der Form zweier Spiralgänge im Inneren von Druckströmungen beim Fließen durch kreisbogenförmige Rohrkrümmer sogar theoretisch begründet, im Einklang mit Beobachtungen. Diese „geordneten“ Drehbewegungen sind bei rauhen Ufern von Uferwirbeln oder Wasserwalzen um steile Achsen begleitet; die Uferwirbel sind gleichfalls in ihrer Wirkungsweise nicht unentwirrbar. Selbst auf morphologischem Wege ließ sich eine sehr deutliche Regelmäßigkeit beweisen (Nr. 29). Die Theorie dieser „geordneten Turbulenz“, welche uns obige Beispiele näher brachten, scheint mir noch sehr in den Anfängen zu stecken. Die Karsthöhlen stellen nun oft Röhren dar, deren stark ungleicher Querschnitt und krümmenreicher Längsverlauf über alle physikalischen und technischen Versuchsbedingungen hinausgeht. Daher verdient hier gerade die erwähnte Fließweise Aufmerksamkeit, die erst in den letzten Jahren Beachtung gefunden hat, weil die einfachen Versuchsbedingungen der Hydrodynamik einzelne Wirbel eher als Störung erscheinen ließen, wenn dabei überhaupt das spiralige Fließen aufgefallen ist.

§ 28. Nun muß eine Bewegung des Wassers besprochen werden, die man nicht als Strömen oder Fließen schlechtweg bezeichnen darf, die jedenfalls etwas ganz anderes ist als alles, was bisher so genannt wurde. Es handelt sich um die Verschiebung des Wassers bei den kapillaren Saugvorgängen. Die Karstgesteine ziehen ebenso wie Metall- und Glaswände eines Gefäßes jeden Wasserspiegel empor, der an ihnen sein Ufer hat. In engen Röhren oder zwischen dicht benachbarten Platten ergibt sich daraus infolge der Spannung der gekrümmten Oberfläche ein begrenztes Eindringen des Wassers. Dieses ist bei den gewöhnlichen Versuchsanordnungen ein kapillares Emporsteigen, kann aber auch nach abwärts eintreten, welcher Fall bei den Karstgesteinen wichtiger ist. Zwischen dem Eindringen nach oben oder unten ist kein merklicher Unterschied. Denn die kapillaren Oberflächenspannungen sind der Volumskraft der Schwere derart überlegen, daß die Richtung des Eindringens auf dessen Tiefe ohne erkennbaren Einfluß bleibt. Soweit das Wasser in so enge Räume gesogen wird, halten die Oberflächenspannungen es daher auch gegen die Schwerkraft fest. Wir wollen daher der allgemein gültigen Formel für die kapillare Steighöhe näher treten.

Sie besagt:

$$h_{mm} = \frac{15 \cdot 4}{r_{mm}} \text{ (In der Darstellung von Ch w o l s o n [Nr. 52, 2. Aufl., S. 201 u. 209]) } \quad 2$$

Hat die saugende Röhre innen einen Millimeter Radius, so steigt Wasser fast

<sup>1)</sup> Vgl. zuletzt Rehbock (Nr. 40, S. 516). E. Brückner lehrte in der Vorlesung nach amerikanischen Beobachtungen, daß der Doppelwirbel nur bei fallendem Hochwasser oben gegen die Mitte gerichtet sei, bei steigendem aber oben nach den Ufern auseinander gehe.

<sup>2)</sup> Die Energieverluste in Rohrerweiterungen und Rohrkrümmen. Z. f. Techn. Physik, Augusth. 1929. Prandtl hat diese geordnete Drehbewegung in gekrümmter Rohrleitung als „Sekundärströmung“ in einem Abriß der Strömungslehre, 1931, S. 103 kurz behandelt. Das Wasser strömt dabei aus der Mitte gegen die Außenseite der Krümmung.

15  $\frac{1}{2}$  mm empor (hinab) im Vergleich zum Referenzspiegel oder zur Ausgangslage. Ist  $r = 2,5$  bis 3 mm, so hält die Röhre gerade noch einen Tropfen am unteren Ende fest, den die Schwerkraft nicht abreißt. Bei 6 mm Durchmesser hört auch für das reinste Wasser ein den Querschnitt der Röhre füllendes Ansteigen und Anhaften auf. Der Einfluß der Reinheit des Wassers<sup>1)</sup> ist im Vergleich zu dem der Temperatur so groß, daß in obiger Formel auf diese keine Rücksicht genommen wurde. Zwischen parallelen Platten mit dem Abstand  $r$  wird das Wasser nur halb so hoch emporgezogen als nach der Formel 2. Damit Wasser auch nur einen Meter tief zwischen parallelen Gesteinsbänken angesogen werde, darf die Fuge nicht breiter sein als 0,008 mm, eine Enge, die bereits einer mikroskopischen Haarfuge entspricht. Tiefer angesogen wird Wasser bei allmählich enger werdenden kapillaren Hohlräumen, wobei es bis zur engsten Stelle gelangt, die in vielen Fällen allerdings auch dicht unter der Oberfläche liegen kann.<sup>2)</sup>

Wichtig ist nun folgendes: Wird das Wasser zwischen beliebig ausgedehnten parallelen Gesteinsplatten angesogen, so ist nicht umso mehr Wasser im Inneren des Gesteins, je tiefer es eindringt, sondern nur gleich viel, denn die Steighöhe ist dem Abstände der Platten verkehrt proportional; und was das Volumen durch die Höhenzunahme gewinnt, verliert es durch die Abnahme der Breite.

Wird das Wasser aber von Röhren angesogen, etwa an der Stelle, wo Fugen einander kreuzen, so ist im Berg umso weniger Wasser in den Röhren, je tiefer es in sie eingesogen wurde. Denn in diesem Falle hängt das Volumen vom Quadrate des Halbmessers der Grundfläche ab, der aber mit der Tiefe des Saugvorganges im umgekehrten Verhältnis steht. Die Folgen des Gesagten für den Karst mögen zwei Rechenbeispiele mit der Formel 2 beleuchten. Das Ausmaß natürlichen Wassers, das von einer stets gleich weiten Karströhre mit 5 mm Durchmesser angesogen wird, beträgt 0,120 Kubikzentimeter.

$$h = \frac{15,4}{2,5 \text{ mm}} = 6,16 \text{ mm}, r^2 \pi = 20 \text{ qmm. } 0,120 \text{ bis } 145 \text{ cbcm sind die größte Menge}$$

gewöhnlichen, nicht absolut reinen Wassers, die angesogen werden kann.<sup>3)</sup> Wäre der Durchmesser nur 1 mm, so wird das Wasser wohl 30,8 mm tief angesogen, aber es sind dann nur noch 0,0242 cbcm in der Röhrenkluft. Zwischen parallelen Platten von 1 mm Abstand werden auf Fugenlängen, die an der Erdoberfläche 1 m betragen, 7,7 Kubikzentimeter Wasser angesogen. Mehr wird es auch nicht, wenn engere, gleich lang ausstreichende Fugen ein tieferes Eindringen zulassen. Ist aber die Fuge an der Oberfläche 1 km lang, so kann sie kapillar 7,7 l Wasser aufnehmen. Es sind 125 so lange Fugen nötig, bis ein einziger Kubikmeter Niederschlag in einem Karstgebiet zwischen parallelen Fugenwänden auf kapillare

<sup>1)</sup> Destilliertes Wasser in ganz sauberen Röhren kann doppelt so hoch steigen, als die Formel angibt, die etwa für Leitungswasser gilt.

<sup>2)</sup> Nach den in Keilhacks Lehrbuch über Grundwasser und Quellen S. 113, erwähnten Versuchen Atterbergs konnten in Sanden mit  $\frac{1}{20}$  bis  $\frac{1}{50}$  mm Durchmesser Steighöhen bis fast 1,9 m erzielt werden.

<sup>3)</sup> Für  $r = 3$  mm und bei besonders reinem Quellwasser kann man für das Maximum auf 0,145 cbcm hinaufgehen.

Art Unterkunft gefunden hat. Was geschieht aber, wenn die Wände der Fugen nicht parallel sind? Dann hat das Ansaugen von Wasser an den Verengungen seine Grenze. Diese Verengungen können so nahe an der Oberfläche sein, daß nicht einmal die geringen Mengen Wasser Eintritt finden, die bisher berechnet wurden. Dies wird in den meisten Fällen gelten, denn in der Natur gibt es häufig kleine Unebenheiten der Fugenwände. Wenn aber eine Verengung so regelmäßig und allmählich erfolgte, wie zwischen leicht konvergierenden glatten Wänden, dann kann theoretisch viel mehr Wasser kapillar angesogen und festgehalten werden als oben berechnet wurde. Nehmen wir einmal einen solchen höchst unwahrscheinlichen Fall an, wie ihn Abb. 8 darstellt, eine Fuge, die bei 1 mm Breite an der Oberfläche sich bis 2 km Tiefe ganz stetig ohne Rauheiten beliebig stark verenge. Das erste eintretende Wasser würde 2000 m weit angesogen und dann still stehen. Ist das Ausstreichen dieser Fuge an der Oberfläche 1 km lang, so nimmt sie kapillar 1000 cbm oder 10000 hl Wasser auf, denn ihre Wandfläche ist 2 qkm groß. Obwohl dergleichen, selbst vereinzelt, kaum je vorkommen wird, kann man von solchen Wasseraufnahmen im Karst keine Hydrographie ableiten, denn wie mir Herr Prof. Scherrer freundlich rechnerisch bestätigte, üben derart kapillar angesogene beliebig viele Kubikmeter Wasser in der Richtung der Fuge keinen Impuls aus. Auch wo die Fuge in 2000 m Tiefe wieder weiter wird, fließt deswegen gar nichts vorwärts. Nehmen wir nun an, eine Gebirgsbewegung erweitere diese Fuge plötzlich zu überkapillarem Ausmaß. Dann fließen die 1000 Kubikmeter ab, das ist so viel Wasser, als die Areusequelle im Schweizer Jura bei der sehr geringen Wasserführung von 2 cbm/sek schon während 83 Minuten abgibt. Wer der Meinung ist, daß Annäherungen an diesen Fall der Abb. 8 zwar sehr selten, aber doch in der Natur vorkommen könnten, wird es vielleicht übertrieben finden, wenn einer allgemein behaupten wollte, daß in allen Fugen eines Karstes zusammen umso weniger Wasser enthalten ist, je tiefer es ins Innere reicht. Aber diese vielleicht da und dort als Übertreibung bedenkliche Auffassung weicht noch lange nicht so von der Wahrheit ab als die entgegengesetzte Meinung, der Karst sauge sich wie ein Schwamm mit Wasser voll. Diesen irreführenden Vergleich hat meines Wissens erstmalig Wiebel für die Kalke von Kephallenia 1873 ausgesprochen, ohne jedoch darauf eine Theorie zu gründen. Der Karst saugt nicht einmal in der Weise Wasser an wie ein Schwamm, der nicht zusammengedrückt eingetaucht wird, denn die zahlreichen überkapillaren Löcher des Schwammes erlauben dem Wasser das bloße Hineinrinnen beträchtlicher Mengen, die im Vergleich zum

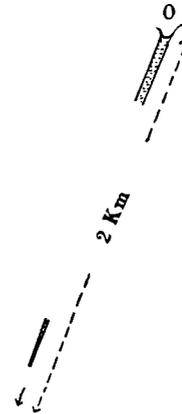


Abb. 8. Vgl. § 28. letzter Teil. O = Klufteingang an der Erdoberfläche. In 2 km Abstand von O ist die engste Stelle der bis dahin gleichmäßig konvergierenden Kluft, die sich dann nach Annahme wieder erweitert. Der angesogene verhältnismäßig bedeutende Wasserinhalt dieser Kapillarkluft übt nicht so viel Druck aus, um sich in Bewegung zu setzen. Der Widerstand der Oberflächenspannung am inneren Ende des Wassers ist zu groß.

Schwamm sehr groß sind, das kapillare Saugen hebt dann erst im Inneren, zum Teil ziemlich weit von der Oberfläche an.

§ 29. Damit kapillar angesogenes Wasser durch einen Karst fließen könne, müssen ganz bestimmte Voraussetzungen gegeben sein. Es muß entweder auf der Eintrittsstelle ein Druck lasten oder an der Austrittsstelle die Verdunstung wirken. Nur in wassererfüllten Karrenklüften, Dolinen und anderen Karsthohlformen wird ein solcher Druck, selten genug und schwach genug, geboten. Die Verdunstung allein kann nur dann helfen, eine kapillare Bewegung aufrecht zu erhalten, wenn das Wasser einen Raum erreicht, wo sie eine Rolle spielt, z. B. eine trockene Höhle. Nichts kann allen kapillaren Wasserumsätzen schon nach Menge und Geschwindigkeit fremdartiger gegenüberstehen als die Karstquellen, die gewöhnlich mehrere, zeitweilig aber in heftiger Aufwallung viele Kubikmeter Wasser in der Sekunde zutage fördern.

Die Bewegung des unterirdischen Wassers im Karst, soweit es Hohlraumquerschnitte zeitweise oder ständig erfüllt, ist nichts anderes als eine oft weitverzweigte Röhrendurchströmung. Dabei muß man unter Röhren nur nicht immer zylindrische Räume verstehen, sondern auch ganz anders geformte mit beliebig vielen Ecken, Knickungen und starken Änderungen des Querschnittes. Nun sind ja auch die verhältnismäßig verwickelteren Röhrenformen, mit denen Physiker und Techniker noch arbeiten, oft viel einfacher und fast stets viel weniger rau als die Hohlräume, in denen sich eine Karstentwässerung einnistet. Daher darf man nicht vergessen, daß alle Geschwindigkeiten, welche die Physiker und Techniker finden oder errechnen, größer sind als jene, die im theoretisch ähnlichsten Falle im Karst vorkommen. Es gelten also im Karst nur jene Behauptungen erst recht, die sich auf die besondere Langsamkeit der Fließbewegungen in gewissen Experimenten stützen. Hingegen ist die Übernahme großer Geschwindigkeiten auf Grund von rein mechanischen oder hydraulischen Formeln experimenteller Herkunft für den Karstforscher unter allen Umständen zu überlegen, bedenklich und gelegentlich verwerflich. Keine Einschränkung erleidet hingegen im Karst die Gültigkeit des hydrostatischen Paradoxons, das die Unabhängigkeit des spezifischen Bodendruckes von der Gestalt, Neigung und Anzahl der Gefäßwände aussagt. Freilich wird diese Erkenntnis im Karst selten die Voraussetzungen ihrer Anwendbarkeit finden. Denn sie gilt für ruhendes Wasser, wie es in der Natur nicht oft angetroffen wird. Bezüglich der Annäherungen langsam bewegten Wassers an den hydrostatischen Druck vgl. den folgenden Paragraphen.

§ 30. Der Druck der ruhenden Flüssigkeiten heißt statischer Druck. Bei ruhigem Wasser spricht man auch vom hydrostatischen Druck. Er ist bekanntlich unabhängig von der Gestalt der Gefäße. Diese können z. B. auch vielfach verzweigte kommunizierende Röhrengeflechte darstellen. Hat ein weites gefülltes Gefäß eine sehr kleine Öffnung am Boden oder in der Seitenwand, so tritt sein Inhalt als Wasserstrahl hervor. Hat die Ausflußöffnung eine entsprechende Form, so daß sich an ihrem Rand keine Störungen einstellen, so fließt das Wasser so schnell hindurch, als ob es den Weg vom Spiegel bis zum Ausfluß im freien Fall zurückgelegt hätte, d. h. die potentielle Energie, die wir den Wasserdruck auf die Öffnung nennen,

hat sich in die Geschwindigkeit der ausfließenden Wassermenge verwandelt. Diese Geschwindigkeit ist

$$v = \sqrt{2gH} \text{ und daraus folgt } H = \frac{v^2}{2g} \quad 3$$

$g$  ist die Schwerebeschleunigung,  $H$  die zu dem betreffenden Druck gehörige Geschwindigkeitshöhe. So lange diese gleichgesetzt werden kann der Höhe der ganzen Wassersäule über dem Ausfluß, spricht man von einem Ausfließen unter hydrostatischem Druck. Genau genommen ist das Wasser nicht in Ruhe, sondern fließt im weiten Gefäß sehr langsam und laminar. Selbst wenn die Gestalt der Ausflußöffnung einen Wirbel über sich erzeugt, so daß die Geschwindigkeitshöhe vielleicht  $\frac{1}{2}\%$  von der Höhe der Wassersäule abweicht, fällt der Energieverlust durch den Wirbel praktisch nicht ins Gewicht und man wird noch immer von Ausfluß unter hydrostatischem Druck sprechen dürfen.<sup>1)</sup>

Wenn aber das Wasser aus dem weiten Gefäß durch ein Ansatzrohr ausströmt, so ist die Geschwindigkeit des Ausflusses bedeutend geringer als die des freien Falles durch den Höhenunterschied  $H$  zwischen Spiegel und Rohrmündung. Es fließt nur so schnell, als ob es um eine kleinere Höhe  $h'$  herabgefallen wäre;  $v$  ist hier gleich  $\sqrt{2gh'}$ . Ein großer Teil der Druckenergie, welche die Gefäßfüllung besitzt, ist hier nicht in Geschwindigkeit verwandelt, sondern hat zur Überwindung der Wandreibung und auch der Zähigkeit gedient; diese ist beim Wasser sehr gering, aber nicht gleich Null. Die Formel  $v = \sqrt{2gh}$  ergibt auch für jede mittlere Geschwindigkeit den zugehörigen Wert von  $h$ . Wenn zwischen dem Ausflußrohr und dem weiten Gefäß ein richtig abgerundeter Übergang hergestellt wurde, etwa gemäß Abb. 9, so daß Störungen der Einströmung unterbleiben und Energie nicht zur Überwindung eines „Eintrittswiderstandes“ verbraucht wird, so herrscht am inneren Ende der gleichweiten Rohrstrecke dieselbe mittlere Wassergeschwindigkeit wie am Ausfluß. Wenn aber das gleichweite Rohr ohne Übergang scharfrandig an die Gefäßwand grenzt, so zieht sich der Wasserstrahl, der ins Rohr tritt, zuerst zusammen und füllt den Rohrquerschnitt gar nicht aus. Erst ein Stück unterhalb legt er sich unter Energieverbrauch überall an die Rohrwand an und erst von dieser Stelle an ist die mittlere Geschwindigkeit  $v$  bis zur Mündung gleich. Die Größe  $v$  tritt also in jedem Falle erst in einem kleinen Abstand vom weiten Gefäß ein, im Falle des scharfrandigen Rohransatzes mit merklichem Energieverlust, im Falle der Abb. 9 ohne Energieverlust. Diese Zeichnung zeigt vom Ausflußrohr nach oben abzweigende Standröhren. Wenn sie überkapillar weit sind, steigt das Wasser darin gerade so hoch, daß das Gewicht ihrer Füllung zusammen mit dem Luftdruck dem Wanddruck der Strömung das Gleichgewicht hält. Zu diesem Wanddruck wirkt zusammen, was vom Druck der Wassersäule im weiten Gefäß übrig ist und der Luftdruck, der ja auch auf der Gefäßfüllung ruht. Dieser Wanddruck heißt

<sup>1)</sup> Wird durch Nachfüllen im weiten Gefäß die Spiegelhöhe aufrecht erhalten, so ist nach Weisbach S. 948  $v = \sqrt{2gH} : \sqrt{1 - \left(\frac{F}{G}\right)^2}$ .  $F$  ist der (enge) Ausfluß-,  $G$  der (weite) Zuflußquerschnitt.

der hydraulische oder (hydro)dynamische Druck der Strömung. Die Wassersäulen in den Standrohren zeigen uns, daß der Wanddruck gegen den Ausfluß hin immer geringer wird und dort nur noch dem Luftdruck gleichzusetzen ist.

§ 31. Bei einer genauen Betrachtung der oberen Zeichnung der Abb. 9 erkennt man, daß die Höhen der Druckspiegel in den Standrohren nicht längs einer schiefen Ebene absteigen, sondern daß ihre Verbindungslinie über dem Beginn der Röhrenströmung etwa auf eine Länge von 50 Rohrdurchmessern eine nach oben offene Konkavität aufweist. Abb. 9 gilt für eine turbulente Strömung. Bei einer Laminarströmung wäre die Konkavität besonders am Anfang deutlicher und würde sich auf längere Strecken, z. B. 100 bis über 200 Rohrdurchmesser geltend machen. Auch bei der turbulenten Strömung ist die Länge der Strecke mit konkavem Druckhöhenabfall nicht unabhängig von den veränderlichen Versuchsbedingungen, wie dem Rohrmaterial usw. Treten wir der Natur des konkaven Druckhöhenabfalls näher, in welchem eine ganz entsprechende Abnahme des hydraulischen Drucks erkennbar wird. Jeder Flüssigkeitsdruck kann durch eine Höhe dargestellt werden, wenn man das spezifische Gewicht der Flüssigkeit  $\gamma$  kennt. Der Druck  $p = \gamma \cdot h$ . Weil für Wasser bei 4° C  $\gamma = 1$ , so ist ein Druck von 30 *g* auf 1 *qcm* der Druck einer 30 *cm* hohen Säule solchen Wassers. Aber für jede während der Beobachtung gleichbleibende Flüssigkeit beliebiger Temperatur, die unter verschiedenen Drucken auftritt oder beobachtet wird, ist es erlaubt, das Verhältnis dieser Drucke dem Verhältnis der Druckhöhen gleichzusetzen. Denn aus  $p = \gamma h$  folgt auch  $h = \frac{p}{\gamma}$ . Diese Einsicht hat bei v. Mises einen grundsätzlichen und eleganten Ausdruck gefunden:

Druck = Kraft : Fläche und spezifisches Gewicht = Kraft : Volumen, also

$$\frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} : \frac{\text{Kraft}}{\text{Volumen}} = \text{Länge} \left( = \frac{\text{Volumen}}{\text{Fläche}} \right).$$

Wir dürfen demnach alle Wasserdrucke durch Längen, d. h. durch die zugehörigen Höhen in Vergleich setzen. Das ist für die Veranschaulichung der *p*-Werte von größtem Vorteil.

Betrachten wir nun die untere Zeichnung der Abb. 9. Würde die Strömung im Rohr durch keinerlei Reibung beeinflusst, so stünde in Standrohren das Wasser so hoch, daß es überall bis zur wagrechten Linie 2 emporreichen würde. Die Linie 2 ist um *h* tiefer als das mit dem Spiegel im Gefäß übereinstimmende Niveau 1.  $h = \frac{v^2}{2g}$ , ist die schon bekannte Geschwindigkeitshöhe für die mittlere Geschwindigkeit. Ist die Form des Einlaufes abgerundet, wie in Abb. 9, so dürften die kaum merklichen Energieverluste beim Einlauf als Höhen dargestellt so niedrig sein, daß sie in der Dicke der Linie 1 Platz finden. Hingegen wird bei scharfrandigem Rohransatz der Energieverlust durch die Kontraktion der Strömung bedeutend, etwa  $0,3 \frac{v^2}{2g}$ . Freilich ist dann *v* kleiner, als es ohne diesen Verlust wäre. Im Falle der Abb. 9 ist aber von der ursprünglichen Druckhöhe *H* nicht nur die Geschwindigkeitshöhe *h* abzuziehen, sondern als erstes kommt der Einfluß der inneren Reibung

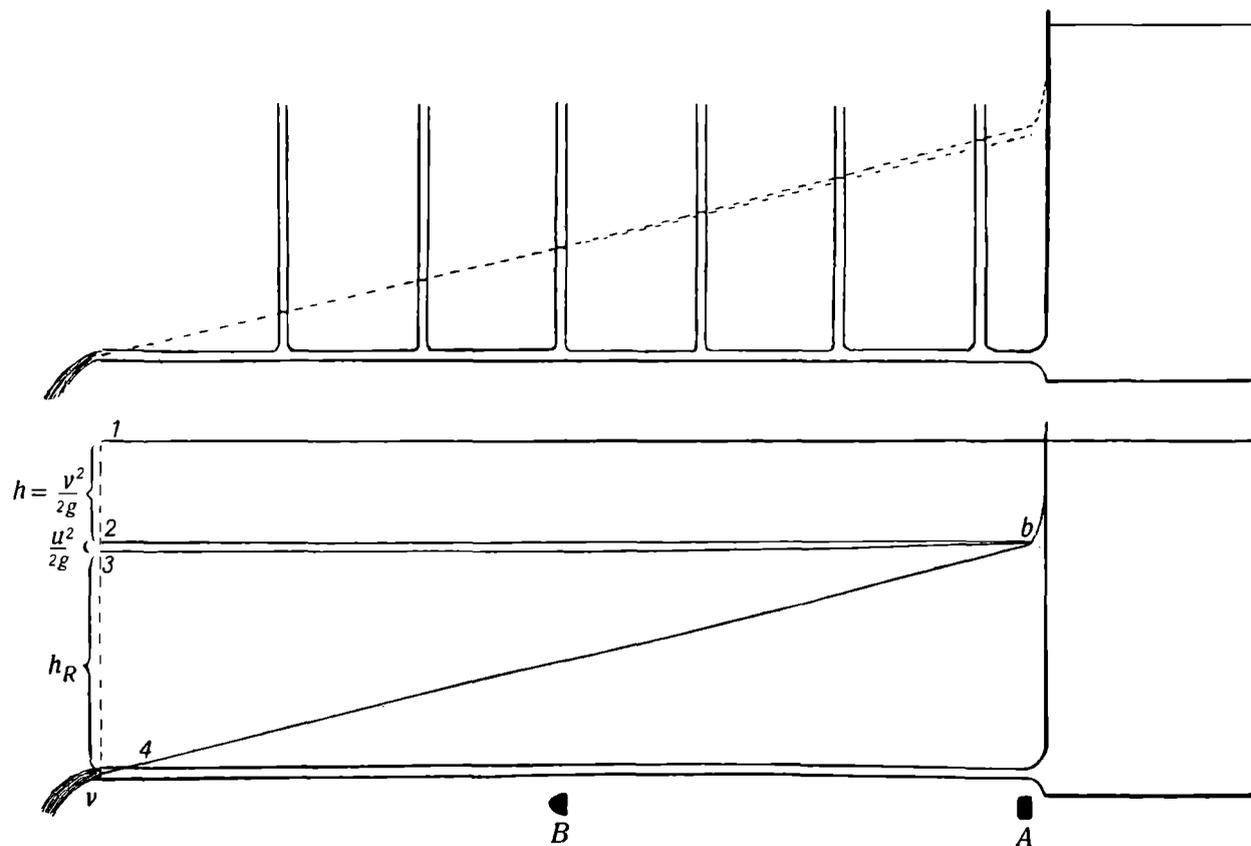


Abb. 9. Erklärung der Spiegelstände in Standröhrchen (Abfall der Druckniveaux) beim turbulenten Ausfluß aus einem Gefäß durch ein gleich weites horizontales Ausflußrohr. Die Spiegelstände folgen der Linie 4 der unteren Zeichnung und der Linie von der Gefäßwand zum Ausfluß der oberen Zeichnung. Der Abstand  $h = \frac{v^2}{2g}$  zwischen den Linien 1 und 2 entspricht dem Druckhöhenverbrauch zur Erzeugung der mittleren Geschwindigkeit  $v$  im Rohr. Die kleine Höhenabnahme bis zur Linie 3,  $\frac{u^2}{2g}$  stellt sich infolge der Verwandlung des Geschwindigkeitsprofils  $A$  unten in jenes von  $B$  ein. (Beide etwas vergrößert gezeichnet.) Die absteigende Linie 4 wird schließlich von der äußeren Reibung herbeigeführt.  $h_R$  stellt die von ihr beim Ausfluß verbrauchte Druckhöhe dar. Sie heißt als Höhe einer Wassersäule am inneren Rohrende die Widerstandshöhe für die ganze Rohrlänge. In der oberen Zeichnung führt der tiefere Ast der gestrichelten Linie gerade zum Betrag  $h_R$  empor.

hinzu. Während am Anfang der Strömung im gleichweiten Rohr die Geschwindigkeit über den Querschnitt nahezu gleich verteilt ist und fast überall von der mittleren sehr wenig abweicht, hält die innere Reibung die randnäheren Wasserteile alsbald stark zurück. Die Kontinuität der Strömung und Aufrechterhaltung der mittleren Geschwindigkeit im gleichweiten Rohr bringt nun ein stärkeres Vorseilen der mittleren Strömungsteile, des „Kerns“ der Strömung mit sich, welches die randliche Bremsung des Wassers aufwiegt. Bei einer Laminarströmung nähert sich diese maximale Geschwindigkeit in der Rohrachse asymptotisch dem Doppelten der mittleren Geschwindigkeit, das Geschwindigkeitsprofil gleichzeitig zurückgelegter Streckeneinheiten ergibt eine spitze Parabel. Bei turbulenten Strömungen muß der Strömungskern nicht so stark vorseilen und die mittlere Geschwindigkeit bleibt doch erhalten, weil auch die innere Reibung nicht so weitgehend bremst.

Die maximale Geschwindigkeit, der sich turbulente Strömungen in der Rohrachse nähern, ist nach v. Mises (S. 66) das 1,16- bis 1,23fache der mittleren, nach Prandtl (II. S. 52f.) kann sie sich dem 1,3fachen nähern. Die Strecke, auf der die Geschwindigkeit in der Rohrachse sich bis auf etwa 1% ihrem asymptotischen Endwert nähert, heißt Anlaufstrecke. Sie ist es, welche sich durch die Konkavität des Druckhöhenabfalles bemerkbar macht, denn zur Erzeugung der maximalen Geschwindigkeit ist ein gewisser Verbrauch an Druckenergie und -höhe nötig, welcher zu jenem dazu kommt, den die mittlere Geschwindigkeit beansprucht hat. Auf der Anlaufstrecke kommt also zu  $h = \frac{v^2}{2g}$  noch ein kleiner Wert:  $\frac{u^2}{2g}$ , wobei  $u$  die Geschwindigkeit ist, mit der der achsiale Strömungskern der mittleren Geschwindigkeit vorseilt.  $\frac{u^2}{2g}$  ist nach der oben mitgeteilten Zahl Prandtl's 0,09  $\frac{v^2}{2g}$  oder  $\frac{1}{11}$  von  $h$ . Im Vergleich zu dem Buche v. Mises ergeben die Beobachtungen, auf die sich Prandtl stützt, einen hohen Wert von  $\frac{u^2}{2g}$ . Er wurde in Abb. 9 angewandt, weil bei einem kleineren  $\frac{u^2}{2g}$  die Konkavität noch schwächer sichtbar wäre. Bis zum Ende der Anlaufstrecke ist also zu  $\frac{v^2}{2g} = h$  die Druckhöhenverwandlung  $\frac{u^2}{2g}$  hinzugekommen. Gäbe es also nur die innere Reibung allein, so würden die Spiegel in Standrohren sich nach der Linie 3 einstellen, diese ist unterhalb der Anlaufstrecke praktisch wagrecht, auf der Anlaufstrecke konkav, und zwar in Abb. 9 auf etwa 50 Rohrdurchmessern. Nun kommt dazu noch der Druckhöhenverlust durch die äußere Reibung an der Rohrwand mit dem schrägen Abstieg zur Mündung. Er ist in allen geraden, gleichweiten Röhren der zurückgelegten Strecke proportional. Für sich allein würde der Druckhöhenverlust durch die äußere Reibung also eine geneigte Gerade durch die Standrohrspiegel legen lassen. Aber da diese Druckhöhenverluste von der über dem Anlauf krummen Linie 3 abgezogen werden müssen, so ordnen sich auch die Standrohrspiegel längs einer gegen ihr oberes Ende hin schwach gekrümmten Linie an. Es ist die Linie 4

in der unteren Zeichnung von Abb. 9. Auch die obere Zeichnung enthält diese Linie. Sie spaltet sich von der geradlinig nach rechts aufwärts fortgeführten Verbindungslinie ab, die zum Wert  $h_R$  führt. Die Größe dieses Wertes gibt uns an den gesamten Druckhöhenverlust durch die äußere Reibung bis zum Rohrende. Wir können  $h_R$  die Reibungs- oder Widerstandshöhe am inneren Rohrende nennen und nennen  $h_r$  das, was in den Standrohren gegen den Ausfluß hin von  $h_R$  noch übrig ist. Nun sind wir auch imstande, eine unter den Verhältnissen der Abb. 9 geltende Formel für die Höhen des Wanddruckes  $h_d$  an jeder beliebigen Stelle zu geben.  $A$  sei die Höhe der Wassersäule, die dem Luftdruck  $p_0$  entspricht. Statt  $\frac{v^2}{2g} + \frac{u^2}{2g}$  wird geschrieben  $h' \left(1 + \frac{1}{n}\right)$ , wobei  $n$  nach Prandtl 11, nach v. Mises z. B. auch 25 sein könnte.

$$h_d = H + A - h' \left(1 + \frac{1}{n}\right) - h_R + h_r$$

$h_r$  kann alle Werte zwischen  $h_R$  und Null annehmen. In dieser Formel ist gemäß Abb. 9 die Geschwindigkeit des Wassers am Spiegel des weiten Gefäßes vernachlässigt, weil sie eben so klein ist wie im Inneren. Abb. 10 zeigt nun einen Fall, wo es nötig ist, die Zuflußgeschwindigkeit  $c$  im engen Hals des Gefäßes in Rechnung zu stellen.

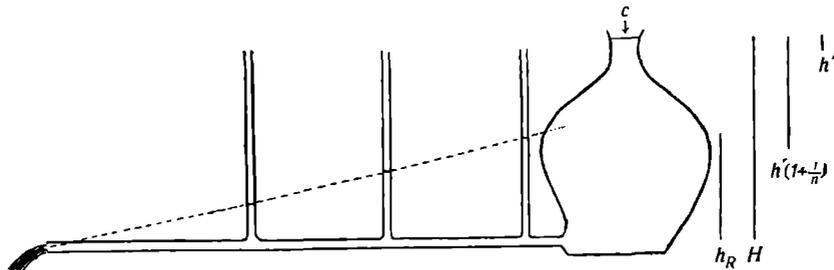


Abb. 10. Ausfluß aus einem Gefäß mit Ansatzrohr und engem Hals, in welchem die Zuflußgeschwindigkeit  $c$  herrsche. Die einer turbulenten Strömung entsprechende Form des Druckhöhenabfalles nach Abb. 9 ist berücksichtigt. Veranschaulichung der Wasserdruckhöhen, die für den Wanddruck (hydraulischen Druck) nach Formel 4 maßgebend sind:  $h'' = \frac{c^2}{2g}$ ,  $h' \left(1 + \frac{1}{n}\right) = \frac{v^2}{2g} + \frac{u^2}{2g}$ ,  $h_R =$  Widerstandshöhe nach Formel 5.

Man darf nun mit Weisbach (vgl. Nr. 59, S. 952) annehmen, daß die Geschwindigkeitshöhe des Zuflusses  $h'' = \frac{c^2}{2g}$  im weiten Gefäß ganz in Druck verwandelt werde. Dann ist die hydraulische Druckhöhe an beliebiger Stelle einer Druckströmung nach Abb. 10, ausführlich geschrieben, durch folgende Formel ausgedrückt:

$$h_d = H + A - \frac{v^2}{2g} \left(1 + \frac{1}{n}\right) + \frac{c^2}{2g} - h_R + h_r \quad \text{oder}$$

$$h_d = H + A - \left[ k' \left( 1 + \frac{1}{n} \right) - k'' \right] - (h_R - h_r) \quad 4$$

Vor jedem Reibungsverlust ist also am inneren Rohrende die hydraulische Druckhöhe gleich der des hydrostatischen Drucks:  $H + A$  vermindert um die Differenz der Geschwindigkeitshöhen im Rohr und jener des Zuflusses.

Die Widerstandshöhe  $h_R$  ist dann im Falle der Abb. 9

$$h_R = H - k' \left( 1 + \frac{1}{n} \right);$$

sie wird im Falle der Abb. 10

$$h_R = H - k' \left( 1 + \frac{1}{n} \right) + k'' \quad 5$$

Der Atmosphärendruck wirkt auf sie nur mittelbar ein, indem in der Natur zwischen der Spiegelhöhe und dem Ausfluß ein bedeutender Höhen- und Luftdruckunterschied sein kann. Setzt man zur Probe Formel 5 in Formel 4 ein, so ergibt sich auch rechnerisch, daß  $h_d = A + h_r$  und am Ausfluß  $h_d = A$ .

Das sieht wie eine bloße Umgruppierung von Selbstverständlichkeiten aus, bietet aber den Schlüssel zum Verständnis aller sonstigen Fälle. Man kann nun auch krumme, wechselnd weite und beliebig geneigte Rohre ins Auge fassen. Bleibt  $H$  der Höhenabstand zwischen Ausfluß und Spiegel und ist  $H_n$  die Höhe eines beliebigen Punktes der krummen oder geneigten Rohrachse unter dem Spiegel, dann gilt für den hydraulischen Druck ganz allgemein

$$h_d = H_n + A - k' \left( 1 + \frac{1}{n} \right) + k'' - h_R + h_r \quad 4 a$$

Man kann statt  $H_n$  auch  $H$  schreiben, wenn man dieses Zeichen gleich von Anfang an als Höhe jedes Punktes der Strömungsachse krummer Rohre unter dem Spiegel definiert und nicht, wie es hier geschah, zunächst nur im Hinblick auf die Lage des Ausflusses.

**§ 32.** Bevor weiter gegangen wird, muß der Umstand bereinigt werden, daß die bisherigen Abbildungen ohne Maßstab gelassen sind, was unter Umständen Fehlerurteile erzeugen könnte. Daher sollen einige Geschwindigkeiten und die dazugehörigen Spiegelstände gerechnet, bzw. auch gezeichnet werden. Die Rechnungen sind am einfachsten, wenn wir die mittleren Ausflußgeschwindigkeiten stationärer Wirbelströmungen in glatten Metallröhren bestimmen, wo die Reibung besonders klein ist. Wir bedienen uns dabei nach dem Beispiel Chwolsons (Nr. 52) der Formel von Weisbach (Nr. 59, S. 933).

Danach ist

$$v'_{m/sek.} = \frac{\sqrt{2gH}}{\sqrt{1+R}} \quad 6$$

$H$  ist hier die Höhe des Ausflusses unter dem Spiegel. Die ihr entsprechende Geschwindigkeit unter hydrostatischen Verhältnissen mußte noch durch eine die Reibung berücksichtigende Größe dividiert werden. Nennt man die Rohrlänge  $l$  und den Durchmesser  $d$ , so ist

$$R = k \frac{1}{d} \quad \text{und}$$

$$k = 0,01439 + \frac{0,009471}{\sqrt{v}} \quad \text{für einen Meter}$$

und  $0,01439 + 0,0030241 \sqrt{\frac{g}{v}}$  für beliebige Maßsysteme. Der Koeffizient  $k$  ist aber selbst von der mit ihm zu errechnenden Geschwindigkeit abhängig. Er ist keine Konstante, sondern mußte für verschiedene  $v$  durch Versuche bestimmt werden. Weisbach hat die  $k$ -Werte in Tabellen geordnet. Weisbachs Formel trennt noch nicht die Zähigkeit von der Wandreibung und ist daher theoretisch unbefriedigend. Ihm war der Gegensatz zwischen Zähigkeit und äußerer Reibung in turbulenten Strömungen nicht bekannt, den v. Mises (Nr. 56, S. 57) in die Worte faßte: „Je zäher die Flüssigkeit ist, um so geringere Bewegung werden die Teilchen durch dieselbe Rauigkeit der Wand erhalten.“<sup>1)</sup> Gleichwohl kann man mit der Formel Weisbachs im Bereich seiner Versuchsergebnisse rasch rechnen, ohne einen praktisch ins Gewicht fallenden Fehler zu machen.<sup>2)</sup>

§ 33. Wenden wir uns den gerechneten Beispielen und Abbildungen zu. 1. Fall: Ausfließen eines weiten Gefäßes ohne Nachfüllung, drei Spiegellagen. Abb. 11,  $v'$  nach Formel 6.

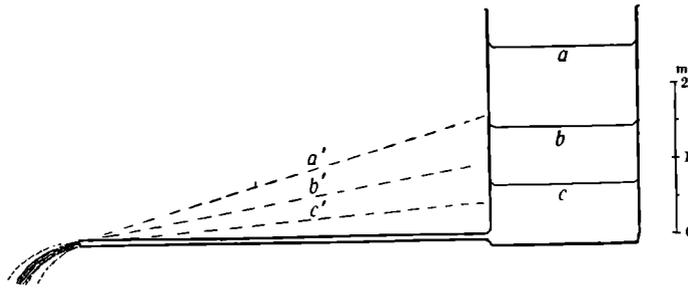


Abb. 11. Änderung des durchschnittlichen Druckhöhenabfalles beim Auslaufen eines Gefäßes durch ein Ansatzrohr.  $a$ ,  $b$ ,  $c$ : zeitlich aufeinanderfolgende Spiegellagen.  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ : die zugehörigen geraden Verbindungslinien zwischen der Mündung und dem höchsten möglichen Standrohrspiegel. Diese Linien haben die Durchschnittsneigung der etwas nach unten durchgebogenen Gefällslinie der wirklichen Spiegel mit Anlaufstrecke. Die Abweichung erreicht höchstens 1 mm.

<sup>1)</sup> Hier ist an die Querbewegungen bei der Turbulenz zu denken.

<sup>2)</sup> Auch Formeln, welche dem heutigen Stande der Forschung entsprechen (vgl. § 36), können nicht hindern, daß man bei Berechnung der Geschwindigkeit auf eine Größe stößt, die selbst von der Geschwindigkeit abhängt. Im Lehrbuch der Physik von Chwolson (1918, I, 2. S. 277) ist für den Meter ein Wert des Koeffizienten  $k$  enthalten, der mit dem von Weisbach (Nr. 59, S. 1017) für den preußischen Fuß in der Sekunde fast übereinstimmt und vielleicht für russische Fuß gilt. In dem betreffenden Bande der 5. Auflage von Weisbach vom Jahre 1875 sind aber bereits für preußische Fuß und für Meter besondere Tabellen zur Berechnung von  $k$  dargeboten.

$$l : d = 100$$

$H \text{ m}$	$v' \text{ m}$	$h_R \text{ m} + (h' : 11)$
2,5	4	1,60
1,44	3	0,96
0,67	2	0,45

$h_R + (h' : 11)$  wurde gefunden als  $H - h'$  und  $h'$  als  $\frac{v'^2}{2g}$ .

2. Fall: Einfluß verschiedener Rohrlängen;  $H$  durch Nachfüllen konstant auf 10 m erhalten (Abb. 12).

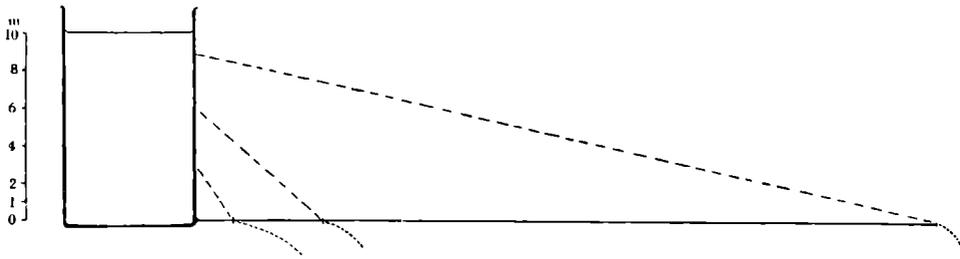


Abb. 12. Einfluß verschiedener Rohrlängen auf den durchschnittlichen Druckhöhenabfall. Das Ausflußrohr ist nur als Linie gezeichnet mit Rücksicht auf die Rohrlänge von 466 Durchmessern, die hier nicht maßstäblich dargestellt werden kann. Da die verschiedenen Rohrlängen gleichzeitig aneinandergereiht sind, ergibt sich die Lage des Ausflusses für jeden Fall aus den punktiert angedeuteten Wasserstrahlen.

$$H = 10 \text{ m}$$

$\frac{l}{d}$	$v' \text{ m}$	$h_R \text{ m} + (h' : 11)$
25	11,52	3
84	8,86	6
466	4,43	9

Die in den gerechneten Abbildungen gestrichelte Linie ist nicht genau die Verbindungslinie der Druckspiegel in den Standrohren. Ihre Konkavität würde in mehreren Fällen nicht mehr sichtbar sein. Die gestrichelte Linie berücksichtigt aber die Anlaufstrecke, indem sie gerade zur Höhe  $h_R + \frac{1}{11}h'$  emporführt (entsprechend Punkt  $b$  in Abb. 9 unten). Die gezeichnete Linie bildet eine Sehne zur wirklichen Verbindung der Spiegelhöhe, diese Sehne weicht von der Wirklichkeit im Maßstabe dieser Zeichnungen kaum merklich ab.

Schon durch Abb. 12 wird es begreiflich, daß bei Rohrlängen von etwa 1500 Durchmessern aufwärts der Unterschied  $H - h'$  im Längenmaß ganz unwesentlich wird und zeichnerisch vernachlässigt werden kann. Die Verbindungslinie der Standrohrspiegel steigt dann praktisch vom Ausfluß schräg zum Spiegel des Hauptgefäßes

selbst an.<sup>1)</sup> Dadurch entsteht bei entsprechend langen Rohren der Begriff einer Druckhöhe schlechtweg, d. h. ohne nähere Bezeichnung. In ihr verschmelzen praktisch die Größen von  $H$  und  $h_R$ . Auch hat es keinen Zweck mehr, hier eigens noch von hydrostatischem Druck zu sprechen. Es genügt dann die Kenntnis leicht feststellbarer Unterschiede der Druckhöhen schlechtweg und experimentell gewonnener Erfahrungsgrößen der Reibung zum Aufbau einer eigenen Gruppe von Formeln, die ein unbekanntes  $v$ , auch innerhalb der Rohrleitungen, zu berechnen erlauben, während sich z. B. das  $h$  früherer Formeln nur aus einer schon bekannten Geschwindigkeit ableiten ließ. Zu dieser neuen Gruppe von Formeln gehört eigentlich auch schon jene Nr. 6 (§ 32). Später wird eine andere auch für sehr rauhe Wände brauchbare vorgeführt.<sup>2)</sup> (§ 36.)

Das nächste Rechenbeispiel betrifft als 3. und 4. Fall die Verschiebung und Ausgleichung der Spiegelhöhen, wenn nach anfänglicher Absperrung der wagrechten Verbindungsröhre zwischen dem Grund zweier Gefäße (Abb. 13 und 14) ein Überströmen aus einem Gefäß in das andere eingeleitet wird, wobei der Ausfluß aus der Röhre nach links alsbald unter Wasser erfolgt. Bei einem Ausfluß unter Wasser ist der Wert von  $H$ , das sich in diesen Fällen noch gemäß Abb. 9 unten zerlegen läßt, gleich der Differenz der jeweiligen Spiegelhöhen in beiden Gefäßen. Die Lage des

<sup>1)</sup> Eine solche, für den Nichtphysiker zunächst undurchsichtige Zeichnung anstatt der in § 30 gebotenen Abb. 9 bringt die deutsche Ausgabe des Lehrbuches der Physik von Chwolson gleich als Einleitungsfigur für die hydrodynamischen Überlegungen. Das muß einem Lernenden das Eindringen in die Zusammenhänge und die Einprägung der Grundbegriffe erschweren, besonders wenn er dann in anderen Lehrbüchern, sehr knapp erläutert, eine Abbildung sieht wie Abb. 9. Der Druck schlechtweg wird auch der Gesamtdruck genannt (pression totale). Er setzt sich also aus dem Druck der Geschwindigkeitshöhen (pression vive) zusammen und aus dem Wanddruck, der oben als hydraulischer oder hydrodynamischer Druck bezeichnet wurde. Die „pression vive“ nennt Prandtl bei eingetauchten Meßinstrumenten auch Staudruck. Den Wanddruck nennt er im Gegensatz dazu den „statischen“ Druck, wohl im Hinblick auf das ruhende Wasser in Standröhren. Versteht man hier wie es gemeint ist, so kann aber der Satz Chwolson's in der französischen Ausgabe I, 3, S. 699, Verwirrung stiften, wenn er bei der Zeichnung, in der  $h_R = H$  ist, schreibt: „La pression dynamique (= totale) est donc la somme de la pression hydrostatique“, nämlich  $\gamma h_r + p_0$  in unserer Schreibweise „et de la pression vive“

( $\gamma \frac{v^2}{2g}$  gleich  $\rho \frac{v^2}{2}$ ,  $\rho$  = die Dichte). Ich halte daran fest, daß eine ruhende Flüssigkeit auf die Wände stärker drückt als wenn sie in Bewegung ist, und demgemäß hätte Chwolson besser geschrieben: „La pression totale est donc la somme de la pression hydrodynamique et de la pression vive“. Mir ist es ganz klar, wieso Geographen und Geologen, die nicht gerade von den Euler'schen Gleichungen aus an die Sache heran kommen, dieselben Arten von Quellen bald unter hydrostatischem, bald unter hydrodynamischem Druck hervortreten lassen.

<sup>2)</sup> Daß die üblichen technischen Formeln, die  $v$  mit Druckhöhen schlechtweg berechnen, theoretisch von einem Ansatz abstammen, der  $v$  eigentlich als Funktion von  $h_R$  darstellt, wenn der Atmosphärendruck auf Spiegel und Ausfluß praktisch gleich ist, ergab sich mir aus dem Inhalt der S. 1012 und 1013 im Lehrbuch von Weisbach (Nr. 59). Erst nach deren Studium verstand ich z. B. die inneren Gründe für die Richtigkeit des Rechnungsverfahrens in Forchheimers Hydraulik, S. 42. (Ergiebigkeit von Wasserleitungen mit Speisung aus zwei ungleich hohen Reservoirs.) Vielleicht ist dieser Hinweis auf meinen fast nur auf Lehrbüchern beruhenden hydraulischen Studiengang nicht ganz überflüssig.

54 Verhalten der Karstgewässer im Lichte der physikalisch erfaßten Bewegungsformen

linken Endes der gestrichelten Linien braucht keine Erklärung, die Höhe des rechten Endes ist gleich der Spiegelhöhe links  $+ h_R + \frac{h'}{n}$  für jede berechnete Lage.

Die für die Fälle der Abb. 13 und 14 berechneten Spiegelhöhen  $H_s$

$$\frac{1}{d} = 10.$$

$H_s$ links	$v_{m/sek}$	$H_s$ rechts	$H_s$ links $+ h_R + \frac{1}{25} h'$
0	5	1,59	0,25 (a)
0,51	3	1,08	0,6 (b)
0,8 <sup>1)</sup>	0	0,8 <sup>1)</sup>	--

M e t e r

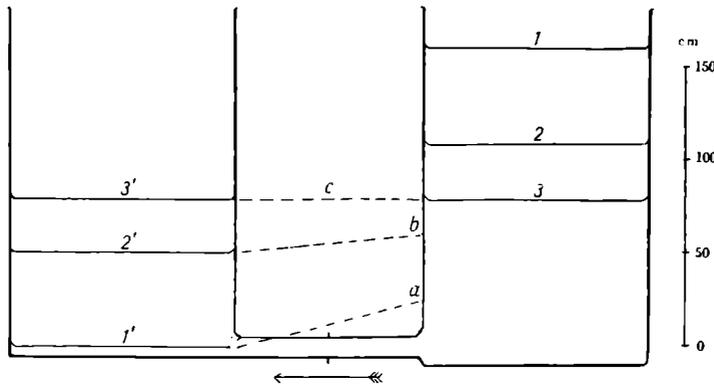


Abb. 13. Aufeinanderfolge verschiedener durchschnittlicher Druckhöhenabfälle  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , entsprechend den Spiegellagen 1, 2, 3 im rechten Gefäß, wenn in einem bestimmten Augenblick der Weg zum Überströmen in das linke Gefäß frei wird, indem das Verbindungsrohr geöffnet wird. Weil es nur 10 Durchmesser lang ist, hat es nur etwa ein Fünftel der Länge turbulenten Anlaufes. In der Rechnung ist daher für  $\frac{u^2}{2}$  nur  $\frac{h'}{25}$  eingeführt. 1', 2', 3': entsprechende Spiegellagen links.

$$\frac{1}{d} = 1000$$

$H_s$ links	$v_{m/sek}$	$H_s$ rechts	$H_s$ links $+ h_R + \frac{1}{11} h'$
0	5	26,26	24,9 (a)
8,11	3	18,15	17,67 (b)
13,0 <sup>1)</sup>	0	13,0 <sup>1)</sup>	--

M e t e r

<sup>1)</sup> Diese Spiegel müssen etwas tiefer als der hier errechnete Wert liegen, weil auch im Verbindungsrohr Wasser bleibt. Bei sehr weiten Gefäßen ist dieser Unterschied unwesentlich.

Obige Rechenbeispiele und die Abb. 11 bis 14 lehren, daß jeder ziffernmäßig andere Fall auch auf das gezeichnete Bild sehr einwirkt, so daß ihm dieses nur unter Hinzufügen

Die Fälle 3 und 4 zeigen, wie es gar nicht möglich ist, die Spiegelschwankungen des Wasserinhaltes nicht erforschter unterirdischer Hohlräume auf Grund weniger zugänglicher Stichproben vorauszusagen oder zu extrapolieren, wenn diese Hohlräume eine sehr ungleiche Zufuhr bekommen und erst von einer bestimmten Höhe an kommunizieren. Es sind dann Verhältnisse denkbar, denen gegenüber die zuletzt gerechneten einfach sind; und doch ergaben sich unvermutet große Unterschiede. Man denke sich nur zwischen den Gefäßen der Abb. 13 und 14 nach oben führende

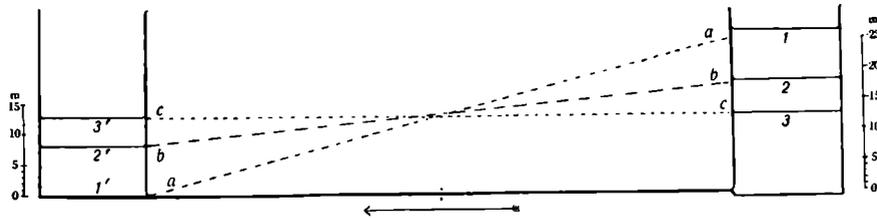


Abb. 14. Derselbe Vorgang des Überströmens mit nachfolgendem Ausfluß unter Wasser wie in Abb. 13 und seine Begleiterscheinungen, wenn das als Strich gezeichnete Verbindungsrohr zwischen dem ursprünglich vollen und dem ursprünglich leeren Gefäß eine Länge von 1000 Durchmessern hat. Den rechten Spiegellagen 1, 2, 3 nach Eröffnen des Durchflusses entsprechen links die Spiegellagen 1', 2', 3', und die durchschnittlichen Neigungen des Druckhöhenabfalles *aa*, *bb*, *cc*.

Klüfte, welche bei beliebiger Gestalt und Richtung gemäß dem hydrostatischen Paradoxon die Rolle von Standrohren spielen müßten. Während in Abb. 14 die Verbindungen der Spiegelstände im Laufe der Zeit sich kreuzende Linien bilden, ohne sich um einen Punkt zu drehen, findet in Abb. 13 keinerlei Kreuzung statt. Bei den oft gar nicht einfachen Naturvorgängen können daher auf Grund des Einblickes in den Wasserstand einiger weniger Klüfte die zu erwartenden Wasserstände und selbst deren Änderungen in anderen Klüften nicht in schematischer Weise beurteilt werden, so zu Zeiten von Schneeschmelze, nach großen Regenfällen und nahe von Flußschwinden.

§ 34. Bei geneigten Ausflußröhren ist das  $H$  der bisherigen Formeln gleich dem Höhenunterschied zwischen Gefäßspiegel und Ausfluß (vgl. Abb. 15). Dieses  $H$  ist also nicht mehr gleich der Wassertiefe in den weiten Gefäßen. Sein Wert ist in den Fällen der Abb. 15 zeichnerisch dargestellt. Dabei ist noch folgendes zu beachten: Ist das Rohr abwärts geneigt, so ist die Geschwindigkeit unter sonst gleichen Umständen größer, als wenn das Rohr zur Mündung ansteigt. Es ist somit auch  $\frac{v'}{2g} = h'$  größer und zugleich  $h_R$  der Reibungsverlust der schnelleren Bewegung. Das größere  $H$  läßt sich eben auch in größere Teile zerlegen. Dies ist in den Abb. 15 berücksichtigt, die aber im übrigen wieder willkürlich sind. Daß ihnen ein Maßstab fehlt, wird ja eines Maßstabes eindeutig entspricht. Die früheren, wie auch die üblichen Zeichnungen (vgl. Abb. 9 und 10 usw.) sind also willkürlich und ihre Proportionen gelten, obwohl die Zeichnungen eine allgemeine Gesetzmäßigkeit darstellen, nur für einen ganz bestimmten Fall der Gefäß- und Rohrgrößen, der aber mangels eines dazu berechneten Maßstabes nicht definiert ist.

nun keinen Schaden mehr stiften können. Die Standrohrspiegel in Abb. 15 zeigen auch, daß die hydraulische Druckhöhe in dem Ausflußrohr sich von der Widerstandshöhe nicht immer nur durch die Höhe des zusätzlichen Atmosphärendruckes unterscheidet, sondern daß auch die Rohrneigung dabei von Einfluß ist. Bei absteigendem Rohr ist im Inneren das  $H_n$  der Formel 4 a kleiner als  $H$  und auch der

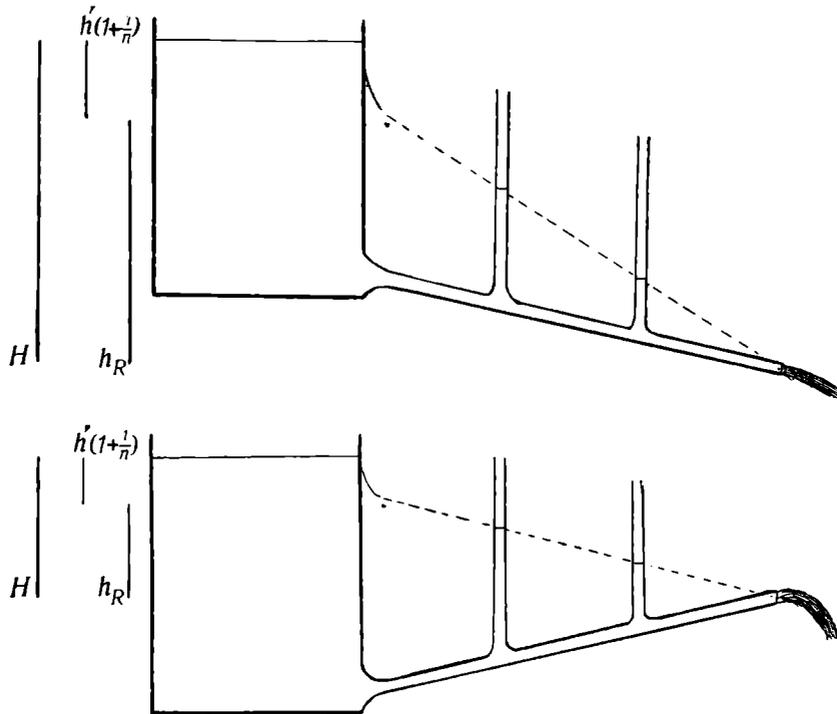


Abb. 15. Die für das Ausströmen aus geneigten Rohren maßgebenden Wasserdruckhöhen.  $H$ : die gesamte Druckhöhe und ihre Teile die Geschwindigkeitshöhen  $h' \left(1 + \frac{1}{n}\right)$  und die Widerstandshöhe  $h_R$ . An dem Wanddruck im aufsteigenden Rohr ist auch der statische Gegendruck von der Mündung abwärts beteiligt.

Wanddruck schon am Anfang kleiner als  $h_R + A$ . Bei aufsteigendem Rohr findet das Umgekehrte statt.

Nun bietet auch der Fall mehrfach auf- und absteigender gleich weiter Ausflußrohre keine gedanklichen Schwierigkeiten mehr. Alle Formeln für  $v$ -Werte, in denen der Ausdruck  $\sqrt{2gH}$  vorkommt, meinen mit  $H$  einen Höhenunterschied gegenüber dem Ausfluß.

Wem das Vorgebrachte gar zu breitpurig entwickelt erscheint, der wird über meine Darstellung milder urteilen, wenn er die Rechnungen gelesen hat, die R. G. Spöcker auf S. 53 seiner „Karstphänomene im Schelmbachgebiet“ in den Abhandlungen der Naturhistorischen Gesellschaft in Nürnberg, XXII. Bd., H. 2, 1924,

veröffentlicht hat. Dazu muß man noch bedenken, daß diese Rechnungen in der ganzen rührigen Karstliteratur seither ohne lauten Widerspruch und, soweit ich durch eine Anfrage mein Wissen sichern konnte, überhaupt ohne Widerspruch geblieben sind.

§ 35. Betrachten wir kurz die Druckverhältnisse für den Fall, daß ein Gefäß mit dem nach abwärts geneigten Ausflußrohr leer läuft, so daß nur noch im Rohr Wasser enthalten ist. Dann eilt in diesem Rohr der Spiegel mit der Geschwindigkeit des Ausflusses vorwärts. Durch Nachfüllen kann man den Spiegel in einem solchen absteigenden Rohr auf gleichbleibender Höhe erhalten. Verfolgen wir den Vorgang des Leerlaufens des weiten Gefäßes. Wie in Abb. 11 wird sich auch im Falle der oberen Figur von Abb. 15 der Spiegel dem Niveau des Reibungswiderstandes immer mehr nähern, bis am Boden beide zusammenfallen. Zwar ist im Falle der Abb. 15 oben für den Ausfluß noch ein Rest von  $H$  vorhanden, der sich aus der Rohrneigung und Länge ergibt. Aber sobald für das innere Rohrende, —  $h_R + h_r = 0$  wird, wird auch das  $H_n$  der Formel 4 a zu Null. Ferner ist  $v = c$  geworden, d. h. der Ausfluß erfolgt gleich schnell wie der Zufluß, und  $h' = h''$ ; am inneren Rohrende ist also nach Formel 4 a der hydraulische Druck gleich dem Atmosphärendruck, dasselbe gilt von vornherein beim Ausfluß.<sup>1)</sup> Da nun trotz der Rohrneigung abwärts gar kein Geschwindigkeitszuwachs bis zur Mündung erfolgt, so wird der Einfluß der restlichen Druckhöhe ( $H$  minus die Tiefe des ausgeflossenen Wassers) von der Reibung völlig aufgehoben. Es ist also längs des ganzen Rohres das der Neigung entstammende  $H$  gleich  $h_R$  und die Formel 4 a gilt auch für jede Stelle des Rohrinternen. Es bleiben also im Augenblick nach dem Leerlaufen des weiten Gefäßes alle Standröhren nur mit Luft gefüllt. Dies gilt für glatte, gleichmäßig geneigte gerade und gleich weite Rohre. Darin ist die Strömung nun gleichwohl von der Neigung des Rohres nicht unabhängig, sie ist im Mittel rascher bei steileren Rohrlagen als bei schwächer geneigten, aber stets stationär (im Mittel gleichförmig). Im steileren Rohr selbst bekommt das Wasser eben eine größere Schwerkraftkomponente als im flacher geneigten und verhält sich bereits wie ein offenes Gerinne, das der Neigung seiner Unterlage folgt und einen durch Reibung stationär gebremsten Fall auf schiefer Ebene vollzieht. Wenn man das Gesagte durch einen Versuch erhärten will, so muß man sehr darauf achten, daß die Standröhrchen unten überkapillar weit und gleichmäßig angeschweißt sind, sonst kommt man infolge der auftretenden Störungen zu Beobachtungen, die ein mit diesen Ergebnissen unvereinbares Fehlurteil erzeugen. Indem Herr Prof. Scherrer im Physikalischen Institut der E. T. H. mich auf die Mängel des auf meine Veranlassung schon früher einmal hergestellten kleinen Glasapparates aufmerksam machte, beseitigte er den scheinbaren Widerspruch zwischen meinen eigenen theoretischen Schlußfolgerungen und den unbrauchbaren Beobachtungen. Bei dieser Darstellung des Rohrdurchflusses ohne drückende Gefäß-

<sup>1)</sup> Nach Formel 4 a müßte der Luftdruck auch den besonderen Energieverbrauch der Anlaufstrecke speisen, weshalb in ihr der Wanddruck geringer sein müßte als der äußere Luftdruck. Tatsächlich reißen Rohrströmungen dieser Art gewöhnlich Luft mit. Doch kenne ich keine physikalische Untersuchung über das Verhalten des Anlaufes in leerlaufenden Rohrausflüssen, weshalb ich meine Vermutungen nur mit Vorbehalt äußere.

füllung wurde von möglicherweise auftretenden schwachen Stauungen durch eine Kontraktion des Ausflußstrahles abgesehen.

§ 36. Betrachtet man die Geschwindigkeiten in geneigten Kreiszyylinderrohren ganz allgemein,<sup>1)</sup> so hängen sie nicht allein und einfach vom Neigungswinkel ab, sondern, da ja oft auf Wasserzutritte am oberen Rohrende Rücksicht zu nehmen ist, vom Druckgefälle.

Dieses ist

$$J = \frac{h_1 - h_2}{l} + \frac{p_1 - p_2}{\gamma l} \quad 7$$

$l$  ist die Rohrlänge,  $\gamma$  das spezifische Gewicht der Flüssigkeit,  $h_1$  und  $h_2$  sind die Höhen der beiden Rohrenden,  $p_1$  und  $p_2$  die daselbst wirksamen Drucke, z. B. der Atmosphärendruck beim Ausfluß.<sup>2)</sup>  $J$  das Druckgefälle der Gesamtströmung ist ein unbenannter Bruch.

Die mittlere Geschwindigkeit des Ausflusses ist hier:

$$c = \sqrt{\frac{g}{\zeta}} \sqrt{rJ} \quad 8$$

$r$  ist der Radius des Querschnittes,  $g$  die Schwerebeschleunigung und  $\zeta$  die von der Rauigkeit der Wände abhängige Widerstandsziffer, diese hat die Größe:

$$\zeta = 0,0024 + \sqrt{\frac{k}{r}} + 0,3 \sqrt{\frac{Z}{cr}} \quad 9$$

$k$  bedeutet die Rauigkeit. Für die Verhältnisse im Karst kommen je nach der Wandbeschaffenheit folgende experimentell gefundene  $k$ -Werte als Annäherung für gerade Zylinderröhren in Betracht:<sup>3)</sup>  $k \cdot 10^6 = 600$ , gültig für gewöhnliches Mauerwerk (ohne Glättung der Quadern oder ohne fein gefugte Backsteine).  $k \cdot 10^6 = 2000 - 4000$ , gültig, wenn rohe Bruchsteine die Wand bilden; viele Rauigkeiten im Karst überschreiten gewiß die Rauheit von Erdwänden und Kiesböschungen, bei denen  $k \cdot 10^6 = 10000 - 20000$ . (Gezogenen Metallwänden entspricht  $k \cdot 10^6 = 0,2$  bis  $1,0$ ).<sup>4)</sup>  $Z$  ist die Zähigkeitszahl  $0,0178$  für Wasser von  $0^\circ \text{C}$ ;  $0,0131$  für solches von  $10^\circ \text{C}$ .<sup>4)</sup> Wie man sieht, hängt die Widerstandsziffer  $\zeta$  selbst wieder von der Geschwindigkeit  $c$  ab, die damit berechnet werden soll. Daher berechnet man zuerst eine Annäherung für  $\zeta$ , nämlich:

$$\alpha = 0,0024 + \sqrt{\frac{k}{r}}$$

und rundet diese nach oben ab (vgl. den nächsten Paragraph). Die Abrundung heiße  $\zeta'$ . Damit rechnet man mit Hilfe der Formel 8 ein ungenaues  $c'$  aus, und indem man dies in die Formel 9 statt  $c$  einsetzt, bekommt man bereits ein  $\zeta$ , das bis auf die vierte Dezimale genau ist. Ebenso wird dann die Geschwindigkeit  $c$  mit weitau

<sup>1)</sup> Ich folge in der Darstellung Rich. v. Mises (Nr. 56, S. 38ff. und S. 75ff.).

<sup>2)</sup> Man findet  $J$  öfter in ‰ angegeben, bezogen auf den wagrechten Abstand der Rohrenden. Dies ist aber nur bei so geringen Neigungen erlaubt, daß man ohne Schaden den Sinus durch die Tangensfunktion ersetzen darf.

<sup>3)</sup> v. Mises, S. 63.

<sup>4)</sup> Ebenda, S. 45.

genügender, großer Genauigkeit mit Hilfe dieses  $\zeta$  errechnet. Man braucht dazu nicht noch einmal von vorn mit der Formel 8 zu rechnen, sondern muß nur das Ergebnis  $c'$  mit  $\sqrt{\zeta' : \zeta}$  multiplizieren. Die Formeln von R. v. Mises beruhen auf einer außerordentlich klaren, auch dem Laien einleuchtenden Ableitung mit der Gültigkeit für beliebig große oder kleine Strömungsquerschnitte. Dies drückt sich in obigen Formeln durch die Einführung der relativen Rauigkeit  $\frac{k}{r}$  aus. Denn v. Mises' Ableitung nimmt nicht nur auf den Röhrendurchmesser an sich Rücksicht, sondern auch darauf, daß eine Rauheit der Wand von so und so viel Zentimeter oder Millimeter Hervorragung oder Vertiefung bei weiten Querschnitten viel weniger bedeutet als bei engen.<sup>1)</sup>

§ 37. Rechenbeispiel mit den Formeln 7 bis 9: Gegeben ist eine Höhle in der Form eines  $10^\circ$  geneigten, 200 m langen, 4 m weiten ( $r = 2 m$ ), am Ende offenen Kreiszyylinderrohres. In dieses fließt Wasser unter einem Druck von 1,4 Atmosphären hinein. Der Temperatur entspräche die Zähigkeitszahl  $Z = 0,015$ , der Rauigkeit der Faktor  $k \cdot 10^6 = 3000$  (cm/sek). Das Gefälle ergibt sich nach (7) zu  $J = \sin \alpha + (1,4 - 1,0) \cdot 10 : 200 = 0,19$ . Denn dem Druck von 1,4 Atmosphären entspricht die Druckhöhe von rund 14 m usw. Die relative Rauigkeit  $k : r$ , die man zur Berechnung von  $\zeta$  und  $\alpha$  braucht, ist  $15 \cdot 10^{-6}$  und

$$\alpha = 0,0024 + \sqrt{\frac{k}{r}} = 0,0063.$$

Daher darf man versuchen, mit  $\zeta' = 0,009$  die Größe  $c'$  zu berechnen.

Mit Hilfe von (8) ergibt sich:

$$c' = \sqrt{\frac{981 \cdot 200 \cdot 0,19}{0,009}} = 2035 \text{ cm/sek.}$$

Die Nachrechnung von  $\zeta$  auf Grund von (9) liefert:

$$\zeta = 0,0024 + 0,0039 + \frac{0,037}{\sqrt{2035 \cdot 200}} = 0,00636.$$

Es ist somit  $c'$  im Verhältnis  $\sqrt{90 : 63,6} = 1,19$ , d. h. auf 24,2 m/sek zu erhöhen, damit man  $c$  erhalte.

Hätte man mit dem höchsten absoluten Rauigkeitswert für Kiesböschungen und Erdwände in der Tabelle von Mises, S. 63, nämlich mit  $k \cdot 10^6 = 20000$  gerechnet, so bekäme man eine Geschwindigkeit von 17,3 m/sek. Auch das ist noch rund doppelt so viel als die höchste jemals auf Grund von Beobachtungen berechnete Geschwindigkeit von einer Karströhre, nämlich in der Vauclusequelle. Für jede schroffe Krümmung, für jede starke Querschnittsänderung müßte ein entsprechender Druckhöhenverlust abgezogen werden.

<sup>1)</sup> v. Mises hat auf S. 80 noch ein direktes Berechnungsverfahren mit Hilfe eines logarithmischen Diagrammes (seine Fig. 23, S. 64). Es beruht letzten Endes auf dem hier nicht behandelten Ähnlichkeitssatz, der allerdings für feinere Darlegungen unerläßlich wäre. Bei sehr rauen Höhlenwänden gelten aber vielleicht die Konstanten der Formel 9 nicht mehr genau.

§ 38. Man hat im Karst wenig Höhlen gefunden, die den einfachen und großzügigen Verhältnissen der Röhre des Rechenbeispiels entsprechen, ganz abgesehen von dem bei absteigenden Höhlenmündungen niemals nachgewiesenen wassererfüllten Ausflußtor von solcher Weite. Fassen wir eine mittlere Geschwindigkeit von  $20\text{ m/sek}$  ins Auge, so entspricht ihr bei dem Querschnitt von  $12,5\text{ m}$  eine sekundliche Wasserführung von  $250\text{ cbm/sek}$ . Sollte ein solcher Vorgang auch nur eine Stunde dauern, so verbraucht er eine Wassermenge von rund  $25\text{ cm}$  Höhe auf  $3,6\text{ qkm}$ , die bei den ärgsten Wolkenbrüchen des Salzkammergutes vielleicht alle Vierteljahrhundert einmal an einem Tag herabgießt.<sup>1)</sup> Es kann auch auf über  $100\text{ qkm}$  Fläche so gießen, dann hat der Abfluß des Tages einen entsprechend längeren Weg, wenn er zu einer bestimmten Stelle gelangen soll. Nun hält ja im Karst niemand eine Höhle zu, bis sie vollgelaufen ist, und dann geöffnet einige Zeit mit solcher Geschwindigkeit Wasser abgibt. Daher werden Höhlenstücke des bescheidenen Durchmessers von  $4\text{ m}$  und jener ebenfalls in der Natur oft übertroffenen Neigung niemals unter Druck turbulent durchflossen werden. Jedenfalls ist es wissenschaftlich auszuschließen, daß man in einer heute nur durchtropften einstigen aktiven Höhle auch nur einen Tag lang annähernd so große, geschweige gleich große Geschwindigkeiten mit Anspruch auf Wahrscheinlichkeit annehmen darf. Alle so großen oder noch größeren Höhlen hatten, solange sie voll Wasser waren, einen engen oder stark aufwärts gebogenen Ausfluß. Nehmen wir bei obiger Höhle an, es sei am unteren Ende anstatt des weiten Tores ein so enges Ausflußloch (Quelle), daß die Anwendung der Formel  $v = \sqrt{2gH}$  als gerechtfertigt erscheint. Nun ist unser  $H = 38\text{ m}$  ( $\sin 10^\circ \cdot 200 + 0,4\text{ atm.}$ ). Wir wollen jene Formel noch für anwendbar halten, wenn  $H$  um  $0,5\%$  zu klein ist (vgl. § 30), so daß das Wasser nur so rasch auströmt, als ob es  $37,81\text{ m}$  hoch herabgefallen wäre. Wenn nun im Inneren der Höhlenröhre die schwache Reibung nur  $5\text{ cm}$  Druckhöhenverlust bewirken würde, so könnte dort höchstens eine Geschwindigkeit von  $165\text{ cm/sek}$  herrschen ( $= \sqrt{2g \cdot 14\text{ cm}}$ ). Aus der engen Öffnung bräche das Wasser mit der rasenden Geschwindigkeit von  $27,24\text{ m/sek}$  hervor ( $= \sqrt{2g \cdot 37,81\text{ m}}$ ). Im inneren Querschnitt von  $12,5\text{ qm}$  herrsche also jene Geschwindigkeit von  $165\text{ cm/sek}$ . Daraus folgt, daß der Querschnitt des Ausflusses (der Quellöffnung) nicht über  $0,76\text{ qm}$  sein darf. Schon dieser Wert ist zu viel, denn bei dem inneren Radius von  $2\text{ m}$  ist nach § 25 eine Geschwindigkeit von  $165\text{ cm/sek}$  nur unter Turbulenz und daher nur mit weiteren Reibungsverlusten möglich, wodurch sich die mittlere Geschwindigkeit im Inneren verlangsamt und im entsprechenden Maße auch die Ausflußgeschwindigkeit unter den Idealwert von  $\sqrt{2gH}$  sinkt. Nun kann aber nach der Formel auf S. 948 bei Weisbach (Nr. 59) der Ausflußquerschnitt in diesem Falle  $0,46\text{ qm}$  nicht übersteigen, weil sonst das Wasser seinem Umfang nicht mehr anliegt. Ohne die Kenntnis des Querschnittes sagt eben die Formel  $\sqrt{2gH}$  über die Geschwindigkeit im Inneren nichts aus. Würde der Querschnitt genügend verkleinert, und zwar unter  $5\text{ qcm}$ , so würde im Inneren die Geschwindigkeit unter  $1\text{ mm/sek}$  sinken, also nach § 25 selbst bei stoßweisem Wasser-

<sup>1)</sup> Vgl. meine Darstellung der langjährigen Niederschlags extreme vor dem Bergsturz am Sandling. Abh. der Wiener Akad. Bd. 100, H. 3; 1926.

andrang die laminare Bewegung für  $r = 2 m$  durchsetzen. Die Ausflußgeschwindigkeit würde sich bei solcher Verengung fast nicht ändern, sondern nur ihrem Idealwert  $27,3 m/sek (= \sqrt{2g \cdot 38 m})$  nähern.

Nehmen wir die Geschwindigkeit von  $1 m/sek$  im Inneren an — es ist das eine sehr hohe —, so strömen  $12,5 cbm/sek$  durch die Höhle. Soviel könnte mit alpinen Niederschlägen und Einzugsgebieten alle Jahre an mehreren Stellen ein- oder ein paarmal vorkommen. Auch eine solche Höhle wäre nicht frei von den Spuren der Drehbewegungen einer mäßigen Turbulenz. Hier ist nun hervorzuheben, daß entsprechende Kolkwirkungen gerade in besonders großen, nicht zersägten Höhlenprofilen fehlen, flach sind oder sich auf Sohlennähe beschränken (vgl. Bild 5). Das erlaubt es nicht, in weiten Höhlen von  $4 m$  Durchmesser aufwärts, Druckströmungen mit mehr als  $1 m/sek$  und entsprechende Wasserbeförderung für das Gewöhnliche zu halten; zumal die errechneten Ausflußgeschwindigkeiten von  $27 m/sek$  jene weit überschreiten, die bei Karstquellen gefunden wurden. Mit dem Gesagten stimmen gut folgende Beobachtungen überein: Die bemerkenswert starken Karstquellen der Ostalpen halten sich fast alle zwischen einer Wasserabgabe im Mittel von  $1,2$  und  $12 cbm/sek$ . Die berühmte Vaclusequelle führt im Mittel  $8 cbm/sek$  (vgl. § 99). Die Quelle der Orbe, die u. a. auch der Lac de Joux im Waadtländer Jura speist, entläßt im Mittel  $5 cbm/sek$ .<sup>1)</sup> Die Areusequelle im Neuenburger Jura, zu deren Speisung auch oberirdische Bäche in Schwinden beitragen,<sup>2)</sup> führt im Mittel rund  $2,5 cbm/sek$ ,<sup>3)</sup> kann aber für etliche Stunden auf  $100 cbm/sek$  anschwellen.<sup>2)</sup> Alle diese Quellen haben Geschwindigkeiten, die viel kleiner sind als die oben errechneten theoretischen Maximalwerte. Bei den beiden Juraquellen wurde bei Hochwasser kaum  $3 m/sek$  Maximalgeschwindigkeit im Stromstrich geschätzt. Das zeigt, daß auch im Inneren größere Geschwindigkeiten als an den Quellen meist ganz unwahrscheinlich sind und kleinere die Regel sind, sei es, weil die Rauheit viel größer ist als angenommen wurde oder andere Widerstände sehr stark sind, sei es, weil die weiten Hohlräume gewöhnlich mit einem sehr viel geringeren Druckgefälle durchflossen werden als dem rechnerisch angenommenen. Soviel über rechnerische und wirkliche Geschwindigkeiten turbulenter Strömungen.

**§ 39.** In den Fällen wirklich laminarer Wasserbewegung unter Druck gelten für die Geschwindigkeiten grundsätzlich ganz andere Formeln als die bisher betrachteten, auch wo es sich um Röhrenströmungen handelt. Hingegen ändert sich nichts an den Lehren der Druckhöhen und ihrer Beziehungen. Röhrenströmungen, bei denen die Geschwindigkeiten unter der kritischen (§ 25) bleiben, sind gewöhnlich in Haarröhrchen vorhanden. Die für sie gefundene Geschwindigkeitsformel, das Poiseuillesche Gesetz genannt, gilt aber für jedes laminare Fließen, also auch in weiten Querschnitten. Es lautet:

$$U_{cm/sek} = \frac{P D^2}{32 \eta L}.$$

<sup>1)</sup> Schardt, Geogr. Lexikon d. Schweiz, Bd. III, S. 605.

<sup>2)</sup> Schardt, Eclogae Helvet. Vol. XI, S. 271.

<sup>3)</sup> Tribolet, ebenda Bd. I, S. 88.

Dabei ist  $P$  der Druck in Dynen, auf 1  $qcm$  der Oberfläche bezogen,  $D$  der Durchmesser eines zylindrischen glatten Rohres in Zentimetern,  $L$  die Rohrlänge ebenso und  $\eta$  der Zähigkeitsfaktor, der von der Temperatur abhängt. Für  $0^\circ$  ist  $\eta = 0,01797$ , für  $10^\circ$  C ist es  $0,01307$ .

Bringen wir z. B. an einem Gefäß, dessen Füllung durch Zugießen auf 1  $m$  Tiefe erhalten wird, unten ein 1  $m$  langes Ausflußrohr mit nur 1  $mm$  Durchmesser an, so errechnen wir mit Hilfe der Formel Poiseuilles eine Geschwindigkeit von 17,1  $cm/sek$  für  $0^\circ$  und 23,4  $cm/sek$  für  $10^\circ$  C. Für ein so enges Röhrchen liegen diese Werte erheblich unter der kritischen Geschwindigkeit. Der Einfluß der Rohrlänge und des Durchmessers auf die Geschwindigkeit ist hier ein unmittelbar starker:  $U$  ist der Rohrlänge verkehrt proportional, also bei einem 10mal längeren Rohr ein Zehntel des früheren Wertes. Zum Durchmesser steht die Geschwindigkeit in einem genau quadratischen Verhältnis. Sie ist bei fünffachem  $D$  25mal so groß, wenn das laminare Fließen anhält, aber auch bei einem Durchmesser von  $\frac{1}{5} D$  25mal so klein. Verlängert man das Rohr des Beispiels auf 100  $m$  und verkleinert den Durchmesser auf 0,2  $mm$ , also einen noch deutlich makroskopischen Wert, so wird die Geschwindigkeit der 2500ste Teil der im vorigen Beispiel errechneten oder es würde ein Druck von 2500  $m$  Wasserhöhe nötig, um die Geschwindigkeit von 17 bis 23  $cm$  in der Sekunde aufrecht zu erhalten. Das Poiseuillesche Gesetz erlaubt nicht allein für laminare Strömungen in Röhren die Geschwindigkeiten zu berechnen, sondern auch für solche Bewegungen in Fugen zwischen glatten parallelen Flächen. Ist deren Abstand die Fugenweite  $D_1$ , so lautet die Formel

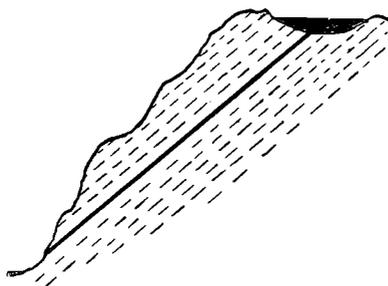


Abb. 16. Übertrieben breite Darstellung einer unter  $45^\circ$  geneigten Fuge im Fels, welche der ganzen Länge nach unter Druck von einem Wasserbecken aus durchströmt wird. Die darin herrschenden Geschwindigkeiten wurden für verschiedene Weiten und Weglängen berechnet und sind als Tabelle im Text vorgeführt. Für jedes Rechenbeispiel ist also der Maßstab der Zeichnung ein anderer.

gen in Röhren die Geschwindigkeiten zu berechnen, sondern auch für solche Bewegungen in Fugen zwischen glatten parallelen Flächen. Ist deren Abstand die Fugenweite  $D_1$ , so lautet die Formel

$$U_{1cm\,sek} = \frac{P D_1^2}{12 \eta L} \quad 10$$

Das laminare Fließen in Fugen beliebig großer seitlicher Ausdehnung erfolgt also höchstens  $2\frac{2}{3}$ mal schneller als in Röhren, deren Durchmesser gleich der Fugenweite ist — bei sonst gleichen Umständen. Wenden wir diese Formel auf genügend glatte Fugen im Karst an, die unter  $45^\circ$  Neigung Wasser wieder zutage führen, weil

sie hydrographisch wegsam sind: Dann ergeben sich für verschiedene Werte von  $D_1$  und der Weglänge  $L$  (vgl. Abb. 16) die in der nächsten Tabelle festgehaltenen Zeiten. Wir sehen deutlich, was schon die Formel ergibt, daß das Wasser in einer längeren Fugenstrecke langsamer fließt, also zur Zurücklegung seines ganzen Weges ganz besonders lang braucht. Der Einfluß des Verhältnisses  $\frac{l}{d}$  auf die Geschwindigkeit

1) Berechnung von Herrn Prof. Dr. W. Schmidt. Indirekt ist die Formel auch aus einem Kapitel in Lambs Hydrodynamik ableitbar. Der Ausdruck gilt unter der Annahme, daß die Ausdehnung der Fugen links und rechts von der Fließrichtung unendlich sei.

turbulenter Strömungen (§ 32) ist nur eine schwache Andeutung der bei laminarem Fließen gültigen Bremswirkung der Weglänge.

Geschwindigkeiten laminaren Fließens in glatten, engen Fugen  
von der Weite  $D$  gemäß Abb. 16

Neigung 45°	Durchmesser	$D =$ $\frac{1}{20} mm$	$D =$ $\frac{1}{5} mm$	$D =$ $\frac{1}{2} mm$
Weg- längen	Z e i t a u f w a n d f ü r			
500 m	1 dm	100 <sup>s</sup>	6,25 <sup>s</sup>	1 <sup>s</sup>
	500 m	5 <sup>d</sup> 18 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 41,2 <sup>m</sup>	1 <sup>h</sup> 22,8 <sup>m</sup>
1 km	1 dm	3 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup>	12,5 <sup>s</sup>	2 <sup>s</sup>
	1 km	23 <sup>d</sup> 3 <sup>h</sup> 8 <sup>m</sup>	1 <sup>d</sup> 10 <sup>h</sup> 44,8 <sup>m</sup>	5 <sup>h</sup> 31,2 <sup>m</sup>
4 km	1 dm	13 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup>	50 <sup>s</sup>	8 <sup>s</sup>
	4 km	1 Jahr 5 <sup>d</sup> 1,8 <sup>h</sup>	23 <sup>d</sup> 0 <sup>h</sup> 2,1 <sup>m</sup>	3 <sup>d</sup> 16 <sup>h</sup> 19,2 <sup>m</sup>
6 km	1 dm	20 <sup>m</sup>	1 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup>	12 <sup>s</sup>
	6 km	2 Jahre 102 <sup>d</sup> 2,5 <sup>h</sup>	51 <sup>d</sup> 18 <sup>h</sup> 4,7 <sup>m</sup>	8 <sup>d</sup> 7 <sup>h</sup> 26 <sup>m</sup>

Anm. Es wurden zuerst die hohen Werte ausgerechnet. Die für 1 dm wurden abgerundet in Einklang damit gebracht. Die Nachrechnung kann sich der Werte für 1 dm nicht als Ausgangsgrößen bedienen.

