

Über die Beschaffenheit des Grundwasserspiegels in lockeren Aufschüttungen.

Von Dr. Otto Lehmann.

Über die Form des Grundwasserspiegels und die möglichen Bewegungsvorgänge in seinem Bereich haben noch vielfach irrige Vorstellungen Einfluß. Das gilt auch in dem verbreiteten Fall, daß das Grundwasser lockere Aufschüttungen durchströmt. So stellt z. B. das vorwiegend lotrecht hinabsickernde Wasser seine Bewegung nach der Tiefe durchaus nicht ein, wenn es den Grundwasserspiegel erreicht hat. Auch die tiefsten Teile jedes Grundwassers, das Quellen speist, haben sich an der Oberfläche befunden vor einer Zeit, die kurz ist im Vergleiche zum Alter der ganzen Grundwasseransammlung. Jene untersten Wasserteile haben eben darin ihre Vertikalbewegung unter Druck am weitesten in die Tiefe fortgesetzt. Es ist nicht erlaubt, die streckenweise steil hinabführenden Bewegungslinien, „Stromfäden“, aller Wasserteile im Grundwasser zu übersehen, bloß weil dessen Masse als ganze einen vorwiegend seitlichen Versatz mitmacht. Es ist auch nicht richtig, sich die Bewegungen an der Oberfläche eines strömenden Grundwassers als eine gewissermaßen verkleinerte Form der Vorgänge zu denken, welche ein Fluß oder Bach zeigt, über dessen Spiegel größere Steine einzeln oder in Gruppen aufragen. Ein solches Gewässer wird die Steine gleich Inseln umfließen oder in bestimmten Fällen darüber hinwegwallen, sie mit einer stationären Woge bedeckend. Die Stromfäden versetzen das Wasser von Bächen und Flüssen, indem sie manchmal in die Tiefe tauchen, manchmal zur Oberfläche emporsteigen und auch manchmal eine Strecke weit an der Oberfläche bleiben.

Das Grundwasser hingegen unterliegt auch in groben Schottern den Gesetzen einer Strömung in ungezählten Druckröhren unter Hinzutritt der Besonderheiten ebenso zahlreicher kapillarer Querschnittseinschränkungen und der Oberflächenspannungen. Gerölle oder Kies, die gerade von der Oberseite des Grundwassers getroffen werden, können von diesem nicht überwogt werden, und die Steine werden nicht wie von Bächen umflossen. Alle Stromfäden tauchen vielmehr sofort unter. Sie kommen erst an den Quellen wieder an die Oberfläche des Grundwassers oder in deren unmittelbare Nähe. Sieht man von den Biegungen ab, mit denen die Wasserteilchen den Steinen der Aufschüttung im Inneren des Grundwassers ausweichen, so schließen die sich ergebenden durchschnittlichen

Richtungen der eingetauchten Stromlinien allerdings meist sehr spitze Winkel mit dem allgemeinen Verlauf der Oberfläche ein. Dies ergibt sich aus der fast überall geringen Mächtigkeit des Grundwassers im Vergleich zu seiner flächenhaften Ausdehnung. Das alles hat schon Slichter gezeigt und abgebildet,¹⁾ aber es ist immer noch nicht in allen Fachkreisen klar durchgedrungen, weshalb ich mich mit der Bedeutung seiner Untersuchungen auch an anderer Stelle befaßt habe, sie zur Sicherung neugewonnener Einsichten benützend.²⁾

Im folgenden will ich nur die Form des sogenannten Grundwasserspiegels und die Bewegungsvorgänge unter dem Einfluß der Oberflächenspannung beschreiben, ausführlicher als es im Rahmen meines erwähnten Aufsatzes möglich war. Im allgemeinen weiß man, daß sich die Grundwasseroberfläche zu den Quellen hin neigt und zwar mit einer Krümmung, über deren Ursache ebenfalls unrichtige Ansichten gelehrt werden. Doch kann ich mich damit hier nicht befassen. Nicht allein durch diese Krümmung unterscheidet sich eine Grundwasseroberfläche von Bach- oder Flußspiegeln. Auch die ihr sozusagen aufgesetzten kleinen, aber oft stark geböschten Unebenheiten sind andere als die Wellungen in der gefällsmäßigen Neigung der oberirdischen Gewässerspiegel.

