

Separatabdruck aus
Geographischen Jahresbericht aus Österreich

XIII. Band

ÜBER QUELLEN UND GRUNDWASSER

Von

Professor Dr. Otto LEHMANN

Leipzig und Wien
Franz Deuticke
1925

Über Quellen und Grundwasser.

Berichtigungen und Ergänzungen zu verbreiteten Ansichten.¹⁾

Von

Dr. Otto Lehmann.

Mit 8 Abbildungen im Text.

Wenn man sich aus Hand- und Lehrbüchern über Quellen unterrichten will, findet man, daß verschiedene Verfasser nicht nur abweichende Einteilungen der Quellen vorgeschlagen haben, sondern auch dieselben Ausdrücke in verschiedenem Sinn verwenden. Dieser mißliche Zustand erscheint in der deutschen Fachliteratur förmlich festgelegt, weil die neuesten Werke über unseren Gegenstand mit ihren Unterschieden im selben Jahre, 1912, erschienen sind²⁾. Betrachtet man jede der vertretenen Einteilungen für sich, so findet man, daß sie logisch nicht befriedigen und Einflüssen eines alten Irrtums unterworfen sind. Beides ist nicht etwa die Folge praktischer Rücksichten. Darum ist es im folgenden unternommen worden, den hervorgehobenen Mängeln abzuhelpen.

Der erwähnte Irrtum besteht darin, daß das unterirdische Wasser, wenn nicht besondere Kräfte eintreten, unter dem Niveau der tiefsten Quelle stagnieren soll, so daß wohl absteigendes, aber kein aufsteigendes Wasser an die Quelle gelangt. Das obere Wasser bilde den Grundwasserstrom über dem ruhenden Stau in der Tiefe. Diese Ansicht wurde und wird von ihren Anhängern fast ausnahmslos für alle jene Fälle vertreten, wo ein „Grundwasserspiegel“ zu den Quellen absteigt. Die Erläuterung und Richtigstellung zeigt Abb. 1.

Die aufsteigenden Quellen werden von den Anhängern der Lehre eines stagnierenden Grundwasserstaues abgesondert als Quellen

¹⁾ In diesem Aufsätze handelt es sich nur um die nicht vulkanischen Quellen. Ausführlich werden die unterirdischen Gewässer des Karstes erörtert. Der Aufsatz ist aus der Vorbereitung zu einer Vorlesung hervorgegangen.

²⁾ K. Keilhack, Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde, und H. Höfer v. Heimhalt, Grundwasser und Quellen, eine Hydrogeologie des Untergrundes. Die Neuauflage des zweiten Werkes (1920) habe ich nicht einsehen können.

unter „hydrostatischem“ Druck behandelt, als ob im Falle der Abb. 1 nicht ebenfalls ein solcher Druck wirksam sein müßte. Es handelt sich aber dabei im Grunde um nichts anderes als um jenen Druck, der in jeder Flüssigkeit unter dem Spiegel herrscht, und den das Wasser allseits auf seine Wände ausübt, auch nach oben, wenn das Gefäß eine Form hat, die dazu Gelegenheit gibt. In ruhenden Flüssigkeiten ist er als hydrostatischer Druck zu bezeichnen und wird auch in solchen so genannt, die man für gewisse Betrachtungen als ruhend ansehen kann, obwohl sie bewegt sind. In bewegten Flüssigkeiten heißt er hydrodynamischer Druck. Die Höhe des hydrodynamischen Druckes ist kleiner als jene des hydrostatischen, wenn ein vorher ruhender Flüssigkeitsinhalt im selben Gefäß oder Hohlraumssystem sich bewegt. Der Unterschied beider Druckhöhen ist grobenteils in Geschwindigkeit verwandelt. Auch unter dem Grundwasserspiegel nach Abb. 1, überhaupt unter jedem, herrschen die

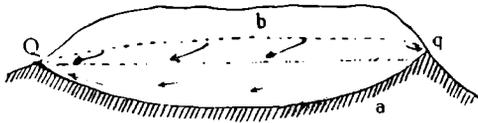


Abb. 1. a undurchlässig, b durchlässig; Q, q Quellen.

Die obere Grenze des Grundwasserkörpers ist gestrichelt. Das Wasser ist in der Richtung der Pfeile bewegt. Die punktierte Linie als untere Grenze eines „Stromes“, im Sinne der bisherigen Anschauungen gezeichnet, hat keine Berechtigung.

Druckverhältnisse der Hydrophysik und haben auch hier die Wirkung, daß das Wasser unter der Quelle zu ihr aufsteigt. Ein Stillstand wäre nur bei örtlich ausreichend vermehrter Reibung möglich, so z. B., wenn in Abb. 1 von oben in das undurchlässige Gestein enge, „blinde“ Schläuche oder Säcke führen würden, in denen durchlässige Einlagerungen stäken. Ohne solche ruhende, enge oder für eine Wasserbewegung ungünstig gelegene Grundwassersäcke, die uns weiter nicht angehen, gibt es kein stagnierendes Wasser in einer den Niederschlägen zugänglichen Tiefe.

Ein Beweis dafür braucht hier nicht geboten zu werden, da die gegenteilige Ansicht, die auf Otto Lueger zurückgeht³⁾, schon zur Zeit ihrer Entstehung den Lehren der Physik widersprach⁴⁾,

³⁾ O. Lueger, Theorie der Bewegung des Grundwassers in den Alluvionen der Flußgebiete. Stuttgart 1883. — Die Wasserversorgung der Städte. Darmstadt 1890, S. 127f. Dieses zweite Werk habe ich erhalten können. Die irrige Ansicht beruht auf einem durch drei Figuren erläuterten Trugschluß.

⁴⁾ Z. B. J. Weisbach, Lehrbuch der theoretischen Mechanik. Braunschweig 1875, für Techniker geschrieben. Der hydrodynamische Teil verwertet in klarster

außerdem seither auch in hydrographischen Darlegungen ausdrücklich abgelehnt wurde⁵⁾). Als Gegenbeweis muß also heute die Nennung der betreffenden Werke und der Hinweis auf ihre Unterlagen genügen. Die eingangs erwähnten Lehrbücher haben jedoch diesen Tatbestand nirgends in merkbarer Weise zur Kenntnis genommen⁶⁾). Darum ist eine Einteilung der Quellen auf richtiggestellter Unterlage erforderlich, wobei sich zugleich Gelegenheit bieten wird, die logischen Einteilungsgründe genau auseinander zu halten. Die Lehren von der Wasserversorgung und andere Aufgaben der Technik werden darunter nicht leiden.

I. Einteilung der Quellen nach lithologisch-geologischen Merkmalen.

A. Nach dem Träger des unterirdischen Wassers:

1. Quellen aus dem festen Fels;
2. Quellen aus Lockermassen.

Da die Grenze zwischen festem Fels und Lockermassen manchmal schwer zu ziehen ist, so ist es deutlicher, wenn man die unter 2 genannten gesondert aufführt als:

Weise die eigenen Forschungen seines Verfassers, die man auch in den modernsten Lehrbüchern der Physik und Hydraulik immer wieder zitiert findet.

⁵⁾ Ch. S. Slichter, The motions of underground waters. U. S. A. Geol. Survey, Water Supply etc. Papers No. 67, 1902.

⁶⁾ In O. Luegers Irrtum verstrickt war A. Grund in seiner Karsthydrographie (1903) und schon vorher Höfer. Grund trat unter dem Eindruck der Arbeiten Kings und Slichters von dieser Meinung 1910 äußerlich zurück. Höfer behielt sie in seinem Lehrbuch bei. Verschieden ist die Stellungnahme in Keilhacks Lehrbuch: S. 226 macht es diese Fehlmeinung nicht mit, sondern beruft sich für klüftiges Gestein auf die Lehren des belgischen Geologen d'Andrimont. Dieser war durch Färbeversuche im Laboratorium der Wahrheit erheblich näher gekommen. Daher unterschied er im bewegten Grundwasser eine Zone über und eine unter der tiefsten Quelle. Jene nannte er die aktive, diese die passive Zone, was physikalisch weiter nichts bedeutet. Er konnte sich aber nicht entschließen, auf ein stagnierendes Grundwasser als besondere Zone in der größten Tiefe zu verzichten, wo dieses Grundwasser unter Umständen auch seine eigenen Bewegungen haben könne. Grundsätzlich ist damit der alte Fehler nicht aufgehoben. Immerhin ist es ein Fortschritt gegenüber S. 311 im Buche Keilhacks, von wo an der Irrtum O. Luegers ohne Einschränkung herrscht. Nun können die Bewegungsgesetze des Wassers in klüftigem Gestein von denen in Lockermassen nicht abweichen. Liest man d'Andrimonts Ausführungen nach (Ann. Soc. géol. de Belgique [Lüttich], XXXII. Bd., Abt.: Mém. 704), so findet man, daß er seine Experimente mit Dünen sand gemacht hat. In Wahrheit hat d'Andrimont nur die ganz wertvolle, aber nicht überraschende Erkenntnis gewonnen, daß das Grundwasser in den belgischen Küstendünen, die Oberflächenform nachahmend, z. T. meerwärts,

- a) Schuttquellen (von manchen Schuttgrundquellen genannt);
- b) Quellen aus vulkanischen Lockeranhäufungen;
- c) Schotter- und Sandquellen.

Unter a) sind auseinander zu halten Gipfelschutt, Bergsturzschutt, Haldenschutt, Gehängeschutt und Rutschungsschutt. Die Gipfelschuttquellen heißen gewöhnlich „Gipfelquellen“; sie sind wohl vorwiegend von Nebeln gespeist, die durchs Blockwerk ziehen⁷⁾. Die unter c) genannten könnte man als „Grundwasserquellen“ im engsten Sinne einführen, insofern in Schottern und Sanden frühzeitig Eigenschaften des Tiefenwassers erkannt und verallgemeinert wurden. Doch möchte ich den Gebrauch dieses Wortes in der Einteilung I A nicht empfehlen, weil das Wort „Grundwasserquelle“ an einen hydrographischen Einteilungsgrund denken läßt. Wenn man „Grundwasserquelle“ im Sinne von I A, 2 c und „Gipfelquelle“ im Sinne von I A, 2 a nebeneinander stellen wollte, würde der Anschein eines Wechsels im logischen Einteilungsgrunde entstehen, während nur die an sich begreifliche Wahl kurzer Worte diesen störenden Eindruck macht. Da oben besonders im Hinblick auf Keilhacks Lehrbuch⁸⁾ von einem Wechsel in der logischen Gliederung gesprochen wurde, so sei betont, daß dabei keine nur scheinbaren Willkürlichkeiten gemeint waren.