Es sind hier makroskopische und die größten mikroskopischen Fugenbreiten ausgewählt worden, sowie unterirdische Weglängen zum Teil sehr bescheidener und in keinem Falle übergroßer Ausmaße berücksichtigt worden. Gleichwohl fördert nur ein Teil dieser Fugen den Niederschlag schon nach Stunden oder Tagen wieder zum Ausfluß. Bedenkt man nun noch, daß in der Natur die Fugen nicht so glatt sind wie dort, wo das Poiseuillesche Gesetz gilt, und ferner daß die Neigungen der Bahnen oft tief unter 45° liegen, wodurch sich auch die Druckhöhen vermindern, so kann man ruhig sagen, daß wegen der Langsamkeit dieses Fließens auch die makroskopischen Fugen, selbst solche mit bereits großkapillaren Weiten, nur zum Teil karsthydrographisch wirksam sind, d. h. die Niederschlagsperioden binnen wenigen Wochen und Monaten in den Abflußverhältnissen merkbar machen. Hierbei ist von der Gefahr der Versinterung der Fugen ganz abgesehen worden (§ 11). Legen wir uns noch einmal die Frage vor, ob man mit Hilfe einer häufigen Erweiterung solcher Fugen durch chemische Lösung die Karsthydrographie ableiten kann, wenn wir der Mehrheit der aufgeschriebenen Fugengrößen in der Wirklichkeit wenigstens hydrographische Wegsamkeit zuschreiben. An sich müßte sich ja mit der Zeit durch chemische Erweiterung ein wachsender Anteil groß- und selbst überkapillarer Fugen ergeben. Wo etwas Derartiges in geologischen Zeiträumen geschehen

ist, müßte eine beträchtliche Anzahl von Fugen von 0,5 *mm* bis wenigen Millimetern Weite Wasser mit Geschwindigkeiten von 1 *cm* bis 1 *dm* in der Sekunde hervortreten lassen. Und diese Art des Durchflusses müßte die Karsthydrographie in wachsendem Maße und in vielen Entwicklungsstadien beherrschen. Was zeigt aber die Beobachtung tausendfach? Sie zeigt den sprunghaften Gegensatz von gewaltigen Kluft- und selbst Höhlenquellen in unmittelbarer Nachbarschaft von zum Teil tieferliegenden Klüften, aus denen überhaupt noch nie ein Beobachter einen Tropfen hervortreten sah, geschweige daß sich an ihnen Stadien einer verschieden fortgeschrittenen Erweiterung zeigen würden, die später unterbrochen wurde. Viel, viel seltener sind die Beobachtungen, wo, allerdings unter mehreren Fugen, eine Anzahl Wasser ausschwitzen, eine noch kleinere Zahl es langsam herausrieseln läßt. Aber diese örtlich in geologischen Zeiträumen zustande gekommene Entwicklung hat noch kein einziges Karstgebiet erobern können und wird von der ganzen Literatur mit Recht als völlige Nebensache behandelt. So sehr die Meinungen im übrigen geteilt waren. So finden die § 11 bis 14 eine Unterstützung im Inhalte und der Bedeutung der vorgeführten Tabelle, ohne daß es einer solchen bedurft hätte. Es ergibt sich wieder, daß jede einwandfreie Herleitung der wirklichen Karsthydrographie schon vor aller Erweiterung der Wasserbahnen auf überkapillare Urhohlräume zurückgreifen muß, deren Querschnitte die Ausmaße aller übrigen vorher bestehenden Fugen sprunghaft übertrafen. Im Gegensatz zu diesen weiteren Urhohlräumen spielt ein Teil der engen Fugen mit gleitendem Durchfluß im Karstinneren höchstens die Rolle von Zubringern einer größeren Zahl feinverteilter Wassermengen, wobei vielleicht, unserem Auge verborgen, die Stadien mannigfacher Erweiterung regelmäßig vorkommen. Der karsthydrographische Gegensatz besteht also schon auch im Inneren als Gegensatz der Unzahl feinerer Fugen und Sprünge und der kleinen Menge weiterer Urhohlräume, die zwar spärlich verteilt sind, aber deswegen nicht seltener und weniger dicht auftreten, als etwa große Quellen und Flußschwinden.

§ 40. Wie schon erwähnt, gelten die Grundbeziehungen der verschieden benannten Druckhöhen allgemein, d. h. bei jeder Art des Fließens und bei allen vorkommenden Geschwindigkeiten, endlich auch unabhängig von Größe und Form der Röhrenquer- und Längsschnitte. Somit können wir nun den Druckverhältnissen in wechselnd weiten Röhren näher treten, was durch Abb. 17 erläutert sei. Jede Verengung des Rohres hat eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit zur Folge, jede Erweiterung eine Verlangsamung. Der Zuwachs an Geschwindigkeit in Verengungen kann nur auf Kosten des hydrodynamischen Druckes erfolgen, der, wie man zu sagen pflegt, „zum Teil in Geschwindigkeit verwandelt wird“. Über Verengungen steht demgemäß in Standröhren das Wasser niedriger als oberhalb und unterhalb. Folgt eine Erweiterung, so ist in ihr das Fließen langsamer, der Wanddruck höher, was man wieder an den Standrohrspiegeln sehen kann. Es ist hier „Geschwindigkeit in Druck verwandelt“ worden. Wiederholt sich der Querschnittswechsel entsprechend, so kann öfter Geschwindigkeit in Druck, auch zurückverwandelt werden und umgekehrt.

Was sich zwischen den Standrohren 1 und 2 oder 3 und 4 in Abb. 17 zeigt, ist also größtenteils nur scheinbarer Druckhöhenverlust. Aus den Verbindungslinien mehrerer Standrohrspiegel ersieht man, daß neben den abwechselnden Ver-

änderungen der Druckhöhen auch noch der echte Verlust an Druckhöhe durch die Reibung berücksichtigt wurde. Er besteht hier nicht nur aus den gewöhnlichen Reibungsverlusten glatter Rohre, sondern ist durch die Querschnittsänderungen erhöht. Besonders wird bei so plötzlichen Erweiterungen wie in Abb. 17 nicht so viel Druck zurückgewonnen als bei allmählichen Erweiterungen, weil sich dann an den Wänden Rückströmungen einstellen, so daß ein größerer Anteil der Be-

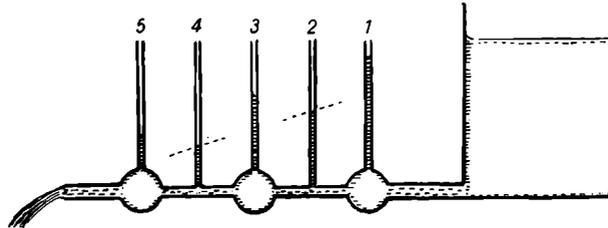


Abb. 17. Einfluß der Engen und Weiten auf die Größe des hydraulischen Druckes, dessen Änderungen sich in den verschieden hohen Wassersäulen in den Standröhren äußern. Wegen der Regelmäßigkeit im Wechsel der Querschnitte sind die Spiegelabstiege von der Standröhre 1 nach 2 und 3 nach 4 gleich.

wegungsenergie für diese verbraucht wird<sup>1)</sup>. In den Fällen, zu denen auch der in Abb. 17 gehört, ist mit Hilfe der Verbindungslinie von Standrohrspiegeln keinerlei Betrag einer Reibungs- oder Geschwindigkeitshöhe konstruierbar.

Hier ist Gelegenheit, dem in der Karstliteratur manchmal ohne Einschränkung hingeschriebenen Satz entgegenzutreten, als ob in weiten unterirdischen Hohlräumen das Wasser schneller fließe als in engeren. Dabei wird dieser Behauptung eine umfassende Bedeutung gegeben. In Wirklichkeit gilt von jeder kontinuierlichen Strömung in zusammenhängenden Hohlräumen das Gegenteil. Jener Satz hat nur beim Vergleich voneinander isolierter Druckströmungen in Röhren unter sonst gleichen Umständen Geltung. Besonders darf bei weiteren Hohlräumen das Verhältnis  $\frac{l}{d}$  nicht wesentlich ungünstiger sein als bei engeren, sonst ist wieder das Fließen in jenen langsamer. Laminares Fließen nach dem Poiseuilleschen Gesetz der Geschwindigkeiten ist auch in weiten Räumen nicht grundsätzlich ausgeschlossen, bei sehr rauhen Wänden wohl immer mit Drehbewegungen, mindestens in Wandnähe, verbunden. Nennen wir  $\Delta h_r$  den echten Druckhöhenverlust jeder Art auf einer begrenzten Röhrenstrecke, so ist der Unterschied der Höhen der Standrohrspiegel über benachbarten Einschnürungen und Ausbauchungen der Rohre, wenn die Querschnittsänderungen sehr allmählich sind, und weil  $\gamma = 1$ :

$$D_h = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \pm \Delta h_r$$

wobei  $v_1$  immer die größere der beiden Geschwindigkeiten bedeutet. Ist  $v_1$  unterhalb  $v_2$  vorhanden, so gilt  $+\Delta h_r$ , ist  $v_1$  oberhalb  $v_2$  vorhanden, gilt  $-\Delta h_r$ .

<sup>1)</sup> Vgl. Prandtl. Tietjens (Nr. 57), I, S. 227ff.



Bei den plötzlichen Erweiterungen der Abb. 17 ist die Zunahme der Druckhöhen

$$D'_h = \frac{v_2(v_1 - v_2)}{g} - \Delta h_r^1)$$

Vergleicht man die Drucke unmittelbar vor der Erweiterung und in ihrer Mitte, so kann  $-\Delta h_r$  ohne großen Fehler wegfallen.

Eine Strömung im ganzen erfolgt selbstverständlich vom höheren zum niedrigeren Druck, im einzelnen ist gleichwohl das Umgekehrte möglich, und zwar auf zweierlei Art: 1. wenn der unterhalb folgende höhere hydrodynamische Druck aus verwandelter Bewegungsenergie besteht, und 2. wenn der oberhalb vorhandene niedrigere hydrodynamische Druck davon herrührt, daß dort Druck zur Erhöhung der Geschwindigkeit verwendet worden ist. Beides kann auch zusammenwirken und wird oft gar nicht trennbar sein. Es wird uns auch noch die Tatsache beschäftigen, daß die Erhöhung der Geschwindigkeit in Einschnürungen des Querschnittes den hydrodynamischen Druck so herabsetzen kann, daß er geringer als der äußere Luftdruck wird. Es ist dann bei dem ja häufigen Ausfluß an die Luft der Druck auf die Rohrmündung größer als an jener engen Stelle des Rohrinernen. Dabei kehrt sich die Strömung natürlich nicht um, sie bleibt auch nicht stehen. Das verhindert ihre im Gesamtsystem ihrer Bewegung begründete Ausflußenergie.

§ 41. Vermehrter Zufluß in einen gleichbleibenden Querschnitt hat in bezug auf die Geschwindigkeitszunahme die Folgen einer entsprechenden Verengung. Was die Folge mehrerer gleichzeitiger Zuflüsse nebeneinander ist, zeigt Abb. 18. Dann wird der Druckhöhenabfall gegen den Ausfluß hin steiler, gegen das innere Rohrende sanfter aufsteigend, als es der Neigung der schiefen Linie der Abb. 9 entspricht. Eine Strömung kann in einem solchen Fall auch ohne weites Gefäß aufrecht bleiben. Alle Standröhren wirken hier ja als eine Mehrzahl schmaler Gefäße, die Wasser spenden. Die Verbindung der Standrohrspiegel ergibt einen polygonalen Zug, welcher verrät, daß die Reibungsverluste gegen die Mündung hin größer sind. In einem glatten Rohr kann das nur die Begleiterscheinung der in gleicher Weise gesteigerten Geschwindigkeit sein. Die geraden Stücke des polygonalen Zuges stellen Sehnen zu einer Kurve dar. Daher darf man im Grundwasser in Schottern und Sanden, wo sozusagen ununterbrochen „Standrohre“ vorhanden sind, als erlaubte Vereinfachung eine Kurve ziehen. Die Fläche, deren Erzeugende diese Kurve ist, pflegt man als „Grundwasserspiegel“ zu bezeichnen. Ein solcher Vereinfachungsbegriff ist auf den Karst nicht anwendbar, wo die Verzweigungsstellen des Röhrengeflechts manchmal einige, oft viele Meter auseinanderliegen und Querschnittsänderungen von  $> 25 \text{ qm}$  die Spiegelstände beeinflussen.<sup>2)</sup> Noch ein zweiter Ge-

<sup>1)</sup> Vgl. Prandtl-Tietjens (Nr. 57), I, S. 228 f. und II, S. 56 und 84, bes. die schöne Ableitung aus dem Impulssatz an der erstgenannten Stelle.

<sup>2)</sup> Selbst beim Überblick über sehr weite Karstgebiete, gegenüber deren Ausdehnung die Unterschiede der einzelnen Karstwasserspiegel von Ort zu Ort klein sein können, ist das Vorhandensein eines „Karstwasserspiegels“ mit Eigenschaften eines „Grundwasserspiegels“ durchaus kein physikalisches Gesetz, wie A. Grunds Deduktionen glauben machen wollten. Er ging zum Schaden für seine Theorien den entgegengesetzten Weg der amerikanischen Hydrographen King und Slichter, die zunächst jede gewöhnliche Grundwasserbewegung in Schottern als das — was sie ist — als verzweigte Röhrenströmung nach strengen Methoden behandelten und so erst die richtige Einsicht in die nur bei Schottern und Sanden

sichtspunkt vermehrt die Einsicht in die Zusammenhänge des zunehmenden Druckhöhenabfalles bei mehrfachen Zuflüssen in eine Röhrenströmung.

Ob Zuleitungen nach Abb. 18 oder in anderer Art, z. B. von unten erfolgen, ist dabei nebensächlich. In jedem solchen Falle nimmt der sekundliche Durchfluß im Rohr ruckweise zu.

Wo immer ein Zufluß in eine Röhrenströmung eintreten kann, geschieht dies nur, indem der hydrodynamische Druck innen an der betreffenden Stelle vom Druck des Zuflusses übertröffen wird.

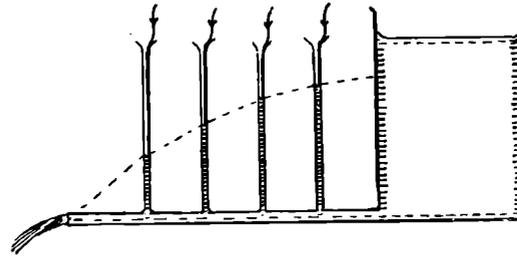


Abb. 18. Druckhöhenabfall in einem Ausflußrohr, wenn seine Wasserführung auch durch die Standröhren gespeist wird. Es ergibt sich ein Polygonzug, je nach der Zahl der Standröhren.

§ 42. Ist eine Verengung stark genug, so wird dort mehr vom hydrodynamischen Druck in Geschwindigkeit verwandelt, als die zur Verfügung stehenden Wasserhöhen hergeben können, d. h. es wird im Rohr auch noch ein Teil des Atmosphärendruckes zu Geschwindigkeit umgewandelt, so daß der Druck auf die Rohrwand im Inneren kleiner ist als derjenige der Luft von außen. Die Hydromechanik hat mit Recht die einst manchmal unterlaufene Ausdrucksweise vom „negativen“ hydrodynamischen Druck fallen gelassen. Einen solchen gibt es nicht: Der Druck auf die Wand von innen kann nie unter Null sinken. Diese Annahme muß zu fehlerhaften Ableitungen führen. Hat die Röhrenwand dort eine Öffnung, wo der Innendruck unter den atmosphärischen gesunken ist, so rinnt kein Wasser heraus; im Gegenteil, es dringt Luft ein und wird mitgerissen.<sup>1)</sup> Man kann dann mit Hilfe des Luftdruckes auch Wasser in die Strömung einführen, was durch Abb. 19 erläutert sei (vgl. Nr. 59, S. 953). Das Rohr mit der Verengung kann eine beliebige Lage, die Strömung darin eine beliebige Richtung haben. In der Verengung herrsche der Druck  $p_1$ , der kleiner ist als der Luftdruck  $p_0$ . Der Unterschied beider entspreche einer Wassersäule von der

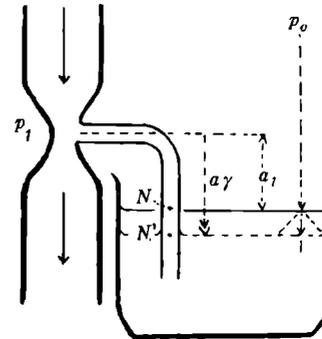


Abb. 19. Die Bedingungen eines hydrodynamischen Saugvorganges.  $p_0$ : der Luftdruck,  $p_1$ : der hydraulische Druck an der Verengung der Röhrenströmung,  $a$  Höhe der Wassersäule, welche die Bedingung erfüllt:  $p_1 + a\gamma = p_0$  ( $\gamma$  spez. Gew.). In der Lage  $N'$  liegt der Spiegel um  $a$  unter der Verengung und es herrscht Gleichgewicht; die obige Gleichung ist erfüllt. Das Knierohr ist mit ruhigem Wasser angefüllt. In der Lage  $N$  liegt der Spiegel nur um  $a_1 < a$  unter der Verengung. Wegen der Ungleichung  $p_1 + a_1\gamma < p_0$  drückt dann die Luft Wasser durch das Knierohr in die Strömung: es wird gesogen.

erlaubten Vereinfachungen schufen, wie sie auch das Verständnis dafür anbahnten, daß im Karst die vereinfachten Begriffsschemata der Grundwasserlehre für Lockermassen irreführend sind.

<sup>1)</sup> Auf dieser Erfahrung beruhen die Wasserstrahlpumpen, es sind Saugpumpen.

Höhe  $a$  ( $p_1 = p_0 - a\gamma$ ). Von der Verengung gehe nun nach unten ein gekrümmtes Rohr aus, das unter den Spiegel einer Gefäßfüllung tauche, ganz gleich wie tief. Solange nun der Spiegel des Wassers nur um eine Höhe  $a_1 (<a)$  unter der Verengung liegt, so herrscht an der Stelle  $N$  im Knierohr von oben der Druck  $p_1 + a_1\gamma$ , und von unten der stärkere äußere Luftdruck  $p_0$ , der größer ist nach Voraussetzung gleich  $p_1 + a\gamma$ . Daher steigt das Wasser im gebogenen Rohr hinauf und vereinigt sich in der Verengung mit der Strömung im Rohr. Wenn der Spiegel im Gefäß um die Höhe  $a$  tiefer steht als die Saugstelle, so wird das Wasser im Knierohr vom Luftdruck so weit gehoben bzw. so hoch gehalten, daß es bis zur Verengung reicht, wo es dann aber still steht, denn für die Spiegelhöhe  $N'$  halten sich im Knierohr von unten  $p_0$ , von oben  $p_1 + a\gamma$  das Gleichgewicht.

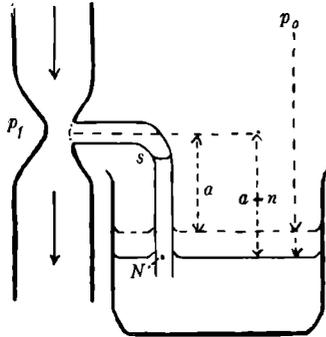


Abb. 20.  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $a$  wie in Abb. 20. Der Spiegel der Gleichgewichtslage bei wassererfülltem Knierohr ist, wie dort, gestrichelt. Wird der Gefäßspiegel auf das Niveau  $N$  gesenkt, das um die Höhe  $a + n$  tiefer ist als die Verengung der Röhrenströmung, so stellt sich im Knierohr der Spiegel  $s$  ein, der um den Betrag  $a$  höher liegt als das Niveau  $N$ . Die Wassersäule unter  $s$  bleibt in Ruhe. Über  $s$  sammelt sich verdünnte Luft und Wasserdampf mit dem Druck  $p_1$ ; das Gasgemisch ist mit dem Wasser in der Strömung im Gleichgewicht. Für das Niveau  $N$  gilt nun bei der nur teilweisen Erfüllung des Knierohres die Gleichgewichtsbedingung

$$p_0 = p_1 + a\gamma.$$

Man erkennt hieraus, daß die Saughöhe eine obere Grenze hat, die durch die Größe des Luftdruckes gegeben ist, der in der Natur höchstens dem Druck einer wenig über 10 m hohen Wassersäule gleichkommt. Selbst wenn also der hydraulische Druck in der Verengung praktisch gleich Null wäre, so kann nur eine höchstens rund 10 m hohe Wassersäule in aufsteigende Bewegung versetzt werden. Daß jener Innendruck nicht negativ werden kann, wissen wir schon.

Nun kann man auch erkennen, was geschieht, wenn der Spiegel der Gefäßfüllung um mehr als die Höhe  $a$  unter der Verengung der Strömung liegt, z. B. um  $a + n$  (vgl. Abb. 20). Dann ist der senkrechte Teil des Saugrohres zu lang und es wird nicht gesogen. Denn

$$p_1 + (a + n)\gamma > p_0$$

In diesem Falle rinnt aber ebenfalls nichts aus der Öffnung bei der Verengung heraus. Viel-

mehr wird aus dem knieförmigen Rohr soviel Luft herausgesogen, bis darin der Luftdruck  $p_1$  herrscht. Da dieser kleiner als  $p_0$  ist, so steigt zugleich das Wasser ein Stück weit in diesem Rohr hinauf, so daß sein Spiegel ( $s$ ) darin um  $a$  über dem äußeren Spiegel steht, der dabei ein wenig gesunken ist; an der Stelle  $N$  herrscht nun wieder das Gleichgewicht  $p_1 + a\gamma = p_0$ . Diesen Fall habe ich noch in keinem Lehrbuch betrachtet gefunden. Praktisch ist das Nichtsaugen ja ohne Bedeutung und theoretisch erscheint es den Verfassern wohl selbstverständlich. Man braucht sich aber nur zu fragen, was beim Übergang vom Saugen zum Nichtsaugen geschieht, wenn der Spiegel im weiten Gefäß z. B. durch Wegschöpfen während des Saugens so zum

Sinken gebracht wird, daß der Druck der Wassersäule im knieförmigen Rohr bis zur gesenkten Spiegelhöhe im Gefäß, vermehrt um  $p_1$ , größer wird als  $p_0$ . Es ist durchaus nicht selbstverständlich, daß dann das Hauptrohr an seiner Einschnürung kein Wasser ausströmen läßt, sondern der Zustand der Abb. 20 sich einstellt, bei welchem eine auf den Druck  $p_1$  verdünnte Luft im oberen Teile des Knierohres über  $s$  vorhanden ist. Dem Abreißen einer Saugbewegung ist § 47 gewidmet. Dieser Fall wird später erlauben, in einen der Erklärungsversuche der Meermühlen Licht zu bringen.

§ 43. Wo im Karst ein oberirdisches Gewässer in ein Ponor verschwindet und seinen Anschluß an eine verborgene unterirdische Druckströmung findet, ist an sich zweierlei möglich. Dieser Anschluß könnte an einer Stelle erfolgen, wo der Druck der verborgenen Strömung geringer ist als der atmosphärische. In diesem Falle dürfte allgemein und mit Recht von Saugwirkung gesprochen werden. Der Anschluß an die Druckströmung kann aber durch den zusätzlichen Druck der verschwundenen Gewässer allein erzwungen werden. In diesem Falle spricht man allgemein an der Pforte, wo das Gewässer die unterirdische Bahn betritt, von Verschluckung, auch wenn es in einem gewöhnlichen Wasserfall hinabstürzt. Es empfiehlt sich erst recht, auch dort von Verschluckung zu sprechen, wo das verschwundene Wasser in der Tiefe bei hydraulischen Drucken von mehr als einer Atmosphäre an der Druckströmung teilzunehmen beginnt (vgl. Abb. 18). Wer will, kann hier von hydrodynamischer Verschluckung sprechen. Im Gegensatz zu diesem Vorgang sind echte Saugstellen im Karst sehr selten. Denn es ist mir kein Fall bekannt geworden, daß das Wasser an einem Ponor heftig die nachdringende Luft mit hinabreißt oder daß Luft an einem Ponor hinabgerissen wird in Zeiten, da die Wasserschwinde trocken liegt.

§ 44. Die eine der beiden für die Meermühlen von Argostoli auf Kephallenia versuchten Erklärungen, und nur sie arbeitet mit echten Saugwirkungen, übrigens, wie wir sehen werden, in einer durchaus nicht einwandfreien Weise. Aber da die Meermühlen eine so auffällige Erscheinung sind, so hat jede theoretische Deutung Anspruch auf eindringende Beachtung, auch wenn sie weder im Falle von Kephallenia, noch sonst im Karst hydrographisch verwirklicht sein sollte. Das mag es rechtfertigen, wenn ich dem Vorgang des Saugens auch noch rechnerisch etwas näher trete. Eine Verengung reicht aus, daß der hydraulische Druck in ihr unter den äußeren Luftdruck sinkt, wenn der verengte Querschnitt:  $F_2$  zu dem des Ausflusses in freier Luft:  $F$  nach Nr. 58, S. 169 f. in folgender Beziehung steht

$$\frac{F_2}{F} < \sqrt{\frac{1 + \zeta_2}{1 + \zeta + \zeta_2 \left(\frac{F}{F_2}\right)^2} \cdot \frac{H}{H_2}}$$

Hiebei ist  $H$  der Höhenunterschied zwischen Ausgangsspiegel (oberem Druckspiegel) und Ausfluß,  $H_2$  jener zwischen ebendemselben Spiegel und der verengten Stelle,  $\zeta$  der Widerstandskoeffizient von  $F_2$  bis  $F$ ,  $\zeta_2$  jener vom Spiegel bis  $F_2$ . Ohne Rücksicht auf Reibungswiderstände und Nebenhindernisse gilt, daß der hydraulische Druck größer, gleich oder kleiner ist als der atmosphärische Außen-

druck, wenn  $\left(\frac{F}{F_2}\right)^2$  kleiner, gleich oder größer ist als  $\frac{H_2}{H}$ . Es wird dann also gesogen, wenn

$$F_2 < F \sqrt{\frac{H}{H_2}}$$

Bei einem wagrechten, äußerst glatten Rohr, in dem  $H_2 = H_1$ , genügt es in reibungslos gedachter Strömung, daß die Verengung den inneren Querschnitt gerade unter denjenigen des Ausflusses bringe, damit dort an seitlicher Öffnung die Saugwirkung einsetze. Die Widerstandskoeffizienten, bei Weisbachs Versuchen kleine positive Zahlen ( $\leq 1$  bis  $< 6$ ) müssen als Ausdruck der Druckhöhenverluste für jede Art und Form des Rohres eigens durch Versuche bestimmt werden.

Damit seien die theoretischen Betrachtungen über die Saugwirkung abgeschlossen. Sie haben ergeben, daß das Wasser nicht etwa nur im Inneren einer Röhrenströmung von Orten niedrigeren Druckes zu solchen höheren getrieben werden kann, sondern auch zu einem Ausfluß rinnt, der selbst unter höherem Druck steht als eine oder mehrere Stellen im Inneren des Rohres (vgl. §§ 45 und 50).

§ 45. Auch wenn die Einschnürung eines Querschnittes nicht so stark ist, daß der äußere Luftdruck den hydrodynamischen Wanddruck übertrifft, kann sie dazu führen, daß Wasser, und zwar ohne Hilfe des Luftdruckes, durch Wandöffnungen eintreten muß. Zwei Fälle sind hier besonders bemerkenswert. Im ersten spielt sich

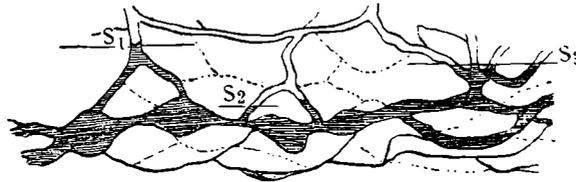


Abb. 21.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ , Spiegel des Druckwassers in aufwärts führenden Hohlräumen.  $S_1$  über Erweiterungen,  $S_2$  über einer Verengung, Gesamtströmung nach links. Steigt der Spiegel  $S_1$  bei vermehrtem Wasserandrang bis zur Verbindungskluft nach  $S_2$ , so strömt dorthin Wasser über, und zwar entgegengesetzt der Hauptströmung. Die besondere Form des Hohlraumes unter  $S_1$  bewirkt, daß stets auch Wasser nach links abwärts zur untersten Erweiterung fließt.

alles innerhalb des Strömungssystems ab. Weil das Wasser in einem Standrohr, das von einer Erweiterung ausgeht, höher steht als in einem Standrohr, das von einer Verengung ausgeht (vgl. Abb. 17), so braucht sich ihm nur eine Verbindung zwischen den Standrohren über der Hauptströmung zu bieten, und es steigt das Wasser über der Erweiterung empor, um nach Überströmen ins andere Standrohr bei der Verengung in die Hauptströmung zurückzukehren. Liegt die Verengung oberhalb, so entsteht ein förmlicher Kreislauf des Wassers. Abb. 21 erläutert dies gleich mit einer gewissen Anpassung an natürliche Verhältnisse. Weil das Wasser hier infolge seines Gewichtes in die Verengung tritt, sprechen wir von einem Schluckvorgang daselbst und nicht von Saugen.

Dieser Schluckvorgang kann sich auch vollziehen, wenn anstelle der Erweiterung der Ausfluß unter Wasser erfolgt. Dann drückt auf die Mündung die Atmo-

sphäre und die sie bedeckende Wassersäule. Im Inneren eines gleich weiten Ausflußrohres müssen die Standröhren außer den Wassersäulen, welche den Reibungswiderstand verraten, auch noch eine Wassersäule tragen, welche gleich ist dem Gegen- druck des auf der Mündung lastenden Wassers. Durch eine Einschnürung der Strömung kann zunächst der Vorrat an unverbrauchter Reibungshöhe vorübergehend in Geschwindigkeit verwandelt werden. Ist die Einschnürung stärker, so wird der hydrodynamische Druck zwar noch lange nicht unter den Atmosphärendruck sinken, aber er kann unter die Summe von Luft und Wasserdruck über dem Ausfluß ge-

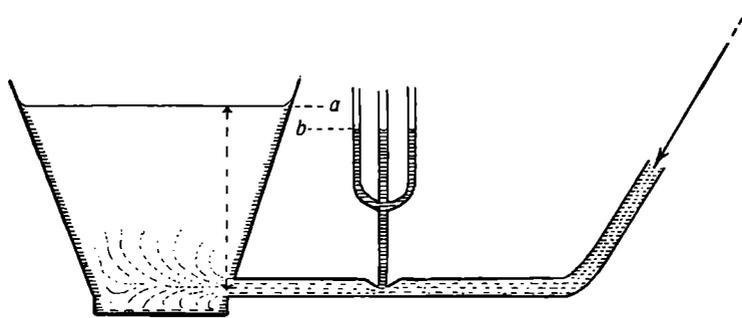


Abb. 22. Ausfluß unter Wasser in ein weites Gefäß, dessen Spiegel höher steht als der Standrohrspiegel über einer Einschnürung der Strömung. Eine Verbindungsrohre in den Höhenlagen unter *a*, auch unter *b*, würde bewirken, daß Wasser aus dem weiten Gefäß einen dauernden Kreislauf antritt, indem es bei *b* den Spiegel hebt und so durch seinen Überdruck an der Einschnürung verschluckt wird.

bracht werden. Da auch auf die Standröhrchen die Luft drückt, ist die Folge der Verengung in diesem Falle nur, daß die Wassersäule der Standröhre an der eingeschnürten Stelle nicht so hoch ist wie die Wassersäule, die auf dem Ausfluß lastet (vgl. Abb. 22). Ein zwischen *a* und *b* oder auch tiefer eingeschaltetes Verbindungsrohr müßte auch hier eine Kreislaufströmung aus dem weiten Gefäß ins Rohr einleiten. Da der hydraulische Druck an der Verengung hier größer als der atmosphärische ist, so liegt keine Saugwirkung, sondern eine Verschluckung vor. Der Unterschied ist besonders geographisch wesentlich. Es hat keine Klarheit gebracht, sondern das Gegenteil, daß man auch bei Meermühlen, auf welche eine solche Verschluckung ebenfalls anwendbar ist, dabei von Saugwirkung gesprochen hat.

## B. Die dynamischen Beziehungen zwischen Karstwasser und Meerwasser.

§ 46. Der gemachte Unterschied zwischen echter Saugwirkung und der Schluckwirkung bei hydraulischen Drucken über einer Atmosphäre ist karsthydrographisch wichtig. Die Entscheidung darüber, ob bei einem sonst gleichartig angeordneten Kluftsystem eine unterseeische Süßwasserquelle entsteht oder eine Brackwasserquelle über dem Meeresspiegel, kann von jenem Unterschied abhängen.

Dies erläutere Abb. 23. Links sind die Bedingungen für eine Brackwasserquelle gegeben, denn die Verengung, an der ein Druck  $p_1$  unter einer Atmosphäre herrsche, läßt das vom Luftdruck heraufgehobene Meerwasser in die Strömung eintreten, wo es, mit dem Süßwasser vermisch, als Brackwasserquelle zutage tritt. (Saugwirkung.)

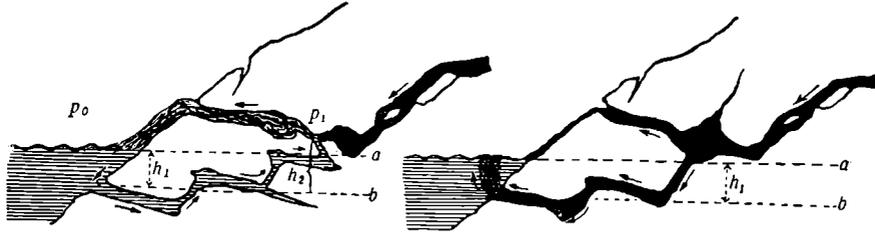


Abb. 23. Links: eine Brackwasserquelle, rechts eine unterseeische Süßwasserquelle (dazu eine schwächere oberirdische Süßwasserquelle). Die Gestaltung der Klüfte stimmt weitgehend überein, außer der Verengung mit dem Druck  $p_1$  links, der kleiner als der Luftdruck  $p_0$  ist. An der entsprechenden Stelle ist rechts eine Erweiterung.  $a$ : Höhe des Meeresspiegels im Küstengebirge,  $b$ : Tiefe der unterseeischen Felsöffnung im Gebirge, beide Niveaus sind gestrichelt.  $h_1$  deren Höhenunterschied. Links würde der Druck des Meerwassers allein ausreichen, daß es in Röhren bis  $a$  steigt. Daher genügt es für die Speisung der Brackwasserquelle, wenn der Unterdruck  $p_1$  imstande ist, das Salzwasser aus der Höhe  $h_2 - h_1$  emporzusaugen. Rechts wird das Süßwasser hinabgedrückt (verschluckt), weil der hydrodynamische Druck der Strömung am Grunde der Erweiterung größer ist als  $p_0 + h_1\gamma'$ , wobei  $\gamma'$  das spezifische Gewicht des Meerwassers ist.

Rechts sind die Bedingungen für den Fall einer unterseeischen Süßwasserquelle gezeichnet; in der Erweiterung herrscht ein besonders hoher Druck, jedenfalls ist er größer als der Atmosphärendruck. Selbst wenn zuerst Salzwasser bis dicht unter die Erweiterung  $E$ , d. h. bis zur Höhe des Meeresspiegels reichen würde, müßte es weggedrängt werden. An seine Stelle tritt das hinabgepreßte Süßwasser. Der hydraulische Druck in der Erweiterung

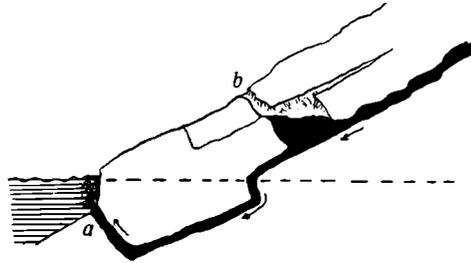


Abb. 24. Bildung einer unterseeischen Süßwasserquelle aus einer unterbrochenen Druckströmung. Die Öffnung  $b$  kann fehlen, ohne daß sich etwas Wesentliches ändert. Sonst kann ein stärkerer Wasserandrang bei  $b$  ebenfalls eine Quelle erzeugen. Es kann aber auch die Erweiterung der Hohlräume fehlen, dann liegt der einfachste Fall einer unterseeischen Quelle vor. Es ist der einer Erläuterung nicht mehr bedürftige Ausfluß einer schlichten Druckströmung unter Wasser.

ist eben so groß, daß er zusammen mit dem Drucke der hinabgepreßten leichteren Süßwassersäule stärker bleibt als die Summe des Meeresdruckes und Luftdruckes auf die unterseeische Quellmündung. Diese kann also dauernd Süßwasser am Meeresboden hervorquellen lassen; die Röhre, die vom Boden der Erweiterung hinabführt, schluckt. Es ist nebensächlich, ob in diesem Fall außer der unterseeischen auch eine obertägige Süßwasserquelle vorhanden ist, wie in der Zeichnung oder ob der Fels so dicht ist, daß über dem Meeresspiegel kein Wasser austritt. Überhaupt können unter-

seeische Süßwasserquellen ebenso wie Brackwasserquellen auch anders entstehen als auf eine der soeben betrachteten Arten.

Wenn nämlich die Erweiterung in größerer Höhe über dem Meeresspiegel liegt als vorher (vgl. Abb. 24), so kann bereits bei einer bloß halben Füllung der Druck des Süßwassers größer sein als der des Salzwassers, so daß jenes am Meeresgrunde austritt. In diesem Falle braucht bei *b* keine Süßwasserquelle aufzutreten, selbst wenn die Zuleitungsröhre vorhanden ist. Daß unterseeische Quellen auch in den

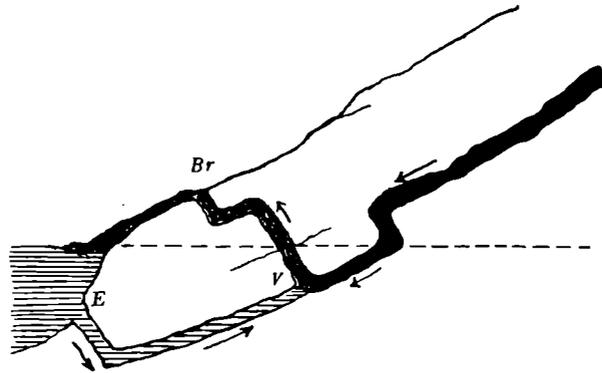


Abb. 25. Bildung einer Brackwasserquelle *Br* durch Verschluckung des Meerwassers bei *V*. Wesentlich ist, daß *V* unter dem Meeresspiegel liegt. Hingegen ist es unwesentlich, ob *V* höher oder tiefer liegt als die Einströmung des Meerwassers bei *E*.

Fällen nach Abb. 24 entstehen müssen, wo die obere Ausgangsröhre *b* fehlt, ist kaum zu erwähnen. Selbst die Erweiterung ist hier überflüssig, wenn der hydrodynamische Druck von rechts oben auch ohne sie ausreicht. Hingegen ist es unrichtig, bei jeder Brackwasserquelle über dem Meeresspiegel nach Abb. 23 links Saugwirkungen zur Erklärung heranzuziehen. Wenn nämlich der Quellstrang unter die Höhe des Meeresspiegels greift, wie in Abb. 25, und dort eine Verbindung zum Meeresboden hat, so drückt das Meerwasser an der Stelle *V* kraft seines Übergewichtes nach oben, das Süßwasser kraft seines Wanddruckes an dieser Stelle nach unten. Aber der hydraulische Wanddruck ist so nahe dem Ausfluß schon sehr klein, nicht viel über Atmosphärendruck. Daher kann das Empordringen des Meerwassers stärker sein<sup>1)</sup> als der hydraulische Druck und so mischt sich dieses der Quelle bei. Je tiefer der Quellstrang unter die Höhe des Meeresspiegels hinabtaucht, desto mehr Meerwasser muß eindringen. Es wäre eine Rechenaufgabe, eine wie große Erweiterung des Quellstranges bei *V* man annehmen müßte, und wie weit sie von der Mündung *E* abliegen müßte, damit selbst bei dieser Anordnung der hydraulische Druck noch eine unterseeische Quelle erzwingen wie nach der früheren Abb. 23 rechts. Die jetzt betrachtete Brackwasserquelle nach Abb. 25 hat also die Salzflut nicht angesogen, sondern von unten her bei mehr als Atmosphärendruck schlucken müssen.

<sup>1)</sup> In den klassischen Gebieten dieser Erscheinungen ist das wärmere Meerwasser salzreich genug, so daß es stets schwerer ist, nicht nur als kälteres Süßwasser, sondern in Kephallenia nach Wiebels Bestimmungen auch schwerer als alle beobachteten Brackwässer.

§ 47. Kehren wir nun zum Fall einer Saugwirkung zurück; diesmal soll sie aber an einer U-Röhre nach Abb. 26 angreifen. Die Zeichnung veranschaulicht ein Experiment, welches mir Herr Prof. Scherrer, Vorstand des physikalischen Institutes der E. T. H., vorgeführt hat. Der rechte Schenkel des U-Rohres empfängt den Zufluß aus einer Wasserleitung, so daß der Trichter zunächst gefüllt

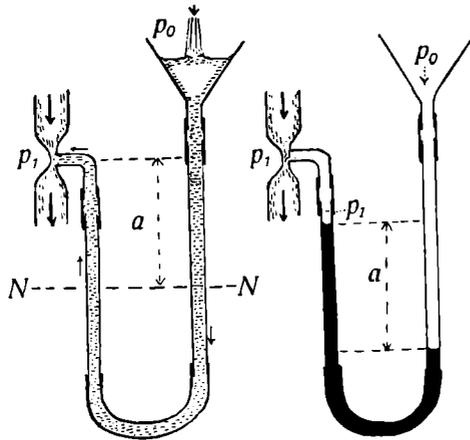


Abb. 26. Die Zustände in einem U-Rohr vor und nach dem Abreißen einer angesogenen Strömung. Im Falle der linken Zeichnung saugt die verengte Stelle der Hauptströmung lebhaft, weil der Luftdruck  $p_0$ , vermehrt um den Druck einer Wassersäule zur Rechten (unter dem Zufluß) größer ist als  $p_1 + a\gamma$ . Nach dem Sperren des Zuflusses und dem folgenden Abreißen der Saugströmung entsprechen die Spiegellagen des zur Ruhe gekommenen schwarz gezeichneten Wassers der Gleichgewichtsbedingung  $p_0 = p_1 + a\gamma$ . Alle dargestellten Vorgänge würden auch eintreten, wenn die Strecke des Hauptrohres mit der Verengung nicht senkrecht, sondern wagrecht verlief.

bleibt. An der saugenden Verengung herrscht der Druck  $p_1$ , der um  $a\gamma$  kleiner sei als der Luftdruck  $p$ . Da außerdem noch wegen der Höhe des Trichters eine Wassersäule über dem Niveau der Verengung mitdrückt, so dringt das Wasser mit großer Heftigkeit aus dem Kniestück des Rohres in die saugende Strömung ein. Nun werde der Zufluß in den Trichter abgesperrt. Der Wasserspiegel sinkt nun im rechten Röhrenschenkel reißend hinab. Im Augenblick, wo er das Niveau NN erreicht, herrscht das Gleichgewicht der Drucke gemäß  $p_1 + a\gamma = p_0$  (vgl. § 42). Es ergibt sich aber, daß der rechte Spiegel ein Stück unter die Höhe NN sinkt. Die Trägheit läßt die reißende Bewegung nicht so gleich stille stehen, obwohl die echte Saugwirkung vorbei ist und obwohl der Druck im linken Schenkel schon über  $p_1 + a\gamma$  und damit auch über den Luftdruck gestiegen ist. Noch immer ist der linke Schenkel ganz voll Wasser.

Ich hatte zuerst theoretisch gefolgert, daß nun die Strömung umkehren würde und das Gleichgewicht sich erst einstellen werde, wenn aus der Verengung etwas Wasser hinaus in den linken U-Schenkel geflossen sei, denn hier sei nun ein Druck  $p_1 + (a + n)\gamma >$  als  $p_0$  gegeben. Dies tritt aber eben nicht ein und Herr Prof. Scherrer zeigte mir nun, was nur das Experiment sicherstellen kann:

Noch in derselben Sekunde, wo im rechten U-Schenkel der Spiegel etwas unter NN gesunken ist, reißt die Wasserverbindung an der Verengung ab und nach kurzem Schaukeln stellt sich das Wasser gemäß der in Abb. 26 schwarz gezeichneten Füllung ein. Im linken Schenkel hat sich Luft mit dem Druck  $p_1$  angesammelt, daher steht hier das Wasser um den Betrag  $a$  höher als im rechten, auf den der Luftdruck wirkt. Es herrscht also Gleichgewicht. Der ganze beschriebene Vorgang vollzieht sich so schnell, daß man ihn erst bei öfterem Zusehen erfaßt und er ist keineswegs als selbstverständlich für den Nichtphysiker zu bezeichnen, obwohl das

herauskommt, was schon in Abb. 20 gezeichnet wurde, die aber erst nach Kenntnis des Experiments entstanden ist. Setzt man für den Spiegel im Trichter den Meeresspiegel ein, so ergibt sich, daß daneben ein tieferer möglich ist, wenn etwa Schleusen den Zufluß des Meeres abhalten. Das ist die zweite Möglichkeit, die Erscheinungen bei den Meermühlen zu erklären. Wie Abb. 26 zeigt, steht das Wasser nach dem Abreißen der Strömung im linken Schenkel des U-Rohres über dem Niveau NN. Es ist aber ein Fehler, der gemacht worden ist (vgl. § 54), wenn man den Begriff der „Saughöhe“  $a$  so faßt, als ob alles Wasser, das ein Stück weit in sie emporreicht, auch wieder hinaufgerissen würde. Denn im Niveau NN kann ja die Wassersäule nicht zerrissen werden, ohne daß ein luftleerer Raum entstünde. Vielmehr müßte der Zufluß wieder so lange geöffnet werden, bis rechts das Wasser über NN steigt, damit es links wieder in die Strömung eingesogen würde. Daß verdünnte Luft beim Abreißen der Wasserverbindung sich vor die Verengung legt, ist selbstverständlich. Weder im Experiment und erst recht nicht in der Natur kann verhindert werden, daß zwei heftige Wasserströmungen Luft heranbringen, die tatsächlich schneller, als man denken kann, die Abreißstelle erfüllt. Das in den §§ 42 bis 46 Vorgebrachte würde zum Verständnis von Meeresschwinden fast ausreichen, aber keinesfalls schon zum vollen Verständnis der einst zu ihrer Erklärung gemachten Theorien, die nur noch wegen der gleichzeitig damit verwobenen Beobachtungen mehr als bloß historische Bedeutung haben. Es muß ihnen aber auch nachgesagt werden, daß sie trotz den unterlaufenen Fehlern mehr oder weniger auch physikalisch der Wahrheit näher kamen als die frühere Vergangenheit. Man hätte nur nicht durch kritiklose Übernahme und flüchtig abgeschriebene Auszüge aus den älteren Erklärungen der Meermühlen von Argostoli deren Fehler teils verschleiern, teils vergrößern sollen. Darum wollen wir jetzt der Wirklichkeit der Meeresschwinden näher treten.

**§ 48.** Parallel zu der Westküste von Kephallenia im Jonischen Meer erstreckt sich gegen Mittag ziehend in 2 bis 4 *km* Entfernung eine Halbinsel, die nur im N mit dem Hauptteil der Insel zusammenhängt (vgl. Abb. 27). Die Breite dieser Halbinsel hält sich zwischen 3 und 7 *km*. Sie begrenzt im W den 13 *km* langen, im S offenen Livadibusen. Die Halbinsel, Paliki genannt, ist uneben, mit einzelnen Höhen bis über 300 *m*, im N auch über 500 *m*. In den Livadibusen ragt von S her eine kleine, längliche Halbinsel, nach NNW streichend, etwa  $4 \times 1$  *km* messend. Man kann sie daher auch nur als felsige Landzunge bezeichnen. Sie zieht ebenfalls parallel zur übrigen Küste, indem sie von einer breiten Ausbauchung Kephallenias abzweigt. Durch diese Landzunge wird einerseits die Ausfahrt aus dem Livadibusen auf 3 *km* Breite, drei Fünftel, eingeengt, andererseits erstreckt sich sein östlicher Teil in der Form einer eigenen kleinen Bucht hinter der Landzunge noch 4 *km* nach SSE. Diese Bucht, meist unter 1,5 *km* breit, ist anfangs 25 *m* tief und endet zuletzt als flacher Sumpf. In der Mitte ihres Westufers liegt die größte Stadt von Kephallenia, Argostoli, und nach ihr wird Landzunge und Bucht benannt. Die felsigen Höhen westlich hinter der Stadt erreichen nur noch 90 *m* über dem Meere, das ist zugleich die größte Höhe der kleinen Halbinsel oder Landzunge von Argostoli. Die weitere Darstellung dieses Paragraphen folgt größtenteils der Schrift von Joseph Partsch über Kephallenia (Nr. 37, S. 22f.), so daß bei den wörtlichen Zitaten ohne nähere Angabe er der Verfasser ist. . . „An der Spitze der felsigen Landzunge von Argostoli

wurde man 1835 aufmerksam auf mehrere Stellen, an denen das Meerwasser in den Boden eindrang. Auch an der Ostküste liegt ein Platz, an der westlichen mehrere, wo sich derselbe Vorgang vollzieht.“<sup>1)</sup> Diese späte Beobachtung „durch ein Rauschen im Boden veranlaßt“, ist nur durch die Schwäche des Geräusches erklärbar. Als schon die Mühlen bestanden, betonten mehrere aufmerksame Beobachter geradezu die Geräuschlosigkeit der Meeresschwinden (Wiebel, S. 108, 130). „Durch Verschließung einiger Klüfte und Erweiterung einer anderen zu einem Kanal gelang



Abb. 27. Umriß von Kephallenia, rd. 1:888.900.

es, diesem eine ausreichende Wasserführung zu sichern zum Betriebe einer Mühle.“ Im Jahre 1859 wurde eine zweite Mühle errichtet (Wiebel, S. 110), etwa 370 m südöstlich der älteren. Beide Mühlen werden also vom Meerwasser betrieben, „welches etwa 50 Schritt ins Land eindringt und dann in den Klüften des Gesteins verschwindet“. Die Zuleitungskanäle beider Mühlen sind im Abschnitt der Radrinne und auf der anschließenden Schluckstrecke parallel zur Küste angeordnet, etwa 17 m von ihr entfernt, worauf bisher niemand hingewiesen hat (vgl. Abb. 29). „Die Klüfte nahmen nur ein bestimmtes Maß von Wasser auf, jeder Überschuß verursachte einen Rückstau.“ Das heißt nicht, daß die Schlucktätigkeit aufhörte, sondern nur, daß sich das Meerwasser in der Rinne asymptotisch auf den jeweiligen Meeres-

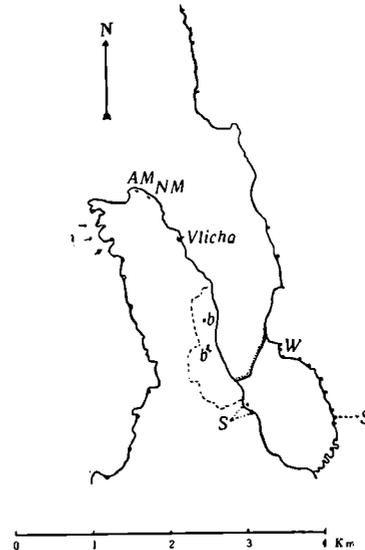


Abb. 28. Die Küste der Halbinsel und Bucht von Argostoli nach Wiebel und Partsch. Der Umriß der Stadt ist gestrichelt. *AM*, *NM*: Alte, Neue Mühle. Die Pfeile weisen auf sonstige Meeresschwinden; an der Küste im NW sind solche allein von Wiebel bestritten. Die starken schwarzen Punkte bedeuten auf der Ostseite der Bucht alle oder fast alle Brackwasserquellen, besonders stark sind jene beim Waschhaus, *W*. *S*: sichere Süßwasserquellen, *b*: Brackige Quellen auf der Westseite der Bucht, besonders die Gruppe bei der Kirche von Argostoli. Höhlen an der Westküste der Halbinsel.

<sup>1)</sup> Damit bestätigt Partsch eine bezüglich der Westküste der Landzunge von Wiebel (Nr. 49, S. 127) ausdrücklich bestrittene ältere Nachricht von Browne (Wiebel, ebenda, S. 109). Die Stelle an der Ostküste ist die Mulde „Vlitcha“.

spiegel einstellte, womit die zum Drehen des Rades nötige wagrechte Fließgeschwindigkeit aufhörte.<sup>1)</sup> Andererseits wurden die Becken, die man am Ende der vom Meere ausgehenden Kanäle ausgehauen, auch nicht völlig trocken, wenn man den Zufluß von der See aus abspernte, sondern das Wasser stand dann in ihnen still, in einem beständigen Niveau von 1,5 m unter dem Spiegel des Meeres.<sup>2)</sup> Die Geschwindigkeit, mit der das Meerwasser die Radrinnen durchfließt, kann also mit Hilfe von Schleusen beeinflusst und geregelt werden.

Wenn die Schützen völlig geöffnet wurden, nachdem die Kanäle selbst sich nach unten entleert haben, strömte das Meerwasser mit etwa 6 m/sek in die Radrinnen (Wiebel,

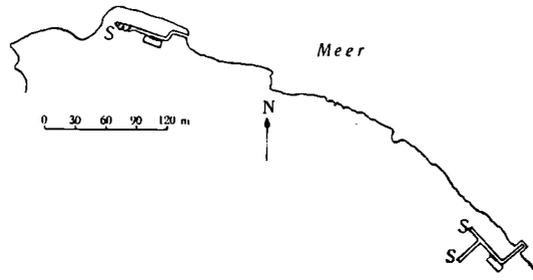


Abb. 29. Lageskizze der beiden Meermühlen von Argostoli. Sie beruht auf den Einzelplänen jeder der Mühlen von Wiebel 1:1000 und auf der Darstellung der britischen Admiralkarte „Port Argostoli“, 1894/95, in viel kleinerem Maßstab als Abb. 29. Der gegenseitige Abstand der Mühlen ist der Seekarte entnommen; er weicht von anderen Angaben nicht unerheblich ab. Dabei wurde angenommen, daß die Bezeichnung „Water Mill, ruins“ an der Küste sich auf die südöstliche Meermühle der Literatur bezieht. S: Schwundstellen des Meerwassers. Die alte Mühle ist die westlichere.

S. 110). Das ist die größte gemessene Geschwindigkeit; zwischen ihr und der für die Mühle zu langsamen Strömung beim „Rückstau“ liegen jene Geschwindigkeiten, welche bei bestimmter Schützenöffnung den Mühlrädern einen gleichbleibenden Gang erlauben.

Die ältere Mühle arbeitete anfangs mit einem Nutzgefälle von 2,5 bis 3 engl. Fuß (zu rd. 30,48 cm) in der Radrinne, später mit nicht mehr als 1,75 Fuß. Die neue Mühle wurde auf 0,5 Fuß Nutzgefälle eingerichtet (Wiebel, S. 110, 126). Die Rinnenbreiten betragen 4,5 bzw. 4 engl. Fuß.<sup>3)</sup> Die Mengen des verschluckten Meerwassers wurden etwas roh mit Hilfe der Anzahl der Radumdrehungen bei Leergang und 1 Fuß Wassertiefe in der Radrinne ermittelt. Es ergab sich dabei eine stationäre Geschwindigkeit von 2,56 m/sek bei der älteren Mühle und 1,91 m/sek bei der neueren (Wiebel, S. 125f.). Demgemäß wurden bei jener verschluckt 1,03 cbm/s und bei dieser 0,7 cbm/sek (genau 0,697 cbm). Das ergibt im Tag rund 150000 cbm

<sup>1)</sup> Wiebel scheint in der Frage, ob bei ungehemmtem Zudrang des Meeres das Schlucken wirklich oder nur scheinbar aufhöre, eine nicht ganz feste Haltung einzunehmen (vgl. seine S. S. 128 und 147, oben und unten). Die physikalischen Erklärungen einschließlich der Theorien Wiebels selbst fordern aber in jedem Falle die Fortdauer der Verschluckung.

<sup>2)</sup> Dies ist auch die Angabe Fouqués (Nr. 14). Die englischen Maßangaben lauten bei Wiebel alle auf 4,5 engl. Fuß, was 137 cm entsprechen würde.

<sup>3)</sup> Sie sind also auf Abb. 29 gemäß den Plänen Wiebels über dem Maß gehalten.

verschluckten Meerwassers bei beiden Mühlen zusammen, wovon  $\frac{3}{5}$  auf die Klüfte im Bereich der älteren,  $\frac{2}{5}$  auf jene im Bereich der jüngeren entfallen.<sup>1)</sup> Diese Menge bleibt jahraus jahrein mit geringen Schwankungen wegen der Gezeiten gleich.<sup>2)</sup>

Bei der neueren Mühle wird noch eine Geschwindigkeit bei höherem Wasserstand in der Radrinne gemeldet, wenn der Querschnitt der Strömung von 4 Quadratfuß auf 6,6 Quadratfuß erhöht wird (Wiebel, S. 109). Es ergab sich dann eine Geschwindigkeit von nur 115 *cm*/sek. Die Abweichung der Durchflußmenge von 0,7 *cbm*/sek ist dabei so gering, daß sie innerhalb der Fehler dieser Messungsarten liegt.

§ 49. Hier ist aber nur wichtig, daß der Wasserstand in den Klüften des alten und des neuen Mühlganges gleich tief unter dem Meeresspiegel liegt, wenn die Schützen der Meeresschleusen geschlossen sind. Daraus hat man mit Recht auf einen Zusammenhang der Klüfte geschlossen (Wiebel, S. 127). Nach Partsch ist — 1,5 *m* auch der Wasserstand in den Klüften der Meeresschwinde an der östlichen Küste der Halbinsel, näher der Stadt, wo die Mulde „Vlicha“ sich erstreckt. Zu erwähnen ist ferner noch ein Bohrergebnis im nördlichen Teile der Stadt Argostoli, wobei man „anscheinend auf dasselbe Niveau“ stieß.

Auch in der Bohrung war nämlich das Wasser salzig und stieg „nicht über das Niveau von — 1,5 *m*“. Nun kommt es bei einer physikalischen Erklärung dieser Tatsachen hier auf jeden Dezimeter, ja auf jeden Zentimeter der Spiegelhöhen an. Und bei dem Abstand der Mühlen von der Stadt, 1,5 *km*, ist wenigstens eine unmittelbare Kommunikation der Klüfte nicht leicht annehmbar. Wenn daher die — 1,5 *m* ganz genauen Messungen entsprächen, und wirklich ein so ausgedehntes „unterirdisches Wasserniveau“, tiefer als der Meeresspiegel, bestünde, so würde das die Anwendung jeder der vorgeschlagenen physikalischen Erklärungen sehr erschweren, denn es würde niemand die erforderlichen Besonderheiten glauben. Aber 1. ist nicht zu vergessen, daß allein schon bezüglich der Tiefe der unterirdischen Spiegel, je nachdem wir den englischen oder den metrischen Maßangaben folgen, eine Unsicherheit von 13 *cm* besteht; 2. werden wir sehen, daß schon bei den Mühlen nach Schließung der Meeresschleusen das Kluftwasser noch kleine Spiegeländerungen bis etwa 10 *cm* erleidet und 3. hat eine Bohrung weiter südlich in der Stadt nach dem Gewährsmann von Partsch eine unterirdische Spiegelhöhe von — 2 *m* ergeben. Diese Umstände erwecken den Gedanken, daß mehrere Verschluckungssysteme, z. T. unter ähnlichen Bedingungen ohne gegenseitigen Zusammenhang in dem Gebiet vorhanden sind. Jedenfalls ist es mir erlaubt, gleich den Forschern an Ort und Stelle die gesammelte Aufmerksamkeit auf die Erscheinungen bei den Meermühlen selbst zu richten.

Da ist als nächstes festzustellen, daß das feinere Verhalten der Kluftwasserspiegel im Laufe des Tages, wie auch während des Jahres derartig widerspruchsvoll geschildert wird, daß die gemeldeten Beobachtungen nicht gleichzeitig zutreffen können. Sie allein würden schon verschiedene — auch im physikalischen Sinne verschiedene Theorien nötig machen, d. h. nicht nur verschiedene topographische Theorien über den Ort des Wiedererscheinens des verschwundenen Meerwassers.

<sup>1)</sup> Partsch's Umrechnung aus den englischen Maßen ergab genau 153770 *cbm* im Tag.

<sup>2)</sup> Auch ein für Argostoli verheerendes Erdbeben hat daran nichts geändert.

Eines ist den älteren Forschern Fouqué (1867) und Wiebel (1873) aber dauernd gelungen, nämlich der damals nicht einfache Nachweis, daß das Wasser der Meeresschwinden wieder zum Meere zurückkehren müsse. Das ist auf zwei Arten möglich, entweder durch unterseeische Quellen am Grunde des Meeres oder durch Quellen über dem Meeresspiegel, die natürlich dann auch salziges (brackiges) Wasser führen müssen. Unter beiden Annahmen mußten nun physikalische Möglichkeiten gefunden werden, zunächst für die einfache Tatsache, daß das Kluftwasser in Verbindung mit den Quellsträngen bei Absperrung der marinen Einströmung sich mehr als 1 *m* unter dem Meeresspiegel halten kann.

§ 50. Dienen unterseeische brackische Quellaustritte als Pforten für die Rückkehr des Meerwassers, so muß sich das ruhende Wasser der Klüfte über einer Strömung in der Tiefe befinden. Daher muß die zu erklärende Tatsache im Lichte der hydraulischen Druckhöhengesetze angesehen werden. Der Querschnitt der am Meeresgrunde austretenden Quellströmung unter den Klüften braucht nur an den entsprechenden Stellen genügend eingengt zu sein, so wird das Wasser in ihnen ohne Zufuhr von oben einen Standrohrspiegel einnehmen, der niedriger ist als der Meeresspiegel. Denn an der eingengten Stelle ist der Druck geringer als an der unterseeischen Mündung des Quellstranges. Selbst über dieser Mündung ist der Druck geringer als etwa der hydrostatische Druck des Meeres, denn das Wasser der unterseeischen Quelle ist Süßwasser oder Brackwasser (wenn die Meermühlen „gehen“) und beide sind im Jonischen Meere bei Kephallenia nach Wiebels Bestimmungen an verschiedenen Stellen stets leichter als das wärmere Seewasser. Der Salzgehalt hat dort mehr Einfluß als die Temperatur. Infolgedessen besteht von der unterseeischen Quellöffnung an ein Auftrieb und der Druck des bewegten Wassers ist, wie wir wissen, stets kleiner als der des ruhenden bei gleicher Tiefe. Dieses bewegte Wasser ist aber auch noch spezifisch leichter als die von ihm durchdrungene Salzflut. Daher ist die Druckhöhe auf einer am Meeresgrunde verborgenen Mündung kleiner, als es der Höhenlage des Meeresspiegels entspricht. Es könnte somit im Quellstrang unmittelbar innerhalb der unterseeischen Quellöffnung die Anbringung eines Standrohres darin einen Spiegel mit negativen Meereshöhen ergeben. Aber mit der Entfernung von der Mündung nach innen wachsen ja im allgemeinen die Höhen der Standrohrspiegel. Und die Schluckklüfte der Mühlgänge liegen schon 17 *m* von der Küste entfernt; wahrscheinlich noch viel weiter von der wirklichen Quelle am Meeresboden. Das erfordert für den Rest des Weges das Vorhandensein einer Widerstandshöhe, die noch nicht ganz von der Reibung verbraucht ist. Nun ist zwar unmittelbar nach Schließung der Schleusen des Meeres in den Klüften das eingeströmte Salzwasser vorhanden, dessen Druck größer ist als der Druck des von der unterseeischen Mündung aufsteigenden Brack- und Süßwassers. Aber der Unterschied der spezifischen Gewichte von wenigen Prozent kann nicht die Reibungshöhe für eine noch weitere, mindestens 17 *m* lange Druckströmung liefern. Außerdem ist festgestellt worden, daß nach achttägiger Sperre der Schleusen süßes Karstwasser bis zu 7 von 10 Teilen das Salzwasser in den Klüften ersetzte, wodurch aber der Kluftspiegel nur etwa 1 *dm* (wenige Zoll, Wiebel, S. 129 und passim) stieg. Es ist daher bei der gemachten Voraussetzung der unterseeischen Rückkehr des geschluckten Meeresswassers die Annahme einer entsprechenden Verengung des

Quellstranges das einzige Mittel, das uns die Bewegungslehre des Wassers bietet, um die beobachtete Depression der Kluftwasserstände auch in ziemlicher Entfernung vom Meere zu erklären (vgl. § 45). Wir wissen ja schon, unter welchen Umständen in Röhrenströmungen eine Strecke weit das Wasser von einem Ort niedrigeren zu einem Ort höheren Druckes fließt und zwar dauernd, so daß sich die Fließbewegung nicht umkehrt. Wir stehen also im Falle unterseeischen Wiederaustrittes des Wassers vor einem hydrodynamisch hervorgerufenen Kreislauf des Meereswassers. Wärme- und Dichteunterschiede haben höchstens auf seine Geschwindigkeit einen schwachen Einfluß. Wenn man den Ausdruck Saugen auf jene Fälle beschränkt, wo an der verengten Strecke der hydraulische Druck unter den äußeren Luftdruck sinkt, so

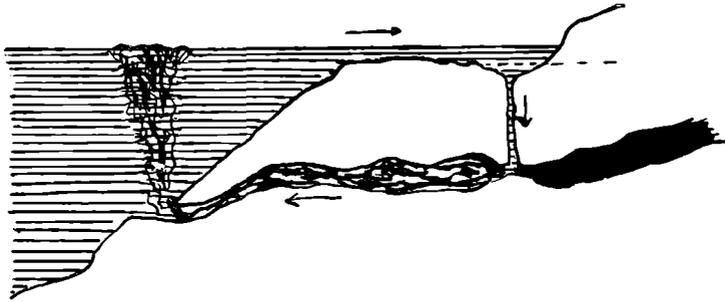


Abb. 30. Schema einer Meeresschwinde durch Verschluckung des Meerwassers an der Einschnürung eines Quellstranges. Bei Argostoli dürfte in diesem Falle der Wiederausfluß des geschluckten Meerwassers sehr viel weiter draußen in der See liegen.

liegt hier kein Saugen vor. Denn der Druck der Strömung ist hier größer als der äußere Luftdruck, und zwar vermehrt um den Druck einer Wassersäule, die bis 1,5 m unter den Meeresspiegel hinanreicht. Abb. 30 möge die Anwendung der vorgetragenen Theorie erläutern. Würde hingegen im Gegensatz zur Wirklichkeit nach Sperrung der Schleusen auch alles Kluftwasser in der Tiefe verschwinden, vom Luftdruck hinabgepreßt, und dann auch noch Luft einströmen — nur dann läge geographisch und mechanisch ein Saugen vor. Die Dichteunterschiede zwischen dem brackisch-süßen Quellantrieb in der See und der rein salzigen Einströmung bei offenen Schleusen fördern die Geschwindigkeit des von Meerwasser mitgemachten Kreislaufes und damit die durchströmenden Mengen. Hingegen haben sie hier die Bewegung nicht eingeleitet, wie sie das unter hydrostatischen Umständen in Röhren ohne merklichen Reibungsverlust tun könnten. Von den älteren Forschern hat M. Fouqué bereits die Annahme gemacht, daß bei Argostoli das geschluckte Meerwasser seinen Kreislauf submarin vollende, angeregt durch brackische Wasserantriebe im Livadibusen (Nr. 16, S. 479 ff.). Er leitete ihn aber ausschließlich von den Dichteunterschieden ab; dieser Versuch ist nach dem oben Gesagten theoretisch unzureichend. Die Gründe, die Fouqué veranlaßten, das Vorhandensein unterseeischer Quellen zu vermuten und die Brackwasserquellen obertags für die Erklärung beiseite zu lassen, können erst mit dem feineren Verhalten des Kluftwassers zusammen erwogen werden, wobei eben leider die unvereinbaren Beobachtungsberichte der verschiedenen Forscher eine Rolle zu spielen beginnen.

§ 51. Wiebel hat 1873 ebenfalls kurz die Annahme erwogen, daß das Meerwasser der Schwinden in unterseeischen Quellen zum Ozean zurückkehre.<sup>1)</sup> Doch behandelte er diese Annahme rein nur als hypothetischen Fall, denn ausführlich versuchte er zu beweisen, daß bei Argostoli die benachbarten oberirdischen Brackwasserquellen über dem Mittelwasser des Meeres, und zwar auf der Ostseite der Bucht das verschluckte Meerwasser ausspien. Seine bloß nebenbei gemachte Erwägung (Nr. 47, S. 146) des unterseeischen Wiederausflusses beruft sich etwas unbestimmt auf die Möglichkeit, daß die Druckhöhe in Standröhren niedriger sein könnte als über der Ausflußstelle des zugehörigen Rohres. Zur näheren Erläuterung verweist er auf sein Kapitel III (S. 141f.), wo er aber eine höchst merkwürdige Auffassung verrät. Die Stelle lautet a. a. O., S. 142: „Denkt man sich das Rohr (mit Ausfluß unter Wasser *L.*) so tief unter Wasser gesenkt, daß der Stand eines Piézometers (Standröhrchen zum Druckmessen, *L.*) unter den äußeren Spiegel zu liegen kommt — und dann an einer Stelle der Röhre zwischen dem äußeren und inneren Stand der Flüssigkeit eine Öffnung gebohrt, so wird Wasser in das Piézometer strömen und durch die Störung des Gleichgewichtszustandes einen Kreislauf herbeiführen.“ Wiebel hat sich hier etwas Unmögliches vorgestellt. Wenn man durch Senken eines Rohres, welches die Strömung entläßt, erzwungen hat, daß ein Standrohrspiegel tiefer als der im Gefäß liegt, wohin das Wasser zuerst strömte, so kehrt sich die Strömung natürlich um und fließt bei der früheren Ausflußstelle einwärts anstatt daß ein Kreislauf entsteht. Wo nach § 45 wirklich ein Kreislauf möglich ist, braucht das Verbindungsrohr übrigens gar nicht zwischen dem äußeren und inneren Stand der Flüssigkeit angebracht zu werden.

Diese Darlegungen Wiebels rücken auch seine Zeichnung auf S. 146 in ein bedenkliches Licht. Sie gleicht weitgehend der Abb. 30 in § 50, sieht aber keine Verengung an der saugenden Stelle vor. Auch im Text ist nicht erläutert, daß man sich den saugenden Strang als eine Einschnürung von längerer Erstreckung vorzustellen habe. Nach den vorher gebrachten Mitteilungen ist es mir nicht möglich, in diesem Mangel bloß ein Versehen anzunehmen. Vielmehr ist die Zeichnung Wiebels in wesentlicher Beziehung fehlerhaft.<sup>2)</sup>

§ 52. Nun sei die andere topographische Annahme erwogen, daß das Wasser der Meeresschwinden in den obertägigen Brackwasserquellen zutage trete, die in größerer Zahl an der Ostseite der Bucht von Argostoli hervorbrechen (vgl. Abb. 28). Solche Brackwasserquellen reichern sich besonders südöstlich der Meermühlen am jenseitigen Strande der Bucht an. Abb. 31 erläutere den durch Herrn Professor Scherrers Versuch belegten physikalischen Vorgang in Anpassung an die örtlichen

<sup>1)</sup> Die ältere Arbeit Fouqués ist, wie Partsch sagt, Wiebels Aufmerksamkeit entgangen.

<sup>2)</sup> Gerade der Mangel dieser Zeichnung, den man unter günstigeren Umständen als Versehen deuten könnte, ist nun in Günthers Geophysik (II, S. 510) sogar unter Beihilfe des Sohnes von Wiebel, ferner in v. Knebels Höhlenkunde übergegangen, wo er sich dann in spätere kompulatorische Darlegungen vererbte. Es genügt eben nicht, in einer Zeichnung „S“ hinzuzuschreiben, damit an der betreffenden Stelle gesaugt oder geschluckt werde. Für den Fall unterseeischer Quellen kann Wiebel nicht als Urheber einer Erklärung gelten, sondern höchstens als ziemlich ahnungsloser Anhänger einer hydrodynamischen Deutung.

Verhältnisse, der imstande ist, eine so lange Zwischenleitung aufrecht zu erhalten und ein ruhendes Kluftwasserniveau unter dem Meeresspiegel zu ermöglichen, sobald die Meeresschleusen abgesperrt worden sind. Von den Strängen der Brackwasserquellen kann tatsächlich eine echte Saugwirkung ausgehen. Dies hat auch Wiebel bedacht. Sie hebt an bei dem östlichen oder südöstlichen Ende eines langen U-förmigen Siphons, der unter der Bucht von Argostoli hinüberführt. Auf dem nordwestlichen Schenkel und seinen Verzweigungen bei den Meeresschwinden liegt ein Atmosphärendruck, auf den rechten wirkt ein geringerer an der Verengung des

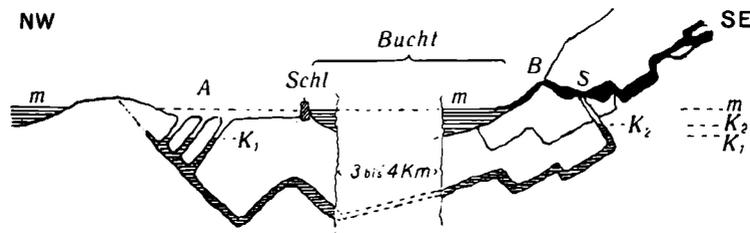


Abb. 31. Schematischer Querschnitt durch eine denkbare Verbindung der Meeresschwinden A bei Argostoli und einer auf der anderen Seite der Bucht bei S saugenden Wasserader. Der Querschnitt gilt für die Zeit, während der Zufluß des Meeres durch die Schleuse *Schl.* gesperrt ist.  $K_1$  ist der Kluftwasserspiegel bei den ruhenden Mühlen,  $K_2$  der Spiegel der abgerissenen Strömung unter der Saugstelle.  $m - m$ : Meeresniveau. B wirkt als Brackwasserspiegel, solange die zugehörige Wasserader Meerwasser ansaugen kann.

Brackwasserstranges. Das Saugen setzt voraus, daß die Summe von Atmosphärendruck und dem Wasserdruck auf der Seite der Mühlen größer sei als die Summe des Gegendruckes des Wassers und des geringen hydraulischen Druckes auf der anderen Seite. Beim Saugen kann jenseits der Bucht das Wasser nach Abb. 19 über den Meeresspiegel gehoben werden, der dem Spiegel des weiten Gefäßes entspricht. In Abb. 31 ist eine starke Verengung des Quellstranges angedeutet, daß die Saugwirkung jedenfalls eintritt.

Fehlt es an der nötigen Zufuhr von den Meeresschwinden her, so muß nach § 47 die Strömung an der Saugstelle abreißen und ein langer Wasserrest in der U-Röhre unter der Bucht von Argostoli zurückbleiben. Wenn dieser Rest nach Sperrung der Schleusen nirgends mehr mit dem Meere in Verbindung steht, ist sein Spiegel auch unabhängig davon und kann in den Klüften ruhig tiefer stagnieren als das Meeresniveau. Der Spiegel im anderen Schenkel der U-förmigen Verbindung unter den Brackwassersträngen wird gemäß § 47 nach dem Abreißen der Strömung höher stehen, also weniger tief unter dem Meeresspiegel oder sogar über seinem Niveau liegen, je nach dem Unterdruck in der Luftschnittung unter der Abreißstelle und je nach der Höhenlage der brackischen Quellströmung (vgl. Abb. 31).

Eine Unterbrechung der Saugwirkung nach Sperrung der Schleusen nahm auch Wiebel an (S. 144), doch leitet er den Vorgang ganz anders ab. Er weist nämlich auf die Funktion einer Nagelschen Wasserpumpe hin, mit der man einen Teich entleeren kann. Wenn hiebei dessen Wasserinhalt genügend gesunken ist, ohne daß

man mit dem eingetauchten Schlauche oder Rohre nachrückt, so reißt schließlich die angesogene Strömung ab und der tiefer gelegte Spiegel bleibt in Ruhe. Überrascht fragt man sich beim Lesen dieser Ausführungen, ob Wiebel sie wirklich auf die Verhältnisse von Argostoli anwenden will. Wir werden sehen, daß daran nicht zu zweifeln ist.

§ 53. Da Wiebel die Möglichkeit kannte, daß auch eine unterseeische Quelle das Wasser der Meeresschwinden wieder zurückführen könnte, war es ihm um den Beweis zu tun, daß in Wirklichkeit die Brackwasserquellen diese Rolle spielen. Er erkannte auch, daß besonders die Eigenheiten im feineren Verhalten der nur ungefähr ruhenden Kluftwasserstände für die schließliche Entscheidung den Ausschlag geben. Betrachten wir diese Eigenheiten näher, und zwar nach seinem Bericht.

1. „Wird die Schütze der Meeresschleuse geschlossen, wenn das Wasser in der Rinne etwa 2 Fuß hoch gestiegen war,<sup>1)</sup> so bemerkt man ein allmählich langsames Versiegen in den Klüften, bis es den niedrigsten Stand erreicht hat.<sup>2)</sup> Es (das Wasser, *L.*) erhebt sich dann wieder um einige Zoll (etwa 1 *dm*, *L.*) und zeigt kleine Schwankungen im Steigen und im Fallen.“ Die Zeit und Dauer dieses Vorganges wird leider von niemandem angegeben. Betrachten wir zuerst das langsame Sinken des Spiegels. Es ist nun so, wie es beschrieben wird, mit dem Wiederaustritt in submarinen Quellen ohne Hilfsannahmen vereinbar. Denn das Meerwasser aus den Klüften, die ja Standrohren entsprechen, muß, solange sein Überdruck herrscht, hinabfließen, bis er aufgebraucht ist. Wiebels Theorie hingegen kommt vor dem schlichten Vorgang der verzögerten Spiegelsenkung gar nicht einfach davon. Denn sie muß dabei folgenden Umständen Rechnung tragen. Wie Wiebel gemessen hat, liefern die Brackwasserspeier auf der Ostseite der Bucht zusammen nur  $\frac{4}{7}$  soviel Salzwasser, als bei den Mühlen verschwindet, andererseits meldet er nirgends, daß bei Abschließung des Meeres von den Mühlgängen die Brackwasserquellen geschwächt hervortreten. Er schweigt über diese naheliegende Vermutung und hat sie anscheinend nicht überprüft. Im übrigen vertritt er die Ansicht, daß bei gesperrten Schleusen in der Nachbarschaft Meerwasser versickere, das weiterhin zur Speisung der Brackwasserquellen beitrage (S. 145f.). Somit ist Wiebels Erklärung für das verlangsamte Sinken des Kluftspiegels bei den Meermühlen auf das Zusammenwirken mehrerer saugender Stränge unter den Brackwasserquellen angewiesen, die auch saugen, wenn das Kluftwasser bei den Mühlen schon stille steht; das Saugen wäre dabei also im Gleichgewicht mit einer anderweitigen hypothetischen Zusickerung.

Das verzögerte Sinken der Spiegel in den sich selbst überlassenen Klüften bei den Mühlen soll nun damit zusammenhängen, daß die verschiedenen saugenden Stränge unter den Röhren der Brackwasserquellen ihre Tätigkeit nacheinander einstellen. Daraus würde sich aber ein ruckweise verlangsamtes Sinken des Kluftwassers bei den Mühlen ergeben, bis die letzte angesogene Wasserverbindung abreißt. Dergleichen ist nun freilich nicht beobachtet worden. Wiebel will die Entscheidung künftiger Forschung überlassen.

<sup>1)</sup> Dann sind alle oberen Kluftmündungen gleichmäßig unter Wasser gesetzt.

<sup>2)</sup> Wiebel, S. 128.

§ 54. Was nun das Wiederansteigen des Wasserspiegels der Klüfte um einige Zoll zur endgültigen Höhe betrifft, so kann man dies ohne Hilfsannahme erklären, wenn die unterirdischen Stränge bei den Mühlen den Ausgang zum Meeresboden finden. Denn die Zusickerung von Süßwasser in die Klüfte, welche bis zur Schleusen-sperre reines Meerwasser geschluckt haben, ist durch mehrfache Beobachtungen sichergestellt. Dieser Süßwasserzutritt, der bei der einen Mühle geradezu als Quelle angesprochen wird, macht sich in der feuchteren Jahreszeit auch chemisch stark bemerkbar, was Wiebel selbst festgestellt hat (S. 129). Somit wird das schwerere Meerwasser in den als Standröhren aufgefaßten Schluckklüften bei den Mühlen durch leichteres Wasser mit viel weniger Salz ersetzt. Das aber muß zu einer Erhöhung der in den Klüften vorhandenen Wassersäulen führen, welche dem hydraulischen Druck der Strömung in der Tiefe das Gleichgewicht halten.

Wiebel erklärt jedoch den langsamen Spiegelanstieg in den Klüften bis zum schließlichen Stillstand auf sehr verwickelte Art und kommt dabei ohne eine unbewiesene Hilfsannahme nicht aus. Diese besteht in einer maßgebenden Zusickerung von Meerwasser, auch nach Schluß der Schütze an der Schleuse. Diese Zusickerung hebe den unterirdischen Wasserstand neuerlich so weit, daß auf der Ostseite der Bucht wieder eine Saugwirkung eintrete, die sich mit der Zufuhr ins Gleichgewicht stelle, worauf dann die etwas gehobene Spiegellage zur Ruhe kommt. Wiebel ist genötigt, diese Hypothese an seine Auffassung von der vorangegangenen Unterbrechung der Saugwirkung anzuschließen und geht dazu wie folgt vor (S. 144f.). Er verweist darauf, daß beim Pumpen aus einem Teiche der angesogene Strahl nicht gleich reiße, wenn der Spiegel schon tiefer gesunken sei als das untere Ende des Rohres, das die angesogene Wassermenge emporleitet. Vielmehr steigt dabei zunächst noch ein Wasserstrahl ein Stück weit frei durch die Luft zum Rohre, ehe er abreißt. Man sieht, es handelt sich hier um eine bis ins einzelne ausgebaute Übertragung der Erfahrungen beim Teichaspumpen. Der Spiegel des Teiches muß sich dann aber erst wieder etwas heben, bevor das Saugen wieder anfangen kann.

Diese Spiegelhebung besorge nun zusickerndes Meerwasser. Mit solchen, der Sache nicht entsprechenden Vorstellungen, deren Fehlerhaftigkeit durch die Zeichnung Wiebels auf S. 144 noch unterstrichen wird, gelingt es ihm natürlich nicht, wahrscheinlich zu machen, daß ein heftiger Saugvorgang, der 1736 l/sek verschlucktes Meerwasser in 3 bis 4 km Entfernung emporgerissen hat, sich hier in aller Stille in einen anderen verwandelt, der nur mit Sickerwasser gespeist wird. Auf dem von Wiebel angegebenen Wege findet das überhaupt nicht statt und auf dem Wege, den das Experiment (§ 47) angibt, ist dies höchst und äußerst unwahrscheinlich, wenn die einfachen Bedingungen des beschriebenen Versuches durch eine Mehrzahl von ungleichzeitig tätigen Saugstellen verwickelt werden. Das Nachsinken und Wiederansteigen des Wasserspiegels der Klüfte verhält sich, soweit es betrachtet wurde, so, daß auch der physikalische Ersatz von Wiebels Erklärungsversuch durch Abb. 26, bzw. Abb. 31 uns nur einen möglichen Vorgang aufzeigt, der aber nach den Beobachtungen bei Argostoli nicht verwirklicht sein muß und schwerlich verwirklicht ist. Denn den topographischen Grundgedanken Wiebels hat dieser Ersatz seiner Theorie ja beibehalten: die denkbare Saugwirkung der Brackwasserspeier.

§ 55. Es gibt aber noch eine dritte Eigenheit im Verhalten des Kluftwasserspiegels bei den Mühlen. Dieser macht nämlich, wenn der Zustrom von der See gesperrt ist, die Bewegungen und Änderungen des Meeresspiegels durch die Gezeiten oder bei Antrieb und Anstau durch den Wind mit, ohne seine negativen Höhen zu verlieren. Soweit stimmen die Beobachtungen überein, aber nun beginnt der große Widerspruch: Fouqué sagt (Nr. 14, S. 480): „les marées qui font varier le niveau de la mer d'environ 8 centimètres, deux fois par jour, sur la côte de Céphalonie, amènent une variation égale et simultanée dans le niveau de l'eau des bouches d'engouffrement.“ (Die Hervorhebungen sind von mir.) Und ferner: „lorsque le vent du sud élève le niveau de la mer dans l'intérieur du golfe, ou au contraire, lorsque le vent du nord y amène une depression sensible, les mêmes changements s'observent aussitôt dans la hauteur du niveau de l'eau à l'entrée des bouches.“ Wenn das nur einigermaßen stimmt, so kann das Meerwasser unter der Schwinde nur den von Fouqué vermuteten Weg nehmen. Nun erfahren wir durch Wiebel<sup>1)</sup> von Messungen des Mühlenbesitzers Migliaressi mit zwei Pegeln, daß das zur Ruhe des Spiegels gekommene Kluftwasser die Schwankungen des Meeresspiegels mit  $1\frac{1}{2}$  Stunden Verspätung und mit geringerer Amplitude mitmache (3 engl. Zoll statt  $4\frac{1}{2}$ ). „Diese Versuche wurden 10mal wiederholt und die Beobachtungen nicht nur während des Tages, sondern auch zweimal während der Nacht fortgesetzt.“ Angesichts so verschiedener Angaben kann erst die künftige Forschung eine Entscheidung bringen. Die Angaben Migliaressi beziehen sich offenbar auf die Gezeiten und nicht auf Windeinflüsse. Migliaressi meldete ferner, daß während eines erheblichen Bruchteiles einer Stunde der Meeresspiegel bereits  $\frac{1}{2}$  Zoll steigt, während der verspätet folgende Spiegel in den Klüften noch  $\frac{1}{2}$  Zoll sinkt. Um Migliaressis Ablesungen in seine Theorie aufzunehmen, sucht Wiebel diese wenn auch verspätete Befolgung des Ganges der Gezeiten usw. in den Klüften wieder mit der Hilfshypothese des zusickernden Meereswassers zu deuten, das allmählich dazu komme, den anfänglichen Einfluß des Süßwasserzutrittes zu überwiegen (S. 145f.). Auch im Falle, daß ein solcher Vorgang erwiesen wäre, kann man darin keine Erklärung erblicken. Denn der Zutritt des Süßwassers an sich äußert sich doch ebenfalls durch ein Steigen der Kluftspiegel. Bei der Nähe des Meeres und bei dem Umstand, daß die Klüfte abseits der Mühlen, falls sie Sickerwasser aus dem Meere führen, dies doch schon zur Zeit des Ganges der Mühlen tun, bleibt sowohl die Verspätung von  $1\frac{1}{2}$  Stunden als dann auch die Abschwächung der Amplitude völlig unaufgeklärt, ja sie steht dem Deutungsversuch Wiebels nur im Wege. Denn diese gefüllten Sickerwasserbahnen stellen Leitungen dar, in denen sich Druckunterschiede viel rascher geltend machen.