Nichts ist mehr geeignet, richtige Vorstellungen über die möglichen Bewegungen in den obersten Teilen des Grundwassers zu wecken, als die nahe Betrachtung seiner Oberfläche; denn die Anschauung übertrifft hier die Wirkung einer umfänglichen mathematischen Beweisführung, mit der sie natürlich nicht im Widerspruch stehen darf. Abb. 1³⁾ zeigt eine Kugelpackung von der Art, daß die Mittelpunkte von acht Kugeln in den Ecken von Rhomboëdern liegen, deren Winkel 60 und 120° betragen. Bei einer solchen Lagerung bleibt am wenigsten Luftraum zwischen den Kugeln, nämlich knapp 26% der ganzen Packung. Die Kugeln seien uns vorläufig ein Ersatz für eine Geröllanhäufung. Die Flußgeschiebe pflegen wegen ihrer platten Gestalt noch weniger Raum zwischen sich zu lassen.

Nehmen wir nun an, eine solche Kugelpackung werde in verschiedenen Höhen von einer wagrechten Fläche geschnitten, wie sie etwa ein Grundwasserspiegel darbieten würde, wenn die Kugeln aus einem Stoff wären, welcher den Rand des Wassers weder aufbiegt, noch hinabkrümmt. Abb. 2 zeigt die Pläne solcher Schnitte oder derartiger allerdings von wirklichen Grundwasserspiegeln etwas abweichender Flüssigkeitsspiegel. Die Pläne ent-

¹⁾ U. S. A. Geol. Survey. Water Supply and Irrigation Papers Nr. 67 und 19. Annual Report 1897/8, II.

²⁾ Geogr. Jahresbericht aus Österreich. XIII. 1925.

³⁾ Nach der Photographie im Texte Slichters gezeichnet, der das Bild zur Ableitung der Strömungszustände verwendet.

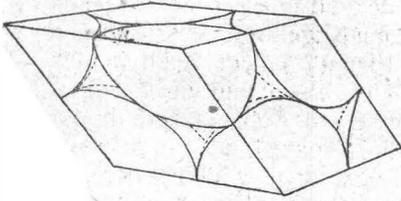


Abb. 1.



Abb. 3 a.

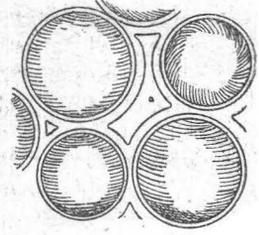


Abb. 3 b.

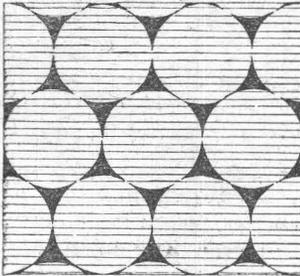


Abb. 2 a.

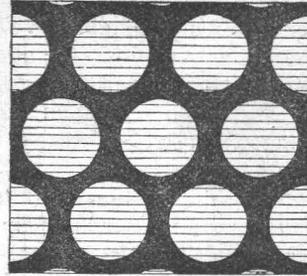


Abb. 2 b.

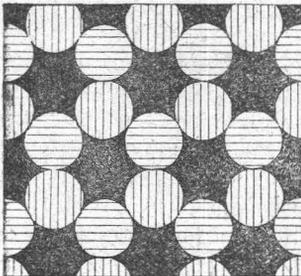


Abb. 2 c.

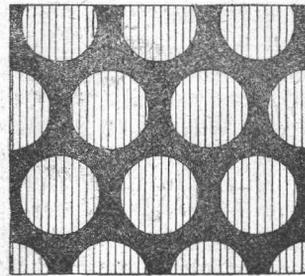


Abb. 2 d.

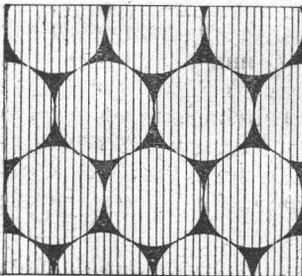
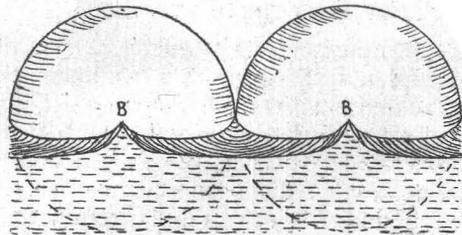


Abb. 2 e.



