

# Einfluß offener Gewässer auf das Grundwasser

Von Prof. **Karl Kastner** in Salzburg

(Mit 3 Textfiguren und 1 Tabelle)

Die Bregenzer Ache tritt bei Kennelbach in das Rheintal ein. Oberhalb Kennelbach hat sie ihr Bett im Felsterrain, unterhalb in ihrem eigenen sehr flachen Schuttkegel ausgewaschen. Dem Bette mehr weniger parallel fließt im alluvialen Rheintale ein Grundwasserstrom, welcher hauptsächlich vom Gebirge her gespeist wird, dem Bodensee zu, der die Basis der oberirdischen und unterirdischen Wässer ist. Der Grundwasserstrom fließt nicht in einzelnen Adern, sondern erfüllt das ganze Gebiet von einer gewissen Tiefe an, was die zahlreichen Brunnen hinlänglich beweisen. Da diese Brunnen nicht überall gleichviel Wasser liefern, so folgt daraus, daß der Grund nicht überall gleich gut wasserdurchlässig ist. Der Grundwasserstrom am linken Ufer der Ache speist die Brunnen von Wohlfurt, Lauterach und Hard, und zwar liegen dort die meisten Brunnenspiegel, also auch der Spiegel des Grundwasserstromes, tiefer als die Ache. Wenn Terrainsenkungen unter den Grundwasserspiegel reichen, so treten Quellen zutage, z. B. die Lauteracher Quellen.

In den neunziger Jahren wurde bei Kennelbach ein Fabrikanal angelegt, welcher der Bregenzer Ache durchschnittlich  $10 m^3$  Wasser per Sekunde entnimmt und bei der städtischen Brücke wieder in die Ache einmündet. Damals beschwerten sich die Bewohner von Lauterach, daß durch das Entnehmen dieser Wassermenge aus der Ache die Brunnenspiegel gesunken seien und die Lauteracher Quellen weniger Wasser liefern.

Die Argumente, welche in der Regel als maßgebend genug gelten für den Beweis, daß kein wesentlicher Zusammenhang zwischen Flußwasser und Grundwasser vorhanden ist, sind

speziell auf das Gebiet von Lauterach angewendet, wo der Achspiegel bedeutend höher ist als der des Grundwassers:

A. Die chemische und thermische Verschiedenheit des Achwassers einerseits, der Brunnen und Quellen andererseits.

B. Es wurden Färbungsversuche durchgeführt, welche in bezug des Zusammenhanges zwischen Ache und Brunnen ein negatives Resultat ergaben.

C. Das Kanalwasser verschlammte sein Bett in kurzer Zeit fast vollständig, somit scheint die Annahme begründet zu sein, daß auch die Ache im Laufe der Zeit ihr Bett ausgedichtet hat, wie jeder zeitweise trübe, höher als das Grundwasser gehende Fluß.

D. Die Richtung des Flußwassers und des Grundwassers ist fast parallel. Tritt Flußwasser in größerer Menge auf einer ausgedehnteren Strecke in den Boden ein, so muß sich das auch durch die mehr weniger normale Richtung des Sickerwassers auf die Flußrichtung bemerkbar machen.

E. Es muß eine ganz bedeutende Menge von Achwasser in das umgebende Terrain eindringen, wenn dadurch auf der 6 km langen und am linken Achufer über 1 km breiten Fläche der Grundwasserspiegel merkbar erhöht werden soll. Messungen und Schätzungen der Achwassermenge in Kennelbach, Lauterach und Hard wiesen jedoch keinen oder nur einen geringen Unterschied des Achwasserquantums auf, und zwar war die Menge des Bregenzerachwassers unterhalb der Einmündung des Kanales in die Ache größer als die bei Kennelbach oberhalb des Ursprungs des Kanales, obwohl kein oberirdischer Zufluß vorhanden ist.

F. In der Nähe der Ache wurde eine tiefe Grube, die nicht bis auf das Wasser reichte, ausgeworfen und Wasser hineingeschüttet. Das Wasser floß gegen die Ache und nicht gegen Lauterach hin ab.