Wollte man auch bei Felsquellen eine Unterteilung einführen, so wären die Quellen aus Schichtgesteinen, Massengesteinen und metamorphen Gesteinen auseinander zu halten. Da mir eine solche Einteilung nicht bekannt geworden ist und sie auch nicht viel Sinn hätte, so steht es mit dem häufig gebrauchten Ausdruck „Schichtquelle“ wohl immer so, wie es im nächsten Abschnitt dargestellt werden wird.

Das Wasser aus allen Lockermassen und aus vulkanischen Deckenergüssen hat die Eigenschaft, daß es an der Grenze der betreffenden Anhäufung auch ohne Erosion oder tektonische Störungen Quellen bilden kann⁹⁾, während es sonst bei festen Gesteinen auf derartige Gelegenheiten zur Quellbildung angewiesen ist.

z. T. binnenwärts fließt, während es im Sand unter den Dünenwällen ganz zum Meere durchfließt. Das binnenwärts bewegte macht also nach unten eine Wendung von 180°. Im übrigen ergab sich, daß das Grundwasser dieser Gebiete auch bis zur undurchlässigen Unterlage, also erheblich unter dem Meeresspiegel in Bewegung ist, so wie es Abb. 1 hier darlegt.

⁷⁾ Höfer, Grundwasser und Quellen, S. 49.

⁸⁾ S. 291ff.

⁹⁾ Diese Überlegung stammt aus dem Lehrbuche Keilhacks.

B. Nach der geologischen Bedeutung der Austrittsstellen lassen sich auseinanderhalten:

1. Schichtfugenquellen;
2. Quellen aus Druck- und Schwundfugen;
3. Bewegungskluftquellen (an tektonischen Grenzen);
4. Quellen an der Grenze einer Gesteinsanlagerung;
5. Quellen ohne örtliche geologische Vorzeichnung (zum Unterschied von 1—4).

Die Schichtfugenquellen können auftreten über einer undurchlässigen Gesteinsschichte bei normaler Auflagerung der durchlässigen oder auch inmitten eines klüftig durchlässigen Schichtgesteins. Das zweite kommt besonders im Karst vor, wo die undurchlässige Unterlage gar nicht zutage tritt. Aber auch wo dies der Fall und ein Quellhorizont entstanden ist, kann eine höher liegende, klaffende Schichtfuge in geeigneter Anordnung Quellwasser an den Tag leiten, so daß nur noch der Rest des Grundwassers zum Quellhorizont hinabgelangt. Keilhack rechnet diese Schichtfugenquellen aus dem Karst zu seinen „Spaltenquellen“¹⁰⁾ und bildet als solche auf S. 324 die Schichtfugenquelle der Areuse ab, die aus dem Jura in den Neuenburger See fließt. Was hier „Schichtfugenquelle“ heißt, wird gewöhnlich kürzer als Schichtquelle bezeichnet. Unerörtert bleibe, ob dieser Ausdruck auch auf flachliegende vulkanische Erguß- oder Aschengesteine angewendet werden darf. Überall, wo an derselben Schichtgrenze Quellen in beträchtlichen Abständen voneinander hervortreten, muß beachtet werden, ob nicht das Zusammenstoßen dieser Schichtgrenze mit besonders weiten Druck- oder Schwundfugen dem Grundwasser die räumliche Sondierung seiner Quellaustritte aufzwingt. Für sich allein können Druck- und Schwundfugen in Erstarrungsgesteinen aller Art Leiter der Quellstränge sein.

Die Quellen an Bewegungsfugen umfassen die mit den Schichtquellen besonders häufig aufgeführten Verwerfungsquellen, aber auch jene an Überschiebungsbahnen. So könnte die Quelle nach

¹⁰⁾ Höfer (S. 105f.) versteht unter „Spaltenquellen“ eine Abart der artesischen, von denen später die Rede sein wird, und denkt dabei vorwiegend an Massengesteine. Der Ausdruck Spaltenquelle könnte zunächst für eine Einteilung der Quellen nach dem Aussehen des Quellmundes verwendet werden. Eine solche Einteilung müßte noch unterscheiden: Höhlenquellen (im Karst), Löcher- und Porenquellen in Konglomeraten und Schottern, bzw. Sandsteinen und Sanden. Der Quellmund ist oft nur der Anschnitt der vorherrschenden Hohlraumformen des Gebirgsinneren.

Abb. 1 auch am Grunde einer Schubdecke hervorkommen. Bezeichnenderweise kann Abb. 2. verwendet werden, sowohl um die Quellen bei einer Schichtenanlagerung als auch um Verwerfungsquellen zu erläutern. Im ersten Fall ist an der Verwerfung V V ein jüngeres Gestein c angelagert worden oder es kann dies auch an einem Erosionshang an Stelle von V V geschehen sein. Im zweiten Fall ist c ursprünglich auch über b gelegen, aber infolge von Abtragung nur noch rechts der Verwerfung V V erhalten, an der es in eine mehr geschützte Lage geraten war.

Ohne geologische Vorzeichnung bilden sich Quellaustritte dort, wo der Träger des Tiefenwassers auskeilt oder genügend dünn gemacht worden ist. Der erste Fall hat am meisten Bedeutung in Schotterebenen vor dem Fuß ansehnlicher Gebirge, wo die Mächtigkeit der herausgefrachteten Gerölle in der Richtung der allgemeinen Neigung abnimmt und ihre Oberfläche der Schotterebene schließlich

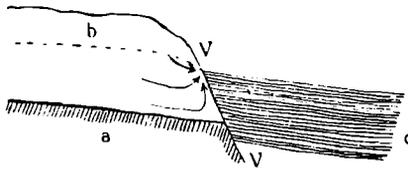


Abb. 2.
a, c undurchlässig, b durchlässig. Vgl. den Text.

unter die Spiegelhöhe des Grundwassers sinkt. Dann scheidet sich an einer quellenreichen Linie der nasse vom trockenen Teil der Ebene, wobei auch Versumpfungen großen Umfanges vorkommen können wie in der schiefen Ebene von München. Ein schönes Beispiel bietet die Ebene der Wiener inneralpinen Flachlandsbucht, wo auf das öde Wiener-Neustädter „Steinfeld“ nach Norden die freundlich grüne, von klaren Grundwasserquellbächen durchströmte feuchte Ebene folgt. Die Quellenreihe in der friaulisch-venetianischen Ebene gehört auch hieher; sie führt den Namen „Fontanili“.

Abb. 3 zeigt einen Fall, wo die Talbildung durch Erosion den Grundwasserträger verdünnt hat. Aus einer Zeit, wo man die Täler vielfach als „Spalten“ auffaßte, stammt der Name „Spaltquelle“ für solche Vorkommnisse. Slichter nennt sie „chasm springs“. Die erwähnten Lehrbücher vermeiden mit Recht diese Bezeichnung¹¹⁾. Besteht das durchlässige Gebirge in Abb. 3 aus Schichtgestein, so werden die Quellen wohl meist an Schichtfugen liegen. Da aber weder

¹¹⁾ Kerner nennt Verwerfungsquellen „Spaltquellen“ in seiner Quellengeologie von Mitteldalmatien. Jahrbuch der geol. R. A., 56. Bd., 1917.

die Gesteinsgrenze noch eine besonders weite Fuge das Wasser abzugeben brauchen, sondern nur die Tiefe des Tales bestimmt, welche Fugen das Quellwasser hervortreten lassen, so liegt ein Mischfall zwischen einer Quelle ohne örtliche geologische Vorzeichnung und einer Schichtfugenquelle vor. In dem üblichen Sinne spricht man auch hier von einer „Schichtquelle“; doch muß das Tal der Abb. 3 durchaus nicht in ein Schichtgestein eingeschnitten sein.

II. Einteilung der Quellen nach dem Verhalten des Grundwassers und Betrachtung seiner verschiedenen Arten.

A. Im Hinblick auf die Form der Tiefenwasseransammlung kann man unterscheiden:

1. Quellen aus einem dichtmaschigen Grundwassernetz oder aus einem einfachen Grundwasserkörper;

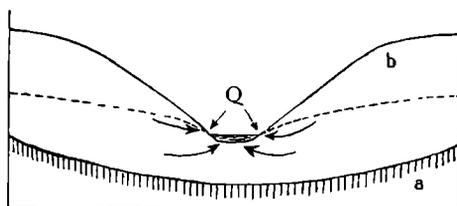


Abb. 3. Grundwasser und Quellen in einem Grundwasserträger, der durch Talbildung verdünnt ist. a undurchlässig, b durchlässig, Q Quellen.

2. Quellen aus weitständig verzweigten Grundwassersträngen oder aus einem mehrgliedrigen Grundwasserkörper;

3. Quellen aus einem ziemlich einfachen Grundwasserkörper (vermittelnder Fall).

Wir beginnen mit dem mehrgliedrigen Grundwasserkörper, weil er der physikalisch allgemeine Fall ist. Die anderen Arten gehen durch gewisse Vereinfachungen daraus nur begrifflich hervor. Wo diese nicht erlaubt sind, ist also ein mehrgliedriger Grundwasserkörper im Sinne obiger Einteilung vorhanden. Er sei an Abb. 4 erläutert. Hier greifen kapillare und überkapillare Hohlräumverflechtungen ineinander. In jenen ist die Bewegung bei gegebenen Druckstärken viel langsamer, ja in feinen geologischen Haarspalten reichen die vorhandenen Drucke meist kaum hin, um merklich Wasser durchzupressen¹²⁾. Auch in den überkapillaren Hohlräumen gibt es

¹²⁾ Röhren von etwa 0,5 cm Durchmesser, in denen einzelne Wassertropfen stecken bleiben und nicht dem Zuge der Schwerkraft folgen, sind im physikalischen Sinne bereits „kapillar“ wirksam.

große Unterschiede der Geschwindigkeiten, die ja den Querschnitten verkehrt proportional sind. An engen Stellen ist die Geschwindigkeit größer, der Druck kleiner als an weiten. Dieser Druck auf die Wandungen bewirkt auch, daß die nach aufwärts führenden Zweige der Hohlräume bis zu einer gewissen Höhe Wasser führen. Der Wasserspiegel steht höher bei S_1 , wo die Wassersäule aus Erweiterungen abzweigt, als bei S_2 , wo dies aus Verengerungen geschieht. (Die Abzweigung könnte auch eine ganz einfache sein.) Die in dem kurzen Ausschnitt der Abb. 4 sichtbaren auf- und niedergestaffelten Spiegel sollen nicht vergessen machen, daß die Gesamtheit aller Einzelspiegel im Durchschnitt zu den Quellen hin absteigende Höhen haben muß. Abb. 4 ändert sich nicht, ganz gleich ob man diese fernen Quellen rechts oder links davon annimmt.