B, B: Berührungspunkte der abgebildeten Kugeln mit solchen vor der Bildebene.

Abb. 4.

sprechen dann fünf bemerkenswerten Grundwasserständen. Der erste und der letzte fallen in die Oberseite und in die Unterseite der Abb. 1; diese Schnitte sind also um einen Kugeldurchmesser in der Höhenlage verschieden. Der mittlere Plan (2c) liegt auch in der Höhe n i m m e zwischen den beiden. Der zweite und vierte liegen gleich weit über und unter dem mittleren. In Abb. 2a zerfällt die Wasseroberfläche in lauter dreieckige Einzelspiegel, die durch wagrechte größte Schnittkreise der oberen Kugellage voneinander getrennt werden. Die eine Hälfte jeder Kugel ist untergetaucht, die andere ragt als Insel aus der Flüssigkeit empor in den trockenen Teil der Kugelpackung. Dasselbe gilt von der Abb. 2e, nur haben da die größten Kugelkreise ihren Platz gewechselt, entsprechend der Stellung der unteren Kugellage. Abb. 2b zeigt, wie der Flüssigkeitsspiegel gegliedert ist, wenn der Schnitt so gelegt ist, daß die obere Kugellage nur noch eintaucht, die untere aber eben noch nicht auftaucht. Bei diesem Wasserstand gibt es in der Kugelpackung nur einen zusammenhängenden Spiegel mit den größten möglichen Querschnitten der Engen zwischen den Kugeln. Ihre Querschnitte schrumpfen sofort wieder, wenn bei einer weitergehenden Wasserstandsabnahme die unteren Kugeln auf tauchen und zugleich die eingetauchten Segmente kleiner werden. Dies führt schließlich zum Schnitt Abb. 2c, wo wir abermals lauter Einzelspiegel haben, die nun aber einen sechs eckigen Grundriß zeigen, zwischen den wagrechten Berührungskreisen der eingetauchten und der aufragenden Kugelsegmente. Sinkt der Wasserstand weiter, so erscheint 2d als eine Wiederkehr der großen Spiegelfläche von 2b, aber nun hört die obere Kugelreihe eben auf, das Wasser zu berühren, so daß sich ein Platzwechsel zwischen Engen und Weitungen verrät, womit der Übergang zum Plan 2e in Bezug auf 2a vollzogen erscheint. Bezeichnet man mit R den Radius der Kugeln, so findet man mit Hilfe der Geometrie der Mittelschule, daß die Radien der Segmentflächen in 2b und 2d gleich sind $78\frac{5}{10}\%$ von R und jene von 2c $58\frac{0}{10}\%$ von R . Die Engen zwischen den Kugeln werden also höchstens $43\frac{0}{10}\%$ der Kugelhalbmesser breit, nicht viel mehr als ein Fünftel ihrer Durchmesser.

Eine beiderseits offene, senkrechte Glasröhre hält einen Wassertropfen fest, wenn sie weniger als 4—6 mm Durchmesser im Lichten hat (je nach der Reinheit des Wassers.). Etwa von 0·5 cm abwärts dürfen auch zwischen Steinen die Durchmesser als kapillar bezeichnet werden. Bei Kugeln von 2·5 cm Durchmesser abwärts⁴⁾ würde also die besprochene Packung auch im günstigsten Falle (2b und 2d) nur kapillar verengte Verbindungen in allen zu den

⁴⁾ Als mittlerer Halbmesser würde das etwa Nußgröße der Geschiebe entsprechen.

Rhomboëderflächen parallelen Schnittebenen liefern; denn nur zweimal innerhalb eines senkrechten Abstandes von der Länge eines Kugeldurchmessers werden 5 mm Breite erreicht werden, sonst aber sind die Engen überall noch schmaler.