G. Schließlich kann noch erörtert werden, daß überall im Gebiete, wo Quellbäche austreten, man weiter aufwärts kein Anzeichen dafür findet, daß sie früher wesentlich höher ausgequollen seien, und doch müßte eine Senkung des Grundwasserspiegels um ein oder zwei Dezimeter bei der flachen Bodenlage schon lange Strecken alter Quellbachgerinne trockenlegen. Die Beobachtung der jetzigen Quellaustritte im ganzen Gebiete läßt direkt ablesen, daß eine merkliche Tieferlegung der Quellaustrittspunkte tatsächlich in den letzten zehn oder noch mehr Jahren nicht stattgefunden hat.

Die eben erwähnten Beobachtungen und Erscheinungen werden wie gesagt in der Regel als hinlänglich beweiskräftig angenommen, daß zwischen Flußwasser und Grundwasser kein Zusammenhang besteht mit Ausnahme unbedeutender Mengen von Sickerwasser, welches da und dort zufällig in den Boden eindringt und, falls wirklich Schwankungen der Brunnenpiegel oder der Quellbäche auftreten, diese durch Schwankungen der Höhe des Grundwasserstromes infolge größerer oder geringerer Niederschlagsmengen verursacht werden.

Nun soll der Fabrikskanal wieder um 2 *km* verlängert werden. Die Anrainer fürchteten auf Grund ihrer Erfahrungen eine weitere Senkung der Brunnen und Abnahme der Wassermenge in den Quellbächen. Der Vertreter der Gemeinde Lauterach, Dr. Boss in Bregenz; teilte mir die ganze Angelegenheit mit und bat mich um Äußerung meiner Ansicht darüber. Da die Aussagen der Gemeindeangehörigen von Lauterach ganz bestimmt einen Zusammenhang zwischen Ache und Grundwasserstrom voraussetzen, überdies die gleich im Anschlusse besprochene ähnliche Grundwasserfrage von Gnigl bei Salzburg, welche vor kaum einem Vierteljahre vielfach erörtert wurde, mir schon manche Stunde intensiven Nachdenkens verursacht hatte, beschloß ich zu versuchen, mehr Licht in die vorwaltenden Grundwassererscheinungen und die Art ihrer Untersuchung zu bringen.

Durch den Bau des Rangierbahnhofes Salzburg war die Gemeinde Gnigl<sup>1)</sup> über Nacht vollkommen wasserlos gemacht. Die Einwohner von Gnigl bezogen bis zu diesem Zeitpunkte ihr Trink- und Nutzwasser aus einem mächtigen Grundwasserstrom, der von der Guggentaler Seite her einsetzt, längs des Kapuzinerberges verläuft und welcher zwischen Kilometer 2·8 und 3·1 die Bahn kreuzt. Dieser Grundwasserstrom wurde durch den Bahngraben angeschnitten, durch den Bahnkanal vollständig eröffnet und die Höhe des Grundwasserspiegels dadurch um etwa 2·5 *m* tiefer gelegt. Mehrere Hausbesitzer in Gnigl versuchten anfänglich die Brunnen zu vertiefen, wodurch zwar eine vorübergehende Vermehrung des Wassers erreicht wurde, jedoch war die Qualität wesentlich schlechter als vorher. Zunächst wählte man den Aus-

---

<sup>1)</sup> Siehe Näheres: Denkschrift über die Wünsche und Beschwerden der Gemeinde Gnigl ... Salzburg. 3. September 1904, Seite 8—11. Druck bei Kiesel.

weg, jedwelchen Konnex zwischen den Bahnarbeiten und der Wasserkatastrophe kurzerhand in Abrede zu stellen, später wurde erklärt, das Wasser sei keineswegs infolge der Bahnarbeiten ausgeblieben, die Schuld daran trage vielmehr die Trockenheit des heurigen Sommers.

Schließlich mußte der Zusammenhang doch zugegeben werden, da auch nach mehreren Monaten, während welcher Zeit önger an dauernde, bedeutende atmosphärische Niederschläge waren, der Grundwasserspiegel sich nicht mehr wesentlich änderte.