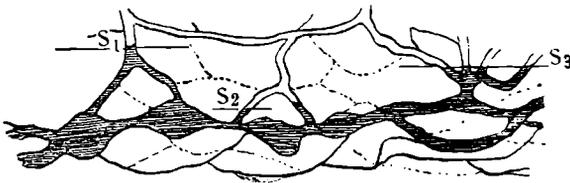


Abb. 4. Ausschnitt aus einem mehrgliedrigen Grundwasserkörper.

Die kapillaren Fugen sind gestrichelt und führen meist kein Wasser, wenn dafür der herrschende Druck nicht reicht. Besonders erschwert wird der Durchtritt von Wasser durch sie, wenn Luft einschließt zwischen angesogenen Wassertropfen höhere Verschiebungskräfte erfordern, als meist vorhanden sind. Die Spiegelhöhen S können im Vergleich zur Mächtigkeit der Wasserführung immerhin um beträchtliche Höhen voneinander abweichen.

Der Unterschied D der Spiegelhöhen infolge der Querschnittsänderungen ergibt sich aus den Geschwindigkeiten in den engen und weiten Querschnitten nach der Formel $D = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$ ¹³⁾, wozu noch der Druckhöhenabfall zum Ausfluß hin kommt, der aber bei so nahe benachbarten Grundwasserspiegeln (Abb. 4) wenig ausmacht. Ein wassererfüllter Höhlenkarst bietet wohl den äußerst entwickelten Fall eines mehrgliedrigen Grundwasserkörpers dar; gleichwohl werden darin auch an den engsten überkapillaren Strecken nur selten Geschwindigkeiten von mehr als 10 bis 20 Sekundenmetern auftreten ¹⁴⁾.

¹³⁾ Vgl. Weisbach, a. a. O., S. 952, oder Forchheimer, Hydraulik 1914, S. 30f. und S. 223f.

¹⁴⁾ Die größte Geschwindigkeit, die meines Wissens in der Karstliteratur genannt wird, ist die von 20 *m/sec.* Sie wird von Karl v. Terzaghi für den Gačkaursprung vertreten (Mitt. aus d. Jahrb. d. Ungar. Geol. Reichsanst. XX, 6, 1913. „Beitrag z. Hydrogr. u. Morphol. d. Kroat. Karstes“, S. 317). Diese viel zu wenig bekannte Abhandlung beruht auf Beobachtungen, die v. Terzaghi bei den Vorarbeiten für eine großzügige Wasserkraftanlage gemacht hat, wobei die Gefällsstufe zwischen der

Danach reicht folgende Tabelle aus, um eine Vorstellung von den möglichen Werten von D zu gewinnen, die sich als Differenz eines der aufgeschriebenen Werte h sogleich berechnen lassen¹⁵⁾. Die Geschwindigkeiten v sind in Sekundenzentimetern aufgeschrieben.

v	h (cm)	v	h (cm)
1	0.00051	500	127.5
100	5.1	600	183.6
200	20.4	800	326.4
400	81.6	1000	509.7

$$h = \frac{v^2}{2g}, \text{ die „Geschwindigkeitshöhe“}$$

Nimmt z. B. die Geschwindigkeit von 4 auf 1 Sekundenmeter ab, so hebt dies die Spiegelhöhe um $(81.6 - 5.1 =) 76.5$ cm. Die Unterschiede benachbarter Spiegel schwellen also in einem derartigen Grundwasserkörper leicht auf Dezimeter an und können selbst 2 m erheblich überschreiten¹⁵⁾.

Ganz allgemein auf Grund der Ergebnisse der Physik gilt von dem Verhalten dieser Spiegel und des Wassers darunter folgendes:

In Klüften, die in den unterirdischen Luftraum emporreichen, wird das Wasser so hoch gehoben, bzw. gehalten, daß der hydrostatische Druck der Wassersäule dem Wanddruck der Strömung gleich ist. Bei diesem Gleichgewicht der Drucke ruht also das Wasser in jeder Kluft. Steigt der hydrodynamische Druck, so hebt sich die Wassersäule mit ihrem Spiegel entsprechend. Auf längere Zeit ist ein Ruhezustand des Wassers in den aufwärts führenden Kluftfüllungen nur möglich, wenn unten eine stationäre, d. h. mit der Zeit nicht wechselnde Strömung herrscht. Eine solche könnten Niederschläge erzeugen, die aus anderen Klüften herabsickern, oder ein verschwindender Fluß. In jeder Kluft aber, in der selbst Wasser herabsickert, wird ein vorhandenes Gleichgewicht der Drucke gestört. Der Überdruck der erhöhten Füllung bewirkt eine Abwärtsbewegung, hebt also die Ruhe der Wassersäule auf: Die Kluft trägt

Gačkaschwinde und dem quellenreichen Küstensaum bei Zengg ausgenützt werden sollte. Trotz der technischen und geologischen Autorität des Verfassers halte ich obigen Wert für zu hoch, da die Berechnung auf den m. E. für Quellgebiete zu geringen Klüftigkeitswerten des Kalkes nach A. Grund beruht. Doch hat diese Einschränkung weiter nichts zu bedeuten.

¹⁵⁾ Eine zu den Quellen hin gebogene Fläche, welche die Mittelhöhen aller dieser einzelnen Spiegel verbindet, hat höchstens eine graphische, aber keine reelle Bedeutung als Unterlage für hinreichend genaue Schlüsse.

zur Speisung der Strömung unter ihr bei. Diese Abwärtsbewegung, die bei Spiegeln erfolgte, die durch das daraufsickernde Wasser emporstiegen, geht natürlich auch weiter, wenn es dahinkommt, daß Zufuhr von oben und Abfluß nach unten einander gleich werden und deswegen der Spiegel in einer höheren Lage Halt macht. Hört das Hineinsickern in eine Kluft über einer stationären Strömung auf, so sinkt der Spiegel, bis wieder mit dem Gleichgewicht der Drucke die Wassersäule ruht. Läßt allgemein der Hinzutritt von Wasser in das Hohlraumsystem nach, dann sinken alle Spiegel und in gleichem Maße bewegt sich das Wasser aus den nach oben mit den unterirdischen Lufträumen zusammenhängenden Klüften hinab in die Röhrenströmung. Mit dem Sinken aller Spiegel vermindert sich die Ausflußgeschwindigkeit an den Quellen. Eine geringere Zufuhr als früher genügt nun, um dem Sinken der Spiegel ein Ende zu machen und um wieder ein Gleichgewicht der Drucke und Ruhe der oberen Wassersäulen vorzubereiten.

Legt man in S_1 , S_2 und S_3 wagrechte Stollen an, so breitet sich in ihnen der Wasserspiegel ohne Höhenänderung aus. Treffen sich diese Stollen nicht, so kann man dreierlei Spiegelhöhen in nächster Nachbarschaft gewinnen. Reißt eine Spalte auf, die die Kluft unter S_1 mit jener über S_2 verbindet (oder wird eine solche Bohrung gemacht), so füllt sich der neue Hohlraum ganz mit Wasser und wird dauernd nach rechts durchströmt, indem das Wasser unter S_2 in die ältere Strömung zurückkehrt. Dasselbe ist zwischen S_3 und S_2 in entgegengesetzter Richtung möglich. Nach welcher Seite dabei die schon vorhandene Strömung geht, ist für diese Vorgänge ohne Belang.

Es können seitlich neben den hier im Ausschnitt gezeichneten Grundwasserverzweigungen gleichartige andere, jedoch in verschiedenen Höhen vorhanden sein, in denen auch die Spiegel trotz bestehender Querverbindungen ganz erheblich höher oder tiefer liegen. Das muß eintreten, wenn die Querverbindungen in der Tiefe spärlich sind und nur kapillare Durchmesser haben, und wenn die weiteren Verbindungen in der Höhe nicht immer von den Spiegeln erreicht werden. Die Bewegung in den kapillaren Verbindungen ist zu langsam, um überall die schwankenden Spiegelhöhen einander wenigstens soweit zu nähern, wie dies innerhalb des einen dichter verknüpften Hohlraumgeflechtes nach Abb. 4 möglich ist. Es kann sogar überhaupt jede kapillare Durchbewegung fehlen. Anders ist die Rolle vorhandener weiter Klüfte, die etwa in den Höhen S_1 , S_2 und S_3 die Verbindung zu einem benachbarten Grundwassergeflecht her-