§ 56. Im Zusammenhang mit dem Bericht Wiebels über die Messungen Migliaressis kann man sich fragen, wie es mit der Meinung Fouqués bezüglich des weiteren Weges des verschwundenen Meereswassers stünde, wenn dessen eigene Darstellung der Gezeitenfolgen fehlerhaft wäre und die Beobachtungen Migliaressis gelten müßten. In diesem ersten und einzigen Falle braucht die Annahme des unterseeischen Wiederausflusses ebenfalls eine Hilfshypothese, die übrigens den Vorzug

<sup>1)</sup> A. a. O., S. 128.

hat, bei künftigen Forschungen überprüfbar zu sein. Als Hilfhypothese kommt nämlich in Betracht, daß die unterseeischen Quellen an Stellen auftreten, die eine andere Hafenzzeit haben als das Meer bei den Mühlen. Allerdings ist eine Phasenverschiebung der Gezeiten um  $1\frac{1}{2}$  Stunden etwas viel. Die eigenartige Anordnung und Gestalt des Livadibusens und der Bucht von Argostoli könnten wohl manche Verspätung des Gezeitenumlaufes erklären. Darnach würden die unterseeischen Quellen irgendwo liegen, wo Ebbe und Flut  $1\frac{1}{2}$  Stunden später stattfinden als in der Nachbarschaft der Standrohrklüfte, deren Wasserinhalt den späteren Gang mitmacht. Die Schwingungsweite der Klüftespiegel ist nur 3 Zoll statt  $4\frac{1}{2}$ . Wieviel davon auf die Gesetze der Reibungsverluste in Röhren und Dichteunterschiede kommt, wieviel auf den Umstand, daß die unterseeische Quelle vielleicht in einem Meeresteil mit geringerem Ausschlag der Gezeiten hervortritt, wäre besonderer Beobachtungen würdig.<sup>1)</sup> Immer noch erklärt diese Hilfhypothese, mit der man die Ansicht Fouqués stützen kann, die Verspätung der Spiegelschwankungen usw. besser als Wiebels Sickerwassertheorie.

Ferner berichtet Fouqué<sup>2)</sup>, daß im Winter und vor allem in den regenreichen Jahren der Klufthwasserspiegel sich erniedrige. Dies müsse auch so sein, weil dann die submarine Quelle mehr süßes, also (im Jonischen Meer) leichteres Gemisch emporsteigen lasse, dem in den Klüften eine niedrigere Salzwassersäule das Gleichgewicht halten kann. Man benütze diesen Tiefstand, um die Klüfte zu reinigen. Es scheint, daß nicht Messungen, sondern vielmehr die Tatsache, daß man im Winter, wenn die Mühlen ruhen, die Klüfte reinigt, Fouqué zur Theorie eines Tiefstandes brachte. Sie ist ganz im Banne seiner hydrostatischen Grundansicht. Denn in Wahrheit kommt es bei einer Reinigung von Tang und Einschwemmungen gar nicht auf einige Zentimeter Unterschiede der Spiegelhöhen an. Mehr werden es aber kaum sein, sonst könnte nicht so viel von einer sozusagen dauernden Depression des ruhigen Klufthwassers von etwa  $1\frac{1}{2}$  m gesprochen werden. Träfe aber der Tiefstand in den Klüften bei regenreichen Zeiten zu, so wäre er ein schwerer Schlag gegen den von Fouqué vermuteten Weg des verschwundenen Wassers, ohne aber zugleich der Wiebelschen Auffassung Nutzen zu bringen. Dem hier hydrostatisch nur an Dichteunterschiede denkenden Fouqué blieb so die Erkenntnis verschlossen, daß die vermehrten winterlichen Niederschläge alle Wasserspiegel steigen lassen müssen, denn mit dem allgemeinen Druck lassen die Regen Geschwindigkeiten und Reibungsverluste größer werden, doch so, daß immer noch eine vermehrte Geschwindigkeit herauskommt. Glücklicherweise hat uns noch Wiebel die Beobachtungstatsache hinterlassen (S. 128f.), daß die Verschlückung des Meeres nach vielem Regen schwächer wird, während gleichzeitig das Wasser in den Brunnen der Stadt steigt und die Quellen reichlicher fließen. Die Herabsetzung der Verschlückung ist natürlich die Folge der höheren Lage der Ruhespiegel in den Klüften, denn dann kann das herzugeleitete Meerwasser an den Verschlückungsstellen auch

<sup>1)</sup> Ob der von Fouqué vermutete Ort der unterseeischen Quelle am Grunde des nördlichen Livadibusens bei Samoli die um  $1\frac{1}{2}$  Stunden verschiedenen Gezeitenstände und andere Hubhöhe hat, muß nun dahingestellt bleiben.

<sup>2)</sup> (Nr. 14, S. 481). Es betrifft dies die vierte Eigenart im feineren Verhalten der Klufthwasserspiegel.

nur einen beschränkten Überdruck entfalten. Diese Mitteilungen Wiebels, für seine eigenen Auffassungen ohne Bedeutung, zerstören Fouqué's hydrostatische Theorie völlig, stärken aber ungemein dessen Annahme unterseeischer Wiederaustritte des Wassers der Meeresschwinden.

§ 57. Zusammenfassend kann man sagen: Im topographischen Sinne stehen für die Salzwasserverschluckung an den Meermühlen von Argostoli einander gegenüber die Hypothese des Rückflusses in submarinen brackischen Quellen von Fouqué und die Hypothese oberirdischen Rückflusses in Brackwasserspeiern nach Wiebel. Fouqué hat zu seiner Hypothese physikalisch eine im Grunde statische Theorie gemacht, die mit bloßen Dichteunterschieden arbeitet; man kann sie als statische Verschluckungstheorie bezeichnen. Wiebel hat zu seiner Hypothese eine dynamische Saugtheorie zu machen versucht. Die Prüfung an den Einzelercheinungen hat ergeben, daß physikalisch Fouqué's Theorie durch eine dynamische Verschluckungstheorie zu ersetzen war und daß von der versuchten physikalischen Deutung Wiebels nur die theoretische Möglichkeit des Saugens, aber sonst nichts Haltbares übriggeblieben ist. Es wurde nun anstelle des mißlungenen Erklärungsversuches von Wiebel, die Zuleitung zu den oberirdischen Brackwasserquellen dynamisch zu definieren, eine wirkliche Theorie hierfür aufgestellt, gestützt auf das mir von H. Prof. Scherrer gezeigte Experiment. Aber die feineren Beobachtungen, denen Wiebel seine Auffassung vergeblich anzupassen versuchte, verhindern derzeit auch die örtliche Anwendung der ausgebauten theoretisch einwandfreien Erklärung. Nun besteht aber die Tatsache, daß in bezug auf die Gezeiteneinflüsse ein unaufgeklärter Widerspruch zwischen den Beobachtungsangaben Wiebels und Migliareisis einerseits und jenen Fouqué's andererseits klafft. Das zeigt uns die Notwendigkeit ergänzender Studien an Ort und Stelle. Also abgesehen davon, daß Wiebel und Fouqué unannehmbare physikalische Erklärungen geliefert haben, ist derzeit weder der submarine Wiederausfluß des Meerwassers noch jener in oberirdischen Brackwasserspeiern, sei es abgetan, sei es bewiesen. Die bisher einhellig anerkannten Beobachtungen — und das ist doch die Mehrheit — fallen zugunsten des unterseeischen Wiederausflusses ins Gewicht. Jeder Versuch, die oberirdischen Brackwasserquellen mit den Meermühlen von Argostoli in Zusammenhang zu bringen, wird auch bei einwandfreier physikalischer Begründung mit zwei Schwierigkeiten zu ringen haben, 1. mit der Tatsache, daß die Brackwasserquellen an der Ostseite der Bucht nur einen Teil des verschluckten Salzgehaltes führen, obgleich man so viele saugende Stellen braucht. 2. Bestehen Brackwasserquellen auch in der Stadt Argostoli selbst in der Nähe von ruhenden Kluftwasserspiegeln in Tiefen von  $1\frac{1}{2}$  und 2 m unter dem Meeresspiegel. Die erste Tatsache hat schon Partsch veranlaßt, die Annahme der unterseeischen Quellen zu bevorzugen. Die Kenntnis der zweiten Tatsache verdankt man erst Partsch, wenn er auch sich aller Theorien physikalischer Art in seiner Landeskunde enthalten hat. Die Lehre A. Grunds ist eigentlich schon durch diese Mitteilungen aus Argostoli unmöglich gemacht worden. Was die theoretischen Erklärungen betrifft, so hat Fouqué innerhalb seines einseitig hydrostatischen und darum abgelehnten Standpunktes richtige Schlüsse gezogen. Hingegen sind die Schlußfolgerungen Wiebels zwar hydrodynamisch gemeint, aber mehrfach falsch, sowohl, wo er nebenbei den unter-

seischen Wiederausfluß erwägt, als auch in seinem eigenen ausgeführten Erklärungsversuch. Wiebel zitiert von Weisbach nur die kleine „Experimental-Hydraulik“ von 1855, hat aber 1873 noch nicht die ebenfalls schon 1855 erschienenen, heute noch geltenden Einsichten in Weisbachs Theoretischer Mechanik beachtet und erfaßt, wo sie ihn angegangen hätten.

Es genügt, die Darlegungen Wiebels neben der ersten Auflage von Weisbachs Theoretischer Mechanik zu studieren, um zu erkennen, daß mein Urteil durchaus nicht zu scharf ist.

v. Knebel freilich hat in seiner Höhlenkunde S. 110 geschrieben:<sup>1)</sup> „Die wiederholt von Martel ausgesprochene Behauptung, daß das Phänomen der Meeresswinden bisher unerklärt sei, beruht also auf Irrtum.“ v. Knebel weist dabei auf Wiebels Erklärung hin. Die Meinung Martels dürfte weniger auf einem Irrtum als auf gewissenhafter Einsicht in die Grundlagen unserer Kenntnis von den Meeressmühlen beruhen. Es ist unvorstellbar, daß v. Knebel den von ihm zitierten Fouqué gelesen habe. Es ist sogar schwer vorstellbar, wie er nach dem von ihm zitierten Partsch zu seiner Darstellung der Sache kommen konnte. Zu bemerken wäre nur, daß v. Knebel bezüglich der geologischen Entstehung derartiger Erscheinungen durch Krustenbewegungen sich anregende und originelle Gedanken gemacht hat. Sie können in diesem Buche nicht behandelt werden.

Ob eine der durch Abb. 30 und 31 erläuterten physikalischen Möglichkeiten bei den Meermühlen von Argostoli verwirklicht ist, möchte ich trotz meiner Gründe zugunsten unterseeischer Brackwasserquellen hier nicht entscheiden. Und so haben jene Abbildungen nur ganz allgemeine Bedeutung und sind vielleicht erst bei Betrachtung der Meeresswinden von anderen Küsten ohneweiters brauchbar.

### C. Die Entwässerung der geschlossenen Karstpoljen, theoretisch betrachtet.

**§ 58.** Unter dem Namen Polje (= Feld) werden gewisse Wannen im Karst zusammengefaßt, welche von sehr ungleicher Größe und verschiedener morphologischer Anlage sein können. Diese Wannen sind ringsum geschlossen, in selteneren Fällen durch ein enges Durchbruchstal geöffnet. Als Hohlformen gehören die Poljen zu einer höheren Größenordnung als die Dolinen, die außerdem einen viel runderen Grundriß haben.<sup>2)</sup> Kleine Poljen, etwa unter 2 *qkm* groß, empfangen Wasser öfter nur unmittelbar durch die Niederschläge. Die größeren und großen Poljen empfangen außerdem Karstquellen und, wenn sie nahe undurchlässigen Gesteinen liegen, auch Regenbäche und Flüsse aus diesen. Die Karstquellen haben auch in den Poljen eine äußerst schwankende Wasserführung, die bei vielen zeitweilig ganz aussetzt. Das gilt auch von den Gewässern, die von solchen Quellen ausgehen. In den rings geschlossenen Poljen verschwinden alle Wasserläufe in Schluckschlünden, auch Wasserschlinger oder „Ponore“ genannt. Das geschieht spätestens, wenn sie

<sup>1)</sup> Wahrscheinlich meint v. Knebel Stellen wie z. B. in Les Abîmes, S. 523 „... et cet étrange phénomène est encore mystérieux, malgré des diverses théories dont il à été l'objet“. Das ist ein strengeres Urteil als das meine.

<sup>2)</sup> Nur die größten Dolinen von etwa 1 bis 2 *qkm* Fläche haben schon die Größenordnung kleinster Poljen.

den Fuß des Gehänges erreicht haben, das der Seite der Quellen gegenüberliegt. Die Gegenüberstellung einer Zu- und Abflußseite ist bei allen bekannten größeren Poljen möglich. In manchen Poljen gibt es auch Seen, ständige oder zeitweilige, die als Überschwemmungen, Überflutungen oder Inundationen bezeichnet werden. Da bei den Ponoren gewöhnlich die tiefsten Flächen der Poljensohle liegen, ist deren Umkreis auch das Gebiet, wo die Überflutungen am längsten dauern. Wo solche Überschwemmungen sich durch Wochen oder auch Monate ausbreiten oder schrumpfen, erweist sich ein Teil der Öffnungen in der Poljensohle als Wechselschlünde, deren Name darauf hinweist, daß sie zeitweilig Wasser aufnehmen, zeitweilig hervorquellen lassen. Das berühmte, 380 *qkm* große Polje von Livno wird im Abschnitt III vorgeführt.

Demgemäß sind die geschlossenen Poljen über einer gewissen Größe der Ort einer oft sehr verwickelten Ausprägung der Karsthydrographie, indem sie die unterirdisch verlaufende Entwässerung ihres Karstgebietes unterbrechen. Diese Unterbrechung ist entweder vollständig oder nur teilweise. Die beiden Fälle veranschaulicht Abb. 32 durch schematische Beispiele. Eine Überschwemmung der Poljen tritt ein, wenn die Quellen und noch dazu vorhandene Wechselschlünde mehr Wasser an den Tag führen, als die Ponore gleichzeitig abfließen lassen. Dann ist zwischen Zu- und Abfluß kein Gleichgewicht vorhanden. Der theoretische Grenzfall dieses Zustandes besteht darin, daß überhaupt nur Zuflüsse auftreten, und sich mit den Quellen lauter Wechselschlünde verbünden. Ein solcher Fall ist noch bei keinem Polje durch Beobachtung erwiesen worden. Er tritt z. B. in Brunnen auf, deren Spiegel durch Auspumpen genügend rasch gesenkt wird. Dann liefern eine Zeitlang alle Poren Wasser und keine führt solches weg. Das Auspumpen ist aber ein künstlicher Eingriff, nach dem man natürliche Verhältnisse nicht beurteilen darf. In einem sich selbst überlassenen Brunnen mit ruhigem Spiegel, der in einem Grundwasserstrom liegt,<sup>1)</sup> wird ebensoviele Wasser zugeführt wie weggeführt. Steigt oder sinkt sein Spiegel, so zeigt das eine Störung dieses Gleichgewichtsverhältnisses an. Je nachdem können also die einen Poren nicht soviel Wasser schlucken, als die anderen liefern oder umgekehrt.<sup>2)</sup> Soweit besteht zwischen den wechselnden Wasserständen in

<sup>1)</sup> Von Brunnen, die in eine isolierte ruhende und demgemäß bald erschöpfte Grundwasseransammlung reichen, ist hier abgesehen, wenn es dergleichen überhaupt gibt. Das hat keinen Bezug auf die Verhältnisse der Karstpoljen.

<sup>2)</sup> A. Grund hat dies verkannt: Er schrieb (Nr. 20, S. 181) „Wenn daher auch der Seespiegel der Jamen (kleiner Karstseen bei Imotski) schwankt, so können sie doch nie trocken gelegt werden, weil das Karstwasser und infolgedessen der Seespiegel nie bis zum Seeboden sinkt. Hier von einem Mißverhältnis von Zufuhr und Abfuhr des Wassers, welches die Inundierung bewirken soll, zu sprechen, ist ebenso unzulässig, als wenn man diese Ausdrucksweise bei einem Brunnen anwenden würde, der in den Grundwasserstrom eines Schotterfeldes getrieben ist.“ Wer jenes „Mißverhältnis“ nicht seelisch auffaßt, sondern als Ungleichung zwischen Zu- und Abfluß bei Spiegelhebung oder -senkung, für den besteht im Gegenteil volle Berechtigung, auch bei einem Brunnen im Schotterfeld jene Ausdrucksweise zu verwenden, denn Z kann größer sein als A. Nur dann steigt ein Spiegel oder tritt unter Umständen Inundation ein, wo früher keine war. Auch wenn der Abfluß in einem Brunnen künstlich auf Null gebracht wird, ist  $Z > A$  und wenn der Brunnen sich wieder auffüllt, tut er es infolge eines mathematischen „Mißverhältnisses“. Die Argumentation von A. Grund ist nicht mathematisch-naturwissenschaftlich, sondern bloß sophistisch im üblichen Wortsinne.

überschwemmten Karstpoljen und denen eines sich selbst überlassenen Brunnens kein Unterschied. Weil aber in einem Polje alle Öffnungen für zu- oder abfließendes Wasser viel spärlicher verteilt sind als diejenigen einer Brunnenwandung, außerdem aber auch an Größe des Querschnittes viel verschiedener sind, können die hydrographischen Vorgänge in einem Polje von sozusagen unerschöpflicher Mannigfaltigkeit sein. Und selbst wo Überschwemmungen alle Feinheiten verhüllen, gibt es gerade bei den Ponoren verschiedene Bewegungsverhältnisse. Es ist z. B. möglich, daß ein Ponor um so mehr schluckt, je höher die Überschwemmung steigt, es ist ebenso möglich, daß ein anderer dann umso weniger schluckt. Beobachtet wurde bisher nur der erste Fall.<sup>1)</sup> Die Möglichkeit des zweiten ist bisher nur theoretisch gegeben.

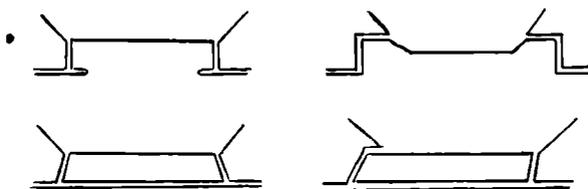


Abb. 32. Querschnitt durch Wannen, die in den zwei Fällen oben eine völlige Unterbrechung der Röhrenströmungen bedeuten, so daß in ihnen oberirdischer Abfluß eintreten muß, solange Wasser von einer Seite herangebracht wird. Unten: Wannen, deren Untergrund ohne Unterbrechung in Röhren durchströmt werden kann, ohne daß ein Teil des Wassers unbedingt auf dem Wannenboden erscheinen müßte. Diese Typen bleiben auch aufrecht, wenn sich durch jede Wanne mehrere oder viele derartige Schnitte legen lassen, deren Röhren senkrecht zur Bildebene zusammenhängen können.

§ 59. Abb. 33 zeigt einen einfachen Fall, wo in einer Wanne mit leichtem Bodengefälle beim Eintritt einer Überschwemmung die Schluckstelle  $p$  umso mehr Wasser aufnimmt, je höher der Seespiegel steigt. Beim Sinken der Flut tritt das Umgekehrte ein. Eine Überschwemmung ist hier nur möglich, wenn aus  $q$  das Wasser unter wachsendem Druck austritt. Dann würde der Druck bei  $q$  genügen, in einer Rohrverlängerung nach oben das Wasser rasch emporsteigen zu lassen. Der Spiegel der Überschwemmung in der Wanne steigt aber viel langsamer. Diese kann daher für den Abfluß durch  $p$  nicht so viel Druck liefern, als in  $q$  für die Geschwindigkeit des Zuflusses wirksam ist. So lange diese Ungleichheit besteht, wird der Spiegel steigen. Da die Abfuhr durch  $p$  unter dem Wannenboden nicht mit den Rohren der Zufuhr zusammenhängt, so spielt die Wanne für die von  $p$  ausgehende unterirdische Strömung die Rolle des weiten Gefäßes (gemäß den §§ 30 bis 40) und die Geschwindigkeit des Schluckens wird umso größer, je höher die Überschwemmung steigt.

<sup>1)</sup> Die damit in Widerspruch stehenden Behauptungen, die A. Grund in Nr. 20, S. 185 und Nr. 22, S. 190, unter Berufung auf Ballif (Nr. 3, S. 43 und 69 u. T. III) vorgebracht hat, verkehren das, was Ballif gemessen und beobachtet hat, ins Gegenteil (vgl. § 67). Ich habe das schon vor sieben Jahren ausgesprochen (Nr. 31). Seitherige Veröffentlichungen, die so tun, als ob ich nichts Wesentliches vorgebracht hätte, zwingen mich diesmal ganz deutlich zu werden.

Abb. 34 zeigt einen einfachen Fall, wo die Schluckstelle  $p$  in einer solchen Wanne umso weniger Wasser aufnimmt, je höher die Überschwemmung steigt und sich beim Sinken umgekehrt verhält. In diesem Falle haben Quellstrang und Ponorabzug unter der Wannensohle einen Zusammenhang. Steigt der hydraulische Druck der Strömung, so wird zuerst bei  $q$  Wasser austreten und in  $p$  hineinfließen, gemäß dem Druckhöhenabfall 1 ... 1 in Ab-

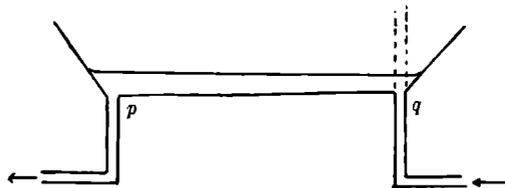


Abb. 33. Eine Wanne mit Wasserinhalt, in welcher der Abzug bei  $p$  um so mehr schluckt, je höher das Wasser steigt. Über  $q$  ist in einer gedachten Röhre der Druckzuwachs vorstellbar, welcher zunehmend Wasser in die Wanne treibt. Der Spiegel in der weiten Wanne hebt sich dagegen so langsam, daß der Stelle  $p$  der Druckanstieg fehlt, der zur gleich schnellen Abfuhr der aus  $q$  steigenden Wassermenge nötig wäre. Der Einfachheit halber sind alle Rohrstücke als gleich weit angenommen.

bildung 34. Steigt der hydraulische Druck weiter, so würde er auch unter  $p$  eine höhere Wassersäule im Standrohr tragen als ursprünglich. Der Abfluß unter  $p$  vollzieht sich also unter dem möglichen Überdruck des aus  $q$  stammenden und auf den Standrohrspiegel unter  $p$  einströmenden Wassers. Ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluß kann höchstens so lange dauern, bis die Wassersäule unter  $p$  gerade an den Wanneboden empor-

reicht, d. h. bis die vom hydraulischen Druck getragene Wassersäule im Ponorschacht und die zur Abfuhr des Wasserlaufes nötige aufgesetzte Wassersäule zusammen die Röhre bis an den oberen Rand der Schluckstelle füllen. Steigt der allgemeine Druck der Strömung

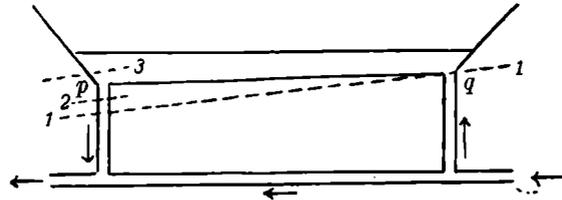


Abb. 34. Eine Wanne, in welcher der Abzug bei  $p$  im Fall einer Überschwemmung von Anfang an um so weniger schluckt, je höher diese ansteigt. Gestrichelt: Zeitlich aufeinanderfolgende Druckhöhenabfälle. Bei 1 beginnt Wasser in die Wanne zu treten. Die Steigerung des Druckes von 1 bis 2 kann sich nur unter dem Eingang zu  $p$  voll als Spiegelhebung geltend machen, während von  $q$  aus nur langsamer anschwellendes Wasser in die Wanne fließt. Noch kann ein Wasserfall bei  $p$  den Spiegel über die Lage 2 emporheben, so daß Abfluß und Zufuhr im Gleichgewicht sind. Sobald aber links der Spiegel die Wannensohle erreicht hat und der Druck den Spiegel in einer verlängerten Röhre auf die Lage 3 heben würde, so wird der Überdruck aus der langsam sich füllenden Wanne kleiner und  $p$  schluckt dann um so weniger, je mehr diese Überschwemmung steigt, denn sie tut es mit abnehmendem Vorsprung.

weiter, so wird bei  $q$  noch mehr Wasser herausfließen, aber bei  $p$  nicht entsprechend mehr geschluckt werden, denn der hydraulische Druck trägt nun auch einen Teil jener Wassersäule, die vorher zum Abfluß mitwirkte. Was zu wenig abfließen kann, überschwemmt den Wanneboden. Bei seiner Ausdehnung bedeutet das einen sehr

verlangsamten Spiegelanstieg. Je mehr der hydraulische Druck steigt mit der wachsenden Durchströmung, desto mehr bleibt der Spiegel des Sees in der Wanne hinter der Höhe zurück, bis zu der bei  $q$  das Wasser in einer verlängerten Röhre steigen würde. Bei  $p$  rückt die Höhe der vom hydraulischen Druck getragenen Wassersäule dem langsam steigenden Überschwemmungsspiegel nach und immer näher.

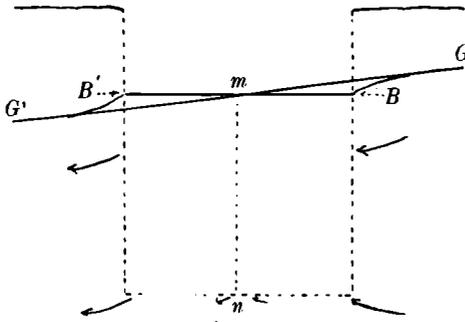


Abb. 35. Schnitt durch einen Brunnen in einem Schotterfeld, parallel zur Richtung des Grundwasserstromes.  $GG'$ : Grundwasserspiegel; wegen der Kürze der betrachteten Strecke ist trotz der Überhöhung der Grundwasserspiegel als schiefe Ebene angenommen.  $BB'$ : Brunnenpiegel.  $mn$ : Schnittlinie einer senkrechten Ebene mit der Brunnenwand. Die Poren an dieser Schnittlinie geben bei ruhigem Spiegel weder Wasser ab, noch schlucken sie solches, denn für alle Poren der Linie  $mn$  hat der Brunnenpiegel dieselbe Höhe wie der Grundwasserspiegel. Einige Bewegungsbahnen sind angedeutet. Sie sollten zitterig gehalten sein, ebenso sollte auch die Linie des Grundwasserspiegels zitterig sein, das entspräche besser der Wasserverteilung in einer Schotter- oder Sandpackung. Wird eine Hebung der Grundwasserstände zur Ursache einer Hebung des Spiegels, so schiebt sich die Schnittstelle  $m$  etwas vorwärts und umgekehrt. Dies und seine Folgen erläutert Abb. 37.

§ 60. Vergleichen wir das Verhalten der Schluckströmung beim Vorhandensein eines einfachen Röhrengerinnes mit dem Verhalten von Poren einer Brunnenwand, wenn der Grundwasserspiegel keinem Rückstau von der Abflußseite her unterliegt. In einem Brunnen, der sich selbst lange genug überlassen blieb, steht sein Spiegel auf der Abflußseite höher als das ungestörte Grundwasser, auf der Zuflußseite tiefer als dieses (vgl. Abb. 35 und 36). Eine senkrechte Ebene, welche den Zylinder

Dadurch wird der zur Abfuhr des Wassers nötige Überdruck immer kleiner, während bei  $q$  der Zufluß immer mehr steigt. Also steigt auch die Überschwemmung mit der durch die Weite der Wanne vorgeschriebenen Langsamkeit.

Je mehr sie steigt, desto langsamer wird der Abfluß bei  $p$  und umgekehrt. Theoretisch kann es dahin kommen, daß auch  $p$  nicht mehr schluckt, sondern Wasser hinaufsteigen läßt, das selbst zur Vermehrung der Überschwemmung beiträgt. Dann hat die Höhe der vom hydraulischen Druck getragenen Wassersäule bei  $p$  die Spiegelhöhe der Wannenfölluug ebenfalls überholt. Es ist aber wohl zu beachten, daß der Beginn der Überschwemmung auch hier beim schluckenden Ponor eintritt. Das zeitweilige Speien einer Öffnung auf der Abflußseite eines Poljes beim Maximum der Überschwemmung ist noch nie beobachtet worden. Nicht einmal die Verlangsamung ihrer Schlucktätigkeit wurde bisher durch Messung erwiesen.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Daß ein großer Saugwirbel nicht beobachtet wird oder verschwindet, ist nicht eindeutig und beweist daher nicht, daß nun Wasser emporsteigt. Diese Wirbel zeichnen sich nur bei niedrigen Wasserständen an der Oberfläche ab (vgl. das Verhalten in einer Badewanne).

des Schachtes quer zur Bewegungsrichtung schneidet, trifft alle jene Poren an den Seitenwänden und auf der Sohle, bei denen weder Wasser austritt noch eintritt, weil hier der Grundwasserspiegel ebenso hoch steht wie der Brunnen Spiegel. Zeigt dessen Ruhe ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluß an, so nimmt die Zuflußseite ebensoviel Fläche der Brunnenwand ein wie die Abflußseite. Je höher der Spiegel steht, desto mehr Wasser tritt durch alle Poren, da mit dem höheren Grundwasserstand auch ein größeres allgemeines Druckgefälle verbunden ist. Umgekehrt wird bei niedrigerem Spiegel weniger zugeführt und weniger geschluckt. Wenn der Brunnen Spiegel steigt, sind mehrere Vorgänge wirksam. Es vermehrt sich die Zahl und Ergiebigkeit der Wasser abgebenden Poren. Es vermindert sich die Zahl und Wasseraufnahme der schluckenden Poren. Zwar kommen bei steigendem Spiegel oben schluckende Poren hinzu. Aber in dessen vergrößert sich an allen übrigen Begrenzungsflächen des Brunnenwassers der Zuflußbereich auf Kosten des Abflußbereiches. Dies geschieht, indem die senkrechte Ebene, in der jene Poren liegen, die weder Wasser abgeben noch schlucken, sich in der Richtung des Abflusses verschiebt. Während der Spiegel sinkt, weicht diese Ebene zurück. Ihr Verschiebungsbereich ist an den Seiten des Brunnen schachtes in Abb. 37 zu sehen. Auf ihr sind im Verlaufe der Wasserstandsschwankungen alle Poren wie Wechselschlünde wirksam. Bei steigenden Spiegeln geben solche Wasser ab, die es bei fallenden Spiegeln schlucken. Damit durch alle Poren der Sohle und schließlich überhaupt durch alle Poren des Brunnen Wasser nur eintrete, muß oben genügend abgepumpt werden.

Wir sehen also zweierlei: 1. Die Beziehung: zunehmende Verschluckung bei steigendem Wasserstand gilt ebensowohl in einem Brunnen auf der Abflußseite, wie z. B. in einer Karstwanne, unter deren Boden Zu- und Abflußröhren keine Verbindung haben. 2. Die Beziehung:

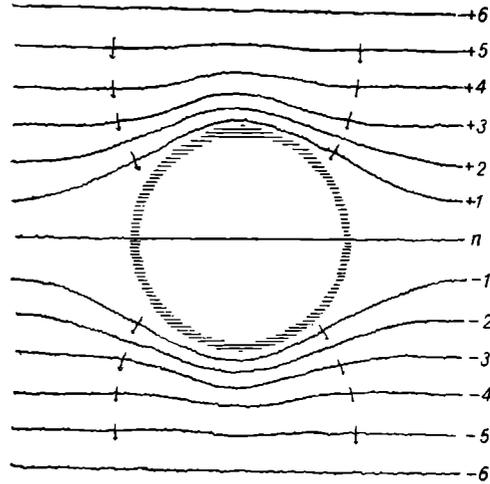


Abb. 36. Plan eines Grundwasserspiegels nach Abb. 35 in Isohypsen um einen sich selbst überlassenen Brunnen in Schottern mit ruhendem Spiegel.  $n$  ist die Isohypse, in der der Brunnen- und der Grundwasserspiegel gleiche Höhe haben,  $n + 1$ ;  $n - 1$  usw. sind die übrigen Isohypsen. Die Pfeile zeigen die horizontalen Komponenten der Bewegungsbahnen, welche unter den Grundwasserspiegel eintauchend zu denken sind. Der zitterige Verlauf der Isohypsen entspricht der Wirklichkeit; da der Grundwasserspiegel aus vielen sehr kleinen Einzelspiegeln besteht und kapillare Unebenheiten Einfluß haben. Eigentlich sollten die zitterigen Linien auch noch zahlreiche kleine Unterbrechungen aufweisen. Dieses Isohypsenbild gibt verdeutlicht eine Erkenntnis, welche den zahlreich verbreiteten Isohypsenbildern von Brunnen nach teilweisem Abschöpfen nicht zu entnehmen ist.

abnehmende Verschluckung bei steigendem Spiegel ist auf der Abflußseite eines Brunnens nicht möglich, wohl aber in einer Karstwanne, unter deren Boden die Zu- und Abflußröhren durch eine Druckströmung verbunden sind. Aus 2. folgt: Die theoretische Möglich-

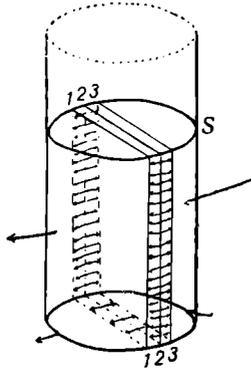


Abb. 37. Ansicht eines bis zum Spiegel *S* gefüllten Brunnenschachtes. Die Ebene 2 — 2 rückt bei steigendem Spiegel gegen die Lage 1 — 1 vor, bei fallendem gegen die Lage 3 — 3 zurück. Ihre Schnitte mit der Wand des Brunnens sind der geometrische Ort aller Poren, die kein Wasser abgeben und keines aufnehmen. Eine rechnerische Behandlung würde ergeben, wie groß der Verschiebungsbereich unter naturgemäßen Annahmen höchstens werden kann. Sobald der Spiegel, sei es in höherer, sei es in tieferer Lage in Ruhe kommt, stellt sich die Lage 2 der charakteristischen Schnittebene wieder her. In dem hervorgehobenen Streifen der Brunnenwand wirken die Poren als „Wechselschlünde“.

keit, daß alle Öffnungen eines Wannengrundes Wasser abgeben, gilt im äußersten Falle wohl, wenn eine Verbindungsströmung unter dem Wanneboden durchzieht (gemäß Abb. 35), aber durchaus in keinem sich selbst überlassenen Brunnen. Wenn diese Sätze vielleicht manchen Leser verblüffen, liegt es nur an der bisher üblichen Behandlung des Gegenstandes. Forschen wir nach den Gründen der Übereinstimmung 1 und der Verschiedenheit 2.

Die Übereinstimmung 1 ergibt sich zunächst daraus, daß der Brunnenpiegel beim Steigen des Grundwasserstandes rascher steigt als die kleinen Druckspiegel, welche auf der Abflußseite die Oberfläche des Grundwassers bilden. Denn der anschwellende Grundwasserspiegel bekommt ein steileres Gefälle, während der Brunnenpiegel wagrecht bleibt. Daraus folgt die erste Beziehung. In einem Polje, das sich nach Abb. 33 entwässert, ergibt sich dieselbe aus dem Grunde, weil ja zunächst im Ponor oft überhaupt kein Wasser ist, sondern nur das weite Gefäß sich dahin entleert. Wenn aber Niederschläge auf die Abflußseite des Poljes fallen, so entfernt sie ja der sofort einsetzende unterirdische Abfluß immer mehr von der Wanne. Es wird sich dabei wohl eine steigende Widerstandshöhe auch in der Richtung zum Ponor geltend machen. Aber da sich in dieses Ponor die versammelte Wassermasse eines weiten Beckens entleert, nimmt zwar bei steigendem Spiegel der Überflutung die Widerstandshöhe sogar noch zu, aber gleichzeitig auch die Geschwindigkeitshöhe und damit die Menge des in der Zeiteinheit Verschluckten. Es gilt hier, was Abb. 11 erkennen läßt, wenn man sich an dem weiten Gefäß am Beginn der Strömung die verschiedenen Spiegelstände durch Nachfüllen steigend denkt. Die Widerstandshöhe steigt auch, aber nicht so rasch. Auch im Falle der Abb. 18

ändert sich nichts an der Tatsache, daß die Geschwindigkeit, auch die relativ geringe Geschwindigkeit am inneren Rohrende mit den Spiegelständen im weiten Gefäß gleichsinnig schwankt. Ein hoher, gefüllter Zuflußtrichter auf einem der Standrohre wäre nötig, um daran etwas zu ändern. Aber kein Niederschlag kann im Karst auf der Abflußseite eines Poljes ein diesem Trichter entsprechendes Polje von annähernd derselben Größenordnung schaffen.

Somit ist die Übereinstimmung 1 aufgehellt.

Nicht ganz so durchsichtig ist die Verschiedenheit 2, die zwischen dem Abflußverhältnis eines ungestörten Brunnens und dem eines Poljes theoretisch auftreten kann, zumal es sich dabei um Poljen handelt, in deren Umgebung die Klüfte ebenfalls kommunizieren, sogar auch unter der Sohle durch. Gleichwohl kann es leicht geschehen, daß in solchen Poljen der Spiegel langsamer steigt als der Druck in der Umgebung und daß so am Ponor die Geschwindigkeitshöhe abnimmt. Wie dies zugeht, wurde schon durch Abb. 34 erläutert. Warum ist aber letzten Endes bei einem ungestörten Brunnen dergleichen nicht möglich? Auch diese Frage wurde schon beantwortet, aber beide Antworten bilden doch kein Ganzes. Wir finden es, wenn wir bedenken, daß eine Poljenüberschwemmung, die ganze Quadratkilometer einige Meter tief überflutet, am besten mit zu seichten trockenen Brunnen verglichen wird, deren Grund zeitweilig einige Millimeter oder Zentimeter hoch vom Grundwasser bedeckt wird. Im freien Raum des Brunnens breitet sich das Wasser viel rascher aus als in den Poren ringsum, aus denen es mit einer „Filtergeschwindigkeit“ austritt. Die einzelnen Wasserteilchen haben außerdem ganz kurze Wege zurückzulegen, um sich zu der Schicht mit steigendem Spiegel zu vereinigen. Umgekehrt bewegt sich in Poljen bei Überschwemmungen das Wasser langsamer als in den Röhren, aus denen es zuströmt oder in die es abfließt. Wegen des größeren Abstandes dieser Quellöffnungen müssen die Wassermengen auch weitere Wege zurücklegen, um sich zu einer Überflutung zu vereinigen. Auch wenn der See schon da ist, sind die Strömungen darin langsamer und ist besonders jede Spiegelhebung langsamer als die gleichzeitigen Bewegungen und Verschiebungen in den wassererfüllten kommunizierenden Röhren ringsum. Künftiger Forschung bleibt die Aufgabe zu berechnen, wie weitmaschig müssen kommunizierende Röhren und Klüfte um eine Wanne sein, damit — anders als in ungestörten Brunnen — die Bezeichnung: steigende Spiegel, abnehmende Verschluckung möglich werde?

§ 61. Nun sind alle Unterlagen beschafft, damit der Leser von einer schädlichen Suggestion befreit werde. Die Karstwasserhypothese von A. Grund behandelt die Hydrographie der Poljen vor allem nach dem Schema der Grundwasserbewegung, und zwar beim Vorhandensein von Brunnen, deren Spiegel durch Pumpen gesenkt wurde. Und man kann sagen, daß keiner seiner Gegner in dem langen Streit diesen Sachverhalt durchschaut hat. Die erste Quelle jener Suggestion dürften alle die Lehrbücher über Grundwasser und Quellen sein, welche von einseitig praktischen Gesichtspunkten aus nicht einen sich selbst überlassenen Brunnen durch Wort und Zeichnung ordentlich erläutert haben, sondern einen zum Teil abgepumpten, gegen dessen Spiegel das Grundwasser von allen Seiten herabsteigt und wo es daher unten und überall eindringt. Infolgedessen wehrte sich Grund mit entstellender Verkennung der wenigen Beobachtungen, die wir Ballif verdanken, dagegen, daß bei den Ponoren die Schlucktätigkeit bei steigendem Spiegel zunehme; er hielt dies offenbar für eine Stütze der von ihm bekämpften Theorie der Karstgerinne, während es doch bei jedem Brunnen, der nicht abgepumpt wird, vorkommt. Umgekehrt haben heftige Gegner A. Grunds, wie Katzer, die Möglichkeit ausschließen wollen, daß auch die Ponore der Abflußseite infolge Gegendruckes von unten mindestens die Tätigkeit einstellen. Sie schrieben so, als ob sie fürchteten,

damit der Ansicht ein Zugeständnis zu machen, die Karsthydrographie, in den Poljen besonders, vollziehe sich in weitgehender Analogie zur natürlichen Grundwasserbewegung, während gerade jenes Aufhören des Abflusses in einem sich selbst überlassenen Brunnen oder in einem natürlichen Grundwassersee nicht vorkommen kann.

Nichts könnte die starke Sonderart der Karstentwässerung in Poljen so blitzartig beleuchten als die Möglichkeit, daß sie auf natürlichem Wege eine Beziehung zwischen Spiegellage und Abfluß erzeugt, die bei Brunnen künstlich hervorgerufen werden muß. Diese Sonderart wird noch vollständiger klar, wenn die Tatsache hinzutritt, daß eine in Brunnen herrschende natürliche Beziehung zwischen Spiegellage und Abfluß in Karstwannen ebenfalls natürlich, aber auf ganz und gar verschiedene Weise zustande kommt.<sup>1)</sup>

Beides, jene Möglichkeit und diese Tatsache muß man im Auge behalten, soll die Hydrographie der Poljen nicht fehlerhaft aufgefaßt werden. An und für sich kann man bei jedem einzelnen Ponor, vor dem sich Überschwemmungen ansetzen, fragen, ob diese durch eine unzureichende, wenn auch zunehmende Schlucktätigkeit des Schlundes eingeleitet werden oder durch eine unzureichende und außerdem abnehmende Schlucktätigkeit. Im zweiten Falle kann die noch entferntere Möglichkeit bedacht werden, daß vielleicht später der Schlund Wasser abgeben wird und so die Überschwemmung selbst speist. Dann erst würde die Erwägung eines Mißverhältnisses zwischen Zu- und Abfluß für diesen einzelnen Wechsellund ihren Sinn verlieren. Für die ganze Hohlform des Poljes kann man sie aber ruhig weiterverwenden, ohne das mathematisch-naturwissenschaftliche Denken zu verletzen.

Die strenge Beziehung zwischen der Kurve des Wasserstandes, einer Poljenüberflutung und der Abflußkurve, sei sie nun so oder so, gilt eigentlich nur für reines Wasser. In der Natur aber schwemmen die trüben Fluten der angeschwollenen Poljenflüsse massenhaft Verunreinigungen jeder Art herbei, die natürlich einige Jahre nach jeder Reinigung der Schluckschlünde eine neue nötig machen, damit die Abflümmen gesteigert, die nötigen Widerstandshöhen aber vermindert werden, was beides die Dauer der Überschwemmungen und ihre Ausbreitung herabsetzt. Unbestrittene Wechsellünde sind häufig zwischen Quellen und Ponoren zu erwarten. In dem einfachen Schema der Abb. 34 braucht man sich nur ein drittes Standrohr in der Mitte hinzuzudenken und dann sich den Eintritt genügend großer Druckschwankungen in der Strömung vorzustellen. Die obere Öffnung des mittleren Standrohres wird dann zum Wechsellund. Wäre die Wannensohle ganz eben, so würden auch manche

<sup>1)</sup> Auch das Nachhinken der Überschwemmungen gegenüber dem Maximum der Niederschläge kommt in Poljen auf ganz andere Weise zustande als die entsprechend verspäteten Grundwasserschwellungen in Schottermassen: während die Flußhochwässer in undurchlässigen Gebieten rasch den Niederschlägen folgen, sind sie im Karst auf die weniger unmittelbare Zunahme der Felsenquellen angewiesen. Dann dauert es auch noch einige Zeit, bis die Abzüge durch die Ponore unzureichend geworden sind, ehe die eigentliche Überschwemmung der Karstwanne beginnen kann.

periodische Quellen auf ihr Wechselschlünde sein müssen, d. h. beim Sinken der Überschwemmung schlucken müssen. Aber weil die Wannensohle zu den Ponoren hin geneigt ist, wird der Ort der Sohlenquellen beim Sinken der Flut zuerst frei, so daß dort die Gelegenheit zum Schlucken wegfällt. Selbstverständlich sind viele Quellen und manche Ponore nicht am Grunde der Poljen, sondern an den Gehängen gelegen. Dieser viel einfachere Fall wurde in Abb. 33 und 34 gar nicht berücksichtigt, da die dort gewählte Anordnung für alle grundsätzlichen Überlegungen ausreicht.

Die Abbildungen nehmen gleich weite Röhren an. In Wirklichkeit liegen solche nie vor. Denken wir uns im Falle der Abb. 34, daß das Standrohr bei  $p$  von einer Erweiterung der unteren Strömung abzweigt, das Rohr bei  $q$  von einer Verengung, so muß die Quelle auf der Abflußseite, der Ponor auf der Zuflußseite liegen, wenn das Polje beginnt, an der Entwässerung teilzunehmen. Auch der Fall der folgenden Abb. 38 ist nicht auszuschließen, wobei die Röhren, die mit der Wanne zusammenhängen,

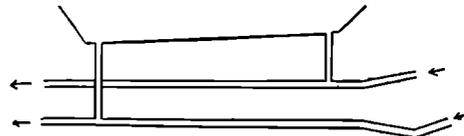


Abb. 38. Wanne, die von isolierten Röhrenströmungen aus verschiedenen Einzugsgebieten betreten werden kann. Das bleibt auch so, wenn durch die Wanne eine Vielheit derartiger Schnitte gelegt werden kann. Das Verhalten der Quellöffnungen und Schlundlöcher läßt sich hier nicht voraussagen und selbst nicht leicht in bloße Regeln fassen. Die dargestellten Röhren können überall getrennt verlaufen, mit dritten aber zusammenhängen.

ganz getrennte Strömungen führen. Man wird im Karst weniger leicht fehl greifen, wenn man zuviel für möglich hält, als wenn man zu wenige Möglichkeiten zuläßt, die sich in einem engen, in Wahrheit zu engen Schema unterbringen lassen.

§ 62. Die hydrographischen Erscheinungen verraten uns einiges, aber nicht viel von den Zuständen und Vorgängen im Inneren des Karstes, in welchem das Polje liegt. Schluckt ein Ponor umso mehr Wasser, je höher er überflutet ist, so darf gefolgert werden, daß sich der Abfluß in vorher leere Hohlräume ergießt, deren Wasser mit anderen unterirdischen Strömungen keinen oder noch keinen Zusammenhang hatte. Wenn aber, was zweimal von Ballif beobachtet wurde, die Abflußmenge rascher sinkt, als gemäß dem Fallen des Wasserstandes, so muß das Studium der Verhältnisse ergeben, ob eine Verstopfung durch Anschwemmungen eintrat oder ob der Abfluß in der Tiefe von anderen Strömungen gebremst wurde, die ihn auf dem Wege von Verbindungsklüften her erreichen, während im Polje die Flut sank. Zusammenhängende Klüfte in der Tiefe bedeuten eben noch kein zusammenhängendes Karstwasser, ehe nicht alle angefüllt sind. Aber selbst der Zusammenhang der Klüfte kann zweifelhaft oder ausgeschlossen sein. Solches ist der Fall, wenn auf der Zuflußseite eines Poljes zwischen Reihen von Quellen eine nur als Schluckloch tätige Öffnung vorkommt oder wenn auf der Abflußseite zwischen Ponoren Quellen auftreten. Wo solches nach § 61 auf Querschnittsänderungen zurückgeht, so muß nicht jeglicher Zusammenhang dieser Röhren mit anderen fehlen, doch setzen dann die gegenseitigen Verbindungen im Bereich einer langen Strecke aus.<sup>1)</sup> Wie ich schon

<sup>1)</sup> Unter Röhren verstehe ich alle Hohlformen, die unter allseitigem Wanddruck durchflossen werden können, also nicht nur zylindrische.

1925 erläutert habe, ist ein Karstwasserspiegel nur ein örtliches Gebilde; in großer Nähe der Stellen, die der Beobachtung zugänglich sind, kann ein anderer Karstwasserspiegel eine sehr verschiedene Höhe haben. Am allerwenigsten erlauben die Verhältnisse bei den Ponoren und Wechselschlünden, mehr als eine rein örtliche Feststellung in bezug auf die schwankenden Stände des Karstwassers zu machen. Man bedenke nur die so verschiedenen Widerstandshöhen bei ungleichen Querschnitten und Krümmungen der Wasserbahnen an jeder Einströmung in ein Schluckloch bei gegebener Zuflußmenge.<sup>1)</sup>

### III. Erläuterung der Karsthydrographie größerer Musterlandschaften.

A. Die Wasserverhältnisse des Poljes von Livno. (Vgl. die Kartenbeilage 1)

Lit. Nr. 3, 10, 17, 20, 41<sup>2)</sup>

(eine geologische Karte 1:200.000 mit den jungtertiären Mergeleinlagerungen auf großen Teilen der Poljensohle und mit Quartärgebilden am Rand bringt Cvijić in Nr. 10.)

§ 63. Indem wir nun ein großes, besonders eingehend untersuchtes und von mehreren Forschern behandeltes Polje betrachten wollen, werden wir aus dem Gebiete der Theorie zu Stellen geführt, an denen sich Theorien bewähren sollen. Freilich ist nun im folgenden so manches nicht im Hinblick auf theoretische Probleme geschrieben. Denn die Nachrichten sind immer noch nicht lückenlos. Vielmehr wird angenommen, daß der Leser schon aus landeskundlichem Interesse gern von dem hydrographischen Reichtum dieser Gegend Kenntnis nimmt, auch wo er nicht von dem roten Faden einer wissenschaftlichen Beweisführung geleitet wird. Dafür ist er sicher, daß der Reichtum der Wirklichkeit geistig nicht abgewürgt wird durch die Gefahr, daß die Beweisführung auf sophistische, oder nur formal logische Abwege gerät. Das unbefangene Aufnehmen des folgenden Berichtes soll aber durch die Tatsache nicht gestört werden, daß einzelne Stellen später doch auch in theoretischer Beziehung zu beachten sind; darum werden diese durch einen Stern hervorgehoben. Im ganzen ist also nirgends ein besonders wachsameres Lesen vonnöten. Das Polje von Livno ist das geräumigste „im Krainer-adriatischen Karst“ (Cvijić, Nr. 10). In sehr rauhe Gebirge 600 bis 1000 *m* tief eingebettet, zieht sich 65 *km* lang, also über zwei Tagemärsche weit, eine fast völlige Ebene NNW nach SSE, die größtenteils monatelang in jedem Winter und Frühling überschwemmt ist. Die breiteste Stelle ist 11 *km* breit, die engsten Einschnürungen messen 4 und 1½ *km*. Der Flächeninhalt des Poljes mit der anschließenden runden Kammer des Busko blato (Sumpf) beträgt nach Ballif, dem um diese Karstgebiete hochverdienten Wasserbautechniker, 405 *qkm*, nach Cvijić 380 *qkm*. Der Busko blato umfaßt nach Ballif 53 *qkm*, nach Gavazzi 49 *qkm*, wird durch das in der Mitte besonders enge Bijelo polje (56,6 *qkm*)

<sup>1)</sup> Auf diese Widerstandshöhen hat schon Theodor Schenkl hingewiesen. (Karstgebiete und ihre Wasserkräfte. Wien 1912.)

<sup>2)</sup> Der größte Maßstab, in dem das Polje dargestellt ist, beträgt 1:75000 auf den Blättern der österr.-ung. Militärkarte: Z. 29 K. XV: Luka und Halapić; Z. 30 K. XV: Gubin und Vrljica; Z. 30 K. XVI: Livno; Z. 31 K. XVI: Zupanjac und Cista.

vom Hauptteil der großen Senke getrennt, an dem Livno liegt. Der Hauptteil mißt sonach rund 295 *qkm*, bezw. gemäß den Zahlen von Cvijić und Gavazzi nur rund 274 *qkm*. Die Höhe des Poljenbodens im Hauptteil gibt Ballif zu 700 bis 710 *m* an, Cvijić einschließlich des Bijelo polje und Busko blato zu 700 bis zu 740 *m*. Nahe den tiefsten Ponoröffnungen sinkt die Oberfläche gegen 695 *m* herab.

§ 64. Das ganze Polje hat drei niedrige Becken mit sehr sanften, unregelmäßig geformten Schwellen dazwischen. Im Hauptteil sind diese Bodenformen unausgesprochen, so daß nur die Überschwemmung und Versumpfung sie verraten. Diese Becken bergen von NW nach SE: 1. den Ševarevo blato (in seinem größeren nördlichen Teil vorwiegend Ždralovac blato genannt) 2. das Livanjsko polje (im engeren Sinne), von Gavazzi als Jasikovo polje bezeichnet, und 3. den Busko blato. Diese drei Vertiefungen sind heute noch monatelang überschwemmt. Einst, vor den Arbeiten Ballifs, am Anfang der Neunzigerjahre des vorigen Jahrhunderts, waren die Vertiefungen im Hauptteil 7 bis 8 Monate unter Wasser, von November bis längstens Ende Juni, so daß 90% von ihm überflutet waren.<sup>1)</sup> Im Busko blato dauert die Überschwemmung noch 1 bis 2 Monate länger. Ob die durch Ballifs Ponorreinigungen erzielten Abkürzungen der Inundationen noch aufrecht sind, ist sehr zweifelhaft. Neuere Ausräumungen des Schlammes zu diesem Zweck sind mir nicht bekannt geworden. In der wasserfreien Zeit hebt sich das Grün des Poljengrundes von dem öden Karst ringsum lebhaft ab. Jedes der genannten Überschwemmungsgebiete hat ein eigenes zeitweiliges Flußnetz. Außerdem gibt es auch auf den Schwellen Flüsse mit eigenen Quellen und Schwinden. Einer wird auch vom benachbarten Überschwemmungssee her gespeist. Aus dem Ševarevo blato (Ždralovac bl.) gehen zwei Flüsse zu eigenen Ponoren. Die Nichtübereinstimmung zwischen den flachen Hohlformen des Poljengrundes und den Einzugsgebieten mehrerer Flüsse ist eine Merkwürdigkeit, die zuerst Cvijić aufgefallen und von ihm allein hervorgehoben worden ist. Die Ševareva jaruga ganz im NW ist der eine Fluß, der den gleichnamigen Sumpf nach S zu W entwässert, und zwar den Ždralovac blato genannten Teil. Die Gewässer dieser Jaruga<sup>2)</sup> schluckt der Ponor beim Dorf Kazanci. Die Vrbička jaruga ist der zweite Fluß, der den Ševarevo blato vorwiegend nach S entwässert. Bevor diese Jaruga ihre Schwinde im Lakalponor erreicht, vereinigt sie sich mit der nach NW fließenden Ljusnička jaruga, die aus einem Schwellengebiet kommt. Das Überschwemmungsgebiet von Livno birgt in genauer Übereinstimmung mit der Beckenform das Gewässernetz der Plouča mit mehreren ganzjährigen Zuflüssen und einer Gruppe besonders großer Ponore. Das Bijelo polje ist überschwemmungsfrei und hydrographisch nicht einheitlich, weil es mehrere kurze Karstbäche enthält. In getrennte Ponore verschwinden dann auch die zeitweiligen Gewässer des Busko blato, aber der Fluß Ričina übertrifft alle anderen so stark, daß er als der Fluß dieses schön ausgeprägten

<sup>1)</sup> Das wäre eine Fläche von 250 bis 260 *qkm*. Der Neuenburgersee mißt 216 *qkm*, der Zürichsee 88,5 *qkm*. Die Tiefen im Livno polje sind freilich gering, meist wohl 2 bis 5 *m*. Im Jahre 1904 meldete Gavazzi als überschwemmte Fläche aus früherer Zeit einmal 200 *qkm*. Es kommt eben sehr auf die jeweiligen Wasserstände an.

<sup>2)</sup> Jaruga ist ein Gattungsname für solche Poljenflüsse mit stark veränderlicher Wasserführung.

Beckens angesehen werden darf. Die Gewässer des Ploučasystems erreichen im Hochsommer die großen Ponore nicht, sondern enden schon im Drinovac-Sumpf, wnw Livno, noch im östlichen Teil der Beckenweite. Alle diese Flüsse werden von Karstquellen und Wechselschlünden gespeist. Es gibt auch Quellen aus Schutthalden und Schuttkegeln, besonders am NW-Ende des Poljes und ganz im N Regenbäche aus einem Dolomitgebiet; ebenso an einer Stelle des Westgehänges, wo sich das Bijelo polje zur Ploučaebene erweitert. Diese normalen Quellen und Bächlein verstärken die Überschwemmungen anscheinend, ohne vorher einen unterirdischen Weg einzuschlagen. Der Dolomit, hier als undurchlässiges Gestein wirksam, setzt nur an den genannten zwei Stellen die Gehängeoberfläche zusammen. Übrigens bildet er am Westrand der Ždralovac blato bis gegen den Kazanci ponor nach A. Grund den unteren Teil des Gehänges, doch ist — wohl wegen der Schuttanhäufungen und wegen lagenweise sich einstellendem Wechsel mit Kalkbänken — das Ende des undurchlässigen Gesteins nicht sicher festgestellt. Zwischen ödem Karst, der nur gebirgiges Weideland mit seltenem Höhenwald bietet, und dem Überschwemmungsgebiet läuft die Reihe der Siedlungen an den öfter terrassierten Poljenhängen entlang, sehr abhängig vom Auftreten ständiger Quellen. Kommen die Herbstregen<sup>1)</sup>, so fließen alle ständigen Karstquellen reichlicher, periodische erscheinen. Die Flußbetten füllen sich zum Teil auf dem Umwege dieser Quellen, zum Teil durch den Regen selbst; ihr Wasserstand wird bald zum Hochwasser. Weil die Möglichkeit besteht, die Fluten in den Ponoren unter Druck abzuführen, breitet sich das Hochwasser mit etlicher Verspätung zu Überschwemmungen aus. Schließlich, nach Monaten, versiegen die Quellen oder fließen schwach, die Überflutung weicht und nach einigen Wochen dienen die Flußbetten nur noch zur Entleerung der weiten Überschwemmungsmulden, worauf sie mit wenigen Ausnahmen eintrocknen. In diesem allgemeinen Rahmen des Geschehens gibt es genug bemerkenswerte Einzelheiten.

§ 65. Am Nordende des Ševarevo blato bildete vor den Arbeiten Ballifs und vielleicht heute wieder der Ždralovac blato am Gehängefuß einen ständigen See. Nach Räumung des Kazanci ponor war dort nur von Mitte November bis Ende Juni ein See, während die Überschwemmung des ganzen Ždralovac blato auf etwa 6 Monate herabgesetzt werden konnte. Den einst ständigen See speisten, abgesehen von Wasser aus Schuttkegeln und von Regenbächen aus dem Dolomit, Karstquellen in 708 bis 712 *m* Höhe, die tiefsten an der Poljensohle. Der Seespiegel lag am 22. Juni 1902 710 *m* hoch. Das ist noch nicht die Höhe, bei der der ganze Ševarevo blato unter Wasser ist. Die niedrigsten Höhenzahlen des Sumpfbodens sind nach der Spezialkarte 705 und 706 *m*. Demgemäß wäre die Wassertiefe schon dicht am Nordufer 2 bis 3 *m* und weiter im Süden 5 bis 6 *m*. Untiefen kommen vor. Bei 711 *m* sind zwei Trigonometerpunkte in dieser Gegend der Poljensohle verteilt. Nach Grund „überflutet der See“ bei Hochstand „den größten Teil des nördlichen Ždralovac blato und steht dann in oberirdischer Verbindung mit dem Kazanci ponor“. Beim Rückgang der Überflutung hört diese Verbindung auf und der See

<sup>1)</sup> Der trockenste Monat in Livno war 1887 bis 1899 der August mit 5,3% der Jahresmenge (1185 *mm*), schon der September erreichte mit 8,2% fast den Durchschnitt und der Oktober mit 12,5% das Maximum (Nr. 21, S. 174) monatlichen Niederschlags.

in seiner besonderen Mulde steht dann „nur noch durch Sumpfland mit der Ševareva jaruga in Zusammenhang“. A. Grund hält also die zahlreichen ständigen Quellen, die vorwiegend aus Lockermassen stammen, und den Westrand des Poljes bis in die Nähe des Kazanciponors begleiten, für nicht ausschlaggebend beim Zustandekommen der ausgedehnten Überflutung des nördlichen Poljes. Beim Schrumpfen und zeitweiligen Verschwinden des Sees versehen nach A. Grund die früheren Quellspalten die Funktion von Abflußöffnungen; er beruft sich dabei auf Cvijić, der am Nordende des Poljes drei solche Wechselschlünde nennt. Daß der periodische See des Ždralovac blato jedesmal so lange währt, bringt A. Grund mit dem Verlust des Abflusses zum Kazanci ponor beim Schrumpfen in Zusammenhang. Die zeitweiligen Speilöcher am Nordrande des Poljes sind aber nicht die einzigen der Gegend. Eine ganze Reihe periodischer Quellen tritt auch am Ostrand auf. Diese Quellen treiben Mühlen, gleichwohl nennt sie Cvijić „schwach“, was auf größere Stärke der meisten sonstigen Ursprünge am Livno-Polje hinweist. Die wasserreichste Quelle dieser Reihe liegt nahe an deren Nordende, sie heißt die Bastašicaquelle. Sie speist in der Regenzeit einen Quellast der Ševareva jaruga. Das Anschwellen dieses Flusses und das Verhalten des Wassers vor seinem Ponor bei Kazanci leiten schließlich auch nach A. Grund die Überflutung des südlichen Ždralovac blato (Ševarevo bl.) ein. Ballif hat uns die Wasserstandskurven vor dem Kazanci ponor aus den Jahren 1892 und 1893 überliefert. Die Flut stieg im März 1892 bis höchstens 709,3 m,\* im Herbst 1892 nur auf 703,5 m, um im selben Winter an der Wende von Februar zu März 1893 auf 708,5 m zu steigen.

Für spätere Jahre ergeben sich nach Gavazzi (Nr. 17, S. 111, aus Zentimetern Pegelstand über 701,6 m) folgende Meereshöhen:

1897	707,6 m	
1898	708,1 m	6. IV.
1899	705,3 m	31. XII.
1900	708,6 m	2. II.

In den Zeichnungen Ballifs<sup>1)</sup> ist als Beginn der Wasserstandskurven vor dem Kazanciponor eine Höhe von etwa 702 m\*, bei anderen Ponoren eine andere festgehalten. Dazu paßt die Höhe von 701,6 m, die nach Gavazzi für den Nullpunkt des dortigen Pegels zutrifft. Ich schließe daraus, daß Ballif in 702 m Höhe den oberen Rand des nicht einfach gestalteten Schluckschlundes angenommen hat. Bei der Reinigung im Hochsommer 1893 konnte dieser Ponor nur „oberflächlich bloßgelegt und etwa 5 m<sup>2)</sup> tief ausgeräumt werden, nachdem auch hier sich Grundwasser vorfand, dessen Beseitigung nicht möglich war“. Darnach komme ich für diesen Wasserstand nicht unter 696,5 m, eher höher. A. Grund, der den Wasserstand in der Tiefe bei 692 m annimmt, setzt damit stillschweigend die Ponormündung bei 697 m an, also 4,6 m unter dem Nullpunkt des Pegels und nicht im Einklang zu Ballifs Überschwemmungskurven und Gavazzis Angabe. A. Grund hätte sich immerhin noch erkundigen können, wie und wann Ballif seine Bestimmung vor-

<sup>1)</sup> Tafel IV. Die Wasserstandsmessungen Ballifs im ganzen Polje von Livno umfassen die Jahre 1888 bis 1894.

<sup>2)</sup> Nr. 21, S. 89.

genommen hat. Denn auch die Zeit ist in diesen Dingen wichtig.\* Er bedauert jedoch nur, daß Ballif nicht angegeben hat, in welchem Jahre und in welchem Zeitpunkt des Hochsommers er den Ponor reinigte. Meine Angabe, daß es das Jahr 1903 war, stützt sich auf Ed. Richter,<sup>1)</sup> der es jedenfalls gewissenhaft in Erfahrung gebracht hatte. Über die mechanische Einordnung des gefundenen Wassers im Ponor bringt Ballif keine Bemerkungen. Seine Aufgabe war es ja nicht, festzustellen, ob es sich dabei um einen Wasserrest handle, der in der Biegung einer U-Röhre zurückgeblieben war. Die meines Erachtens von ihm angenommene Höhe des Spiegels ist 10,5 *m* niedriger als die tiefsten Wechselschlünde am Nordrande des Ždralovac blato in 13,5 *km* Abstand. Nach A. Grund ist der Unterschied sogar 16 *m*\*. Wie Cvijić (S. 33) berichtet, war der See bei jenen Wechselschlünden vor Reinigung der Ponore ständig vorhanden. Er wurde also nicht völlig verschluckt und stand mindestens 708 *m* hoch, als Ballif beim trocken liegenden, verstopften Kazanciponor mit der Arbeit einsetzte und schon in 5 *m* Tiefe auf Wasser stieß. Wenn daher das Wasser im Kazanciponor überhaupt unterirdisch mit dem 10,5, bzw. 16 *m* höheren Seestand zusammenhing, kann es sich im Ponor nur um einen Druckspiegel über einer tieferen Röhrenströmung handeln. Irgendwelche Bewegungen des Wasserinhaltes im Ponor meldet Ballif nicht, obgleich doch die Reinigung wohl mehr als einen Tag beansprucht haben wird. Jedenfalls hat man keine Ursache, einen tieferen Zusammenhang des Sees im N und dieser Ponorfüllung ohne weiteres anzunehmen. Daß der See nach der Reinigung des Schlundes periodisch wurde, hängt sehr wahrscheinlich mit besserer Wirksamkeit des oberirdischen Abzugbettes der Ševareva jaruga zusammen, deren Gebiet eben vorher mehr zur allgemeinen Überschwemmung des nördlichen Poljenendes beigetragen hat und so die Isolierung des einstigen Sees verzögerte. Die Überschwemmung im nördlichsten Poljenteil hat zum Abfließen außer den genannten Stellen noch ein kleines Schluckloch auf der Sohle des Poljes nahe dem Westgehänge nördlich vom Kazanciponor. In diese kleine Öffnung ergießt sich sonst der Bach aus einer nahe benachbarten Quelle bei \* 716 *m*. Nach den Beschreibungen liegt hier keine Anhäufung von Schutt oder Schottern vor, also ist es wohl eine Gesteinsquelle aus dolomitischen Schichten. Wegen ihrer Lage auf der Abflußseite des Poljes hätten die näheren Umstände schon mehr Beachtung verdient. Das kleine Schluckloch reicht nach A. Grund durch jungtertiäre Mergel zum Kalk hinab.

§ 66. Das Gebiet der Vrbička jaruga hat seine eigenen Ponore. In ihm wird die Überschwemmung groß genug, daß sie beim Hochstande mit der nördlichen verschmilzt. Verhüllt dort im N eine 2 *m* dicke Humusschicht den Untergrund, der nach Cvijić sogleich aus Kalk besteht, während A. Grund eine Zwischenlage tertiärer Mergel vermutet, so wird das im Mittelstück des Hauptpoljes anders, und zwar zum Teil schon an der Jaruga von Vrbica, noch mehr an ihrem Zufluß, der Ljusnička jaruga. Von Sumpfstrecken abgesehen, besteht nun der Boden aus Grobschutt der Mergel mit nur gelegentlich vorhandener, 1 bis 2 *dm* dünner Erdauflage. Während nun am Westrande Quellen fast ganz aussetzen, wird die Ostseite des Poljes nach einer Unterbrechung von 7 *km* ganz besonders reich an

<sup>1)</sup> Nr. 41, S. 130.

periodischen, meist bescheidenen Quellen. Sie vor allem speisen die Jaruga von Vrbica, welche länger fließt als der östliche Arm (Ljusnička j.) und manchmal noch im Juli Wasserlachen in ihrem Bett hat. Die Flußschwinde der Jaruga ist ein zweiseitiger Ponor bei Čaprazlije, den Cvijić leider nicht sehr klar wie folgt beschreibt:<sup>1)</sup> „Zwei Ponore nehmen ihr Wasser auf: jener rechts ist eine Kalkwand, von Rissen zerklüftet, an denen entlang das Wasser einige unterirdische Kanäle gebildet hat. Die Decke des größten Kanals ist eingestürzt, indem sich eine Öffnung an der Oberfläche bildete, die den Namen Konjušnica führt; wenn die unterirdischen Kanäle mit Wasser überfüllt werden, so tritt es durch die Konjušnica wieder hinaus. Der linke Ponor ist ein engerer horizontaler Höhlengang.“ Unter Berufung auf diesen Bericht hat A. Grund, Nr. 20, S. 92, geschrieben: „Im Herbst und Frühling hebt sich hier der Karstwasserspiegel bis über den Ponoreingang in der Regel bis zur Höhe 707,6 m. Das Wasser tritt aus den Ponoren emporsteigend hervor.“ Wer denkt dabei, daß Cvijić ein Wiederausfließen von Jarugawasser bei dem einen Ponor berichtet hat, an einer morphologisch offenbar verwickelt gestalteten Schwundstätte? Dieses Paar Ponore benennt Ballif nach dem Dorfe Čaprazlije. Die Spezialkarte nennt die Schwundstelle Lakalponor; er liegt 13,5 km vom Kazanciponor. Dazwischen fand Grund noch ein kleines Schluckloch neben dem Brunnen Šokinovac, das auf der Spezialkarte als Quelle bezeichnet wird. Sollte es ein Wechselschlund sein? Die Wasseranstauung vor dem Lakalponor hob sich beim Hochstand von

1889	auf	705,4 m (rd)	
1892	„	708 m	
1893	„	705 m	im Frühling
1893	„	707,6 m	im Herbst
1897 <sup>2)</sup>	„	705,3 m	25. I.
1898	„	704,6 m	6. IV.
1899	„	703,3 m	31. V.
1900	„	706,4 m	4. XII.

1892 und 1893 war sie niedriger als gleichzeitig beim Kazanciponor.\*) Die Ufermarken eines Hochstandes von 710 m aus dem Jahre 1901/1902 hat A. Grund noch deutlich vorgefunden.

Einen Teil des Lakalponors hat Ballif 1893 reinigen lassen. Denn er war „vollständig verstopft gewesen und die Jagura hatte andere Abzugslöcher näher dem Westrande gefunden“. Vielleicht liegt in diesen Worten E. Richters (Nr. 39, S. 130) eine aufklärende Ergänzung der Darstellung von Cvijić. Jedenfalls ist der Ponor von Čaprazlije, den Ballif gereinigt hat, nach dessen „Längsschnitt“ (T. III) und Photographie (T. X, Fig. 1) und nach dem Text S. 43, wie folgt beschaffen. Es ist ein „Ponorkessel“ vorhanden, der 1893 bis zu 11 m Wassertiefe aufgefüllt wurde. An der Begrenzung des Kessels beteiligt sich eine 5 bis 6 m hohe Kalkwand als Abfall einer Stufe, die selbst bei Hochstand überflutet wird. Der Abfall bildet eine Bucht oder einen einspringenden Winkel. Ganz hinten zieht ein Schacht herunter, dessen

<sup>1)</sup> Nr. 10 S. 31.

<sup>2)</sup> Die Zahlen von 1897-1900 stammen von Gavazzi. Der Pegel-Nullpunkt lag nach ihm bei 695,84 m,

vordere Wand fehlt, soweit der Fels die Sohle des Ponorkessels überragt. Schlamm und Anschwemmungen verstopften bis hoch herauf an der Wand den Schacht. Rechts von ihm öffnet sich in ihr ein dunkles Höhlenfenster, wohl die Konjušnica im Berichte von Cvijić. Stärkerer Wasserandrang mußte also früher an dem verstopften Schacht vorbei zu der anderen Öffnung fließen, nachdem es die Konjušnica verlassen hatte. Die Ausräumung des im Querschnitt unregelmäßig polygonalen bis dreieckigen Schachtes ergab in etwa 20 m Tiefe sein Einwärtsfallen unter etwa 45°. Man räumte auch diesen Höhlenteil noch weitere 30 m tief aus, stieß aber nicht auf Wasser, auch nicht 50 m unter der Ponoröffnung. Wenn daher hier überhaupt Wasser vorhanden war, so konnte es nach Ballif nur tiefer als 646 m\* gefunden werden. 646 m ist aber immer noch 46 m tiefer als der im Kazanciponor gefundene Wasserstand nach der von A. Grund auffällig tief angenommenen Spiegelhöhe. Man wagt gar nichts, wenn man hier den Unterschied der beiden Wasserstände in der Tiefe auf mindestens 50 m veranschlagt. Denn vielleicht hätte Ballif nach 5 bis 10 m weiterer Grabung auch noch kein Wasser angetroffen. Und zwar wurden diese Wasserstände, wie wir wissen, im selben Sommer 1893 in der Zeitspanne angetroffen, in der die Betten der Ševareva und der Vrbička jaruga trocken lagen. A. Grund hat das Fehlen einer Zeitangabe für den Stand im Kazanciponor bedauert, ohne sich bei Ballif oder bei Ed. Richter zu erkundigen. Leider weiß man auch nicht, ob zuerst der Kazanci- oder der Lakalponor gereinigt wurde. War das Wasser im Kazanciponor im Sinken, so kann es sich später dem vielleicht vorhandenen verborgenen Stand unter dem Lakalponor genähert haben. War es in Ruhe oder gar im Steigen, so bleibt der Höhenunterschied der örtlichen Karstwasserspiegel mit der Größenordnung von mindestens 50 m auf der Abflußseite des Poljes eine ungeheure Verlegenheit für die Lehre A. Grunds\*. Als Verlegenheit hat er dies sogar für den Fall empfunden, daß die Ponore in zwei verschiedenen Jahren zur Trockenzeit gereinigt wurden: Denn diese Möglichkeit blieb ihm infolge seiner Nicht-Erkundigung offen. Aber da Ballif so gar nichts von einer Bewegung des Spiegels im Kazanciponor meldet, kann man nicht bestreiten, daß bei diesen Ponoren auf jeden Fall einigemal 10 m Spiegelunterschied gleichzeitig vorhanden sein können, und wären es auch nur 20 m. Auch das ist eine Verlegenheit für die Lehre A. Grunds. Er suchte ihr mit folgenden gewagten Sätzen zu begegnen: „Bei den Meliorationsarbeiten wurde ein total verschlammter und verstopfter Abzugsschacht bis zu 50 m Tiefe ausgeräumt, ohne daß man auf Grundwasser kam. Es fragt sich jedoch, ob eben dieser Kanal nicht damals nach unten und nach der Seite gegen das Grundwasser abgedichtet war.“ Es fragt sich aber noch viel mehr, ob Ballif als verantwortlicher Kenner der Verhältnisse Menschen in 50 m Tiefe unter Tag an der Wegräumung einer Schlammverstopfung hätte arbeiten lassen, wenn die geringste Gefahr bestanden hätte, daß diese Leute damit ununterbrochen den einzigen Schutz schwächten und zerstörten, der sie vor dem Einbruch von Wassermassen unter einigen Atmosphären Druck und vor dem Ertrinkungstode rettete.<sup>1)</sup> Was Ballifs wahre Ansicht war, würde man ohne alle schriftlichen Quellen aus dieser einen Meldung A. Grunds entnehmen können.

<sup>1)</sup> Man lese bei Schardt (Nr. 40) die Beschreibung des Wassereinbruches in einen Tunnel des Jura, wo aus der vom Tunnel angefahrenen lehmefüllten Spalte das Wasser

§ 67. Stellt somit der bisher berichtete Befund nach wie vor eine Verlegenheit für die Lehre A. Grunds dar, gültig in der Zeit, da die Betten trocken lagen, so erhält die Anwendung seiner Lehre auf das Polje von Livno einen sehr schweren Stoß durch die Schlucktätigkeit des Lakalponors bei Hochwasser. Dieser Wasserschlinger bei Čaprazlije ist nämlich der einzige, bei dem Messungen der einströmenden Flut in Verbindung mit Wasserstandsbestimmungen vorgenommen und veröffentlicht wurden. Die Kurven der Abb. 39 sind von der Fig. 3 auf Tafel III in der Schrift Ballifs abgepaust. Es ist fast unmöglich, in einer wissenschaftlichen, ausführlichen

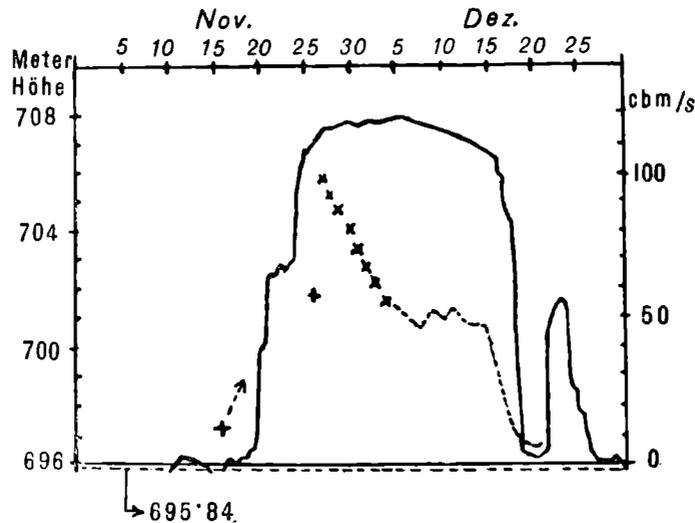


Abb. 39. Ergebnisse der von Ballif vorgenommenen Messungen von Wasserstand und Abfluß beim Lakalponor. Ausgezogene Linie: Wasserstände. Gestrichelte Linie und Kreuze: Abflußmengen. Die Reihe liegender Kreuze gilt nicht für die gleiche Zeit wie die gestrichelte Linie. Jene wurde von Ballif nach einer älteren Beobachtung interpoliert, als der Wasserstand auf 100 cbm/sek gestiegen war. Stehende Kreuze: Das höhere wurde von mir für 58 cbm/sek bei 707,4 m Wasserstand hinzugefügt. Dieser Wert gilt für dieselbe Hochflut wie die gestrichelte Linie (vgl. Ballifs Text). Den Verlauf des Wertes 58 cbm/sek an die gestrichelte Kurve anzuschließen verhinderte das Wetter. Das untere stehende Kreuz gilt auch für dasselbe Hochwasser und bezeichnet nach Ballifs Text dessen Beginn als noch ohne Anstauung 13,5 cbm/sek abfließen.

Karsthydrographie diese unersetzliche Beobachtungsurkunde nicht zu bringen. Nach Reinigung der Spalte bis hinab auf 646 m fand im Herbst und Winter 1893 die Bewegung des Wassers in die Tiefe „unter dem Drucke einer Wassersäule von 61,6 m Höhe = 6,2 Atmosphären statt“. Die Messungen Ballifs „wurden zur Zeit der Flutwelle im Monat Dezember 1893, 1500 m vom Ponorkessel, an einer Stelle vorgenommen, wo der ganze Zufluß sich im geschlossenen Gerinne bewegte. Leider verhinderten Regenfälle und Borastürme die Bestimmung der Abflußmenge zum

den Lehm allmählich auspreßte, obwohl man gar nicht darauf aus war, sie zu reinigen. Auch die Photographien der Verwüstungen vor dem doch über 4 km entfernten Tunnelleingang sind sehr lehrreich. Vgl. § 20.

Beginne der Anschwellung. Für deren Ablauf sind dieselben aber vollkommen durchgeführt. Die Messungen ergaben, daß der Felsspalt ohne Anstauung\* bis zu  $13,5 \text{ cbm}$  per Sekunde abzuführen vermag“. Diesem Werte entsprechend habe ich in Abb. 39 das linke stehende Kreuz hinzugefügt, weil Ballif nur fortlaufende Messungen und Schätzungen in seine Zeichnung aufgenommen hat. „Mit gesteigertem Zufluß beginnt die Schwellung und erreicht die Höhe von  $11,6 \text{ m}$  über der Ponoröffnung, bei welcher der zur Zeit der Beobachtungen konstatierte Maximalabfluß  $58 \text{ cbm}$  per Sekunde betrug“. Diesen Wert habe ich in Abb. 39 durch das höhere stehende Kreuz angezeichnet. „Auf Grundlage früherer Beobachtungen kann aber die Maximalaufnahmefähigkeit dieses Ponors mit mindestens  $100 \text{ cbm}$  per Sekunde angenommen werden. Vergleichen wir den absteigenden Ast der Wassermengenkurve mit jener des Wasserstandes,<sup>1)</sup> so tritt das raschere Abnehmen der ersteren deutlich hervor und wird durch den Umstand der allmählichen vollständigen Sättigung der Spalten, sowie durch die Wahrscheinlichkeit der Rückwirkung tiefer im Gebirge zirkulierender, von anderen Seiten kommender Wassermengen erklärlich. Wie auch durch anderweitige Beobachtungen konstatiert, ist demnach die Kapazität der Ponore beim Beginn der Anstauung\* am größten und nimmt allmählich beim Verlaufe derselben ab.“ Wie die Figur zeigt, versteht Ballif hier unter Anstauung den Hochstand des Wassers, der mehrere Tage nur ganz wenig um  $707,6 \text{ m}$  schwankte, hingegen ist hier nicht als Anstauung bezeichnet der Beginn der Füllung des Ponorkessels über der Spalte bei  $696 \text{ m}$ . Daher ist es im Hinblick auf die Tatsache der Messungsergebnisse ein sprachliches Ungeschick, wenn Ballif vorher von einem Abfluß von  $13,5 \text{ cbm/sek}$  „ohne Anstauung“ sprach. Dort bedeutete es das Fehlen einer Wasserbedeckung des Ponorkessels. Dem geringen Abfluß von  $13,5 \text{ cbm/sek}$  entspricht im absteigenden Ast der Kurve ein Wasserstand von etwa  $697,3 \text{ m}$ , also von nur  $1,3 \text{ m}$  Wasserhöhe über der schluckenden Spalte in dem nach Ballifs Fig. 2 bis  $5,3 \text{ m}$  tiefen Ponorkessel. Nun aber gibt Ballif selbst an, daß die Verschluckung beim Sinken des Wasserstandes durch Hinzutritt anderer Umstände gehemmt war; es waren also  $13,5 \text{ cbm/sek}$  Wasser vor dem Anschwellen der höchste erreichte Wert, solange die Ponoröffnung nicht unter Wasser kam. Erst als die Hemmungen wirkten, brauchte der Ponor die  $1,3 \text{ m}$  Wasserbedeckung, um  $13,5 \text{ cbm/sek}$  zu schlucken. Dem anfangs freien Abfluß entspricht das linke aufrechte Kreuz in Abb. 39. Schaut man unabhängig von einer sprachlichen Ungeschicklichkeit nur die Kurven und Zahlen Ballifs an, so sieht man: zwischen dem Wert von  $13,5$  und  $58$  bzw.  $100 \text{ cbm/sek}$  Verschluckung ist man im aufsteigenden Teil der Wasserstände. Umgekehrt: die sinkenden Wasserstände entsprechen überall abnehmender Verschluckung; beim langsamen Teil des Sinkens hat die Verschluckung kleine Zuckungen, die leicht durch vorübergehende Verstopfung erklärbar sind. Während des andauernden Hochstandes, dessen Schwankungen um eine Mittellage sehr gering sind, löst sich allerdings auf Grund interpolierter Werte von früheren Beobachtungen die rasch sich vermindernde Verschluckung von der noch dauernden Hochlage des Spiegels ab, wofür Ballif oben gebrachte Erklärungen anbietet. Nirgends entspricht jedoch der deutlichen und anhaltenden Spiegelhebung eine

<sup>1)</sup> Die Sperrungen sind von mir veranlaßt.

Abnahme der Verschluckung, und von zwei Zuckungen abgesehen, nirgends einer Spiegelsenkung eine Zunahme der Verschluckung.

In gar keinem einzigen Augenblick „tritt“ aus diesem Ponore „das Wasser emporsteigend hervor“. Die Verschluckung wird, wie Abb. 39 zeigt, nicht einmal Null, geschweige, daß sie negativ, d. h. eine Emporquellung würde. Man kann ganz ruhig sagen: soweit es in der Natur, wo ein Fluß bei Hochwasser alles mögliche mit sich reißt, eine Befolgung der Beziehung: höherer Wasserstand — größere Verschluckung geben kann, ist sie im Lakalponore verwirklicht. Die Mißdeutung der Messungsergebnisse Ballifs, an der A. Grund auch 1910 festhielt, kann daran nichts ändern: Dieser schrieb damals gegen Katzer (Nr. 22, S. 190): „Nach Ballif nimmt die Kapazität der (Schlot-)Ponore im Polje von Livno im Laufe der Inundation ab. Diese Bemerkung kann jedenfalls nur für die Phase gelten, solange sich der Wasserstand hebt.“ — Hier ist bemerkenswerterweise an Stelle des Wortes „Anstauung“ bei Ballif das „Inundation“ gesetzt. A. Grund hätte schreiben können und sollen: nach Ballif nimmt die Kapazität des Lakalponors zu, solange sich der Wasserstand hebt. Die Abnahme der Schluckfähigkeit hingegen beginnt schon bald nach Eintritt des Hochstandes der Inundation, also schon vor dem Sinken ihres Spiegels, wofür Ballif besondere Gründe vermutet. Diese Mitteilung und nur eine solche verträgt es, der Kurve Ballifs und den Textstellen gegenübergestellt zu werden, auf denen die kleinen von mir hinzugefügten Kreuze beruhen.

Wenn schon eine vorgefaßte Meinung 1903 jene sprachliche Nachlässigkeit Ballifs trotz seiner Messungskurve mißverstehen konnte, so brauchte es nicht 1910 zu dem Satze kommen: „Was die gesteigerte Schluckkraft der Ponore bei Inundation betrifft, so mußte Katzer diese erst durch exakte Messungen belegen und dartun, für welche Phase der Inundation das gilt.“ Katzer hätte nur in Ballifs Werk nachsehen müssen, was aber 25 Jahre lang niemand getan zu haben scheint. Zu Unrecht hat übrigens schon 1903 A. Grund den Neigungswinkel der Ponore in diese Fragen hereingezogen. Es ist Ballif so wenig wie sonst einem Wassertechniker eingefallen, die grundsätzlichen Beziehungen zwischen Druck-, Geschwindigkeits- und Reibungshöhen von dem Neigungswinkel des Röhrenstückes abhängig zu machen, den man hinter der Öffnung des Schluckschlundes beobachtet.<sup>1)</sup>

Ballifs Kurve zeigt eine Besonderheit, nämlich die rasche Abnahme der Verschluckung, während die Hochflut durch Wochen einen ganz wenig schwankenden und veränderlichen Stand in der Nähe ihres Scheitels beibehält. Diese Besonderheit kann kaum in solchem Ausmaß als gesichert gelten, denn die Beobachtungen, die Ballif hier eingefügt hat, stammen aus einer früheren Zeit. Er hat sie angestückelt, weil ihm das Wetter nur den höchsten Wert von 58 *cbm*/sek zu messen erlaubte, der aber nach Ballifs Schätzung bedeutend überschritten wurde. Ob er aber deshalb gleich berechtigt war, eine Kurve bei 100 *cbm*/sek nach früheren Beobachtungen anzusetzen, bleibt solange zweifelhaft, als nicht feststeht, daß die Abflußmengen der Ponore zu verschiedenen Zeiten beim selben Wasserstand übereinstimmen.

---

<sup>1)</sup> Alles, was A. Grund im Hinblick auf diese Unterscheidung von Schlotponoren (Vertikal-) und Torponoren (Horizontal-) noch vorbringt, ist ein Gemisch von Wahrheiten, die niemand bestritten hat, weil sie für beliebig geneigte Schluckröhren gelten, und von ganz haltlosen Behauptungen.