Die Bregenzer Ache füllt das Bett innerhalb der Uferbefestigung bei niedrigem Wasserstande nicht ganz aus. Es sind bald links, bald rechts Schotterbänke, die nur bei hohem Wasserstande überflutet werden. Der Grundriß des Achbettes bei niedrigem Wasserstande besteht aus einer Reihe von Krümmungen und Gegenkrümmungen, welche durch mehr weniger zur allgemeinen Richtung des Flusses schiefe Strecken vereinigt sind. Die konkaven Ufer ziehen gleichsam das Wasser an und halten die Tiefen fest, während am konvexen Ufer die Schotterbänke abgelagert sind. Das Gefälle ist nicht gleichmäßig, sondern man bemerkt besonders bei niedrigem Wasserstande deutlich Stromschnellen, während auf dem dazwischen liegenden Terrain das Gefälle bedeutend geringer ist. Das Flußbett stellt demnach eine Reihe von vertieften Kanälen dar, welche durch Schwellen, die Ursachen der Stromschnellen, getrennt sind. Bei hohem Wasserstande ist das Gefälle an der Oberfläche gleichmäßiger. Die Lage der Schotterbänke, der Schwellen etc. ist seit einem Jahre ziemlich gleich geblieben. Es stimmt das mit dem alten Erfahrungssatz überein, daß das Hochwasser die Gestalt des Grundrisses der Bäche und Flüsse, deren Ufer stark befestigt sind, nur wenig verändert. Vergleichsweise führe ich hier das Verhältnis der Salzach bei Salzburg an.

Ich untersuchte sämtliche Schotterbänke der Salzach von der Ernst Thun-Brücke bei Glasenbach bis Muntigl. Überall trat, wenn im Schotter nahe bis zum Niveau des Salzachspiegels oder tiefer Gruben aufgeworfen wurden, Wasser zutage.

Es machte den Eindruck, als ob bei niedrigem Wasserstande der Salzach die Flußsohle hauptsächlich an den Schwellen wasserdurchlässig sei; die Schotterbänke aber führen in einer gewissen Tiefe überall Wasser. An mehreren Schotterbänken,

z. B. an der neben dem Kaiser Franz Josefs-Parke oder neben dem Hotel „Österreichischer Hof“, konnte man besonders während des Winters 1905/6 schön beobachten, wie das Grundwasser am unteren Ende der Bank, die dort den Rand einer Art Bucht bildete, in einer Ausdehnung von ungefähr 10 m wieder in die Salzach einmündete, da dort das Ufer eisfrei blieb und die Strömung deutlich sichtbar war. Die zahlreichen Arbeiter, welche an den meisten Schotterbänken sich mit der Gewinnung dieses Materiales beschäftigten, hoben den Schotter nur bis zu einer bestimmten Tiefe aus und auf meine Anfrage: „warum sie nicht tiefer graben“, wurde mir die Antwort gegeben: „wegen des Wassers“. Tatsächlich war auch überall, wo ich Zweifel hegte, nach Wegscharren einer Schotterschichte von 1—2 dm Höhe das Grundwasser sichtbar. Im Frühjahr suchte ich auch die Geschwindigkeit des Grundwasserstromes zu bestimmen. Einige passende Schottergruben auf der Bank neben der städtischen Schießstätte führten Wasser und zwar betrug die Tiefe desselben 2—5 dm. Bei zwei Gruben waren die Sohle und zum Teile auch der untere Teil der Seitenwand mit kleinem Schotter (1—3 cm Durchmesser) bedeckt.

Die anderen Gruben wiesen partienweise auch schlammigen Boden auf. Ich färbte nun in sechs Gruben das Wasser gleichmäßig mit roter Tinte. Bei den zwei erstgenannten Gruben konnte deutlich wahrgenommen werden, wie das gefärbte Wasser durch nachströmendes klares Wasser allmählich unter einem sehr spitzen Winkel in der Richtung gegen die Salzach gedrängt wurde, und zwar in Grube *a* innerhalb 20 Minuten 1·5 m, in Grube *b* innerhalb 20 Minuten 2 m, somit eine Maximalgeschwindigkeit von 1·7 mm in der Sekunde erreichte. Das Wasser in den Gruben mit mehr schlammigem Boden zeigte eine viel geringere Schnelligkeit.