stellen. Liegt dieses samt seinem Spiegel tiefer, so muß ein Überströmen dorthin eintreten, sobald die Höhen S_1 , S_2 und S_3 überschritten werden. Umgekehrt ist es möglich, daß ein benachbartes Hohlraumgeflecht, sobald seine Wasserstände höher steigen und weite Verbindungen vorfinden, an das aufgezeichnete Grundwasser der Abb. 4 Zuflüsse entsendet. In beiden Fällen werden die Spiegel auf die Dauer solchen Zusammenhanges einander genähert. Nichts ist sohin gewagter, als aus einzelnen Beobachtungen der Spiegel im Gebiete mehrgliedriger Grundwasserkörper Schlüsse zu ziehen auf die Spiegellagen dazwischen, und ohne weitere Anhaltspunkte hängt auch ein Schluß auf ein durchschnittliches Niedrigersein der Spiegel in irgend einer Richtung in der Luft¹⁶⁾. Da nicht für jede Spiegellage Quellöffnungen vorhanden sind, ist auch aus der Anordnung der Quellen allein kein stichhaltiger Schluß auf die Anordnung der Spiegel im Inneren ableitbar. Hier kann die Frage entstehen, ob man bei einem mehrgliedrigen Grundwasserkörper nicht lieber von unterirdischen Gerinnen, Flüssen u. dgl. sprechen sollte. Demgegenüber läßt es sich ernsthaft vertreten, daß man selbst dann mechanisch besser von Grundwasser spricht, wenn solche Geflechte, wie deren Abb. 4 im Anschnitt eines zeigt, völlig getrennt nebeneinander verlaufen. Mehrgliedrige Grundwasserkörper bestehen eben nach der zu vertretenden Ausdrucksweise entweder aus einem oder aus mehreren untereinander verknüpften Grundwassernestern oder -geflechten. Die Bezeichnung „Gerinne“ oder gar „Flüsse“ erscheint in jedem Falle deswegen wenig angebracht, weil das, was man sonst so nennt, ganz frei ist von der jedem Grundwasser eigentümlichen ruhenden oder langsamer bewegten Oberschicht, deren Verhalten im Gegensatz zur darunter folgenden, lebhafter durchfluteten Tiefe ausführlich geschildert wurde. Ferner pflegt man in Schottern ja auch nicht von Bächen und Rinnsalen zu sprechen, sondern von Grundwasser; physikalisch ist da gegenüber den mehrgliedrigen Grundwasserkörpern überhaupt kein Unterschied, während beide sich sehr von Bächen und Flüssen im allgemein verbreiteten Sinn unterscheiden¹⁷⁾. Endlich soll der Ausdruck Höhlenfluß jenen unterirdischen Gewässern vorbehalten bleiben, die ihre Hohlräume gewöhnlich nicht oder nicht mehr bis zur Decke erfüllen und im übrigen meist so wie viele obertägige Wasserläufe fließen. Je mehr sie ein

¹⁶⁾ Es können in benachbarten Grundwasserkörpern derselben Höhen- und Gesteinslage mit Wahrscheinlichkeit angenähert gleiche Spiegelhöhen auftreten, ohne daß der geringste Zusammenhang besteht.

¹⁷⁾ Sedimentation ist dem Grundwasser ebenso eigen wie Flüssen.

solches Verhalten annehmen, desto mehr sind sie nur eine Einzelerscheinung einer sich erschöpfenden Grundwasserhydrographie im Karste. Wenn man aber durchaus ein Grundwassergeflecht nach Abb. 4 auch als verzweigten Höhlenfluß bezeichnen will, so möge man sich auf die Fälle beschränken, wo dieses Geflecht isoliert, sehr schmal und lang gedacht wird und das ungeläuterte Wasser einer Flußschwinde wieder zutage führt. Nun werden sich derlei Übergangsformen als solche nicht immer ganz sicherstellen lassen. Diese Fragen haben übrigens nur bei jenen mehrgliedrigen Grundwasserkörpern Bedeutung, die in Kalken und Dolomiten vorkommen.

Was zum Unterschied von alledem ein einfacher Grundwasserkörper ist, sei an Abb. 5 erläutert. In ihr ist ein poröses Gestein, Schotter oder Sand, als Grundwasserträger angenommen. Würde man einen kleinen Ausschnitt daraus sehr stark vergrößert betrachten, so wiche das Bild nicht grundsätzlich von Abb. 4 ab,

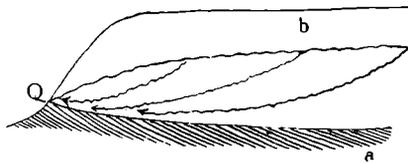


Abb. 5. Ein einfacher Grundwasserkörper und sein Spiegel. Er ist die Schnittlinie der Verbindungsfäche der Einzelspiegel. Auch eine grobe Schotterpackung läßt Einzelspiegel zu. Darunter die krummen Linien der Bewegungsbahnen. a undurchlässig, b durchlässig (Sand oder Schotter), Q Quelle.

die ihrerseits auf einer Verkleinerung beruht. Höchstens könnte es wegen der besonderen Rücksicht, die auf kapillare Verengungen zu nehmen wäre, noch verwickelter erscheinen.

Es sind also in Abb. 5 Vereinfachungen angewendet worden. Die erste besteht darin, daß die Verbindung der Einzelspiegel als „Spiegel“ des Grundwassers schlechtweg eingeführt ist. Für gewöhnlich zeichnet man ihn noch einfacher als glatte Kurve, während hier die Linie absichtlich zitterig gehalten ist. Nur in groben Schottern ohne feinkörnige Einlagerungen kann ein Spiegel um die einzelnen Gerölle herum auf kurzen Strecken zusammenhängen. Auch dieser Spiegel ist aber aus den in Abb. 6 erläuterten Gründen gewellt. In Sandsteinen gibt es vor Wellungen kaum Spiegel. Wodurch ist jene Vereinfachung ermöglicht? Durch die große Dichte der Hohlräume. Diese bewirkt, daß die Spiegel nahe nebeneinander liegen, was ihre Verbindung erleichtert; sie bewirkt aber auch, daß die Hohlraumquerschnitte im Vergleich zur Dicke des gesamten Grundwassers viel

weniger wechseln als in Abb. 4. Daher können auch die Höhenunterschiede benachbarter Spiegel nur ganz klein sein. Ihre Verbindung bedeutet nach keiner Richtung eine beträchtliche Abweichung von der Wirklichkeit: im Vergleich zur ganzen Grundwassermasse kann man, wie es auch üblich ist, ohne Gefahr von einem Grundwasserspiegel reden. Die große Dichte der Hohlräume hat noch eine Folge. Ist der Grundwasserträger oder -filter, wie der Techniker auch sagt, irgendwo angeschnitten, so wird seine ganze Fläche durch die vielen feinen Wasseraustritte fortwährend benetzt. Man kann nun bestimmen, welcher Rauminhalt Wasser in der Zeiteinheit aus der Flächeneinheit des Filtergesteins austritt und bezeichnet das Ergebnis als Filtergeschwindigkeit¹⁸⁾. Die Filtergeschwindigkeit ist ein einfacher und nützlicher Durchschnittswert und sicherer bestimmbar als die wirkliche mittlere Geschwindigkeit des Grundwassers in seinen Hohlräumen¹⁹⁾, während man die tatsächlichen Werte für die einzelnen Stränge überhaupt nicht erkennen kann. Aber noch eine vereinfachende Behandlung erlaubt uns die große Dichte der Hohlräume. Die Bewegungen des Wassers müssen ihnen natürlich folgen (Abb. 4) und die Klüfte und Röhren kümmern sich gar nicht um die idealen Bahnkurven, welche die Wasserteile einschlagen würden, wenn sie alle festen Hindernisse auf dem Wege zur Quelle ohne weiteres überall verdrängen könnten. Wo aber die Strecken des Hohlraumnetzes wegen seiner Dichte überall eng benachbart sind und sich oft kreuzen, da können und müssen die Wasserteile den idealen Kurven nahe bleiben, indem sie um sie feine Wellungen und Zickzacklinien beschreiben. Ohne beträchtlichen Fehler kann man dann die Wasserwege als die geometrischen Linien selbst errechnen oder konstruieren.

Man vergleiche damit den Fall von Abb. 4, wo vielleicht Menschen in den Hohlräumen streckenweise vorwärts kommen könnten; wie sinnlos wäre es da, die theoretischen Bahnen auszurechnen, längs derer das Wasser zur Quelle käme, wenn es sich durch einen kluftlosen, aber außerordentlich porösen Fels zu bewegen hätte.

Ein Grundwasserkörper, bei dem alle angeführten Vereinfachungen nicht nur erlaubt, sondern zum genauen Verständnis mancher Erscheinungen auch geboten sind, verdient jedenfalls die Benennung „einfacher Grundwasserkörper“. Solche sind auch

¹⁸⁾ Forchheimer, Hydraulik 1914, S. 420.

¹⁹⁾ Auch für ihre Bestimmung gibt es nur in einfachen Grundwasserkörpern feinere Methoden.

in ~~den bisherigen~~ Abbildungen zu dieser Schrift mit Ausnahme der Abb. 4 vorausgesetzt, und ~~zwar, wie~~ üblich, ohne die feineren, genaueren Wellungen der Kurven. Es könnte ~~vielleicht~~ manchem auffallen, daß in Abb. 5 ebenso wie in den anderen längs ~~des Spiegels~~ des Grundwassers keine Bewegungspfeile eingezeichnet sind, vielmehr alle Pfeile schräg untertauchen. Das muß selbst beim Grundwasser in Schottern so sein. Bei getrennten Einzelspiegeln können solche Pfeile von vornherein keine Oberflächenströmung bedeuten, für die ja der ~~Durchgangsraum~~ fehlt, sondern höchstens eine Strömungsrichtung parallel zur Spiegelkurve ~~nahe unter~~ ihr. Jede solche Bewegung aber wäre mit den Druckverhältnissen ~~und mit~~ der Bewegung bis in die Tiefen des Grundwassers physikalisch ~~unvereinbar~~, auch in groben Schottern. Der Grund liegt letzten Endes in rechnerisch geprüften Experimenten der Physik des Wassers²⁰). Daher kann hier nur kurz beleuchtet werden, was für Verhältnisse an der Oberfläche eines Grundwassers in groben Schottern herrschen, wenn es auch da keine fortlaufenden Oberflächenströmungen gibt.

In jedem einfachen Grundwasserkörper beherrschen die kapillaren Verengungen die Bewegung vollständig. Diese gilt daher auch in der Hydraulik als wirbelfrei (laminar). Das Fließen ist äußerst langsam, weil die in den Verengungen kapillar ganz niedrig gehaltene „Geschwindigkeit“ immer noch dem Querschnitt entsprechend viel größer ist als die Geschwindigkeit in den eingeschalteten weiten Strecken. Die Kapillarität macht sich aber auch an der Oberfläche eines Schottergrundwassers geltend. Diese Oberfläche sieht nicht überall so aus wie in Abb. 6a; denn nicht überall fallen die Berührungsstellen der Gerölle untereinander mit dem Niveau des Wassers zusammen. Tritt das ein, so erkennt man sofort die Einzelspiegel und jede weitere Erwägung erübrigt sich. An vielen Stellen wird die Spiegelfläche vielmehr die teils eingetauchten (dunkel schraffierten), teils aufragenden (hell schraffierten) Gerölle so schneiden, daß der Anblick von Abb. 6 b und c entsteht. Die Berührungsstellen der Gerölle der Schötterpackung liegen im ersten Fall über, im zweiten Fall unter dem Spiegel.