Gerade Abb. 39 ist nicht geeignet, solche Zweifel zu beheben. Hier soll aber der Besonderheit eine gewisse Wirklichkeit zuerkannt werden. Alles, was Ballif dafür als Erklärung anbietet, läuft hydromechanisch auf den Einfluß verborgen wachsender Widerstandshöhen hinaus. Es ist ein wesentlicher Mangel dieser Erklärung, daß sie auf gar keine eigenen Beobachtungen gestützt ist, und ein zweiter, daß sie nichts über das Verhalten der Zuflüsse oder Niederschläge aussagt, welche die Hochflut speisten, als der Abfluß binnen 10 Tagen auf die Hälfte gesunken sein soll. Denn wir sehen, daß der Wasserstand durch Wochen fast gleich blieb, das erforderte aber, daß dem verminderten Abfluß auch ein verminderter Zufluß entsprach. Dann ist es aber sehr schwer, die unvermeidliche Folgerung anzunehmen, daß alle Zuflüsse des Poljes einen abnehmenden Ertrag geliefert haben, während in verborgenen Adern, die unter dem Polje mit der Ponorröhre kommunizierten, der Andrang des Wassers so stieg, daß man dem Gegendruck seiner Widerstandshöhe eine Herabsetzung des Abflusses 42 *cbm/sek* binnen 10 Tagen zuschreiben kann. Es ist wohl unnötig, diese Überlegungen für ein nicht ganz als reell angesehenes Kurvenstück noch weiter auszubauen. Hingegen entspricht es vielfacher Beobachtung, daß in Ponoren Schlamm, Erde und Pflanzenteile sich anreichern, daß man genötigt ist, sie alle paar Jahre teilweise auszuräumen, das übrige dem nächsten Hochwasserdruck überlassend. Solche Einschwemmungen werden bei steigender Flut noch vorwiegend in Rücken hindurchgerissen oder gepreßt, bei fallender Flut in den Klüften eher abgelagert. Tritt dies nach vorher kräftiger Erosion der Jarugen schon während eines Hochstandes ein, so muß der Abfluß sinken. Es ist dann auch nicht so gekünstelt, daß nach Erreichen der Scheitellagen des Spiegels die Zuflüsse nachlassen, sowohl die den Poljensee ernährenden, als auch alle anderen. Ich verzichte darauf, darzulegen, was alles in der Kurve Ballifs für diese Erklärung des teilweise als wirklich anerkannten, vorzeitigen Niedergangs der Verschluckung spricht.

§ 68. Die der Messung vorangegangene Ausräumung des Lakalponors hatte den Erfolg, daß die Überflutung des zugehörigen Poljenabschnittes, die früher jährlich 6½ Monate \* dauerte und die ganze Breite des Poljes einnahm, sich auf wenige Tage und einige Bodenmulden an der Jaruga beschränkte. Man erkennt dies daran, daß bei einer Überflutung bis 707,6 *m* Ballif in 1500 *m* Abstand vom Ponor ein geschlossenes Gerinne zur Messung des Durchflusses zur Verfügung gehabt hatte.

In den besonders nassen Zeiten der Jahre 1901 und 1902 kam es ausnahmsweise wieder zu einer Überschwemmung bis 710 *m* in der Breite des ganzen Poljes, die sich aber innerhalb dreier Monate \* abspielte. Es ist klar, daß sich im Laufe der Jahre die Verschmierung der Klüfte erneuert. Die nur begrenzte Dauer der erreichten Vorteile spricht nicht dafür, daß die Überschwemmungen entstehen, weil — wie A. Grund lehrte — das Gebirge Karstwasser hervortreten läßt, oder schon beim Steigen der Flut vermindert schluckt, sondern der Umstand, daß es immerhin nach der Reinigung der Ponore eine Zeitlang besser wird, spricht gegen diese Theorie. Wäre auf der Abflußseite das Wasser im Karst zeitweilig höher als die Poljensohle und sein Hervortreten die Ursache der Überschwemmungen, so müßte das Freimachen der Ponore den Zustand sofort noch mehr verschlimmert haben. Bei so großen Überflutungen wie 1901 und 1902 wird auch die Schwelle zwischen Ždralovac blato und südlichem Ševarevo blato unter Wasser gesetzt und auch ein Sattel in der Schwelle, welche das

Ploučagebiet im NW begrenzt. Das sind dann die Zeiten, wo 260 *qkm* unter Wasser stehen, was früher ganz gewöhnlich eingetreten ist.

Wir wissen also: beim Lakalponor besteht zwischen Höhe der Überschwemmung und Verschluckung beim Anschwellen und Sinken eine grundsätzlich gleichsinnige Beziehung. Sollte beim Kazanciponor, wo nichts gemessen wurde, die entgegengesetzte Beziehung eine Rolle spielen, so können die Klüfte zwischen beiden nicht zu ein und demselben Karstwasser gehören. Sollte sich der Kazanciponor jedoch grundsätzlich wie der Lakalponor, wenigstens bei Hochflut, verhalten, so können die Kluftsysteme beider wohl untereinander zusammenhängen oder auch nicht, aber nicht mit jenen, welche auf der anderen (der nö.) Seite des Poljes die Jarugabetten mit dem Wasser periodischer Quellen speisen (vgl. § 60). Angesichts dieser Umstände ist es bemerkenswert, daß Gavazzi auf der Zuflußseite des Poljes bei Vrbica gegenüber dem Kasanciponor ebenfalls einen Ponor erwähnt, mit Pegel und mehrjährigen Wasserstandsbeobachtungen.<sup>1)</sup> Zu der Zeit, als dort, im NE Wasser geschluckt wird, kann das Kazanciponor nur unter der Bedingung Wasser abgeben oder höher steigen lassen, daß es über einer Erweiterung derselben Röhre liegt. In jedem anderen Fall ist eine verborgene Verbindung beider Ponore zur Zeit solcher entgegengesetzter Tätigkeit unter dem Polje im Widerspruch mit der Mechanik von zusammenhängenden Druckströmungen jeder Art. Es ergibt sich sogar die Möglichkeit, daß die Hohlräume, die bei Kazanci Wasser schlucken, weder mit denen des Vrbicaponors noch mit denen des Schlingers von Capražlije (Lakalp.) zusammenhängen.

§ 69. Die nächste große Mulde des Senkungsfeldes bei Livno enthält das oberirdische Einzugsgebiet der Plouča. So heißt die Sammelader, die zeitweilig gefüllt wird von der Studba und der aus den Quellflüssen Bistrica und Žabljak gebildeten „Jaruga“ bei Livno. Alle drei Zuflüsse der Plouča gehen aus ständigen Karstquellen hervor und führen daher das ganze Jahr Wasser, und zwar nach Ballif (S. 39).

	bei Niederwasser	bei Hochwasser
	<i>cbm/sek</i>	<i>cbm/sek</i>
die Bistrica	0,79	43,0
der Žabljak	2,0	31,0
die Studba	1,97	63,0

Daß dies Mittelwerte einer nicht näher genannten Reihe von Jahren sind, ergibt eine Mitteilung Ballifs, wonach im Jahre 1891 die Studba bei Hochwasser bis 115 *cbm/sek* führte. Die Niederwassermengen reichen nicht aus, um die Plouča aufrechtzuerhalten, dann liegt deren Ponorgruppe am SW-Rand des Poljes zwischen dem Dorf Čaić und der Siedlung Prolog han trocken. Zugleich bilden die drei Quellflüsse mit dem Wasser, das sie nicht an Karstspalten verloren haben, am Ende ihres Laufes den Sumpf Drinovac, etwa nw von Livno. Erst durch Menschenhand wurde früher die Studba hierher abgeleitet, die vordem selbständig zu den Ponoren floß<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Nr. 17, S. 110, 112. A. Grund und Cvijić ist dieser Ponor allem Anschein nach entgangen.

<sup>2)</sup> Nach Ballif (S. 45) noch um 1875.

und nach den Karten 1:75000 und 1:200000 mindestens teilweise zur mittleren Plouča abgeleitet war. Der Sumpf Drinovac, 4 *qkm*, bestand ganzjährig und in solcher Größe erst, seit die Studba herzugeleitet wurde, damit andere Gebiete trocken würden. Der Studbakanal, den Ballif gebaut hat, stellte den früheren Zustand wieder her, um den Sumpf Drinovac zu verkleinern, aber auch, um die Versumpfung und Überflutung des übrigen Livanjsko polje einzuschränken. Denn die Versumpfung, 24 *qkm* überziehend, reicht vom Drinovac nach SW quer über den ganzen, fast unmerklich geneigten Schwemmkegel der Studba und geht bis 713 *m* empor, während die Spitze des Kegels 715 *m* hoch liegt. Auf ihm fällt die Versumpfung größtenteils außerhalb der Grenzen der periodischen Überflutungen des Plouča-beckens. Der Sumpf des Schwemmkegels ist nach Ballif (S. 46) ein Grundwassersumpf, getragen von einer Tegel- und Mergelunterlage und gespeist vom Wasserinhalt der mergeligen Einlagerungen des benachbarten nördlichen Bijelopolje. Die aus Žabljak und Bistrica vereinigte Jaruga wird im Sommer durch schluckende Wechselschlünde verhindert, ihren Endsumpf zu überschreiten; nur eine Abzweigung vom oberen Ende des vereinigten Ploučabettes fällt erst weiter im NW einem Schlunde zum Opfer, der nach A. Grund (Nr. 20, S. 101) ebenfalls ein Wechselschlund ist. Ballif hat einen eigenen Abzugskanal vom Drinovac-Sumpf zum mittleren Lauf des Ploučabettes gebaut, welcher Kanal mehr als die Wechselschlünde zum Trockenwerden des Drinovac-Sumpfes beiträgt.

Wenn die Regenzeit eintritt, so entstehen bei Livno auf der NE-Seite des Poljes kräftige periodische Quellen, drei an der Zahl, und die ständigen Ursprünge der Jaruga schwellen gewaltig an. Auch einige Regenbäche helfen dazu mit. Das Bett der Plouča füllt sich mit Wasser und strömt zu den Ponoren sö. Čaić. Die Hochwässer von Žabljak und Bistrica, nach A. Grund auch das Speien der Wechselschlünde, leiten die Überschwemmung ein, welche von den Ponoren bis an den entgegengesetzten, 11 *km* entfernten Rand des Poljes reicht und in welche die höheren Teile des Studbaschwemmkegels wie eine rundliche Halbinsel hinausragen. Nach NW reichte die Flut bis in die Verengung, in der die Ljusnička ihr Wasser sammelt. Die Bistricaquellen brechen zu solchen Zeiten nicht nur verstärkt, sondern auch aus mehreren Quellschloten hervor. Bis 710 *m* schwoll nicht selten diese Hochflut an. Vor den Arbeiten Ballifs war das Ploučagebiet sechs Monate unter Wasser gesetzt. Nachher dauerte dies höchstens zwei Monate und die Spiegelhöhe überschritt nur gelegentlich ein wenig 709 *m*. Am Beginn der Vegetationszeit wurden 2 bis 3 Wochen gewonnen, weil seither die Überschwemmungen spätestens Mitte Mai enden. Im Busko blato wurden keine Ponore gereinigt. Er bleibt mindestens bis Ende Juli, manchmal das ganze Jahr unter Wasser.

§ 70. Die Hydrographie im Hauptteile des Poljes von Livno empfängt eine abschließende Beleuchtung durch die Abflußvorgänge und Wasserstände in den Ploučaponoren, welche die Ponorgruppe von Čaić bilden (vgl. Abb. 40, nach dem Plan auf Ballifs Tafel XVI). Von diesen Schluckschlünden haben Bristovi und Opaki ponor zwei Öffnungen. Südlich des Opaki ponor sind nach A. Grund noch zwei „Alluvialdolinen“, die als Schluckstelle wirken. Vielleicht meint er die Stellen „Ponori“ auf Ballifs Plan. Der erste der Reihe, der Veliki ponor (der „große“), stellte vor den Arbeiten Ballifs seine Tätigkeit zuletzt ein. Seit der kanalisierten

Neuherstellung des Studba-Abflusses bis gegen Čaić dürfte der Veliki ponor das ganze Jahr Wasser empfangen. Er hat die Form einer Doline von 40 bis 50 m Durchmesser mit einem geräumigen Abzug, der dicht unter der Hinterwand der Doline zunächst noch mit einigen meterhohen Stufen, zuletzt ganz steil abwärts führt.

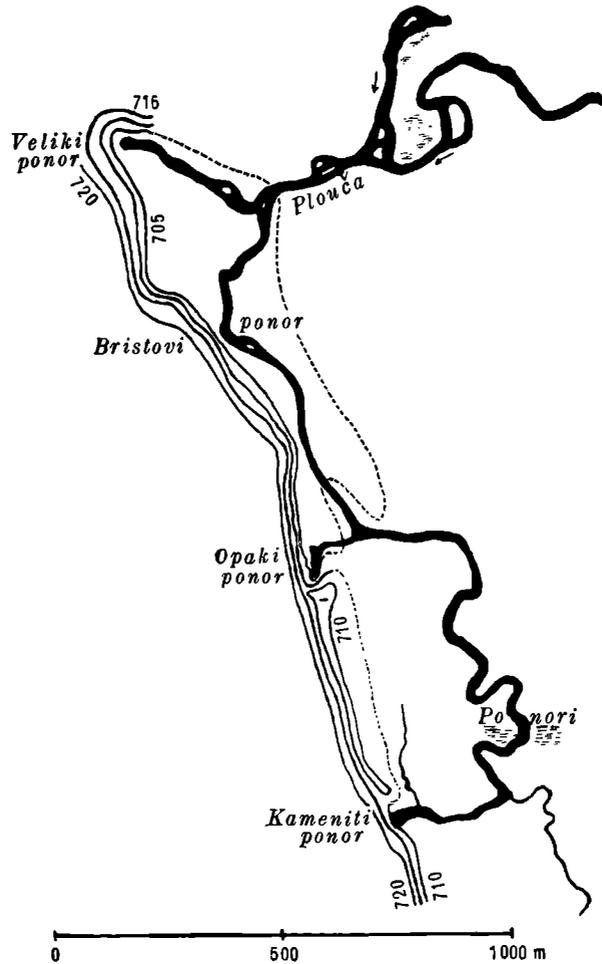


Abb. 40. Plan der Ploučaponore bei Čaić nach Balliffs zweifarbigem Plan. Die 5 m-Isopyhsen sind nur von 705 m aufwärts übernommen, die tieferen bis 695 m herab finden in schwarzer Farbe um die Ponore schwer Platz. In der Ebene sind die Isopyhsen in annehmbarer Weise ergänzt.

Der letzte der Ponore, der Kameniti ponor, wird bei schwindender Flut zuerst trockengelegt. Schon vorher umgeht der Fluß gelegentlich die Stellen „Ponori“. Bristovi und Opaki ponor sind schmale Höhlenspalten; der Bristovi ponor führt steil hinab, geht aber alsbald in ein ganzes Spaltennetz über. Die Öffnung des Opaki ponor birgt in sich einen senkrechten Schlund. Der Kameniti ponor ist eine Höhle im Ge-

hänge, die, 440 *m* weit ins Innere führend, sich auf 32 *m* Tiefe senkt, wo ein 8 *m* tiefer See zwischen Felswänden das Weiterkommen verhindert. Die Breite dieser Höhle schwillt stellenweise auf 6 bis 8 *m* an, die Höhe erreicht 20 *m*. Versturztürmmerhaufen machen den Boden sehr uneben.

Obgleich alle diese Schluckschlünde auf einer Linie von nur 1600 *m* Länge liegen, wurden an ihnen außerordentlich verschiedene Höhen der örtlichen Karstwasserstände nebeneinander festgestellt. Im Hochsommer eines der Jahre nach 1890 und vor 1893<sup>1)</sup> (wahrscheinlich 1892), als alle Ponore trocken lagen, traf Ballif im Veliki ponor das Wasser in nur 10 *m*\* Tiefe<sup>2)</sup> an, im Kameniti ponor jedoch in 32 *m* Tiefe unter der Mündung des zugehörigen Ponors. Da diese Mündungen aber nicht gleich hoch liegen, sondern die des Kameniti ponors höher ist, so sind die Meereshöhen beider unterirdischen Wasserstände um weniger als jene 20 *m* verschieden. Ihrem wahren Unterschied kommt folgende Darstellung nahe. Denn Ballif sagt im Text nicht, wie hoch er die Ponormündungen ansetzt. Man ist darauf angewiesen, es aus seinen Zeichnungen zu entnehmen:

Alle Ponore trocken	Veliki ponor	Kameniti ponor
Höhe der Ponoröffnung	694,5 <i>m</i> <sup>1)</sup>	702 <i>m</i> <sup>3)</sup>
Abstieg zum Karstwasser	—10 <i>m</i> <sup>2)</sup>	32,76 <i>m</i> <sup>4)</sup> errechnet
unterirdische Spiegelhöhe	684,5 <i>m</i> (errechnet)	669,24 <i>m</i> <sup>5)</sup>

Anmerkungen zu dieser Übersicht:

<sup>1)</sup> Nach Ballifs Tafel XVI, Schnitt 4, und nach Gavazzi; Ballif hat bei einem Wasserstand von 709,6 *m* die Fluthöhe zu 15,0 *m* angegeben, was einer Höhe der verbauten Mündung zu 694,6 *m* entspricht. Bei Ballif findet sich die Zahl 694,5 aufgetragen, auf der zweiten Plattform des hölzernen Einbaues von oben gezählt (vgl. Abb. 41 und 42). Der Pegelnullpunkt liegt nach Gavazzi in 695,5 *m* Höhe. Obige Zahl ist die niedrigste unter den genannten Angaben von Ballif und Gavazzi.

<sup>2)</sup> Nicht „10 bis 13 *m*“, wie A. Grund sagt, wobei er 13 *m* subtrahiert.

<sup>3)</sup> Ballif hat auf seiner Fig. 1, Tafel III, etwa 20 *m* vor dem Überhang des Höhlentores die Zahl 702,7 *m*. Der Pegelnullpunkt ist nach Gavazzi 702,8 *m*. Beide Zahlen wären auf 703 *m* abzurunden. Für die Schwelle des Höhlentores selbst bin ich auf 702 *m* herabgegangen.

<sup>4)</sup> Ballif gibt „rund“ 32 *m* an.

<sup>5)</sup> Diese Zahl ist auf dem Schnitt Ballifs für den Wasserspiegel des Sees unmittelbar eingetragen.

Nach dieser Übersicht bestand also ein Höhenunterschied der unterirdischen Spiegel in den beiden Ponoren von 684,5 *m*—669,24 *m* = 15,24 *m*. Für das folgende vergleiche man auch Abb. 41. A. Grund fand die Höhe des Karstwasserspiegels im Veliki ponor nicht zu 684,5 *m*, sondern zu 676 *m*, indem er von 689 *m* statt von 694,5 *m* Höhe 13 *m* abgezogen hat, wo er übrigens nur 10 *m* hätte abziehen dürfen. Dadurch vermindert sich die rechnerische Verschiedenheit der Spiegel im Veliki ponor und im Kameniti ponor auf 6,76 *m*, richtiggestellt auf 9,76 *m*. Auch das ist außerordent-

<sup>1)</sup> Vgl. Richter, Nr. 39, S. 131 und Ballif, S. 49f.

<sup>2)</sup> A. Grund, der die Ponore schluckend fand, rechnet (Nr. 10, S. 107) mit unrichtiger Zitierung der Angabe Ballifs (auf S. 42 in dessen Werk) beim Veliki ponor mit 13 *m* Tiefe des Spiegels unter der Mündung zur Trockenzeit, was den Unterschied gegen den See des Kameniti ponor vermindert.

lich viel für nur 1600 voneinander entfernte Schluckschlünde im Hochsommer und steht den Analogien des Karstwassers mit dem Grundwasser sehr im Wege. Dazu kommt aber, was oben in der Anmerkung 1 zur vergleichenden Übersicht gesagt

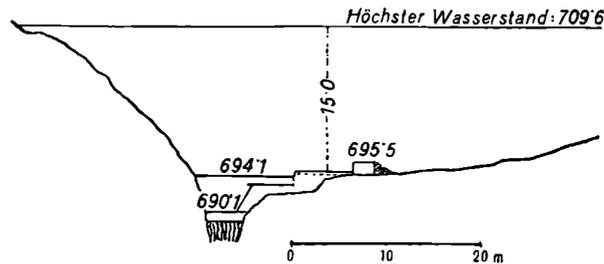


Abb. 41. Westöstlicher Schnitt durch Doline und Schlund des Veliki ponors im Polje von Livno, nach Ballifs Zeichnung, vereinfacht durch Weglassung der einzelnen Balkenlagen der Holzkonstruktionen. Ausgangshöhe für die relative Lage des Wasserspiegels 694,6 m. Pegelnullpunkt 695,5 m.

wurde. Darnach ist nicht 689 m der Wert für den Veliki ponor, auf den Ballif und Gavazzi die relativen Höhen der dortigen Wasserstände bezogen haben.

Schaut man in Ballifs Zeichnungen nach, worauf Grunds Verwendung der Zahl von 689 m beruht, so ist 689,1 m die Höhe des allertiefsten Einbaues schon in der Enge des Schlundes (Ballif, Fig. 2 und 3 auf Tafel XVI). Gleich darunter ist die unverbaute Felsenröhre. Daß Ballif nicht dort unten die Ponormündung annahm, ergibt auch ein Blick auf seine Photographie 1, Tafel XVI. Der Felsenüberhang des dunklen Schlundes reicht bis zur Schulterhöhe eines Mannes emp, der am Rande der Plattform von 693,1 m steht, wie der Vergleich des Bildes mit dem Plan derselben Tafel ergibt, den Abb. 42 zeigt. A. Grund (a. a. O., S. 107) selbst beschreibt seine Beobachtung mit den Worten: „Mit steilem Gefälle eilte das Wasser von 704 auf 689 m herab und verschwand dann in dem Schachte, der mit Holz verbaut ist . . .“. Die Höhe von 704 m entspricht noch der Poljensohle. 9 bis 10 m tiefer liegt der Grund des Ponors nach Ballif und Gavazzi; ohne die Einbauten hätte Grund gar nicht die Höhe von 689 m für die tiefste sichtbare Stelle des Abflusses feststellen können. Vgl.

Abb. 43. Eine genaue Auseinandersetzung mit den Angaben Ballifs hätte ihm nicht erlaubt anzunehmen, daß jener den Wasserspiegel erst in 676 m Höhe festgestellt hat. Zusammengefaßt ergibt sich, daß hier auf 1600 m Abstand in trockenen Zeiten eine Verschiedenheit der Wasserstände in den Ponoren vorlag, der im Falle die Wasser-

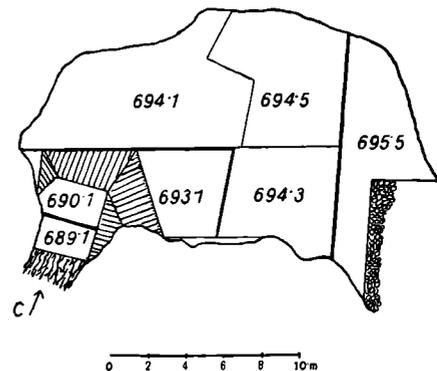


Abb. 42. Plan der Doline des Veliki ponors und der hölzernen Einbauten mit abgestuften Plattformen, von denen aus die Reinigung des Ponors erleichtert ist. Die Zahlen bedeuten die Meereshöhen der Plattformen. C: Schnitt- richtung der Abb. 43 (vgl. Nr. 3, T. XVI, Fig. 2). Der felsige Überhang des Schluckschlundes reicht bis zur Schulterhöhe eines Mannes, der auf Plattform 693,1 steht, d. h. bis zu etwa 694,5 m.

inhalte kommunizierten, mindestens 1 bis  $1\frac{1}{2}$  Atmosphären Druckunterschied bedeuten würde, ohne daß irgend welche Erscheinungen gemeldet wurden, welche die notwendigen Folgen eines solchen Zusammenhanges darstellen würden. Für die Wasserstände des Hochsommers im Bristovi und Opaki ponor fehlen leider Angaben. Im Bristovi ponor wurde in 13 m Tiefe noch kein Wasser gefunden und die Ausräumung des Schlammes noch fortgesetzt, ohne daß Ballif in seiner Schrift den weiteren Befund meldete. 13 m Tiefe bedeutet

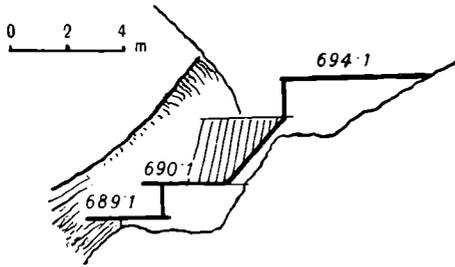


Abb. 43. Schnitt durch den Schlund des Veliki ponor gemäß *C* in Abb. 42, nach Ballif, wie in den vorigen Abbildungen vereinfacht (vgl. Nr. 3, T. XVI, Fig. 5).

hier etwa 690 m und weniger. Es wurde also das Wasser in Tiefen nicht gefunden, die auch in den anderen Ponoren oberhalb der Spiegel lagen. Vom Opaki ponor fehlt eine direkte Angabe. Seine Mündung liegt nach Ballifs Isohypsen bei 695 m. Grund fand den Ponor bis 704 m mit Wasser angefüllt. Nach Richter (a. a. O., S. 131) steht in den Ploučaponoren das Wasser 30 bis 40 m unter der Mündung. Wendet man diese rohen Zahlen auf den Opaki ponor an, da sie auf den Veliki und Bristovi ponor nicht passen, so stünde im Hochsommer das Wasser darin bei etwa 660 bis 670 m, also eher noch tiefer als im Kameniti ponor. Hier kann erinnert werden, daß — allerdings in einem späteren Jahr — im 13,5 km

entfernten Lakal ponor die Arbeiter in einer Höhe, 23 m niedriger als der Seespiegel des Kameniti ponor, immer noch keine Spur von Wasser gefunden hatten. Der örtliche Karstwasserstand liegt also an den Ploučaschlingern wieder erheblich höher, wenn auch nicht so hoch wie im einstigen See des Ždralovac blato. Daß die Abzugröhren der Ploučaponore einen unmittlerbaren überkapillaren Zusammenhang ihrer zeitweiligen Strömungen haben, ist ausgeschlossen. Ihre Spiegelunterschiede würden sich in etlichen Minuten größtenteils ausgeglichen haben. Ein mittelbarer hydrodynamischer Zusammenhang könnte in der Form gedacht werden, daß man die verschiedenen Wasserniveaus als Standrohrspiegel einer tieferen Strömung parallel zum Poljenrande mit bedeutenden Reibungsverlusten und Querschnittsänderungen ansieht, oder daß man in der Tiefe quer zum Polje gerichtete, voneinander genügend getrennte Strömungen annimmt. Endlich könnte es sich um ruhende, voneinander ganz getrennte Wasserreste handeln. Alle diese Möglichkeiten, deren jede weder bewiesen noch widerlegt ist, schließen die Vorstellungen von A. Grund aus, daß sich die Wasserfüllungen der Spalten wegen eines allgemeinen ausreichenden Zusammenhanges auch hinsichtlich der Spiegelstände zu einem Karstwasser zusammenfassen lassen.

**71.** Bemerkenswert ist, was A. Grund am 6. Juli 1902 fand, als es ungewöhnlich naß war und alle Plouča ponore Wasser empfangen. In den Veliki ponor ergoß sich das Flußwasser von 704 m an mit steilem Gefälle. In welcher Tiefe es damals einen Druckspiegel erreichte, wird nicht gesagt. Nach der Darstellung von A. Grund scheint das nicht über 690 m Seehöhe eingetreten zu sein. Der Bristovi ponor war in 705 m Höhe mit Wasser bedeckt, das „langsam und lautlos mit ganz leichter drehender Bewegung in zwei Buchten unter dem Kalkgehänge des Poljes verschwand“. Dies veranlaßte Grund zu der Annahme, daß der Ponor „offenbar noch nicht hinreichend gereinigt worden ist“. Immerhin darf man dagegenhalten, daß Ballif den Veliki ponor nur bis 10 m Tiefe ausräumte, wo er Wasser fand, während er den Bristovi ponor bis 13 m Tiefe ausräumte und dann noch die Reinigung der dort einsetzenden Spaltenverzweigung fortsetzte. „Der größte Teil des Wassers floß weiter zum Opaki ponor. Dieser hat ebenso wie der Bristovi

ponor zwei Sauglöcher. Nur das eine ist ausgeräumt worden und hat Holzeinbauten zur leichteren Reinhaltung bekommen. Es ist ein senkrechter Schacht, der vom Boden des Poljes in den Kalk hinabführt. Mit gewaltigem Getöse stürzte das Wasser von der Höhe von 704 *m* etwa 30 *m* tief hinab in den Schacht und verschwand auf der Westseite des Schachtbodens in Spalten. Zum anderen, ungereinigten Saugloch führt ein Seitenarm. Das Wasser stand über dem Saugloch 703 *m* hoch und verschwand in langsamer Drehung...“ Auch der Opaki ponor nahm zur Zeit von A. Grunds Besuch nicht alles Wasser auf. Der Rest desselben verschwand erst im Kameniti ponor. Er floß dort einfach in die Höhle. Dem Besuche A. Grunds war ein ungewöhnlicher Hochstand bis 710 *m* vorausgegangen, der seine Spuren hinterlassen hatte.

Aus diesem Bericht gehen folgende wichtige Verhältnisse hervor. Der Spiegel des örtlichen Karstwassers im Veliki ponor stand mindestens 15 *m* tiefer als der gleichzeitige Spiegel über dem seinerzeit weiter hinab gereinigten Bristovi ponor (690 *m* und 705 *m*). Der Spiegel des einen Schlundes vom Opaki ponor lag mindestens 30 *m* niedriger als jener über dem Bristovi ponor und über dem anderen Schlunde des Opaki ponor (704 *m*), der allein nicht gereinigt worden war. In einer nassen Zeit betragen also die gleichzeitigen Spiegelunterschiede in und an den gereinigten Ponoren auf wenige hundert Meter Abstand drei Viertel der maximalen Jahresschwankung, die am Kameniti ponor 40 *m* erreicht! Hierin zeigt sich die große Bedeutung der Widerstandshöhen in verschiedenen weiten oder rauen Röhrenströmungen, deren Unterschiede um so schärfer hervortreten, je mehr in alle Schlünde reichlich Wasser floß. Selbst der ungereinigte Arm des Opaki ponors ist lehrreich. Seine Verstopfung ist ohne grundsätzliche Bedeutung. Hydraulisch ist die Wirkung von Sand- und Schlammenschwemmungen und starken, rein felsigen Verengungen grundsätzlich gleichbedeutend. Beides reicht aus, um einen einheitlichen Karstwasserspiegel in eine Anzahl örtlicher, höchst ungleicher Spiegelstände zu zer schlagen. Bei Flußschwinden kann allein durch die Ungleichheit der Widerstandshöhen ein Unterschied von 30 *m* entstehen, ganz gleich, ob die Abzugsspalten in der Tiefe untereinander zusammenhängen oder nicht. Wir sehen immer wieder: ohne Kenntnis der Querschnitte des ganzen unterirdischen Verlaufes darf man aus dem Karstwasserstand eines Hohlraumes, besonders an tätigen Schluckschlünden, keinerlei Schluß auf die Spiegel in ganz nahen Hohlräumen ziehen, auch wenn sie in Zusammenhang stehen. Steht im Polje von Livno die allgemeine Überschwemmung bei 710 *m*, so werden sich die Unterschiede der Niveaus im benachbarten Karstinneren wohl verringern, aber ein Schluß auf die wirkliche Höhe der Wasserstände in jenen Karstspalten der Abflußseite, die nicht unmittelbar vom Ponor ausgehen, beruht auch beim Hochstand der Überflutung auf gar nichts und hat keine Tragkraft. Noch verfehlt ist es aber, aus niedrigen sommerlichen Wasserständen im Karstinneren, die man gerade beobachten kann, Schlüsse auf die Nachbarschaft zu ziehen, oder gar eine allgemeine Karstwasserschwankung mit den Niederschlagshöhen in Beziehung zu bringen, um eine mittlere Klüftigkeit zu berechnen. Wissenschaftlich unerlaubt ist es schließlich, auf Grund vereinzelter Beobachtungen oder der Stände oberirdischer Gewässer die Karstwasserstände weiter Gebiete durch Isohypsen darzustellen, in Analogie zu den Grundwasserisohypsen.

Zwar hat A. Grund dies nicht getan, aber er hat dieser Vergrößerung seiner Fehler in noch viel späterer Zeit nicht vorgebeugt. Hat er doch selbst allzuoft an Stelle haltbarer Erkenntnisse nur eine persönliche Auffassung treten lassen, die aber nichts zu besagen hat, wenn sie mit rücksichtsloser Treue gegenüber den Tatsachen schlecht in Einklang steht.

§ 72. Durch Ballif haben wir auch einige Zahlen über die Mengen des an den Ploučaponoren verschluckten Wassers. „Die meßbare Quantität, welche der Kameniti ponor ohne Überschwemmung noch abzuführen vermag, wurde mit 11,3 *cbm* per Sekunde bestimmt, jene der gesamten Ponore bei Čaić . . . mit 30,6 *cbm* per Sekunde.“ Dies gilt nach S. 47 in Ballifs Werk ebenfalls „ohne eine die Überschwemmung hervorrufende Anstauung“. Auf S. 43 schreibt er hingegen die 30,6 *cbm* einem bis zur Kote 708,3 reichenden Wasserstande zu. Hier muß ein Versehen vorliegen. Denn dieser Wasserstand ist schon der einer bedeutenden Überschwemmung. Wahrscheinlich soll es heißen 703,8 *m*, denn dann gibt es noch keine Überschwemmung. Auch ist es ganz einleuchtend, daß alle vier Ponore ohne Überschwemmung knapp dreimal so viel schlucken als der stärkste, aber bei 708,3 *m* wäre eine so geringe Verschluckung wie 30,6 *cbm*/sek um so weniger glaublich, als dann die Plouča über 100 *cbm* und selbst das Doppelte an Wasser heranführt (vgl. § 69), bis bei einer Überflutung im Niveau zwischen 709 und 710 *m* der Spiegel durch Wochen fast ruhig wird und ein angenähertes Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluß verrät.<sup>1)</sup>

Südöstlich des Kameniti ponor gibt es an der Abflußseite des Poljes von Livno sowohl Quellen als auch Ponore, doch sind die Erscheinungen im Bijelo polje nicht so vielseitig aufgeklärt.

§ 73. Suchen wir in knapper Form ein möglichst allgemeines Ergebnis dieses Abschnittes festzuhalten. Wir befinden uns im Polje von Livno innerhalb eines Kalkgebietes, das nach A. Grunds Vermutungen auf einigen Randstrecken von verborgenen Dolomitantiklinen abgedämmt ist, aber von solchen nicht in mehrere Kammern untergeteilt wird. A. Grund hat in solchen Fällen das Vorhandensein eines innerhalb der dolomitischen Abdämmung im Kalke zusammenhängenden Karstwassers angenommen. Die Voraussetzungen für diese Auffassung sind aber im Polje von Livno nicht gegeben. Nur durch eine entstellende Verkennung wesentlicher Beobachtungstatsachen konnte der Schein aufrecht bleiben, als ob ein allseitiger Zusammenhang der Karsthohlräume bestünde, die dieses einheitliche Karstwasser beherbergen sollen. Die Wiederherstellung der wirklichen Befunde hat ein ganz anderes Bild ergeben. Nehmen wir einmal an, daß die Beobachtungen nur die starke Verschiedenheit der einzelnen gleichzeitigen Spiegelhöhen enthalten würden und nicht auch die Nachweise eines weitgehenden Getrenntseins der Hohlräume. A. Grunds bis über Hunderte von Quadratkilometern ausgebreiteter Karstwasserkörper wurde doch eingeführt als Widerspruch gegen die häufige Annahme allzu vereinzelter und rätselhaft verlaufender Verbindungen zwischen Quellen und Gewässerschwinden, ferner zwischen diesen und Wiederausflüssen. Die Annahme A. Grunds hat eine einheitlichere und dabei einfachere Lösung der karsthydro-

<sup>1)</sup> Vgl. die Kurven der Tab. IV bei Ballif.

graphischen Fragen verheißen. Da ist schon der Befund so ungleicher Spiegelhöhen eine gewisse Widerlegung; mit übereinstimmenden Spiegelschwankungen hat man es selbst in bescheidenen Umkreisen nicht zu tun. Es bedarf vielmehr durchaus nicht einfacher, ja rechnerisch nur umständlich zu bewältigender und mangels Unkenntnis aller verborgenen Hohlräume erst noch unsicherer Annahmen über die Verbindung, Verteilung und Bewegung eines angeblich einheitlichen Karstwassers, um nur den Spiegelhöhen zu entsprechen. Da wäre oft die altertümlichste Form der Röhrentheorie mit Höhlenflüssen immer noch das Einfachere, obgleich sie für Wissenschaft und Technik oft verwickelt genug ist. Somit erweist sich auch der Vorzug handlicher Schlichtheit des Grundschen Karstwasserbegriffes und seines allgemeinen Spiegelniveaus nur als scheinbar, und es entfällt, von allen anderen Hindernissen ganz abgesehen, der rein geistige Anlaß, etwas Derartiges zu denken. Einfach ist beim Polje von Livno nur die Vorstellung, es werde von mehreren getrennten Karstwassersträngen gekreuzt, von denen es selbst aber einige völlig unterbricht. Diese Vorstellung hat noch den Vorzug für sich, daß sie nicht nur im Dolomit, sondern auch im Kalk größere Raummassen ohne hydrographisch wegsame Klüfte für möglich hält, wie sie ja auch schon gefunden wurden (vgl. § 19). Indem A. Grund lehrte, daß z. B. Dolomitteile von geeigneter Beschaffenheit sein Karstwasser in verschiedene Becken zerlegen können, wird es nur eine Frage der Häufigkeit undurchlässiger Kalkmassen im Gebirge, in wieviel Teilbecken und selbst dünne Stränge die einzelnen Becken Grund's noch weiter zerfallen. Die 49 Poljen umfassende statistische Betrachtung des nächsten Abschnittes zerstört für ein großes Gebiet die Wahrscheinlichkeit, daß die von A. Grund behaupteten Zusammenhänge des Karstwassers als Arbeitshypothese die Forschung in den Stand setzen, auf einfache und doch zutreffende Art die Karsthydrographie dieser Poljen zu ergründen. Die Überschwemmungen des Poljes von Livno beruhen darauf, daß der von periodischen Quellen und speienden Wechselschlünden, endlich von angeschwollenen dauernden Riesenquellen gespeiste Karstwasserzudrang in den Ponoren einen zunächst unzureichenden Abfluß findet. Kein Ponor der Abflußseite ist als Wechselschlund auch nur wahrscheinlich gemacht worden, einer ist als reine Abzugsröhre erwiesen, die von sich aus unter sonst gleichen Umständen um so mehr schluckt, je höher der Überschwemmungsspiegel steht. Karstwasserspiegel, die an diesen Vorgängen beteiligt sind, gibt es zu gleicher Zeit eine große Menge. Viele gehören den Hohlräumen hinter den periodischen Quellen oder hinter den dauernden Quellen an, manche den Wechselschlünden und nicht wenige den Hohlräumen unter den Ponoren.

B. Ph. Ballifs tabellarische Übersicht von 49 Karstpoljen in Bosnien und der Herzegowina, statistisch für ihre Hydrographie ausgewertet.

Vgl. Kartenbeilage 2.

§ 74. Das Werk dieses Wasserbautechnikers, dessen Arbeiten unter vielen anderen Erfolgen die Ernteerträge der Gemeinden des Poljes von Livno um 80% und mehr gesteigert haben, enthält von S. 6 bis 21 eine Liste von 49 Poljen, welche außer Namen und politischer Zuteilung noch die Flächen, Wasserzufuhr, Entwässe-

rung, Überschwemmungsdauer und Bodenbeschaffenheit berücksichtigt. Es ist diese Zusammenstellung leider noch von keinem im Lande Ansässigen auf Dalmatien und Kroatien ausgedehnt worden, aber auch so ist sie eine Fundgrube geographischer Einsichten. Wir beginnen mit einer Übersicht:

	Gesamtfläche <i>qkm</i> <sup>1)</sup>	Anzahl der Poljen
trockene	615,4	32
periodisch inundierte Poljen	957,2	17
	<u>1572,6</u>	<u>49</u>

31 von diesen Poljen (24 trockene und 7 inundierte) sind weniger als 15 *qkm* groß, hingegen messen 5 Poljen über 100 *qkm* (2 trockene und 3 inundierte). Zwischen 15 und 100 *qkm* liegen demnach die Flächen von 13 Poljen (7 trockene und 6 inundierte). Übergangsformen zu Dolinen sind nicht inbegriffen, wohl aber fünf Übergangsgrößen unter 1,5 *qkm*. Die dauernd überschwemmten Poljen (Seen) des Abflußgebietes liegen fast alle in Dalmatien. Die Zuweisung eines Poljes zu den trockenen konnte Ballif wegen des Vorkommens kurzfristiger Überschwemmungen von wenigen Tagen oder auf sehr kleinen Teilflächen nicht ohne jede Willkür durchführen. Dabei leitete ihn die Rücksicht auf merkliche Nachteile von Ackerbau und Viehzucht. So hat er 13 Poljen, in denen weniger als 15% der Fläche nur kurzfristig (meist unter einer Woche) unter Wasser geraten, zu den trockenen gerechnet. Die ganz trockenen Poljen — es sind das 19 — sind von zweierlei Art. Die hoch liegenden sind geschlossen und die Wasserzufuhr verschwindet jederzeit restlos in den Schluckschlünden. Die tiefliegenden sind zum Teil aufgeschlossen, d. h. ein ständiger Fluß verläßt sie und genügt, um die Poljensohle freizuhalten von Überschwemmungen oder fast frei davon. Doch gilt die Umkehrung nicht: es gibt Poljen, die längere Zeit Überflutungen beherbergen, obwohl ein Fluß die Gebirgsumrandung durchbricht. In den als periodisch inundierte anerkannten Poljen wird eine Fläche von 568 *qkm* alljährlich im Herbst und Frühjahr, oft auch im Winter, überschwemmt, eine weitere von 194 *qkm* ist dauernd versumpft. Sehr bemerkenswert ist die Verteilung der Poljen nach der Höhe (die Flächensummen sind unmittelbar von Ballif übernommen).

Poljensohlen	bis 300 m		301—800 m		801—1250 m	
	<i>qkm</i>	Anzahl	<i>qkm</i>	Anzahl	<i>qkm</i>	Anzahl
trockene	8,8	4	78,5	10	528,1	18
periodisch inundierte	298,9 <sup>2)</sup>	8	449,4	5	208,9	4
davon unter Wasser	152,8		348,15		67,26	

Ballif hebt hervor, daß die trockenen Poljen „zumeist den höher liegenden, die inundierten den tieferen Horizonten angehören“. Während der Abfluß in den hochgelegenen Poljen in der Regel noch den Wasserzudrang ohne Überschwemmung

<sup>1)</sup> Diese Zahlen sind unmittelbar dem Werke von Ballif entnommen.

<sup>2)</sup> Nach der Einzeladdition 354,0 *qkm*. Es scheint, daß Ballif einen Teil des Beckens von Trebinje, das Popopo polje im engeren Sinne mit 50 *qkm* versehentlich nicht hinzuaddiert hat.

bewältigt, führt dieser Zudrang in den tiefer gelegenen Horizonten zur Inundation. Es sind übrigens bemerkenswert viele Poljen trocken, und zwar sind allein 17 geschlossene vollkommen frei von Überschwemmungen. Diese 17 liegen auf allen Höhenstufen, am häufigsten zwischen 500 und 1000 *m*. Im übrigen ist bei ihnen keine regelmäßige Veränderung der Häufigkeit mit der Höhe zu verzeichnen. Bemerkenswert ist, daß die trockenen Poljen im Durchschnitt und der Häufigkeit nach die kleineren sind. Jeder Versuch, zu beweisen, daß gerade alle diese kleinen Poljen höher liegen als die höchsten Karstwasserstände in ihrem Einzugsgebiet, ist zur Aussichtslosigkeit verurteilt. Dagegen ist zu beachten, daß bei einem möglichen Vorhandensein von Karstwassersträngen mit undurchlässigen Zwischenbereichen im Kalk kleinere Poljen leichter in diese Zwischenräume fallen können als große, die vielleicht mehrere solche wasserreiche Karststreifen und stärkere Adern anschnitten (vgl. § 73, die Zusammenfassung über das Polje von Livno).

Alle geschlossenen Poljen, 11 an Zahl, welche allein oder ganz überwiegend vom Regen direkt gespeist werden, d. h. aus denen Ballif keine periodischen Zuflüsse durch Karstquellen aller Art in Erfahrung bringen konnte<sup>1)</sup> und wohin also keine Bäche einfließen, gehören bis auf eines zu den vollkommen trockenen. Sie liegen zwischen 210 und 1170 *m*. Trotzdem diese 11 Poljen, welche des Zutrittes in Quellen zusammengefaßter Wassermengen entbehren, meist zu den kleineren gehören, bewirken die Niederschläge des ganzen Umkreises nirgends ein Emporsickern von Karstwasser zur Erzeugung selbst kleinster Überschwemmungen. Das eine, inundierte jener 11 Poljen liegt in nur 80 *m* Seehöhe und die Überschwemmung beschränkt sich nur auf die Zeit November bis Februar, sehr im Gegensatz zu den anderen geschlossenen und periodisch inundierten Poljen derselben Höhenstufe. Jenes kurz überschwemmte Polje ist das *Blatca polje* in der Herzegovina (Bezirk Stolac); es ist mit 0,3 *km* das kleinste von allen, die Ballif aufgenommen hat.<sup>2)</sup> Da es Ponore hat, die nur Regenwasser schlucken, wäre es sehr wertvoll, die Schlucktätigkeit während des ganzen Verlaufes einer Überschwemmung zu überprüfen. Würde sich feststellen lassen, daß diese Ponore um so weniger Wasser schlucken, je höher der Spiegel steht, so wäre wenigstens ein Teil der Theorie von A. Grund gerettet, ein Teil, dessen Möglichkeit in § 60f. hervorgehoben und an dem seither immer festgehalten wurde, wenn auch von bisher bekannten Tatsachen noch keine unzweideutig diesem Teile seiner Lehre entspricht.

§ 75. Soviel zur hydromechanischen Seite der Sache. Sie hat aber auch eine geographische. Es ist immerhin sehr bemerkenswert, daß man in einer großzügigen Übersicht über 49 Poljen erst bei einer Kleinheit von 30 *ha* Bodenfläche Gelegenheit findet, zu vermuten, daß ein Geflecht bewegter Karstwässer breit und dicht genug sein dürfte, dieses Polje ganz oder zum guten Teil einzuschließen und es auch ohne

<sup>1)</sup> In einigen Fällen betont er vielmehr, daß die Speisung der Poljen mit Wasser ausschließlich durch die Niederschläge erfolgt. Wenn außerdem selbst schwache Quellen dabei mitwirken (ständige? L.), so erwähnt dies Ballif ausdrücklich. Diese Fälle sind von mir nicht mitgezählt, wo ich von einer Speisung „allein“ oder ganz überwiegend durch Regen spreche.

<sup>2)</sup> Es liegt s.ö. der Narentamündung im küstennahen Hinterlande des Canale di Stagno piccolo (Nr. 49 der Kartenbeilage).

eigentliche Quellen aus Klüften zu überschwemmen. Wie bei den trockenen Poljen ist auch bei den überschwemmten die zusammenfassende Betrachtung recht lehrreich, und zwar im selben Sinne. Auch die höchsten von ihnen liegen unter 1000 *m*. Im übrigen zeigt sich von 0 bis 1000 *m* keine regelmäßige Zunahme ihrer Zahl nach oben oder unten. Zunächst sind 1. alle diejenigen Poljen zeitweilig überflutet, die aus dem Gebiet undurchlässiger Gesteine hochwasserreiche Bäche empfangen; 2. alle jene, in denen Karstflüsse blind enden, zum Teil Abflüsse höherer abgeschlossener Poljen; 3. alle jene, die von zeitweiligen starken oder von ständigen Karstquellen gespeist werden und meist zugleich auch tiefer liegen als nicht weit (unter 20 *km*) entfernte Nachbarpoljen. Es sind das in allen drei Fällen Poljen, in denen zusammengefaßte Karstgewässer auftreten. In solchen Poljen ist die Wahrscheinlichkeit besonders groß, daß die Ponore nur bei Mitwirkung eines Überschwemmungsdruckes den Wasserzudrang bewältigen. Sehr bemerkenswert ist, daß jeweils die höchsten Poljen, über denen es nirgends die Schluckschlünde anderer gibt, nur aus der Ursache 1 überflutet werden. Selbst für die über 1000 *m* hoch gelegenen „trockenen“ Poljen trifft diese Art der Speisung aus anderen Gesteinen oder starken Karstquellen zu, die aber so geringe und kurzfristige Wasseransammlungen erfahren, daß Ballif sie zu den trockenen rechnet. Es gibt also unter den 49 Poljen mit zusammengefaßter Wasserzufuhr nicht ein einziges, das nicht zeit- und teilweise überschwemmt wird, wohl aber gibt es unter 100 *m* Seehöhe drei Poljen, die ebenfalls überschwemmt werden, das Wasser aber nur durch eine Anzahl mäßiger Quellen und durch die Niederschläge erhalten. Der eine Fall in 80 *m* Seehöhe wurde schon behandelt. Das größte dieser drei Poljen mißt noch nicht 4 *qkm*. Bei den naturgemäß größeren gegenseitigen Abständen zusammengefaßter Karstwassermengen fallen kleinere Hohlformen leicht in die Maschen sogar der dichteren Karstwassergeflechte. Wenn sie aber von einem dichteren Geflecht von Karstwassersträngen getroffen werden, können auch sie überschwemmt werden. Was soeben vom Einfluß höherer Nachbarpoljen gesagt wurde, weist auf einen engeren Zusammenhang zwischen Ponoren und Quellen (Résurgences) auch dort hin, wo Beimengungen nicht wieder mit dem Wasser zum Vorschein kamen. Nur darf man sich diesen Zusammenhang nicht in allen Fällen besonders einfach, unverzweigt und ohne Abspaltungen vorstellen. Diese Verzweigungen und Gabelungen können so groß sein, daß von einer Röhrenströmung zwischen Schwinde und „Quelle“ überhaupt nicht mehr gesprochen werden kann. Verzweigte Röhrenströmungen in Klüften unter Druck geben uns jedoch ebenfalls kein Recht, von einem Höhlenfluß zu sprechen.

Ballif hat freilich nicht alle, sondern nur 49 Poljen der westlichen Balkanhalbinsel nach gemeinsamen Gesichtspunkten in Vergleich gestellt, darunter viele kleine. Es sind aber im adriatischen Karstgebiet noch mehrere Dutzend Poljen vorhanden. Soweit über sie im einst österreichisch-ungarischen Teil Näheres bekannt ist, verschieben sich die statistischen Verhältnisse durch Rücksicht auf eine etwas größere Zahl von Poljen nicht wesentlich. Immerhin haben alle in diesem Paragraphen gezogenen Schlüsse nur deshalb Gewicht, weil sie sich immer auf alle Poljen einer bestimmten Gruppierung bezogen oder ab und zu höchstens eine Ausnahme zugelassen wurde.

Und ferner ist es kein Zufall, daß die am Schluß von § 73 aus dem relativ am besten erforschten Polje von Livno stammenden allgemeinen Ergebnisse, auch bei einer Übersicht über viele meist erheblich kleinere Poljen den Tatsachen entsprechen und so jene Schlüsse in der heute erreichbaren Weise aufs beste erhärten. Damit gilt auch im großen, daß sich das Karstwasser in klüftigen Zonen oder Strängen mit weiten Maschen dazwischen fortbewegen kann, was Stille schon im Paderborner Karst gefunden hat<sup>1</sup>.)

Liste der Poljen, welche auf Kartenbeilage 2 aufgeführt sind.

Nach Ph. Ballif.

1—32 trockene, 33—49 periodisch inundierte Poljen.

Nr.	N a m e	Fläche q <sup>km</sup>	Meereshöhe m	Nr.	N a m e	Fläche q <sup>km</sup>	Meereshöhe m
1	Nevesinjskopolje ..	180	830—900	28	Blato bei Mokro ..	1,6	270
2	Duvanjskopolje ...	121,6	860—890	29	Vrbanjepolje .....	1,5	1010
3	Kupreš-, Rilić- und Suhopolje...	94,8	1120—1150	30	Orahovacpolje ....	1,5	650
4	Vukovsko- und ...	35,3	} 1135—1195	31	Urešnje .....	1,3	930—970
5	Ravanjskopolje...	22,6		32	Planskopolje .....	1,2	600
6	Ivan-Dolac und Dugopolje...	28,8		1180—1250	33	Becken von Livno einschl. Buskoblato	405
7	Grahovopolje ....	18	770—800	34	Trebinjčicabecken von Trebinje ab- wärts, u. zwar Tre- binjsko- u. Čičevo- polje Žuma u. Lug u. Popovopolje...	185	225—275
8	Posušjepolje .....	15,2	580—615	35	Glamočer Polje ...	129	882—950
9	Ljubomirpolje ....	11,4	510—550	36	Becken von Imoski	92	250—270
10	Graber Polje .....	10,1	632—720	37	Gackopolje .....	52	} 930—950
11	Dolnje und Gornje Zimlje .....	8,9	808—840	37	und Puštopolje ..	9	
12	Ljubinskopolje ...	8,3	410—450	38	Mostarsko blato...	31,5	230
13	Borovopolje .....	7,3	1110	39	Dabarpolje .....	29,6	470—560
14	Polje bei Marinkovci	6,6	785—825	40	Ljubuškipolje (Mlade-Ebene) ...	23,0	70—100
15	Roškopolje .....	5,2	890—900	41	Rastok .....	17,0	57—67
16	Lukavacpolje .....	4,7	860—870	42	Rakičkipolje .....	14,8	880—920
17	Polje bei Šuica ...	4,6	900	43	Fatničkipolje .....	7,8	470
18	Kružkopolje .....	3,5	1170	44	Pašićpolje .....	60	785—800
19	Stolačkopolje .....	3,2	45—65	45	Crnicabecken .....	4,1	815—850
20	Kočevinskopolje ..	3,1	320	46	Jezerac .....	3,9	30—35
21	Becken von Vinica	3,1	610—620	47	Studeničkopolje...	1,3	30
22	Zlatopolje .....	2,1	1020	48	Jasenpolje .....	1,0	560
23	Crničkopolje .....	2,1	217	49	Blatcapolje .....	0,3	80
24	Vučipolje .....	2,0	976				
25	Konjsko- und Ca- revopolje .....	2,0	830				
26	Gradskopolje .....	1,9	85—95				
27	Trusinskopolje ....	1,9	870				

<sup>1</sup>) Abh. d. Preuß. Geol. Landesanstalt. N. F. Nr. 38.

C. Beispiele weithin abgesondert verlaufender Wasserstränge  
im Krainer Karst.

**1. Einleitendes über die Erfolge der Färbeversuche.**

§ 76. Nur an wenigen bekannten Stellen der Erdoberfläche ist die Entwicklung des unterirdischen Karstes so weit gealtert und dem Nichtkarst angenähert, daß ein Sohlengewässer eine lange Höhlenröhre von einem Tor zum anderen ohne Siphone durchströmt. Staubecken und Wasserfälle sind bei oberirdischen, aber noch viel mehr bei unterirdischen Karstflüssen häufiger als bei Flüssen des Nichtkarstes. Man kann sich fragen, ob man ein Gewässer, das sich ganz in seeartige Beckenfüllungen und Wasserfälle zerlegt, als Fluß bezeichnen darf, selbst wo es nur die Sohle einer Höhle benetzt. Die Abkehr von wesentlichen Teilen der Karstwassertheorie A. Grunds darf nicht dazu führen, sich von der Isoliertheit von Karstwassersträngen übertriebene Vorstellungen zu machen oder einfache Röhrenverbindungen — auch unter Druck durchströmte einfache Siphone — möglichst oft anzunehmen. Es sind die Färbeversuche an Flußschwinden vor allem und andere Versuche mit chemischer Beeinflussung des Wassers, welche hier den richtigen Weg weisen. Überaus merkwürdig ist es, zu verfolgen, wie sich sowohl A. Grund und seine Anhänger als auch deren Gegner auf Färbeversuche stützten. Der Fall, daß Beimengungen nicht wieder zum Vorschein kommen, hat sich an denselben Stellen schon ereignet, wo bei anderen Versuchen ein Wiederaustritt nachgewiesen wurde. Daher beweist hier ein negativer Ausgang einzelner Versuche nach keiner Richtung etwas. Bei kombinierten Versuchen unter besonderen Umständen ist das etwas anderes. Das Anilinrot (14 kg in fester Form), welches man 1869 in eine der Versickerungsstellen der oberen Donau im Malmjura warf, kam in der von ihnen mindestens 12 km entfernten Aachquelle nicht wieder zum Vorschein.<sup>1)</sup> Hingegen gelangten am 22. September 1877 eingeschüttete vier Fässer Schieferöl in die Aachquelle, ebenso 200 g Kochsalz, die am 24. September jenes Jahres eingeschüttet wurden, und endlich „10 kg des kurz vorher entdeckten Fluoreszeins“. Ein viel späterer (wohl um 1900) in Tuttlingen unternommener Versuch mit 5 kg Fluoreszein blieb ergebnislos.<sup>2)</sup> Hingegen gelangten 1907 20 kg Fluoreszeinkali (= Uraninkali) wieder in die Aachquelle; dieses Kali hatte man (wohl bei Möhringen?) in die Flußschwinde gebracht, ebenso 1908 25 Pfund Uraninkali, mit welchem die Donau bei Fridingen in Württemberg, 10 km unterhalb Tuttlingens versetzt worden war. Die durch mehrere Tage bis drei Kubikmeter Wasser in der Sekunde speiende breite Kluft, die der Mt. d'Or-Tunnel an der französisch-schweizerischen Grenze im Waadtländer Jura angeschnitten hat (vgl. § 20), führt zu einer 5 km entfernten Gruppe von drei Quellen, die 74 bis 84 m höher liegen als die Tunnelsohle. Diese Quellen des Bief Rouge versiegten, wie berichtet, nach dem Wassereinbruch im Tunnel. Sie erschienen alle drei wieder, nachdem es gelungen war, die gefährliche Kluft wieder zu verschließen und als das Manometer einen Druckanstieg auf 8 Atmosphären hinter dem Schieber

<sup>1)</sup> Die Angaben bezüglich der Donau entstammen dem geschichtlichen Rückblick n Schaufelbergers Arbeit (Nr. 43, S. 568ff.).

<sup>2)</sup> In Tuttlingen wurde der Versuch nicht wieder aufgenommen. Daß hier Donauwasser versinkt, steht fest.

angezeigt hatte. Mit dem Schieber konnte man verschiedentliche Versuche machen. So wurde Fluoreszein in das Kluftwasser eingeführt, das aber gleichwohl in den neu erstandenen Quellen nicht erschien und die 80 m nicht emporstieg. Wenn man aber vom Tunnel aus die Quellen wieder zum Versiegen brachte und Fluoreszein in ihre Öffnungen am Bief Rouge-Bach einführte, erschien es in dem Wasser, das man durch die Schieberöffnung absichtlich in den Tunnel einströmen ließ (Schardt, Nr. 40, S. 279).

Eine kombinierte Chlorierung von Karstbächen, besonders des Lurbaches an seiner Schwinde in Steiermark östlich der Mur ergab, daß das Chlor in den drei Bächen, die weiter im Westen im Murtal oberhalb Graz austreten, nicht nachweisbar war, obwohl die allgemeine Annahme wie auch der geologische Befund eine solche Verbindung als fast sicher erscheinen lassen. Diesen Versuchen ist 1928 eine ganze Monographie gewidmet worden, die XII. der vom Speläologischen Institut der Bundeshöhlenkommission in Wien herausgegebenen Reihe.

Es war in diesem Falle möglich, in der Höhle, aus der der nördlichste jener Bäche im Murtal austritt, 1200 m weit der Lurbachschwinde entgegenzugehen, so daß ein unterirdischer gerader Abstand von nur 2,5 km übrig blieb. Auch der südlichste vermutete Wiederausfluß, der am weitesten von der Schwinde entfernt ist, hat von ihr nur 3,7 km geraden Abstand. Man hat wertvolle Probeversuche angestellt und hat auf der begeharen Strecke des Höhlenbaches und im anschließenden Tageslauf auf 1800 m Länge durch Fuchsin- und Salzbeimengungen das Verhalten der Farbe und des Chlorgehaltes verfolgt. Dasselbe geschah in einer 2780 m langen Strecke eines oberirdischen linken Seitenbaches der Mur, der weniger als 1 km von den Höhlenreichen zwischen der Schwinde und den vermuteten Wiederausflüssen entfernt ist. Das Zusammenarbeiten der Meßstationen bezog sich auch auf die natürlichen Eigenschaften der Gewässer, noch ehe die Beimengungen eingeführt wurden. Man prüfte nicht nur den absoluten „Beschickungsverlust“ an Beimengungen, sondern auch den auf die Längeneinheiten bezogenen. Ebenso achtete man auf die Art des „Abklingens“ von Fuchsin und Chlorgehalt. Das erlaubte dann auch, die Ergebnisse des vollständig negativ ausgegangenen Hauptversuches sachlich zu beurteilen. Und so konnte der Berichterstatter G. Kyrle, gestützt auf klar und scharfsinnig abgewogene Schlußfolgerungen, „mit Sicherheit aussagen“, daß zwischen der Lurbachschwinde beim Dorf Semriach und anderseits dem Schmelzbach und der Laurinsquelle in der Höhle und dem Hammerbachursprung bei Niederwasser keinerlei Zusammenhang nach Art eines Flusses besteht. Die Anlage und Methoden dieser mustergültigen Forschungsarbeit gehen weit über ihre Vorläufer hinaus. Darum ist das Studium der reichhaltigen und doch knappen Abhandlung Kyrles für jeden Karstforscher unerlässlich.

Was aber die gelungenen Versuche betrifft, bei denen die Beimengungen an den Schwinden in Quellen wieder zum Vorschein kamen, so hat A. Grund in einigen Fällen sehr langsame Fortbewegung ( $0,028 \text{ m/sek}^1$ ), starke Verdünnung der Farbe und Wiederaustritt an mehreren Stellen zugunsten seiner Auffassung ebenso ins Feld geführt, wie er in anderen Fällen mit ihr eine rasche Bewegung ( $0,17 \text{ m/sek}^2$ )

<sup>1</sup>) Nr. 21, S. 166.

<sup>2</sup>) Donau—Aach, ebenda, S. 165.

und geringe Verdünnung und Wiederaustritt an nur einer Stelle damit in Einklang zu bringen wußte. Gewiß geschah das nicht ohne Hilfhypothesen, aber auch die Gegner seiner Auffassung verfügten über keine strenge Beweisführung. Nur in einem Fall ist es möglich gewesen, eine Erscheinung durch Färbeversuche nachzuweisen, die im betreffenden Gebiet selbst mit der Annahme eines bescheiden ausgebreiteten Karstwassernestes unvereinbar ist. A. Grund schrieb (Nr. 21, S. 169): „Nach Katzer kann jedes Gerinne in beliebiger Höhe austreten... Nach seinen Anschauungen könnten die Gerinne auch einander in verschiedenem Niveau kreuzen, ohne daß ein Zusammenhang zwischen ihnen bestünde.“ (Es folgt eine derartige Annahme Katzers mit Ortsangaben aus der Herzegowina.) Grund schreibt darauf: „Diesen Fall des Kreuzens halte ich für ausgeschlossen.“ Er ist tatsächlich mit seiner Theorie unverträglich. Seither ist er aber in Krain durch Färbeversuche erwiesen worden.

## 2. Hydrographisches aus Inner- und Unterkrain nach A. E. Forsters Bericht.

Hiezu Karte Abb. 44.

§ 77. Die Kartenbeilage 3 führt uns in das Gebiet des Gottscheer Ländchens, bekannt als deutsche Sprachinsel im s. Krain. Die Färbungsversuche wurden von der hydrographischen Landesabteilung in Laibach in den Jahren 1912 und 1913 durchgeführt. Ihr Wert besteht darin, daß ein kombinierter Beobachtungsdienst eingerichtet wurde, der nicht nur einen vermutlichen Wiederausfluß, sondern zugleich alle bedeutenden Quellen selbst in ziemlich weitem Umkreis unter Beobachtung hielt. Demgemäß waren auch die Ergebnisse sehr bemerkenswert, über die A. E. Forster (Nr. 15) berichtete.

Anmerkungen zu Abb. 44:

Poljen: *A* Ratschnapolje, 4 km vom westlicheren Laibacher Moor entfernt.

*B* Kleines Becken zwischen Eisenhof und Rosenbach.

*C* Polje von Ponikve.

*D* Gutenfeld (Strug) Strugatal, Forster, mit Podpečhöhle 437 und Schlund Kompoljska jama 423.

*E* Karstwanne von Reifnitz und Gottschee. Reifnitz liegt oberhalb der Schwinde 487 m. So heißt auch der bei 489 m entspringende Bach.

Zeichen: Schwarze Kreise: ständige Quellen; kleine ausgezogene Ringe: periodische Quellen; Halbmonde: Versickerungsstellen und Bachverschluckungen; gerade Strichelung: Luftlinie zwischen den Endpunkten gelungener Färbeversuche; parallele Striche: zeitweilige Kerngebiete seeartiger Überschwemmungen.

Römische Zahlen. Gelungene Färbeversuche: I Zwischen Krokarcia und Polanšica (Gebiet der Dobrava in A). II Močilebach—Podkaškaquelle (des Šicabaches). III Šicabach (Ponor Zatočna jama)—Gurk, Poltercaquelle 269. IV Podpeč Grottenbach—Gurk Studencquelle 189 m und Brlovnikquelle flußabwärts bei Podgozid. V Tržišćicabach—Kompoljska jama am Gutenfeld. VI Rakitnitzbach 473 m—Gurk Šicaquelle 170 m bei Hof. Beim Färbeversuch überflutete der Rakitnitzbach die Schwinde um 390 cm. Dem entspricht die Zahl 477 der Übersichtstabelle.

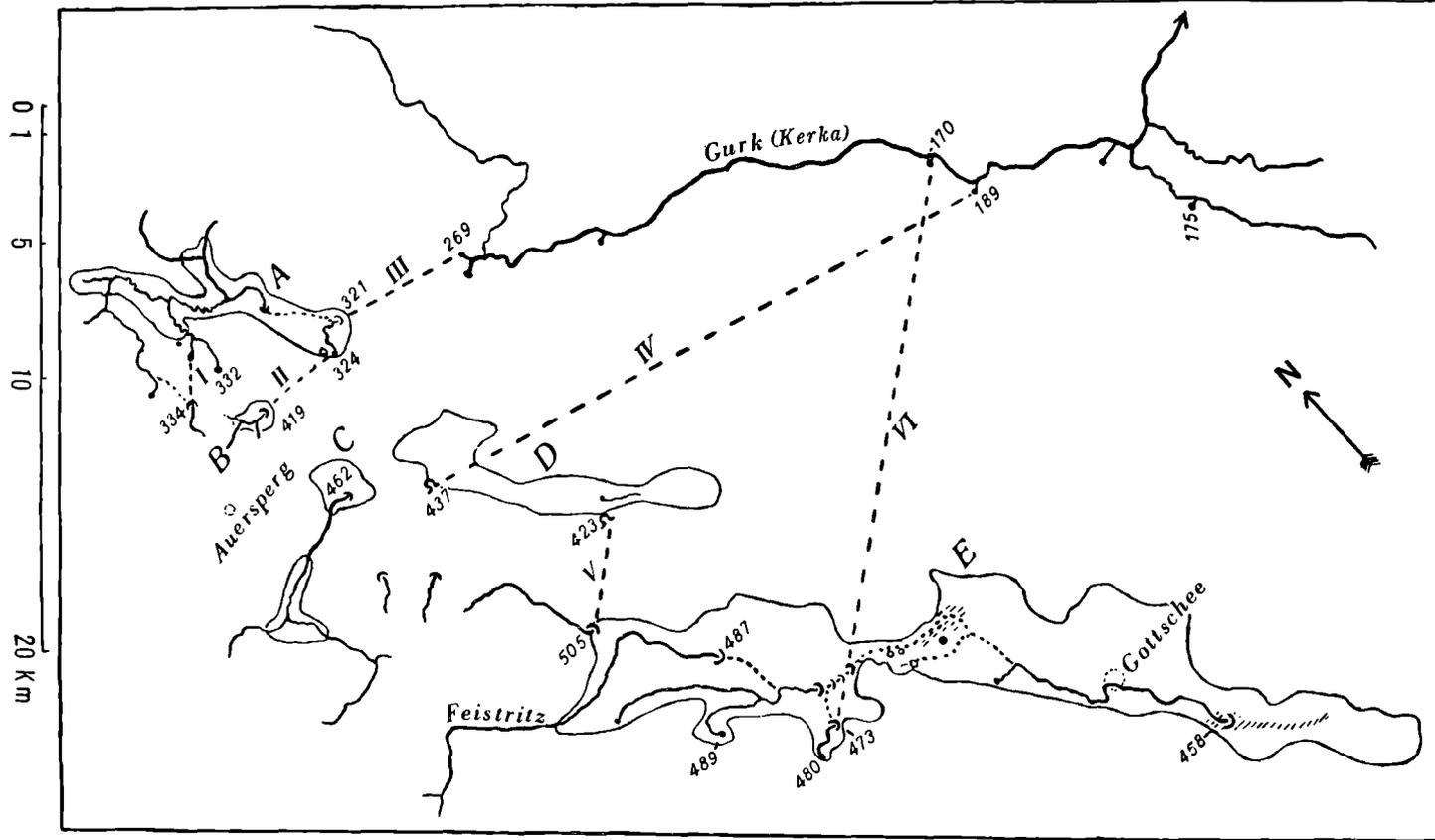


Abb. 44. Teil des unterirdischen Einzugsgebietes der Krainer Gurk (nach A. E. Forsters Kärtchen und amtlichen Kartenwerken).

## Gelungene Färbeversuche in Unterkrain.

Die römischen Versuchszahlen entsprechen den gleichen Nummern der Karte.

Versuche Nr.	Höhenunter- schied zwischen Schwinde und Wiederausfluß	gerader Abstand zum Wieder- ausfluß	auf den geraden Ab- stand bezogene	
			Gefälle	Geschwindig- keiten <i>m/sek.</i>
I $\frac{1}{2}$ kg Uranin in 50 l Wasser Krokarcza 324 m	5 m	1,7 km	$\frac{3^0}{00}$	0,024
Farbausfluß in der Polanšica > 24 Stunden. An den beiden anderen benachbarten Quellen des Polanšica- baches wurde trotz gleichzeitiger Beobachtung keine Färbung gefunden.				
II 1 kg Uranin in 50 l Wasser Močilebach 419 m	94,8 m	3,5 km	$\frac{27^0}{00}$	0,22
Farbausfluß in der Podkaška etwa 20 Stunden. Der nicht ganz 2 km vom Wiederausfluß „Podkaška“ tätig gewesene Wasserspeier Zelenka zeigte den Beobachtern keine Farbspuren.				
III $1\frac{1}{2}$ kg Uranin in 50 l Wasser Sičabach 321 m	52 m	6 km	$\frac{9^0}{00}$	0,024
Schon bei der Krkaquelle, die dem gefärbten Wiederausfluß Polterca 269 m dicht benachbart ist, wurde trotz gleichzeitiger Beobachtung keine Färbung wahrgenommen, ebensowenig bei einer anderen der eingetragenen Quellen rechts der Gurk.				
IV 1 kg Uranin + $\frac{1}{2}$ kg Fluoreszein Podpečer Grottenbach 437 m	248 m	20,8 km	$\frac{12^0}{00}$	0,17
Farbausfluß $6\frac{1}{2}$ —7 Tage in der Studenečquelle 189 m. Trotz Beobachtung wurde keine Färbung bei dem Wieder- ausfluß der benachbarten tieferen (170 m) Šicaquelle beob- achtet, deren Einzugsgebiet vom gefärbten Wasser also spur- los überkreuzt wurde. Keine Färbung ergaben auch alle übrigen Quellen r. an der Gurk und die ebenfalls unter Be- obachtung gestellte Podkašquelle (324 m, im s. Ratschnapolje).				
V 1 kg Fluoreszein in 60 l Wasser Tržiščicabach = Žlebičcer Bach 505 m	82 m	4,2 km	$\frac{20^0}{00}$	0,074
Farbausfluß etwa 14 Stunden bei der Kopoljska jama 423 m Ausfluß bei Hochwasser.				
VI 1 kg Uranin in 62 l Wasser, nach 10 Min. verschluckt Rakitnitzbach 477 m	307 m	20,55 km	$\frac{15^0}{00}$	0,3
Der unterirdische Durchfluß unterfährt jenen vom Versuch IV. Die Färbung am Wiederausfluß Šica war schwach. Beob- achtete Ausflußzeit der Farbe erheblich unter 5 Stunden. Die gleichzeitig beobachtete Quelle in 175 m Höhe am r. Nebenfluß der Gurk zeigte keine Färbespuren.				

Anmerkung. Wo ein Maximum in der Färbung des Wiederausflusses beobachtet wurde, beziehen sich die Sekundenmeter der Angaben Forsters auf die Frist bis zu diesem Maxi-

mum. Die für die geraden Abstände gerechneten Gefälle sind größer als die wirklichen, die gerechneten Geschwindigkeiten kleiner, da ja das Wasser in den gegebenen Zeiten gewiß manche Umwege und Krümmungen beschreibt. Frühe Spuren des Farbstoffes wurden schon in den nachstehenden Zeiten beobachtet:

Bei I in 13 Stunden	III in < 4 Tagen	V in $4\frac{3}{4}$ Stunden
II in < 4 Stunden	IV in < 24 Stunden	VI in 19 Stunden

Die Gefälle und Geschwindigkeiten obiger Tabelle lassen sich weder untereinander, noch mit denen oberirdischer Abflüsse in eine innere Beziehung setzen. Denn es herrscht zwischen jedem Paar dieser Werte das widernatürliche Verhältnis, daß die theoretischen Geschwindigkeiten um so kleiner herauskommen im Vergleich zur Wirklichkeit des unterirdischen Abflusses, je größer die Gefällswerte herauskommen, die für geradlinige Strecken berechnet wurden.

Forster hebt besonders die Fälle IV und VI hervor (a. a. O., S. 29):

„Eine bisher in der Karsthydrographie kaum konstatierte Erscheinung ist das Verhalten der Gewässeradern (Nr. IV u. VI), die sich nahe ihrer in verschiedenen Höhen gelegenen Ausmündungen kreuzen müssen, ohne daß es zu einer Vermischung der Gewässer käme. Dies wäre nur möglich, wenn man wenigstens für die höher liegende Gewässerader (Nr. IV) ein geschlossenes Gerinne in einer undurchlässigen Röhre annehmen würde.“ Die Schlußfolgerung, daß jene Kreuzung eintrete, ist tatsächlich nach den Beobachtungen unausweichlich, nur muß das nicht nahe den Ausmündungen geschehen, wie es bloß wegen der geraden Verbindungsstrecken scheint. Da die Färbung des Ausflusses von IV (189 m) stark und anhaltend war, ist ferner gewiß ein gegen VI geschlossener Wasserzug anzunehmen, ganz gleich, ob er in einer Röhre oder in einem nur in sich selbst verzweigten Geflecht von Hohlräumen dahinströmt. Das Freibleiben so vieler anderer Quellen und Wiederausflüsse vom Farbstoff spricht ferner dafür, daß die Wasserverbindung Nr. IV nicht nur gegen VI, sondern auch sonst abgedichtet ist. In diesem Punkt könnte erst eine Wassermengenbestimmung an Schwinde und Wiederausfluß die Entscheidung bringen. Aber nicht nur örtlich an dieser Kreuzung verliert das „Ausgeschlossen“ in der Stellungnahme A. Grunds den Halt, womöglich noch gefährlicher sind für sie die Befunde I, II, III um das Ratschnapolje, welche melden, daß Quellen, die nur ganz wenige oder einige hundert Meter vom festgestellten Wiederausfluß der Färbung entfernt sind, trotz Beobachtung in der entscheidenden Zeit keine Spuren der Farbstoffe zeigten. Der wagrechte Abstand der farblos gebliebenen Quellen von den gefärbt erschienenen ist mit einer Ausnahme erheblich kleiner als jener der Wiederausflüsse der beiden gekreuzten Wasserbahnen IV und VI voneinander. Dabei liegt in keinem Falle ein Anlaß vor, die Einschaltung verborgener undurchlässiger Schichten anzunehmen, um so viele eng benachbarte, aber verschiedene Karstwässer zu erklären. In diesen Verhältnissen zeigt sich eine Unverbundenheit eng benachbarter Wasserbahnen im Karst, wie sie meines Wissens auf einem so weiten Gebiet noch nicht erkannt und näher beschrieben worden ist. Der früher § 6f betonte karsthydrographische Gegensatz besteht angesichts der vielen Dolinen des Gurkgebietes auch hier, aber die karstlithologische Zusammenfassung der Klüfte und Fugen erscheint hier in einem neuen Lichte und gelangt offenbar nicht immer mit hydrographisch wegsamen Klüften noch innerhalb der Felsränder der Karsterhebungen zum Schnitt der Wasserbahnen und damit zur Vollendung ihres Zusammenflusses.

§ 78. Das in Abb. 44 dargestellte Krainer Gebiet ist auch sonst bemerkenswert. Alle diese Poljen haben eine ausgesprochene Zu- und Abflußseite. Dabei ist hervorzuheben, wie oft und überwiegend hier Ponore und Versickerungsstellen viel näher dem Gehänge der Zuflußseite liegen oder höchstens in der Mitte des Poljes. Man beachte daraufhin die Lage der Schwinden im Reifnitz-Gottscheer Karstbecken. Keine wesentliche Abweichung stellt auch das Gutenfeld dar, bei all seiner Eigenart. Tiefe, teilweise zugängliche Höhlenschlünde an der Zuflußseite verraten hier die unterirdische Abflußrichtung, ohne daß das Wasser für gewöhnlich zur Poljensohle hinaufsteigt. Und so wird selbst auf dieser Seite in diesen Höhlenschlünden eher noch das Niederschlagswasser der Umgebung abgeführt. Bei hohem Andrang entsenden sie Quergerinne ins Gutenfeld, die gegenüber in gereinigten Ponoren verschwinden. Der Abfluß dieses ganzen Karstgebietes quert also die Poljenreihe binnenwärts, d. h. gegen E. Nach A. E. Forster braucht man nicht zu zweifeln, daß auch die dem Gutenfelde benachbarte kleine Wanne (auf der Karte C) von Ponikve sich zur Gurk entwässert, wenn auch der betreffende Färberversuch wegen Hochwasserstörungen und Regengüssen nicht ausgeführt wurde. Da die Färbungen die Vermutungen der Bewohner mehrfach bestätigten, so verdient auch deren Meinung erwähnt zu werden, daß auch das südlich von Gottschee verschluckte Wasser zur Gurk gelange, und zwar durch die Quelle in 175 m Höhe (Radečáquelle in Unterthurn). Doch ist deswegen die Zugehörigkeit zum Kulpagebiet im S nicht ausgeschlossen. Überschwemmungen erleiden das Ratschnapolje und die Karstwanne von Gottschee. Beide erhalten sowohl aus undurchlässigen Gesteinen als auch durch starke Karstquellen Zufluß. Im Ratschnapolje tritt die Überschwemmung im Südteil ein, wenn sich die Hochwässer des Sičabaches mit jenem des verzweigten Dobravagebietes vereinigen. Das geschieht meist im Spätherbst, seltener im Spätsommer. Das gewöhnliche Hochwasser überdeckt den Sičaponor drei Meter tief. Ein besonders großes (so 1910) bedeckte ihn fünfeinhalb Meter tief. Die tiefsten Teile der Poljensohle standen dann 8 m unter Wasser. Die Färbung erfolgte bei Niedrigwasser.

Im Reifnitz-Gottscheer Becken (von Gavazzi Rakitnitzer Polje genannt) kommt es nach starken Regen vor, daß alle Gewässer des nördlichen Teiles über die Ufer treten, die Ponore überfließen und so zusammenströmen. Zeitweilige Quellen in der Enge zwischen Reifnitzer und Gottscheer Beckenweitung helfen mit, daß die geschwollene Hochflut den Nordrand der südlichen Wanne unter Wasser setzt. Aus dieser Inundation ergießt sich dann ein Gewässer, das den gewöhnlichen ständigen Fluß von Gottschee, die Rinnsche (Spezialkarte: „Rinnse“) verstärkt. Jener periodische Zubringer heißt die Hintere Rinnsche. Unter gewissen Niederschlagsverhältnissen entsteht aus zeitweiligen Wasserspeichern die vom SW-Rand ins Polje tretende Vordere Rinnsche. Kommt es zu gleichzeitigem Auftreten der beiden oberen Rinnschen, wo sonst Wiesengründe liegen, so entsteht das bei Gottschee gefürchtete Hochwasser, die „Krainerin“. Insoweit dieses aus dem Reifnitzer Beckenteil stammt, trifft es im Gottscheer Teil erst 24 bis 28 Stunden später ein, so daß viele Hochwässer der Vorderen und der eigentlichen Rinnsche südlich des Ortes noch vorher selbständig unterirdisch ablaufen. Wenn aber ein Hochwasser im S mit einem aus dem Reifnitzer Gebiet zusammenfällt, d. h. von diesem auf

allen Wegen verstärkt wird, so „reichen die vorhandenen Absorptionsspalten und Klüfte zu ihrer Ableitung nicht hin und die sonst leeren Hochwasserarme des Rinnschflusses füllen sich und die aus ihnen austretenden Fluten bilden... einen langgestreckten Überschwemmungssee, dessen Rückstau sich bis zur Stadt Gottschee geltend macht“ (vgl. die Karte, wo der See nicht diese äußerste Länge hat). Bei einem Hochwasser von + 3,9 m Pegelstand im Rakitnitzbach (Schwinde 473 m) findet noch keine Vereinigung mit dem benachbarten Reifnitzbach (Quelle 489 m) statt, wenn auch die Ufer des eigentlichen Gerinnes nicht mehr eingehalten werden. Bei dieser Sachlage fand die Einfärbung statt. Das gefärbte Wasser gelangte nicht in die Rinnsche und der Hochstand fiel (von Mittag bis Abend) ab. Es ist also eine Besonderheit der Karstwanne von Reifnitz-Gottschee, daß ihre „Jarugen“ bei Hochwasser über eine Strecke von rund 30 km einen einzigen Längsfluß bilden können, während unterirdisch eine Querentwässerung an zwei Stellen feststeht. Die stärkste Wasserführung kommt nur mit Hilfe des Druckes einiger Überschwemmungsstrecken des Längsflusses mit der Verschluckung ins Gleichgewicht, die über nicht wenige, aber meist enge Abzüge verfügt.<sup>1)</sup> Neuerdings wurde in der Verlängerung der verschwundenen Rinnsche eine Höhle entdeckt mit engem Zugang zu einer weiteren Halle, auf deren Grund Wasser aus einem engen Tunnel gurgelnd hervortritt; nach dem Berichtstatter R. Pirker<sup>1)</sup> ist es das Wasser der Rinnsche. Seinen weiteren Weg stellt er sich zur Kulpa gerichtet vor.

§ 79. Nur kurz soll das westlich benachbarte Gebiet der Laibach gestreift werden, worüber ja viele, zum Teil auch topographisch leicht lesbare Arbeiten erschienen sind. Das Einzugsgebiet des Flusses Laibach umfaßt vom Senkungsfeld des Laibacher Moores gegen SW noch zwei Poljen, zunächst das der Unz, an dessen Zuflußseite Planina liegt, und zuoberst das von Adelsberg, das von der Poik (Piuka) durchflossen wird, unweit von deren Schwinde diese Stadt liegt. Die Höhlenforschung hat nun schon lange den Zusammenhang der Poik und der Unz ziemlich gesichert. Der Abstand zwischen der Poikschwinde und der Unz mißt in der Luftlinie 5700 m<sup>2)</sup> (etwa SW—NE). Die Poik setzt sich unterirdisch zunächst, ohne daß Siphone den Sohlenlauf unterbrechen, 1870 m weit fort. Einschließlich der dann beginnenden Unterbrechungen des Sohlenlaufes durch Siphone ist sie mit allen Krümmungen gegen 3740 m weit verfolgbare gewesen.<sup>3)</sup> In der Luftlinie nach N bedeutet das einen Abstand von 2600 m von der Schwinde.<sup>4)</sup> Die Unterbrechungen des Sohlenlaufes betragen 170, 180 und 560 m, so daß für den von der Schwinde abwärts verfolgten krummen Höhlenfluß 2830 m verbleiben. Auch vom Wiederausfluß<sup>5)</sup> bei Planina ist man der Poik in Höhlen entgegengegangen, man kam längs der

<sup>1)</sup> Mitt. (Nr. 36) 1930, H. 2, S. 59. Einige Ergänzungen zum Vorgebrachten enthält die Darstellung dieses Poljes durch Gavazzi. Nr. 17, S. 87f.

<sup>2)</sup> Messung nach der Karte 1:75000 (Zone 22, Kol. X, Haidenschaft und Adelsberg).

<sup>3)</sup> Messungen nach Martels Plan (Abîmes: S. 440).

<sup>4)</sup> Messung nach der gen. Karte 1:75000 bis zur Einsturzdoline bei Mali Kolčivka (vgl. Martel, a. a. O., S. 451).

<sup>5)</sup> Dieser Wiederausfluß umfaßt nicht nur Poikwasser, sondern sehr viel auch vom Rakbach usw. Vgl. die Kartenskizze in Nr. 26, S. 79. Doch kann das nicht erklären, daß die Unz aus ihrer Ursprungshöhle das Elffache der Wassermenge herausführt, die als Poik bei Adelsberg verschwindet (vgl. N. Krebs' Beitrag zur Festschrift f. Cvijić, 1924, S. 57).