Daraus ergibt sich, daß bei Anlage solcher Probegruben das Material, wenn man bis auf das Wasser vorgedrungen ist, nicht mehr mit der Schaufel, sondern mit dem Schöpfer entfernt werden muß, da sonst nur der gröbere Schotter entfernt wird, der Sand und Schlamm aber mit dem von der Schaufel abfließenden Wasser mitgerissen und durch die Bewegung in den Grund hineingeschwemmt wird, wodurch die Wasserdurchlässigkeit ungünstig beeinflusst wird. Um eine spätere mögliche Verdichtung des Grundes zu vermeiden, ist es vorteilhaft, den Boden und

unteren Teil der Seitenwände mit nicht zu grobem Schotter zu bedecken.

Da die Grundrißform des Bettes, der Wechsel des Gefälles und der Wasserstand, ebenso das Geschiebe der Salzach und der Bregenzer Ache nicht von durchgreifender Verschiedenheit sind, zog ich daraus den Schluß, daß auch die Bregenzer Ache ihr Bett nicht vollständig ausbetoniert hat und die Schotterbänke wasserdurchlässig sind. Auf Grund obiger Erfahrungen führte ich ähnliche Versuche bei den Schotterbänken der Bregenzer Ache aus.

In der alten Schotterbank, welche am linken Ufer der Bregenzer Ache liegt, sich etwa 90 Schritte oberhalb der städtischen Brücke bis weit unterhalb derselben erstreckt, und die schon längst durch Schlamm verdichtet sein könnte, ließ ich am Gründonnerstag, dem mehrere schöne Tage vorangegangen waren, vier Gruben ausheben. Leider konnten die früher angeführten Vorsichtsmaßregeln nicht in Anwendung gebracht werden, da der Arbeiter keinen Schöpfer auftrieb. Die Höhe der Schotterbank steigt in dem Gebiete bis über 3 *m* — Basis der Achspiegel — an.

Die Ache umfließt in einem nach Nordwest gerichteten Viertelbogen, der bis gegen die Brücke reicht, das obere Ende der Schotterbank und behält dann längs der Bank die Richtung von Ost nach West bei. Die ersten drei Gruben sind unterhalb der Brücke, die vierte oberhalb.

Durch Wegführen von Schotter war die Bank in einem größeren Umkreise (20—30 *m* Radius) um 1 bis 1·4 *m* vertieft und dort ließ ich, um Zeit und Arbeit zu ersparen, die Grube I anlegen; der direkte Abstand von der Bregenzer Ache ist 94 *m*, von der Brücke flußabwärts 128 *m*. Der Arbeiter hatte ungefähr 2 *m* tief gegraben, als zuerst von West, dann von unten und von Nordwest Wasser nicht heraussickerte, sondern herausgepreßt wurde, da das Wasser nach verhältnismäßig kurzer Zeit um 2 *dm* stieg. Die Länge des Wasserspiegels von Ost nach West war 1·5 *m*; die Breite von Nord nach Süd betrug fast 1 *m*. Ich färbte hierauf das Wasser mit roter Tinte. Der Wasserstand in der Grube stieg und fiel mit dem Achwasserstande in etwas verspätetem Sinne. Bei steigendem Wasser in der Grube war die Tendenz der Aufklärung oder Entfärbung von Süd und Ost nach Nordwest, bei sinkendem Wasserstande von NNW. nach SSO.

wahrzunehmen. Liegt die Grube im Staubeiete oder an der inneren Grenze desselben, so ist diese Aufklärung naturgemäß. Würde nur Sickerwasser einfließen, so würde bei steigendem Wasser die Aufklärung von NO. oder N., bei sinkendem Wasser entweder nach allen Richtungen oder, wenn ein Zufluß von der Ache her noch stattfindet, nach S. oder SW. sich nachweisen lassen. Weitere Beobachtungen wurden durch Eintritt von Regen verhindert.