Die Kapillarität zieht nun das Wasser an den Geröllen empor, steiler an den eingetauchten, flacher an den auftauchenden. Aber

²⁰) Vgl. die eingangs erwähnte, noch allgemein verständliche Schrift von Slichter. Diese beruht u. a. auf zwei streng wissenschaftlichen Abhandlungen von King und Slichter selbst, im Annual Report XIX, 2, U. S. A. Geol. Survey, worin Slichter den theoretischen Teil seiner Lehren mit allem Rüstzeug der Physik veröffentlicht hat.

auch zwischen den Schottersteinen steht das Wasser ungleich hoch, und zwar in den Engen höher als in den „Weiten“. **Daher bilden** sich in den Weitungen zwischen den **Geröllen** kleine Becken der gespannten Oberfläche, wie **Abb. 6c** zeigt, durch Rücken in den Engen voneinander **getrennt**. **Benachbarte** Becken ungleicher Größe sind auch **untereinander** verschieden hoch, und zwar ist die Oberfläche der **Kleinern** als Ganzes höher emporgezogen als die der **größeren**. Hier seien auf Grund von Versuchen mit Wiener Hochquellenwasser einige Zahlen mitgeteilt, die die Größenordnung veranschaulichen sollen, um die es sich handelt. Noch **wenn die** Enge zwischen den Geröllen 0.5 cm beträgt, die **Weitung** aber einen dreibis viermal so großen Durchmesser hat, kann man mit freiem Auge die Anschwellungen des Spiegels in den Engen wahrnehmen, die die Vertiefungen in den benachbarten Weitungen voneinander scheiden. Messen die engsten Abstände der Schotteraufragungen nur 1 bis

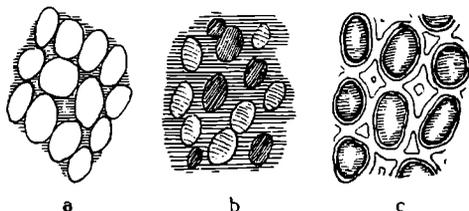


Abb. 6. Aussehen des Grundwasserspiegels in Schottern, von oben gesehen. Vgl. den Text.

2 mm und die weitesten mehr als 0.6 cm , so überragen die Rücken des Wassers den Grund der geschlossenen Spiegelmulden bereits um mehr als 1 mm . Zwischen auftauchenden Schottern von Eiergröße bilden sich oft Höhenunterschiede von 5 mm im Wasserstande aus. Noch häufiger muß das zwischen eingetauchten Geröllen der Fall sein, die das Wasser stärker emporziehen. Die Böschungen der Oberflächen unter den dargestellten Verhältnissen betragen zwischen den Geröllen durch leicht 5° und mehr. Solchen Unebenheiten gegenüber schwindet jede örtliche Wirkung der Druckunterschiede ganz, welche die Spiegel zur Quelle hin durchschnittlich niedriger werden läßt. Diese Abnahme bemißt sich oft nach Tausendsteln oder Hundertsteln und ist am Wasser zwischen benachbarten Schottern überhaupt nicht wahrnehmbar. Außer unmittelbar an der Quelle, wo die steilste Neigung der Spiegelkurve herrscht, können die Druckunterschiede nirgends Wasser durch die kapillaren Anschwellungen zwischen den Schottern treiben. Daraus muß man folgern, daß in der Nähe der Quellen vielleicht doch spannenlange Gerinne zwischen den Geröllen

an der Spiegelfläche hinabrieseln. Es ist das aber mehr unsichere Vermutung als Beobachtung.

Sowie die Mächtigkeit des Grundwassers in der Geröllpackung sich ändert, verlegen sich alle „Ufer“ der auf- und der eintauchenden Gerölle auch in der Wagrechten. Damit können Becken und Rücken bis zu völligem Platzwechsel verschoben werden. So sind die Kapillarkräfte die einzigen, die überall Wasser zwischen den Geröllen an die Oberfläche hin- und herschieben, natürlich in allen denkbaren Richtungen. Ob übrigens das Grundwasser steigt oder fällt, immer zweigen die Linien des Fließens von der Oberfläche in Winkeln nach der Tiefe ab. Doch geht ihr weiterer Verlauf meist nicht so steil hinab, wie die überhöhte Abb. 5 zeigt.

Zwischen den Grenzfällen des mehrgliedrigen und des einfachen Grundwasserkörpers sind theoretisch alle Übergänge denkbar. Man kann aber nicht sagen, daß sie geologisch häufig sind. Ein zwischenliegender Fall wird als oft vorkommend angenommen, ohne daß er auch so oft sichergestellt wäre: nämlich ein Grundwasserkörper in Spalten, die nicht dicht beieinander liegen, aber doch eine Gleichmäßigkeit ihrer weiten Maschen aufweisen und geringe Querschnittsänderungen besitzen. Demgemäß gibt es keine Filtergeschwindigkeit im früher erwähnten Sinn, noch geometrische Bewegungskurven, wohl aber einen gefahrlos konstruierbaren „Spiegel“ im Sinne einer einheitlich gekrümmten Verbindung der Einzelspiegel. Daß man einen solchen Grundwasserkörper, der als „ziemlich einfacher“ benannt sei, so häufig annimmt, dürfte mit der Leichtigkeit zusammenhängen, mit der man hinter den Quellen in Profilzeichnungen eine wohlgekrümmte Oberfläche des Grundwassers annehmen kann²¹⁾.

Ziemlich einfache Grundwasserkörper sind in jenen Gesteinen zu erwarten, die weder porös noch rasch löslich, wohl aber spalten- oder kluffreich sind.

Mit der Voraussetzung sehr ausgedehnter Grundwasserkörper „einfacher“ und „ziemlich einfacher“ Art im Karst rechneten bis zuletzt die Ansichten A. Grund's. Demgemäß nahm er auch einen einheitlichen, ebenso ausgedehnten Karstwasserspiegel an. Er war dabei vom richtigen Streben ausgegangen, das von einigen Forschern im Karst gefundene Grundwasser, welches in den allgemeinen Anschauungen über Karsthydrographie entschieden zu kurz gekommen war, in seiner Bedeutung hervorzuheben. Er hätte dies aber auch mit

²¹⁾ Kerner (a. a. O.) nimmt in seinen vielen schönen Schnitten durch wirkliche Quellen auch in Kalken Mitteldalmatiens ziemlich einfache Grundwasserkörper an, im Text aber eher das, was hier als mehrgliedrig bezeichnet wurde.

einer Untersuchung der Annahme isolierter, mehrgliedriger Grundwassernester verbinden sollen²²⁾). Aber eine gewisse tragische Hast, welche einen aus Grunds einschlägigen Schriften anzuwehen scheint, hat bewirkt, daß sein Eintreten auf viele Jahre zu einer leidenschaftlichen Ablehnung seines Grundwassers im Karst führte, ja daß selbst einfache Dinge im günstigsten Fall auf das tote Geleise „offener Fragen der Karsthydrographie“ abgeschoben wurden. Es wäre unrecht, daran zu zweifeln, daß Grund mit Leichtigkeit den meisten seiner Fehlschlüsse entgangen wäre, wenn er noch ein, zwei Jahre den hier berücksichtigten Überlegungen gewidmet hätte.

Der Führer unter Grunds Widersachern, F. Katzer, war selbst in dem Irrtum Luegers befangen und machte nicht zuletzt deshalb dem Standpunkte Grunds das bekannte Zugeständnis mit dem „seichten Karst“. Sein teilweiser Erfolg beruhte darauf, daß er sich für den „tiefen Karst“ an wirkliche physikalische Erkenntnisse hielt. Da aber Grund die Inkosequenz dieses Vorgehens ausnutzte, wurde der Streit fruchtlos zum Schaden gerade der gediegeneren Argumente in Katzers Darlegungen.

Nach uneingeschränkter Anerkennung der wissenschaftlichen Absicht und der persönlichen Fähigkeiten, die wir Grund auf diesem Gebiet zuschreiben müssen, dürfen dem Streben nach Erkenntnis weitere Rücksichten nicht auferlegt werden. Dieser Forscher war von der irrigen Meinung geleitet, daß Vereinfachungen, die bei der Darstellung „einfacher Grundwasserkörper“ üblich und erlaubt sind, auf die Verhältnisse des Karstes übertragbar seien, weil schließlich alle Fälle von Bewegungen unterirdischen Druckwassers nur „Modifikationen“ desselben physikalischen Vorgangs sind. So richtig der zweite Satz ist, so liegt in der ganzen Auffassung eine Verwechslung der nicht immer zulässigen Vereinfachungen mit den Naturgesetzen. Demgemäß war der Karstwasserspiegel im reinen Kalk für Grund kein Problem, sondern eine Tatsache mit recht einfachen Eigenschaften²³⁾, ebenso die hydrographische Wegsamkeit der engsten

²²⁾ Schon Martel hatte im Werke: „Les Abîmes“ getrennte Spaltenetze angenommen, die wenigstens zum Teil im Sinne dieses Aufsatzes mehrgliedrige Grundwassernester wären. Er hat sich zugleich entschieden gegen die Annahme von „nappes souterraines continues“ und „étendues“ des Wassers in klüftigem Gestein selbst über der undurchlässigen Unterlage ausgesprochen (a. a. O. S. 531f.).

²³⁾ So schreibt er noch in Pencks Geogr. Abh. IX, 3 (1910), S. 160: „Alle Höhlenflüsse fließen also ebenso wie das Kluftwasser (hiebei meint Grund wohl nur dessen höchste Teile) in einem idealen Niveau, welches ich eben Karstwasserspiegel genannt habe“. Man vergleiche bezüglich des Kluftwassers das oben zu Abb. 4 und 5 Gesagte, da hier kein Raum zur Behandlung der Höhlenflüsse ist.