Krümmungen nach Martel 2500 *m*, in der Luftlinie nach SW 1600 *m* weit. So verbleiben als längste geradlinige Strecke unbekanntem Verlaufes des Piukawassers 2400 *m*. In Wirklichkeit mit den unzweifelhaften Krümmungen ist es entsprechend mehr. Nur etwa die Hälfte der unterirdischen Verbindung ist also bekannt.<sup>1)</sup> Schon im bekannten Teil gibt es, von den Siphons abgesehen, 10 Felsbarren, z. T. mit Wasserfällen im Bett und eine starke Abzweigung und eine Wiedervereinigung. Ein stärkeres Anschwellen des Wassers, als es Martel und seine Begleiter erlebten, würde allein im bekannten Teil mindestens zwei weitere Unterbrechungen des Sohlenlaufes durch Druckströmungen in Röhren hervorrufen. Außerdem fanden die Forscher ein ganzes Nest von verzweigten Röhren, zum Teil einstigen Bahnen des Poikwassers, die bei außerordentlichen Hochwässern vielleicht heute noch benutzt werden. Wie verzweigt die Hohlräume in den noch unbekanntem Teilen sind, weiß man nicht. Die Poik ist jedenfalls auf langen Strecken noch von jenem Altersstadium der Karstentwässerung entfernt, wo es nur einen Deckeneinsturz braucht, damit ein gewöhnlicher obertägiger Wasserlauf, „ein Fluß“, vielleicht mit einigen Naturbrücken sichtbar werde. Ihr Wiederausfluß verschwindet als Unz noch einmal, und zwar in 12,5 *km* geradem Abstand von den Ursprüngen der Laibach, die 155 *m* tiefer in 291 *m* Höhe austritt. Hier hat nicht die Höhlenforschung, sondern die allgemeine geographische Lage zur Folgerung gezwungen, daß Unzwasser das Laibacher Moor entweder unmittelbar oder durch die Laibach und ihre Zuflüsse aus dem Karst speise. Aber erst seit 1912 ist durch die Färbung der Unz der Nachweis gelungen, daß die Ursprünge der großen und kleinen Laibach das Unzwasser wieder zutage führen; jedoch tut dies schon nicht mehr eine 900 *m* weiter östlich gelegene Quelle (der Lebia nach der Spezialkarte, der Lubija nach Forster). Die Durchflußgeschwindigkeit, bezogen auf die maximal 12<sup>0</sup>/<sub>100</sub> geneigte gerade Verbindung ist 0,026 *m*/sek. 5 Tage und 16 Stunden brauchte die Farbe in der Unz, um in der Laibach wieder auszufließen. Als Färbemittel wurde eine Lösung von 1 *kg* Uranin in 50 bis 60 *l* Unzwasser benutzt unter Zusatz von 35 *g* Ammoniak, was die Lösung beschleunigt. Die Unz führte 11,2 *cbm*/sek Wasser.

Im Zuge aller dieser Färbungen verdient hier noch jene des Laaserbaches westlich vom Gottscheer Becken Erwähnung, weil die Durchflußgeschwindigkeit bei höherem Wasserstande bedeutend langsamer war als bei tiefem. Es handelt sich um einen Durchfluß nach West. Schwinde und Wiederausfluß haben 9,6 *km* geraden Abstand bei 119 *m* Höhenunterschied. Während niedrigen Wasserstandes floß die Farbe in 7 Tagen und 4 Stunden durch, bei höherem erst in 11 Tagen und 18½ Stunden, das entspricht rund 0,017 *m*/sek, bzw. 0,009 *m*/sek.

#### D. Zur Hydrographie im Gebiete der obersten Donau und der Hegauer Aach.

(Vgl. Kartenbeilage 3.)

§ 80. Als ein Musterbeispiel eines echten Höhlenflusses hat 1906 v. Knebel die unterirdische Verbindung zwischen Donau und Rhein vertreten, welche vom Mäander-

<sup>1)</sup> Wie Krebs an derselben Stelle, S. 56, berichtet, sind von der zu 9 *km* angenommenen krummen Wasserhöhlen-Verbindung etwa 5,5 *km* bekannt.

bogen zwischen Immendingen und Möhringen bei der Flur Brühl in der westlichen Rauhen Alb ausgeht. Diese Verbindung ist 1877 durch Färbung erwiesen worden, wobei der ganze Farbstoff in der Quelle der Radolfzeller Aach wieder zum Vorschein kam. Ebenfalls diesen Erfolg hatte die Färbung der Donau 1908 bei Fridingen, das längs des Flußlaufes der Donau 25 *km* weiter unterhalb liegt, in der Luftlinie 15 *km*. Diese zwei Stellen liegen aber selbst im Bereiche einer 35 *km* langen Donau-Strecke, die mit dem Eintritt der Donau in das Juraplateau bei Geisingen beginnend, noch andere Wasserverluste erleidet; und zwar ist das noch bei Geisingen,<sup>1)</sup> bei Hintschingen,<sup>2)</sup> bei Zimmern,<sup>3)</sup> bei der Immendinger Maschinenfabrik,<sup>4)</sup> bei Tuttlingen und bei Mühlheim<sup>5)</sup> nachgewiesen. Auch ohne alle sichtbare Zeichen gibt es Schwundstrecken der Donau, was sich an der Abnahme ihrer Wassermengen feststellen läßt; die Messungen werden an Pegeln vorgenommen. Badische Pegel stehen bei Kirchen-Hausen, Zimmern, oberhalb von Immendingen, in Immendingen oberhalb der Maschinenfabrik, unterhalb von dieser und dem Ort und bei Möhringen.<sup>6)</sup> Bei Tuttlingen, wo die Donau durch die Elta oft neu entstehen muß und neuen Verlusten entgegengeht, beginnt eine Reihe württembergischer Pegel. In dieser Stadt, die zwischen den Orten erfolgreicher Färbeversuche liegt, wurden solche ohne Erfolg vorgenommen, obgleich drei Ponorbäche auf der Hochfläche, südlich von Tuttlingen, ihr Wasser in die Aach entlassen, was Schaufelberger (Nr. 43) bewiesen hat (vgl. Kartenbeilage 3). Die Donau verliert im ganzen viel mehr Wasser, als in der Aachquelle erscheint, und diese Quelle führt zum Teil auch die Bäche und Niederschläge der Hochfläche, also nicht nur Donauwasser ab. Das alles ist der Höhlenflußtheorie in Anknüpfung an eine einzige Strecke nicht eben günstig und wird auch durch den Umstand nicht günstiger, daß die gefärbte Schwinde oberhalb Möhringen, wenn sie nicht trocken liegt, allerdings zu den kräftigsten Verschluckungsbereichen gehört. Näherem Urteil seien Mengenangaben dargeboten,<sup>7)</sup> die zunächst mittlere Wasserführungen betreffen. Die Aach hatte in neuerer Zeit folgende sekundliche Abflüsse an der Quelle selbst

1923	8,7 <i>cbm</i>	1926	9,7 <i>cbm</i>
1924	9,9 „	1927	11,7 „
1925	9,3 „		

Die Donau wurde von Kirchen-Hausen bis Möhringen (11 *km* Lauflänge), auf welcher Strecke sie die sichtbaren Schwinden von Hintschingen, Zimmern, Immendingen selbst und jene im Mäanderbogen bei der Flur Brühl überschreitet, trotz Zufuhr einiger Nebenbäche um folgende sekundliche Abflußmengen schwächer:

1923	— 7,2 <i>cbm</i>	1926	— 8,5 <i>cbm</i>
1924	— 9,5 „	1927	— 10,0 „
1925	— 9,1 „		

1) Nr. 50 des Lit.-Verz.

2) Von mir 1930 festgestellt.

3) Nach der topograph. Karte 1: 25000 und eigenen Beobachtungen.

4) Mehrfach in der Literatur. Vgl. Abb. 76.

5) Ebenso, vgl. bes. Berz (Nr. 5).

6) In älteren Zeiten gab es diese Pegel nicht alle, dafür wurde einer bei Geisingen benutzt.

7) Vgl. die Bände der amtlichen Veröffentlichungen Nr. 4a.

Im Jahre 1923 teilten sich die Abnahmen, soweit sie festgehalten werden können, wie folgt auf:<sup>1)</sup>

	Lauflänge	cbm/sek
Kirchen-Hausen bis Zimmern	3,25 km	— 3,2
Immendingen, Möhringen	5,5 km	— 5,3

Anmerkung. Um die Mitte der zweiten Strecke liegen innerhalb zweier Kilometer die berühmten Versickerungen.

In Immendingen war die Donau trotz Verlusten wohl hauptsächlich wegen der Nebengewässer stärker als in Zimmern (um 1,2 cbm/sek). So erklärt sich die scheinbare Unstimmigkeit zwischen den für 1923 in den beiden letzten Tabellen gebotenen Abflußsummen. Die unterirdischen Verluste sind also größer als die Abnahme dieser Reihen, denn sie verbrauchen auch die Zunahmen. In diesen Zahlen ist auch nicht enthalten, was die Donau vielleicht schon ab Geisingen (3 km oberhalb von Kirchen-Hausen) verliert, von den Verlusten unterhalb Möhringens abgesehen. Für die oberste Strecke im Jura gibt es aber alte Zahlen von 1887 bis 1891. Freilich beziehen sie sich auf den nicht streng definierten Begriff einer „gewöhnlichen“ Wasserführung.

Die Abnahmen waren	bei gewöhnlicher	bei gewöhnlichem
von Geisingen bis zum Pegel ober-	(häufigster?)	Niederwasser
halb der Immendinger Maschinen-	Wassermenge	
fabrik		
Von da bis Möhringen	— 7,5	— 3,5
	— 4,5	— 2,5

Die Zahlen sind mit den heutigen Mittelzahlen im einzelnen nicht vergleichbar. Damals (1887 bis 1891) war die gewöhnliche Wasserführung der Aach 6,5 cbm in der Sekunde. Diese Zahl gilt aber erst für den Pegel Volkertshausen, 3,5 km unterhalb des Aachtöpfes. Die Aach hat also „gewöhnlich“ zu mehr als  $\frac{2}{3}$  Donauwasser der Brühlschwinde geführt, sie führt heute vielleicht nicht ganz zu  $\frac{2}{3}$  Donauwasser der Brühlschwinde „im Mittel“. Bei Fridingen, von wo aus ebenfalls so gut wie der ganze Farbstoff in der Aach wieder beobachtet wurde, waren die Verluste der Donau nur klein. Nach Endriß<sup>2)</sup> etwa 0,5 cbm/sek, nach einer Anmerkung Wilsers<sup>3)</sup> 0,34 cbm/sek. Nähere Zeitangaben fehlen. Mit dem Jahre 1909 hat Württemberg dieser Versickerung durch geeignete Maßnahmen ein Ende gemacht.

§ 81. Begreiflicherweise hat noch niemand hinter all diesen Verluststellen der Donau „Höhlenflüsse“ vermutet; nun aber erweist sich doch die Versickerung, die im Brühl einsetzt (an Ort und Stelle auch die „Große Immendinger“ genannt), als bedeutendste. Dies kann auch durch Hochwasserverluste belegt werden.

Am 1. I. 1923 nahm die Donau wie folgt ab:

	Lauflänge	cbm/sek
Von Kirchen-Hausen bis Zimmern	3,25 km	um 26,3
Von Zimmern bis Immendingen (Maschinenfabrik)	2,25 km	„ 2,2
Von Immendingen (Maschinenfabrik) bis Möhringen	5,5 km	„ 34,7

<sup>1)</sup> Die wirklich aufschlußgebenden Werte für alle Jahre und den Pegel Maschinenfabrik wurden in Baden bisher (1931) nicht veröffentlicht. Überhaupt gibt es erst von 1923 an die Zahlen von Kirchen-Hausen, die ersten seit den alten Werten 1887 bis 1891; für den einstigen Pegel im benachbarten Geisingen vergleiche das Folgende.

<sup>2)</sup> Nr. 12, S. 69.

<sup>3)</sup> Nr. 50, S. 15. Meine Zahl beruht auf der Planimetrierung einer Kurve, die ich nach der Tabelle Wilsers (aus einem Gutachten) gezeichnet habe.

Noch größer war die Abnahme am 4. Februar 1922, als die Donau in Immendingen 104,0 *cbm/sek* führte, in Möhringen nur noch 55,8.<sup>1)</sup> Die Abnahme betrug 48,2 *cbm/sek*. Seitenbäche gibt es auf dieser Strecke nicht. Dies können aber noch nicht die höchsten Zahlen sein. Denn wir haben noch höhere Wasserstände, allerdings nur für Kirchen-Hausen und Möhringen. Am 29. Dezember 1925<sup>2)</sup> flossen im erstgenannten Ort 167,6 *cbm/sek* ab, in Möhringen nur noch 79,1 *cbm/sek*, nachdem noch am 20. Dezember das Bett trocken gelegen war! Das ergibt auf der 11 *km* langen Strecke eine Abnahme von 88,5 *cbm/sek*. Wir dürfen annehmen, daß hundert Kubikmeter wirklich verschluckt wurden, davon mehr als die Hälfte in der Brühlschwinde. Bemerkenswert ist nun eine Gegenüberstellung mit der Aach, wo die Farbstoffe nach 60 Stunden wieder erschienen.

Donauverluste im Brühl	in <i>cbm/sek</i>	Maximum in der Aach <i>cbm/sek</i>
4. II. 1922	über 50	14,12 (6. II.)
1. I. 1923	„ 40	17,11 (2. und 3. I.)
29. XII. 1925	gegen? 60	21,46 (31. XII.)

Dieses Verhalten kann man nur entweder durch einen großen unterirdischen See erklären, der aber schon oberirdische Ausmaße haben müßte, damit daraus ein so starker Wasserrückhalt bei solcher Zufuhr erklärbar sei, oder durch die Annahme ungemein weit und fein verzweigter Spalten und Röhren, die sich, sonst trocken, bei solchen Hochständen auffüllen und dem Abfluß eine vervielfachte Reibung entgegenstellen. Also die Brühlschwinde erweist sich zwar als die stärkste Schluckstrecke, aber fällt dennoch nicht für eine sehr weite und durchgängige Höhlenverbindung ins Gewicht, geschweige für einen (und einen) „Höhlenfluß“. Um das noch anschaulicher als durch Zahlen zu beweisen, sei auf die Beobachtungen an der Donau selbst, an der Aach und auf die geologischen Verhältnisse dazwischen verwiesen.

§ 82. An der Donau fehlt im Brühl wie anderwärts jede Andeutung eines Höhlentores. Ihre Versickerungsstellen sind in jenem Mäanderbogen auf eine Länge von mindestens 1700 *m* verzettelt. Die Donau versiegt nicht in den „Kiesen“ der Talsohle; das hat schon Endriß erkannt, was nicht hinderte, daß man später die Versickerung in Kiesen einfach behauptet hat. Der Fluß ist vielmehr am Fuße des Prallhanges auf einen Sockel der „wohlgeschichteten Malmkalke“ ( $\beta$ ) festgerannt, die schon bei Zimmern von rechts die Talsohle erreichen, bei Immendingen auch am linken Gehänge, wobei eine steile Flexur nach Osten mitwirkt. Im Anschluß an sie sprechen die Geologen geradezu von einer „Brühlmulde“. Diese Malmkalke haben meist einen prismatisch-würfeligen Zerfall von Seitenlängen mit 10 bis 25 *cm*. Ihre Stücke liegen massenhaft nur eben kantengerundet im schluckenden Donaubett, während die schönen, mit Sand vermengten, zum Teil kristallinen Kiese, die in der benachbarten Talsohle 5 *m* tief aufgeschlossen sind, im Donaubett kaum in Spuren vertreten sind. Einzelne festere Kalkpartien bilden im Bett lange Riffe. Das auffälligste und längste Zeichen einer Versickerung sind die Anschwemmungen von Pflanzenresten, Gras, Blättern, Stengeln, Reisig am Prallufer, wo also sonst gerade der größte Stromstrich unterwäscht. Sie sind oft das einzige Zeichen einer Quer-

<sup>1)</sup> Von Kirchen-Hausen wurden 1922 keine Zahlen veröffentlicht.

<sup>2)</sup> Von Immendingen wurden wieder 1925 keine Zahlen veröffentlicht.

strömung. Anfangs September 1930 gab es, teils schwimmend, am s. Ufer der seichten Donau angedrückt, teils als „Heuwall“ und „Reisigverhau“ im trockenen Bettstück abgelagert, solche Triftgegenstände auf 420 *m* Länge, verteilt auf acht Strecken, deren keine unter 20 *m* lang war. Einige kürzere Vorkommnisse sind als zweifelhaft weggelassen. Vom Beginn der Schwinde an hatte die Donau am rechten Ufer nur 1150 *m* weit Wasser, das an fünf hör- oder sichtbaren Schluckstellen verschwand; einige Schluckstellen am Ufer konnten, nur von höheren Wasserständen erreichbar, damals nicht mehr benutzt werden. Sichtbar waren drei Schluckdolinen von 1 bis 2 *m* Durchmesser; davon waren zwei gelegen am Ende rückläufiger Rinnen von 30 bis 50 *m* Länge, ferner gab es ebenso kleine Gehängebuchten am Wasser von grobem Blockwerk, teils umstellt, teils gebildet, in denen das Gestein herniedersackt. Räumt man davon etwas fort, zeigen sich Öffnungen, in die man einen Finger, höchstens eine Hand schieben kann, ohne das unzerrüttete Gestein zu erreichen. Auf der Trockenstrecke konnte ich außer größten Triftwällen keine morphologischen Spuren örtlich gesteigerter Verschluckung finden. Auch wo man mit und ohne Wasser nichts sieht, dürfte der Bettgrund häufig schlucken. Die Kiese der benachbarten grünen Talsohle, aus denen oft das Grundwasser quillt, hatten dieses verloren, wie die tiefen Aufschlüsse und die Besichtigung des Brunnens beim nächsten Bahnwärterhaus mit der Nr. 38 ergab. Wo die Donau wenige hundert Meter oberhalb schräg über die Talsohle dem Prallhang zuströmt, mußte sie auf einem von ihr ernährten Grundwasserdamm fließen, wie ein solcher bei Tuttlingen durch viele kombinierte Brunnenstudien erwiesen ist.<sup>1)</sup> Die Stelle, wo 1877 der erste Färbeversuch vorgenommen wurde, liegt schon nahe dem unteren Ende der Versickerungstrecke, rechts von der niedrigen Stufenmündung eines Trockentälchens (Flur Einöd). Der heutige Anblick entspricht nicht mehr der sehr sorgfältigen Beschreibung Knops. Von der Spalte, in die er beim Vorversuch mit Glasgower Schieferöl einen Schlauch schieben konnte, ist nichts mehr zu sehen. Überhaupt hat das Gehänge einige kleine Anrisse und Sackungen, welche seine Beweglichkeit erweisen. Nur wagrechte feine Risse finden sich über dem Bett an der Böschung im Umkreis jener Stelle; in diese Risse kann man kaum ein Messer schieben. Den etwa zehn ufernahen Gesteinsabbrissen entspricht an der Donau auffälligerweise keine Anhäufung, obwohl doch Blätter und Gras in nächster Nähe nicht wegbewegt wurden. Das spricht dafür, daß die Sackungen den allmählichen Einbruch kleiner Hohlräume darstellen. Da und dort gibt es in der Donau allerdings Haufen unsicherer Herkunft aus sehr eckigem Blockwerk, die vom Gehänge stammen könnten. Aber eine Rinne trennt sie von dem Gehänge mit den Abrißstellen; sie ist ebenfalls durch Nachbrechen erklärbar, aber durch ein solches, das auch einen Teil der Bettsohle ergriffen hat. Ich behalte mir die genauere Darstellung der Morphologie solcher Flußschwinden für einen anderen Ort vor. Das Gesagte sollte nur zeigen, wie nichts für den Anschluß von einigermaßen geräumigen Höhlen an diese Flußschwinde spricht, wo das Gestein nicht einmal eine 10 oder 20 *cm* hohe Öffnung bestehen läßt. Umso begreiflicher ist, daß so große Wasserverluste auf den 1700 *m* Länge über sehr zahlreiche kleine Abzugsstellen verfügen müssen.

---

<sup>1)</sup> Berz (Nr. 5).

§ 83. Das Donauwasser, welches hier in Höhen von 656 *m* bis 652 *m* versinkt, steigt aus Tiefen von unter 471 *m* zum 483 *m* hohen Aachtopf wieder empor. Wenigstens gilt dies für die zwei tiefen Spalten an seinem Grunde, welche die Hauptwassermasse der Aach liefern. Es gibt aber nach Schaufelberger noch 5 andere Quellen im und am Aachtopf, die nicht immer alle Wasser abgeben. Aber diejenigen, die bei Färbeversuchen tätig waren, brachten stets alle zugleich mit den Hauptspalten die Farbe zutage. Es kommt nach Schaufelberger auch vor, daß zwei dieser Quellöffnungen zeitweilig schlucken, während andere Wasser abgeben. Bei meinem Besuch, als etwa Mittelwasser herrschte, konnte ich mit Sicherheit an beiden Orten eine Strömung zum Ufer hin sehen. Eine war aber von der Aufwallung über den großen Spalten in der Mitte des zugehörigen Querschnittes des Quelltopfes nicht unabhängig und vielleicht gerade keine Verschluckung. Im zweiten Fall weiter abwärts liegt am Wasser eine hufeisenförmige Felsnische mit einer niedrigen wagrechten Spalte vor, in die der Wasserspiegel hineinreichte. Es gab sowohl aus- wie einziehende Strömungen, so daß ich zuerst vermutete, eine kreisende Uferwalze vollende ihren Bogen in dieser niedrigen Spalte und kehre so an den Tag zurück. Jedoch bestand kein Verhältnis zwischen der Menge und Geschwindigkeit des austretenden und des einziehenden Wassers. Ich glaube daher, daß hier auch bei meinem Besuch etwas geschluckt wurde. In jedem Fall haben wir es im Aachtopf nicht mit dem Wiederaustritt eines Höhlenflusses, sondern mit mehreren verzweigten Quellsträngen zu tun, von denen zwei aus einer nur bis 12 *m* ertauchten größeren Tiefe emporsteigen. Mindestens diese Spalten sind aber Höhlen, die unter Druck durchflossen werden. Es entspricht schon der im Falle der Aach sehr deutlichen Zusammenfassung der Karstgewässer (vgl. Kartenbeilage 3), daß in der Nachbarschaft wirklich Höhlen vorhanden sind. Dafür sprechen auch die bedeutenden Einsturzdolinen 400 *m* nördlich vom Aachtopf, etwa in 570 *m* Höhe. Schaufelberger hat sie topographisch einfach skizziert. Es handelt sich von N nach S um zwei große und eine kleinere Doline. Die großen haben Durchmesser von 80 bis 100 *m* bei größten Tiefen von 15 und 20 *m*. Die kleinste ist 14 *m* breit und 6 *m* tief. Es sind sehr schöne Kesseldolinen, in der Tiefe fast ohne ebenen Boden, voll Gestrüppes. Die großen haben Felswände auf einer Seite. Dolinen sind auf der Alb eine seltene Erscheinung und in anderen Fällen sogar geschichtlich als plötzliche Senkung belegt.

Auf dem Wege von der Brühlschwinde zum 12 *km* entfernten Aachtopf muß das Wasser absteigend immer jüngere geologische Schichten durchdringen. Denn so sanft diese einfallen — mit geringen Flexuren und Brüchen in einem Umkreis von 2 bis 3 *km* vom Aachtopf, — so sind sie stärker geneigt als die Landoberfläche und auch stärker als eine gerade Linie von der Schwinde zum Wiederausfluß. Das Donauwasser verschwindet in den „wohlgeschichteten“ Malmkalken ( $\beta$ ) schätzungsweise 10 bis 15 *m* über den Mergeln des unteren Malm ( $\alpha$ ). Diese bröckeligen Kalke<sup>1)</sup> haben feine Mergel- und Toneinlagen, sodann muß das Wasser durch die 20 *m* mächtigen mittleren Malmmergel ( $\gamma$ ) geologisch empordringen, hydrographisch abwärts steigen. Diese Mergel haben einige Kalkeinlagen. Sodann dringt das Wasser

<sup>1)</sup> Ein sehr schönes Bild dieses Gesteins bringt Berz in Nr. 5 auf Tafel III, Abb. 9.

in die hangenden Quader- und Massenkalken ( $\delta$  und  $\epsilon$ ). In diesen liegt auch der Aachtopf. Es sind höhlenbildende Gesteine. In den  $\delta$ -Kalken lag die schwächere Fridinger Donauschwinde. Bei der Bloßlegung zeigten sich in den Quaderkalken daselbst über 1 m hohe, etwa 20 cm breite Spalten.<sup>1)</sup>

Im Durchschnitt dringt das verschluckte Wasser also spitzwinkelig in hangende Gesteine ein, von denen sich ein vorherrschendes Mergelstockwerk als durchlässig erweist. Auch die Quader- und Massenkalken sind nicht ganz frei von mergeligen Einlagerungen. Das schließt Höhlenbildungen in ihnen nicht aus, hingegen sind die älteren Gesteine nicht einmal dafür besonders geeignet.

Erst im Lichte dieser Tatsachen gewinnen die Ergebnisse über die Mengen Kalkes, die in gelöstem Zustand aus der Aach abfließen, die richtige Bedeutung. Schaufelberger hat (Nr. 41, S. 131) zum erstenmal versucht, die Lösungserfolge des versickerten Donauwassers ziffernmäßig von denen zu trennen, die dem auf der Alb verschwindenden Regen- und Bachwasser auf seinem Wege zur Albquelle zuzuschreiben sind, wofür er die Niederschlagsmengen heranzuziehen hatte. Er stützte sich dabei auf die Korrosionswerte, welche Schardt für die französischen Härtegrade ermittelt hat. Indem er annahm, daß das in der Tiefe bewegte Donauwasser an Menge das Doppelte des Wasserzutrittes von oben ausmache, schrieb er ihm eine jährliche Auslaugung von 3600 *cbm* Gesteins, also noch 500 *cbm* mehr zu als einst Endriß. Das erscheint sehr viel, wenn man bedenkt, daß der Weg in der Luftlinie nur 12000 m lang ist. Bezogen auf einen weiten Höhlenschlauch ergäbe das in wenigen Jahren eine Zunahme seines Querschnittes um einen Quadratmeter. Aber in einem weiten Raum kann das Wasser gar nicht solche Lösungserfolge haben als in tausendfacher Berührung mit engen Bahnen. Der Auslaugung wirken wahrscheinlich auch Einschwemmungen entgegen und sicher in der Donaunähe viele Nachsackungen und kleine Niederbrüche. In den Kalken im südlichen Teil der Hochfläche sind seltenere, aber stärkere Einbrüche zu vermuten. In dem Fall der erwähnten großen Dolinen nördlich vom Aachtopf wurde nach Berechnung Schaufelbergers ein Hohlraum von 12000 *cbm* zerstört. Sollte er auf dem Wege der Lösung neu entstehen, so wären 1245 Jahre mit obigem Auslaugungswert nötig, ohne daß dies die Durchgängigkeit im ganzen wesentlich heben würde.

Die nähere Kenntnis der Donauschwinden hat also ergeben, daß am Anfang und Ende eine verzweigte Kluft- und Röhrenentwässerung herrscht, dazwischen entweder höhlenfeindliche Gesteine oder höhlenbildende, die bereits zu verengenden Einstürzen übergegangen sind. Damit ist den Ansichten v. Knebels und anderer der Boden entzogen. Es ist möglich, daß das Spalten- und Röhrengeflecht eine längliche Gestalt hat. Dabei hängt es immerhin mit denen aller anderen gefärbten Schwinden über zum Teil breite Räume weg zusammen und über den Verbleib des ganzen Donauwassers, das heute von Geisingen bis über Immendingen und dann wieder von Tuttlingen bis Mühlheim in größeren Mengen geschluckt wird als an der Strecke am Brühl, ist überhaupt nichts Gewisses bekannt. Im Hinblick auf die Übersicht der Kartenbeilage bietet die folgende Tabelle samt Erläuterung eine Ergänzung.

<sup>1)</sup> Ein Bild davon ebenda, Tafel III, Abb. 10.

§ 84. Gelungene Färbeversuche im Einzugsgebiet der Radolfzeller Aach.

Versuch Nr.	Höhen- unterschied	Gerader Abstand	Auf den geraden Abstand bezogene		Anmerkung
	zwischen Einfärbungsort und Aachtopf		Gefälle	Geschwindig- keiten	
I Donau zwischen Immendingen und Möhringen zuerst 1877 zuletzt 1907	175 m	12 km	14·6 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	Bei einem Zeit- aufwand von 60 Stunden 0·055 m/sek.	Bett unterh. trocken, 10 kg Fluoreszein. Ausfluß 36 Stunden. 200 Zentner Salz. Ausfluß 90 Stunden
II Donau unterhalb Fridingens. Jetzt vermauerte Schlucklöcher; Donau abgelenkt	133 m	20 km	6·7 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	Bei einem Zeit- aufwand von 200 Stunden 0·028 m/sek.	12·5 kg Uraninkali, Ausfluß 2 Tage 250 Zentner Salz, Ausfluß 28 Tage
III Obere Ver- sickerungsstelle im Krieger Tal 31. VII. 1928	127 m	7 km	18 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	Bei einem Zeit- aufwand von 72 Stunden 0·023—0·027 m/sek.	In der Aach Niederwasser. Starke Ver- dünnung. Farbausfluß 15 Tage stets gleichmäßig
IV Untere Bachver- sickerung im Wasserburger Tal 4. V. 1928	57 m	3 km	19 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	Bei einem Zeit- aufwand von 9 Stunden 0·083 m/sek.	In der Aach Hochwasser. Geringe Ver- dünnung. Farbausfluß 3 Tage
V. Versickerung des Jaucherbaches 22. VI. 1928	257 m	9 km	28·5 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	Bei einem Zeit- aufwand von 70 Stunden 0·04 m/sek.	Farbausfluß 10 Tage, stets gleich stark

Zu diesen Zahlen ist im Wesen dasselbe zu bemerken wie zu jenen, die A. E. Forster mitgeteilt hat (§ 77). Bei I erschienen die ersten Spuren von Salz schon nach 20 Stunden, bei II schon nach 126. Heftige Gewittergüsse im Donautal machen sich in der Aach nach 36 Stunden bemerkbar. Die Färbeversuche III, IV, V hat Schaufelberger zu den älteren hinzugefügt. Die zugehörigen Versickerungsstellen liegen in drei verschiedenen geologischen Kalkschichten: bei III in den „wohlgeschichteten“ Kalken (so wie die Donau bei Immendingen), bei IV in den Massenkalken (so wie die Aachquelle) und bei V in den Plattenkalken, dem höchsten Jura-

horizont der Gegend. Er ist durch die 50 m mächtigen oberen Malmmergel ( $\zeta$ ) von den Massenkalken getrennt. Die Plattenkalke ( $\eta$ ) und die oberen Malmmergel ziehen sich nicht bis zum Aachtopf hinab. Im Gegensatz zum Donauwasser hat das gefärbte Bachsickerwasser der Verbindung V also in immer ältere Schichten hinabsteigen müssen, ehe es zum Aachtopf kam. Es mußte dabei die an 50 m mächtigen oberen Malmmergel queren, die zum Teil sehr tonig sind, mit oolithischen Kalkbänken, und öfter einen Quellhorizont mit oberirdischen Bächen tragen: so ergibt sich auch dieses große Mergelstockwerk des Malmjura als relativ durchlässig und selbst karsthydrographisch wirksam. Das ist umso bemerkenswerter, als der gefärbte Jaucherbach nur wenige Sekundenliter bei einer Geschwindigkeit von nur 27 mm/sek führte und 4 kg Fluoreszein bei der Brücke 600 m oberhalb der letzten Versickerung erst in dreiviertel Stunden zur Lösung gebracht wurden. Die Wasserverbindung III mußte hingegen gleich dem Donauwasser durch die geneigten immer jüngeren Schichten zur Aach führen und dabei die mittleren Malmmergel durchdringen. Der Bach des Kriegertales (III) führte 40 Minutenliter, also nicht einmal einen Sekundenliter. Das Fluoreszein ging sonach auf dem Wege spärlichen Bachsickerwassers durch Boden und Gesteine nicht verloren, obwohl hier die Sickerstellen durchaus nicht etwa wie in anderen Karstgebieten zu deutlichen Dolinen oder gar zu Ponorhöhlen großartig ausgestaltet sind. Man muß im Falle der Trockenheit auch hier die Schluckstellen erst suchen. Allerdings war beim Versuch III die Verdünnung, in der das Fluoreszein hervorkam, schon sehr stark, nämlich zehnmal so groß als bei den Versuchen IV und V, „gerade noch an der Grenze der Sichtbarkeit mittels des Fluoroskopes“.<sup>1)</sup> Bei dem Versuch IV im Wasserburger Tal brauchte theoretisch das Sickerwasser die Quader- und Massenkalke gar nicht zu verlassen, um zur Aach zu gelangen. Das Wasserburger Tal führte nach den Mitteilungen des H. Josef Gohm, Gastwirt zum Adler in Aach, noch in der Mitte der Achtzigerjahre einen ständigen Bach, in dem auch in den heißesten Jahren die Kinder badeten. Zur Zeit des Versuches 1928 war der Bach im Oberlauf besonders stark und führte 40 bis 50 Sekundenliter, was ihm ermöglichte, sich ein Stück weit ins bewachsene Bett zu verlängern. Von den 2 kg Fluoreszein, die eingeführt wurden, konnte die wieder erschienene Menge zu 1972 g bestimmt werden. Selten gelingt so gut der Nachweis, daß die gesamte Beimengung eines Karstgewässers an einer Stelle wieder erscheint. Im Hinblick auf die Karte kann noch erwähnt werden, daß die Bächlein, die um den Punkt 846 m einen oberirdischen Lauf haben, in einem Fetzen von Molasse (Jura-kalknagelfluh) mit tonigem Bindemittel entspringen. Was diese Karte zeigt, ist ein schönes Beispiel karstlithologischer Zusammenfassung, hingegen ist in der Alb der karsthydrographische Gegensatz nicht durch sehr viele Dolinen, sondern schwächer nur durch Bachversickerungen und Trockentälchen ausgeprägt, von denen die Karte nur eine Auswahl zeigt, die sich an ständige Wasserläufe und deren Schwinden anschließt. Bezüglich der Zerklüftung hebt Schaufelberger hervor, wie eine ganz flache Faltung mit anderen Störungslinien gegen die Aachquelle im Streichen konvergiert und dort von einer Flexur geschnitten wird.

---

<sup>1)</sup> Schaufelberger und Schardt führen diese starke Verdünnung auf die Benutzung weiter Hohlräume zurück.

Der Mißerfolg der Ansichten v. Knebels hat in dieser Gegend dazu geführt, daß die Lehren A. Grunds erneut in bedeutendes Ansehen gekommen sind. Die hervorragende Arbeit des Geologen Berz stellt sich auf ihren Boden und die Karte von Gradmann in seiner neuen Länderkunde von Süddeutschland, in der er Grundwasserisohypsen für die Alb entworfen hat, huldigt derselben Ansicht. So hat sich wieder einmal die Höhlenflußtheorie als Nährboden gezeigt, welcher der entgegengesetzten, so sehr bekämpften Meinung eine gewisse Zählebigkeit verschafft. Auch das umgekehrte Verhältnis wird sich belegen lassen. Diese Rückkehr zu A. Grunds Ansichten kann aber nichts Tiefgreifendes, noch Dauerhaftes sein. Sie widerspricht auch den Tatsachen und Ergebnissen, die in diesem Buch festgehalten sind. Schon in der Arbeit von Berz kann man bemerken, daß ihre wertvollsten Ausführungen, besonders auch jene über die Verluste des echten Kiesgrundwassers bei Tuttlingen nur äußerlich mit den Ansichten von einem Karstgrundwasser verbunden sind und damit keineswegs stehen oder fallen. Die Kartenbeilage von Berz zeigt, wenn auch nicht so deutlich wie die Kartenbeilage 3, die räumliche Zusammenfassung der Karstwässer, welche sich in Verbindung mit dem zum Teil sehr eigenwilligen Verhalten der Färbeversuche dem von ihm theoretisch angenommenen Schema nicht fügt. Die Isohypsen des Karstgrundwasserspiegels von Gradmann sind eine Anwendung desselben Vorgehens, das Krebs 1919 sogar für Hochkroatien nicht vermieden hat.<sup>1)</sup> Selbst A. Grund hat 1910 einen Grundwasserspiegel nur in einem Profil als Kurve durch weite Karstgebiete gezogen. Von Krebs aber wird diese Nichtachtung natürlicher Verhältnisse im Grundriß sogar flächenhaft vorgenommen. Dies entsprach schon seit Jahren nicht mehr dem Stande der Forschung und war ohne ausdrückliche Widerlegung meiner 1925 begründeten Ansichten (Nr. 32) sachlich nicht mehr möglich. In der Alb liegen die Verhältnisse wohl einfacher als in Kroatien, aber selbst wenn das Karstwasser sich in einem einzigen sehr klüftigen Horizont, etwa in den „wohlgeschichteten Kalken“ bewegen würde, und zwar über sicher undurchlässiger Unterlage, was von keinem Mergelhorizont des Malm gilt,<sup>2)</sup> so wäre die von Gradmann übernommene schematische Darstellung sehr bedenklich. Sie versagt in Wirklichkeit im Donautal selbst, wie wir gleich sehen werden.

§ 85. Im Donautal zwischen Immendingen und Möhringen ist die unübersichtlich gebogene Schnellzugsstrecke durch drei Bahnwächterhäuser gesichert, in der Reihenfolge talabwärts Nr. 39, 38 und 37 (vgl. Abb. 45). Das Verhalten der Brunnenwässer dieser Wächterhäuser, richtig vorgeführt, erlaubt zusammen mit anderen Beobachtungen folgende Darstellung. Im Laufe des Jahres wechseln Zeiten, wo das Grundwasser bei Hochstand der Donau aus den Wiesen steigt und diese überflutet, mit solchen ab, wo die ganze bis 6 m mächtige Kiesfüllung des Talgrundes wasserleer wird, nachdem in der gut 4 m tiefen Schottergrube etwa 100 m n. vom Wächterhaus 38 eine kleine Quelle versiegt ist. Dieses ist am weitesten in die Talau vorgeschoben (Höhe 658,4), während jenes, Nr. 37, vom linken Gehängefuß nur durch die Straße getrennt wird und auf der Isophyse 660 m steht. Der Brunnenpiegel in der Talau kann im 12 m tiefen Schacht so tief sinken, daß nur noch 40 cm Wasser

<sup>1)</sup> Ebenheiten und Inselberge im Karst. Zeitschr. Ges. f. Erdk. Berlin, 1929.

<sup>2)</sup> Die von mir gefundene Schwinde bei Hintschingen liegt in den unteren Malmmergeln (a).

darin stehen. Ebenso sank nach Endriß beim jetzt zugeschütteten Brunnen des Hauses Nr. 39 der Spiegel metertief unter die Schottersohle in den Fels hinab, in welchem der Wasserinhalt sich selbst ergänzte. Es geht nicht an, dieses Karstwasser einfach als gesunkene Grundwasser der Kiese anzusehen, denn es ist beim Wärterhaus 38, wo der Brunnen 2 bis 3 *m* tiefer als das Haus liegt, das ganze Jahr hindurch rein und frisch, hat also eine reine Zufuhr und Abfuhr auch innerhalb des Kalkes, nachdem alles Wasser aus den Kiesen verschwunden ist. Das Wasser beim Haus Nr. 39 wurde hingegen trübe, weshalb der Brunnen zugeschüttet wurde. Nach Aussage des jetzigen Wächters trat die Trübung bei Hochwasser ein. Die Donau ist dem zugeschütteten Brunnen am nächsten, nur 120 *m* entfernt, aber das besagt nicht, daß die Trübung von ihr stammen mußte. Wenn im Brunnen von Haus Nr. 38 das Wasser sehr tief steht, so verfügt der Wächter zur Schonung auch noch im unteren Teil des nördlichen Gehänges über eine Brunnenstube mit gutem Wasser. Ebenso wurde der verschüttete Brunnen von Nr. 39 am l. Gehänge durch eine solche Wasserfassung ersetzt. Als ich den Brunnen von Nr. 38 besichtigte, stand das Wasser darin mindestens 7 *m* tiefer als im selben Talquerschnitt der Spiegel der Donau etwa 150 *m* oberhalb der Stelle, wo sie der Kalksockel vor dem Prallhang ganz zum Versiegen brachte. Das erste Ergebnis ist also: Während in feuchten Zeiten das Grundwasser die Kiese ganz erfüllt, beschränkt es sich in trockenen Zeiten auf die nächste Umgebung der Donau, ehe sie den Kalksockel längs des Prallhanges betritt. Im übrigen ist im Fels des Untergrundes eine Karstwasserbewegung vorhanden. Ihr Zusammenhang mit dem Karstwasser im nördlichen Gehänge, das auf ganz kurze Entfernung 8 bis 15 *m* höher steht, ist unaufgeklärt.

Außer diesen ein oder zwei Karstwässern gibt es noch das trübe unreine Karstwasser im Brunnen des Wärterhauses Nr. 37. Diese Eigenschaften hat das Brunnenwasser das ganze Jahr hindurch. Der Brunnen ist fast auf gleicher Höhe wie das Haus und 8 *m* tief, so nahe am Gehänge reicht auch er mehrere Meter in den Fels hinab. Zur Zeit meines Besuches gab es darin nur Wasser aus dem Fels. Das erbetene Trinkwasser war gelblich trübe und roch muffig. Man bot es mir gekocht an, dann war es braun wie manche abgestandenen Biersorten. Ein Ersatzbrunnen ist nicht da, außer man geht bis Möhringen. Bei hohem Wasserstand wird das Wasser „besser“, d. h. die Kuh des Wärters säuft es dann, obgleich nun eine mechanische Trübung auftritt. Zur Zeit meines Besuches stand der Spiegel in diesem Brunnen mit dem so elend filtrierten Wasser mindestens vier Meter höher als das klare Karstwasser bei Nr. 38 in der Aue, das ebenso ganzjährig gut ist wie jenes schlecht. Der Abstand beider Brunnen ist nicht ganz 1 *km*. Es folgt also eine Karstwasserader hier dem Tale, die mit den anderen nichts zu tun hat. Wenn man bedenkt, daß bisher nicht der geringste Anhaltspunkt gegeben wurde, wohin die riesigen Wassermengen der Donau kommen, die schon oberhalb vom Brühl bis zur Immendinger Maschinenfabrik verschwinden, die fast die ganze Donau durch ihr Grundstück lenkt, ist dieser Befund sehr auffällig. Dieser Brunnen, 1600 *m* von jeder Siedlung entfernt, wird also durch ein weit überkapillares, ziemlich lang isoliertes Röhrengerinne gespeist, dessen Verlauf wir höchstens vermuten können. Denn er liegt nahe der geraden Verbindungslinie zweier zugeschütteter Brunnen, die sich getrübt haben. Der eine ist der erwähnte vom Wärterhaus Nr. 39. Der andere lag nach einer Nachricht

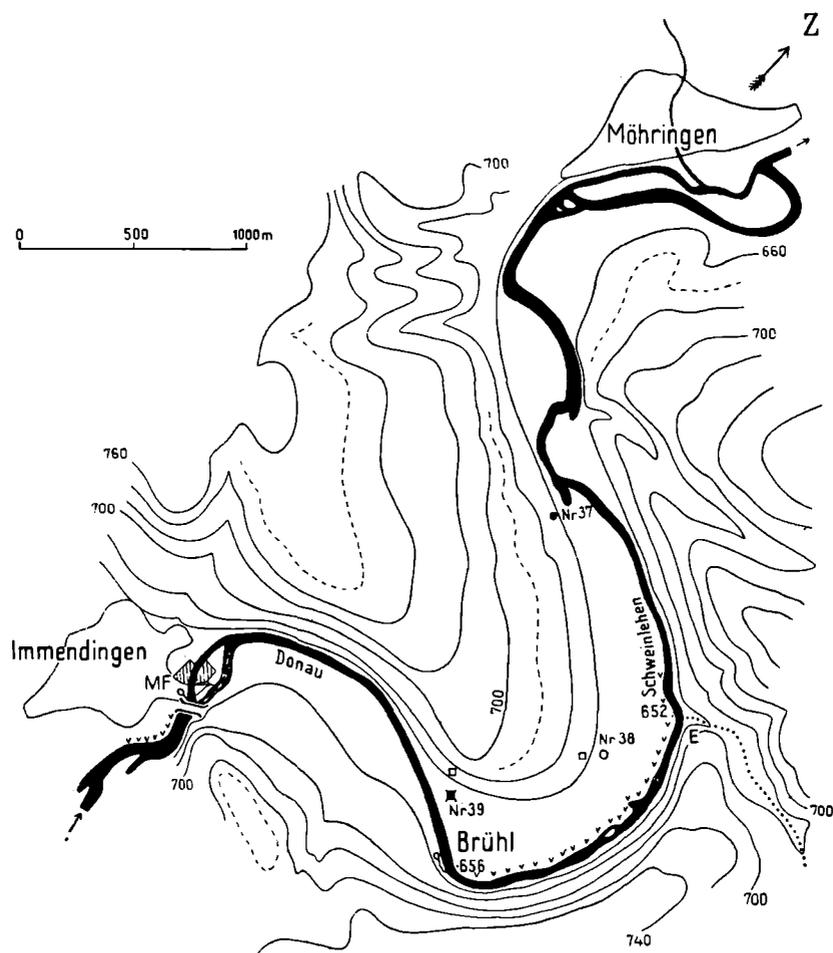


Abb. 45. Der Tal- und Flußmäander der Donau zwischen Immendingen und Möhringen nach der topographischen Karte 1:25000 mit den Strecken stärkster Versickerung. Diese Strecken sind durch kleine Häkchen angedeutet, die aus Platzgründen dem linken Ufer folgen, obwohl das meiste Wasser im Flußbett und am rechten Ufer verschwindet. Die Nummern 37 bis 39 vom Gewann Schweinlehen bis zur Flur Brühl beziehen sich auf die Bahnwärterhäuser, von denen aber nur die Brunnen übertrieben groß dargestellt wurden. Auch blieben die Geleise fort. *E* Flur Einöd, *MF* Maschinenfabrik. Hier ist sw. von ihr an der Brücke durch ein kleines Oval der Pegel hervorgehoben, auf den sich die Mengenangaben des Textes beziehen. Die Wagenbrücke unterhalb der Eisenbahnbrücke ist weggelassen. Die hellen Stellen in dem durch den Fabrikskanal geschwächten Donaulauf deuten Sandbänke an. Weiße Quadrate: Brunnenstuben mit stets klarem Wasser. Weißer Kreis: Brunnen, der bei jedem Wasserstand klar bleibt. Schwarzer Kreis: bei jedem Wasserstand trüber Brunnen. Schwarzer Kreis mit gekreuzten Strichen: zugeschütteter Brunnen mit Trübungen bei Hochwasser. *Z* mit Pfeil: ungefähre Richtung auf einen verschütteten und verschollenen Ziehbrunnen mit zeitweisen Trübungen.

Knops irgendwo zwischen Möhringen und Tuttlingen. Er ist heute verschollen. Von ihm berichtet Knop, wie folgt, an einer später wiederholt, aber stets mißbräuchlich zitierten Stelle:<sup>1)</sup> „Nach den Erfahrungen des Herrn Maschinenbau Direktors Groß zu Immendingen, eines geborenen Tuttlingers, gibt es vor Tuttlingen (unterhalb Möhringen) einen sogenannten Ziehbrunnen, dessen Wasserspiegel etwa 50 bis 60 Fuß (15 bis 18 *m*) unter dem Donauspiegel liegt. Nach heftigen Regengüssen bei Geisingen (oberhalb Möhringen und Immendingen) trübt sich das Brunnenwasser früher, als das getrübtete Donauwasser bei Tuttlingen anlangt. Dieser Umstand beweist, daß bei Tuttlingen unterirdische und, wie man weiß, starke Wasserzüge existieren, welche von der Wasserführung der Donau unabhängig sind.“ Knop bringt diese Nachricht in einer Darlegung, worin er für die später von ihm mit Erfolg durchgeführten Färbungen der Donau eintritt, um den Zusammenhang mit der Aach besser zu beweisen, die sich auch trübt, wenn es in gewissen Gegenden stark geregnet hat. Was von jenem Ziehbrunnen gemeldet wird, zeigt, daß er Karstwasser führt, über dessen weitere Abflußrichtung nichts verlautet. Denn die Mächtigkeit der Talschotter ist auch bei Tuttlingen nur 5 bis 8 *m* (vgl. Berz, S. 27f.) und jener Ziehbrunnen spiegelte 10 *m* tiefer. Die Herkunft seines Wassers muß man sich aus dem oberen Donautal denken, wo ja so viel Wasser versickert, das nicht zur Aach geht, ohne daß bisher jemand anderswo sein Wiedererscheinen aufzuzeigen versucht hätte. Wir haben keinen Grund, die von dem sehr genauen und verdienten A. Knop angenommene Glaubwürdigkeit seines Gewährsmannes zu bezweifeln. Überraschend ist, daß die Trübung sogar der Hochflut der Donau vorauseilt. Wenn irgendwo, so liegen hier zu raschem Durchfluß geeignete unterirdische Hohlräume vor. Deswegen brauchen wir nicht anzunehmen, daß dieses Karstwasser schneller ströme als die Donau, es braucht nur deren Windungen und Mäander nicht mitzumachen. Klüftige Hohlräume können diese gerade abschneiden. Nun schneidet die Verbindungslinie vom verschollenen Brunnen nach jenen von Nr. 37 und 39 einen guten Teil des großen Mäanders ab. Die Donau hat oberhalb und unterhalb noch andere Mäander, die abgeschnitten werden können. Knops Meinung, daß diese Wasserzüge von der Donau unabhängig seien, würde an sich den Bestand eines eigenen Karstwasserstranges nicht bestreiten, sondern nur dessen Speisung durch Donauwasser. Wollte man trotz der nun von mir hinzugebrachten Beobachtungen die Trübung durch Donauwasser ablehnen, muß man sie von wo anders herleiten. Dann verwickelt sich die Sache. Denn, weil nun nach mehrfach vertretener Meinung auch die Alb nördlich der Donau an der Speisung der Aachquelle beteiligt sein soll, kann man jetzt darüber nachdenken, wo das reine Karstwasser am Gehänge bei den Bahnwärterhäusern 39 und 38 das unreine im Tal ohne Vermischung kreuzt oder woher reine und unreine Karstwasseradern getrennt nebeneinander aus der Alb nördlich des Flusses in das Donautal treten.

Nachdem soeben der Theorie v. Knebels entgegengetreten wurde, fehlt nicht viel und man könnte eine Art Höhlenfluß unter und neben dem Donautale als sehr wahrscheinlich erklären. So wenig ist die Rückkehr zu A. Grunds Lehre gerechtfertigt. Der Karst duldet eben Schematisierungen weniger als irgend eine geographische

<sup>1)</sup> Nur wird sie stets als Beleg für einen Grundwasserstrom im Donautal angeführt.

Erscheinung. Die umstrittene Frage, ob die Donau in zunehmendem Maße an die Aach Wasser abgibt, ist heute trotz den Niederbrüchen und Nachsackungen des Gesteins für den Zeitraum seit 1884 im Durchschnitt unbedingt zu bejahen. Endriß und Berz bringen Belege, wonach die Donau zu Anfang des 18. Jahrhunderts überhaupt nicht zu versiegen pflegte, während sie bei Möhringen seit 1901 mit einer Ausnahme jährlich mindestens 100 Tage ein trockenes Bett hat. Im Jahre 1921 waren es sogar 309 Tage; das Jahr darauf 29 Tage. Diese Zahlen entsprachen den langjährigen absoluten Extremen der Niederschläge. Der Vorgang der Verkarstung ist hier in einem Stadium sich selbst überlassen worden, in dem er kein geologischer, sondern ein rascher geschichtlicher Vorgang wird. Die nähere Erörterung dieser Verhältnisse findet in diesem Buche nicht Raum.

#### IV. Die Entwässerung der Karsthöhlen und der engeren unterirdischen Hohlräume.

##### A. Die Gewässer der zugänglichen Höhlen.

§ 86. Welche Hohlräume im Karst Höhlen genannt werden, hängt nur von ihrer Größe und besonders von ihrer Zugänglichkeit ab. Hohlräume, die nirgends so groß sind, daß ein menschlicher Körper in ihrem Querschnitt Platz finden könnte, sind keine Höhlen; wenn sie jedoch mit zugänglichen oder zugänglich gemachten Höhlen sichtbar zusammenhängen, so pflegt man die kleinen Hohlräume als Anhängsel einem Höhlenbereich zuzurechnen. Da somit der Mensch das Maß abgibt dafür, was als eine Höhle oder nur als Kluft usw. gilt, so ist der Begriff „Höhle“ kein rein naturwissenschaftlicher, sondern eben ein ausschließlich geographischer. Daran ändert es nichts, daß Höhlentiere auch in Klüften Platz und Lebensraum finden, wohinein der Mensch vielleicht nicht einmal seinen Arm oder seine Hand strecken kann.

Da aber die Bewegungsweisen des Wassers hier nur als physikalisch-geographische Tatsachen wichtig erscheinen, hat im Rahmen der unterirdischen Strömungen aller Art die Höhlenhydrographie keine sachliche Selbständigkeit. Sie ist ein natürlich wichtiges Glied der Karsthydrographie. Denn Beobachtungen in Höhlen sind allerdings sehr wichtig; sind sie doch die einzigen, welche uns über das Verhalten des unterirdischen Wassers unter Umständen Auskunft geben, die bei physikalischen und hydraulischen Versuchen nicht nachgeahmt werden, weil sie unpraktisch oder zu verwickelt erscheinen. Andererseits darf man, was in weiten Höhlen zu sehen ist, nicht für unzugängliche Hohlräume verallgemeinern, es sei denn, die Verallgemeinerung stütze sich auf solche Grundtatsachen der Physik, die über alle einzelnen Versuchsbedingungen und -maßstäbe hinaus ins Gewicht fallen. Was die Beobachtungen in „aktiven“ Karsthöhlen oder „Wasserhöhlen“ betrifft, so beschränken sie sich natürlich auf die zugänglichen Teile dieser Höhlen, in denen sich ja zu den touristischen Schwierigkeiten das nicht stets zu umgehende Hindernis der völlig wassererfüllten Strecken, der „Siphone“ gesellt. Es ist ratsam, was man in trockenen Höhlen gesehen hat und verhältnismäßig ruhig studieren konnte, nachher in wasserführenden Höhlen wieder zu suchen, wo es manchmal in Berührung mit der Strömung noch in der Entwicklung angetroffen wird (vgl. § 94). Wo die Wasserhöhlen zugänglich

sind, begegnet man öfter zunächst von der Oberfläche her vertrauten Erscheinungen, Sohlengerinnen mit Wasserfällen und Seen. Die Sohlengerinne haben auch in längst trocken gewordenen Höhlen untrügliche Spuren hinterlassen; Erosionsschluchten und gelegentlich auch Aufschüttungen. Wo Erosionsschluchten auftreten, entsteht

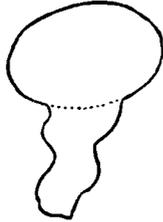


Abb. 46. Höhlenquerschnitt mit den Anzeichen von zweierlei zeitlich getrennten Fließweisen. Die jüngere steht in Verbindung mit dem Einschnitt einer Klamm durch turbulent fließendes Wasser.

ganz gewöhnlich ein Höhlenquerschnitt, wie ihn Abb. 46 zeigt. Oben ist er rundlich, unten ist die mit allen Spuren wirbelnden Fließens, also mit Kolken, Nischen und selbst Strudeltöpfen ausgestattete Schlucht; allem Anscheine nach ist sie eingesägt auf Kosten der einstigen Höhlensohle, welche in die obere Rundung paßte. Beispiele dieser Art bieten verschiedene Höhlen, so die Eisriesenwelt bei Werfen an mindestens zwei Stellen, ebenso die große Peggauer Höhle (im steirischen Murtal). Ein herrliches Bild eines solchen Falles hat 1913 Hermann Bock veröffentlicht (in Nr. 7, S. 62). Im gleichen Jahr hat er in Nr. 6

eine Aufnahme von A. Hobelsperger aus einer bosnischen Höhle veröffentlicht, die dasselbe zeigt. Bock war meines Wissens auch der erste, der ausdrücklich darauf hinwies, wie derartige Querschnitte eine wichtige Änderung im unterirdischen Abfluß anzeigen, indem einst ein Gerinne unter

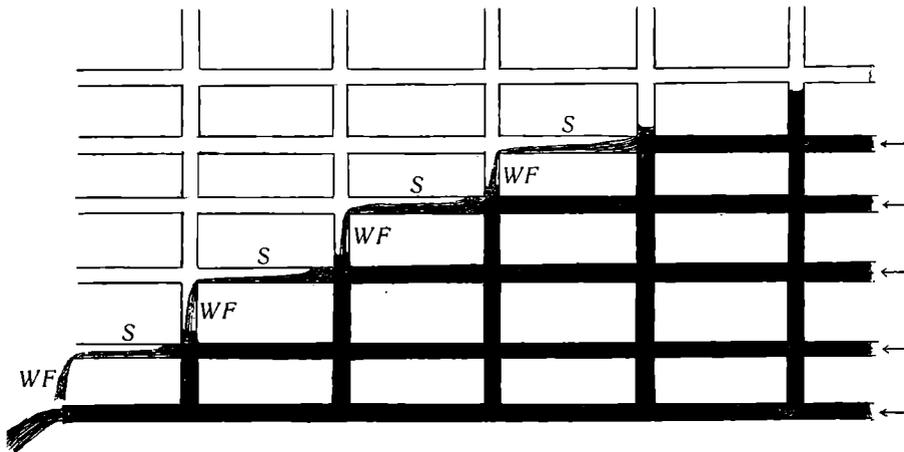


Abb. 47. Durchströmtes Röhrengitter mit Sohlengerinnen: *S* und Wasserfällen: *WF*, die in Schächte oder ins Freie stürzen. Es sind beliebig viele Röhrengitter möglich, die ohne diese Begleiterscheinungen unter Druck durchflossen werden, es sind aber auch beliebig viele, zum Teil bedeutend weniger regelmäßige Röhrengitter möglich, in denen ein oder mehrere Sohlenläufe und Wasserfälle auftreten müssen (vgl. Abb. 61).

Druck floß, wo später ein Sohlenbach, der den Raum nicht ausfüllte, gemäß dem steilen Gefälle der Unterlage einschneit. Diese Unterscheidung ist von grundsätzlicher Wichtigkeit und ihr Wert hängt nicht davon ab, wie man sich die Wasserbewegung

zur Zeit der Druckbewegung vorstellt. Denn hierüber sind allerdings verschiedene Meinungen vorhanden. Statt Sohlengerinne sagt H. Bock und die Karstliteratur Gravitationsgerinne, wohl einem technischen Sprachgebrauch folgend. Das Auftreten solcher Schluchten in Höhlen, ja überhaupt das Fließen von Sohlengerinnen, wo einst die Druckströmung regierte, muß man nicht mit starrer Unbedingtheit als Zeichen der Entartung einer Karstentwässerung ansehen, wenn es in der Natur auch meist stimmen wird. Abb. 47 zeigt jedoch einen einfachen Fall eines sogar im



Abb. 48. Längsschnitt durch einen Höhlensee, der von einer Druckströmung in der Tiefe sozusagen getragen wird, indem Druckstollen sowohl den Zufluß als auch den Abfluß besorgen.



Abb. 49. Höhlensee als Überrest einer mindestens zeitweilig unterbrochenen Karstentwässerung.

Laboratorium denkbaren Versuches, wo Sohlengerinne mit Wasserfällen notwendig als Abzweigungen eines darunter noch unversehrten Geflechtes von Druckströmungen auftreten, die sehr viel langsamer vor sich gehen können.

Dasselbe gilt von manchen Höhlenseen, deren Füllung von natürlichen Druckstollen aus der Tiefe stammt und deren Abfluß seinen Weg in Druckstollen fortsetzt. Solche Seen werden zu Zeiten außerordentlichen Wasserandranges bis zur Decke wachsen können und dann wird der Raum die Rolle von Erweiterungen in einer Röhrenströmung unter Druck spielen (vgl. Abb. 48). Andere Höhlenseen werden durch ein Sohlengerinne oder einen Wasserfall gespeist, ihr Abzug erfolgt jedoch in einen Siphon. Auch die umgekehrte Anordnung kommt vor, besonders nahe dem Höhlenausgang in Quelltöpfen.<sup>1)</sup> Wenn Höhlenseen mit einem Durchfluß beliebiger Art nicht in einer erheblichen Verbreiterung des Höhlenquerschnittes liegen, dann wird ihr Wasser nicht gerade „stagnieren“. Es gibt aber auch periodisch oder schon endgültig ganz still liegende Höhlenseen in Vertiefungen eines zeitweilig oder überhaupt nicht mehr überströmten Höhlenbodens (vgl. Abb. 49). Wenn das Wasser noch genügend anschwellen kann, verwandelt sich das Höhlenstück mit dem Seebecken in einen Siphon. Sobald das nicht mehr vorkommt, werden solche Seebecken leicht dauernd mit Anschwemmungen erfüllt. Fehlt es an Zuleitungen von unten, welche gelegentlich Druckwasser in den See heben könnten, so sind späterhin solche Seen auf die Speisung mit Tropfwasser angewiesen. Ist die Verdunstung stärker als diese Zufuhr, so schwindet der See zu einer mit Kalzit gesättigten Lache zusammen,

<sup>1)</sup> Vaoclusequelle, Gollinger Wasserfallquelle in Salzburg.

die unter Hinterlassung schöner Kristallplatten schließlich eintrocknet, wie dies in der Eisriesenwelt gefunden wurde (vgl. Bild 6 oben). Es kann auch ein Riß im Gebirge das Becken plötzlich entleeren. Auch Seen sind daher wie Sohlengerinne öfter Zeichen einer, wenigstens in einem gewissen Höhlenbereich absterbenden Karsthydrographie.

§ 87. Es gibt jedoch eine bekannte Höhle, die von Anfang an nur mit stagnierendem Wasser im strengsten Sinne erfüllt war, woraus sich mit der Zeit ein einziger, in alle Verzweigungen der Höhle reichender unterirdischer See entwickelte. Es handelt sich um die frühere Wasserfüllung der Höhle des Gipsfelsens („Kalkberg“) von Segeberg in Südholstein (vgl. § 16 mit Abb. 70 und Abb. 4 und 5), deren Wirkungen K. Gripp untersucht hat. Ich habe die Höhle besucht und kann nichts Besseres tun, als den Darlegungen Gripps folgen. Das Regenwasser, das in diese Höhle gelangte, hat den Wasserstand darin nicht merklich verändert, denn die Höhlenfüllung hing mit einem obertägigen Moränensee in nächster Nähe des Berges zusammen. So entsprach der Zufuhr von Regenwasser in die Höhle notwendig die Abgabe von schwerem gipshaltigen Wasser an den äußeren See. Im Verlaufe unscheinbarer Bewegungen und Umsätze erhielt die Höhle jene merkwürdige, nach oben breiter werdende Gestalt, die noch zu erklären sein wird und die mit der flächenhaften Ausbreitung eines einheitlichen Spiegels Hand in Hand ging. Es entstand ein Höhlensee von besonderer Verzweigkeit. Die einzigen Bewegungen, die sich in den Formen der Höhle verraten, sind nämlich Konvektions- (Dichte-) Strömungen.<sup>1)</sup> Zugleich ist die Form der Höhle, wo sie nicht verstürzt ist, ein Beweis für die ruhige Lage des Spiegels. Der ungestörte Querschnitt eines Segeberger Höhlenganges ist nämlich ein auf der Spitze stehendes, ebenes Dreieck (vgl. Abb. 71). Wie man sich dieses als Ergebnis der Auslaugung einer senkrechten Spalte vorzustellen hat, das beschreibt Gripp, wie folgt (Nr. 18, S. 49): „Sobald das frische Wasser (das eindringende Regenwasser, L.) das Gestein aufzulösen beginnt, entsteht an den Wänden eine nach unten gerichtete Strömung, die einen aufwärts gerichteten Gegenstrom verursachen wird. Hervorgerufen wird dieser Kreislauf dadurch, daß das an gelösten Stoffen reichere, daher spezifisch schwerere Wasser nach unten in Schichten gleicher Schwere sinkt. Daher ist in den tieferen Schichten stets ein spezifisch schwereres, also weniger lösungsfähiges Wasser vorhanden, was zur Folge hat, daß hier die Auflösung des Gesteins weniger schnell vor sich geht als weiter oberhalb. Da aber die spezifische Schwere des Wassers von oben nach unten gleichmäßig zunimmt (Gripp schrieb aus Versehen abnimmt), so wird die Lösungsfähigkeit von oben nach unten ebenfalls gleichmäßig abnehmen und es muß somit die Seitenfläche der Kluft (vgl. Abb. 50) die Gestalt einer ebenen, vom Dach der Höhle schräg in das Innere geneigten Fläche annehmen, falls die Grenze zwischen gesättigtem und nichtgesättigtem Wasser während längerer Zeit dieselbe Lage beibehält.“ Auch diese Bedingung war im Segeberger Höhlensee erfüllt. In dieser Entwicklung ist gleich, ebenfalls nach Gripp anzubringen, daß durch den Angriff des ganz süßen Wassers an der Oberfläche die Seitenwände derart hinausgeschoben werden, daß die Höhlendecke

<sup>1)</sup> Hiebei ist nicht an das „Strömen“ im Vergleich zum „Schießen“ oder „Gleiten“ zu denken. Dieses Strömen stand wohl zwischen Gleiten und ganz leichten Drehbewegungen.

wagrecht wird, entsprechend dem sich verbreiternden Spiegelniveau.<sup>1)</sup> Wären die Zufuhr von Sickerwasser und der Austritt der gesättigten Lösung nicht in diesem Gleichgewicht gewesen, so hätte auch die Tiefe wechseln müssen, in der die abgesunkene gesättigte Lösung stand und den Fels nicht mehr angriff. Dann hätten die Seitenwände keine schiefe Ebene bilden können, sondern gekrümmt ausfallen müssen.

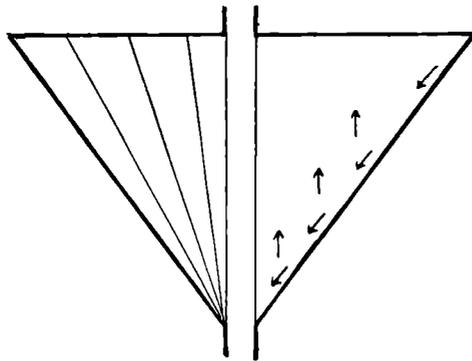


Abb. 50.

Auslaugung einer senkrechten Spalte bis zum Querschnitt eines Dreiecks durch Konvektionsströmungen.

Die Abbildung bringt die von K. Gripp für die Höhle von Segeberg entworfene erklärende Zeichnung.

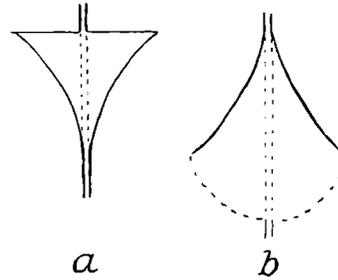


Abb. 51. Höhlenquerschnitte mit gebogenen Wänden, die sich aus einer senkrechten Spalte durch Auslaugung entwickeln, bei *a*, wenn der Spiegel ruht und schwache Konvektionsströmungen nicht verhindern, daß eine völlige Sättigung der tieferen Flüssigkeitsteile emporwächst, bei *b*, wenn die mittlere Spiegellage schwankt und am Grund keine Sättigung eintritt.

Gripp erläutert hierbei den besonders leicht vorstellbaren Fall, daß die Sättigungsgrenze allmählich emporstieg, woraus er mit naheliegenden Gründen den der Abb. 51 a ableitet, der aber in Segeberg nicht verwirklicht ist.<sup>2)</sup> Hingegen ergab die Untersuchung einiger Ufermarken unterhalb der wagrechten Decke, daß nicht der Spiegel des Höhlensees seine Meereshöhe geändert hat, sondern an gewissen Stellen sich der ganze Berg zeitweise emporschob, worauf längere Stillstandslagen eintraten.<sup>3)</sup>

§ 88. Gripp hat theoretisch auch den Fall erörtert, daß sich der Spiegel der Höhlenfüllung senkt, einerseits dadurch, daß die Lösung einen entsprechenden Abfluß nach unten habe, andererseits dadurch, daß bei weiter werdendem Hohlraum

<sup>1)</sup> Seit dem Trockenwerden der Höhle ist sie an mehreren Stellen durch plumpe Sinterbildung oder Blockfälle rau und uneben geworden.

<sup>2)</sup> Die Entwicklung vom Schnitt Abb. 50 a ist in Nr. 18, S. 45 und in Nr. 19, S. 20, mit besonderen Zeichnungen im Einzelnen dargelegt.

<sup>3)</sup> Gripp hat (Nr. 19) gezeigt, daß die Bewegungen eines Anhydrites nicht einfach dem Salzaufstieg zugeordnet ist, dem ja selbst Lösungsvorgänge entgegenwirken. Daher konnte in Segeberg der Salzaufstieg kontinuierlich erfolgen, ohne daß das oben Gesagte erschüttert wird. Gripp konnte den Querschnitt Abb. 50 in einem Salzwürfel experimentell hervorrufen. Diese ebene Decke stellt sich auch in den Kammern der Salzbergwerke ein, die man zur Gewinnung von Sole mit Wasser gefüllt hat. Sie heißt bei den Bergleuten des Salzkammergutes der „Salzhimmel“ (Himmel ist die Decke des bei Prozeptionen getragenen Baldachins). Frdl. Mitt. von H. Prof. Dr. Walter Schmidt, Charlottenburg.

jeder Zustrom frischen Wassers den Spiegel weniger hoch heben kann, als er früher war. Dann werden die höheren Teile der Kluft immer seltener vom Wasser benetzt und gelöst, die tiefsten aber am längsten nun auch von lösungsfähigem Wasser bedeckt.

Gripp leitet daraus richtig aus einer senkrechten Spalte Wandformen nach Abb. 50b ab, also ganz andere, als sich in Segeberg wirklich vorfinden. Dadurch war er auch nicht zu theoretischen Überlegungen über die zugehörige Gestalt der Höhlensohle veranlaßt.

Nicht nur Wirbelkolke und -nischen, sondern auch die Gesamtquerschnitte einer Höhle in löslichem Gestein können also dazu dienen, das Verhalten des Wassers in diesen Hohlräumen für jene Zeiten zu erschließen, als die Höhle überhaupt noch nicht zugänglich war. Im Gips von Segeberg wurde also eine Höhle von einem ganz stillen Wasser ausgelaugt, deren maximale Breite 30 m beträgt, während manche Hallen ohne die Schlotte 10 bis 15 m Höhe erreichen, und zwar geschah das in einem Teile der Postglazialzeit. Die großen Höhlen in den Kalkgebieten haben in ihren wohlausgebildeten Teilen ein vielfach höheres Alter und ungemessene Zeiten der Wasserführung hinter sich. Dies wird bei weitem nicht aufgewogen durch die größere Löslichkeit und Lösungsgeschwindigkeit im Gips (vgl. § 21f.). Daher ist es sehr möglich, daß im Kalk rein chemische Auslaugungshöhlen ebenso große, ja noch größere Ausmaße erlangt haben. Als ich einige Zeit nach der Höhlenexpedition der Wiener Akademie der Wissenschaften in die Eisriesenwelt (Nr. 29) die Strudel-nischen und Kolke einiger obertägiger Klammern, sowohl bei vereinzelt wie auch bei dichtgeschartem Auftreten untersucht hatte, suchte ich die Höhle noch einmal auf, um mich zu vergewissern, daß in ausgedehnten glatten, wohlgerundeten und nicht verstürzten Strecken diese Spuren einer anhaltend oder vorübergehend lebhafteren, geschweige wilderen Strömung fehlen, bzw. daß sie örtlich und vereinzelt nur ganz schwach ausgebildet sind. Weil dies zutraf, faßte der Gedanke in mir Wurzel, daß jene Räume nur von Seen mit schwankenden Spiegeln oder still bewegten Wässern zu solcher Größe ausgelaugt wurden.

**§ 89.** Wenn eine einst vorhandene Druckströmung aus eckigen Hohlräumen solche mit mehr rundlichem Querschnitt gemacht hat und dann eine Zeit kommt, wo das Wasser den weiter gewordenen Querschnitt nicht mehr ständig ausfüllt, d. h. nicht mehr unter Druck durchströmt, dann müssen nicht immer Sohlengerinne oder eine Verbindung solcher mit Siphonen den Abfluß besorgen. In flachen, mäßig auf und absteigenden Höhlenstrecken mit engem Abzug müssen sich dann vielmehr lange Höhlenseen mit Stauspiegeln bilden. Dann hängt es nur vom Verhalten ihrer Spiegel ab, welche Veränderungen die bereits vorhandenen rundlichen Querschnitte in der folgenden Zeit erleiden. Und die späteren Querschnitte werfen wieder ein Licht auf die stattgefundenen Spiegelschwankungen zurück. Man hat also in Höhlen nach dem Aufhören anfänglicher Druckströmungen nicht mehr von senkrechten engen Spalten, sondern von weiten und mehr rundlichen Querschnitten auszugehen, wenn man die Wirkungen von Spiegelschwankungen verfolgt. Die folgende Betrachtung ist zunächst an die einfache Kreisform geknüpft. Was Abb. 52 für die linke Hälfte eines Kreisgewölbes zeigt, gilt ebenso für die rechte und gleichartig für die anderen Viertel einer ursprünglichen Kreiszyklinderröhre, in der sich

Spiegelschwankungen einstellen. Dies veranschaulichen fünf Spiegelstände, welche ein gleichförmiges Sinken sich stets erneuernden Wassers darstellen sollen, indem ihren gleichen Abständen gleiche Zeitunterschiede entsprechen. Das Sinken erfolge so langsam, daß die benetzten Wandteile durch Lösung von der Mitte weggeschoben werden, um so mehr, je länger die Benetzung dauert.

Der Lösungserfolg wird senkrecht zur Wandfläche gemessen, also hier in radialen Richtungen. Da den ausgewählten Spiegellagen fünf gleiche Zeitabstände entsprechen, so ist auch der Lösungserfolg in jeder tieferen Spiegellage um den gleichen Betrag größer als in der höheren unmittelbar zuvor. Das Kreisgewölbe wird in ein breiteres verwandelt. Daher nimmt die Spiegelbreite zu. Das verbreiterte Gewölbe ist nicht ganz genau konstruiert, denn der Lösungserfolg kann streng genommen nur für die Kreisform in radialer Richtung aufgetragen werden, während in Abb. 52 die Radien nicht mehr senkrecht zum sich verbreiternden Gewölbequerschnitt stehen. Wenn aber der Vorgang nicht weiter verfolgt wird, als in Abb. 52, darf man

es unterlassen, die Kreisradien durch krumme Linien zu verlängern, denn der Fehler überschreitet noch kaum die gezeichnete Strichdicke des Gewölbes. Die neue Gewölbeform würde sich genau so einstellen, wenn das Wasser statt langsam zu sinken, ebenso langsam mit gleichförmigem Spiegelanstieg in einem trockenen Kreisröhrenschnitt von unten einmal emporstiege. Nur die Nummern der Spiegelstände

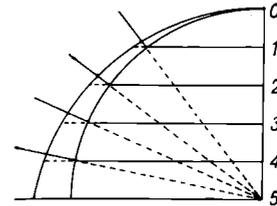


Abb. 52.

Halbes Kreisgewölbe, das bei sehr langsamem gleichförmigem Sinken eines Wasserstandes durch Auslaugung nach unten in zunehmendem Maße verbreitert wird.

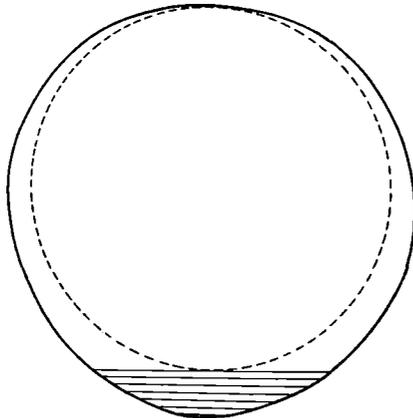


Abb. 53. Umgestaltung eines kreisförmigen (gestrichelten) Hohlraumquerschnittes durch Auslaugung bei gleichförmigen Spiegelschwankungen. Die Benetzungsfristen der Wand nehmen von oben bis zur Mitte in wachsendem Maße zu, von der Mitte nach unten nehmen die Benetzungsfristen in sich vermindertem Maße zu.

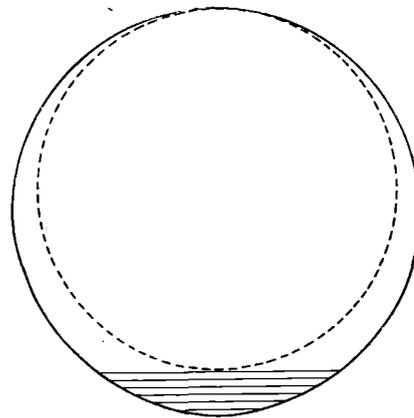


Abb. 54. Umgestaltung eines kreisförmigen Hohlraumquerschnittes durch Auslaugung bei pendelartig auf- u. niedergehenden Spiegelschwankungen. Diese sind von der Mitte nach oben und nach unten verzögert, gegen die Mitte beschleunigt. Die Benetzung der Wand nimmt dann nach unten gleichförmig zu und ebenso der Auslaugungserfolg.

wären dann von unten nach oben zu ordnen. In der Natur muß man durchaus nicht damit rechnen, daß eine einzige gleichsinnige Wasserstandsänderung langsam genug erfolgt, so daß die Lösung das ursprüngliche Kreisgewölbe merklich umgestaltet. Wohl aber muß sich in geologischen Zeiten bei vielen Schwankungen der Spiegel nach oben und unten ein von der Kreisform stark abweichender Querschnitt einstellen. Jener der Abb. 52 entspricht gleichförmigen Spiegelschwankungen und demgemäß

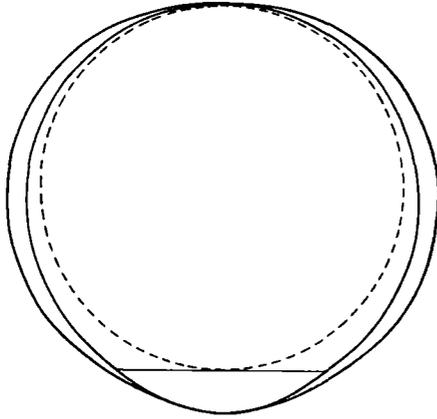


Abb. 55. Umgestaltung kreisförmiger Röhrenquerschnitte durch Auslaugung bei gleichsinnig beschleunigten und gleichsinnig verzögerten Spiegelschwankungen. Der äußere Querschnitt entsteht, wenn die Spiegel gleichförmig beschleunigt bis zum tiefsten Stand sinken und von dort wieder gleichförmig verzögert steigen. Der innere Querschnitt entsteht bei den gegenteiligen Bedingungen. Die Benetzungsfristen nehmen im ersten Fall nach unten in abnehmendem Maße zu, anfangs fast gleichmäßig; im zweiten Fall nehmen sie nach unten beschleunigt zu, in der unteren Hälfte fast gleichmäßig.

ungleichförmigen Änderungen der Benetzungsfristen am Ufer des Wassers. Denn während z. B. das Wasser von 0 bis 1 sinkt, weicht die Benetzung der Wand um eine viel längere Strecke zurück, als während der Spiegelsenkungen von 1 nach 2 usw. Abb. 53 lenkt den Blick von den Einzelheiten des Viertelquerschnittes auf das Ganze. Sie zeigt also, wie sich der gestrichelte ursprüngliche Kreiszyylinder zu einer neuen Röhrenform verwandelt, wenn das Wasser gleichförmig seine Spiegelstände vom Scheitel bis zu dem untersten Punkte des Querschnittes lange genug auf und abgeschoben hat und dabei eine fortschreitende Bewegung die konzentrierte Lösung nicht sich ansammeln läßt wie bei Segeberg, sondern im ganzen Raum stets lösungsfähiges Wasser zur Verfügung stellt. Abb. 54 zeigt einen Querschnitt, der entsteht, wenn sich im ursprünglichen Kreiszyylinder jene ungleichförmigen Spiegelschwankungen einstellen, welche im Gegensatz zum vorigen Fall ein gleichförmiges Vordringen und Zurückweichen der Benetzung der Wand bewirken. Die Spiegelstände beschreiben dann eine geradlinige Schwingung, welche genau jener gleich, die der Schatten einer Kugel ausführt, wenn die Kugel gleichförmig längs eines Kreisumfanges rollt und der Schatten von einer Wand senkrecht zur Kreisebene aufgefangen wird. Abb. 55 zeigt, abgesehen vom gestrichelten ursprünglichen Kreisquerschnitt, zwei ausgezogene Auslaugungsquerschnitte. Der äußere entspricht Wasserstandsschwankungen, bei denen die Spiegel gleichförmig beschleunigt sinken und gleichförmig verzögert steigen, der innere ausgezogene Querschnitt entspricht dem umgekehrten Verhalten der Spiegel. Die geschlossenen Kurven der Abb. 53 und 54 sind zwar nicht gleich, aber doch wenig verschieden, obwohl bezüglich der Spiegelbewegungen sehr ungleiche Annahmen gemacht wurden. Die Unterschiede der Auslaugungsquerschnitte wären viel bedeutender, wenn der Vorgang länger gedauert

wären dann von unten nach oben zu ordnen. In der Natur muß man durchaus nicht damit rechnen, daß eine einzige gleichsinnige Wasserstandsänderung langsam genug erfolgt, so daß die Lösung das ursprüngliche Kreisgewölbe merklich umgestaltet. Wohl aber muß sich in geologischen Zeiten bei vielen Schwankungen der Spiegel nach oben und unten ein von der Kreisform stark abweichender Querschnitt einstellen. Jener der Abb. 52 entspricht gleichförmigen Spiegelschwankungen und demgemäß ungleichförmigen Änderungen der Benetzungsfristen am Ufer des Wassers. Denn während z. B. das Wasser von 0 bis 1 sinkt, weicht die Benetzung der Wand um eine viel längere Strecke zurück, als während der Spiegelsenkungen von 1 nach 2 usw. Abb. 53 lenkt den Blick von den Einzelheiten des Viertelquerschnittes auf das Ganze. Sie zeigt also, wie sich der gestrichelte ursprüngliche Kreiszyylinder zu einer neuen Röhrenform verwandelt, wenn das Wasser gleichförmig seine Spiegelstände vom Scheitel bis zu dem untersten Punkte des Querschnittes lange genug auf und abgeschoben hat und dabei eine fortschreitende Bewegung die konzentrierte Lösung nicht sich ansammeln läßt wie bei Segeberg, sondern im ganzen Raum stets lösungsfähiges Wasser zur Verfügung stellt. Abb. 54 zeigt einen Querschnitt, der entsteht, wenn sich im ursprünglichen Kreiszyylinder jene ungleichförmigen Spiegelschwankungen einstellen, welche im Gegensatz zum vorigen Fall ein gleichförmiges Vordringen und Zurück-

hätte und z. B. der senkrechte Durchmesser der erweiterten Höhle die  $1\frac{1}{2}$ fache Länge des ursprünglichen Kreisdurchmessers erhalten hätte. Nur kann man dann die einfach abgeleitete Zeichnung nicht innerhalb erträglicher Fehlergrenzen ausführen.<sup>1)</sup> Auch das bisher Vorgebrachte genügt, um zu zeigen, daß verschieden verlaufende Spiegelschwankungen in der Natur allmählich riesige und sehr ungleich gekrümmte Auslaugungsquerschnitte in Hohlräumen herbeiführen können. Dabei wird man es mit durchschnittlichen Schwankungen der Spiegelstände zu tun haben, die mathematisch nicht einfach definiert sind, ja vielleicht auf solche Art nur äußerst schwer und bloß angenähert einzufangen sind. Abb. 72 zeigt einen Riesenraum von gleichbleibender Höhenlage. Trotz manchem Versturz sind seine Rundungen so beschaffen, daß in den Hauptzeiten seiner Entwicklung eine langsam bewegte Wasserfüllung mit Spiegelschwankungen allein wahrscheinlich ist.

§ 90. Die allseitige Ausbildung weiter stetiger Auslaugungsräume wird in der Natur dort weniger einfach sein, wo Steine von der Höhlendecke während der Auslaugung zu Boden fallen oder hereingeschwemmt werden. Zwar ist auch dieser Sohlenbelag löslich, aber er verhindert die stetige Fortsetzung der Wandrundung nach unten gleichwohl. Zwischen den Steinen und Blöcken wird sich zudem leicht Wasser höherer Konzentration bewegen, das langsamer lösend wirkt. Schließlich können Lehmeinschwemmungen und -absätze die Lösung an der Sohle überhaupt stark vermindern. Zu diesen Gründen, welche erklären können, warum man in manchen Tunnelhöhlen glatte großzügige und eigenartige Wölbungen meist nur über sich, nicht aber unter sich findet, gesellt sich auch noch die Tatsache nachträglicher, die Felssohle verhüllender Ablagerungen. Unter solchen Umständen sind besondere Merkmale erwünscht, die einem das Recht geben, das Gesagte anzuwenden, d. h. die theoretischen Auslaugungsquerschnitte auch in bloß oberseitig und links und rechts verfolgbaren Krümmungen der Röhrenquerschnitte zu vermuten und auch in Tunnels mit ziemlich flacher Sohle wieder zu erkennen. Ein solches besonderes Merkmal ist der fast auf Schritt und Tritt erfolgende Wechsel der Wölbungsform in länglichen Höhlen mit einigen Auf und Ab der Röhrenachse. Denn bei jeder nicht gleichförmigen Spiegelschwankung herrscht in verschiedenen Höhen eine andere Geschwindigkeit der Niveauverschiebung. Ein Tunnelstück mit einer nach unten durchgebogenen Längsachse liegt vielleicht in durchschnittlich beschleunigt steigenden Spiegeln, in seiner Fortsetzung steigt die Höhle vielleicht mit der Sohle höher hinauf als vorher die Decke war und gelangt zu Höhen, wo die Spiegel verzögert steigen. Daraus gehen ununterbrochen sich ändernde Gewölbebögen hervor. Solches ist tatsächlich zu sehen oder es ist selbst noch nach manchem späteren Deckenabbruch der Eindruck,<sup>2)</sup> wenn man sich nicht durch die kantigen Einzel-

<sup>1)</sup> Vor allem müßten wieder verschiedene Fälle berücksichtigt werden, wie z. B. das allmähliche Nachsinken der mittleren Spiegellage und zeitweise völliges Leerlaufen der Hohlform beim Fortschritt der Höhlenentwicklung. Die Berechnungen und Konstruktionen, die zur richtigen Ausführung und Erklärung der Abb. 53 bis 55 nötig waren, wurden vorgenommen. Zu einer Gleichung der Kurven drang ich nicht vor. Diese muß ich einem Mathematiker überlassen, der den auch für ihn erheblichen Zeitaufwand auf sich nehmen kann.

<sup>2)</sup> In der Monographie VI (Nr. 44) ist auf Tafel XIX die Wölbung des U-Tunnels in der Eisriesenwelt zu sehen, die nach innen aufsteigend sich verändert. Die Asymmetrie

heiten ablenken läßt. Die künstlichsten Kurven der barocken Baukunst reichen nicht heran an den unerschöpflich mannigfachen Schwung der Wölbungen in Höhlen dieser Ausbildungsart. Gewiß ist nicht jede Veränderung der Wölbung, habe sie auch eine stetige Krümmung, ein Beweis für entsprechende Veränderungen der Spiegelschwankungen einstiger Höhlenseen in auf und absteigenden Höhlen. Auch die geologische Urform des Hohlraumes spielt dabei mit, die sich keineswegs überall erst in eine sehr rundliche Form hat bringen lassen, ehe die abgeleiteten Umrißkurven der Auslaugung bei schwankenden Spiegeln entstanden.

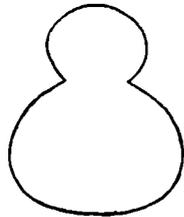


Abb. 56. Zusammengesetzter Höhlenquerschnitt, ist in so glatter Form am leichtesten durch Auslaugung erklärbar, wenn ruhig schwankende Spiegel eine gewisse Höhe lange nicht mehr überschritten.