Die Grube II — 176 *m* flußabwärts von Grube I und 6 *m* von der Ache entfernt — war etwas tiefer als der Achspiegel ausgeworfen, als fast normal zur Ache von Norden her Wasser mit ziemlicher Kraft eindrang und die Grube meiner Schätzung nach bis zur Höhe des Achspiegels füllte. Die Ache war im Steigen. Das Grubenwasser wurde gefärbt. Nach vier Stunden war das Wasser in der Grube entsprechend gestiegen, oben fast klar, in der Tiefe noch gefärbt. Eine Stunde später war die Färbung noch in der südwestlichen Ecke wahrzunehmen, der übrige Teil war klar.

Die Grube III ist 25 *m* von der Ache und 96 *m* von der Grube I flußabwärts entfernt. Auch hier kam das Wasser erst zum Vorschein, nachdem die Grube tiefer als das Achniveau gegraben war, und zwar aus der NO.-Ecke. Es drang an mehreren Orten von unten herauf, bildete auch an einer Stelle einen kleinen Schlammvulkan und stieg rasch um 15 *cm*.

Die vierte Grube, 40 *m* oberhalb der Brücke und 22 *m* von der Ache entfernt, war etwas tiefer als der Achspiegel ausgegraben, als Wasser sich ansammelte und in kurzer Zeit etwa 2 *dm* hoch den Grund füllte. Der Zufluß erfolgte von NNO. und im gefärbten Wasser konnte man deutlich sehen, daß das eintretende Wasser schief aufwärts getrieben wurde. Leider stürzten die Wände der drei letztgenannten Gruben über Nacht teilweise ein und das machte weitere Beobachtungen unmöglich.

Auch bei den drei dem Wasser zunächst liegenden Brückengelenken, an deren Basis die Schotterbank vertieft war und die vom Flusse durch dem Abstände entsprechende größere Schotterpartien getrennt sind, trat bei hohem Achwasserstande Wasser zutage.

Während der Arbeiter die Grube I ausschaufelte, kamen die anderen auf der Bank beschäftigten Arbeiter herbei, um zu sehen, was wir da machen. Diesen gegenüber bezweifelte ich

das Vorkommen von Wasser an dieser Stelle. Sie versicherten mich aber, daß sie an allen Orten der Schotterbänke, wo sie bis jetzt gearbeitet hatten, manchmal zwar bis zu  $\frac{1}{2}$  m unter dem Flußspiegel, auf Wasser gestoßen seien.

Aus obigem läßt sich schließen, daß die Schotterbänke der Bregenzer Ache in einer bestimmten Tiefe Wasser führen und mehr weniger wasserdurchlässig sind. Die angeführten Erscheinungen weist demnach die Bregenzer Ache und die Salzach von Golling bis gegen Oberndorf hin, ferner aber auch die Salzach im Oberpinzgau, der Inn im Inntale, der Rhein im Rheintale bis zu seiner Mündung in den Bodensee auf und es unterliegt daher wohl kaum einem Zweifel, daß alle Flüsse, deren Bett in ähnlichem alluvialen Gebiete in ähnlicher Weise gestaltet ist wie bei den eben genannten, deren Wasserhöhe, abhängig von den Niederschlägen, einem größeren Wechsel unterworfen ist, selbst wenn das Hochwasser noch so viel Schlamm und Geschiebe mit sich führt, ihr Bett nicht ausbetonieren, sondern ihren eigenen Grundwasserstrom in den Boden senden können.

Die Einwirkung des Achwassers auf den Grundwasserstrom versuchte ich zunächst experimental nachzuweisen.

## I. Versuch

Eine zylindrische Glasröhre von 70 cm Länge, 4 cm im Lichten, demnach mit einem Querschnitt von  $12.6 \text{ cm}^2$ , wurde an dem einen Ende mit Gaze verschlossen, um das Auslaufen des Sandes zu verhindern, dem Wasser aber freien Abfluß zu gewähren. An der Außenseite der Glasröhre brachte ich von unten nach oben in der Entfernung von je 10 cm eine Marke an. Für die erste Reihe der Versuche wählte ich ausgewaschenen Flußsand. Die Röhre wurde zuerst 20 cm, dann 30 cm, endlich 40 cm hoch mit Sand gefüllt und nach je einmaliger Füllung in der Nähe eines Wasserreservoirs derart mittels eines Trägers aufgestellt, daß durch einen drehbaren Hahn aus obigem Gefäße Wasser in die Röhre eingeleitet und auch durch weitere Manipulation mit dem Hahne die Wassersäule in der Röhre beliebig hoch fixiert werden konnte. Vom Hahne hängt ein Band in die Glasröhre, damit das Wasser an diesem langsam hinunter fließt und nicht mit Kraft hinunter fällt, wodurch der Sand fortwährend aufgewirbelt würde. Nun wurde solange Wasser in die Röhre eingeleitet, bis es 40 cm