Klüfte im Kalk²⁴). Daraus folgte dann freilich eine Zusammengehörigkeit all der Einzelspiegel über große Flächen und eine entsprechende Ausdehnung des Karstwasserspiegels. Ja Grund hielt die regelmäßigen von Slichter untersuchten Bahnkurven im Karst für möglich und wahrscheinlich²⁵). Zugleich war er aber nicht der Meinung, daß die Adern des Karstwassernetzes besonders dicht seien. Vielmehr wußte er, daß man sehr tief unter seinen Karstwasserspiegel bohren könne, ohne Wasser anzufahren; ja er glaubte, solche Bohrungen könnten erst bei einer Unterteufung von weit über hundert Metern mit Sicherheit das Karstwasser treffen. Daraus ergibt sich, daß Grund jene Bewegungskurven völlig mißverstanden hat, aber als eine Erscheinung des „normalen Grundwassers“ ohne weiteres nachträglich (1910) für den Karst zu übernehmen bereit war. Als sich nämlich Grund genötigt sah, mit Rücksicht auf physikalische Darlegungen, das „stagnierende Grundwasser“ aufzugeben, hat er nicht auch die Folgerungen fallen gelassen, die er früher daraus gezogen hatte, sondern sie weiter verwendet. Um Beobachtungen zu entsprechen, die gegen seine Theorie, daß im reinen Kalk das Karstwasser unter einem einheitlichen Spiegel zusammenhänge, geltend gemacht wurden, nahm er mehrfach verborgene Dolomitbarren an, die von unten in sein Karstwasser hineinragten; diese nahm er ferner ohne Beweis als undurchlässig an und endlich schrieb er ihnen nach wie vor die Wirkung zu, daß das Wasser hinter ihnen stagniere oder sie umfließen müsse. Grund scheint auch nach Kenntnis der Abhandlung Slichters nicht erkannt zu haben, daß solche Barren in so und so vielen Fällen, auch wenn sie vorhanden und undurchlässig sind, vom Grundwasser einfach aufsteigend überquert werden. Denn der Weg zu einer näheren Quelle kann selbst beim Zwang zu aufsteigender Bewegung weniger Reibungsverlust erfordern als die Ablenkung zu einer fernerer. Weil sich Grund das Karstwasser flächenhaft

²⁴) Ebenda S. 172 heißt es: „Nur eine absolut klufteleere Kalkpartie ist undurchlässig.“ Doch hat er (S. 152) wenigstens die mikroskopischen Fugen nicht als Klüfte angesehen.

²⁵) Ebenda S. 162, Anm. 5, heißt es in bezug auf die Bewegung der Höhlenflüsse: „Die Bewegung besteht in einem Fließen in horizontaler Richtung“ (was eine unerlaubte Vereinfachung ist. L.), „unterscheidet sich also von der normalen in parabolischen Druckbahnen sich vollziehenden Grundwasserzirkulation“ (folgt ein Hinweis auf Slichter, der diese Bahnen übrigens nicht parabolisch nennt). „Im jugendlichen Karst mit reiner Kluftzirkulation dürfte die normale Grundwasserbewegung vorhanden sein; ebenso dürfte sie unter dem Niveau der Höhlenflüsse herrschen.“ Jene Kurven, die das Wasser innerhalb der einzelnen weiten Karsthohlräume beschreibt, sind erst Gegenstand späterer Forschungen und wurden als Problem zu Grund's Zeiten noch nicht gestreift.

sehr ausgedehnt dachte, so nahm er an, ganze Seen und Karstmulden, auch Poljen seien darin eingebettet wie ein Brunnenschacht im Grundwasserstrom eines Schotterfeldes. Dabei zeigte er von dem Verhalten eines Brunnens keine klare Vorstellung und beachtete nicht genug, wo sein Vergleich aufhörte, berechtigt zu sein²⁶⁾.

Es ist hier nicht der Ort, die Fehler, die deswegen vorgekommen sind, zu erörtern. Hingegen ist es von Bedeutung, daß sich Grund auf die Ergebnisse der hydrographischen und hydrotechnischen Messungen Ballifs²⁷⁾ zu stützen versucht hat. Liest man nämlich Ballifs Werk nach, so entdeckt man, daß seine Ergebnisse in Grunds Abhandlungen sehr ungenau wiedergegeben sind und in mancher Beziehung das Gegenteil von dem enthalten, was man nach der Darstellung Grunds mit Fug und Recht denken müßte²⁸⁾. Tatsächlich kann man Ballifs Beobachtungen und Messungen genug Nachweise entnehmen, daß es gerade auch beim Polje von Livno, auf das sich Grunds Theorie am öftesten stützt, mehrere ganz oder teilweise getrennte Grundwasserkörper gibt, die sehr verschieden hohe Spiegel haben²⁹⁾, und zwar innerhalb des einen nach Grund durch unterirdische Dolomitbarren umfaßten Einzugsgebietes, in welchem er das Vorhandensein nur eines Karstwasserspiegels vertritt. Wie die älteren Untersuchungen, so bieten auch die neuen und neuesten Einzelforschungen fortgesetzt nur Beispiele für das Vorkommen kleinerer Grundwassernester³⁰⁾ im zusammenhängenden Kalk. Sie können die Form recht langer Röhrenstränge haben.

Grunds Versuch war deshalb zu solchen Mißerfolgen verurteilt, weil er die Möglichkeiten verschiedenartiger Grundwasserkörper nicht auseinander hielt. Nicht die Beobachtungen haben seine Annahme eines den zusammenhängenden Kalk durchziehenden Karstwasser-

²⁶⁾ Karsthydrographie 1903, S. 107 bis 109, 181 bis 185.

²⁷⁾ Wasserbauten in Bosnien und der Herzegowina. Wien, Holzhausen, 1896, Tafel III, bei S. 42.

²⁸⁾ Vgl. Anm. 26 und Pencks Geogr. Abh. IX, 3, 1910, S. 190f. Die Abweichung vom wirklichen Inhalt der Beobachtungen und Messungen Ballifs ist so groß, daß sie der ganzen Abwehr Grunds gegenüber der Kritik durch Katzer in der Frage der Poljengewässer den Boden entzieht.

²⁹⁾ Die Unterschiede der gleichzeitigen Höhen betragen meines Erachtens mindestens 30 bis 40 m.

³⁰⁾ Vgl. F. Kerner, a. a. O., S. 153, für Mitteldalmatien, A. E. Forster für Krain (Mitt. Geogr. Ges. Wien 1922, S. 29). Auch die Ergebnisse der Expedition der Wiener Akademie der Wissenschaften in die „Eisriesenwelt“ im Tennengebirge sprechen dafür: Ausführlicher Bericht usw. IV. Morphologische Beobachtungen von O. Lehmann (Speläolog. Jahrbuch III 3/4 1922, 83f. 94).

spiegels unvermeidlich gemacht, sondern jene Unterlassung. Sonst hätte er finden müssen: je reicher ein Grundwasserkörper unbekanntem Umfangs in einem Gebiete gegliedert ist, desto wahrscheinlicher ist die zeitweise oder völlige Selbständigkeit kleinerer Grundwassernester in der ganzen Gegend. Es gilt heute nicht mehr, einzelne besonders schmale und selbständige Karstgerinne, die unter Druck durchströmt werden, als Gegensatz zu mehrgliedrigen Grundwassergeflechten von einigen Dutzend Quadratkilometern aufzufassen³¹⁾; es beruht vielmehr alles Verständnis der Hydrographie der Karstquellen auf der Kenntnis des Gemeinsamen solcher nur in der Größe verschiedener Vorkommnisse.

Die an der Spitze dieses Abschnittes gebotene Dreiteilung entspricht in der Natur so ziemlich der üblichen Unterscheidung von „Grundwasserquellen“ im engeren Sinne, von „Felswasserquellen“ oder im weiteren Sinne gemeinten „Spaltenquellen“, mit Absonderung der Karstquellen, überhaupt aller Höhlenquellen.

B. Nach der Bewegungsrichtung des Grundwassers unmittelbar hinter den Quellen sind zu unterscheiden:

1. Absteigende Quellen;
2. Quellen, zu denen gleichzeitig Wasserstränge herab- und heraufsteigen;
3. aufsteigende Quellen.

Die Lageveränderung, welche eine unterirdische Wasseransammlung, die Quellen nicht vulkanischer Herkunft speist, im ganzen mitmacht, ist in allen Fällen ein Absteigen. Daher kann diese Einteilung der Quellen nur von den Verhältnissen gleich hinter den Quellen ausgehen. Absteigende Quellen sind nur in wenigen Arten verbreitet. Dazu gehören jene, wo die undurchlässige Unterlage des Grundwassers gleichsinnig zur Quelle hin geneigt ist, ferner die mit den „Fontanili“ wesensgleichen Grundwasserquellen in schiefen Schotterebenen, endlich die Karstquellen, welche ein absteigender Hohlraumstrang zutage führt. Die letzteren sind aber nicht bestandfähig und daher seltene Gebilde. Denn das Wasser nagt bei zeitweilig unzureichendem Druck in den Boden der absteigenden Röhre eine Schlucht. Dadurch gerät die Quelle in den Hintergrund einer Höhlenschlucht oder -klamm, aus der durch Deckeneinsturz ein Sacktal oder -tälchen hervorgeht.

³¹⁾ In Grunds Werken handelt es sich freilich um Grundwassergebiete, die z. T. über manches Hundert Quadratkilometer hin ausgebreitet sind.

Alle anderen bisher als absteigend bezeichneten Quellen gehören zur nächsten Gruppe, für die noch Namen zu suchen sind. Beispiele bieten die Abb. 1, 2, 3 und 5. Ob das zur Quelle absteigende oder das zugleich aufsteigende Wasser überwiegt, hängt von verschiedenen Umständen ab. Höhere Temperatur und größere Zwischenräume des Grundwasserträgers vermindern die Reibung. Beides kommt häufiger dem aufsteigenden Wasser, besonders an Schichtfugen und Bruchflächen, zugute. Man kann diese Quellen als „zusammengesetzte“ bezeichnen. Sie können vielleicht auch bei mehrgliedrigen Grundwasserkörpern vorkommen, z. B. wo dicht hinter einer Karstquelle ein aufsteigender Höhlenstrang sich mit einem absteigenden vereint. Doch dürfte dieser hier nur gedachte Fall wohl sehr selten sein.