Slichter hat sich nicht mit den Spiegelformen, sondern mit Größe und Richtung der Strömungsgeschwindigkeiten befaßt. Er hat dargelegt, wie zwischen dem Kugelhautwerk oben genannter Packung das Wasser in dreieckigen Röhren fließt, indem es ihrem *gewundenen* Verlaufe folgt. Ihre Weite wechselt in regelmäßiger Weise und sie bilden ein verzweigtes System. Die linke Zeichnung der Abb. 3 stellt das Verhältnis zwischen engstem und weitestem Querschnitt dar, natürlich senkrecht zur jeweiligen Richtung der gekrümmten Röhrenachse.⁵⁾ Die sechseckigen Spiegelschnitte im Plane 2c stehen nämlich darauf nicht senkrecht. Die Wände der Röhren sind z. T. die Kugelflächen, z. T. die kapillar am meisten gehemmtten Wasserteile zwischen den Punkten größter Annäherung der Kugeln. In den Fällen, wo die Kugeldurchmesser mehr als 1·6 cm betragen, bietet die Kugelpackung dem Wasser immer noch Querschnittsweitungen von > 5 mm, wo nicht alles Wasser kapillar beeinflusst ist. In wirklichen Schottern — auch in den größten — gilt es jedoch allgemein als Tatsache, daß die ganze Grundwasserbewegung eine kapillare ist, sie wird auch von Slichter nur als solche berechnet und auch in den neuesten technischen Werken als solche behandelt.⁶⁾ Daraus sieht man, wie sehr die platte Gestalt der Geschiebe mit ihren stark gekrümmten Schmalseiten und oft auch noch die Einschaltung von Kiesen eines kleineren Kornes die Durchgängigkeit im Vergleich zur Kugelpackung vermindern. Die Röhrenquerschnitte sind natürlich auch in diesem Fall konkav eingefasste Flächen und die Röhrenwände in der oben erwähnten Weise zusammengesetzt. Dieser Hinweis auf einige Lehren Slichters soll dem vorbeugen, daß mit den Schnitten der Spiegel in Abb. 2c die irrige Vorstellung verknüpft wird, daß sechseckige Röhrenquerschnitte der *Bewegungen* vorkommen.

Wenden wir uns daher wieder der Oberfläche eines Grundwassers in der Kugelpackung zu, und zwar der wirklichen. Die Kräfte, welche das Fließen in Haarröhren so hemmen, daß es selbst unter hohen Drucken nur langsam erfolgt, erzeugen auch die Oberflächenspannung. So steigt der Wasserrand an Glas- oder an Steinwänden empor und auch sein übriger Spiegel steht höher, wenn unter sonst gleichen Umständen die Begrenzungsflächen näher beieinander sind. An *ein*tauchenden Kugelsegmenten oder Geröllflächen kann der Wassersaum sogar bis zur Form eines

⁵⁾ Man vergleiche dazu die eingehenden Abbildungen bei Slichter, im Ann. Rep. XIX. 2 S. 311 ff.

⁶⁾ Ph. Forchheimer, Hydraulik, 1914, S. 420, 425, 430.

Überhanges emporgezogen sein. Füllt man eine Wanne mit Wasser und legt eine Schotterpackung hinein, die den Spiegel schneidet, so sieht man, daß das Wasser nicht nur an den „Ufern“, sondern auch in den Engen höher steht als in den Weitungen. Ist die Breite der Engen etwa 0,5 cm und die der Weitungen das zwei- bis dreifache oder mehr, so wird der entsprechende Unterschied der Spiegelhöhen schon mit freiem Auge wahrgenommen. Sind die Engen erheblich schmaler als 0,5 cm, dann kann in ihnen die Anschwellung ohne weiteres auf einige Millimeter geschätzt werden. Wo wegen Ungleichheit der Geröllstücke und ihrer Packung Weitungen und Engen von allerlei Ausmaß vorkommen, bildet der Wasserspiegel in den größeren Weitungen tiefer liegende Schüsselchen als in den kleineren, was in Abb. 3, rechts, ohne Anspruch auf Genauigkeit sinnfällig gemacht ist.

Die Wasseroberfläche wird nicht nur dann in Einzelspiegel zerlegt, wenn sie den Schnitten 2a, c und e entspricht, sondern auch, wenn sie im Mittel etwas tiefer liegt. Denn dann wird das Wasser in den Zwickeln an den Berührungspunkten der Kugeln kapillar festgehalten, auch wenn sich der sinkende Spiegel schon den Lagen 2b oder 2d zu nähern begonnen hat. Die einzelnen Weitungen sind dann, wie es Abb. 4 an einem leicht darstellbaren Beispiel von der Seite zeigt, durch besonders weit emporreichende, spitzig zulaufende Wassererhebungen voneinander getrennt. Eine Fläche mit verzweigtem, durchgreifendem Spiegel kommt also auch bei diesen Wasserständen nicht vor.