Aber der Einfluß der geologischen Uranlage zeigt doch nicht solche Feinheiten. So erwähnt Biese (Nr. 34, 1926, S. 36), wo er von Gewölbeprofilen spricht, ebenfalls den schnellen Wechsel im Habitus solcher Hohlräume, „die nur wenige hundert Meter weit — in den meisten Fällen auf viel kürzere Strecken“ — eine Profilform beibehalten. Er nimmt für solche Fälle außer der wohl hauptsächlich lösend gedachten Wasserwirkung geologische Vorgänge an, nämlich Gesteinsablösungen und -abspaltungen durch Gebirgsdruck. Gewiß ist es, daß tektonische Nah- und Fernwirkungen, wie das Auslösen von Spannungen nicht nur für die Urformen heranzuziehen sind, sondern daß auch während der Wasserarbeit ein Wiederaufleben und die Einschaltung von solchen Profilen denkbar ist, die von Ur-

profilen weniger in der Form als im Zeitpunkt der Bildung abweichen. Aber wer Bieses Beobachtung aufmerksam vernimmt, wird sogar einen Anhaltspunkt darin finden, die reinen Auslaugungsquerschnitte, die im vorigen Paragraphen theoretisch behandelt wurden, von geologisch beeinflussten Veränderungen der Querschnitte zu unterscheiden.

Manchmal trifft man auch einen Höhlenquerschnitt, wie Abb. 56 einen zeigt. Sofern es sich dabei nicht um die Zerstörung einer Zwischendecke ungleich weiter Röhren handelt,<sup>1)</sup> kommt am meisten die Annahme in Betracht, daß der tiefere Teil der Höhle für sich allein unter einer Spiegellage ausgelaugt wurde, welche durch lange Zeiträume oft erreicht, aber nicht mehr regelmäßig überschritten wurde. Wo die Kante zwischen dem oberen und unteren Teil wagrecht verläuft, steht einer solchen Erklärung vorläufig nichts im Wege. Ich kenne einen Fall, wo diese Kante schräg verläuft, ohne daß man sonst einen Grund hat, an einen Deckendurchsturz zu denken. Dafür sind in dem weiteren unteren Teil des Querschnittes regelmäßig Kolke wie von Uferwirbeln erhalten, so daß man mit Recht eine nachträgliche Schiefstellung vermuten kann, für welche noch unabhängige Merkmale zu suchen wären, die eine solche Vermutung über den Rang einer Hilfshypothese erheben würden.

§ 91. Auch in anderen Erscheinungen findet die Ansicht eine Stütze, daß in manchen Tunnelhallen längliche Füllungen mit schwankenden Spiegeln die Aus-

ihres Querschnittes deutet auf eine asymmetrische geologische Ausgangsform. Die Kreisform wurde ja nur wegen der Einfachheit der Überlegungen zur Grundlage gewählt.

<sup>1)</sup> Vgl. das in Nr. 29, S. 90 von der Satanshalle Berichtete.

laugung besorgten. Wo steile Kamine von der Decke solcher Höhlen nach oben abzweigen, muß bei genügendem Anstieg des Wasserstandes die Flut in diese Kamine eindringen. Solange sie so hoch reicht, steht die ganze Höhlenstrecke unter Druck. Der Kamin wird dabei zu einem rundlichen Schlot ausgelaut. Die engen rauen Formen darüber verraten eine obere Grenze der Wasserstände. Sind großzügige Spiegelschwankungen gegeben, so erhält der Schlot eine nach unten trichterförmige Erweiterung.<sup>1)</sup> Diese Trichter können so großartig sein wie im Alexander v. Mörkdom in der Salzburgischen „Eisriesenwelt“. In dieser Halle kann man in dem dunklen Dämmer der Höhe von 40 *m* den Übergang zum engeren Deckenschlot mehr ahnen als sehen. Sehr wichtig sind die Erscheinungen in derselben Höhle beim P. 1780,8, wo über einer viel bescheideneren Trichterform der Decke von „Midgård“ ein ungeheurer elliptischer Schlot ansetzt, dessen Durchmesser 9 und 6 *m* Achsenlängen aufweisen. So ergibt es der Höhlenplan, ohne daß die Beobachtung daran wesentliches geändert hätte, denn ein Trümmerhügel unter diesem Schlot erlaubt einem, zu ihm näher hinauzusteigen und ziemlich sicher zu schätzen. Dieser Schlot reicht als glatte Röhre keine 10 *m* empor (wahrscheinlich erheblich weniger), aber wohin man noch gut sieht, hat seine Wand eine leichte Riefelung wie ganz flache Schraubengänge. Heute arbeiten Rieselwasser und heftige Tropfenfälle, wohl auch Steinschlag aus dem rauen Teil des Kamins an der Zerstörung dieser Riefelung. Aber einst wurde der Schlot hauptsächlich von unten nach oben unter Wasser gesetzt und dieses geriet, wie man aus den gewundenen Riefen folgern darf, in eine Drehbewegung. Ihre grundsätzliche Bedeutung kann erst später in Verbindung mit anderen Drehbewegungen erwogen werden (vgl. § 95).

Wie hoch unter Umständen das Wasser in Schloten steigen kann, ergab die Aufgrabung von mährischen Erdfällen (Dolinen) durch R. Trampler.<sup>2)</sup> Es waren Erdfälle, von denen sich mindestens der eine zeitweilig von unten mit Wasser füllt, wenn starke Regenfälle in 1,0 und 1,6 *km* Entfernung kleine Wildwasser in Schluckschlünde hinabsenden. Ähnlich wirkt jähe Schneeschmelze. Beim Aufgraben dieses Erdfalles entdeckte man unter der begrünten Karstmulde einen zum Teil schräg verlaufenden Schlot, der aus der Decke einer kleinen engen Halle aufstieg. In ihr lag ein Seelein von 11 *qm* Fläche und 5 *m* Tiefe, darauf schwammen Holzklötze. Die Halle reichte 11 *m* über den Wasserspiegel. Das Wasser steigt nun manchmal weitere 24 *m* über deren Decke empor, so daß es am Tage 4 *m* tief in der Doline steht. Es ist bei diesem Beispiel nicht ausgeschlossen, daß die Holzklötze die enge Wasserhöhle zeitweilig verstopfen, da der Abzug unter dem Spiegel des Seeleins liegt, und daß die größte Anschwellung durch diese Verstopfung entsteht.

**§ 92.** Betrachten wir noch einige Anzeichen dafür, daß in Höhlen ein sehr ruhig bewegter Wasserinhalt vorhanden war, ganz gleich, ob nun noch Spiegelschwankungen dabei eine Rolle spielten oder nicht. Ein solches Anzeichen sind Deltabildungen. Den Rest einer solchen aus der Eisriesenwelt zeigt Abb. 73. Diese

<sup>1)</sup> Abb. 50 b kann hier herangezogen werden, aber man muß sie nicht als Auslaugung einer senkrechten Spalte, sondern als Querschnitt einer Rotationsfigur ansehen.

<sup>2)</sup> Mitt. d. Geogr. Ges. Wien, 1893, S. 241ff. Es ist erstaunlich, daß mir in der ganzen gelehrten Karstliteratur der folgenden Jahrzehnte nicht eine einzige Heranziehung von Trampfers hochwichtigen Beobachtungen untergekommen ist.

Deltabildung erkennt man sicherer als manche im Freien, weil hier ihr Kern deutlicher entblößt ist. Das ist jene älteste Ablagerung am Grunde, wo sich noch die Zunahme der Fläche des wachsenden Deltas deutlich in einem Dünnerwerden der Schichtung ausspricht. Dadurch kann leicht der Eindruck entstehen, das Delta liege auf einem ungeschichteten Sockel. Es ist allerdings möglich, daß sich das Delta wirklich auf einer solchen Unterlage abgesetzt hat. Dann können nur Untersuchungen von Fall zu Fall die Bildungsgeschichte erhellen. So weit die Deltabildungen in Höhlen nicht aus weiter transportierten kristallinen Sanden bestehen, sondern aus Kalkgeröllen, ist bei der Kürze aller Karstbäche nur eine sehr schlechte Abrundung zu erwarten.

Derartige Kalkschotterbänke im Verbindungsstück des Doms ohne Namen und des Doms der Vereinigung in der Dachstein-Mammuthöhle haben einen gewissen Ruf erlangt, weil einst H. Bock damit jene riesigen Geschwindigkeiten ausrechnete, für welche der Nachweis der erforderlichen Niederschlagsmengen nie gelungen ist, noch gelingen konnte. Nach Biese (Nr. 36, 1926, S. 5) hegt Bock jetzt die Vermutung, daß die Gerölle durch einen Schlot in die Höhle gelangten. Diese Vermutung ist viel annehmbarer, auch Biese hat sich ihr angeschlossen. Den nach der Gestalt der Schotter anzunehmenden kurzen Transport hält er für ein Hindernis der von Smekal im Einklang mit mir veröffentlichten Auffassung,<sup>1)</sup> es handle sich um eine Art Deltaablagerung. Vom geographischen Standpunkt spielt weder die Entfernung noch die Richtung, aus der Schotter herangeschwemmt werden, eine Rolle bei der Benennung ihrer Ablagerungsform. Der Lauterbrunnenbach oder der Nardisbach im Val di Genova schleudern in freiem Fall Wildbachschotter — meist eher Schutt an ihren Fuß. Das Gebilde, das dort entsteht, ist ein Wildbachkegel, und wenn es in einem See entsteht, ein Delta. Dies gilt auch, wo Wasser in Schlote hinabfällt. Es wäre eine geographisch nicht annehmbare Einengung des Begriffes Delta, wenn man den genannten wohlgeschichteten und sortierten, etwas kantengerundeten Kalkstücken der Mammuthöhle diese Bezeichnung aus den Gründen Bieses versagen wollte.

Einen Beweis erstaunlich ruhiger Wasserbewegungen hat man in den Gipshöhlen angetroffen, welche der Mansfelder Bergbau angefahren hat. Wie Penck (Nr. 38, S. 182) berichtet, sind die Wandungen der „Schlotten“ genannten Höhlen streckenweise von reinem Alabaster gebildet und hier hat die Lösung die weitesten Fortschritte gemacht. Wo aber der Gips unrein ist, ragen die eingeschalteten (schwer löslichen) Stinksteinschichten aus der Gipsoberfläche heraus, sogar frei schwebend hängen sie herab. Penck stützt sich auf den Bericht von Johann Carl Freiesleben aus dem Jahre 1809 und entnimmt ihm folgende anschauliche Worte: „Wir trafen in den ersten Tagen der Zugänglichkeit solcher Schlotten noch häufig ganz dünne, spinnwebeähnlich freischwebende Lagen von Stinksteinen, die nur der leisesten Berührung, nur eines Hauches bedurften, um in Asche zu zerfallen.“ Penck hebt auch gleich hervor, daß es sich in diesen Höhlen um Korrosionserscheinungen in ruhigem Wasser handelt, das nur von den in den Gips eingesickerten Wässern herrühre, und, wo man es angetroffen hat, „fast bewegungslos“ gefunden wurde.

<sup>1)</sup> Der Bergsteiger 1923, S. 155.

§ 93. Die Betrachtung der Trichterformen mit enger Schlotfortsetzung nach oben hat in einem Falle, wo eine schraubenähnliche Riefelung erhalten war, die Vorstellung einer Drehbewegung hervorgerufen, die das in den Schlot anschwellende Wasser befolgt. Dabei ist in Höhlen ein Anschwellen des Wassers von Dezimetern in Minuten schon reißend zu nennen. Diese Drehung ist also mit einem spiraligen Anstieg verbunden. In einem gewöhnlichen nach unten sich entleerenden Trichter ist ein spiraliger Abstieg leicht jederzeit zu beobachten. Die Geschwindigkeiten sind dabei unvergleichlich größer und enden mit denen einer freien Fallstrecke. Man hat also allen Grund, die Hartnäckigkeit zu beachten, unter der das spiralförmige Fließen sich — hier an Querschnittsänderungen — bei so verschiedenen Geschwindigkeiten einstellt (vgl. § 27). Die nächste Folgerung ist, daß auch schwache und

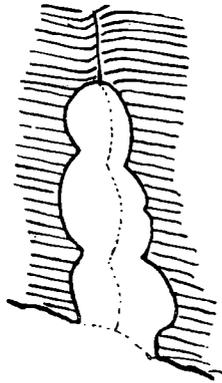


Abb. 57. Schnitt durch eine Sackröhre in einer Höhlendecke. Diese Hohlform endet nach oben an einer Haarfuge. Sie wurde vom Wasser ausgebildet.

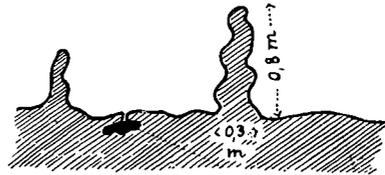


Abb. 58. Hohlgänge in der Decke der Beatushöhle am Thuner See und durch Auslaugung herausgearbeitete Kieselknollen. Zeichnung von Arnold Heim. Die größere Sackröhre, von Heim als Spiralgang bezeichnet, findet sich 614 m vom Eingang.

langsame Wirbel dem löslichen Gestein die morphologischen Spuren ihrer Bewegungsart aufprägen können.

Schlote, in denen das Wasser unter Drehung emporsteigt und sie auslaugt, brauchen nicht zu oberirdischen Dolinen zu führen, sie brauchen sich auch nicht überall in rauhe Tropfwasserkamine fortzusetzen. Vielmehr können innerhalb des Schwankungsbereiches der Spiegellagen die Kamine auf einmal an einer geologischen Haarfuge enden. In solchen Fällen entstehen statt der Schlote oft meterhohe, bei drehender Bewegung ausgelaugte, manchmal schlauchartig hinangekrümmte Sackröhren (Abb. 57). Zwar wird dabei ihr oberes Ende mindestens zeitweilig unter Druck gesetzt, es ist aber unbekannt, ob das Steigen solchen Druckes die Drehbewegung schwächt oder stärkt. Darum ist es verfrüht gewesen, diese Gebilde als „Druckkolke“ zu bezeichnen; wo man das ausnahmslos tut, ist es sogar verfehlt. Es besteht ohnehin die Neigung, sich in Höhlensträngen, wo solche Deckenkolke vorkommen, überall heftige Druckströmungen vorzustellen. Aber dagegen spricht eine wichtige Beobachtung in der Beatushöhle über dem Thuner See. Sie werde hier in der Form wiedergegeben, wie sie Arnold Heim<sup>1)</sup> gezeichnet hat, ein in Höhlen-

<sup>1)</sup> Über die Beatushöhlen am Thuner See. Vierteljahrschrift der Naturforsch.-Gesellschaft in Zürich 54, 1909, S. 60.

fragen den alten Meinungsverschiedenheiten ganz fernstehender Beobachter, der einfach das, was er gezeichnet hat, eine für ihn „ganz rätselhafte Erscheinung,, nannte. Die Zeichnung Heims ist in Abb. 58 genau wiedergegeben. Er spricht von einem „Spiralgang“ an der Höhlendecke, „gleichsam eine reziproke Gletschermühle“. „An der gleichen Stelle sieht man an der Decke als Auslaugungsrückstände einzelne schwarze Kieselknollen (in Form „reziproker Gletschertischchen“). Im allgemeinen sind Kieselkonkretionen im Schrattenkalk selten; hier aber treten sie bis zu 10 cm Dicke auffällig hervor.“ Es hat also in dieser Höhle hier die mechanische Wucht der einstigen Höhlenströmung nicht ausgereicht, die „reziproken Gletschertischchen“ von ihren dünnen Stielen zu brechen, die vielmehr offenbar der Lösung entgangen sind. Eben das zeigt, daß die Kolke daneben als reziproke Gletschermühlen nicht glücklich bezeichnet sind, sondern vom Wasser bei sanft drehender Bewegung ausgelaugt wurden, indem es eine ihm zugängliche ältere Hohlform der Decke erweiterte. Es geschah chemisch dasselbe wie im Umkreis der Kieselknollen. Die Höhlenstrecke mit diesen Kolken verläuft mit scharfen Knickungen und wird vom Bach auf verborgenem Wege östlicher abgeschnitten, wobei er aber tiefer fließt wie die Höhle selbst; er folgt dem kräftigen Gefälle von 10 bis 15°, welches das Schichtfallen vorschreibt. Es wäre nun verfehlt, wegen dieser Beobachtungen alle Kolke, Wirbelnischen u. dgl. in Karstgesteinen durch reine Auslaugung und ohne die geringste mechanische Arbeit erklären zu wollen. Richtiger ist es heute, den nüchternen, ganz allgemeinen Gedanken festzuhalten, daß eben das Wasser seine Drehbewegungen im Fels abbildet; in unlöslichen Gesteinen (d. h. ungeheuer schwer löslichen) geschieht dies durch mechanische Angriffe, in leicht löslichen kann dies ebenso geschehen, aber in anderen Fällen auch auf chemischem Wege. Eine leise mechanische Mitwirkung von Reibung der Trübe oder des Schwebes muß dabei gar nicht bestritten werden. Morphologische Merkmale, chemische und mechanische Arbeit an Karstgesteinen zu unterscheiden, gibt es nur dort, wo offenbar große Steine und Kiesel mitarbeiten, also in Mühlen und Strudeltöpfen. Hingegen wies in der Geologischen Gesellschaft in Zürich Herr Prof. Albert Heim darauf hin, daß Auslaugung in den Hohlformen auch bei glattem Aussehen der Kolkwände sich den Fingerspitzen durch feine Rauheit des Gesteins verrate, mechanische Arbeit aber durch politurartige Glättung. Ich bin Herrn Prof. Heim für diese wertvolle Ergänzung meines vorangegangenen Vortrages überaus verbunden, die er aus dem Schatze seiner Erfahrung beisteuerte.

§ 94. Der Bildung von Deckenkolken kann man in Wasserhöhlen manchmal eine Zeit lang zusehen. Solche Beobachtungen verdanke ich einer Einladung des Herrn Prof. Smekal, nach dem gemeinsamen Besuch der Mammuthöhle im Dachstein noch am gleichen Abend mit ihm in die Koppenbrüller Höhle bei Obertraun zu gehen, weil inzwischen ein heftiges Unwetter seine Güsse herabgesandt hatte. Der tobende Lärm in der Höhle schien nur zum kleinen Teil von einem Wasserfall und einem Bach herzustammen, der aus der „Krokodilhalle“ zum Pollaksiphon strömte und hoch angeschwollen war; zu dieser Jahreszeit bleibt der Bach aber tief unter der Schwelle des Höhlentores. Sein Lauf war deutlich geneigt, also sehr steil für ein Sohlengerinne und das Bett uneben. Wie der Führer sagte, stand das Wasser schon 1,5 m über dem Niederwasser. Nach schätzungsweise 20 m Laufes berührte

der Bach die eintauchende Höhlendecke. Dadurch begann eine Druckströmung schon oberhalb des ihn verschlingenden Siphons. Die wagrechte Komponente der Bewegung war dort merklich verlangsamt, vielleicht sogar unter 1 m/sek. Aber die Breite des Bettes, die Niedrigkeit des Querschnittes, in dem man sich, am Bauche liegend, den Kopf am Felsen rieb und der heftige Zustrom ließ den Stauspiegel nicht ruhen. Diese Umstände im Verein mit dem Abstand des rundlichen Pollaksiphons von der Stelle, wo die Decke untertauchte, verhinderten, daß sich am Beginn der Druckströmung ein einfacher, den ganzen Bach erfassender Saugwirbel bildete.

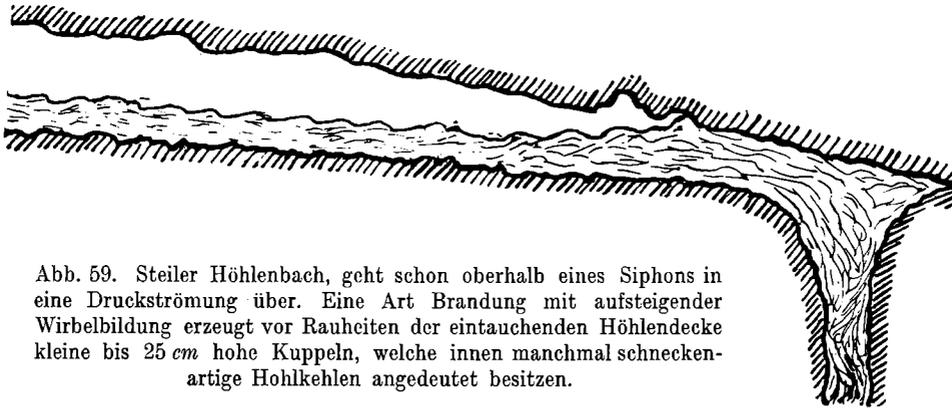


Abb. 59. Steiler Höhlenbach, geht schon oberhalb eines Siphons in eine Druckströmung über. Eine Art Brandung mit aufsteigender Wirbelbildung erzeugt vor Rauheiten der eintauchenden Höhlendecke kleine bis 25 cm hohe Kuppeln, welche innen manchmal schneckenartige Hohlkehlen angedeutet besitzen.

Ein solcher Wirbel hätte sich hier größtenteils um eine flache Achse drehen und Wasser auf der einen Seite nach oben schleudern müssen. Aber auch eine Deckwalze um eine wagrechte Achse quer zum Bach war nicht zu sehen; sie bilden sich, wo Wasser unter halboffenen Schleusen hindurchschießt. Das Wasser war, wo die Höhlendecke eintauchte, noch in sehr lebhafter Bewegung, die es allerdings an einigen Stellen zur Decke aufwallen ließ. Ob es hiebei unter dem Einfluß mehrerer kleiner Wirbel mit flachen Achsen stand, konnte nicht sichergestellt werden. Zweifellos großen Einfluß auf das Verhalten des rückgestauten Wassers hatten die groben Rauheiten und bedeutenden Hervorragungen des eintauchenden Felsens. Hinter jedem Vorsprung an dieser Stelle zeigte die Oberfläche des Baches Wirbel um aufrechte Achsen, immer wieder wuschen sie in die Vertiefungen der Decke hinein und zwar auch in immer neue, denn das Wasser schwoll in jeder Minute um etwa 10 cm an. Abb. 59 möge die Sachlage beleuchten, sie will keine genaue Wiedergabe der topographischen Verhältnisse sein. Herr Prof. Smekal wies auf kleine Kuppeln dicht über dem Wasser hin, die mich an eine sehr ähnliche in der Eisriesenwelt erinnerten,<sup>1)</sup> und konnte das Verhalten des Baches selbst in noch wenig ausgerundeten Deckenvertiefungen sofort zur greifbaren Erklärung heranziehen. Man gewann den Eindruck, daß so kleine Deckenkolke besser ausgebildet werden, wenn der Spiegel nicht so schnell die Höhe ändert. Ob auf diese Art mehrere Meter hinaufführende gewundene Sackröhren entstehen können, ist durch die beschriebenen Beobachtungen nicht bewiesen. Trotz des großen Gefälles des heranschießenden Sohlenbaches, trotz des Getöses, das es oft unmöglich machte, dem Nachbar mit Erfolg etwas ins Ohr zu

<sup>1)</sup> Nr. 29, S. 94; Nr. 45, VI, 1926, S. 57.

schreien, konnte man die größte Geschwindigkeit des Baches kaum auf mehr als 2 m/sek schätzen.<sup>1)</sup> An der Staustelle in Berührung mit der Decke war sie nur etwa halb so groß. Die nach oben greifende Drehbewegung hatte sich hier der mechanischen Reibwerkzeuge von emporgeschleuderten Steinen und grobem Sand nicht erkennbar bedient, obwohl dergleichen im Bachbett nicht ganz fehlte. Ich wage keinesfalls zu sagen, daß die Ausarbeitung der Ausstrudelungskuppeln im Koppenbrüller größtenteils mechanisch erfolgte. Anderseits ist es kaum vorstellbar, daß die Stielchen herabreichender Konkretionen diesem Wildbach standhalten würden. Immerhin war es von Wert, die Drehbewegungen des Wassers an den entscheidenden Stellen einmal gesehen zu haben und so von bloßen morphologischen Spuren in trockenen Höhlen unabhängig zu werden. Deckenkolke, besonders hohe, sind jedenfalls keine Handhabe, um ohne sonstige Beweise in ihrem Bereich eine heftige turbulente Bewegung für die Vorzeit zu behaupten.

§ 95. Steile Schlote und Sackröhren zeigen also manchmal eine Riefelung oder schneckenartig gekrümmte Ausbauchungen in den Fels hinein. Gerieft erscheinen manchmal auch flache, sozusagen wagrecht verlaufende Röhren und Tunnelstrecken. Die Wülste und Furchen liegen dann fast senkrecht zu der Längsachse. Ein Beispiel bietet Abb. 74 aus der Eisriesenwelt. Es scheinen dort Festigkeitsunterschiede des Gesteins mitzuwirken, aber in einem Falle ließ sich sogar ein wirklicher Schraubengang verfolgen, so daß der Schluß berechtigt ist, daß die vermuteten Festigkeitsunterschiede sehr spitzwinkelig zu den ebenfalls engen Bahnen eines einst spiralig vorschreitenden Fließens lagen. Denn schon der Name „Wassergang“, den die Salzburger Höhlenforscher dieser Röhrenstrecke gaben, spricht für den sinnfälligen Eindruck kräftiger Wasserarbeit, den sie hier empfingen. Es ist auch die einzige Stelle, wo mir die Vorstellung einer „Ausbohrung“, d. h. der Erweiterung eines vorhandenen Hohlraumes durch das spiralig fließende Wasser ohne weiteres begreiflich wurde.<sup>2)</sup> Der daran geschulte Blick erkannte in der „Eisriesenwelt“ gleichartige Formen, auch im Einstiegsstollen zum ersten Verbindungsgang. Im allgemeinen scheinen so geformte Auswaschungen in flachen Höhlenteilen gar nicht häufig zu sein. In der Höhle des Koppenbrüllers erinnert im Raum der Kapelle die eine Seite an den „Wassergang“ nach dem Bilde auf S. 8 des Werkes „Höhlen im Dachstein“ (Nr. 7). An Ort und Stelle blieb mir ein solcher Eindruck nicht haften. An einem breiten niedrigen Tunnel zeigen sich beim Höhlenbach La Boniche (Dep. Ariège) die Wandgebilde des Wasserganges ebenfalls nach dem ersten Bild in Martels Nouveau traité des eaux souterraines vor dem Titelblatt. Eine merkliche Seltenheit derartiger Röhrenformen würde dafür sprechen, daß sie an gewisse, nicht sehr häufige Bedingungen gebunden sind, die aber noch nicht erforscht sind. Vielleicht ist unter ihnen auch ein Wechsel des Querschnittes am Ein- und Ausgang solcher „Wassergänge“ von Bedeutung. Kehren wir zum Beispiel aus der Eisriesenwelt zurück, indem wir zunächst das einstige spiralige Fließen darin

<sup>1)</sup> Seit ich auf einer flachen Strecke des Rheinfalls am Schaffhauser Ufer Anfang März 1930 mit Stoppuhr, Schwimmer und Meßband die Strömung zu rund 2,5 m/sek gemessen habe, halte ich obige Schätzung für zu hoch.

<sup>2)</sup> Diese Vorstellung ist nicht ganz dasselbe, was in der Literatur oft als „Efforation“ bezeichnet wird. (Vgl. § 98.)

ebenso als Tatsache betrachten wie beim raschen Emporsteigen des Wassers in Deckenkolken und -schloten. Hält man daran fest, daß die Bahnen der Wasserteilchen höchstens ganz spitzwinkelig von den Furchen der Riefelung abwichen oder genau dazu stimmten, so ergibt sich, daß bei einem Umgang von  $360^\circ$  eine gleichzeitig in der Achsenrichtung der Röhre fortschreitende Bewegung von höchstens 10 bis 25 *cm* erzielt wurde. Geschah dies in einer Sekunde, so braucht man an der Peripherie des Querschnittes eine absolute Rotationsgeschwindigkeit von etwa 5 *m* in der Sekunde, was ungeheuer viel ist. Auch eine halb so große wäre annehmbar, womit sich die fortschreitende Geschwindigkeit auf 5 bis 12,5 *cm/sek* vermindern würde.<sup>1)</sup> Eine spiraling durchflossene Höhle verbrauchte also den Niederschlag sparsam und konnte dabei doch voll bleiben und gleichzeitig mechanisch kräftig erweitert werden. Denn selbst eine Geschwindigkeit von 3 *m* längs der Wand konnte Sand umherwirbeln. Der heutige Sand im Wassergang ist aber eine späte Abspaltung. Selbstverständlich ist niemand gehindert, die angeführten Geschwindigkeitswerte zu verdreifachen oder noch durch drei zu teilen. Die Prüfung dessen, was zulässig ist, liegt derzeit nur in den erforderlichen Niederschlägen. Daß der Rundung des Wasserganges an den Enden der langen Ellipsenachse dreieckige Zwickel aufgesetzt erscheinen, braucht nicht zu stören. Auch in der von einem Doppelwirbel durchströmten Rohrkrümmung, die Lorenz untersucht hat,<sup>2)</sup> war noch an gewissen, nach seiner Theorie verständlichen, wandnahen Strecken Raum für eine schmale Folge dicht gescharter kleiner Wirbel, die man auch heute noch als ganz ungeordnet bezeichnen kann. Derartiges darf man auch im Wassergang nicht ausschließen.

§ 96. Andere Querschnittsformen der Hohlräume im Karst sind zu erwarten, wenn das Wasser in wilden Strudeln allseitig an die Wand stößt, wobei der betreffende Querschnitt nicht einmal ganz wassererfüllt zu sein braucht.

Eine entsprechende Ausgestaltung zeigt Abb. 60 links. So geformte, enge Röhren kann man in der Eisriesenwelt im Raume „Midgard“ auf der Nordseite eines mächtigen Felsfeilers ö. vom „Wasserberg“ beobachten (vgl. Abb. 77), andere sah ich in der Bockhöhle bei der Schönbergalm. Der Durchmesser dieser Röhren betrug nur zwischen 5 und 20 *cm*. Ihre Form ist noch kein Beweis dafür, daß die aus Klammern bekannten Kolke und Strudelnischen unter dem Wasser und an den Ufern hier einfach auf allen Seiten ausgebildet wurden. Denn diese zarten Hohlformen sind hunderte von Malen kleiner. Aber da sich auch der Anblick der Abb. 60 rechts vorfindet, wo eine kleine Schlucht in die Röhre eingerissen ist und herausgeschwemmt

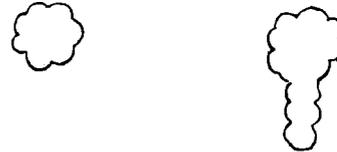


Abb. 60. Kleine Röhren von 5 bis 20 *cm* Durchmesser mit den unruhigen Wandformen einer allseits an die Wände schlagenden mit Sand bewaffneten ungeordneten Wasserbewegung. In die rechte Röhre ist eine kleine Schlucht eingesägt.

<sup>1)</sup> Als ich bei der Höhlenexpedition in der Eisriesenwelt gegenüber meinen sportlichen Führern und Freunden solche Überschlüge machte, merkte ich, daß ich damit liebgeordnete romantische Vorstellungen von einer auch gewaltig vorwärtsstürmenden Flut verletzte.

<sup>2)</sup> Zeitschr. f. Techn. Physik, Augustheft 1929.

Sand etwa einen halben Meter tiefer am Wandfuß Kegel bildet, so erkennt man, daß sich mit der Schluchtförmigkeit auch die Einzelheiten maßstäblich verkleinern und daß auch die lebhaften Umrisse der unzerstörten rundlichen Röhren als Kolke angesehen werden dürfen. Die besprochenen Formen beschränken sich nicht nur auf solche Kleinformen der Unterwelt. Ein großräumiges Beispiel bietet die Peggauer Lurgrotte. Dort gibt es z. B. im Siphon I Strecken, wo bei Durchmessern von einigen Metern große Nischen und Aushöhlungen auf keiner Seite der Höhlenwandungen fehlen; nebensächlich ist, daß der Querschnitt nicht so an einen Kreis erinnert wie Abb. 60 links. Nun weiß man aber, daß in dieser Grotte gefährliche wilde Hochwasser häufig waren, welche den Querschnitt ganz oder fast ganz erfüllten. Ihnen müssen alle die Kolke zugeschrieben werden, welche ihrer Form nach wesentlich mit allen anderen Auswaschungen an heftig wirbelnden, oft mit Sand und Steinen bewaffneten Gewässern übereinstimmen. Daß in der Peggauer Lurgrotte anscheinend auch Flecken größerer Lösungsgeschwindigkeit im Kalk unregelmäßig verteilt sind, gibt einem Teil der Aushöhlungen ein merkwürdig scharfrandiges Aussehen und sehr ungleiche Größen. Zusammen mit zweifellos mechanischen Ausstrudlungen erteilt die Fülle der Kolkgestalten jenem Peggauer Höhlenquerschnitt örtlich eine phantastische Unregelmäßigkeit. Und die dämonische Wirkung dieser Räume sucht in allen un stetig ausgebildeten Höhlen, von denen ich etwas gesehen habe, ihresgleichen.

Im engen Zusammenhang mit den betrachteten Querschnitten muß jener erwähnt werden, den ein Wassereinbruch in einem steilgencigten Schurfstollen des Salzbergwerkes von Dürnberg bei Hallein erzeugte, indem er binnen 18 Tagen dessen Höhe um 6 m und die Breite um 4 m vergrößerte. Man verdankt diese Kenntnis den Angaben Bieses,<sup>1)</sup> ebenso ein wertvolles Lichtbild. Der am 18. August erfolgende Einbruch fand den Schurf (Ankerschurf), dessen Neigung 30° beträgt, mit 1,9 m Höhe, 1,5 m Breite an der Sohle und 0,9 m Breite am First vor. Er liegt in salzhaltigem Haselgebirge, einer tonig-sandigen, auch schwach schieferigen Bildung. Das einbrechende Wasser war nicht frei von Salzlösung. 680 cbm Gesteins wurden in den 12 Tagen vom Wasser beseitigt. Der Querschnitt, den das Bild zeigt, erinnert noch an die ursprünglichen Proportionen, zeigt aber einen stärkeren seitlichen Kolk und mehrere seichte, auch eine Anzahl unregelmäßige Vorsprünge, selbst solche, die nicht einfach als die Vorsprünge zwischen Kolken zu deuten sind. Das Gestein war hier sowohl mechanischer wie chemischer Beanspruchung stark ausgesetzt.

§ 97. Den größten Gegensatz zu den soeben betrachteten Querschnitten mit Ausstrudlungsformen bilden die im Querschnitt kreisrunden bis schwach elliptischen Zylinderröhren, deren Vorkommen in der Eisriesenwelt den Namen „Kanonenröhren“ erhalten hat. Ihr Durchmesser ist etwa 1 m. Man darf dabei ja nicht an heutige mit Spiralzügen ausgestattete Geschützrohre denken, sondern nur an altertümliche, innen höchstens etwas angebrannte Feldschlangen. Leider kenne ich die genannten Röhren nur nach zwei allerdings ausgezeichneten Aufnahmen A. Asals<sup>2)</sup> und nach den Beschreibungen von H. Oedl und Frl. Fuhrich. Diese Höhlenteile sind frei von dem, was man Kolke oder Strudelnischen nennen könnte. Daher müssen sie entweder geschichtet (laminar) vom Wasser durchströmt worden sein oder es gab Wirbel, die noch schwächer waren als jene, die in Tunnels äußerst zarte, kaum sicher

<sup>1)</sup> Nr. 36, 1930, H. 1, S. 28.

<sup>2)</sup> Nr. 45, T. 29 und 48.

deutbare Spuren hinterlassen haben. H. Bock<sup>1)</sup> hat die schönen Zylinderformen von Höhlen ohne Vorsprünge des Querschnittes so deuten wollen, daß früher weniger regelmäßige Gestalten des Querschnittes ausgeglichen und wohlgerundet wurden; dies sei bei einer raschen Druckströmung geschehen, die Steine allseits an die Höhlenwand schleuderte, indem dabei vorspringende Kanten gerundet, Ecken abradiert und der Fels abgeschuert wurden. Eine solche Entwicklung wurde aber nie durch vergleichende Beobachtungen als wirklich oder auch nur möglich dargelegt. Ganz allgemein spricht dagegen, daß Wirbel leicht stabil werden, so daß Steine nicht beliebig auftreffen, sondern durch lange Zeiten immer wieder an dieselben Stellen geschleudert werden. Auch würde der Vorgang schwerlich je zu einem Endziel kommen, weil die Bedingungen nicht stationär bleiben. Zuerst würde die Höhle auch während der Erweiterung unter Druck durchwirbelt werden. Dabei werden aber die Wirbel und Wasserwalzen nur größer. Wohl werden Ecken und Vorsprünge beseitigt, aber zwischen um so tieferen und größeren Kolken werden neue Erhabenheiten gebildet. Schließlich aber bei einer bestimmten Erweiterung hört die allseitige Berührung der Wand auf, sie mit den größten Ausstrudelungsformen hinterlassend. Man kann ja, wenn man will, annehmen, daß einmal die Niederschläge und der Durchfluß im selben Maße gewachsen seien wie die Höhlenquerschnitte, und zwar durch beliebig lange Zeiträume. Aber selbst bei dieser gewagten Voraussetzung finde ich in den Darlegungen Bocks nicht die geringste Stütze für die Folgerung, daß endlich doch eine mehr geglättete, annähernd kreiszyllindrische Höhlenform daraus hervorgehe. Nur wo das Fließen unausgesetzt streng in Spiralen erfolgte, ist eine gewisse Zylinderform vielleicht nicht ausgeschlossen, wenn das Gestein innerlich so beschaffen ist, daß es auf diese Beanspruchung mit keinerlei Furchen oder Schraubenzügen antwortet. Dabei ist aber zu bedenken, daß ein spiralisches Fließen sich eher in einer Röhre einstellt, die schon vorher glatt genug war, so daß dann doch wieder der von Bock aufgebotene Arbeitsvorgang seine Bedeutung verliert. Auf die „Kanonenröhren“ ist eine mechanische Entstehungstheorie überhaupt nicht anwendbar. Vielmehr sind diese ein schönes Beispiel dafür, wie in genügend homogenem Fels die chemische Einwirkung langsamer Druckströmungen gerade die Wandformen dieser Röhren erzeugen kann. Sie sind bei aller Einfachheit ihres Querschnittes keineswegs glatt geschuert. Vielmehr ist ihnen eine feinzellige Anätzung des Kalkes eigen, welche seine Oberfläche porös gemacht hat. Nicht in jedem Gestein haben übrigens chemisch ausgelaugte Hohlformen so regelmäßig runde Querschnitte. Der Tunnel des Mont d'Or (§ 20) schnitt Klüfte und Röhren an, die 80 m tief unter den wenigen Stellen ihres Ausflusses liegen. Demgemäß war darin die Strömung so langsam, daß schwer lösliche Fossile herausgeätzt wurden und dichter lehmiger Schlamm sich absetzte.<sup>2)</sup>

Nichts ist nun lehrreicher als die von H. Schardt veröffentlichten Lichtbilder dieser Hohlräume (Nr. 40, Abb. 14, 16, 20, 22, 23, 24, 26, auf S. 278f. und 291 ff.).

<sup>1)</sup> Nr. 7, S. 82.

<sup>2)</sup> Nach Schardt, S. 278, brauchte das Wasser zu 80 m Anstieg auf 5 km Entfernung 46 Stunden, bis bei der Wiederauffüllung des Höhlenastes die tiefste Quelle zu fließen begann. Die Endgeschwindigkeit, als alle Quellen wieder flossen, muß wegen des angewachsenen Gegendruckes die kleinste und unter diesem Durchschnitt gewesen sein.

Darin gibt es Nischen und Furchen ganz von der Art, die man überall unbedenklich raschen und zu mechanischer Arbeit fähigen Gewässern zuschreibt. Die Umriss einer Kluft sind so kantig, daß man künstliche Eingriffe vermutet. Denken wir zurück an die dreieckigen Querschnitte der Segeberger Höhle und halten wir die „Kanonenröhren“ und die Bilder aus dem Mont-d'Or dagegen, so dürfen wir

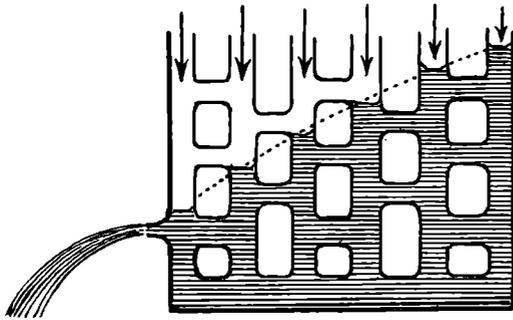


Abb. 61. Durchströmtes Röhrengitter, bei dem nur Druckströmungen auftreten und nicht wie in Abb. 47 auch Sohlengerinne und Wasserfälle. Die Verminderung der Ausflußquerschnitte ergibt einen längs einer Kurve gestaffelten Spiegelabstieg. Im Karst ist dies ein Sonderfall.

sagen, daß je nach den Umständen des Gesteins, der Vorläuferformen, wie der Wasserführung die chemisch ausgeleugten Höhlenquerschnitte gewiß nicht weniger mannigfach sind als die mechanisch erzeugten. Der Kenner wird sie gleichwohl nicht verwechseln. Da wird es fast Bedürfnis, Folgen der Auslaugung zur erhöhten Beweiskraft auch im Längsschnitt zu suchen. Nehmen wir an, das Röhrengitter der Abb. 61 habe einst rechtwinkelig aneinander stoßende Ecken gebildet, so entspricht die Zeichnung bereits einer begonnenen Abrundung der

Ecken, wie sie zu erwarten ist, wo das Röhrensystem in einer löslichen Grundmasse ausgehöhlt ist. Dauert die Auslaugung an, so müssen schließlich die Röhren trompetenförmig ineinander münden und ebenso in eingeschaltete größere Hohlräume. Die Mehrheit der beschriebenen „Kanonenröhren“ mündet nun heute scharfkantig in den ganz verstürzten Teil der sogenannten „Schotterhalle“ der Eisriesenwelt. Nur an einer photographierten Stelle sieht man deutlich, daß der Röhrenzylinder mit auffälliger Trompetenmündung in einen weniger zerbrochenen Wandteil der Halle übergeht. Bedenkt man noch, daß gerade solche Einmündungs- oder Abzweigungsstellen eines Röhrengitters selbst bei einer sonst gleitenden Fließart örtliche Wirbel verursachen, so ist das Fehlen aller chemischen wie mechanischen Kolke an solcher Trompetenmündung wirklich ein brauchbarer Grund, sich die Entwicklung der Kanonenröhren bei sanftesten Bewegungen, laminaren Druckströmungen nach Art der Abb. 61 vorzustellen, wenn der Ausfluß womöglich noch enger ist.

Im Verlauf der Darstellung waren gewisse Fälle zu erwähnen, wo die Querschnittsformen der Höhlen oder die Deckenkolke ohne besondere Merkmale sich als zweideutig erwiesen und sowohl chemischer als auch mechanischer Wirkungsweise des Wassers zugeschrieben werden können, manchmal sogar ausschließlich nur einer. Bei sehr großen Röhren gibt es noch ein Hilfsmittel, sich für eine dieser Erklärungen zu entscheiden. Das ist die Prüfung der für einen raschen Durchfluß erforderlichen Niederschlagsmengen und Einzugsgebiete auf ihre Wahrscheinlichkeit.

§ 98. Somit bleibt nur noch zu erörtern das Verhältnis der unter Druck ganz erfüllt gehaltenen, chemisch erweiterten Röhren und der bei Spiegelschwankungen

ausgelaugten Rundhöhlen. Versuchen wir wenigstens einige theoretische Untersuchungsergebnisse festzuhalten. 1. Die Kurven der rundlichen Auslaugungsquerschnitte der erfüllten und ganz unter Druck laminar durchflossenen Röhren sind längs geneigter Höhlenachsen nicht so stetig veränderlich wie die der anderen. 2. Unter ruhigen Spiegelschwankungen entwickelte Querschnitte sind entweder nur zu einer senkrechten Ebene bilateralsymmetrisch oder gar nicht, wenn die geologische Ausgangsform asymmetrisch war. Hingegen können unter Druck ausgelaugte Röhren auch zu schrägen und selbst wagrechten Symmetrieebenen spiegelbildlich entwickelt sein, wenn die Ausgangsform wieder kein Hindernis ist. Das Gesagte bietet, wenn nicht in allen, so doch in einigen Fällen eine Handhabe fürs Urteil. Der erste, der meines Wissens auf Grund bestimmter Höhlenbeobachtungen bewiesen hat, daß auch „wohlgerundete Röhren“ als Folge reiner Gesteinsauflösung entstehen, war Helmuth Cramer.<sup>1)</sup> Seine Gründe sind zum Teil dieselben, die Schardt für wenig regelmäßig ausgelaugte Hohlräume vorgebracht hatte: erstens die ausgezeichnete Erhaltung feiner Fossilformen, die als langsamer löslich den Höhlenwänden entragen, zweitens die fortdauernde Erweiterung gewölbter und gekrümmter Höhlenwände bei bereits vorhandener Lehmausfüllung, indem das Wasser, zwischen Lehm und Kalkwand sickernd, an den Lehm Kalk abgibt und so den Fels neuerdings oder vermehrt angreift.<sup>2)</sup> Wohlgerundete Röhrenformen, wie sie im Mt. d'Or noch nicht ausgebildet waren, wohl aber dort, wo Cramer gearbeitet hat, werden aber in den Kreisen sportlicher Höhlenforscher vielfach unbedenklich jener mit Steinen bewaffneten mechanischen Erosion von Druckströmungen zugeschrieben, deren Gewalt eine solche Arbeitsweise erlauben soll.<sup>3)</sup> Hierüber ist schon in § 97 einiges gesagt. H. Bock, der Urheber derartiger Annahmen, hat den von ihm erdachten Vorgang als „Druckerosion“ oder „Efforation“ (wörtlich = Ausbohrung) bezeichnet. Aber auch für unregelmäßige Querschnitte wie jenen, den der Wassereinbruch von Dürnberg-Hallein so reißend schnell erzeugte, wird von Biese der Ausdruck Efforationsprofil gebraucht. Damit bestätigt sich mein Eindruck, den ich an vielen Stellen der Literatur und auch bei der Höhlenforschung im Verkehr mit anderen jedesmal gewonnen habe, daß nämlich „Efforation“ ein Schlagwort ohne sicheren wissenschaftlichen Inhalt darstellt. Seit wann dies gilt, ist eine hier nicht bedeutsame historische Frage. Bedenkt man, daß die Efforation für die Höhlenflußtheorie Bocks wesentlich ist, so versteht man die Anhängerschaft reißender Höhlenströme. Es ist ein bleibendes Verdienst Cramers, sich bei Betrachtung der Röhrenhöhlen einer verbreiteten Suggestion durch fruchtbare Kritik entzogen zu haben.

<sup>1)</sup> Nr. 36, 1927, S. 56 ff.

<sup>2)</sup> Daß in der Tiefe auf eine solche Art Klüfte erweitert werden, hat einst H. Bock selbst (Nr. 6, S. 5) bei der Bekämpfung der Lehre A. Grunds betont, ohne aber die Frage der Querschnittsformen zu berühren.

<sup>3)</sup> So schreibt Cramer, a. a. O., S. 57: „Nun finden wir aber so ehe Fossilien auch in wohlgerundeten Röhren vor, die wir nach unseren Anschauungen von der Hydrodynamik des Karstes zumeist unbedenklich als Druckleitungsformen zu bezeichnen pflegen. Ich selbst habe 1922 bei der Beschreibung des Katzenbodens die im Frankendolomit gelegene Röhre „Petrefaktentunnel“ ebenfalls noch als Efforationsleitung bezeichnet“. Es ist eines der Ergebnisse dieses Buches, daß Druckleitung und Efforationsarbeit miteinander nichts zu tun haben müssen.

§ 99. Die Efforations- theorie ist nicht nur unbewiesen, sondern auch höchst unwahrscheinlich, weil sie viel zu große Geschwindigkeiten der Höhlengewässer braucht. Bock ist nach Biese von seiner einstigen Berechnungsmethode zurückgetreten. Ein anderer Anhänger der Efforations- theorie, Spöcker, hat für eine Höhle im Frankenjura auch unerhörte Geschwindigkeiten bis über 8 *m*/sek für die einstige Wasserfüllung zusammengerechnet; diese Art Berechnungen mußte schon einmal erwähnt und abgelehnt werden, denn sie hat mit wirklicher Hydromechanik nichts zu tun. Und wenn dann wegen der unmöglichen Efforationsgeschwindigkeiten ungeheure Niederschläge benötigt werden, so fordern deren Vertreter leicht riesige Einzugsgebiete nicht auf Grund von selbständig beweiskräftigen Beobachtungen, sondern um die Berechnungsart nicht preiszugeben.

Um so mehr ist es nützlich, sich nach den größten, in der Gegenwart wirklich vorkommenden Geschwindigkeiten umzusehen. Wenn in einem oberflächlichen Sohlengerinne 2 *m*/sek mittlere Geschwindigkeit schon viel sind, ganz gleich, ob es sich um die Donau bei Wien zur Zeit von Niederwasser oder den Zembach in den Zillertaler Alpen handelt, wo er in steiler Felsschlucht oberhalb der Berlinerhütte hindurchbraust,<sup>1)</sup> so muß man sich bei Druckströmungen zeitweise auf ein Mehrfaches dieses Betrages gefaßt machen. Dies lehrt uns das bisher allerdings allein- stehende Beispiel der Vauclusequelle östlich der Rhone-Ebene bei Avignon am Alpenrand. Das Folgende stützt sich nur auf die Angaben Martels in „Les Abîmes“. Ein 50° bis 60° steiler Siphon leitet das Wasser zu dieser Sacktalquelle empor. Die Torschwelle der oben weiten Quellschale wird vom Scheitel einer wallartigen Block- anhäufung gebildet, die 21 *m* mächtig wird. Nach innen, zur Quelle, hat sie einen steilen Haldenwinkel, talabwärts bildet sie eine sanftgeneigte Aufschüttung. Wenn das Wasser innen den Fuß des Blockhanges benetzt und in ihn eindringen kann, so fließen 5,5 *cbm*/sek aus, die aber erst in 180 *m* Entfernung von der Quellschale im Blockbett hervortreten. Es wurden aber als Minimum schon 4,5 *cbm*/sek gemessen, so daß man sich fragen darf, ob nicht auch von unten aus dem Fels Wasser in das Blockwerk eindringt, bzw. ob das oberste Stück der Röhrenwand nicht seitlich Wasser zu den Quellen im Blockbett entsendet. Wenn das Wasser gerade bis zum Scheitel der Blockschüttung heranreicht, so quellen aus deren sanfter Abdachung 22 *cbm*/sek hervor. Bei weiterem Schwellen des Zudranges beginnt der Überfalls- strahl der Quelle, und wenn er 2,68 *m* tief den Blockscheitel überströmt, so liefert die Quelle fast 100 *cbm*/sek mehr als vorher, nämlich 120 *cbm*/sek. Es wurden aber auch schon 150 *cbm* sekundlicher Abfluß gemessen. Nach den Zeichnungen Bouviers, die E. A. Martel veröffentlichte (Les Abîmes, S. 34 bis 36), hat die Quellschale einen Querschnitt von 16 *qm*. Aus den obigen Wassermengen, die den- selben Werken entstammen, ergibt sich daher eine minimale Geschwindigkeit von  $5:16 = 0,31$  *m*/sek, die aber vielleicht noch geringer wird, wenn die Block- quellen noch anderes Spaltenwasser zutage führen. Als mittlere Wasserführung gelten 8 *cbm*/sek, was etwa 50 *cm*/sek Geschwindigkeit entspricht. Die riesige Zu-

<sup>1)</sup> Beim Gletschervermessungskurs 1913 wurde unter Leitung von Herrn Geheimrat Finsterwalder eine Messung vorgenommen, bei der viele Teilnehmer die zu erwartende Geschwindigkeit bis zum Doppelten überschätzten.

nahme der Wassermengen endlich, welche sich nach den Bestimmungen der Gewährsmänner mit dem Anschwellen des Überfalles einstellt, muß wohl fast ganz auf die in der Quellröhre vermehrte Geschwindigkeit zurückgeführt werden. Demnach muß darin ein Durchfluß von 120 bis 140 *cbm/sek* vorkommen, womit die Geschwindigkeit auf 7 bis 9 *m/sek* emporgetrieben wird. Obwohl 150 *cbm/sek* als Abfluß des ganzen Quellbereiches schon in einem Jahr zweimal gemessen wurden, 1886 am 26. Oktober und vom 9. bis 13. November, so wiederholt sich ein mächtiger Überfallsstrahl doch erst wieder nach mehreren Jahren für einen oder wenige Tage; 120 *cbm/sek* waren es vorher im Oktober 1872, also 14 Jahre früher. Es wäre nun überaus wertvoll, zu wissen, ob die Höhlenröhre, die vielleicht alle 10 bis 15 Jahre im Durchschnitt 1 bis 6 Tage mit außerordentlich großen Geschwindigkeiten unter Druck durchströmt wird, mehr die Formen der Auslaugung zeigt oder ob Kolkwirkungen die mechanische Heftigkeit der kurzen Gewaltströme bezeugen. Nach den Zeichnungen zu schließen, die Martel bringt, sind wenigstens auf der Unterseite der steil ansteigenden Röhre Kolke bescheidener Ausmaße in die Wand erodiert, ein stärkerer nur dort, wo ein Block den Querschnitt verengt, dicht unter der kelchförmigen Mündung der Röhre, mit welcher sie sich zur Quellschale öffnet. Diese Zeichnungen berücksichtigen wohl die Erfahrungen des Tauchers, der 1878 23 *m* unter den Spiegel in der kelchartigen Erweiterung hinabgelassen wurde und die Rohrlänge auf rund 30 *m*, so gut es ging, beobachtete. Wenn nun eine so rasend rasche Druckströmung in irgend einer Höhle noch seltener einträte als bei der Vauclusequelle und bei Geschwindigkeiten von nur 3 bis 7 *m* jedesmal auf einige Stunden oder wenige Tage, so sind nach Trockenlegung der Höhle Ausstrudelungsformen überhaupt nicht sicher nachweisbar, besonders wenn ein in Jahren dazwischen herrschender ruhiger Auslaugungsvorgang einen Querschnitt schafft, der der Reibung wenig Angriffsflächen bietet. Die Erkenntnis, daß eine Querschnittsform durch Gesteinsauflösung bei ruhigen Wasserbewegungen entstand, wird also ein vorsichtiger Beurteiler nicht zur allgemeinen Behauptung steigern, daß in der Höhle nicht einmal tage- oder stundenweise alle paar Jahre heftige Bewegungen aufgetreten sind, es sei denn, daß besondere Gründe dagegen sprechen.

Diese Vorsicht empfiehlt sich nicht nur bis zu 16 *qm*, dem Querschnitt der Vauclusequellröhre, sondern möglicherweise auch noch bis zu merklich höheren Querschnitten. Im übrigen entscheiden dann die Niederschläge und das wahrscheinliche maximale Einzugsgebiet, welche Geschwindigkeiten mangels sonstiger Merkmale zulässig sind.<sup>1)</sup> Für den Hochkarst der Alpen darf man heute die tertiären Niederschläge, welche die verlassenen Höhlenreiche füllten, nicht mehr weit über den gegenwärtigen annehmen, unter Hinweis auf das einstige Tropenklima. Die Totalisatoren in der Schweiz haben in den letzten Jahren Niederschläge ergeben, die sogar über jenen der meisten äquatorialen Stationen liegen. Auch in den Ost-

<sup>1)</sup> Bock polemisiert in Nr. 34, 1927, S. 4, wegen der sogenannten „Paläotraun“ gegen Smekal und mich. Doch scheinen diese Darlegungen auf einem Mißverständnis zu beruhen. Ich habe den Ausdruck „Quellmagazin“ für jene große Halle nicht gebraucht und er ist auch keine glückliche Wiedergabe der von Smekal im Verein mit mir vorgebrachten Ansicht. Der wesentliche Unterschied ist der, daß ich im Gegensatz zu Bock die sehr breiten und flachen Kerben an der Wand dieser Höhle nicht als Werke mechanischer Erosion ansehe.

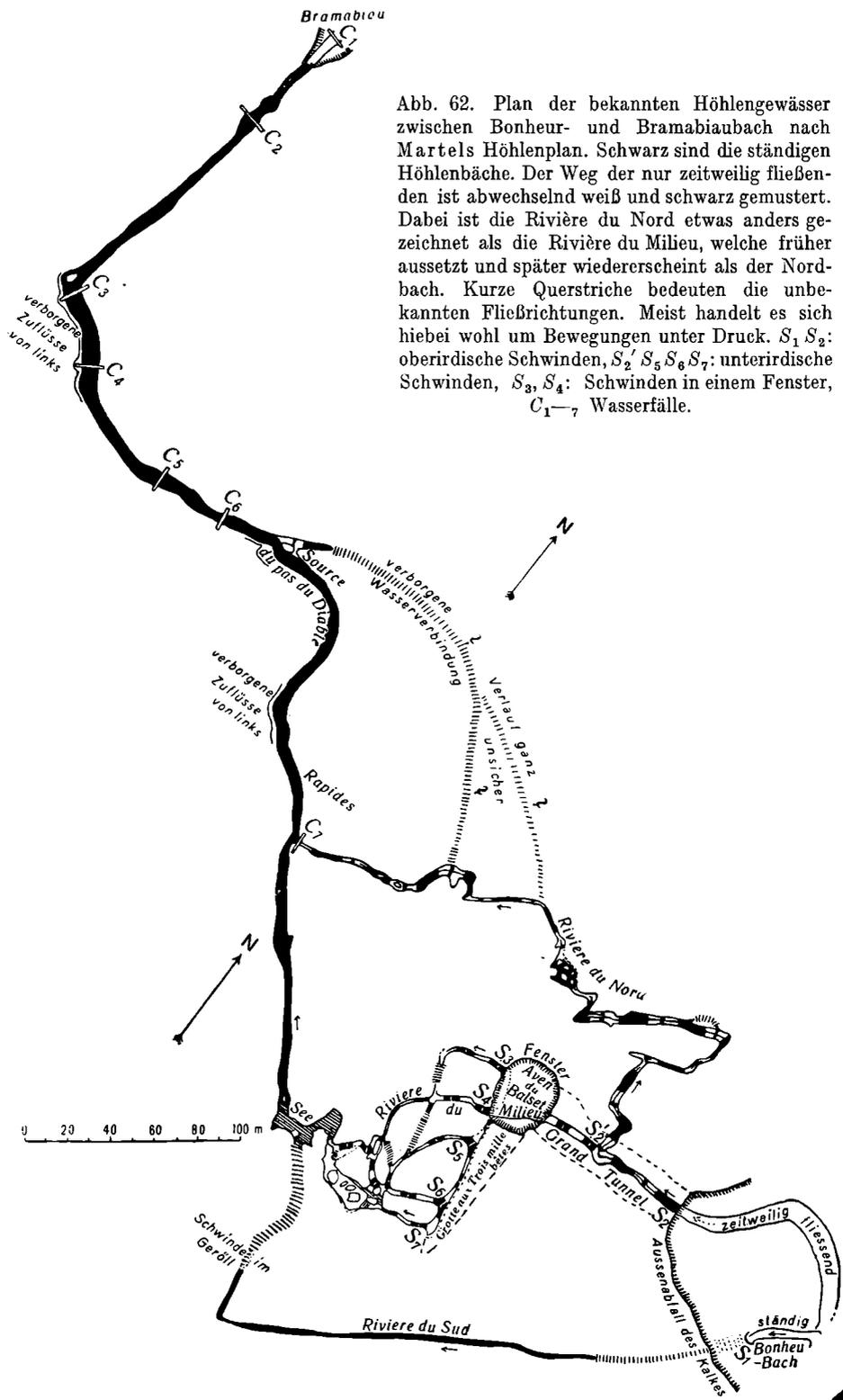
alpen sind die Niederschläge der Hochregionen größer als bisher angenommen wurde und stehen hinter den meisten tropischen nur unwesentlich zurück.

§ 100. Bisher war nur von Höhlenquerschnitten die Rede, deren Formen den Schluß zuließen, daß die Höhlen mindestens zu Zeiten, oft zu ungemessen langen Zeiten, mit Wasser erfüllt waren. Es gibt aber andere Querschnitte, bei denen dies entweder nie der Fall war oder nur so kurz und unbedeutend, daß davon keine nachweisliche Einwirkung auf die Querschnittsform ausging. Es handelt sich um steile oder senkrechte Spalten von bedeutender Höhe, 20 bis 60 *m* oder mehr, die sich, besonders zu Anfang noch eng, dem unterirdischen Abflusse darboten. Die Eigenart dieser Höhlengewässer mit aufgezwungener kanalartiger Streckung, die wenig Verzweigungen gleicher Größenordnung haben, läßt sich in das früher Vorgebrachte nicht ohneweiters einreihen. Nur die starre Geradlinigkeit unterscheidet diese Höhlengewässer im Grundriß sogleich von dem, was man im Nichtkarst Fluß nennt. Wir werden noch sehen, daß es sich dabei nicht selten um lange dünne Ketten kleiner Höhlenseen mit Wasserfällen dazwischen handelt. Es kommen unter ihnen aber auch Sohlengewässer mit gleichsinniger Neigung wenigstens streckenweise als echte Höhlenflüsse vor. Betrachten wir näher einige besonders berühmte Beispiele solcher offener Spaltengewässer, die gewöhnlich unterschiedslos als Höhlenflüsse oder -bäche ins Treffen geführt werden.

In den Cevennen nwn. von Avignon liegt 1110 bis 1120 *m* hoch das Dorf Carnprieu. Knapp nördlich davon verschwindet der Bach Bonheur in Höhlen unter einer nur 20 *m* hohen Schichtstufe des Kalkes. Bis dahin ist seine Länge nur 5 *km*. Er kommt von SE, wo er im Granit entspringt, dicht über der Kante des tektonischen Abfalles der nördlichen Cevennen zur Rhonenederung. Der Abfall besteht hier — wie auch die bis über 1400 *m* hohen Erhebungen der Nachbarschaft — aus kristallinen Gesteinen. Auf der anderen Seite des mit der Bonheurschwinde beginnenden Höhlenreiches im NW fließt unter und zwischen 120 *m* hohen Wänden der Bach Bramabiau (etwa Ochsenbrüller) in ein Tal hinaus, dessen Ursprung der Bonheurbach einst oberirdisch erodierte, als er die Kalkstufe im Osten umging. Das Tal mit der Bramabiauquelle gehört schon zum Gebiete des Tarn, das sich gegen Sonnenuntergang abdacht. In der Luftlinie ist die Bonheurschwinde vom Bramabiau 600 *m* entfernt. Der Höhenunterschied beider beträgt 80 *m*. Das Höhlenreich dazwischen haben erforscht: besonders E. A. Martel und seine Helfer und Begleiter, die Lehrer L. P. Mély und F. Mazauric und Vater. Dies geschah von 1888 bis 1892.<sup>1)</sup>

Die folgende Beschreibung stützt sich nur auf die zitierten Arbeiten Martels. Der Plan der Abb. 62 beruht auf seinem Höhlenplan und dem Text. Der Bonheurbach hat zwei Schwinden ( $S_1$  und  $S_2$ ) am Fuße der Kalkstufe. Die erste Schwinde in Gestalt von Klüften im Bachbett speist den ständigen südlichen Höhlenbach (Rivière du Sud), die zweite Schwinde in der Form eines Tunneltores nimmt zeitweilig Bonheurwasser auf. Dieses zeitweilige Höhlengewässer spaltet sich unterirdisch in ein mittleres und nördliches Gewässersystem auf. Dies geschieht schon hinter der Mitte des Tunnels an der ersten unterirdischen Schwinde ( $S_2'$ ). Der Tunnel erreicht nach 75 *m* Länge einen Lichtschacht, an dessen Westseite die mittlere Ader

<sup>1)</sup> Les Abîmes, S. 64, 70, 187ff. mit Bildern, Plan und Profilen.



(Rivière du Milieu) als letzte endgültig der Unterwelt verfällt. Sie tut dies je nach der Wassermenge unter Benutzung von fünf Schwinden ( $S_3$  bis  $S_7$ ) oder einiger davon. Diese Höhlenröhren sind dann wegen ihrer Niedrigkeit und der Wasserfüllung unpassierbar. Das Gewässersystem Rivière du Milieu setzt am häufigsten aus. Dann kommt es vor, daß nur Rivière du Sud und du Nord fließen, wenn nicht auch dieser trocken liegt. Bemerkenswert sind auch die Wiedervereinigungen der so vielfach aufgespalteten Adern des Bonheur-Wassers, wenn alle fließen. Der südliche Bach, auf verborgenen Wegen von der ersten Schwinde gespeist, macht nach 300 *m* unterirdischen Laufes ein scharfes Knie nach rechts, um gleich in Geröll zu verschwinden und auf verborgenen Felswegen den See der Vereinigung mit dem mittleren Gewässersystem zu erreichen. Wenigstens ist dies höchst wahrscheinlich. Von diesem See geht dann eine ständige Hauptader nach N, deren Wasser in der Bramabiauquelle erscheint. Dieses Hauptgewässer ist ein Sohlenbach mit fünf unterirdischen Wasserfällen und einer Schnelle. Es empfängt an zwei Stellen das Wasser der Rivière du Nord: Oberhalb der Schnellen geschieht dies in der Form eines Wasserfalles ( $C_7$ ) von rechts. Oberhalb des innersten Wasserfalles der Hauptader ( $C_6$ ) geschieht dies auf verborgenen Wegen in der Form der zeitweiligen „Source du pas du Diable“. Wenigstens ist diese Quelle sehr wahrscheinlich von Bonheurwasser aus der Rivière du Nord gespeist. Die Hauptader empfängt ferner von links zeitweilig offen, zeitweilig auf verborgenen Wegen Gewässer, so daß die Bramabiauquelle nicht einfach der wiedererschienene Bonheurbach ist.

Selbst wenn wir an Stelle der verborgenen Gewässerstrecken nur unverzweigte Röhrenströmungen unter Druck annehmen, wird die ganze Südosthälfte des Höhlenreiches noch immer alljährlich von einem reichen Geflecht von Karstwasseradern durchzogen, die zum Teil unter Druck fließen. Soweit ihre Wege verfolgt werden konnten, haben diese zusammen etwa 1600 *m* Länge. Aber in Schichtlagen bis 25 *m* über den gewöhnlichen Wasserspiegeln ist besonders im SE des Höhlenreiches ein über 5 *km* messendes Geflecht niedriger gangbarer Spalten vorhanden, dessen Gitterwerk auf Abb. 62 weggelassen wurde. Die heutige Entwässerung wirkt im Vergleiche dazu wie ein mageres Skelett der Vergangenheit, und wenn zu Zeiten nur die erste Schwinde des Bonheurbaches Wasser bekommt, so schrumpft die Entwässerung auf die Rivière du Sud und die Hauptader zusammen, die mit dem See und den verborgenen Druckstrecken nur noch das Rückgrat des bei reichem Zufluß noch vorhandenen Skelettes der Entwässerung bilden. Die hohen steilen Spalten sind es, die erlauben, daß die ständige Verbindung Bonheur-Bramabiau größtenteils aus Sohlengewässern mit gleichsinnigem Gefäll bestehen.

Was hier vorgeführt wurde, ist das an örtliche Bedingungen geknüpfte Gegenwartsbild einer in Vergangenheit und wohl auch in Zukunft, wenn die tieferen Klüfte weiter sein werden, viel verwickelter gestalteten Höhlenentwässerung.

Daraus ergeben sich nicht einmal für andere Gewässer in hohen steilen Spalten bestimmte allgemeine Schlußfolgerungen, wie wir gleich sehen werden, geschweige für ganz anders fließende Höhlengewässer.

§ 101. Nicht unerheblich verschieden ist die Hydrographie einer anderen von Martel beschriebenen Höhle mit langer senkrechter Spaltenform. Sie wurde gefunden in dem Karstgebiet 120 bis 130 *km* nördlich von Toulouse, wo südwestlich

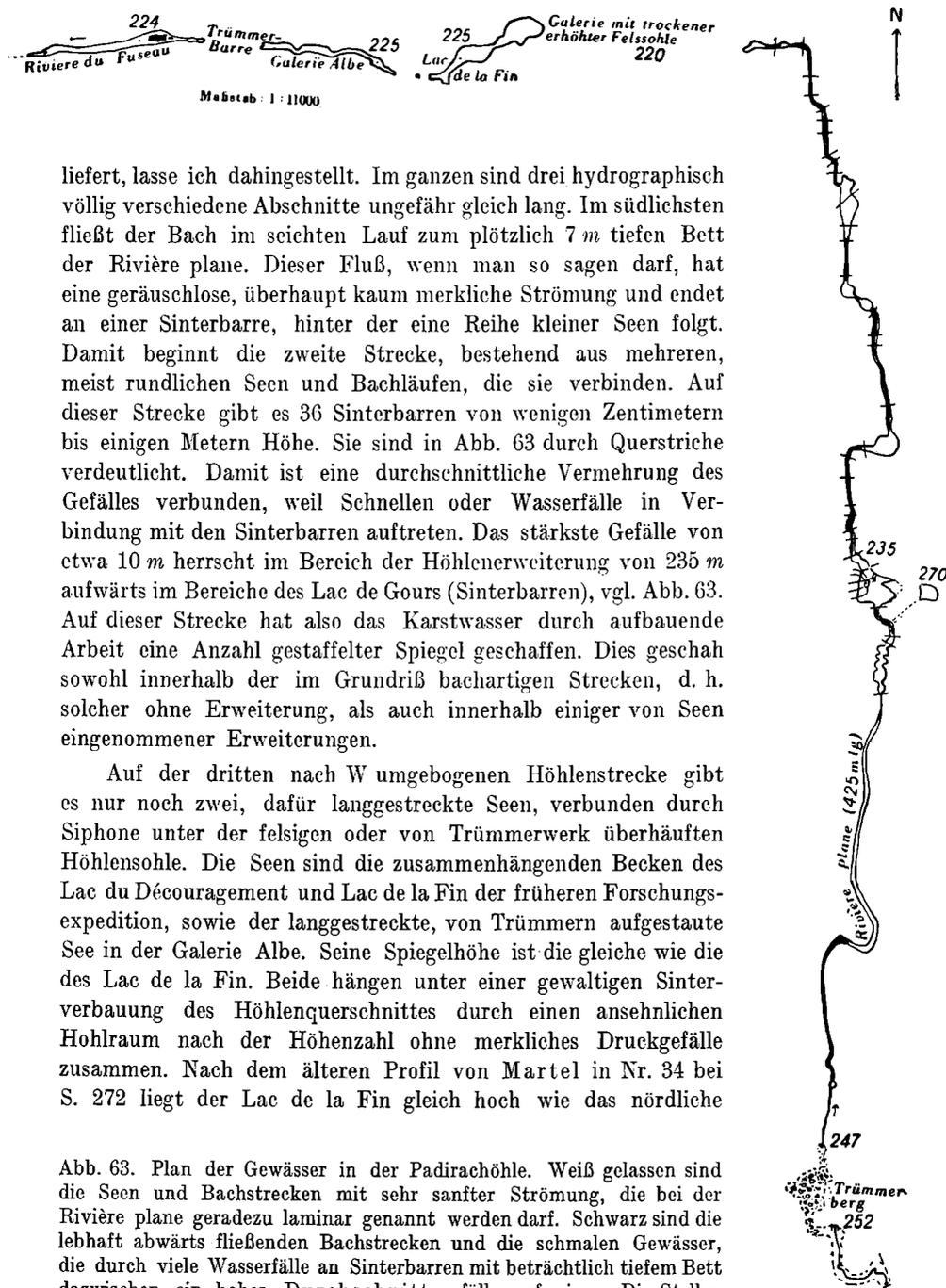
der den fernen Horizont bildenden Vulkangruppe des Cantalgebirges die schön gewellte Karstfläche „Causse de Gramat“ zwischen den Flüssen Lot und Dordogne liegt. Die Meereshöhen des Landes betragen dort im Mittel nur 350 *m*, die höchste Erhebung erreicht 475 *m*. Die eigenartig malerischen Züge dieser Hochfläche mit ihren verstreuten Weidegründen machten auf Martel einen tiefen Eindruck und er verstärkte seine kurze Beschreibung<sup>1)</sup> noch durch die natursinnige, wahrhaft künstlerische Schilderung eines anderen in der Gegend heimischen Schriftstellers.<sup>2)</sup> Dieses nicht unfreundliche Karstland zeigt nun mehrere offene, besonders steil zur Tiefe führende Schlünde. Unter ihnen mißt der Puits (Brunnen) de Padirac, dessen Rand fast ein Quadrat mit sehr stark abgerundeten Ecken bildet, 35 *m* im Durchmesser; 54 *m* tiefer unten wird vom überaus scharfen und glatten Rand der Gipfel eines selbst 21 *m* heraufragenden Trümmerberges im Dämmer sichtbar. Was Martel von dem Grunde dieses weiten Schlundes aus erforschte, nennt er die schönste aller seiner Entdeckungen, bei der ihn die Höhlenforscher Gaupillat, Armand, Foulquier und de Launay begleiteten und unterstützten. Besonders großartige und zierliche, farbenprächtige und flimmernde Tropfstein- und Sinterbildungen, die sich in einem stillen Wasser spiegeln, die Melodien verschieden tönender Tropfen und deren zartes Echo machen die Mitte der langen Hauptstrecke dieser Höhle von Padirac zu Stätten solcher Naturbewunderung. Das Nachfolgende beruht ausschließlich auf den angeführten Arbeiten Martels. Der Plan der Abb. 63 beruht auf der Verbindung seiner Pläne verschiedenen Maßstabes von 1894 in Les Abîmes bis zum Lac de la Fin, und von 1921 im „Traité“, sowie auf dem Text.

An den Grund des Schlundes von Padirac und an den Fuß des Trümmerberges in der Tiefe schließen sich an zwei Stellen Höhlen. Die eine im S führt unmittelbar durch ein 18 *m* hohes rechteckiges Tor über eine lehmige Schleppe des Trümmersmantels zu einer Bachschwinde im Fels, 98 *m* unter Tag. Die Quelle dieses dem Eindringenden entgegenfließenden Baches liegt keine 200 *m* oberhalb; sein Lauf folgt den Biegungen der Höhle. Auf der anderen Seite, im N des Trümmerberges, führt eine Folge von zwei Schächten bzw. Kaminen mit einer kleinen Halle dazwischen 28 *m* hinab zu einer stärkeren Quelle aus dem Fels, 5 *m* tiefer als die erwähnte Bachschwinde. Von da ab erstreckt sich die Wasserhöhle 2 *km* weit nach N fast gerade, von wenigen bajonettartigen Knickungen des Grundrisses abgesehen, und biegt dann, soweit sie bekannt ist, fast noch 1 *km* weit nach W um. Dieses letzte Stück wurde nur mit besonderen Schwierigkeiten zur Hälfte bis 1890 und weiter im Jahre 1900 erforscht. Im Jahre 1890 konnte noch der Lac de Découragement<sup>3)</sup> und der anschließende Lac de la Fin entdeckt werden, 60 und 80 *m* lang. Seither (1900) kam dazu der See der Galerie Albe, 5 bis 8 *m* tief, 140 *m* lang, und hinter einer 15 *m* hohen Trümmermasse die Rivière du fuseau, 1 *m* tiefer spiegelnd. Ihr Wasser verschwindet in einer niedrigen und ganz engen Spalte, die dem Vordringen das letzte Ziel setzte. Die Gewässer der Padirachöhle beginnen und enden also unterirdisch. Ob der schwache Bach der Quelle bei 247 *m* alles Wasser dieser Höhle

<sup>1)</sup> Nr. 32, S. 81, 260ff., 431, Pläne und Profile bei S. 272 und Traité usw.; Nr. 33, S. 242f. und Fig. 156, S. 247.

<sup>2)</sup> Francis Maratuech.

<sup>3)</sup> Der elfte See nach der Zählung Martels.



liefert, lasse ich dahingestellt. Im ganzen sind drei hydrographisch völlig verschiedene Abschnitte ungefähr gleich lang. Im südlichsten fließt der Bach im seichten Lauf zum plötzlich 7 m tiefen Bett der Rivière plane. Dieser Fluß, wenn man so sagen darf, hat eine geräuschlose, überhaupt kaum merkliche Strömung und endet an einer Sinterbarre, hinter der eine Reihe kleiner Seen folgt. Damit beginnt die zweite Strecke, bestehend aus mehreren, meist rundlichen Seen und Bachläufen, die sie verbinden. Auf dieser Strecke gibt es 36 Sinterbarren von wenigen Zentimetern bis einigen Metern Höhe. Sie sind in Abb. 63 durch Querstriche verdeutlicht. Damit ist eine durchschnittliche Vermehrung des Gefälles verbunden, weil Schnellen oder Wasserfälle in Verbindung mit den Sinterbarren auftreten. Das stärkste Gefälle von etwa 10 m herrscht im Bereich der Höhlenerweiterung von 235 m aufwärts im Bereiche des Lac de Gours (Sinterbarren), vgl. Abb. 63. Auf dieser Strecke hat also das Karstwasser durch aufbauende Arbeit eine Anzahl gestaffelter Spiegel geschaffen. Dies geschah sowohl innerhalb der im Grundriß bachartigen Strecken, d. h. solcher ohne Erweiterung, als auch innerhalb einiger von Seen eingenommener Erweiterungen.

Auf der dritten nach W umgebogenen Höhlenstrecke gibt es nur noch zwei, dafür langgestreckte Seen, verbunden durch Siphone unter der felsigen oder von Trümmerwerk überhäuften Höhlensohle. Die Seen sind die zusammenhängenden Becken des Lac du Découragement und Lac de la Fin der früheren Forschungs-expedition, sowie der langgestreckte, von Trümmern aufgestaute See in der Galerie Albe. Seine Spiegelhöhe ist die gleiche wie die des Lac de la Fin. Beide hängen unter einer gewaltigen Sinterverbauung des Höhlenquerschnittes durch einen ansehnlichen Hohlraum nach der Höhenzahl ohne merkliches Druckgefälle zusammen. Nach dem älteren Profil von Martel in Nr. 34 bei S. 272 liegt der Lac de la Fin gleich hoch wie das nördliche

Abb. 63. Plan der Gewässer in der Padirachhöhle. Weiß gelassen sind die Seen und Bachstrecken mit sehr sanfter Strömung, die bei der Rivière plane geradezu laminar genannt werden darf. Schwarz sind die lebhaft abwärts fließenden Bachstrecken und die schmalen Gewässer, die durch viele Wasserfälle an Sinterbarren mit beträchtlich tiefem Bett dazwischen ein hohes Durchschnittsgefälle aufweisen. Die Stellen dieser „Barren“ sind durch lange Querstriche verdeutlicht.

Abb. 63.

Ende der meridionalen Höhlenstrecke. Die Höhenzahl 225 *m* des neuen Planes im *Traité* von 1921, S. 247, ist um 5 *m* höher als die sich aus dem alten Plan ergebende (220 *m*). Dieser Unterschied ist wohl nicht als wirklich so groß anzusehen, sondern man darf bedenken, daß die älteren Messungen nur als Differenz zu dem in ungefähr 350 *m* Höhe angenommenen Rand des Padirac-Schlundes über dem Trümmerberg bestimmt wurden.<sup>1)</sup> Da kann sich leicht eine Korrektur eingestellt haben. Das lange Gewässer zuhinterst nach der Galerie Albe beginnt 1 *m* tiefer als deren See und wurde Rivière du Fuseau, „Spindelfluß“, genannt. Das spricht für eine Strömung. Seine Tiefe erreicht 7 *m*. Sie bleibt im Durchschnitt nur wenig hinter der Tiefe der Rivière plane zurück. Die vielen See- und Sinterbecken haben 5 bis 14 *m* Tiefe. Durch Verengung und Niedrigwerden der Spalte bis nahe an den Spiegel konnte das Gewässer des Spindelflusses nicht weiter verfolgt werden.

Heute sind bis auf weiteres Siphonströmungen und Druckbewegungen durch Blockwerk auf das unterste Drittel der Höhle beschränkt. Es ist zu beachten, daß die Rivière plane nach den Beschreibungen mindestens im Sommer nahezu laminar fließt und daß auch in manchen der nur 10 bis 30 *m* langen kleineren Becken bei 5 *m* Tiefe und mehr eine deutlich turbulente Bewegung weder anzunehmen ist noch gemeldet wird. Selbst wenn in allen zugänglichen Wasserhöhlen in hohen engen Spalten Strömungen und Fließweisen gefunden würden, welche Züge, sei es des Bramabiaustranges, sei es der Padiracgewässer aufweisen, so läge nur ein zeitlicher und räumlicher Sonderfall der Karsthydrographie vor.

5 *km* nordwärts vom Ende der Padirachöhle liegt das Dordognetal. Dort treten 100 *m* über dem Fluß in 215 *m* Höhe am Gehänge nicht sehr starke Karstquellen auf, die wohl von dem Höhlengewässer gespeist werden. Sie liegen 9 *m* tiefer als das Ende der Rivière du Fuseau. Bis dorthin ist also ein viel schwächeres Gefälle vorhanden, wenn man bedenkt, daß in der Höhle auf nur 2 *km* 27 *m* Gefälle auftreten. Darnach kann man sich die Strömung der Rivière du Fuseau wohl richtig als ebenfalls nur schwach vorstellen. Im Winter, wenn ein großer Wasserfall im Bereich des Schlundes beim Trümmerberg hinabbraust, ist nach Martel der Wasserstand in der Höhle nur etwa 1 *m* höher. Die Bewegung ist auch dann schwach. Die Steine in dem Bett der Gewässer sind kaum kantengerundet. Dasselbe Aussehen haben die Stücke von Brekzien auf Gesimsen. Wir sehen also: Obwohl die Wasserführung der Padirachöhle mit meist 5 bis 8 *m* Breite jene des Sohlenbaches in der Bramabiauöhle übertrifft, der nur 2 bis 6 *m* breit ist, obwohl seitliche Zuflüsse in der Padirachöhle nicht gefunden wurden, ist der Eindruck eines einheitlichen kräftigen Sohlengewässers in ihr nicht gegeben. Es wirkt eben keine Bachschwinde mit, und es ist nichts als Karstwasser der Tiefe, dem die lange hohe Spalte eine schmal gestreckte, vielleicht sehr isolierte Gestalt aufgezwungen hat, in der es je nach den Umständen Bachstrecken, Wasserfälle und Seen bildet. Das Wasser brauchte hier einst nur durchschnittlich 2 bis 3 *m* höher zu stehen, und die Padirachöhle war von wenigen langen Karstwasserseen erfüllt, die durch Siphone unter ihren Spiegeln verbunden waren.

**§ 102.** Die steilen und hohen Spalten mancher Karstgebiete werden uns auf

<sup>1)</sup> Vielleicht liegen die Wasserflächen mit den Zahlen 225 und 220 *m* sogar gleich hoch.

morphologischem Weg — so wie früher die runden Querschnitte — noch weitere karsthydrographisch bedeutsame Einsichten verschaffen: Die Spalte, aus der der Wiederausfluß Bramabiau erfolgt, reicht, sogar auf einer Photographie schwach sichtbar (Traité, S. 68), bis an die Oberfläche an einer Stelle, wo der Bach nie geflossen ist. Sie ist also eine überkapillare Spalte, im Inneren der Höhle unten breiter als oben, wie Martel berichtet, was wohl der Arbeit des Wassers im Bereich des Spaltengrundes zuzuschreiben ist. Die verschiedenen Lichtbilder (vgl. Abb. 78)<sup>1)</sup> und einige Schnitte zeigen an dem tieferen Teil der Wände nur schwache Spuren Nischen bildender seitlicher Wasserarbeit, in den höheren zugleich engeren Teilen der Spalte jedoch Ecken und rauhes Gestein. Das Wasser tritt einige Meter weit in einer Art Klamm ins Freie, die nach oben nicht enger wird und rasch von einer Haldenschlucht abgelöst wird. Eine Haldenschlucht hat unter den Wänden Schutthalden, die dünn einer schiefen, manchmal gestuften Felsböschung aufliegen und am Wasser bis ans Ufer reichen. Sie ist das Ergebnis der Wandverwitterung einer Klamm oder einer gleich engen, rauhen Schlucht bei rechtzeitiger Fortschaffung alles überschüssigen Fallschuttes durch das Wasser.<sup>2)</sup>

Die eindringende mechanische Verwitterung hat die Wände der Spalten zurückgeschoben. Das kurze, nordwärts offene Sacktal des Bramabiau ist nicht entstanden durch Einsturz einer Höhlendecke. Solche Täler haben eine ursprünglich unregelmäßig mit Trümmerwerk bedeckte Sohle. Zwischen steilen Wänden sind sie nach Beseitigung und Ausbreitung der Trümmer Sohlenschluchten und nicht Haldenschluchten. Echte Einsturztäler und ihre wirkliche Form sieht man auf vielen Bildern mit Naturbrücken. Die Bramabiauschlucht gehört also nicht dazu, und es ist irrig, daß Martel hier eine „vallée d'effondrement“ in Entwicklung sieht, was bei ihm eine solche ist, „dont le plafond s'est affaissé“.<sup>3)</sup> Hier ist keine Decke eingefallen. Das widerspricht der Vorstellung einer bis an den Tag reichenden Spalte. Diese Kluft ist ja am Wasserfall des Bramabiau wie im Boden der Hochfläche den Angriffen chemischer und mechanischer Verwitterung ausgesetzt.

**§ 103.** Doch nicht der Unterschied der Erklärung dieses Sacktales ist hier die Hauptsache, sondern zunächst folgende Feststellung: das Tal, das sich da bildet, jene Haldenschlucht, ist nur zum kleinen Teil ein Erosionstal, ja die Erosion ist für die Ausbildung seiner Form unwesentlich. Es ist auch kein Spaltental in dem einfachsten Sinne einer bei der Mehrheit der Geographen und Geologen als ganz veraltet geltenden Theorie. Aber diese Schlucht steht einem Spaltental sehr nahe, als Gebilde der Verwitterung von Spaltenwänden, die vielleicht ursprünglich noch an mehreren Stellen durch einen nur großkapillaren Abstand getrennt waren. Die Arbeit des Wassers, das nach seinem unterirdischen Eindringen sein Bett etwas tiefer legte und wohl auch die Spalte erweiterte, hat dadurch bescheidene Überhänge geschaffen

<sup>1)</sup> Vgl. auch das Lichtbild bei S. 200 in Les Abîmes.

<sup>2)</sup> Den genaueren Beweis für diese Entwicklung einer Haldenschlucht werde ich in einer nächsten Veröffentlichung erbringen. Vgl. das große Bild bei S. 188 in „Les Abîmes“.