Für die häufigen zusammengesetzten Quellen aus einfachen und manchen ziemlich einfachen Grundwasserkörpern soll ein bequemerer Name gesucht werden, der ihrer hydrographischen Einheit und Beschaffenheit einigermaßen gerecht wird. Denn es ist ja ganz gleichgültig, ob ein Teil des Grundwassers deswegen aufsteigen muß, weil die undurchlässige Unterlage aufgebogen ist (Abb. 1) oder weil eine Verwerfung oder Schichtenanlagerung dasselbe bewirkt (Abb. 2). Dabei könnte in Abb. 2 die Verwerfung statt nach rechts nach links geneigt sein; das täte nichts zur Sache. Auch eine Quelle nach Abb. 3 gehört ganz zu dieser Gruppe. Die innere Zusammengehörigkeit dieser Fälle schimmert selbst durch die Mannigfaltigkeit der bei maßgebenden Verfassern gebräuchlichen Benennungen, von denen in knapper Übersicht einige vorgeführt seien.

Tatsache: Quelle, gemäß:	Keilhack a. a. O. S. 311, 320 ff. 325	Kerner a. a. O. Erläuterung zu Taf. X und XI	Höfer a. a. O. S. 90 bis 92	Vor- schlag
Abb. 1	Überfallquelle	Überfallquelle	Überfall- oder Überlauf- quellen*)	Überfallquellen
Abb. 2 verändert, Neigung der Verwerfung nach links abwärts	Stau- o. Barriere- quelle, wo eine Schichtenanlage- rung den Stau schafft, sonst auch: „Verwer- fungsquelle“	Stauquelle		
Abb. 2 unverändert		Rückstauquelle		
Abb. 3	Überfallquelle	—		

*) Nur für die unveränderte Form des Falles, Abb. 2, und zwar bei Schichtenanlagerung belegt.

Man sieht, daß bei Höfer die Zusammenfassung des Zusammengehörigen ziemlich durchgreifend ist, obwohl er sich den Stau ruhend vorstellte. Ferner erkennt man, daß die Unterteilung anderer Verfasser nur auf geologische Unterschiede zurückgeht³²⁾. Das geschieht auffälligerweise nicht mit eigentlich geologischen Ausdrücken, sondern solchen aus der Physik und Technik der Wasserbewegung. Davon wird noch zu reden sein.

Der erste Vorschlag, der sich hier aufdrängt, lautet einfach, die ganze Gruppe „Stauquellen oder Überfallquellen“ zu nennen. Denn der Stau ist die Voraussetzung, der Überfall oder Überlauf eine Folge. Schon darin käme zum Ausdruck, daß es sich um ein und dasselbe handelt. Außerdem ist dieser Vorschlag dem hergebrachten Wortschatz entnommen und beseitigt die mangelnde Einheitlichkeit, welche die Übersicht uns verrät, indem er das Gemeinsame verwertet. Die geologischen Verschiedenheiten, die uns hier nichts angehen, können durch den Hinweis auf das in früheren Abschnitten Gesagte berücksichtigt werden. Es genügt völlig, z. B. von einer Bruchstauquelle, bezw. von einer Muldenstauquelle zu sprechen, um mit wenig Worten das an sich nützliche Streben der von Kerner angewandten Unterteilung zu befriedigen.

Ein anderer Gesichtspunkt ist, aufs Ganze zu gehen und sich von den in der Übersicht gestreiften Verhältnissen der Benennungsweisen durch Wahl eines neuen Ausdrucks abzuwenden. Als solchen empfehle ich „Überfließquellen“. Man entgeht damit den Nachteilen, welche mit dem Gebrauche der Worte „Stauquelle“ und „Überfallquelle“ verbunden sind. Es gibt nämlich Grundwasseranstauungen, die nur aufsteigende Quellen entsenden. Auch sie sind „Stauquellen“. Diese aber sind in obiger Gruppierung nicht gemeint. Das Wort Stauquelle sagt an sich überhaupt nichts von den Bewegungsrichtungen aus. Bedenklich ist auch das Wort Überfallquelle. Als „Überfall“ bezeichnen Physiker und Hydrauliker den Wasserfall, der beim randlichen Überfließen eines Gefäßes oder dort entsteht, wo ein Fluß über ein Wehr fällt. Man sieht dann, daß sich ganz nahe jenem Wasserfall eine Senkung des offenen Spiegels mit bestimmter Krümmung ausbildet, die oft schon in geringer Entfernung oberhalb keinen merklichen Einfluß auf die allgemeine Spiegelneigung hat. In jenem Gefäß z. B. bleibt gleich im Anschluß an

³²⁾ Ich glaube nicht, daß es Kerner bewußt war, daß im Falle der Abb. 2 bei besonders spitzem Eingekeiltsein des Wassers unter der Verwerfung oder unter der Schichtenanlagerung ein stagnierender Grundwasserzwickel entstehen könnte.

den Überfall der Spiegel der Wagrechten asymptotisch nahe. Das ist etwas ganz anderes als der Überfall jener Quellen, deren Grundwasser ja die allgemeine und weitgespannte Spiegelneigung besitzt, die mit der Bewegung des Wassers in allen seinen kommunizierenden Hohlräumen verbunden ist. Außerdem muß jetzt schon bemerkt werden, daß man bei Höhlenquellen den echten physikalischen Überfall öfter findet, der aber in dem bisherigen Wortgebrauch nicht inbegriffen ist. Allen Verwicklungen beugt der Ausdruck Überfließquelle vor. Wer aber doch lieber „Stauquellen“ oder „Überfallquellen“ sagt, kann auch dies tun, ohne Unklarheit zu stiften, wenn er nur weiß, was es mit diesen Worten auf sich hat und wenn er es deutlich macht.

Die aufsteigenden Quellen sind nicht so ungleichartig benannt worden, daß Anlaß wäre, darüber ausführlich zu sprechen. Es sind Quellen, bei denen durch die geologischen Verhältnisse der Eintritt

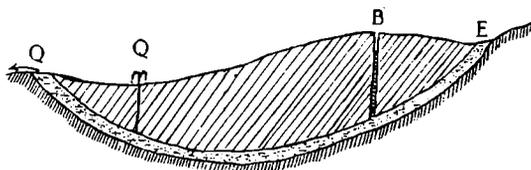


Abb. 7. Artesische Quellen.

Q, Q Quellen; E Einzugsgebiet der Quellen; B artesischer Schöpfbrunnen.

absteigenden Wassers unmittelbar in die Quelle ausgeschlossen ist. Bei einem einfachen Grundwasserkörper und bei einem ziemlich einfachen in entsprechenden Klüften ist das nur möglich, wenn die obere Grenze des Grundwasserträgers gleich hinter der Quelle in die Tiefe taucht und von einem anderen Gestein bedeckt ist, das keinerlei Wasser in der Quellnähe an den Tag läßt. Diese Lagerung zeigt Abb. 7. Sie wird allgemein als artesische bezeichnet, deren bewußte Verwertung in Europa im Mittelalter vom Artois ausgegangen zu sein scheint.

Das Deckgestein braucht nicht frei von Klüften zu sein. Solche entsenden oft die schönsten artesischen Quellen (rechtes Q in Abb. 7) oder sie sind vom hydrodynamischen Druck bis in die Nähe der Oberfläche mit Wasser gefüllt (B in Abb. 7). In solchen Klüften oder in Brunnenschächten an gleichartiger Stelle steigt das Wasser nur in dem Maße empor, als es abgeschöpft wird. Reicht das Wasser in natürlichen Quellen dieser Art bis nahe genug an den Tag, so liegt eine Schöpfquelle vor. Solche sind nicht minder artesisch als

die Springquellen (rechtes Q) oder die bloß aufwallenden Quellen (linkes Q) mit einem abfließenden Gerinne.

Artesische aufsteigende Quellen müssen aber nicht aus einfachen Grundwasserkörpern hervorkommen; vielmehr gibt es auch Gesteinslagen mit mehrgliedriger Wasserführung in gleichartiger Einschaltung zwischen Gesteinen unten und oben, die mindestens im Umkreise der Quelle ganz undurchlässig sind. Hat das Deckgestein keine oder nur wenige durchgängige Klüfte, so spricht man von einem durchaus „gespannten Spiegel“ des artesischen Wassers. Es fragt sich, ob dieser Ausdruck glücklich ist. Jedenfalls gehört eine solche eigens benannte Oberseite des Wassers gar nicht zum Wesen eines artesischen Grundwassers. Denn ist das senkrecht geklüftete

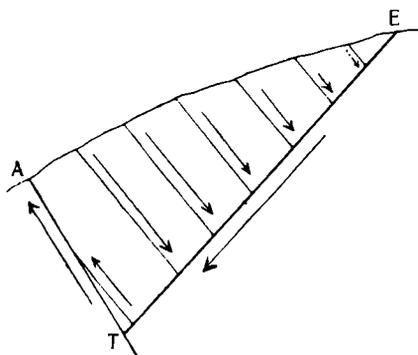


Abb. 8. Aufsteigende Kluftquelle (A) und die Bewegungsrichtungen im zugehörigen Grundwasserkörper.

E oberes Ende des Einzugsgebietes der Quelle.

Deckgestein genügend dick erhalten, so können beliebig viele offene Spiegel, gemäß B in Abb. 7, vorkommen, ohne daß der Ersatz eines durchgängig gespannten „Spiegels“ durch noch so viele ungespannte Einzelspiegel etwas an der Eigenart und der Beschaffenheit der Quellen ändern würde, es sei denn, daß der „artesischer Druck“ sogar steigt, wenn merkliche Wassermengen in all den Klüften zusickern. Umgekehrt herrscht schon in jedem gewöhnlichen absteigenden Schottergrundwasser auf der Unterseite jedes eingetauchten Gerölles ebenfalls ein „gespannter Spiegel“ mit freilich sehr schwachem Druck. Wir finden uns daher damit ab, daß die übliche Ausdrucksweise vom gespannten Spiegel eigentlich nur den auffallend hohen Druck würdigen will, unter dem das tiefe artesischer Wasser steht.

Aus mehrgliedrigen oder auch aus ziemlich einfachen Grundwasserkörpern in geeigneten Klüften können aufsteigende Quellen gemäß Abb. 8 hervorgehen. Sie zeigt dies an einem ziemlich einfachen

Grundwasserkörper. Höfer spricht in einem solchen Fall von Spaltenquellen und behandelt sie im Anschluß an die artesischen. Das Gestein über der von E nach T und über der von A über T führenden Klufffläche braucht hier ebenfalls nicht fugenfrei zu sein; ja es ist beim Vorkommen einer kräftigen Quelle an der Stelle A sogar wahrscheinlicher, daß das Wasser nicht nur von E aus in die Kluff E T gelangen kann, sondern an mehreren anderen genügend weiten Fugen. Verlaufen sie so wie in Abb. 8, so findet bei A nur eine aufsteigende Bewegung statt. Stünden die Fugen zwischen E und A senkrecht auf der Richtung A T, so würde auch absteigendes Wasser in die unmittelbare Nähe der Quelle gelangen können; diese wäre dann eine zusammengesetzte Quelle eines ebenfalls ziemlich einfachen Grundwasserkörpers.