Eine allgemeine Schwankung des Grundwasserstandes braucht daher nur das Ausmaß eines Kugel- oder Gerölldurchmessers zu erreichen, dies genügt, um mannigfache Veränderungen der Spiegelunebenheiten bis zu ihrem völligen Platzwechsel in der wagrechten Verteilung zu bewirken. Streut man feinen Staub auf die Spiegel in der schottergefüllten Wanne und erzeugt durch Änderungen des Verhältnisses zwischen Zu- und Abfluß wechselnd hohe Wasserstände, so kann man verfolgen, wie demgemäß die Wasserteile der Oberfläche hin- und herrücken u. zw. in den verschiedensten, auch in entgegengesetzten Richtungen. Das sind die der Oberfläche eines strömenden Grundwassers eigentümlichen Bewegungen: es sind Nahverschiebungen als Folge der Molekularkräfte, welche den Unebenheiten der Spiegelflächen Böschungen verleihen, die viel steiler sind als die durchschnittliche Höhenabnahme des Wasserstandes zu den Quellen hin. Daher wird die allgemeine Grundwasserströmung nicht einmal mittelbar an der Oberfläche merklich, etwa in der Weise, daß ein schwimmender Körper von einem eintauchenden Stromfaden zum nächsten gleitet, angetrieben von deren wagrechter Komponente. Dies wäre höchstens dicht an den Quellen möglich, wenn dort der Höhenunterschied zweier benachbarter und zusammenhängender Spiegelweitungen

zu einer gleichsinnigen Gefällsabstufung ohne trennende Anschwellung gesteigert würde.

Die Kugelpackung wurde im Laufe der Darstellung durch ein beliebiges Geschiebelager mit einer Grundwasserströmung ersetzt. Dabei gehen nur die Gleichmäßigkeiten der Abb. 2 verloren, die Zerlegung der Wasseroberfläche in Einzelspiegel wird aber dadurch nur noch gefördert. Abgesehen von den in Abb. 4 erläuterten Gründen, besagt die allgemeine Neigung der Oberseite des Grundwassers zu den Quellen, daß die Gerölle nicht wagrecht geschnitten werden. Schnitte, die wie 2b und 2d beschaffen sind, wenn auch mit unregelmäßigen Einzelformen, können sich also nie über größere Teile der Grundwasserfläche erstrecken; vielmehr wird jede so verzweigte Spiegelgegend irgendwo abgeriegelt, wo die geneigte Wasseroberfläche die Gerölle in der Höhe ihrer Berührungspunkte schneidet (gemäß 2a, c und e) oder ihnen von unten her so nahe kommt, daß der Fall der Abb. 4 eintritt. Diese Überlegung ist unabhängig von der Korngröße der Schotter, gilt also auch bei den größten Flußgeschieben. Damit schließt sich der Kreis der Betrachtung.

*

Zusammenfassung und Folgerungen.

Alles Grundwasser unterliegt den Gesetzen der Druckströmungen in Röhren, in aufgeschütteten Lockermassen nicht minder als in den Fugen, die in ein klüftiges Gestein eingebettet sind. Auch in groben Schottern ist die Grundwasseroberfläche in eine Unzahl von Einzelspiegeln zerlegt; sie sind die Eintrittsstellen der untertauchenden Stromfäden des zugesickerten Wassers. Die sprachliche oder zeichnerische Zusammenfassung der Einzelspiegel zu einem „Grundwasserspiegel“ ist bequem, aber mit Vorsicht zu gebrauchen, damit nicht physikalische Eigenschaften der wirklichen Spiegel auf diese Zusammenfassung übertragen werden. Eine solche Übertragung ist u. a. die Annahme durchgehender Strömungen, entlang dem Grundwasserspiegel. Diese kann es nicht geben. Hingegen treten in Schottern und Sanden zu Zeiten noch so kleiner Änderungen des Grundwasserstandes an der Oberfläche kapillare Wasserverschiebungen in allen möglichen Richtungen als Nahbewegungen auf.