<sup>3)</sup> Es steht nicht „affaissé“. Martel zitiert hier eine Äußerung Kilians über das Orbetal bei der Feengrotte in zustimmender Weise als Beleg seiner eigenen Ansichten. (Nr. 35, S. 69.) Der Sinn der Stelle ist nicht fraglich.

und so die Steinschläge der Verwitterung gefördert. Niemand kann es nunmehr ausschließen, daß anderwärts eine bis 8 m breite senkrechte Zerreißung des Karstgesteins, wie sie die schon entleerten Höhlen der Eisriesenwelt im Tennengebirge später gekreuzt hat, in einem weniger mächtigen Karst bis an die Oberfläche klaffen müßte. Dann wäre ein echtes Spaltental fertig; das Wasser am Grunde wird nicht lange ausbleiben. Aber die Erosion hat ein solches Tal in keiner Weise geschaffen. So breite Spaltentäler sind allerdings in der ursprünglichsten Gestalt nirgends nachgewiesen worden. Aber fragen wir uns zunächst, welche morphologische Züge ein engeres Tal dieser Art haben müßte, bzw. könnte. In den Höhlen haben die steilen hohen Spalten entweder überhaupt keine Spuren der Wasserwirkung oder sie sind im unteren Teil offenbar vom Wasser bearbeitet. Ist aber im unteren Teil eine solche klaffende Urspalte, in der sich ein echtes Sohlengerinne bewegt, nur wenige Zentimeter oder Dezimeter, vielleicht auch 1 m breit, so kann, ja muß bei einem starken Anschwellen des Wassers ein Bettprofil entstehen, welches sehr viel tiefer als breit ist. Im Gegensatz dazu haben oberirdische Flüsse und Bäche meist ein Bett, das sehr viel breiter als tief ist. Breiter als tief sind gewöhnlich auch die mir bekannten Betten von Klammgewässern, die ihre Klamm wirklich erodiert haben, wobei kleinkapillare Fugen höchstens die Richtung für den mechanischen Angriff gewiesen haben. Ich habe die Nischen und Kolke der Wände von Erosionsklammen näher studiert, wo Gewässer am Werke sind, die kaum je wesentlich tiefer werden als sie breit sind.<sup>1)</sup> Diese Formen sind übrigens durch viele Bilder und als Schaustücke der Natur weiten Kreisen wohl bekannt. In gleichsinnig geneigten Höhlen kommen sie ebenfalls vor, wo eine Klamm nachträglich in die Sohle einer runden Röhre eingeschnitten wurde, bzw. das Wasser den Einriß geschaffen hat, als es nicht mehr ausreichte, die Rundung auszufüllen und sie unter Druck zu durchströmen. Aber in engen, sehr hohen Spalten fehlen diese Formen, nicht nur dort, wo sie niemals vom Wasser bearbeitet wurden, auch an den benetzten Wandteilen unten ist nicht die häufige, wohlbekannte Art der Ufernischen, Wandkolke usw. von mir oder anderen beobachtet, bzw. beschrieben worden. Man wird sofort die Bedeutung dieses zunächst gewissermaßen bloß statistischen Befundes erkennen, denn man braucht sich nur etwa zu fragen, wie fließt turbulentes Wasser von 5 m Tiefe in einer sanft absteigenden Spalte von 20 cm Breite. Es können 10 cm oder 40 cm sein und die Spalte braucht keine großen Krümmungen zu haben. Es war mir nie vergönnt, eine solche Bewegung zu sehen oder einen Höhlenteil zu besuchen, für den zeitweilig eine Strömung durch so schmale Bettprofile angenommen werden muß. Aber wir werden sehen, daß andere in dieser bevorzugten Lage waren. In einem so tiefen schmalen Wasserlauf ist jedenfalls kein Platz für die rückläufigen Uferwirbel oder Wasserwalzen beiderseits, die selbst die von mir beobachtete Lammer<sup>2)</sup> in sehr enger Klamm bei höchstens 1 bis 2 m Tiefe beschreiben konnte. Gleichwohl kann es bei hoch angeschwollenen Höhlenbächen solcher Art nur ein sehr unruhiges, jedenfalls turbulentes Fließen mit gehemmten seitlichen Komponenten geben. Auch das muß die Wände umgestalten, allmählich auch auseinander schieben.

---

<sup>1)</sup> Nr. 28.

<sup>2)</sup> Rechter Nebenbach der Salzach nördlich vom Tennengebirge.

Aber mit welchen Formen? Eine Vorstellung davon bekam ich in einem Vortrag von H. Bock, den ich nach 1921 oder 1922 in Wien hörte, doch bin ich nun, da eine Anfrage irgendwie ihr Ziel verfehlte, mit Vorbehalt ganz auf mein Gedächtnis angewiesen: Bock zeigte ein Lichtbild aus einer wohl schon meist über 1 m breiten Spaltenstrecke eines sehr schwer zugänglichen Teiles der Semriacher Lurhöhle, der zeitweise von mehrere Meter tiefen Fluten mit großer Gewalt durchströmt wird. Die Wände nun zeigten sich perspektivisch in der mir damals ganz neuen Form von Vorhangfalten aus schwerem Stoff, die der Wind bewegt und die stellenweise schwach zusammengezogen oder gerafft zu sein schienen. Die mir sonst aus Klammern vertrauten Einzelformen fehlten auf dem Bilde. Nun sind im *Nouveau traité des eaux souterraines* von Martel mehrere Bilder enthalten, die dasselbe zeigen wie jene Aufnahme Bocks. Und sie gehören zu einem Text, in dem Martel sich mit allem Schwung für ein, wie er meint, gar nicht so seltenes Vorkommen echter Spaltentäler einsetzt. Meine eigenen Überlegungen und jene Vortragserinnerung hatten mich in den Zustand versetzt, daß es bei dem Lesen der betreffenden Ausführungen Martels<sup>1)</sup> wie ein Nebel von meinen Augen wich. D. h. ich bin jetzt weit davon entfernt, das wiederholte Vorkommen von Spaltentälern und Spalten- und gemischten Tälern im Karst Europas zu bezweifeln. Vielmehr halte ich es für erwiesen bei der von Martel mit Plan und Bildern erläuterten Schlucht von Olhadibie in den Pyrenäen s. von Bajonne, wo eine Höhlenspalte eine oben offene Verlängerung von 1500 m hat. Diese düstere Schlucht hat an einer abgebildeten Stelle 3 m Breite und 300 m Tiefe. Im Grundriß hat sie höchst wesentliche Übereinstimmungen mit der Spalte von Padirac, besonders an den kurzen scharfen Umbiegungen, wo auch der Querschnitt größer ist. Das Gefälle ist rund 80 m mit 12 Wasserfällen.<sup>2)</sup> Sie sind voneinander scharf getrennt, der größte ist 12 m hoch. Das Bild, Fig. 17, S. 27, in Martels *Traité* ist eine Photographie. Die Fig. 36 und 37 (S. 59f.) und ebenso Fig. 39 (S. 63) sind Zeichnungen, die aber gut zur Photographie passen. Nach den Wandformen wage ich zu sagen, daß höchstens die untersten 20 m vom Wasser in die Tiefe genagt sind, jedoch nicht nach Art einer gewöhnlichen Klamm, sondern bei einem schmalen, hohen Querprofil der Benetzung, während die obere Hälfte der Wände rauh zu sein scheint. Ferner haben mich die Ausführungen Martels überzeugt (fast genügen die Bilder Fig. 18 und 22, S. 31 und 37), daß die Rhoneschwinde unterhalb Bellegarde im Hineinfallen des Flusses in eine ursprünglich nicht von ihm erodierte Spalte besteht, so daß man, auch wenn die Rhone am Grunde dieser Spalte aufschüttet oder noch einschneidet, in ferner Zukunft ein Tal zu erwarten hätte, das man nur als unwesentlich ausgestaltetes Spaltental ansprechen könnte. Auch das Verdontal darf man vielleicht streckenweise als eine einstige Höhlenspalte ansehen. Man betrachte die weichen Auswaschungen des Überhanges auf Fig. 24 (S. 41) bei Martel. Am Ufer gegenüber diesem Überhang ist das Gehänge durch Wasser und Verwitterung höchstens noch zur Seite gedrängt worden. Wieder

<sup>1)</sup> Nr. 35, S. 30ff.

<sup>2)</sup> Sollten diese in Gesteinsunterschieden keine Veranlassung haben, so ist ihr Vorhandensein auf 1500 m Länge allein ein Grund gegen die Annahme, die 300 m tiefe, terrassenlose Schlucht sei vom Wasser erodiert worden. Das hätte zu einem Ausgleich selbst bei einigen Festigkeitsunterschieden geführt.

fehlen an solchen Stellen alle morphologischen Spuren einer mechanischen Tiefenerosion, die in normalen Schluchten den bloß kapillaren Fugen des Felsens langsam nacharbeitet. Dieser Überhang am Verdon erinnert sehr an die eine Seite der schrägen, aber steilen Hannahkluft in der Koppenbrüller Höhle. Ich gehe so weit, zu bekennen, daß ich in der sonst gewöhnlich erodierten Liechtensteinklamm in Salzburg eine Strecke, die mir wegen der fremdartig rauhen Enge gleich merkwürdig war, unter Umständen als einen von Haus aus offenen Riß anerkenne, obwohl ich weiß, daß im altkristallinen Gestein Spaltenhöhlen noch nie gefunden worden sind. Aber das Aussehen der unterirdischen Riesenspalten des Karstes schärft uns den Blick dafür, was wir mindestens von manchen offenen engen Kalkschluchten zu halten haben. Man kann also im Höhlenkarst unterscheiden steile überkapillare bis meterbreite Spalten, teils ohne Erweiterung und Vertiefung durch das eingezwängte unterirdische Wasser, teils mit solcher Umgestaltung; wo sie an den Tag reichen, wenn auch mit ihrer größten Enge, da muß man unter Umständen auch den Hinzutritt der Verwitterung zu den Gestalten dieser Spaltenhöhlen erwägen. Das alles hat heute nicht mehr bloß theoretische Bedeutung. Ist man aber einmal so weit gekommen, so wird es unmöglich zu behaupten, nur die engsten dieser ursprünglich tektonischen Spalten haben die Erlaubnis, an die Oberfläche zu reichen, niemals aber erheblich weitere. Dabei ist es gleichgültig, ob der Riß von Anfang an bis zur Oberfläche klaffte oder ob er erst bloßgelegt wurde, weil die Oberfläche durch äußere Vorgänge tiefer gelegt worden ist. In beiden Fällen liegt ein schluchtförmiges Spaltental vor, manchmal in der Art ausgestaltet, die auch oder sogar nur in einer Höhle möglich ist.

Was besagen nun diese scheinbar abliegenden Einsichten für die Karsthydrographie? Zunächst bemerkt man den großen oberirdischen Unterschied zwischen den Kapillarfugen einerseits, die der Talbildung streckenweise nur die Richtung weisen, aber nie selbst zu Schluchten werden, und den weit klaffenden Spalten andererseits, welche eine Schlucht sind in dem Augenblick, wo sie an die Oberfläche gelangen. Angesichts dieses Unterschiedes besteht auch der für das Werk der Höhlen-gewässer angenommene Standpunkt der §§ 11 bis 14 noch eine Prüfung. Wie dort bewiesen wurde, kommt es in der Karsthydrographie auf die schon ursprünglich überkapillaren Klüfte an, die auch ohne Ausweitung karsthydrographisch wirksam wären. Die Auslaugung kann ihren Vorrang nur verstärken oder abschwächen.

Die Spaltentäler der Oberfläche werden stets eine Besonderheit bleiben, auf einen Teil der felsigen Talbildungen beschränkt. Wohl alle übrigen Täler sind bei so langsamer Gefällsvermehrung durch die Krustenbewegungen geschaffen, daß das Wasser stets nur in zerfallendem oder ganz kleinem Schutt tätig ist und nicht dazu kommt, den Fels und seine Spalten unmittelbar anzugreifen. Es gehören schon rasche Hebungen dazu, um da und dort ständige Gewässer wesentlich anders arbeiten zu lassen, als Schuttgerinne es immer tun.<sup>1)</sup> An Stelle der vielen neu entstehenden Fugen, längs welcher das einst von nur wenigen Klüften durchzogene Felsgestein zu Schutt zerfällt, sind es im unterirdischen Karst eine große Menge flach und sehr schräg verlaufender Klüfte mit nur bescheidenen überkapillaren

<sup>1)</sup> Vgl. meinen Beitrag zum Penck-Festband 1918.

Ausmaßen, welche eine Vorherrschaft der steilen hohen Spalten nicht immer aufkommen lassen. Die Spaltenbäche und -flüsse des Höhlenkarstes, die nicht erst als Nachfolger einstiger Druckgerinne nach Abb. 46 an der Höhlenhydrographie teilhaben, sind zwar nicht so selten wie die nun wieder anerkannten oder anzuerkennenden wasserführenden Spaltentäler der Oberfläche, aber als Sohlengerinne und damit als echte Höhlenflüsse ausgebildet, sind sie doch nur ein Sonderfall der Karsthydrographie und nicht der Schlüssel für alle ihre Erscheinungen.

B. Die Entwässerung des Karstes zwischen der Oberfläche und den Höhlen und zwischen diesen selbst.

§ 104. Der vorige Abschnitt hat die Aufmerksamkeit mehr auf die tiefsten Hohlräume des unterirdischen Karstes gelenkt, in denen fast immer Wasser vorhanden ist, und nur gelegentlich einen Fall getroffen, wo in der nächsten Nähe ständiger Höhlenwasserläufe solche bloß zeitweilig vorhanden sind. Eine kurze Zusammenfassung der nun bekannten Fließweisen in den unteren Teilen des Karstes diene nun dazu, daß man bei Betrachtung der oberen Teile des Karstes, und zwar schon dicht unter der Oberfläche die daselbst gefundenen Fließweisen schneller als dieselben wiedererkennt, die in der Tiefe oft dauernd herrschen.

In den tiefen Teilen des Karstes sind Druckströmungen und Sohlengewässer festgestellt worden. Eine Mittelstellung nehmen offen spiegelnde Staubecken ein, die das Wasser oft unter Druck erreicht und stets auf diese Art verläßt. Die Druckströmungen haben zwei Hauptformen, als turbulente<sup>1)</sup> in größeren Röhren und als laminar zu denkende in großkapillaren, seitlich nicht unbegrenzten Fugen zwischen langhin ziemlich parallelen Gesteinsplatten. Die Sohlengewässer der Tiefe treten mit und ohne Wasserfälle auf, zum Teil eingeschnitten in die Sohle einstiger Druckröhren, zum Teil in hohen ursprünglichen Spalten, welche aber auch Staubecken enthalten können. Die gewöhnliche Erscheinung in zugänglichen Wasserhöhlen, daß Sohlengerinne, Staubecken und Drucksiphone räumlich aufeinander folgen und abwechseln, vollzieht sich entweder auf undurchlässiger Unterlage, indem das Gestein kluffrei oder kein Karstgestein ist, oder über einem Karst, in welchem ausschließlich Druckströmungen alle Hohlräume erfüllen. Es wird sich nun zeigen, daß das Reich der gemischten Fließarten mit einem Vorherrschen vorübergehender Druckströmungen bis an die Oberfläche emporgreifen kann. Daraus wird dann folgen, daß die Unterscheidung von Karst- und Sickerwasser oder gar von „vertikaler“ und „horizontaler“ Zirkulation im Karst,<sup>2)</sup> teils von ihrem groben Schematismus befreit, teils aufgegeben werden muß. Eine Beobachtung soll uns in die Verhältnisse einführen. Auf dem „Stein“, dem einsamen unvergletscherten Karstplateau in der Mitte des Dachsteinstockes, liegt die abgekommene Hirzkaralpe. An der Umrandung ihrer Hohlform sind in einem niedrigen Steilabfall Quellöffnungen vorhanden, von denen eine vom Schnitt der Abb. 64 getroffen wird.

Der anschließende Einzugsraum hat folgenden Längsschnitt<sup>3)</sup> (Abb. 64). Zu oberst

<sup>1)</sup> Hierzu kommen sekundäre Drehbewegungen. Vgl. § 95.

<sup>2)</sup> Nr. 21, S. 137 ff.

<sup>3)</sup> Die Zeichnung beruht in Höhen und Abständen auf etwas eiligen Schätzungen,

(außerhalb der Skizze) durchzogen den sanft geneigten Grund weit und breit Kluffkarren mit Moospolstern bewachsen. Eine solche Kluff, bei I, erhielt einen seit-

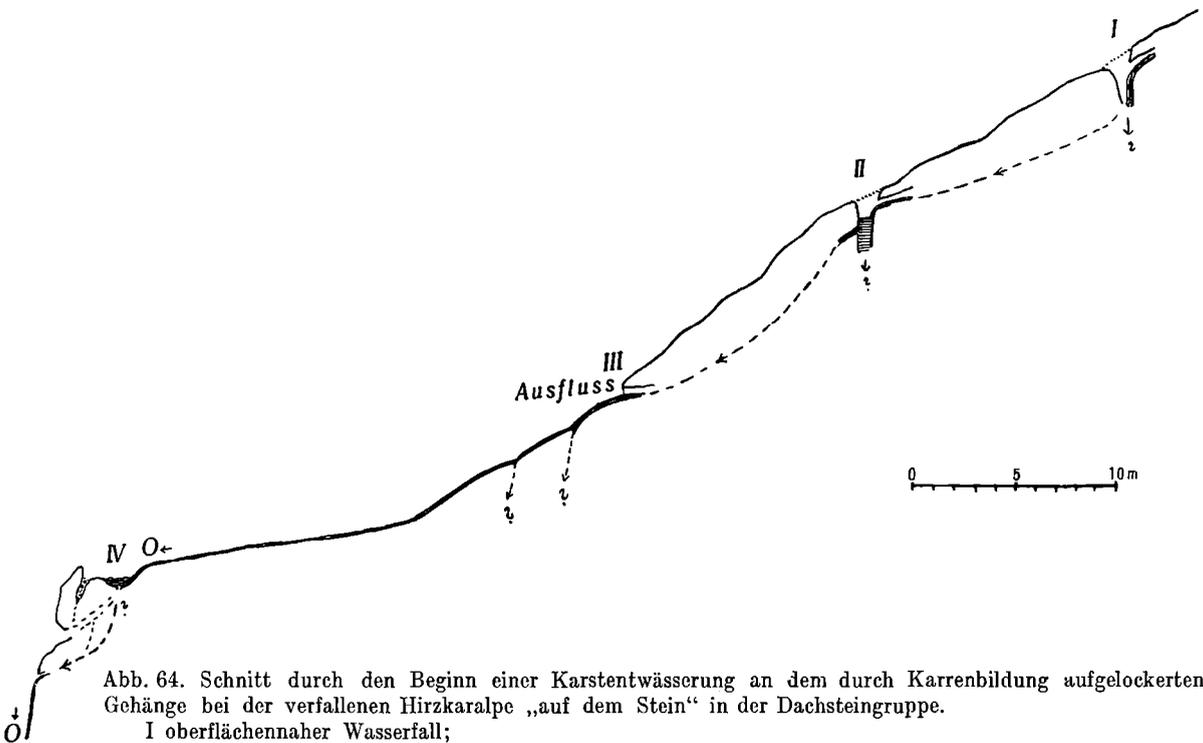


Abb. 64. Schnitt durch den Beginn einer Karstentwässerung an dem durch Karrenbildung aufgelockerten Gehänge bei der verfallenen Hirzkaralpe „auf dem Stein“ in der Dachsteingruppe.

I oberflächennaher Wasserfall;

II angestauter Spiegel, der einen oberflächennahen Wasserfall empfängt, ein Röhrengerinne unter Druck entläßt;

III Ausfluß eines Röhrengerinnes ohne Druck, soweit man es feststellen konnte;

IV Wasserbecken der Oberfläche, das ein Röhrengerinne unter Druck entläßt.

Vom Ausfluß III bis O verläuft ein oberirdisches Bächlein. Der oberirdische Wasserfall O' verliert sich im Schutt, wo dann erst endgültig die unterirdische Entwässerung für diese Gegend des „Steins“ beginnt. Wahrscheinliche unterirdische Verbindungen sind gestrichelt, bloße Vermutungen als solche durch ? gekennzeichnet. Die Einzelheiten I bis IV sind vielleicht für den Maßstab etwas zu groß ausgefallen.

welche durch die immer unfreundlichere Wetterlage bei später Nachmittagsstunde in dieser Karsteinöde gelitten haben dürfen. Genauigkeit im Unwesentlichen kann nicht gewährleistet werden.

lichen bis dahin unterirdischen Zufluß, der in die Tiefe fiel. Wenige Meter davon sah man in einen Karrenbrunnen, bei II, der in geringer Tiefe ein wassererfülltes Gefäß bildete. Auf seinen Spiegel ergoß sich aus der Richtung der Schwinde I ein Rinnsal, während in der Wand des Gefäßes unter dem Spiegel ein Ausfluß bestand. In dieser Gegend ist die Oberfläche kräftig geböschet und bildet die hintere Lehne einer Art Nische, die sich trotz kleinen Stufen an Karrenklüften zu einem sanften Boden verflacht. Im allgemeinen durchziehen schwache Rillenkarren die schiefe Ebene zwischen den kleinen Stufen. Diese Rillen beginnen oben manchmal bei einem kleinen Loch oder nassen Fleck im Gestein. Damals trat ganz nahe bei dem Gefäß mit dem unterirdischen Abfluß II aus einem dieser Löcher ein Wasserlauf (III) hervor und hielt einige Meter weit an, wobei er sich wegen kreuzender Karrenfurchen in zwei bis drei Gerinne gabelte. Eines erreichte noch ein kleines Becken, bei IV, dessen Füllung aber nicht unterirdisch, sondern an der Oberfläche spiegelte. Aus diesem Becken entwich das Wasser in der Richtung auf die Quellöffnungen im kleinen Stufenabfall zur Hirzkaralpe, wo es unter einer trockenen weiten Öffnung an mehreren Stellen hervortrat. Zwischen dem Becken und dem Stufenrand war noch eine Querkluft mit Steinchen darin. Es läuft also zu Zeiten das Becken IV oberirdisch über oder der ganze Wasserlauf ist so stark, daß er einfach darüber hinwegströmt bis zur vorderen Querkluft über dem Steilabfall.

§ 105. Entsprechend der Enge dieser Hohlräume sind natürlich die Stauspiegel der Wasserfüllungen, welche die Druckgerinne entlassen, winzig.

Außer dem gezeichneten Beispiel wurden in derselben Gegend noch zwei andere gefunden, wo kleine Becken an der Oberfläche oder bis Armestiefe darunter den Druck für Röhrenströmungen lieferten, die im übrigen mit Sohlengerinnen unter Tag oder auch an der Oberfläche abwechselten. Das zweite Vorkommnis betrifft die Durchquerung mehrerer Dolinen und der trennenden Felsbarren südlich vom Krippenstein durch ein Karstgerinne, das schließlich über eine Wandstufe neben dem Weg nach der Hirzkaralm herabfällt und in der Schutthalde verschwindet. Das dritte Beispiel lag nahe dem rechten Gehängefuß einige hundert Meter unterhalb des Endes des Schladminger Gletschers unterhalb eines Schneeflecks.

Alle diese Beispiele lehren, daß sogar in einem so furchtbar zerklüfteten Hochkarst 1000 m und mehr über den Karstquellen unterirdisches Wasser zunächst nach kurzem Lauf wieder zutage treten, oberirdisches nicht sofort der Tiefe des Dachsteinkalkes anheimfallen kann. Bisher sind in der Karsthydrographie die Verhältnisse der oberflächennahen Hohlräume vernachlässigt worden, die unter Karren und Dolinen unzugänglich enge Querschnitte haben. Da ist die Anzahl der gebrachten Beobachtungen wohl nur eine dürftige Füllung dieser Lücke. Immerhin ergibt sich aus ihnen ungefähr, was man sich über und unter den ausgeweiteten Hallen der Tiefe vorzustellen hat, deren Luftinhalt ein Tropfenfall durchschneidet, in denen es sozusagen „regnet“. Über diesen Höhlen herrscht ebenso wie unter ihnen ein Wechsel von offenen und röhrenfüllenden Gewässern. Dabei muß man aber in einiger Tiefe, die nicht mehr zahlreiche, durch Karren- und Dolinenbildung aufgeschlossene Klüfte enthält, ein stärkeres Überwiegen sowohl laminarer Kapillarströmungen als auch überkapillarer Druckströmungen annehmen. Das Herrschendwerden von Wasser unter Druck ergibt sich aber nicht nur aus den Überlegungen, die sich auf die gebrachten

Beobachtungsbeispiele stützen, sondern manche Wanderung in tief zerklüftetem Hochkarst hat mich darüber beruhigt, daß diese Beispiele stark vermehrt werden können. Endlich beruht das Gesagte vorgehend auch auf den Erfahrungen im mehr als 1800 *m* langen Hauptstollen des Spullerseewerkes, erbaut unter der Leitung von Herrn Ingenieur Hans Ascher. Dieser Stollen verläuft größtenteils in nur 80 bis 200 *m* Tiefe. Die meisten der über 170 Quellen darin flossen bereits unter einem, wenn auch noch schwachen Druck (vgl. im einzelnen § 112 bis 120). Was man sich für das Gestein über und unter den Höhlen mit Tropfenfall vorzustellen hat, gilt auch für die unzugänglich engen Hohlräume neben solchen Höhlen und zwischen ihnen in den gleichen Höhenlagen.

§ 106. Liegen die Ausflußstellen (Quellen) einer Karstentwässerung alle höher als die tiefsten Hohlräume oder ist durch Häufigkeit der Niederschläge gesorgt, daß diese niemals leerlaufen, so gibt es in der Tiefe eine unebene Fläche, unter welcher nur vom Tropfwasser durchmessene Höhlen unmöglich sind, weil alle Höhlen, auch die größten, wenigstens zeitweise und in einem Teil des Querschnittes, wenn nicht völlig und dauernd mit fließendem Wasser erfüllt sind. Weil die Hohlräume ungleich groß sind und auch die Anordnung der engen Klüfte im Fels außerhalb der Höhlen diese nicht alle gleichmäßig mit Wasser versorgt, wäre es vermessen, zu denken, daß es ein bestimmtes Niveau oder eine gesetzmäßige Höhenzone gibt, unter dem die zeitweise oder dauernd durchflossenen, d. h. nicht durchtropften Höhlen auf einmal auftreten. Dazu braucht man nicht einmal das zu kennen, was frühere Abschnitte dieses Buches ergeben haben, welche einen solchen Gedanken als unrichtig erweisen. Wenn es nun lange genug nicht geregnet hat, so laufen in Wasserhöhlen die obersten Hohlräume mit Sohlengewässern leer, in denen mit Druckströmungen läßt der Druck wegen Sinkens der Spiegel nach, denn die Quellen zehren am unterirdischen Wasservorrat, solange er ihnen tributär ist, ohne Unterlaß. Wenn es nun im Einzugsgebiet regnet, so ist ein Unterschied zwischen dem unmittelbar unter dem Regenzutritt liegenden Teil des Karstes und dem Teil zu machen, der nur durch Druckleitung von weitem einen verstärkten unterirdischen Wasserzudrang erfährt.

In den vom Regen direkt getroffenen Karst dringt von oben eine neue Verknüpfung von offenen und Druckgerinnen ein, während die untere zuerst noch in ständiger Wasserabgabe begriffen ist. Zwischen beiden Reichen sind die Hohlräume nur mit Luft erfüllt. Diese Luft wird nun verdrängt. Erreicht der Regenabfluß in der Tiefe einen offenen Spiegel in durchströmter Höhle, so hebt er ihn; umso langsamer, je weiter der Hohlraum ist. Soweit die Luft nicht schon vorher entwichen ist durch Klüfte, die kein Wasser enthalten oder in einem Teil ihres Querschnittes nur wenig Wasser führen, wird sie nun unten eingeeengt und über, bzw. mit der Strömung zu den Quellen oder benachbarten Höhlenöffnungen befördert. Wird dann noch der untere Hohlraum bis zur Decke durch den Zufluß erfüllt, so verschwindet sein weiter Spiegel und wird mit einem Schlage durch einen oder mehrere viel höhere enge Spiegel ersetzt, an denen — vielleicht unweit der Oberfläche — Druckströmungen beginnen. Dieser plötzliche Ersatz eines tiefen Spiegels durch einen oder mehrere höher gelegene tritt auch überall ein, wo Regenabfluß unter Druck in der Tiefe auf einen hydraulischen Standrohrspiegel in aufwärtsführender Kluff trifft, nachdem

die Luft dazwischen genügend ausgewichen ist. Da nicht alle Teile des Regenabflusses gleichzeitig in die Tiefe gelangen, so erzeugen die früher eintreffenden in der Nachbarschaft einen passiven Anstieg der unteren Spiegelhöhen, u. zw. oberhalb der Zuflüsse durch Rückstau, unterhalb durch beschleunigten Zufluß (vgl. § 41). Die nun später eintreffenden Regenabflüsse treffen daher auf Strecken steigender Spiegel. Dann wird die Luft zuletzt an mehreren Stellen von oben und unten eingeeengt, besonders der Luftrest, der nicht schon vorher einen Ausweg gefunden hat. Wieder gelangt er mit und über den Strömungen zu den Quellen, Wiederausflüssen oder auf anderen tiefen Wegen ins Freie. Es sind nicht viele, aber kostbare Beobachtungen, die mir erlaubten, diese Vorgänge in der vorgeführten Art abzuleiten.

§ 107. In einigen Fällen ist nämlich die Gestalt und Anordnung der Hohlräume so, daß die verdrängte Luft in ein starkes Wehen gerät und ihr Brausen und Toben mit dem Geräusche des Wassers verbindet. Aus dem Ausseer Becken fließt die Traun in engem Durchbruch zur Talweitung von Obertraun und aus dieser in das Südende des Hallstättersees. Die Talweitung dürfte einst eine weiter nach Osten greifende, nun ausgefüllte Bucht des Sees gewesen sein. In der Durchbruchsschlucht liegt nahe ihrem Ausgang bei etwa 545 m Höhe die Wasserhöhle des „Koppenbrüllers“, über die wir neuere Nachrichten besonders G. Lahner verdanken.<sup>1)</sup> Für gewöhnlich fließt das Wasser nur in den tiefsten Teilen der Höhle und steigt nicht zu dem großen Höhlentor 37 m über der Traun empor. Vielmehr erreicht es deren Schlucht gewöhnlich nur auf verborgenen Wegen. Zu Zeiten von Wassereinbrüchen, besonders bei der Schneeschmelze auf der 1500 bis 1800 m hohen Karstfläche des Koppenplans speit das Tor aber einen ungeheueren Wasserfall aus. Lahner berichtet nun: „Bevor jedoch die im Inneren des Berges sich sammelnden Gewässer die Höhlenausmündung erreichen, pressen sie die Luft aus den niederen Räumen mit gewaltigem Druck hinaus, was sich mit einem eigentümlichen dumpfen Gebrüll, oder besser gesagt, Geheul vollzieht.“ Lahners Mitarbeiter, Josef Kling, war aber einmal im August stundenlang bei einem Wassereinbruch in dieser Höhle eingeschlossen. Während die höhere Galerie, die seine Zuflucht bildete, wasserfrei blieb, stieg darunter die Flut meterhoch, so daß ohne Tauchen ein Erreichen des Freien unmöglich war. Das Steigen der Flut bewies, daß einzelne Wasserstränge das Höhlengewässer schon erreicht hatten. Sonst bliesen aber die Hohlräume des Wassereintruches einen heftigen Wind aus, der, als ihm der Weg ins Freie verlegt war, in der Höhle aufwärts wehte, wo diese von abwärtsdrängenden Wasserfluten frei blieb. Wie die oben zitierte Stelle beweist, ist Kling weit entfernt, diesen Wind auf das Steigen des Spiegels hinter dem Höhlentor zurückzuführen, das schrecklich genug war, wenn es zeitweise nach meiner Schätzung in der Minute 50 bis 100 cm betrug. Eine Messung liegt nicht vor, aber die Beschreibung Klings spricht von einer „fast stoßweisen“ Anschwellung der Flut, welche „kaum daß er einen Moment so stand“, schon „bis an die Knöchel“ drang. Es ist das die weitaus größte rein unterirdisch erzeugte Steiggeschwindigkeit, über die je von einem örtlichen Karstwasserspiegel berichtet wurde. Aber auch eine zehnmal größere hätte noch keinen spürbaren Luftzug bewirken können.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Nr. 7, S. 6 und 11, vgl. auch Simonys Dachsteinwerk.

<sup>2)</sup> Windstärke 1 („leiser Zug“): 1,7 m/sek.

§ 108. Manchmal findet die vom eindringenden Regenwasser verdrängte Luft anscheinend auf kurzem Wege an die Oberfläche zurück. Im Triester Karst und in Istrien kennt man eine ziemliche Anzahl von Blaslöchern,<sup>1)</sup> aus denen nach A. Grund „bei Regenwetter Luft mit Geräusch entweicht.“<sup>2)</sup> Für ihn ist dies „eben eine Folge des sich hebenden Grundwasserspiegels“; auch Krebs hatte denselben Schluß gezogen, wenn eine solche Luftbewegung „nach Regengüssen“ beobachtet wird. Wo nicht alles verschluckte Regenwasser, sofort und gleichzeitig in Druckströmungen verwandelt, zur Tiefe eilt, gibt es Klüfte mit freiem Luftraum über spärlichen Sohlengewässern, durch welche die in benachbarten vollen Klüften abwärts verdrängte Luft nach oben ausweichen kann. Fehlen ausreichende Luftwege nach oben, so muß eben die Luft unten durchdringen. Eine Beziehung zu einem steigenden Grundwasserspiegel ergibt sich dabei überhaupt nicht. Und im Hinblick auf einen passiv emporrückenden örtlichen Spiegel des Karstwassers läßt sich ebenfalls keine haltbare Erklärung der Blaslöcher aufbauen, wie aus den von Kling berichteten Verhältnissen hervorgeht.

§ 109. Betrachten wir nun den Teil eines Karstes, der außerhalb eines gut begrenzten Regengebietes liegt, in solcher Entfernung davon, daß über den Strömungen in der Tiefe in den Klüften so gut wie gar kein Wasser unterwegs ist. Ferner sei angenommen ein ununterbrochener Zusammenhang der Hohlräume bis in den Regenbereich. Der Zufluß von dort aus wird im betrachteten Karst die vielleicht vorhandenen Sohlengerinne und die Durchflußbecken unter Spiegelerhöhung zu rascherer Bewegung bringen. Soweit hier Druckströmungen vorhanden sind oder entstehen, werden die Spiegel in den nach oben führenden Klüften steigen, denn mit dem geschwinderen Zustrom steigt auch die Reibung und damit der Wanddruck, der das Wasser emporhebt. Im ganzen könnte man diesen Umkreis des Karstes als einheitliches Gebiet passiver Spiegelhebung bezeichnen. Auch in ihm wird Luft verdrängt, und zwar entsprechend langsam nach oben. Blaslöcher sind unter solchen Voraussetzungen noch nie beobachtet worden. Aber bei der Heftigkeit des Andringens des Wassers im Karst, wenn im entfernten Einzugsgebiet ein starker Regen gefallen ist, sei er auch weit weg, werden zwischen Siphonen Hohlräume mit spiegelnden Gewässern rasch aufgefüllt und da zeigt es sich dann, ob die in Gewölben eingeschlossene Preßluft Wege hat, heftig aufwärts zu strömen, oder ob sie vielmehr im Wasser eingeschlossen und mitgerissen und — geschoben wird, bis weite Ausgänge ihr einen heftigen Abzug bieten. Für einen solchen Fall haben wir ein schönes Beobachtungsbeispiel aus dem Mährischen Karst bei Brünn K. Absolon zu verdanken, dem hochverdienten Erschließer und Darsteller der gegenwärtig mit am allerbesten erforschten Wasserhöhlen. Absolon machte seine Beobachtungen, indem er auf der Arbeitsleiter in den berühmten 135 m tiefen Einsturzschaft der Macocha hinabstieg, als dort Hochwasser eintrat. Am 17. und 18. April 1917 herrschte darin ein außerordentlich wildes Hochwasser. In 5 km Entfernung nördlich der Macocha verschwindet der Bach des Sloupertales in einer Höhle beim Orte. Über diesem Tal war ein Wolkenbruch von unerhörter Stärke niedergegangen, so daß sich dort gewaltige Wassermassen in das Felseninnere wälzten. Schon nach zwei Stunden er-

<sup>1)</sup> Nr. 27, S. 58.

<sup>2)</sup> Nr. 22, S. 141.

schien das Hochwasser in der Macocha, aus mehreren Öffnungen hervorbrechend, und setzte den Grund des Schachtes bis 14 m über dem Spiegel seiner kleinen Seen unter Wasser, wobei der „Untere See“ normalerweise selbst 30 m tief ist. Je höher diese Öffnungen gelegen sind, um so später traten sie in ihre speiende Tätigkeit ein. „Dumpfe Schläge,“ schreibt K. Absolon,<sup>1)</sup> „die bei einer solchen Gelegenheit von allen Wänden widerhallen, . . . ändern sich zeitweilig wie in eigentümliche Worte um, die man mit den mit einer tiefen Stimme ausgesprochenen Worten ‚bluum‘, ‚blaub‘ vergleichen könnte. Offenbar drücken die Gewässer die Luft in Spalten und Löcher ein und dadurch entstehende Töne resonieren auf mannigfaltigste Weise“ . . . Aus einer höhern trocken bleibenden Höhlenöffnung verstärkt sich der gewöhnliche Luftzug bei Hochwasser so sehr, daß sogar das Licht nicht brennen kann und verrät durch seine niedere Temperatur und Feuchtigkeit, daß er seine Entstehung „der durch Wasser hinausgepreßten Luft“ verdankt und zu solchen Hochwasserzeiten „nicht dem Ausgleich von Temperaturen verschiedenen Grades“. Derartig mitgerissene und verschleppte Luft beobachtete Kling auch in der Koppenbrüllerhöhle, als das Wasser in dem überschwemmten Höhlenteile zu fallen begonnen hatte und er nach sechs Stunden seinen ersten Rettungsversuch machte. Er sah, daß in dem tiefen Höhlenraum hinter und unter dem großen Tor, den er zu durchqueren hatte, aus der sinkenden, gurgelnden Flut bei der Annäherung an den Pollaksiphon „große Luftblasen mit lautem Knall aus dem Wasser herausplatzen“. Man darf hier daran denken, daß mit dem Sinken des Wassers manche Hohlraumstrecken wieder vorübergehend Luft aufnahmen, die vorher das Wasser erfüllte und daß jedes solche Lufteindringen bei heftig pulsierenden Fluten zunächst ein Opfer der fortreißen Strömungen wurde.<sup>2)</sup>

§ 110. In der Karsthydrographie haben die Zeiten, zu denen frisches Regenwasser eindringt, eine verschiedene Bedeutung, je nachdem, ob dieses Wasser in der Tiefe noch Wasser von früheren Niederschlägen antrifft oder nicht. Eine solche Vereinigung mit älterem Karstwasser ist gesichert, solange dieses teilweise unter die tiefsten Quellen hinabreicht, also nicht völlig auslaufen kann. In allen anderen Fällen hängt es letzten Endes von der Häufigkeit der Niederschläge ab, ob das frisch eindringende Wasser auf seinem Wege ältere Strömungen einholen kann. Wenn nicht, so speist es zeitweilige Quellen, wenn aber ja, werden ständige Quellen verstärkt und über ihnen durch Druckanstiege zeitweilige Quellen anderer Art hervorgerufen. Die dritte Art zeitweiliger Quellen ergibt sich, wenn das Wasser nur aus aufsteigenden Röhren hervortritt, wo in der Tiefe ständig solches vorhanden ist, aber nicht immer unter dem nötigen Druck steht. Wie man sieht, hat es im Karst wenig Wert, eine Trennung von Sickerwasser und Karstwasser einzuführen. Einer solchen Trennung aber die weittragende und grundsätzliche Bedeutung zu geben, wie A. Grund es tat, ist verfehlt und mußte zu Irrtümern

<sup>1)</sup> Nr. 1, S. 82.

<sup>2)</sup> Wie sich Luft an das Wasser hängt, konnte ich in der Höhle der „Eisriesenwelt“ im Tennengebirge beobachten, wo von den glatten Wänden des 6 und 9 m weiten elliptischen Schlot es östlich vom Wasserberg ein heftiger Tropfenfall stattfand. Das Hautgefühl merkte deutlich die mitgerissenen Fetzen wärmerer Luft, die aus der rauhen Röhre über dem Schlot in die eisige Höhlenluft geriet.

führen. Das Versickern ist eine langsame Fließbewegung kleiner Wassermengen in vielen engen Hohlräumen in der Form vorwiegend laminarer Druckströmungen. Im Laufe der Zeit können dadurch merkliche Verluste auftreten. Bei der Übertragung des Begriffes auf den Karst war man sofort genötigt, mindestens auch kleine Sohlenbäche und schwache Wasserfälle (starker Tropfenfall bis Träufeln) in die Versickerung einzubeziehen. Auch finden die Druckströmungen in engen, aber bereits überkapillaren Hohlräumen nicht überall sicher wirbellos statt. Daher muß man auch turbulente Druckströmungen in die „Versickerung“ einbeziehen. Denkt man nun an den aktiven Höhlenkarst mit seinen größeren Sohlengewässern und Druckströmungen in weiteren Röhren, so ergibt sich zunächst nur ein Größenunterschied seiner Fließbewegungen gegenüber einer sogenannten Versickerung, ohne daß irgendwo eine Grenze zwischen beiden Begriffen gesetzt werden könnte. In den Fließweisen herrscht also weitestgehende Übereinstimmung zwischen der Bewegung in recht engen und in großräumigen Klüften und Röhren. Die geringen Verschiedenheiten in der Häufigkeit der Turbulenz oder des Gleitens sind an sich etwas hypothetisch und keinesfalls kann man auch hydromechanisch ein Sickerwasser von sonstigem Wasser im Karst mit einiger Klarheit absondern.

Wer unbedingt an der Verwendung des Wortes Sickerwasser festhalten will, kann es ohne Fehler nur so tun, daß der Absonderung gar keine wesentliche Bedeutung zukommt. Er kann etwa die Vorstellung des Sickerwassers auf die Zeiten nach sehr schwachen Regenfällen, langsamer Schneeschmelze und jene Zeiten beschränken, wo das frisch eingedrungene Regenwasser die nur zeitweise gefüllten Hohlräume wieder verlassen hat, während deren Wandfeuchtigkeit noch einzelne Tropfen abgibt. Dieses Sickerwasser ist karsthydrographisch ohne jede Bedeutung, sein Vorhandensein oder Fehlen in den Quellen und Wiederausflüssen ist nicht einmal nachweisbar. Daher ist es besser, nicht nur alles zusammenhängende, sondern überhaupt alles Wasser im Karst Karstwasser zu nennen.<sup>1)</sup> Man erfaßt dann mit Sicherheit alles Wasser, das die hydrographische Eigenart des Abflusses im Karst zur Schau trägt. Wesentlich ist nur die Einteilung des Karstwassers in ständiges und bloß zeitweilig vorhandenes. Daß frischeindringendes Regenwasser zeitweilige Karstquellen speisen könne, wenn es durch ein vorher leergelaufenes Kluft- und Röhrengeflecht rinnt, kann durch viele Beispiele belegt werden.<sup>2)</sup> Zeitweilige Quellen dieser Art sind alle jene, die an der Zuflußseite von Poljen am Gehänge auftreten, wo ein genaues Zurückgehen auf die Beobachtungen ergibt, daß die Überschwemmung der Poljen nicht auf das Emporsteigen von Druckwasser aus der Tiefe zurückgeht. Aber selbst im Fall emporsteigenden Wassers müssen nicht alle zeitweiligen Quellen mit diesem zusammenhängen. Wie wenig ein allseitiger Zusammenhang hydrographisch wirksamer Fugen in den Karstgesteinen Tatsache ist, wissen wir schon. Auch in geschlossenen Poljen ohne Überschwemmungen wird

<sup>1)</sup> Ich folge mit dieser Ansicht ohne weiteres einem Gesichtspunkt von H. Bock.

<sup>2)</sup> Schon 1913 hat Bock auf die Beatushöhle über dem Thunersee verwiesen, weil Grund „Sickerwasserquellen“ nicht zulassen wollte. Der Bach dieser Höhle folgt auf der ganzen Länge mittelsteilen Schichtflächen und ist an der Quelle nicht ein durch Druck gehobenes Karstwasser. Sickerwasserquellen gibt es nur in dem Sinne nicht, als das Sickerwasser im Karst keine sachliche Bedeutung hat.

man unter den zeitweiligen Quellen solche treffen, welche nur ein bei Regen und kurz darnach vorhandenes Karstwasser ernährt. Erwähnt dürfen hier werden die kleinen Quellen um den Augstsee im Toten Gebirge, einen Karsee in flachliegenden Jurakalken. Eine entsprang am 20. August 1926 6 bis 7 *m* über dem Südufer des Sees und fällt in kleinen Stufen zu ihm ab. Die Temperatur war knapp 4° C. Fast gegenüber trat eine Quelle in nur 1 *dm* Höhe über dem See dicht am Ufer aus mit 7,5° C, die dritte Quelle am Ostufer nahe dem Ausfluß liegt 3 bis 4 *m* über dem See in etwa 12 *m* Abstand. Ihre Temperatur war 8° C. Der See hatte an der Oberfläche 14 bis 15° C. Seit einer Woche war schönes Wetter. Ich weilte zu kurz in der Gegend, so daß mir nur bei der Quelle 3 ein deutliches Schwächerwerden auffiel, während der übrigens ständige See in 24 Stunden um 1 *cm* sank.<sup>1)</sup> Jedoch halte ich alle diese Quellen für solche, die ein nur zeitweilig in den Spalten und Röhren vorhandenes Karstwasser speist. Die Einteilung des Karstes in zeitweilig und dauernd wasserführenden ist die einzig der Wirklichkeit entsprechende. Nur müssen zeitweilig und dauernd durchflossene Hohlräume nicht stets über und untereinander liegen, sie können bei dem häufig geringen Zusammenhang der Klüfte auch nebeneinander in gleicher Höhe im selben Gestein liegen. Einen dauernd trockenen Karst gibt es nicht, solange überhaupt von Karsthydrographie die Rede sein kann. Die hier vorgeschlagene hydrographische Zweiteilung des Karstes paßt auch zur Tatsache, daß die sogenannten „trockenen“ Höhlen stets zeitweilig von Tropfwasser, Triefwasser und selbst von kleinen Wasserfällen durchquert werden und daher vorübergehend doch Karstwasser führen. Die vielen Tropfwasser- und Tropfsteinhöhlen, die man kennt, sind alle einst anders durchflossen worden. Ihre Entwässerung hat eine Störung erlitten durch die Eröffnung tieferer Kluft- und Höhlenreiche. Das Tropfwasser dieser Höhlen stellt eine Unterbrechung von anderen Fließweisen oberhalb und unterhalb dar, es besagt nichts für ein eigenes Stockwerk von Sickerwasser, das an der Oberfläche beginnt.

§ 111. Mit diesen Feststellungen ergibt sich auch die Notwendigkeit, die Unterscheidung zwischen „vertikaler“ und „horizontaler“ Zirkulation im Karst abzulehnen. Sie ist noch gröber schematisch als die wenig naturgemäße Analogie „Sickerwasser“ und „Karstwasser“. In Wirklichkeit legt jedes Wasserteilchen im Karst die Wege zurück, die ihm durch die Richtung der benützten Klüfte usw. vorgeschrieben ist. Wollte man hingegen nur den Schwerpunkt einer begrenzten Wassermenge, die sich auf mehrere verzweigte Hohlräume verteilt, auf seiner Wanderung in Abständen verfolgen, so erhielte man an Stelle der Bewegungsbahnen längs der Klüfte einen Polygonzug, der uns den Versatz eines größeren Wasservolumens veranschaulicht. Wie immer die Klüfte verlaufen, würde dieser Versatz zeigen, daß

---

<sup>1)</sup> Immerhin deckte der Ertrag der drei Quellen nach meiner Schätzung rund die Hälfte des Abflusses des Augstsees in Form eines Baches, den bald, noch im Riegel des Beckens, eine große Kesseldoline schluckt. Der See bezog, wie wohl schon aus seiner auffallend hohen Temperatur hervorgeht, auch aus der Tiefe wärmeres Wasser. An einer Stelle hörte man solches unter dem benachbarten Boden rauschen. Kleine Quellen, an dem Steilabfall 25—30 *m* unterhalb des Kalkriegels gelegen, der den See begrenzt, hatten eine Temperatur von 14° und 12,5°. Ein Fahrzeug zu Temperaturlotungen auf dem See war nicht vorhanden.

das Wasser von der Regenschluckstelle oder Flußschwinde bis zu den Quellen und Ausflüssen im Durchschnitt sanft absteigt. Oft würde sich wohl zeigen, daß die Teile des Polygonzuges am Beginn des Wasserweges steiler sind als später, mit der wichtigen Ausnahme der Nachbarschaft aufsteigender Quellen. Aber das Steilersein der Versatzstrecken im oberen Teil der Bewegung gilt nicht nur zu Regenzeiten, sondern gilt, wenngleich abgeschwächt, auch für die höchsten Wasserteile einer lange ohne Zufuhr gelassenen, nur abströmenden Höhlenentwässerung.

Dieser Polygonzug ist der im Karst manchmal mögliche Ersatz der Kurven der Grundwasserbahnen in Schottern und Sanden, die Slichter berechnet hat (vgl. Nr. 30 und die dortigen Zitate). Die Dichte der Wasserwege in solchem Grundwasser macht die Kurven des Versatzes fast unabhängig von den wirklichen Bewegungen. Denn sie bewirken nur einen sozusagen zitterigen Verlauf des Kurvenzuges.

Weder geometrisch noch hydrophysikalisch ergibt sich ein Schnitt oder ein rascher Übergang zwischen einem durchgehend sehr steilen Versatz in zeitweilig durchflossenen Karsthohlräumen und einem sehr flachen Versatz im ständig wasserführenden Karstinneren. Wo flach gelagerte Schichten von steilen Klüften durchsetzt werden, kann dieser Gegensatz allerdings als geologisch bedingter Sonderfall häufig sein, indem frisch eindringendes Regenwasser am meisten vor seiner Verbindung mit tieferem Wasser einen sehr steilen Versatz aufweist, der hier zugleich den Klüften entspricht und indem dann der durchschnittlich ohnehin sanft geneigte Versatz zu den Quellen durch die Schichtfugen auf lange Strecken noch mehr verflacht wird. Dieser geologische Einfluß gilt aber ebenso für zeitweilig vorhandenes wie für ständig vorhandenes Karstwasser. Irgendwelche allgemeine Einsicht in das Wesen der Karsthydrographie ist mit der Unterscheidung einer vom Schichtbau unabhängig gedachten „vertikalen“ und „horizontalen“ Zirkulation im Karstinneren nicht zu gewinnen, hingegen eignen sich diese Schlagworte zur Verdunkelung und formellen Bekämpfung richtiger Ansichten.

Die Trennung des zeitweiligen vom ständigen Karstwasser ist auch im Hinblick auf die Zirkulation sachlich brauchbar. Sie allein umfaßt zwanglos die Tatsache, daß neben den horizontalen Verschiedenheiten im vertikalen Sinne ein sozusagen „schwebendes“ Karstwasser über dem der Tiefe erscheint, dieses stets einholt, wenn es ständig vorhanden ist, oder daß das schwebende an die Stelle eines ausgeflossenen tiefen tritt.

### **C. Die Ergebnisse der Beobachtungen und Messungen im Hauptstollen des Spullersee-Werkes.**

Ein Beispiel für das Verhalten des Wassers im Inneren von Karstgesteinen abseits von den Höhlen und in den Klüften anderer Gesteinsarten.

Hiezu zwei statistische Tafeln in der Beilage, S. 202—205 und Abb. 75.

§ 112. Das Folgende beruht außer auf der wichtigen gemeinsamen Veröffentlichung von Dr. Otto Ampferer und Ing. Hans Ascher (Nr. 2) auf freigebig und geduldig mir überlassenen unveröffentlichten Angaben und Zeichnungen meines zweitgenannten Freundes, des Bauleiters der Spullersee-Kraftanlage (1922 bis 1925)

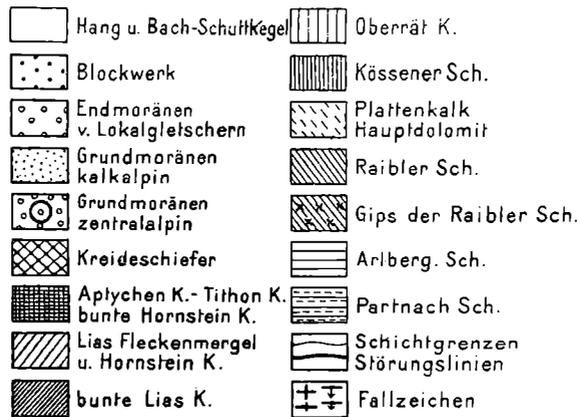
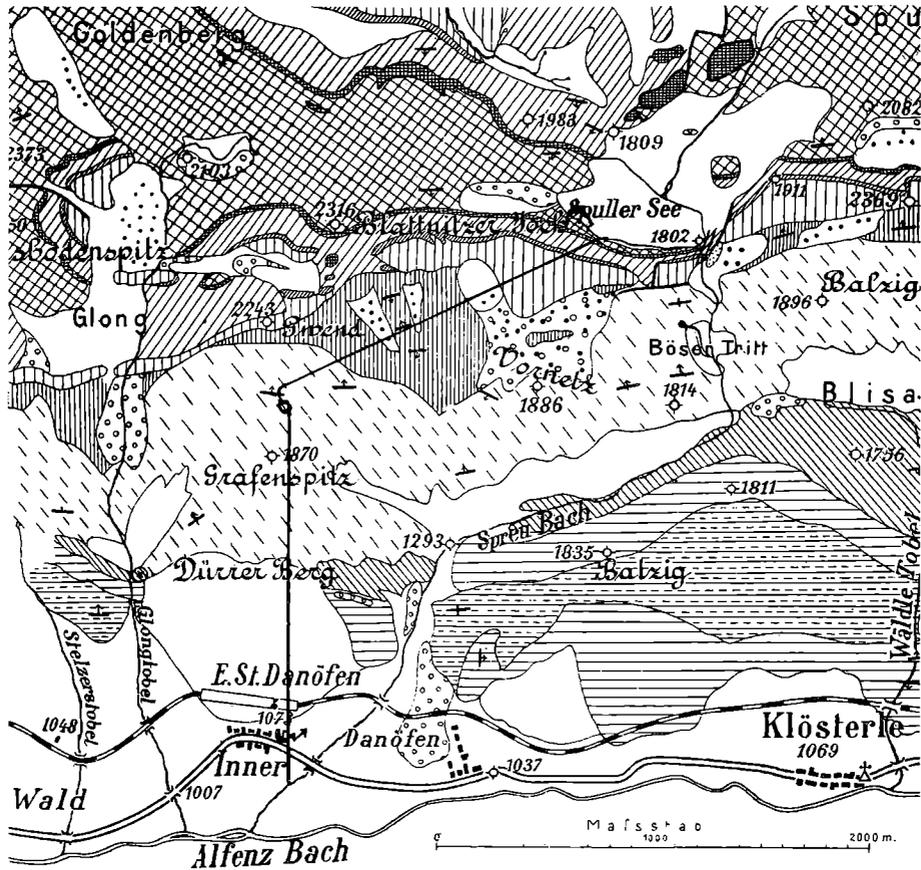


Abb. 65. Ausschnitt aus Ampferers geologischer Karte des Spullerseegebietes mit Einzeichnung des Hauptstollens vom See bis zum Wasserschloß und des Stollens der Steilleitung bis zum Kraffthaus.

für die Arlbergbahn.<sup>1)</sup> Die Lage des Stollens in bezug auf die weitere Umgebung und die allgemeinen geologischen Verhältnisse ergeben sich aus den Abb. 65 bis 67. Vor dem Bau lag der jetzt auf 1825 *m* gehobene Spiegel des Spullersees 1795 *m* hoch. Der Hauptstollen wurde am abgesenkten See mit einer Sohlenhöhe von 1786 *m* begonnen. Er führt 1740 *m* weit mit wenigen Promille Gefälle nach WSW (S 68° W) und dann mit einem kurzen, scharf nach links (S 13° E) umgebogenen Endstück (100 *m*) zum Wasserschloß, wo die Steilleitung zum Krafthaus hinab beginnt. Der

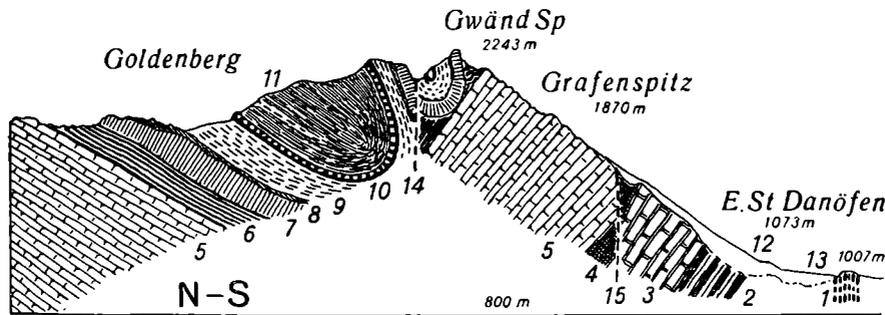


Abb. 66. N-S-Profil durch das Gebirge am westlichen Ende des Hauptstollens des Spullerseewerkes von Otto Ampferer. 1 = Weißlicher, hellgrauer Quarzit. 2 = Tonschiefer und Kalke der Partnach-Schichten. 3 = Kalk- und Dolomitlagen der Arlberg-Schichten. 4 = Mergel, Letten, Kalkschiefer, dunkle Kalke, Rauwacken-Raibler Schichten. 5 = Hauptdolomit. 6 = Kössener Schichten. 7 = Oberrätischer Kalk. 8 = Rote Liaskalke. 9 = Fleckenmergel. 10 = Hornsteinkalke — Tithonkalke. 11 = Kreideschiefer. 12 = Mächtiger, wahrscheinlich interglazialer Schuttkegel. 13 = Schuttkegel des Spreubach-Tobels. 14 = Formarinverwerfung. 15 = Kleinere Verwerfung.

Stollen schneidet das allgemeine westöstliche Gebirgsstreichen fast auf seiner ganzen Länge spitzwinkelig. Im einzelnen ist das Streichen nö. vom großen Bruch (Formarinbruch, Abb. 67) meist WNW-ESE, so daß es den Stollen unter mittleren Winkeln trifft; südwestlich des großen Bruches hat ein fast nordsüdliches Streichen (N 15° E) 100 *m* weit ebenfalls mittlere Winkel zur Folge, aber dann wird es rasch fast parallel zum Stollen (Schnittwinkel nur 2°). Im ganzen bedeuten diese Winkel ein Zusammenlaufen der gefalteten Schichtflächen gegen Osten, besonders gegen die Strecke des Spreubachtales südlich vom Seeausfluß, wo am rund 1750 *m* hohen, sehr ebenen Grapsboden etwa ein halbes Dutzend Quellen auftreten. Der Einlauf des Stollens liegt, wie der Spullersee selbst, noch in der nach N überkippten Mulde der schieferigen Kreideschichten, die außer den nur zwei Quellen im Stollen mit ihren Schichtfugen noch einige Quellen unter dem Seespiegel speisen. Über dem Stollen liegen von beiden kurzen Endstrecken abgesehen 115 bis 235 *m* Gesteins. Diese Felsauflage führt dem Tunnel sehr ungleichmäßig Wasser zu. Gemessen an anderen Erfahrungen sind auch die größten Mengen bescheiden, obwohl doch 479 *m* des Tunnels in kalkigen Gesteinen, 570 *m* im Hauptdolomit liegen. Das jährliche Auftreten von rund 170

<sup>1)</sup> Außerdem bin ich ihm für eine freundliche Führung im Bereich jenes Baues verbunden.

meist schwachen Quellen beginnt ebenso wie die Tropfwasserabsonderung erst nach der Schneeschmelze und dem Auftauen der gefrorenen Bodenschicht ungefähr im April bis Anfang Mai; die Wasserabgabe im Stollen steigt dann in einigen Wochen auf den Höchstwert von ungefähr 200 Sekundenlitern — in kurzen Zuwächsen innerhalb eines Tages stieg sie im Juni 1923 auf 220 bis 240 Sekundenliter — und geht dann bis zur ersten Januarhälfte auf nahezu Null zurück. Nur zwei Quellen fließen ganzjährig; in der Zeit, wo sie allein bestehen, führen sie zusammen weniger als

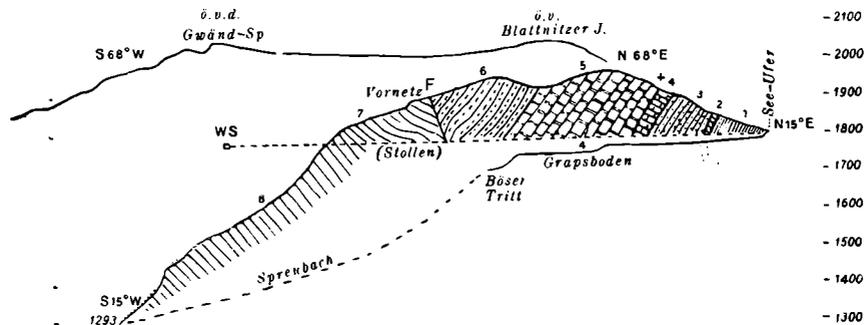


Abb. 67. Geologisches Profil vom Westende des Spullersees zum Punkt 1293 m am Spreubach (vgl. Karte Abb. 64). Höhen und Längen etwa 1 : 20.000. Dieses Profil schneidet die meisten Schichten im Hauptstollen des Spullerseewerkes senkrecht zum Streichen und schneidet auch den Stollen an der durch + bezeichneten Stelle. Der Hauptstollen (bis zum Wasserschloß WS) ist auf die Profilebene mit Strahlen rechtwinkelig zu dieser projiziert und darum nur gestrichelt gezeichnet. Sein linkes Ende liegt  $\frac{1 \text{ km}}{20.000} = 5 \text{ cm}$  hinter der Profilebene. Auch der Oberflächenschnitt des Gebirges über der Stollennachse und der Lauf des Spreubaches sind in gleicher Weise auf die Profilebene projiziert. Der Längsschnitt des Baches ist daher nicht der wirkliche. Doch die Stufen und flachen Bodenstrecken sind auch in der Natur sehr gegensätzlich ausgeprägt. Geologisches: 1. Kreideschiefer. 2. Aptychenkalk, Tithonkalk. 3. Lias-Fleckenmergel und -Hornsteinschichten. 4. Lias-Adnether Kalk. 5. Oberrät. Dachsteinkalk. 6. Kössener Schichten. F: Formarinbruch. 7. Plattenkalke. 8. Hauptdolomit. Grundlagen des Profiles: Unveröffentlichtes geologisches Stollenprofil von H. Ascher. Karte Abb. 65. Handkolorierte geologische Originalaufnahme 1 : 25.000 zur Verfügung gestellt von H. Ascher. Für den Spreubach: Spezial-Isohypsenplan der Bauleitung 1 : 2500.

1 l in der Sekunde. Während des Stollenbaues war die Zahl der Quellen größer, wohl an 200; zur Zeit, als der Stollen einen stationären Zustand der Entwässerung hatte, ergibt das von Ascher veröffentlichte große Stollenprofil (Nr. 2, T. X) nach meiner Zählung das Auftreten von 171 Quellen. Über den Bereich der Herkunft des Wassers ist ein gewisses Urteil möglich. Das Wasser der Quellen kommt aus dem Gebiete über dem Stollen und nordwestlich davon, meist aus der Muldenlagerung der Gesteine. Eine Vorstellung von der ungefähren Größe des Einzugsgebietes bietet die Angabe, daß im Stollen (ohne die Dolomitstrecke) soviel Wasser eintritt, als auf 0,75 bis 1 qkm geregnet hat oder auf einem Streifen, der 1740 m lang ist<sup>1)</sup> und 430 bis 570 m

<sup>1)</sup> Das ist die Hauptstrecke des Stollens.

Breite hat. Rechnet man mit einem Abflußfaktor von 80%, was eher zu hoch ist, so erhält der Stollen ohne die Dolomitstrecke den natürlichen Abfluß von 0,9 bis 1,3 *qkm* oder von einem Streifen mit der Länge 1740 *m* und 520 bis 750 *m* Breite.<sup>1)</sup> Ist somit eine erste Einsicht in das Zuzugsgebiet der Quellen gewonnen, so kann sie ergänzt werden durch das, was man über den weiteren Weg des Wassers feststellen konnte. Der Stollen führt alle Wassereintritte künstlich nahe dem Westende zutage und hat dadurch deren natürlichen Weg so ziemlich umgekehrt. Denn der Durchschlag der Gebirgsstrecke brachte die Quellen im E, am Grapsboden zum Versiegen. Eine nicht ganz wasserdicht zu haltende Stollenausmauerung<sup>2)</sup> genügte, um die meisten dieser Quellen wieder zum Fließen zu bringen. Die geologischen Verhältnisse sind im Stollen wegen der Faziesänderungen innerhalb der Altersstufen und östlichen Störungen nicht so einfach und sind im einzelnen dem linken Rand der statistischen Tafeln zu entnehmen. Diese zeigen auch genau die Wasserverhältnisse an, und zwar faßt die eine Tabelle die Gesteine Kalk und Dolomit, die andere die mergelig schieferigen Gesteine zusammen. Die Stollenmeter erlauben, die wirkliche Reihenfolge wiederherzustellen. Sie sind vom Seeinlauf aus gezählt. Die Tabellen sind größtenteils eine statistische Auswertung des von Ascher veröffentlichten großen Stollenprofils (100 × 60 *cm*). Das erste Bemerkenswerte ist, daß die Kalke den Mergeln durchschnittlich an Reichtum der Wasserführung gar nicht überlegen sind. In 479 *m* Kalkgestein tritt alle 7,1 *m* je eine Quelle auf, in 563 *m* Mergelgesteinen (ohne die Kreideschiefer) alle 5,5 *m* eine Quelle. In den Kreideschiefern gab es auf 218 *m* Länge allerdings nur zwei Quellen, ihre Dichte würde sich unter Zuziehung der Quellen im benachbarten Seegrund vergrößern. Am wenigsten Quellen hat aber der Hauptdolomit geliefert, nämlich auf 570 *m* nur eine. In ihm liegen größtenteils die natürlichen Quellen am Grapsboden. Fehlen der Quellen im Stollen bedeutet aber keineswegs immer Undurchlässigkeit des Gesteins. Vielmehr ist auch noch das Auftreten von Tropfenfall, ausgeschwitzter und träufelnder Feuchtigkeit zu beachten. In dieser Form ist besonders der Hauptdolomit auf zerklüfteten Strecken durchlässig. Und zwar geht das Wasser sehr rasch durch ihn hindurch. Stark zerklüftet sind im Dolomit etwa 200 *m*, mäßig zerklüftet 100 *m*, in je zwei Teilstrecken. An den klüftigen Stellen treten trotz 80 bis 120 *m* Überlagerung die Niederschlagswässer schon nach 3 bis 5 Stunden in den Stollen ein. Wegen der Durchlässigkeit der Dolomitsohle bedurfte es keiner Abzugsanlage.<sup>3)</sup> Viele Klüfte sind mit Kalk- oder Dolomitspat verheilt, viele sind offen und dann meist mit einem sehr feinkörnigen Mergelstaub ausgefüllt, der bei Wasserzutritt zusammenklebt. Diese Schmierlassen erreichen bis zu 5 *cm* Mächtigkeit. Außerdem zeigte dieser Hauptdolomit andere Eigenschaften,

<sup>1)</sup> Diese Ergebnisse stützen sich auf die Abflußmengen aus dem Stollen im Jahre 1923; die Kurve Aschers habe ich planimetriert und ohne die Dolomitstrecke 83 Sekundenliter Abfluß als Jahresdurchschnitt erhalten. Gestützt auf die veröffentlichte Niederschlagshöhe von 3207 *mm* am Spullersee im vorangegangenen Jahr 1922 rechnete ich oben diese Zahl erfassend mit 2500 bis 3500 *mm* Niederschlag und festem Ausfluß aus dem Tunnel. In Wirklichkeit müssen die erforderlichen Flächen in engeren Grenzen schwanken, jedenfalls über 1 *qkm* der Oberfläche betragen.

<sup>2)</sup> Später wurde ein Rohr in den Stollen eingebaut.

<sup>3)</sup> Daher wurde in den vorangegangenen Berechnungen ausdrücklich von dem Wasserdurchfluß im Dolomit abgesehen.

die die Legung eines Rohres nötig machten. Hier ist besonders wichtig, daß seine Wandungen bei Innendrücken von 2 bis 4 Atmosphären rissen. Die Risse öffneten sich bei Unterdrucksetzung der Versuchsstollen und schlossen sich bei deren Entleerung zu kaum erkennbaren Haarrissen. Tropfwasser, und zwar längere Zeit anhaltendes, kommt auch in quellenreichen Strecken der Kalke des Oberrhätts (Dachsteinkalk), der Kössener Schichten und in deren Mergeln während der nassen Jahreszeit in beträchtlicher Menge, in geringerer, aber sehr ungleicher Stärke auch in allen anderen Gesteinen des Stollens vor. Durch Trockenbleiben des Felsens, von den Quellen abgesehen, zeichneten sich besonders lange Strecken der Kreideschiefer und hinwiederum der Adnether Kalk des Lias aus. Kehren wir zu dem Vergleich zwischen den Kalken und Mergeln zurück. Die Dichte der Stollenquellen ist in den Mergeln, trotz einiger Schiefereinlagerungen in den Kössener Schichten, größer als im Kalk; die Stärke, zu der die Quellen im Laufe des Jahres anschwellen, ist im Kalk auch nicht gerade sehr überlegen.

In Teilen der Gesamtzahl innerhalb jeder Gesteinsgruppe sind

	stark > 1 l/sek	mittel 0·5—1 l/sek	schwach < 0·5 l/sek
von den Kalkquellen	21 %	7,5 %	71,5 %
von den Mergelquellen	15 %	29 %	56 %

Bild 10 zeigt eine „starke“ Quelle dieses Stollens. Nur weil unter den starken Quellen einige von 2 bis 12 l/sek vorkommen, während die anderen Abstufungen sich in den Grenzen von halben zu halben Litern halten, ergibt sich eine bescheidene Überlegenheit des Kalkes bei den stärksten Quellen von etwas über 50%, während er bei den mittleren sehr stark unterlegen ist und gerade bei den schwachen wieder etwas überwiegt. Die Löslichkeit des Kalkes hatte also hier durchaus nicht die allgemeine Erweiterung der wasserführenden Hohlräume zur Folge, mit der sich so leicht gegen die Bedeutung der ursprünglichen Hohlraumunterschiede deduzieren läßt. Wir werden vielmehr noch die fugenversperrende Sinterbildung in diesem Stollen 100 bis 200 m unter der Oberfläche als die maßgebende Folge der Löslichkeit kennen lernen. Im allgemeinen ist zu sagen, daß die Durchlässigkeit des Mergelgebirges von derselben Größenordnung ist wie die des Kalkgebirges und daß der Hauptdolomit in seiner besonderen Art gar nicht zurücksteht. Das paßt sehr gut zu den Erfahrungen mit den Mergeln im Donau- und Aachgebiet der südwestlichen Rauhen Alb. Immerhin kann man am Spullersee nicht einmal örtlich von einer relativen Undurchlässigkeit der Mergel sprechen. Die längste Mergelfolge ohne Quellen ist etwa 140 m lang, die längste Kalkfolge ohne Quellen 254 m. Diese Tatsachen darf man freilich auch nicht verallgemeinern. Immerhin darf man alle Annahmen undurchlässiger Mergel oder Dolomitgesteine in verborgenen Faltenkernen des Kalkes ohne besondere örtliche Gründe mit noch mehr Recht als bisher den bloßen Verlegenheits-hypothesen zurechnen, die eine Karsttheorie entwerfen, die sich, wie es geschehen ist, darauf stützen muß. Daran ändert es nichts, daß die Wasserführung der Mergel hier größer ist als sonst, weil sie durch die Überlagerung mit Kalken wahrscheinlich verstärkt wird. Die geringe und selbst fragliche Überlegenheit der Kalke in bezug auf Durchlässigkeit ihres Gebirgsanteiles bedarf hingegen eines Erklärungsversuches. Nicht wenige dieser Kalke sind ungeschichtete

Riffkalke. Zugleich ist, wie Ascher berichtet, das ganze vom Stollen durchfahrene Kalkgebiet eine Riesenbreccie. Der Dolomit ist streckenweise viel feiner zerhackt, ja zermahlen. Die Verschiebungen in jener Riesenbreccie sind meist nicht groß, oft nur wenige Dezimeter, durchsetzen jedoch das Gebirge nach allen Richtungen und zerlegen es in unregelmäßige Blöcke jeder Größe. Eine solche mechanische Durchklüftung kann auch dem Riffkalk enge Hohlräume verleihen, die ihm mangels der Schichtfugen sonst abgehen, aber es hat das wenig bedeutet. Vielmehr bestätigt die — man möchte sagen geringe — Durchlässigkeit dieser Kalke im Vergleich zu anderen, daß die karsthydrographische Wirksamkeit von Fugen und Rissen um so geringer ist, je mehr es sind, weil sie dann eng zu sein pflegen.<sup>1)</sup> Und alle Kalke des Stollens waren nicht so elastisch gegenüber den Beanspruchungen, denen sie unterworfen wurden, daß sie trotzdem im Inneren weite und bedeutende Hohlräume aufrecht erhalten hätten. Selbst kleine Höhlen sind in einer so durchbewegten Trümmerpackung nur ausnahmsweise zu finden. Und zwar verraten der Dachstein- und der Adnether Kalk auch in diesem Stollen ihre vorzüglich die Verkarstung fördernden Eigenschaften, indem zwischen Stollenmeter 500 und 530, wo der Liaskalk in das Oberrhät unter starken Zerreißen eingepreßt ist, eine Gruppe von offenen runden Kaminen oder Schloten von 0,5 bis 1,0 *m* Durchmesser angefahren wurden und indem der Dachsteinkalk auch bei Stollenmeter 659 einen runden Kamin von  $0,6 \times 1$  *m* Querschnitt aufweist. Jene Gruppe führte beim Vortrieb viel Wasser und war dabei größtenteils lehmefüllt. Auch nach dem vom Durchschlag geschaffenen stationären Zustand kamen aus dreien dieser kleinen Höhlen zwei starke und eine schwache Quelle hervor.

Weiter in die hydrographischen Besonderheiten der einzelnen Gesteinsarten innerhalb der geologischen Stufen einzugehen, hat keinen Zweck. Wer näheres von den örtlichen Verhältnissen zu wissen wünscht, sei auf die Tabellen A u. B verwiesen und auf H. Aschers großes Stollenprofil, das ja durch diese Tafeln nicht ersetzbar ist, die ihrerseits eine statistische Ergänzung bilden. Überhaupt kann durch Verallgemeinerung der Beobachtungen in diesem Stollen nichts bewiesen werden, sondern er bietet als ungewöhnlich großer und gut studierter Aufschluß nur die Gelegenheit, früher bewiesene Lehren an einem bestimmten Falle zu prüfen und dadurch den Wert jener Beweise zu erhöhen. In einzelnen Fällen, wo die Zahl bloßer Wahrscheinlichkeitsgründe zu klein erschien, wurde auch vorgreifend auf diesen Abschnitt verwiesen.

**§ 113.** Was die einzelnen Wasserbahnen betrifft, so unterscheidet die Tabelle zwei Arten nach der Entstehung der Hohlräume: 1. Verwerfungen und 2. Schichtfugen und zwei nach dem Aussehen der Hohlräume als 3. Kalzitbanden und 4. unbedeutende, nicht weit verfolgbare Fugen. Über die Entstehung der beiden letzten ist damit nichts ausgesagt, sie können Zerreißen, kleine Verwerfungen, ausgefüllte oder sonst undeutliche Schichtfugen sein. Aschers Profil hingegen unterscheidet a) Verwerfungen, b) Kalzitbanden, c) Schmierlassen, die aber keine Quellen liefern, sondern höchstens die Wasserbahnen im Hauptdolomit bilden, und

<sup>1)</sup> Damit nehmen diese Kalke jene teilweise karsthydrographischen Eigenschaften an, die ich 1924 beim Dolomit in Verbindung mit der oft auffallend größeren Sprödigkeit des Felsens brachte. (Nr. 44, S. 741.) Vgl. § 15.

faßt schließlich in einer Legende Schichtung und Klüftung zusammen. Aus dieser Zusammenfassung habe ich mir erlaubt, längere zweifellose Schichtfugen abzusondern, betone jedoch, daß Ascher auch dasjenige größtenteils als Schichtfugen ansieht, was auf den statistischen Tafeln als unbedeutende, nicht weiter verfolgbare Fugen neben ihnen aufgeführt ist. Hingegen scheinen unter den Kalzitbanden, wie mich die Prüfung des Profiles lehrte, wenn man von den Kreideschiefern absieht, die Zerreißungen durch die Schichten hindurch stark zu überwiegen. Von allen Arten dieser Hohlräume entsendet nur ein Teil Quellen, die anderen entlassen zeitweise Tropfwasser oder gar nichts. Sowohl in den reinen Karbonatgesteinen als auch in den Mergeln und Schiefen kommt die relative Mehrheit aller Quellen aus Verwerfungen; zusammen mit den Kalzitlassen entsenden sie die absolute Mehrheit der Quellen. Die sicheren und wahrscheinlichen Schichtfugen vereint sind also nicht von solcher Bedeutung. Wie die Tafel B hervorhebt, wird die einzige Quelle im Hauptdolomit von einer Bruchspalte gespeist; aber 29 solcher Bruchspalten liefern keine Quelle. Überhaupt ist hier auf die Anmerkungen in den Tabellen zu verweisen. Die Schichtfugen treten als Wasserspender in diesen Kalken stark zurück, noch mehr in Kreideschiefern und Liasmergeln, während sie in den nachgiebigen und gepreßten Kössener Schichten sogar die absolute Mehrheit der Quellen liefern.

Die Quellen, bzw. Wasserbahnen aus Kalzitlassen dürfen als absterbend angesehen werden, soweit die Sinterbildung fortschreitet. Sehr groß ist schon die Zahl der mit Sinter verheilten Fugen. Als solche sind besonders die zahlreichen weiß ausgefüllten Schichtfugen in den „dunkeln, äußerst feinkörnigen mergeligen Tonschiefern“ der Kreide hervorzuheben. Hier darf die Frage gestellt werden, ob dieser Kalzit nicht größtenteils von Wässern eingeführt wurde, die sich in den Kalken an der Oberfläche damit beladen haben und von da auch oberflächlich zu den Tonschiefern abfließen, ehe sie in deren Fugen eindringen. Ebenso ist der Lehm in den Lagen des Hauptdolomites und in den Schloten des Dachsteinkalkes schwerlich Lösungsrückstand, sondern entstammt eher den Kössener Schichten, die das Wasser der Oberfläche damit beluden, ehe es in die Hohlräume der Karstgesteine geriet.

§ 114. Die in diesem Abschnitt bisher vorgeführten Beobachtungen zeigten uns, worauf man unter Umständen in Karstgesteinen gefaßt sein muß. Das ergibt eine Gelegenheit, nun die Gesamtentwässerung des Stollengebietes nach den Gesichtspunkten des vorigen Abschnittes richtig zu bemessen und zu erläutern.

Das Gebirge hat eine ungemein reichhaltige periodische Kluftwasserführung, die man in den löslichen Gesteinen als Karstwasserführung zu bezeichnen hat. Die wenigen Spuren eines Höhlenkarstes in Gestalt sehr bescheidener Schlotte sind das einzige Merkmal in der Ausbildung der unterirdischen Entwässerung vor Beginn des Stollenbaues, das dem gewöhnlichen Karst und nur ihm eigen ist. In der Hauptsache liegt eine zeitweilige Karstentwässerung vor. Die schneeigen Niederschläge und die Kälte ließen auch vor dem Stollenbau die Quellen am Grapsboden versiegen. Mit Ausnahme von zwei Quellen im Stollen hört die ganze übrige Wasserführung monatelang auf und sie tut es bis zu den versiegenden Quellen des Grapsbodens 35 m tiefer als die Stollensole. Aber eben jene zwei ganzjährigen unterirdischen Wasseradern beweisen, daß die vielen Wasserbahnen untereinander nicht allseitig Zusammenhang haben. Das Sinken der übrigen Wasserinhalte zieht diese

beiden Gerinne nicht mit hinab. Auch bezüglich der vielen periodisch verschwindenden Wassereintritte steht deswegen zwischen ihnen keineswegs jener Zusammenhang fest, der etwa in Schottern das Grundwasser beherrscht. Auch sonst ist die Verschiedenheit zwischen diesem Gebirge, das so reich ist an fein verteilten Gewässern, und dem Grundwasser in Lockermassen sehr groß. Ein Stollen, der durch ein Schottergrundwasser getrieben wird, und zwar erheblich höher als Quellen, die daraus gespeist werden, kann ihnen nur einen kleinen Teil des Zuflusses entziehen. Unter ihm wird noch viel Wasser zu den Quellen strömen. Hier aber versiegten 30 bis 35 m tiefer alle natürlichen Quellen infolge des Stollenbaues und weil dann die Ausmauerung nicht ganz dicht war, erschienen nur die meisten wieder. Dieses Karst- und sonstige Kluftwasser erfährt also auf einer mindestens 1000 m langen Strecke (nach Abzug der Kreideschichten und des Hauptdolomites) eine auffällige enge Zusammenfassung. Unter dem Stollen hindurch gelangte kein Wasser zu jenen Quellen. Und vor seinem Bau war das nur in dem Maße der Fall, als das durch die Stollensohle emporsteigende Wasser damals nach unten bewegt wurde. Anderes, von diesem künstlich bewirkten Auftrieb nicht betroffenes Kluftwasser war und ist in merklichem Maße unter der Stollenhöhe entweder gar nicht vorhanden gewesen oder kam nicht zu den bekannten Quellen am Grapsboden. Im zweiten Falle müßten wir unter dem Stollen ein ganz hypothetisches Karstwasser auf abgesonderten Wegen annehmen, obwohl die Muldenlagerung da der Phantasie wenig Raum läßt. Jedenfalls hat das Karstwasser hier auch nach H. Aschers Überzeugung von Schicht zu Schicht bei weitem nicht überall gegenseitige Verbindungen. Sind wir also sehr entfernt von Analogien mit Grundwasser in Lockermassen, so hat dieser große Aufschluß uns wieder einmal gezeigt, daß Höhlenflüsse mit Einschaltungen durchströmter Siphonröhren nicht als theoretisches Grundgerüst der Karsthydrographie alle anderen Erscheinungen aufhellen. Bemerkenswert ist das Verhalten dieses Geäders und vielleicht teilweisen Geflechtes nahe benachbarter Karstgerinne beim Wiedererscheinen im Frühling. Die meisten Wasseradern gelangen mindestens zur Zeit der größten Stärke dazu, die dem Stollen benachbarten Klüfte und Röhren jeder Form auszufüllen und werden damit Druckgerinne. Die Schneeschmelze ruft sie ins Leben, aber die großen Mengen des Wassers belehren uns, daß nicht alles Wasser unmittelbar aus einem wenige Meter breiten Bereich über dem Stollen kommt, sondern daß viel von diesem Wasser bereits einen Weg mit horizontaler Komponente von einigen hundert Metern zurückgelegt hat. Das am schnellsten in den Stollen eintretende Wasser stammt höchstwahrscheinlich aus dem unmittelbar über ihm liegenden Fels und Gelände, aber außerdem ist auch eine passive Hebung der Wasserstände und einzelnen Spiegellagen durch Zustrom aus größerer Entfernung nicht abzulehnen. Wieviel Wasser aus größerer Entfernung die horizontale Komponente seines Weges zum Stollen oberirdisch zurückgelegt hat, ist unbekannt. Deswegen darf man diese Möglichkeit aber nicht einfach vernachlässigen. Es war nicht Sache der Erbauer des Kraftwerkes, es war wohl auch gar nicht möglich, genau zu verfolgen, welchen Anteil das Eindringen von oben und welchen die passive Spiegelhebung an der Tatsache des periodischen Wiedererscheinens der Quellen im Stollen hat. Es wurde diese Frage natürlich auch nicht im Hinblick auf die Grapsbodenquellen geprüft. Aber alles, was bekannt ist, steht in keinerlei Widerspruch zum vorigen

Abschnitt; es fällt in mehr als einem Punkt gegen die Absonderung eines Sickerwassers vom Karstwasser ins Gewicht, weil sich das sogenannte „Sickerwasser“ vielmehr als Teil des Karstwassers erwiesen hat, der nicht weniger Bedeutung hat als ein großer Höhlensee oder ein unterirdisches Sohlengewässer.

### V. Zusammenfassung.

§ 115. Der größtenteils durch unterirdische felsige Hohlräume erfolgende Abfluß im Karst entwickelt sich in leicht löslichen Gesteinen, sobald darin folgende Arten ursprünglicher Hohlräume vorhanden sind oder tektonisch entstehen: 1. Weite Urhöhlen, deren Durchmesser die Größenordnung von Metern haben. 2. Überkapillare und großkapillare Fugen und Röhren. Ihre Weite bemißt sich nach Zentimetern, die untere Grenze liegt bei einigen Millimetern. Damit ist die Größenordnung der karsthydrographisch wirksamen Hohlräume angegeben (vgl. § 10 ff.). Das Vorhandensein viel engerer bis mikroskopisch feiner Fugen ist weder hinreichend noch notwendig, daß ein Karstabfluß entstehe. Daran ändert auch die Löslichkeit der Karstgesteine nichts. Denn erst muß das Wasser in merklichen Mengen eindringen können, ehe es merklich löst, und zweitens darf es durch Sinterabsätze dem Durchfluß die Wege nicht verschließen, die es auf anderen Strecken erweitert hat. Diese Bedingungen sind aber gefährdet, wenn die Hohlräume von Anfang an zu eng dafür waren, daß das Wasser sie ungesättigt wieder verlassen kann, wobei natürlich die wechselnde Länge des erforderlichen Weges die Angabe bestimmter Durchmesser verbietet.

Die Karstentwässerung stammt also zeitlich weder von kapillaren Saugwirkungen noch von gleitenden Druckbewegungen ab, die sich in ausgebreiteten Systemen kapillarer Engen vollziehen. Die leichte Löslichkeit der Gesteine des Karstes hat eine wichtige Bedeutung nur im Bunde mit den karsthydrographisch wirksamen Hohlräumen. Aus nicht aufgeklärten Gründen ist die Anordnung dieser Hohlräume in allen bisher untersuchten Karstgebieten<sup>1)</sup> folgendem Gegensatz unterworfen: Vielen Schluckstellen des Regens und kleiner Bäche entsprechen sehr wenige Quellen, den Flußschwinden hingegen in einem Großteil der untersuchten Fälle mehrere Wiederausflüsse. Die leichte Löslichkeit der Karstgesteine hat zur Folge, daß das Wasser die ursprünglich bedeutenden Größenunterschiede zwischen Urhöhlen und engen, aber karsthydrographisch wirksamen Urhöhlen ausgleicht. Dieser Ausgleich beeinflußt wieder die Fließvorgänge. So wird eine Urhöhle, in die einst der Eintritt der benachbarten feinen Strömungen nur Tropf- und Triefwasser entsandte, später oft ebenso vollständig durchströmt wie die engeren wirksamen Wasserbahnen. Hierbei hilft der Umstand der karstlithologischen Zusammenfassung der Wasserbahnen mit. Kleinkapillare Fugen, die zwischen hydrographisch wirksamen Hohlräumen und auf dem kürzesten Wege von ihnen zu den Quellen liegen, darf man nicht bestreiten. Von ihnen ist anzunehmen, daß sie wegen der reichlicheren Zufuhr von Druckwasser frühzeitiger Versinterung entgehen und durchgängig chemisch erweitert werden. Sie werden dann großkapillar. Während sie vorher für das Wasser nur wegsam waren, werden sie damit ebenfalls karst-

<sup>1)</sup> Mit Ausnahme gehobener Korallenriffe, wo die Entscheidung noch aussteht.

hydrographisch wirksam. Daß diese „Auslese“ möglich ist, beruht nur auf dem Vorhandensein der Urhöhlen und größeren Urklüfte und -röhren in der nächsten Nachbarschaft; es handelt sich also dabei um eine Funktion der Lage.