Als aufsteigende Quellen müssen besonders viele Karstquellen angesprochen werden, zunächst die periodisch tätigen Speilöcher (Estavellen), in deren aufsteigenden Zuführungsröhren das Wasser von einer darunter vorhandenen Strömung bei erhöhtem Druck bis zum Ausfluß emporgetrieben wird. Warum sie Höfer unter den „abfallenden“ (= absteigenden) Quellen behandelt (S. 98), „obzwar hier auch noch der artesische Druck mitspielt“, darüber könnte ich nur eine Vermutung wagen. Er hat nämlich unter der abgebildeten Estavelle ein absteigendes Stück einer Höhlenströmung eingezeichnet; aber die Estavelle wird doch nicht erst dadurch zu einer aufsteigenden Quelle, daß der zugehörige Höhlenast gerade dort zu einem Siphon ansteigt, wo sich das Zuführungsrohr abzweigt. Zu den aufsteigenden Quellen gehören alle jene, auch ständigen Karstquellen, die in einer Quelhöhle ein Becken bilden, dessen Wasserzuführung nur von unten erfolgt. Diese Quellbecken können dabei ihren obertägigen Lauf mit einem großen oder kleinen Wasserfall beginnen, einem echten Überfall über die niedrigsten Stellen des Beckenrandes. Nur durch Tauchen in einen oft steilen Siphonast ist das Eindringen in das unterirdische Einzugsgebiet solcher Quellen möglich. Umgekehrt verrät zu Zeiten stärkeren Druckes das Aufwallen der Quellbecken die Richtung der Zufuhr. Solche Quellen dürfen nicht wegen des Überfallstrahles an die Seite der „Überfallquellen“ im üblichen, aber andersartigen Sinn gestellt werden³³). Denn der echte Überfall-

³³) Die berühmte Vaclusequelle, ein schönes Beispiel einer aufsteigenden Karstquelle, wird von Keilhack unter den absteigenden Quellen, und zwar als „Überfallquelle“ dargestellt. Er tut das aber nicht wegen des bei ihr nur periodischen Überfallstrahles, sondern weil die Neokom-Kalkmasse des dortigen Karstes in einer weitgespannten Mulde undurchlässigen Gesteins ruht und weil die undurchlässige

strahl hier ist nur eine Erscheinungsform des Quellaustrittes, wie bei artesischen Quellen die springenden Strahlen oder das stille Aufsteigen zur Schöpfquelle oder auch das einfache Abfließen auf geneigter Unterlage, das auch die absteigenden und Überfließquellen zeigen.

Im ganzen hat man den Eindruck, daß die Gliederung in auf- und absteigende Quellen ursprünglich überhaupt nur für einfachere Grundwasserkörper, keineswegs für Karstquellen gedacht war. Selbst wenn man bei der Übertragung auf diese Quellen Fehlgriffe vermeidet, haftet ihr etwas Gekünsteltes an, wie es an meinem erfundenen Beispiel einer zusammengesetzten Karstquelle (S. 21) deutlich wird. Überlegt man sich, aus welchen Beobachtungen die bloße Zweiteilung der Quellen ihre Nahrung gezogen haben kann, so kommt man darauf, daß fast alle Quellen als absteigend bezeichnet wurden, wo die Spiegelverbindung des Grundwassers oder sein „Spiegel“ schlechtweg zur Quelle herabsteigt, und daß alle als aufsteigend bezeichnet wurden, wo ein „gespannter Spiegel“ zur Quelle emporsteigt. Weil innerlich fehlerhaft, konnte dieses Merkmal nicht immer festgehalten werden. So behandelt Höfer (a. a. O. S. 108) mit Recht eine Quelle nach Abb. 8 als aufsteigend, obwohl sich die Verbindung der Einzelspiegel zur Quelle senken muß. Die gleiche Ausnahme muß aber auch z. B. für alle aufsteigenden Karstquellen gemacht werden, wo die Durchschnittshöhen der Spiegel ebenfalls zu den Quellen hin geringer werden. Damit erledigt sich der Gedanke, es bei der alten Zweiteilung unter Hinblick auf die Spiegel zu lassen. Es wäre schon sprachlich kaum erträglich, daß man einverständlich absteigende Spiegel meint und absteigende Quellen sagt. Wenn man sich aber zu etwas derartigem entschließen will, dann muß wenigstens eine allgemeine Konsequenz das Einverständnis zu einem solchen bedenklichen Verfahren sichern. Somit entspricht allein die vorgeschlagene Dreiteilung in absteigende Quellen, in Überfließquellen, zu denen gleichzeitig Wasserstränge herab- und heraufsteigen, und in aufsteigende Quellen allen hier zu stellenden Anforderungen.

Unterlage im Bereich der Vaclusequelle ihren tiefsten Rand hat. Diese Stelle zeigt aber eine Anlagerung undurchlässigen Tertiärs an die Mulde — Keilhack bringt die Einzelbeschreibung nach französischen Beobachtern — und so müßte Keilhack nach anderen Stellen seines Buches die Vaclusequelle eigentlich als Barrierequelle bezeichnen. Nun hat sich aber die Quelle unter Bildung eines Sacktales längst in den Kalk zurückverlegt. Der Ausdruck „Überfall“ besagt hier eigentlich gar nichts als einen sehr allgemeinen Hinweis auf geologische Verhältnisse im Einzugsgebiet der Quelle.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

1. Es gibt kein stagnierendes Grundwasser, abgesehen von manchem Grundwasserlager unterer, abgelegener Stockwerke, und abgesehen von blinden Verengungen und sackartigen Endigungen einer zusammenhängenden Grundwassermasse.

2. In allen Quellen kommt Wasser unter einem gewöhnlich als hydrostatisch bezeichneten Druck hervor. Dieser Druck ist bei den meisten artesischen Quellen nur viel größer als bei den anderen. Wer einfach vom Fließen unter Druck spricht, erspart sich die Entscheidung, ob im Einzelfalle physikalisch besser von hydrodynamischem Druck zu sprechen wäre. Er kann sehr klein sein.

3. Es gibt nicht nur absteigende und aufsteigende Quellen, sondern oft auch solche, die beiderlei Wasser führen. Überall, wo Grundwasser tiefer reicht als die Quellen, fließt solches unter Druck zu ihnen empor. Es wird vorgeschlagen, die Quellen gleichzeitig aufsteigenden und absteigenden Wassers mit dem unvorgreiflichen Wort Überfließquellen zu bezeichnen. Sie wurden bisher irrig zu den absteigenden gerechnet und in bunter Weise bald als Stau-, bald als Überfallquellen usw. bezeichnet.

4. „Ein Grundwasserspiegel“ ist immer eine Zusammenfassung von Einzelspiegeln. Diese sind voneinander durch das Gestein, in Geröllen auch durch kapillare Anschwellungen getrennt. Es gibt daher keine Oberflächenströmungen von einem Einzelspiegel zum andern. Spiegelströmungen kommen nur in Höhlen innerhalb jedes vom Grundwasser geschnittenen Raumes vor, wenn im selben Raum Zu- und Abfuhr möglich ist. In Oberflächennähe ist alles Grundwasser langsamer bewegt als darunter.

5. Von wesentlicher Bedeutung ist die Unterscheidung des Grundwassers nach der Form der Grundwasserkörper. Erfüllt es ein sehr dichtes Hohlraumnetz, so kann man 1. eine „Filtergeschwindigkeit“ aufstellen; ferner 2. geometrische Bahnkurven, von denen das Wasser kaum abweicht, und 3. einen „Grundwasserspiegel“ als Verbindungsfläche der Einzelspiegel. Solche Fälle wurden als einfache Grundwasserkörper abgesondert. Wenn wenigstens die Verbindungsfläche der Einzelspiegel möglich und nützlich ist, die übrigen Annahmen aber nicht, sei von einem ziemlich einfachen Grundwasserkörper gesprochen. Grundwasserkörper, bei denen alle diese Vereinfachungen unmöglich oder irreführend sind, wurden als mehrgliedrige bezeichnet. Solche erfüllen ein oder mehrere unregelmäßige Spaltennester, bezw. Röhrengeflechte; mehrere dann, wenn

zwischen ihnen nur gewisse, meist bloß zeitweilige Wasserbewegungen möglich sind.

6. Im Karst, im nicht zu unreinen Kalk, gibt es nur mehrgliedrige Grundwasserkörper verschiedener Größe. Die größten sind ausgedehntere Wassergeflechte mit zeitweisigem Zusammenhang untereinander; die kleinsten sind bescheidenere Einzelnester des Grundwassers. Solange es sich um gänzlich wassererfüllte Hohlräume handelt und solange näher der Oberfläche infolge des dort geringeren Druckes eine verhältnismäßige Ruhe herrscht, bilden selbst schmale, langgestreckte Einzelgeflechte mit strömendem Wasser einen Gegensatz zu Flüssen und Bächen und sollten nicht nach ihnen benannt werden; denn diese haben die geringsten Werte der Geschwindigkeit ganz unten.

7. Im Gegensatz zur Auffassung von A. Grund hat das Wort „Karstwasserspiegel“ nicht als Verbindungsfläche der sehr wechselvollen Einzelspiegel einen weitgreifenden Sinn, sondern höchstens als recht grobe Zusammenfassung der Einzelspiegel eines Grundwasserkörpers. Sonst ist es nur für jedes örtlich beobachtete Vorkommen des Grundwasserspiegels verwendbar. Die mehrgliedrigen Grundwasserkörper können im äußersten Fall die Eigenschaften der Gerinne Katzers zeigen, nicht aber diejenigen, welche Grund ihnen gemäß seinen Vorstellungen über das Verhalten gewöhnlichen (einfachen) Grundwassers zugeschrieben hat. Damit sind auch die gleichartigen Annahmen Katzers für den „seichten“ Karst hinfällig.

8. Die Einteilung der Quellen wurde den vorstehenden Ergebnissen gemäß durchgeführt.