Die unterirdischen Wasserbahnen eines Karstabflusses in ihrer Zusammenfassung bilden oft geradezu baumartig verzweigte Riesengefäße. Mit diesem Begriff wird nicht notwendig das Vorhandensein großer Höhlen, sondern die Beschränkung sehr weithin verzweigter Hohlräume auf wenige Ausflußmöglichkeiten verstanden. Wenn in vielen Fällen des Karstabflusses in der Literatur von Analogien gesprochen wurde und wird, so ist die Analogie einer Karstentwässerung mit allen anderen Arten des natürlichen Abflusses viel geringer und seltener als mit dem Ausfluß aus einem weiten Gefäß, das eine relativ kleine Öffnung hat. Ein solches Gefäß muß nicht die oft gezeichnete Zylinderform haben. Vom Standpunkte des hydrostatischen Paradoxons kann es sogar ein filigranartiges Röhrenzweige vorstellen. Hydromechanisch freilich ergeben sich beim Abfluß durch Röhren und Röhrrchen die vielfach hervorgehobenen Unterschiede. Deswegen wird ja auch nur von einer allerdings häufigen Analogie mit weiten Gefäßen gesprochen. Die unterirdischen Riesengefäße sind also selbst aus feinen und weiten Röhren und Spalten jeder möglichen Form und Größe zusammengesetzt. Keine Phantasie ermißt alle Krümmungen, Ecken, Querschnittsänderungen und alle Verflechtungen und Verknüpfungen der wechselvollen Teilstücke dieser Riesengefäße.

§ 116. Die Quellen und Wiederausflüsse sind die verhältnismäßig wenig zahlreichen Ausflußstellen dieser Gefäße. Die einfacher gestalteten Einzugsgebiete, besonders jene mit verhältnismäßig großen Öffnungen an den tiefsten Stellen entleeren sich in der Pause zwischen zwei Regenfällen mehrmals im Jahre, ehe sie sich wieder mehr oder weniger anfüllen. Sie entsprechen jener Analogie am wenigsten oder gar nicht. Andere Hohlraumgefäße, besonders jene mit weniger weiten Ausflüssen an den tiefsten Stellen entleeren sich vielleicht nur in sehr trockenen Jahren. Es kann aber bei ausreichend häufigen Niederschlägen eine Karstwasserbewegung darin ständig aufrecht bleiben, auch wenn ein beträchtlicher Ausfluß an der tiefsten Stelle des Gefäßes liegt. Diejenigen Karstwassergefäße, die man als ständig durchflutet bezeichnet, müssen mit der Erweiterung der Ausflußöffnungen und der inneren Einschnürungen eine starke Änderung ihres Durchflusses erfahren. Es kommen Zeiten, in denen sie jährlich einmal oder mehrmals so leer laufen, als es irgend möglich ist, d. h. bis zu dem Niveau der tiefsten Quelle. Hohlräume, die noch tiefer liegen, bleiben wassererfüllt. Ihre Füllung wird in diesem äußersten Fall zeitweilig ruhen. In berechneten Gebieten scheinen die Zeiten von einem Niederschlag zum nächsten zu kurz zu sein, daß es häufig dahin kommt. Mir ist kein sicherer Fall solchen Stagnierens unter aussetzenden Quellen bekannt geworden. Jede neue Krustenbewegung verjüngt das System des Karstabflusses wieder, d. h. sie schafft neue noch unerweiterte Engen und Ausflüsse. Über diesem Karstwasser der Tiefe gibt es nun das jedesmal vom Niederschlag hervorgerufene zeitweilig eindringende Karstwasser. Sobald es die Luft verdrängt und den Anschluß ans untere gefunden hat, erfassen Druckströmungen auch das ständige Wasser unter dem Quellniveau, selbst wenn es beinahe oder ganz schon stagniert und zwingen es, zu den Quellen aufzusteigen. Je weiter ein unterirdisch verzweigtes Riesengefäß im Vergleich zu

den Ausflußöffnungen ist, desto langsamer rücken die periodischen Entleerungen zum Quellniveau hinab. Diesem Zustande ganz nahe ist das Karstwasser zwischen der Punkvaquelle in Mähren und dem 400 *m* dahinterliegenden Einsturzschaft Macocha, denn zwischen dem Spiegel des Unteren Sees am Grunde der Macocha und der Punkvaquelle besteht gewöhnlich kein merklicher Höhenunterschied mehr. Für die Fälle, wo Quellen tiefer liegen als die tiefsten durch sie Wasser abgebenden Hohlraumteile, lassen sich naturgemäß schwer sichere Beispiele beibringen. Denn selbst das periodische Aussetzen der Quellen ist dafür kein zwingender Beweis, es sei denn, er werde durch örtliche Gründe geologischer Art verstärkt. Gleichwohl ist es nötig, daß eine umfassende Theorie die Möglichkeit dieses Falles nicht aus dem Auge verliert.

§ 117. Die Verkarstung einer Gegend besteht also darin, daß ein merklicher Teil des Abflusses die oberirdische Bewegung einstellt und zur Füllung der durchfluteten Gefäße beiträgt. In normal erodierten Landschaften tritt dies sinnfällig dadurch in Erscheinung, daß bei allmählicher Verkarstung die vollkommenen Bach- und Flußschwinden sich in Rucken talaufwärts verlegen, die Quellen talabwärts.<sup>1)</sup> Schließlich gibt es zwischen beiden nur noch periodische Wasserläufe, weil auch die Quellen nicht mehr ständig fließen. Wird ein Karstgebiet stark disloziert, so kann die Verkarstung verhältnismäßig rasch das zerbrochene Relief erfassen. Ein und dasselbe Wasser kann mehrmals verschwinden und anderwärts wieder erscheinen, wobei es geschlossene Wannen zeitweilig überfluten kann. Dies geschieht in einem Teil der Poljen. Etwas allgemeines läßt sich nur über die Poljen sagen, an denen man eine Zu- und Abflußseite unterscheiden kann. Alle näher untersuchten Poljen sind von dieser Art. Hiebei konnte bisher nur sichergestellt werden, daß der Zudrang periodischer Quellen auf der Zuflußseite und die Wasserabgabe von Wechselschlünden die Überschwemmung heranzuführt. Jene periodischen Quellen sind entweder einem aktiven Andrang frischen Regenabflusses ins Innere zuzuschreiben oder der passiven Druckspiegelhebung, wenn die Niederschläge weiter weg fallen. Oft wird eine strenge Trennung nicht möglich sein. Die Wechselschlünde allerdings heben stets auch Druckwasser empor, das nicht dem unmittelbaren Andrang von Regenwasser an Ort und Stelle zuzuschreiben ist. Der Fall, daß die gewöhnlichen Schluckschlünde auf der Abflußseite der Poljen sich in Wechselschlünde verwandeln, ist bisher nicht durch Beobachtung erwiesen, er soll aber als Möglichkeit für einzelne Poljen nicht abgeleugnet werden. Wo Dolinen zeitweilig unter Wasser kommen, ist dies in den wenigen untersuchten Fällen auf passiven Spiegelanstieg in den darunterliegenden Gefäßteilen zurückzuführen (vgl. § 91). Dauernd überschwemmte Poljen und Dolinen haben stets den Druck ihrer Füllung nötig, damit der Abfluß im Gleichgewicht mit dem Zufluß sei. Jede Spiegelschwankung, sowohl ständiger wie periodischer Seen zeigt eine Störung des Gleichgewichtes zwischen Zufuhr und Abfuhr an.

§ 118. Genau dasselbe ist der Fall mit den Spiegelständen in den höchsten Teilen der vielverzweigten unterirdischen Wassergefäße. Nur daß im Vergleich zum kleinsten Karstsee am Tage die Spiegelflächen in der Tiefe fast alle noch viel kleiner

<sup>1)</sup> Darauf hat schon Cvijić hingewiesen. Das Aufwärtsrücken der Flußschwinden in wenigen Jahrhunderten ist im westfälischen Karst oberhalb Paderborns belegt.

sind. Dementsprechend sind bei Unregelmäßigkeiten des Zuflusses ihre Spiegelschwankungen auch viel heftiger und sind wegen der verschiedenen Querschnitte und Widerstände des Abzuges selbst in engem Umkreis keineswegs von gleicher Größe. Das heißt, es gibt in jedem Karstwassergefäß eine Vielheit von Spiegeln, die nur unter besonderen Umständen eng benachbarte Höhenlagen einhalten können. Sind aber unterirdische Karstwassergefäße ohne gegenseitige Verbindung durch überkapillare Strömungen, welche schon eine kluftarme Kalkpartie ohne wirksame Hohlräume verhindert, so betragen die Unterschiede der Spiegelstände beiderseits der kluftarmen Gesteinsmasse leicht mehrere Atmosphären. Denselben Einfluß können Lehmverstopfungen haben.

Die unterirdischen Fließweisen des Karstwassers sind zwar nach keinerlei Hauptschema räumlich zu sondern. Sie umfassen vielmehr über und nebeneinander alle physikalischen Bewegungsarten des Wassers, je nach Form und Größe der Querschnitte und je nach dem Maß der Erfüllung in den Teilen der vielgliedrigen Hohlraumgefäße. Ein zeitlicher Wechsel der verschiedenen Fließweisen ist ebenfalls an den Höhlenformen wiederholt festgestellt worden. Er hatte gerade dort große Bedeutung, wo das unterirdische Gefäß bereits in seinen heute zugänglichen Teilen ein weitverzweigtes Höhlenreich mit riesigen Ausmaßen<sup>1)</sup> darstellt. Die Quellöffnungen der durchschnittlichen und auch der häufigen Größen bieten einem solchen Gefäß nur verhältnismäßig enge Ausflußquerschnitte, die sich aber im Laufe der Zeit ebenso wie die Einschnürungen des Inneren erweitern. Die daraus abzuleitenden zeitweiligen Entleerungen und Wiederauffüllungen, wo früher ständig Wasser war, sind nicht ohne gleichzeitige Veränderungen der Fließweisen denkbar. Jede sehr enge Quellöffnung, jede starke Einschnürung im Inneren nach einem weiten Raum läßt sich zunächst mit einer Ausflußstelle unter hydrostatischem Druck vergleichen, den man in jedem Laboratorium sieht. Der Ausfluß unter hydrostatischem Druck ist in weiten unverzweigten Gefäßen eine gleitende oder laminare Bewegung, bis auf die Drehung unmittelbar über der Ausflußöffnung. Diese Öffnung kann auf zweierlei Art ihre Enge im Vergleich zur Wasserfüllung verlieren, entweder, weil sie erweitert wird oder weil nur noch wenig Wasser in dem weiten Gefäß vorhanden ist. Besonders im ersten Falle ergreift nach Überschreitung einer meines Wissens rechnerisch noch nicht erforschten Grenze eine wilde Turbulenz die Füllung des weiten Gefäßes, das sich durch das zu große Loch heftig und schnell entleert. Im Karstinneren ergibt sich also in einem relativ weiten, einfachen Raum über einem engen Ausfluß, daß ursprünglich darin eine so gut wie laminare Bewegung herrschte, die mit der Erweiterung des Abzuges aufhörte. Da diese Erweiterung allmählich erfolgt, würde die Füllung ohne Nachschub still auslaufen, aber weil eindringendes Wasser immer wieder nachfüllt, so wird die Bewegung in dem weiten Raum nach mancher Spiegelschwankung einmal turbulent werden müssen. Verfolgen wir diese Entwicklung näher. Wie wir schon wissen, ist die Form des verhältnismäßig weiten Gefäßes beim Ausfluß unter hydrostatischem Druck nach dem bekannten sogenannten Paradoxon gleichgültig. Wir haben darum in Gedanken auch eine zu-

<sup>1)</sup> Als solche meine ich z. B. Ausmaße beliebig gerichteter Verzweigungen von 1 km Luftlinie aufwärts.

sammenhängende Kuppelung verschiedener kommunizierender Röhren in die Rolle des weiten Gefäßes versetzt. Dies hatte schon die Rücksicht auf die Karstquellen verlangt, welche solche Kluft- und Röhrengeflechte entleeren. Auch ein relativ weites Röhrengeflecht wird als Gefäß bei genügender Enge des Ausflusses wirbellos und still unter hydrostatischem Druck durchflossen. Weil aber die Röhren sehr rauh sind, Krümmungen und Querschnittsunterschiede aufweisen, so wird der Ausfluß relativ viel enger sein müssen als bei einer Wanne, wenn ein streng wirbelfreies Fließen aufrecht bleiben soll. Man kann sich denken, daß der Ausfluß sogar im Vergleich zu jeder einzelnen Röhre mit durchschnittlichem Ausmaß, die ein Teil des Gefäßes ist, eng genug sein muß, um in ihr allein ein laminares Fließen zu sichern.

Ob aber diese Bedingung wirklich streng erfüllt sein muß, kann ich nicht angeben. Die häufigsten Quellöffnungen sind wohl eng im Vergleich zu den Höhlenweitungen im Inneren, aber wohl nicht eng im Vergleich zum Durchschnitt aller Hohlräume. Auch dies genügt, um der laminaren Fließbewegung ursprünglich in den Riesengefäßen eine weitverbreitete Vorherrschaft zu sichern, unter der aber an gewissen Stellen einfache ruhige Drehbewegungen nicht ausgeschlossen werden dürfen. Werden die Ausflußöffnungen allmählich erweitert, wie auch die engen Röhrenteile im Inneren, so kann in dem Riesengefäß nicht so schnell eine allgemeine wilde Unordnung des Fließens einreißen wie in einem einfachen weiten Gefäß, in das ein großes Loch geschlagen wird. Daher darf angenommen werden, daß zunächst nur die regelmäßigen Drehbewegungen im Umkreis der engsten Stellen auf Kosten der glatten laminaren Richtungen um sich greifen. Hier ist nun der Anlaß, vom spiralförmigen Fließen zu sprechen. Ich betone, daß ich es nur hypothetisch in diese Entwicklung einordnen kann. Wenn ein weites Gefäß sich sogleich an die Luft entleert, wie eine Wanne, verrät das Geräusch im Abzugsrohr eine ungeordnete Turbulenz. Aber wenn es sich um relativ enge Verbindungsstücke zwischen zwei sehr weiten Räumen handelt und um Ausfluß unter Wasser, so vermute ich, daß bei Überschreitung einer gewissen Geschwindigkeit das spiralförmige Fließen einsetzt. Was hier „relativ eng“ heißt, kann immer noch 1 bis 3 m Querschnitte haben. Das sind Maße, die kein Laboratoriumsversuch bisher kennt, wohl gemerkt in der Rolle „relativ enger“ Verbindungen. Darum wissen wir wohl auch so wenig über das spiralförmige Fließen an Stelle ungeordneter Wirbel und darum findet es so wenig Beachtung, wenn es in bescheidenen Verhältnissen sich über den Ausflußöffnungen alltäglich gebrauchter Becken usw. einschaltet zwischen die laminare Hauptbewegung und den ungeordnet geräuschvollen Röhrenabzug. Das Geräusch ist übrigens nur beim Anfang und Ende der Ausströmung sehr laut.

§ 119. Wenn aber während der hypothetischen Einschränkung des Gleitens in der Gefäßfüllung durch Spiralbewegungen, die schon von Anfang an an gewissen Stellen nisteten, die Erweiterung der Quellöffnungen und Einschnürungen Fortschritte macht, so greift schließlich ungeordnet turbulentes Fließen um sich, und das laminares wird äußerst eingeschränkt auf die stillen Zeiten einer Wasserfüllung unter den tiefsten Quellen, wenn sie diese nur noch mit schwachem Überdruck ernährt. Auch das spiralförmige Fließen wird anscheinend auf wenige Stellen in Schloten, Deckenkolken usw. zurückgedrängt. Die Erweiterung der Quellöffnungen bewirkt eine Vermehrung der Durchflußmengen, selbst wo die Geschwindigkeit

in den erweiterten Einschnürungen nicht die alte geblieben sein sollte, und bewirkt daher auch ein durchschnittliches Sinken der Wasserstände. Zwar werden die ausgelaugten Hohlräume durch Niederschläge und Schneeschmelzen nach jeder zeitweiligen Entleerung immer wieder nachgefüllt, aber mit immer weniger Erfolg. Es beginnt in der geräumig gewordenen Unterwelt das Zeitalter starker Schwankungen aller Druckspiegel mit sinkender Mittellage. Ob es zugleich das Zeitalter maximaler Spiegelschwankungen überhaupt ist, kann man nicht sagen. Denn diese waren gewiß auch groß, als die meisten Hohlräume, besonders im Bereich frischen Zudranges, noch eng waren. Damals aber sanken die Spiegel in den Pausen der Niederschläge nicht so stark hinunter, während sie noch bis zur Oberfläche steigen konnten und dort zeitweiligen normalen Abfluß ermöglichten. Es ist daher wahrscheinlich, daß das Maximum der Spiegelschwankungen in allen Gefäßteilen nicht am Anfang der Entwicklung steht, sondern um die Zeit fällt, da schon stark erweiterte Hohlräume vorliegen. Unter diesen sind es besonders die flach verlaufenden Höhlen, in denen nun die Veränderungen besonders merkbar werden. Ihre Weitungen waren früher stets voll Wasser, die Siphone ruhiger durchflossen. Jetzt aber, wo in diesen vielleicht noch spiralisches, sonst aber ungeordnetes Fließen nicht mehr so enge Querschnitte durchmißt, bleiben die größten Weitungen nicht gefüllt. Sie werden der Herrschaft von Spiegelschwankungen mit sinkender Mittellage unterworfen, d. h. an Stelle der einstigen Druckströmung mit dem Minimum der Geschwindigkeit in der Weitung tritt der seichtere Höhlensee mit weniger langsamem Durchfluß. Schließlich geben die sinkenden Spiegel auch die Siphone teilweise frei. Die tiefsten Höhlenteile füllen Seelein, wenn der Grund undurchlässig ist. Aber nunmehr, da überhaupt viele Hohlräume auch an den Engen nicht mehr ganz erfüllt werden, bilden sich an allen absteigenden, von Druckspiegeln freien Strecken Sohlengerinne aus, echte Höhlenflüsse; sie schneiden Klammen ein oder schottern auf je nach den Gefällsverhältnissen. Der Durchflußsee ist in solchen Riesengefäßen der erste Vorbote einer Entartung der bisherigen unterirdischen Karstentwässerung. Der echte Höhlenfluß und der Tropfenregen durch die Luft der unerfüllten Raumteile verpflanzen also Erscheinungen des oberirdischen Wasserkreislaufes in die Tiefe. Man darf das geradezu als Degeneration der Karstentwässerung in der Tiefe bezeichnen. In diesem Stadium erst werden die so entwickelten Höhlen für den Menschen zugänglich. Aus der Erforschung der „Wasserhöhlen“ läßt sich eine allgemeine Theorie der Karstentwässerung viel weniger leicht und sicher ableiten als aus den Erfahrungen in Höhlen, welche durch Krustenbewegungen eine frühzeitige plötzliche Entleerung aller zugänglichen Teile erlitten haben; in solchen haben die Spuren der sozusagen degenerierten Fließweisen noch nicht die Wirkungen der in viel längeren Zeiten vorher herrschenden Wasserbewegungen mehr oder weniger unkenntlich gemacht. Weil die Höhlen aber ursprünglich kein gleichsinniges Gefälle haben, so werden die Klammen einschneidenden Sohlengewässer meist schon im Inneren das Opfer von Klüften, die sie angesägt haben oder die tektonisch aufreißen. Die Klammen erreichen meist nicht einmal die Eingänge der heutigen Höhlen. Jede Verschluckung eines Sohlengewässers bedeutet einen vorübergehenden Sieg der Druckströmungen in den neu geöffneten Klüften. Aber auch diese gehören noch dem Riesengefäß an, dessen Quellen immer mehr Wasser in der Zeiteinheit entlassen.

Wenn nun starke Regen fallen, können sich zeitweise im Bereich der Sohlengewässer und Durchflußseen wieder Druckströmungen einstellen, welche in den nunmehr zerstörten, daher unruhigen Querschnitten heftig turbulent fließen und sich in den erweiterten Röhren selbst bis zu den Quellen nicht mehr beruhigen. Und nun geht die Entwicklung zu Ende. Es braucht immer größere Wolkenbrüche, immer jähere Schneeschmelzen, damit noch manchmal für immer weniger Tage und Stunden in den Gefäßteilen über den Quellhöhen Druckströmungen sich wiederherstellen. Diese werden immer wilder und übertreffen an ungeordneter Turbulenz sogar die klammeinsägenden Sohlengewässer. Derartige Paroxysmen in einem angefüllten Gefäß mit zu groß gewordenen Löchern teilen sich auch dem Wasser mit, das aus größerer Tiefe zu den Quellen aufsteigen muß und so waren die größten unmittelbar nach Beobachtungen und Messungen gerechneten Geschwindigkeiten von 7 bis 9 *m*/sek der Vaclusequelle zuzuschreiben. Sie dauern nur Stunden und Tage und wiederholen sich nicht einmal alle zehn Jahre.

Die Periodizität im Verhalten aller Karstquellen, die Schwankungen ihres Ertrages erreichen in solchen Fällen den höchsten Grad. Schließlich entsteht in gewöhnlichen Zeiten in allen Hohlräumen mit großem Querschnitt eine Verbindung von Höhlenflüssen mit wenigen Siphonstrecken, deren Tage ebenfalls sozusagen gezählt sind. Und wenn dann nach Einsturz des Höhlendaches ein oberirdischer Karstfluß vorliegt, da und dort vielleicht von Naturbrücken überspannt, so liegt es nur offen zutage, was hydrographisch schon lange in der Finsternis vollzogen war: Das Absterben einer unterirdischen Karstentwässerung.

**§ 120.** Was hier als Entwicklung für ein großes Karstwassergefäß abgeleitet wurde, ist nicht in allen Teilen auch für kleine gültig. Denn im Karst, der keinerlei Schema duldet, können die Quellöffnungen auch von Anfang an zu groß gewesen sein. In solchen Gefäßen treten Sohlengerinne unter Umständen von Anfang an auf, werden aber zunächst auch mehrfach nach unten angezapft und abgeführt. Wie sich der Kampf dieser frühzeitigen Sohlengewässer mit dem Kluftwasser unter Druck weiter entwickeln kann, dafür fehlen mir noch ausreichende eigene Beobachtungen in kleineren Karstwassergefäßen von einiger Zugänglichkeit. Ferner würden an Stelle der oben abgeleiteten Entwicklung viel weniger einfache und übersichtliche Vorgänge treten, wenn das ausgedehnte Karstwassergefäß mit den relativ engen Quellausflüssen von Anfang an hohe und steile Klüfte enthielt, die nie angefüllt werden konnten. Sie wirken unterirdisch fast so absonderlich wie die verwandten Spaltentäler in der oberirdischen Morphologie. Alle Karstwassergefäße als eine Verbindung von Röhrenformen weisen manchmal die größten Besonderheiten der Druckströmungen, wie das Saugen oder die Heberwirkung so nahe der Oberfläche auf, daß auch dort sehr merkwürdige Erscheinungen vorkommen, wie z. B. die Meeresschwinden und die intermittierenden Quellen mit sehr regelmäßigen Zeitabständen unabhängig von den Niederschlägen.

Ich habe in dieser Zusammenfassung fast alles als Behauptung vorgetragen, damit man sehe, was für eine Gesamtvorstellung ich habe. Manche dieser Behauptungen sind im Buch ausreichend bewiesen, andere nicht. Aber indem diese sich zwanglos in das Gesamtbild fügten, wirkt dies für sie wie ein nachträglich hinzugekommener Beweisgrund.

**Rückblick in wenigen Zeilen.**

Die Höhlenforscher hatten in der Karsthydrographie den Höhlenfluß vor Augen. Er ist der eine Grenzfall des Abflusses im Karst. A. Penck erkannte, daß eine auf den Höhlenfluß aufgebaute Karsthydrographie in eine Sackgasse führen müsse. Sie wurde vermieden durch den kühnen und genialen Einfall, den ganzen verborgenen Abfluß im Karst als eine Art Grundwasserbewegung aufzufassen. Damit war der andere Grenzfall dem ersten als gleichberechtigt zur Seite gestellt. Die Art, wie der zweite Grenzfall von A. Grund behandelt worden ist, führte zu einem Stillstand der Erkenntnis in Form einer sozusagen eingefrorenen Polemik, er verhinderte aber, daß das einmal aufgestoßene Tor für den Fortschritt der Erkenntnis zugeschlagen wurde. Die Wahrheit liegt nicht in der Mitte jener Grenzfälle, sondern sie umfaßt beide zugleich und setzt sie erst ins richtige Licht. Es wurde versucht, der Wirklichkeit durch die Einführung eines allgemeinen Begriffes für durchströmte Hohlräume näherzukommen, nämlich durch den Begriff eines Gefäßes beliebiger Form und Größe und Verzweigung.

Die Lehre Katzers, die eine mittlere Stellung einnahm, enthielt daher wichtige Glieder der Wahrheit und wurde von A. Grund einseitigem Standpunkt viel schärfer bekämpft als die Meinungen der Höhlenflußtheoretiker.

Als notwendige Teilstücke dieses Gefäßes ergaben sich gewisse Urhohlräume, die auch ohne Lösung der Gesteine dem Abfluß im Karst ein eigenes Gepräge geben würden. In bezug auf die Anlage dieser Hohlräume wurde jeder über das rein tektonische Geschehen hinausgehende „Entwicklungs“gedanke als verfehlt beiseite gestellt. Hingegen wurde im Gefolge der Erweiterung der Quellausflüsse und der inneren Einschnürungen eine mögliche Entwicklung der mechanischen Strömungsformen erkannt, deren morphologisches Ergebnis nicht die Differenzierung weiter und enger Hohlräume, sondern die Beseitigung manchen Unterschiedes ist. Fortdauer oder Neubelebung der Krustenbewegungen bedeuten im Karst nur am Anfang eine gleichsinnige Förderung seiner Hydrographie, weiterhin aber können sie rückläufige Vorgänge ins Leben rufen. Die Ersetzung des Nicht-Karstes durch den Karst im Gefolge von Krustenbewegungen und tektonischer Zerklüftung führt im Dolomit bei einem viel geringeren Ausmaß dieser Bewegungen, d. h. früher als im Kalk dazu, daß das erreichte Maximum des unterirdischen Abflusses wieder geringeren Beträgen weicht. Bevor die Druckströmungen die größten Durchflußmengen erreichen, ist im Karst der Abfluß mehr mit einer richtig verstandenen Grundwasserbewegung verwandt, nachher mehr mit einem richtig verstandenen System von Höhlenflüssen, bis schließlich die Karsthydrographie von einer gewöhnlichen verdrängt wird.

Statistik der Quellen im Hauptstollen des Spullerseeerwerkes zwischen See und Wasserschloß auf Grund des veröffentlichten hydrologischen Stollenprofils von Ing. Hans Ascher und seiner weiteren Auskünfte.

Beilage zu S. 185.

A. Die Strecken in „undurchlässigen“ Felsarten.

Abschnitt	Geologische Formation; Stollenmeter vom See aus	Gesteinsbeschaffenheit	Meter — Summe	Wasserführung der Quellen (stark, mittel, schwach)					Gegenseitige Abstände der Quellen innerhalb desselben Gesteins	Anmerkungen
				Anzahl der Quellen (nach der Stärke)	Aus Verwerfungen treten hervor	Aus Kalzitbänden treten hervor	Aus Schichtfugen treten hervor	Aus unbedeutenden nicht weiter verfolgbaren Fugen kommen		
I	Kreide — <i>m</i> 0—218	Schiefer, gut geschichtet mit vielen Kalkklassen und -Klüften. Druckschieferung	218	st.	1		1		90 <i>m</i>	Die schwache Quelle kommt von oben, aus der Firste des Stollens
				schw.	1		1			
III	Lias — <i>m</i> 230—350	Fleckenmergel, hart, gut geschichtet, gegen W. Hornstein führend, zum Teil verworfen	120	st.	1		1		Fünf Quellenpaare (1—2 <i>m</i> ) von Paar zu Paar 4—7 <i>m</i> . Abstände der Einzelquellen 15—31 <i>m</i>	Beim Stollenvortrieb waren es erheblich mehr Quellen, meist an Kalzitbänden gebunden
				m.	4	3	1			
IV	Lias — <i>m</i> 350—375	Hornsteinmergel, hart, gut geschichtet, Hornstein sehr zahlreich	25	schw.	11	3	2	6	1·5—9 <i>m</i>	
				m.	2	1	1			
V'	<i>m</i> 381—389	Mergelinschaltung im Adnether Kalk gut geschichtet	8	st.	1		1		Dicht an der Randverwerfung unter dem überkippten Adnether Kalk	
					1		1			
VI'	Ob. — Rhät a) 438—442 b) 449—452 c) 462—469 d) 478—498	Vier Einschaltungen bunter Mergel im Dachsteinkalk (erste Strecke)	34	schw.	3	1		2	1 <i>m</i> bei den zwei Quellen aus a), die eine Quelle aus c) ist isoliert	Die Einschaltungen b) u. d) sind ohne Quellen
					3	1		2		

VI'	e) 520—562 f) 630—640 g) 656—659 h) 666—668	Vier weitere Einschaltungen bunter Mergel im Dachsteinkalk (zweite Strecke)	57	st. m. schw.	5 9 15	5 4+ 8+		5× 6	1	Größte Abstände bei den sechsundzwanzig Quellen aus e) 4 und 5 m, zwei Quellen ++ kommen aus h), eine × aus g)	Die Einschaltung f) ist ohne Quelle
VII	Kössener Schichten (Rhät) a) 691—712 b) 714—728	Kalkreiche Mergel, a) gut geschichtet und verworfen, b) geschichtet und verworfen	35	st. m. schw.	5 9 5	3 2 1	1 1	2 6 2	1	In a) sieben Quellen: größter Abstand 6·5 m In b) zwölf Quellen: größter Abstand 4 m	
VII	c) 771—800 d) 820—852	Dunkle Mergel, c) gut geschichtet, mehrfach verworfen, d) geschichtet und zerklüftet	61	st. m. schw.	2 1 4		2 1		1	5—11 m	Die Mergelfolge e) ist ohne Quelle; unmittelbar nach dem Vortriebe des Stollens bestanden darin fünf Quellen, die seither verschwunden sind, d) hat eine schwache Quelle aus der Firste
VII	e) 862—925 f) 956—1096	Dunkle Mergel im Wechsel mit weichen Schiefen, gut geschichtet, zum Teil gefältelt, zum Teil verworfen und zerklüftet	203	st. m. schw.	1 4 13	1 1 2	2 3	1 4	4	Größte Abstände 8 und 12 m	Die Mergelfolge f) (140 m) ist ohne Quelle. In e) kommt eine schwache Quelle aus der Firste
VII a	<sup>m</sup> 1208—1228	Geschichtete u. gefältelte Kössener Schichten, zwischen Plattenkalk eingeklemmt	20	schw.	1	1				Aus der Firste	Es ist die eine der beiden ganzjährig fließenden Quellen bei Stollenmeter 1228 am Formarinbruch
Zusammen	Kreide Rhät Ob. Trias	Mergelige und schieferige Gesteine	Summen 781	st. m. schw.	16 29 57	9 11 18	5 5 8	2 13 16	15	Längste Strecke ohne Quelle in dieser Gruppe von Gesteinen: 140 m. Aus 28 Verwerfungen kommen keine Quellen in den Stollen. Die 38 Verwerfungsquellen kommen aus 21 Brüchen	

Anmerkung; Als stark gelten die Quellen mit > 1 l/sek, als mittel jene von 0·5 bis 1 l/sek.

B. Die Strecken in „durchlässigen“ Gesteinen.

Abschnitt	Geologische Formation Stollenmeter	Gesteinsbeschaffenheit	Meter	Stärke der Quellen (stark, mittel, schwach)	Anzahl der Quellen (nach der Stärke)	Aus Verwerfungen treten hervor	Aus Kalzitbänden treten hervor	Aus Schichtflügen treten hervor	Aus unbedeutenden nicht weiter verfolgbaren Fugen kommen	Gegenseitige Abstände der Quellen innerhalb desselben Gesteins	Anmerkungen
II	Tithon 218—220 220—230	Unregelmäßig zerklüfteter Kalk, geschichteter Hornsteinkalk	12	—	0					ohne Quellen	Beim Stollenvortrieb traten viele kleine Qu. aus den Kalzitlinsen hervor
V	Lias a) 375—381 b) 389—410 c) 498—503	Adnether Kalk, a) dicht, ungeschichtet, b) undeutlich geschichtet, zerklüftet, c) dicht, zwischen Brüchen im Dachsteinkalk	32	st. schw.	4 3	3× 3	1 2		1	8 und 12 m	aus dem dichten Kalk a) eine Quelle ×, die drei schwachen Quellen aus c)
VI	Ob. Rhät a) 410—438 b) 442—449 c) 452—462 d) 469—478	Ob. Dachsteinkalk (1. Strecke), undeutlich bis gar nicht geschichtete, wenig zerklüftete, graue Kalke	54	st. m. schw.	1 3	1 3				21 m Abstand der zwei Quellen aus a)	aus c) und d) keine Quellen
VI	a) 503—520 b) 562—30 c) 640—656 d) 659—666 e) 668—683	Ob. Dachsteinkalk (2. Strecke), ungeschichtete oder wenig geschichtete, stark zerklüftete und verworfene graue Kalke und Riffkalke	123	st. m. schw.	5 3 15	5 3 7		4 1	3	größte Abstände in d): 3 m, in b): 4—12 m in a): 12 m zwischen einer Einzelquelle und einer dichten Quellen- gruppe	aus den Strecken c) u. e) zus. 31 m keine Quellen; auf der Strecke a) spenden 3 Schloten (Kamine) Qu., 2 davon in der Firste.

VII	Kössener Schichten (Rhät) a) 683—691 b) 712—714 c) 728—753 d) 763—771 e) 817—820	Riffkalk wenig geschichtet wenig geschichtet undeutlich geschichtet zerklüftet und verworfen Riffkalk und dichter Kalk	46	schw.	3	2	1				1 und 8 m	alle drei Quellen kommen aus der Strecke c) = 25 m; die übrigen sind quellenlos
VII	800—817 852—862 925—956	Mergelige Kalke, sehr stark zerklüftet und verworfen, z. T. deutlich geschichtet	58	st. m. schw.	4 2 24	4 2 1	15 3 15	3 5 3	5		größte Abstände 1·5—3 m	2 schwache Quellen bei 927 und 939 m in der Firste; die starke Quelle bei 955 fließt ganzjährig
VIII	Norische Stufe 1096—1208 1228—1270	Plattenkalk schließt zwischen Brüchen eine 10 m lange Strecke v. Kössener Kalk ein, zerklüftet und zerdrückt, stellenweise zermahlen	154	—	0						ohne Quellen	gegen Stollenmeter 1270 geht der Plattenkalk in den Dolomit über
	Jura Trias	Kalke, z. T. Riffkalke	Summen 479	st. m. schw.	14 5 48	13 5 13	1 22 23	4 4 4	9 9		Längste Strecke ohne Quellen im Kalk: 132 m. Aus 36 Verwerfungen im Kalk kommen keine Quellen in den Stollen; die 31 Verwerfungsquellen kommen aus 27 Verwerfungen	
IX	Hauptdolomit 1270—1840	zerklüftet, z. T. stark; stellenweise zermahlen	570	schw.	1	1					beim Stollenmeter 1764 aus der Firste	29 Verwerfungen ohne Quellen, 53 Schmierlassen
	Anhang										2 Quellen an der Grenze von Gesteinen wurden keinem von ihnen zugewiesen	19 Verwerfungen, die verschiedene Gesteine trennen, entsanden keine Quellen

Anmerkung: 1. Bei Meter 659 ist im Dachsteinkalk ein inaktiver Kamin in der Firste. — 2. Da die Gesteine nicht mit senkrechten, öfter mit unebenen Flächen aneinanderstoßen, so bedeuten die Zahlen den mittleren Abstand dieser Grenzflächen vom oberen Stollenende. — 3. Zwischen Stollenmeter 753—763 findet eine Wechsellagerung von Riffkalk, dunklen Mergeln und weichen Schiefeln ohne Quellen mit neunmaligem Schichtwechsel statt. Die Stelle ist in die obige Tabelle nicht aufgenommen worden 4. Die längste Gesteinsfolge ohne Quellen zwischen Meter 956 und 1228 ist 272 m lang. Im stellenweise stark tropfenden Hauptdolomit gibt es eine 494 m lange Strecke ohne eigentliche Quelle.

## Erläuterungen zu den Abbildungen 68—77.

Abb. 68. Auf Torsion beansprucht gewesene Glasplatten. Wiederholung von Versuchen Daubrées durch Hans Schardt. Vgl. § 6 und 7. Die randliche Zusammenfassung der Klüfte hat sich wieder gezeigt. Die Geradlinigkeit der Sprünge in Daubrées Figuren dürfte leicht schematisiert sein.

Abb. 69. Gefalteter Gips in einem r. Seitentälchen der Saale oberhalb von Jena erschlossen. Unten sieht man das Liegende, einen sandigen Dolomit. Seine Böschung ist von Karstgerinnen gefurcht, die aus röhrenförmigen Klüften im Gips herausfließen. Links fällt ein kleiner Quellstrahl zum Wegrand herab. Vgl. § 16.

Abb. 70. Durch saline Tektonik aufgerichtete Gipsschichten mit Anhydritkern im Steinbruch des Burgfelsens von Segeberg (Südholstein). In die Klüfte dieses z. T. postglazial noch gewachsenen Felshügels gelangten Moränenablagerungen. Vgl. § 16.

Abb. 71. Dreieckiger Auslaugungsquerschnitt in der Segeberger Gipshöhle. An anderen Stellen ist die Ebenheit der Decke nachträglich weniger zerstört. Vgl. § 16, § 87.

Abb. 72. Blick in die Teilungshalle der „Eisriesenwelt“-Höhle (Salzburg) auf die Strecke des querelliptischen Profils. Kleine verborgene Nischen der Wand nur in Sohlennähe, spärlich und undeutlich ausgebildet, können vielleicht als Spuren schwach auslaugender Drehbewegungen (langsamer Uferwirbel) gedeutet werden. Die große Ellipse ist dadurch nicht entstanden. Entfernung vom heutigen Höhlenausgang: rd. 1400 m. Vgl. § 89.

Abb. 73. Rest eines Deltas zentralalpiner Sande im „Röhrenlabyrinth“ der „Eisriesenwelt“ im Tennengebirge (Salzburg). Der Kern des Deltas ist links unten beseitigt. Man sieht das Nachlassen der Schichtung gegen unten. Über den Sanden sind Reste von kristallisierten Kalzitplatten als Zeugen eines höheren, nachher verdunsteten Wasserstandes. In einem anderen Raum des Labyrinthes ist ein gesättigter „Kalzitsee“ heute noch vorhanden. Vgl. § 92.

Abb. 74. In der Mitte des „Wassergangs“ in der „Eisriesenwelt“ (Salzburg). Der Wassergang geht von der Haupthöhle aus und kehrt nach etwa 40 m Länge in sie zurück, indem er eine stärkere Krümmung der Haupthöhle durch einen flachen Bogen abschneidet. Der Harnisch rechts wurde vom Wasser wenig angegriffen, die andere Seite wurde aber stark gefurcht. Unter den Furchen läßt sich ein ausgesprochener Spiralgang sicher verfolgen. Der Wassergang ist etwa 300 m vom heutigen Höhlenausgang entfernt.

Abb. 75. Starke Quelle im Hauptstollen des Spullerseewerkes. Sie fließt im Winter nicht, erreicht aber im Sommer 10 l/sek. Sie kommt aus einer von Verwerfungen durchsetzten Einlage geschichteter bunter Mergel im oberen Dachsteinkalk Vgl. § 113 f.

Abb. 76. Rückläufiger Ponorbach der „kleinen Donauversickerung“ bei Immendingen. Der Bach fließt auf einem Gelände, dessen Klüfte man vor Jahren vergeblich mit Beton abdichten versuchte mit 1 m/sek dem Flusse entgegen. Die Breite der Donau ergibt sich aus der dreiteiligen Brücke; gleich unterhalb von dieser zweigt der Kanal zur Maschinenfabrik ab. Wasserstand 24. März 1932 nachm. Im Rücken des Beschauers gab es noch einige kürzere Ponorbäche senkrecht zum Donauufer. Die Schluckstelle ist eine von Gesteinstrümmern ausgekleidete Mulde, die auf dem Bild wie ein kräftiger Kessel erscheint

Abb. 77. Harnischwand im Raume „Midgard“ der „Eisriesenwelt“ (Salzburg). Die Verschiebungsfläche schneidet nahe dem P. 1784·5 m kleine Röhren ab, die manchmal noch Wasser führen, wie Sandkegel darunter lehren (seitlich außerhalb des Bildes). Auch kleine Schluchtformen sind eingerissen. In einer (beim Schatten) ist ein für die Einzelheiten zu starkes Licht angezündet. Vgl. § 96.

---

## Autorenverzeichnis.

- Absolon** K. 22, 181f.  
**Ampferer** O. 20, 185f., 188.  
**Ascher** H. 20, 179, 185ff.
- Baekström** H. 30 (indirekt).  
**Ballif** Ph. 90, 95, 97f., 101f., 103ff., 105 bis 109f., 112 bis 114, 116 bis 120.  
**Berz** K. C. 131 Anm., 143.  
**Bineau** M. A. 29 (indirekt).  
**Biese** W. 152, 154, 160, 164.  
**Blochliger** G. 34.  
**Bock** H. 20, 145, 154, 161, 165, Anm., 183, Anm.  
**Boeke und Eitel** 28, 35.  
v. d. **Broecks** 22 (indirekt).
- Cavazzi** A. 33.  
**Chwolson** O. D. 50, 51, 53, Anm.  
**Cossa** A. 33, 35.  
**Cramer Helmuth** 17, Anm. 37, 163.  
**Crammer** Hans 14.  
**Cvijić** J. 5, 99, 101.
- Daubrée** A. 6f.  
**Doelter** C. 29.  
**Durig** A. 32.
- Eckert** M. 10, 14  
**Endriß** K. 133, 143.
- Forster** A. E. 124ff., 130, 137.  
**Fouqué** 77, 81, Anm., 85ff.
- Gavazzi** A. 99, 101, 112f., 128, 129, Anm.  
v. **Gorup-Besanez** E. 28, 35.  
**Gradmann** R. 139.  
**Gripp** K. 17ff., 145 bis 148.  
**Grünberg** K. 35.  
**Grund** A. 5, 15, 16, 22, 23, 28, 66, Anm., 89f., 95, 100ff., 110ff., 114 bis 117, 119, 122f., 142, 181f., 201.  
**Günther** S. 81.
- Handel-Mazzetti** H. 2.  
**Heim** A. 156.  
**Hodson** A. 2, Anm.
- Hol** J. 6, 22.
- Jaeger** F. 2, Anm.  
**Johnston** J. 32.
- Katzer** F. 5, 12, 95, 107, 124, 201.  
**Kendall** J. 31.  
**Kerner-Marilaun** F. 17.  
**King** F. H. 66, Anm.  
**Kling** J. 180, 182.  
v. **Knebel** W. 2, 28, 81, 88, 130, 136, 139.  
**Knop** A. 134, 142.  
**Krebs** N. 129, 139.  
**Kyrle** G. 123.
- Lahner** G. 180.  
**Lamb** H. 38, 62.  
**Landolt-Börnstein**, Tab. 28ff., 33.  
**Landolt u. Langenhan** (Augenheilkunde) 16.  
**Linck** G. 34f.  
**Lorenz** H. 41.
- Martel** E. A. 88, 129f., 159, 164, 166, 169ff., 174.  
**Migliaressi** 85.  
v. **Mises** R. 46, 49, 51, 58ff.
- Partsch** J. 75ff., 81, Anm.  
**Penck** A. 15, 153, 201.  
**Perko** G. A. 23.  
**Pirker** R. 129.  
**Prandtl** L. 41, 48f., 53, Anm.  
**Prandtl-Tietjens** 66, Anm.
- Rehbock** Th. 39f.  
**Reynolds** O. 38.  
**Richter** E. 12, 102f., 104, 114.
- v. **Sawicki** L. 34.  
**Schardt** H. 23, 25, 27, 136, 161, 163.  
**Schaufelberger** P. 131, 135ff.  
**Schenkl** Th. 98 Anm.  
**Scherrer** P. 74.  
**Schloesing** Th. 32f., 33.  
**Schmidt** Walter 7.  
**Schmidt** Wilh. 40, 62.  
**Schwetz** 2, Anm.

- Slichter Ch. S. 66, Anm., 185.  
 Smekal Ad. 156f., 165, Anm.  
 Soutter F. 23.  
 Spöcker R. G. 56.  
 Stille H. 3, 121.  
 v. Terzaghi K. 20, 34, 153.  
 Waibel L. 2, Anm.  
 Weisbach J. 45, 49, 51f., 83.  
 Wells R. C. 31 (indirekt).  
 Wiebel K. W. 76f., 81ff.  
 Wiegner G. 32f., 33.  
 Williamson E. D. 32.  
 Wilser J. L. 132.

## Orts- und Sachverzeichnis.

- Aach**, Hegauer oder Radolfzeller 130f., 137.  
**Aachtopf** 135.  
**Abfluß**, Begriff und Arten 1.  
**amorpher Kalk**, Löslichkeit 30.  
**Anlaufstrecke** 47f.  
**Ansatzröhren an Gefäßen**, Hydraulik 46ff.  
**Aragonit**, Löslichkeit 30.  
**Argostoli**, Hydrographie 75ff.  
**Augstsee im Toten Gebirge**, Speisung 184.  
**Ausfluß unter Wasser** 71.  
**Ausflußgeschwindigkeiten** 45, 61.  
**Auslaugung**, herauspräparierter Fossilien 27, 163.  
**Auslaugungshöhle von Segeberg** 18f.  
**Auslaugungshöhlen bei Spiegelschwankungen** 148 bis 151, 162f.  
**Auslese von Wasserbahnen** 14, 195.  
**Bachschwinde am Schilt in Glarus** 4.  
**Bakterien als Verstärker der Korrosion** 34.  
**Belgien**, Verhalten d. Schichtfugen in — 8.  
**Bief rouge**, Quellen 21ff.  
**Bijelopolje**, Fläche 98.  
**Bohrergebnisse**, Deutung 22f.  
**Bonheurbach** 166ff.  
**Bosnien u. Herzegowina**, Poljenstatistik 117ff.  
**Brackwasserquellen** 71f.  
**Bramabiau**, Ausfluß 166ff.  
 — Schlucht 171f.  
**Bristoviponor** 111, 114f.  
**Brunnen im Donautal** 139ff.  
**Brunnenwasser u. Poljenseen**, Vergleichung 89, 92ff., 96.  
**Busko blato**, Fläche 98.  
 — — Überschwemmung 99.  
**Čaić**, Ponore 110ff.  
**Čaprazlije Ponor (= Lakalponor)** 103.  
**Chemischer Abtrag im Kalk** 34.  
**Dachstein**, oberflächennahe Röhrengewässer „auf dem Stein“ 176ff.  
**Daubrées Versuche** 6f.  
**Deckenkolke** 155ff.  
**Deltabildung in Höhlen** 154.  
**Diaklasen und Schichtfugen in Belgien** 8.  
**Dolinen nō. Aachtopf** 135.  
 — in Mähren, Wasserauftrieb 153.  
**Dolinendichte u. Wasserverteilung im Karst** 8f.  
**Dolomit**, Klüftigkeit 16f.  
 — Löslichkeit 34f.  
**Dolomitase** 34.  
**Donau**, Beimengungen 122.  
 — Schwinden 130ff.  
**Doppelspat**, isländ., Löslichkeit 30.  
**Druck**, (hydro)dynamischer, Formeln 49f.  
 — schlechtweg = Gesamtdruck 52f.  
 — statischer 44.  
**Drucke**, Terminologie 53 u. Anm.  
**Druckfugen u. Klüfte** 6f.  
**Druckhöhen als Druckmaß** 46.  
 — im Lakalponor 105.  
 — — Mt.-d'Or-Tunnel 26, 28, Anm.  
**Druckhöhenabfall** 46f., 52f.  
 — im Mt.-d'Or-Gewölbe 25, 27.  
**Druckhöhenverlust**, scheinbarer 64f.  
**Druckkolke** 155.  
**Druckspiegelabfall**, polygonaler 67.  
**Durchlässigkeit**, wechselnde, der Karstfelsen 20.  
 — sw. v. Spullersee 189ff., 204f.  
**Efforation** 5, 158f., 161, 163.  
**Eisriesenwelt** 17, Anm., 162, 173.  
**Ergiebigkeit von Karstquellen** 61.  
**Erweiterungen in Röhrenströmungen** 64f.  
**Erweiterung von Klüften und Fugen**, Bedingungen 12f.

- Färbeversuche, Geschichtliches** 122f.,  
 — im Gurkgebiet 125f.  
 — — Laibachgebiet 130.  
 — — Donaugebiet 137f.  
**Fließen in Haarfugen und -röhrchen, Voraussetzungen** 13, 44, Formeln 61ff.  
**Frankendolomit** 17.  
**Frankenjura, Dolomitkarst** 16.  
**Fugen, Klassifikation** 12ff., 15f.  
 — hydrogr. Eigenschaften 11ff.  
 — theoret. Geschwindigkeiten darin 61ff.
- Gegensatz, karsthydrographischer** 6.  
**Geißbach, Glarus** 4.  
**Gesamtdruck** 52f.  
**Geschwindigkeit, untere Grenz- u. kritische**  
 — 38.  
 — der Vaclusequelle 164f.  
**Geschwindigkeiten in Karstquellen** 61.  
 — scheinbare, gefärbter Gewässer 123, 126.  
 — theoretische, in zylindr. Röhrenhöhlen 59.  
 — in engen Fugen 63.  
**Geschwindigkeitsformeln** 45, 50, 58.  
 — laminare 61f.  
**Geschwindigkeitshöhen** 45ff., 49.  
**Gesteine des Karstes** 1.  
 — Verhalten auf mechanische Beanspruchungen 6f.  
**Gips, Klüftigkeit** 17f.  
 — Löslichkeit 36.  
**Gipshöhlen, Segeberg** 18f., 145, 148.  
 — Mansfeld 154.  
**Glarus, Geißbach** 4.  
**Gleiten = Laminare Fließen** 38.  
**Gottesackerplateau, Tiefe offener Karrenklüfte** 14.  
 — Zusammenfassung der Karstwässer 9f.  
**Gottscheer (Reifnitzer) Polje** 125f., 128f.  
**Grundwasser im Donautal** 139.  
**Grundwasserschema im Karst** 5, 15.  
**Gurk, Krainer** 124f.
- Haarfugen, geol. u. physik.** 13ff.  
**Han sur Lesse, Karsthohlräume unter der Vorflut** 22.  
**Hegauer Aach** 130f.  
**Hochwasser im Livno-Polje** 99.  
**Höhlen, Entwässerung** 143ff.  
 — s. a. Auslaugungshöhlen, Gipshöhlen.  
**Höhlenflußtheorie** 5f.  
**Höhlenquerschnitte** 144.  
 — Änderungen im Längsprofil 151f.  
 — sehr unregelmäßige 159f.  
**Höhlenseen** 145f.
- Jaruga = Poljenfluß** 99, Anm.  
**Jonisches Meer** 86.
- Kalk u. Dolomit, Verhältnis d. Löslichkeit** 28.  
**Kalzit, Löslichkeit** 29 bis 33.  
**Kameniti ponor** 111ff.  
**Kapillare Durchmesser, große u. feine** 15ff.  
**Kapillares Saugen** 13.  
**Karrenfeld, randliche Quellen** 8ff.  
**Karrenklüfte als Wasserschlucker** 2, 13.  
**Karst, Begriff** 1.  
 — Beziehungen zum Nichtkarst 3.  
 — Verbreitung 2.  
 — westfälischer 3.  
**Karstabfluß, Erscheinungsformen** 37f.  
**Karstbäche, Kürze der** 3f.  
**Karstentwässerung, maßgebende Züge** 3.  
**Karstgerinne** 5.  
**Karsthydrographischer Gegensatz** 6.  
 — — im Gurkgebiet 127.  
**Karstquellen, Wasserführung u. Geschwindigkeiten** 61.  
**Karstseen** 4; s. a. Überschwemmungen u. Poljen.  
**Karstwasser** 71, 97.  
 — zeitweiliges und dauerndes 179ff., 184f.  
 — Benennung nach Bock 183.  
 — Einheitliche Zirkulation 184f.  
 — unter dem Donautal 139ff.  
 — oberflächennahes 176f.,  
 — im Spullerseegebiet 192f.  
**Karstwasserspiegel, nach A. Grund** 23, 66  
 Anm. 139.  
 — örtliche 55, 98; s. a. Druckhöhenabfall.  
 — ungleich hohe im Mt.-d'Or-Gewölbe 25, 27.  
 — — — an den Ploučaponoren 112 bis 114.  
 — unter dem Donautal 139f.  
**Karstwasserstränge** 117, 119f.  
**Kazanci ponor** 100.  
 — — Überflutungsstände 101.  
 — — Reinigung 102, 104.  
**Kephallenia, Meeresschwinden** 75ff.  
**Klüfte, Anordnung in den Karstfelsen** 6ff.  
 — hydrographische Eigenschaften 11ff.  
 — Rolle beim unterirdischen Karstphänomenen 36f.  
 — Verteilung um Poljen 97.  
**Klüftigkeit, Begriff A. Grund** 22.  
**Kluftwasser bei den Meeresschwinden** 82ff.  
 — in kapillaren Engen 13, 41f., 62f.  
**Kohlensäure in Luft und Wasser, Einfluß auf die Löslichkeit von Kalk** 31ff.  
**Kolke** 144, 148, 155ff., 159f., 165.  
**Koppenbrüllerhöhle** 156ff., 180.

- Laibach, die** 129f.  
**Lakalponor** 103 bis 109.  
**Laminares Fließen** 38, 61f.  
**Lehmverstopfung der Klüfte des Mt.-d'Or-**  
**24f.**  
**Livno, Niederschläge** 100 Anm.  
 — Polje von 89, 98 bis 117, 119.  
**Löslichkeit des Dolomits** 35.  
 — des **Magnesits** 28.  
 — des **Gipses** 36.  
 — — **Kalkes (Kalzits)** 29 bis 33.  
 — u. **Lösungsgeschwindigkeit** 11f., 28  
 — u. **Mineralausbildung von CaCO<sub>3</sub>** 30.  
**Lufteinschlüsse in Fugen als Bewegungs-**  
**hindernis** 13f.  
**Luftverdrängung aus Höhlen durch ein-**  
**dringendes Karstwasser** 179 bis 182.  
**Lurbach, Färbeversuche** 123.  
  
**Macocho** 21, 181f.  
**Malmkalk, Verschluckung eines Baches in**  
**Glarus** 4.  
**Meeresschwinden, theoretisch** 69, 75.  
 — von **Argostoli** 75 bis 88.  
 — **Wasserführung** 77, 84 bis 88.  
**Meermühlen** 75ff.  
**Mikroskopische Fugen u. Risse** 16.  
**Mt.-d'Or-Gewölbe, Färbeversuche** 122f.  
 — — **-Tunnel** 21f.  
  
**Niederschläge im Polje von Livno** 100 Anm.  
 — in den **Alpen** 165.  
 — im **Spullerseegebiet** 189.  
  
**Opaki ponor** 111, 114f.  
  
**Paderborner Karst** 15.  
**Padirac, Höhlengewässer** 168 bis 171.  
**Plouča** 99f.  
 — **Ponore** 109ff.  
**Poik** 129f.  
**Poiseuilles Gesetz** 61ff.  
**Polje von Livno** 98 bis 117, 121.  
**Poljen, Form u. Größe** 88f.  
 — **Statistik von** 49 P. 117ff.  
 — **Theorie der Entwässerung** 88ff.  
 — in **Bosnien u. d. Herzegowina** 117ff.  
 — des **Laibachgebietes** 129f.  
 — — **Gurkgebietes** 124f.  
**Poljenliste** 121.  
**Ponore, Arten der Schlucktätigkeit** 90f., 96f.  
 — **theoret. Verteilung** 97.  
 — **Verstopfung** 97, 106,  
 — **Reinigungserfolge** 102, 108.  
 — **Belanglosigkeit des Neigungswinkels** 107.  
 — s. **Lakalponor, Ploučaponore usw.**  
  
**Quellen, Seltenheit der, im Karst** 8ff.  
 — **zeitweilige u. ständige** 182.  
 — — **um den Augstsee** 184.  
 — **unterseeische** 71f.  
 — in **Poljen, theoret. Verteilung** 97.  
 — des **Bief rouge** 24ff.  
 — **am Gottesackerplateau** 9f.  
 — **im Mt.-d'Or-Tunnel** 21ff.  
 — — **Polje von Livno** 101ff.  
 — — **Stollen des Spullerseewerkes** 188ff.,  
 — **Statistik in e. Stollen** 202 bis 206.  
 — **am Grapsboden, nebenan** 189, 193.  
 — s. a. **Karstquellen, Brackwasserquellen.**  
  
**Rauhigkeit** 50f., 59.  
**Reibung, innere (Zähigkeit)** 46f.  
 — **äußere** 48.  
 — **Formeln** 50f.  
**Reibungshöhe** 49.  
 — **Formel** 50.  
**Röhren, Hydromechanik in** 47 bis 71.  
  
**Saugen** 67ff., 80  
 — **Unterbrechung, theoretisch** 74.  
 — **kapillares, Formel der Steighöhe** 41f.  
**Saugwirbel** 92, Anm. 157.  
**Schießen des Wassers** 38f.  
**Schlote und Auslaugung** 153ff.  
**Schlucken** 70f.  
 — d. **Lakalponors, Mengen** 105ff.  
 — — **Ploučaponore, Mengen** 116.  
**Schluckdolinan an der Drau** 134.  
**Schluckschlünde, s. Ponore.**  
**Schwinde, s. Meeresschwinde, Ponore.**  
**Schwinden in Höhlen** 166f.  
**Segeberger Gipshöhle** 145 bis 148.  
 — „**Kalkberg**“ 18f.  
**Sekundärströmung, drehende** 41, Anm.<sup>2</sup>  
**Ševarevo blato** 99f.  
**Ševareva jaruga** 99, 101.  
**Sickerwasser, eingeschränkte Bedeutung** 183.  
**Simplontunnel** 21.  
**Sinterverschluß enger Hohlräume** 15f.  
 — **im Spullerseegebiet** 191f.  
**Siphone** 5.  
 — u. **Höhlenseen** 145.  
 — d. **Poikhöhlen** 129.  
 — in d. **Bonheur-Bramabiahöhle** 168.  
 — in d. **Padirachöhle** 170.  
**Sohlgewässer in Höhlen** 144.  
**Spalten, wasserfreie, im Mt. d'Or** 27.  
**Spaltenhöhlen, vertikale** 166 bis 176.  
**Spiegelanstiege, aktive und passive** 179ff.,  
 193.

- Spiegelstände, berechnete in Gefäßen und Röhren 51, 54f.  
 Spiegelschwankungen und Auslaugung 149ff., 152f.  
 Spiraliges Fließen 41, 159.  
 Spullersecwerk, Stollenhydrographie 20, 185ff.  
 Steighöhe, s. Saugen.  
 Stockwerktheorie des Karstwassers, Ablehnung 11.  
 Strömen 38f.  
 Strömung in vertikalen Spalten 173.
- Temperatur**, Einfluß auf die Löslichkeit von Kalk 29ff.  
 — — — von Gips 36.  
 Tennengebirge, Zusammenfassung der Karstwässer 9.  
 Totes Gebirge, Zusammenfassung der Karstwässer 8f.  
 — — Quellen am Augstsee 184.  
 Tropfwasser als Unterbrechung anderer Fließweisen 184.  
 Tunnelerfahrungen, hydrogr. 21 bis 28.  
 Turbulenz, „ungeordnete“ 40.
- Überschwemmungen** in 18 Poljen 118.  
 — im Livno-Polje 99.  
 — Ursachen 101, 108f., 117.  
 Überschwemmungsdruck, theoretisch 91.  
 Unz 129f.  
 Urhohlraum in der „Eisriesenwelt“ 17 Anm., 173.  
 Urhohlräume 11, 15, 174.  
 — und Chemismus des Gesteins 36.  
 — und Geschwindigkeiten 64.  
 — im Segeberger Gipsfelsen 19.
- Vauclusequelle**, Geschwindigkeit 164f.  
 Veliki ponor 111 bis 115.
- Verdunstung, unterirdische, als Ursache des Wasserstillstandes 13.  
 Verengungen in Röhrenströmungen 64f., — Formel beim Saugen 69f.  
 Verschluckung s. Schlucken.  
 Versickern 183.  
 Versinterung, s. Sinterverschluß.  
 Vorfluttheorie 20f.  
 Vrbička jaruga 99, 102.
- Wanddruck-Formeln** 49f.  
 Wannan im Bereich von Druckströmungen 89ff.  
 Wassereinbrüche im Mt.-d'Or-Tunnel 24ff., 104 Anm.  
 Wasserfälle in Höhlen 144f.  
 — in der Höhle des Bramabiasystems 167.  
 Wasserfallquellen 20.  
 Wasserhöhlen 143.  
 Wasserschlinger s. Ponore.  
 Wasserstand u. Schlucktätigkeit am Lakalponor 105 bis 109.  
 Wechselschlünde, Verteilung, theor. 97.  
 — im Ždralovac blato 102.  
 Wegsamkeit, hydrogr. von Fugen u. Klüften 11ff.  
 Widerstandshöhen 47, 49.  
 — Formel 50.  
 — u. Karstwasserstand 98, 115.  
 — bei den Ploučaponoren 115.  
 Wirbel, langsame 38.  
 — am Ausfluß 40.  
 — regelmäßig auftretende 41.  
 Wirksamkeit karsthydrogr. v. Fugen u. Klüften 11ff.
- Ždralovac blato** 99f.  
 Zirkulation d. Karstwassers, einheitliche 184f.  
 Zonentheorie des Karstabflusses 11.

Phot. Inst. d. Eidg. T. H.

E. Rüst.

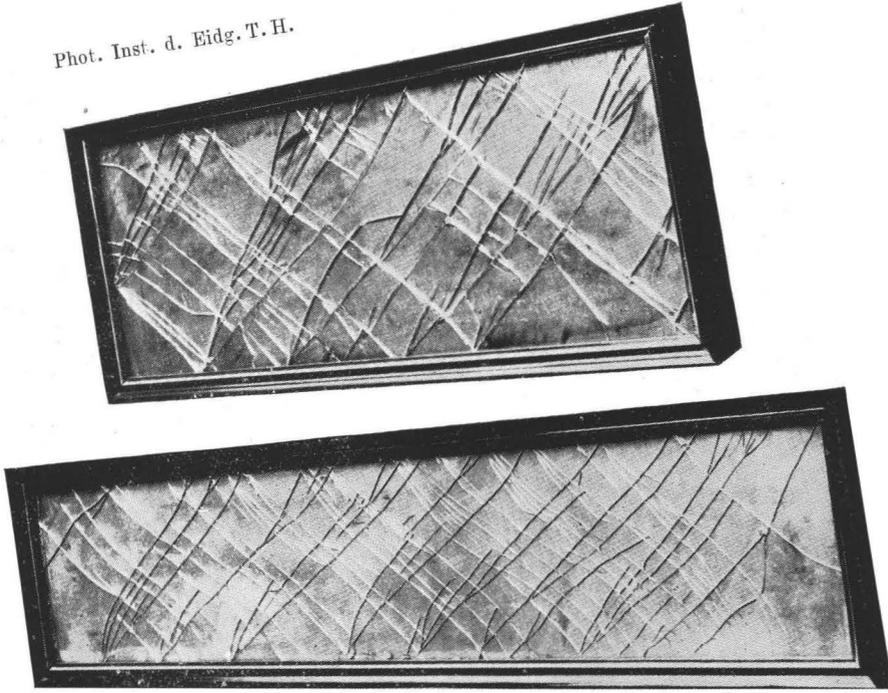


Abb. 68. Auf Torsion beansprucht gewesene Glasplatten. Vgl. §§ 6 bis 8 und S. 6 ff.

O. Lehmann

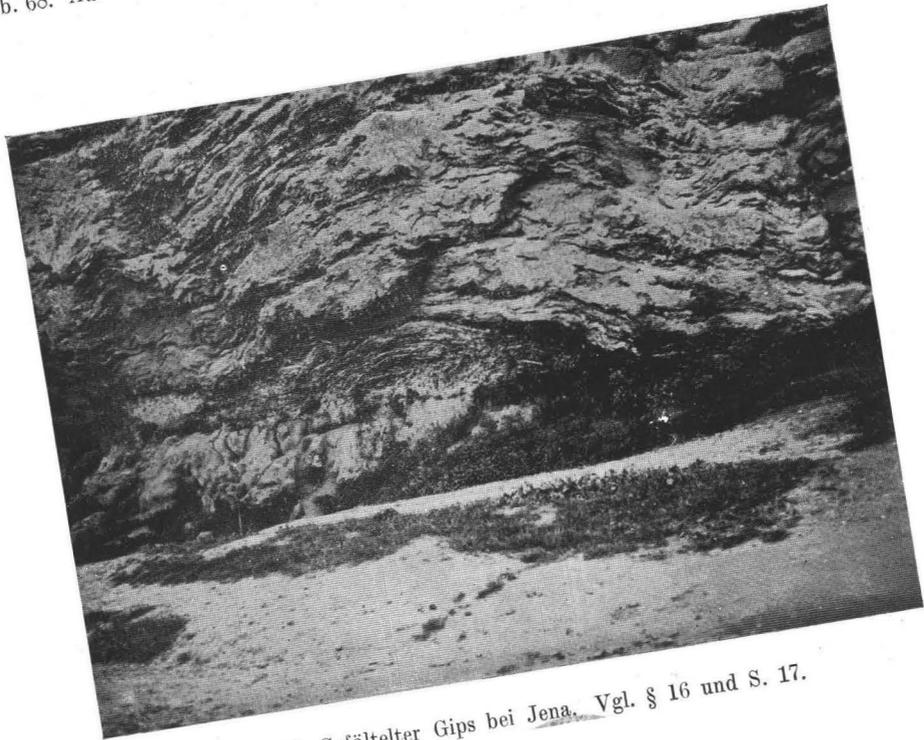


Abb. 69. Gefältelter Gips bei Jena. Vgl. § 16 und S. 17.

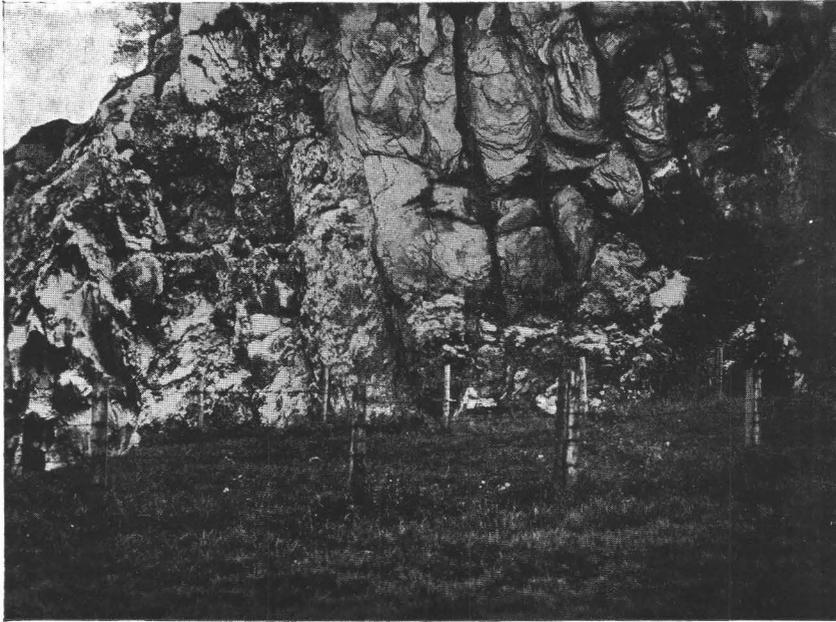


Abb. 70. Durch saline Tektonik aufgerichtete Gipsschichten mit Anhydritkernen.  
Vgl. §§ 16 u. 87 und S. 18 u. 146.



Abb. 71. Dreieckiger Auslaugungsquerschnitt in der Segeberger Gipshöhle.  
Vgl. §§ 16 u. 87 und S. 19 u. 147.



Abb. 72. Der querelliptische, nur zum Teil von Abbrüchen zerstörte Hohlraum der „Teilungshalle“ in der Höhle der „Eisriesenwelt“ (Salzburg). Vgl. § 89 und S. 151.

A. Asal



Abb. 73. Zeugen eines kleinen Höhlensees in der Eisriesenwelt. Delta und Kalzitplatten, einst den benetzten Querschnitt ausfüllend. Vgl. § 92 und S. 153.

E. Angermayer

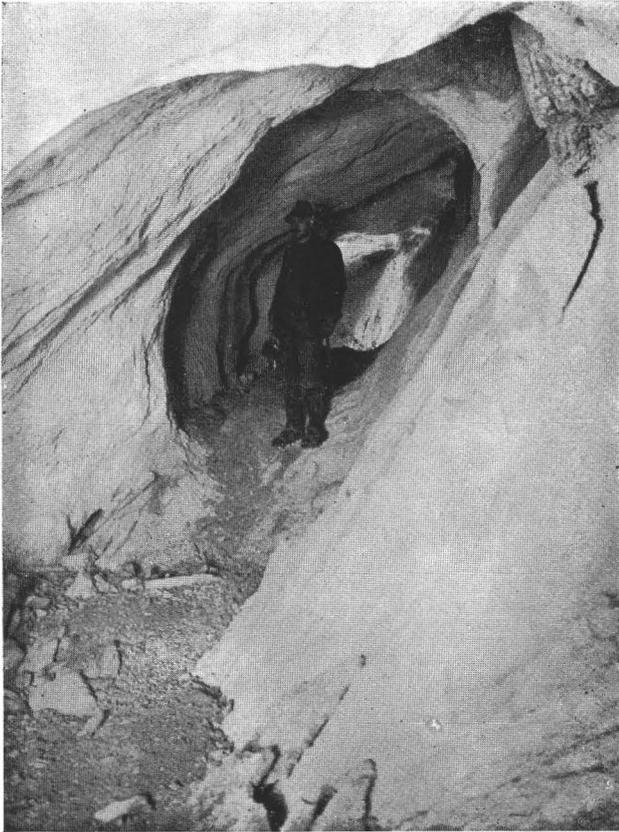


Abb. 74. Der „Wassergang“ in der Eisriesenwelt.  
Vgl. § 95 und S. 158.

H. Aseher



Abb. 75. Starke, periodische Quelle im Stollen des Spullersee-  
Werkes. Vgl. § 112 f. und S. 185 ff.

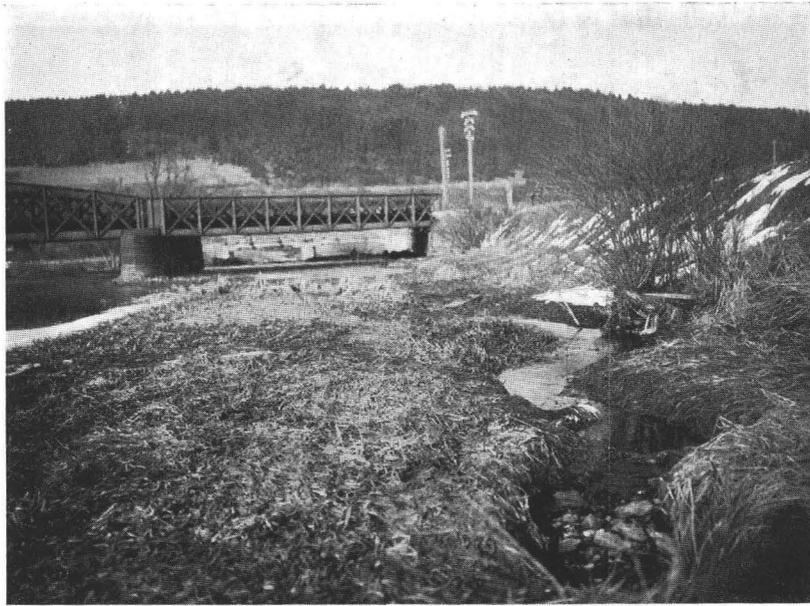


Abb. 76. Rückläufiger Ponorbach am rechten Donauufer oberhalb der Immen-  
dinger Maschinenfabrik. Vgl. §§ 80 f., 85, mit Abb. 45 und S. 131 f. u. 141.

A. Asál

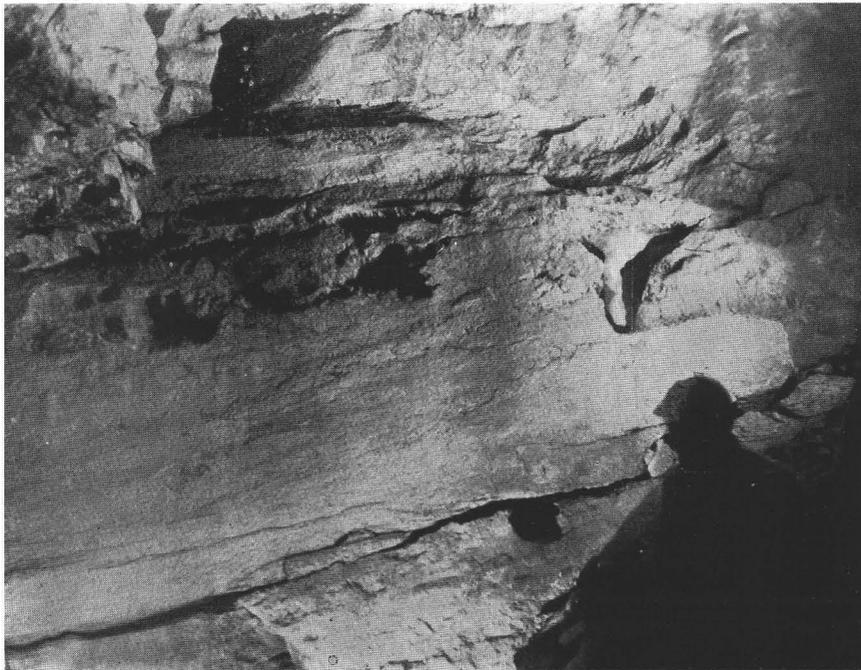


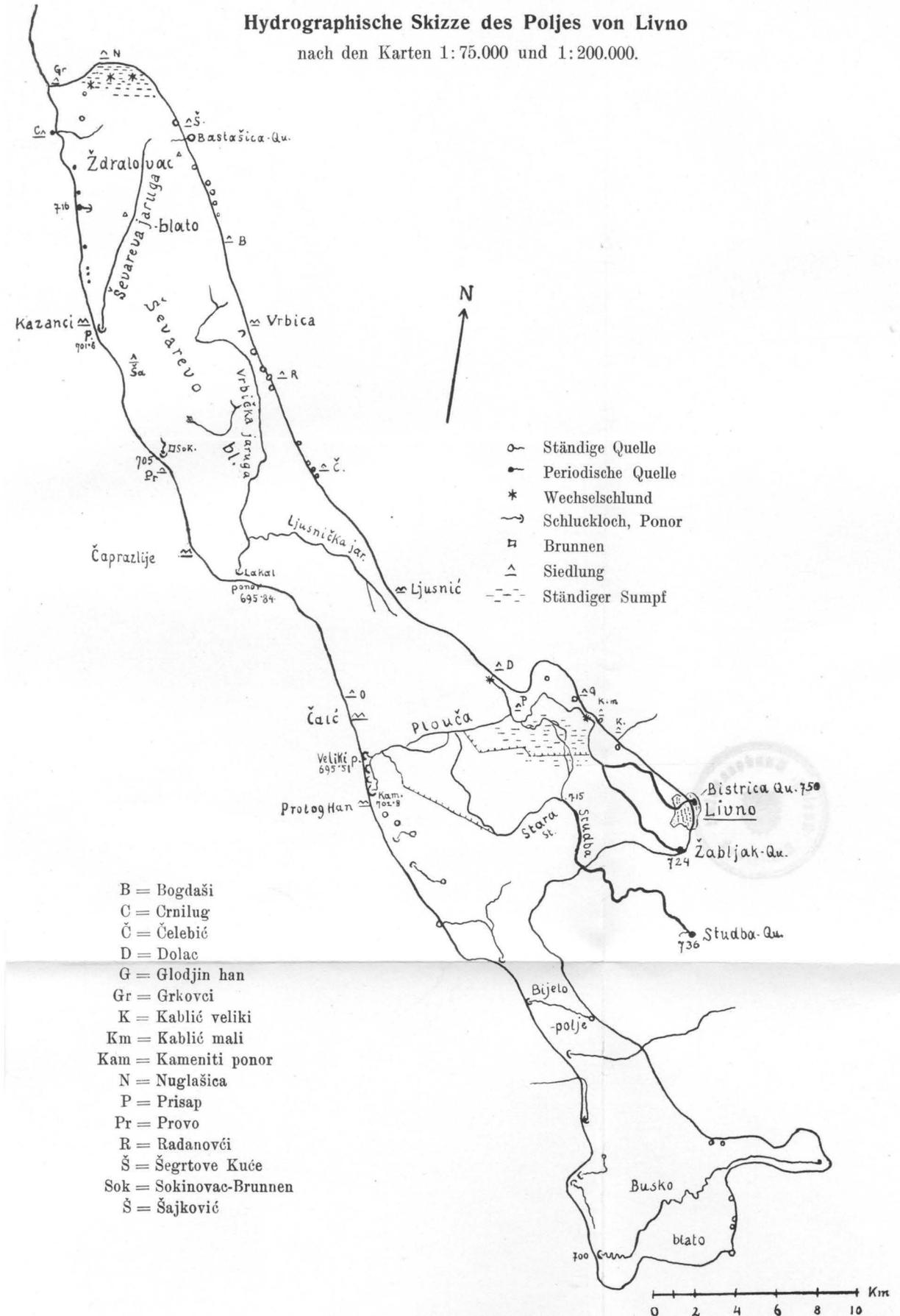
Abb. 77. Kleine Röhren und „Schluchten“ zeitweiliger Karstwasseradern in der  
Eisriesenwelt. Vgl. § 96 und S. 159.



Abb. 78. Bramabiau, Cevennen, Ausfluß aus einem Höhlensystem mit senk-  
rechten Spalten, in welchem u. a. der Bonheurbach verschwindet, sich verzwei-  
gungsbildend vereinigt und verborgenes Wasser des unterirdischen Karstes empfängt. Der  
Wasserfall ist 10 m hoch, der nächste, 50 m weiter innen, ist 6 m hoch. Der Name  
ist „Stiergebrüll“. Vgl. §§ 100, 102 und S. 166 f., 172 f.

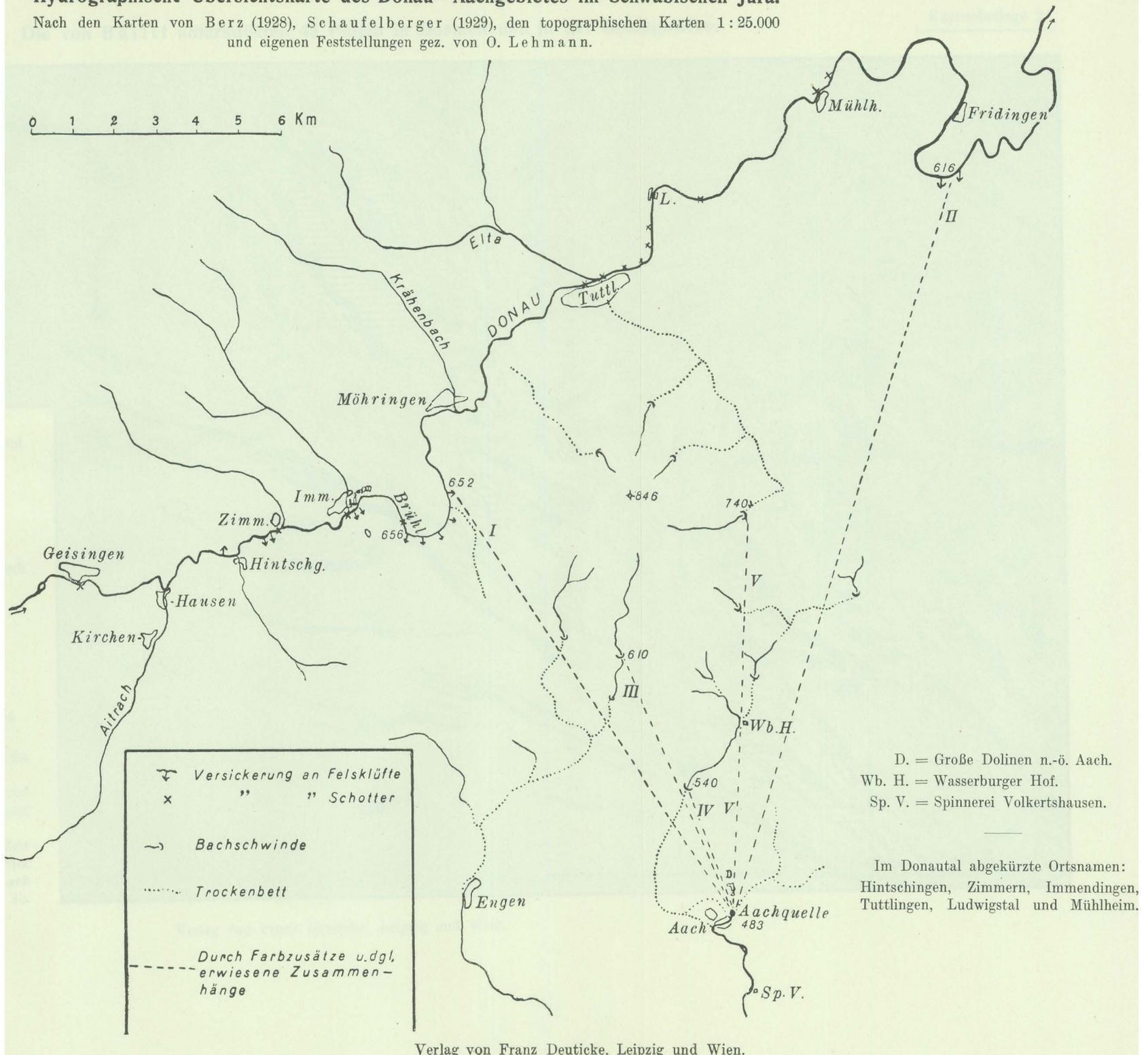
### Hydrographische Skizze des Poljes von Livno

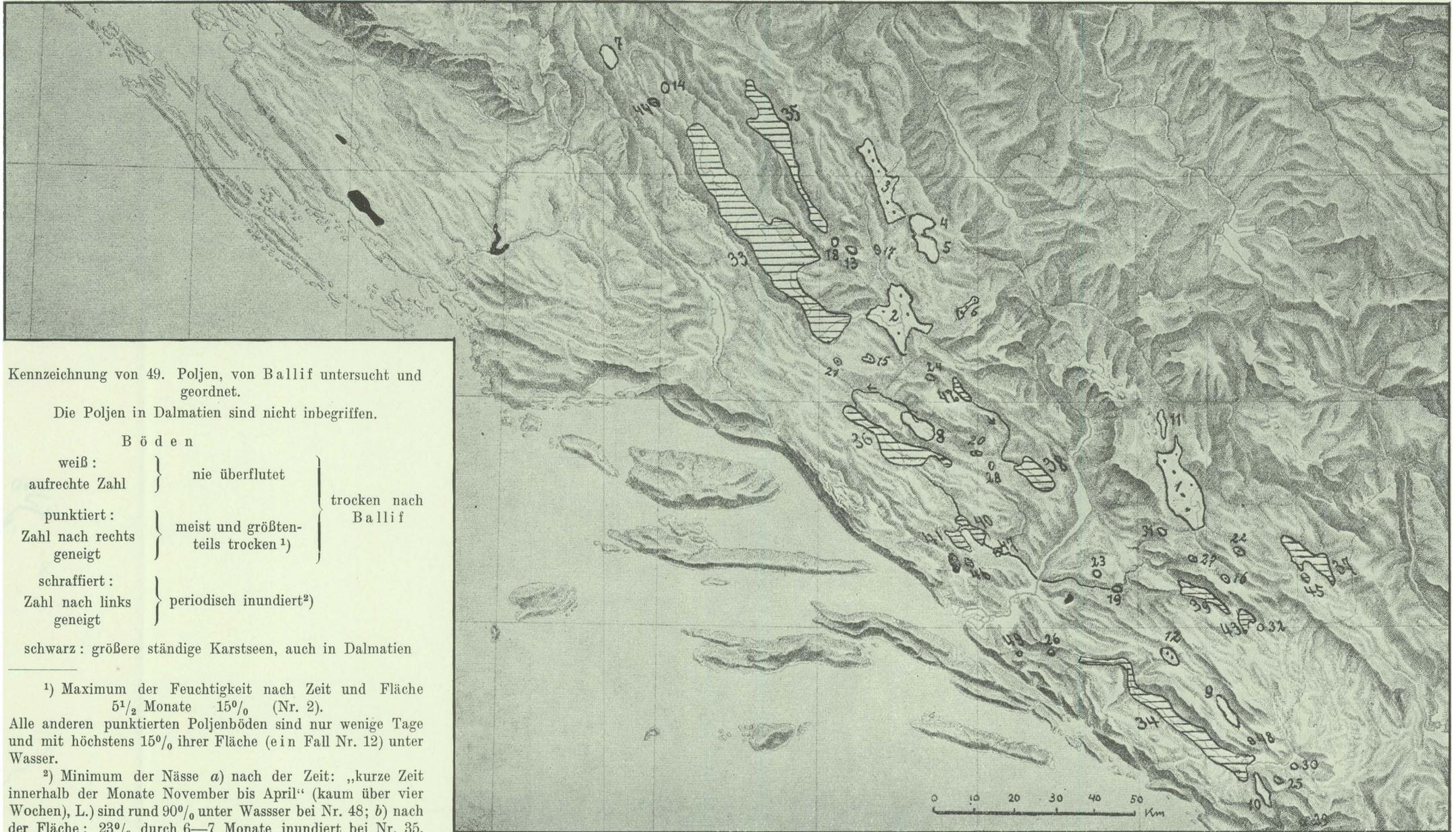
nach den Karten 1:75.000 und 1:200.000.



### Hydrographische Übersichtskarte des Donau—Aachgebietes im Schwäbischen Jura.

Nach den Karten von Berz (1928), Schaufelberger (1929), den topographischen Karten 1:25.000 und eigenen Feststellungen gez. von O. Lehmann.





Kennzeichnung von 49. Poljen, von Ballif untersucht und geordnet.

Die Poljen in Dalmatien sind nicht inbegriffen.

B ö d e n

weiß :	} nie überflutet	} trocken nach Ballif
aufrechte Zahl		
punktiert :	} meist und größtenteils trocken <sup>1)</sup>	
Zahl nach rechts geneigt		
schraffiert :	} periodisch inundiirt <sup>2)</sup>	
Zahl nach links geneigt		

schwarz : größere ständige Karstseen, auch in Dalmatien

<sup>1)</sup> Maximum der Feuchtigkeit nach Zeit und Fläche 5½ Monate 15% (Nr. 2).

Alle anderen punktierten Poljenböden sind nur wenige Tage und mit höchstens 15% ihrer Fläche (ein Fall Nr. 12) unter Wasser.

<sup>2)</sup> Minimum der Nässe a) nach der Zeit: „kurze Zeit innerhalb der Monate November bis April“ (kaum über vier Wochen), L.) sind rund 90% unter Wasser bei Nr. 48; b) nach der Fläche: 23% durch 6—7 Monate inundiirt bei Nr. 35.