hoch über der 20 cm hohen Sandsäule stand, dann wurde die Wasserzufuhr durch Drehen des Hahnes abgesperrt und von dem Moment an unter Berücksichtigung der Zeit das aus der Röhre ausfließende Wasser in einem Gefäße aufgefangen, bis die ober dem Sande befindliche Wassersäule um 10 cm gesunken war, worauf ich das Gefäß durch ein anderes ersetzte. Auf diese Art wurde die jeweilige Wassermenge, die während des Sinkens der Wassersäule um je 10 cm abfloß, und dabei die Dauer, innerhalb welcher letzteres stattfand, festgestellt. Den Vorgang wiederholte ich bei 30 und 40 cm Sandhöhe und 30 beziehungsweise 20 cm Wasserhöhe.

Die Ergebnisse sind:

Bei 20 cm Sandhöhe, 40 cm Wasserhöhe sank die Wassersäule von

40 cm	auf	30 cm	in	95 Sekunden;	abfließende Wassermenge	133 cm <sup>3</sup>
30 "	"	20 "	"	127 "	"	134 "
20 "	"	10 "	"	183 "	"	128 "
10 "	"	0 "	"	275 "	"	122 "

Mit einer anderen Sandfüllung von 20 cm Höhe sank die Wassersäule von

40 cm	auf	30 cm	in	125 Sekunden;	abfließende Wassermenge	130 cm <sup>3</sup>
30 "	"	20 "	"	165 "	"	130 "
20 "	"	10 "	"	227 "	"	129 "
10 "	"	0 "	"	353 "	"	120 "

Bei 30 cm Sandhöhe sank die Wassersäule von

30 cm	auf	20 cm	in	280 Sekunden;	abfließende Wassermenge	135 cm <sup>3</sup>
20 "	"	10 "	"	330 "	"	133 "
10 "	"	0 "	"	414 "	"	127 "

Bei 40 cm Sandhöhe sank die Wassersäule von

20 cm	auf	10 cm	in	735 Sekunden;	abfließende Wassermenge	120 cm <sup>3</sup>
10 "	"	0 "	"	790 "	"	124 "

Sucht man das Verhältnis der Sekundenzahlen zu einander, z. B. bei einer Sandhöhe von 20 cm,  $95:127:183:275 = 1:1.3:1.9:2.9$ , oder  $125:165:227:353 = 1:1.3:1.8:2.7$  und vergleicht diese Größen mit der geringeren Druckwirkung während des Sinkens der Wassersäule um je 10 cm, wobei das unten abfließende Wasser annähernd gleich ist der Quantität des oben absinkenden Wassers, so bedingt der in obiger Weise verminderte Druck eine den angeführten Verhältniszahlen entsprechende Verlängerung der Zeit.

Eine genaue Erörterung der Gesetze, die bei allen derartigen Erscheinungen herrschen, würde weit über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen, überdies ein viel umfangreicheres Beobachtungsmaterial erfordern.

Für eine zweite Reihe von Versuchen wählte ich wieder ausgewaschenen Sand, wie er auch in der Natur vorkommen kann, brachte zum Zwecke genauerer Messung an der Oberfläche der Glasröhre einen schmalen Längsstreifen von Millimeterpapier an und änderte den Vorgang des Versuches derart, daß die Sandhöhe zwar wieder 10 *cm*, dann 20 *cm*, ferner 30 *cm* und 40 *cm* betrug, die Wassersäule wurde jedoch in bestimmter Höhe fixiert und gemessen, wieviel Wasser innerhalb 180 Sekunden unten abfloß. Nach jeder derartigen Beobachtung wurde ohne Änderung des Wasserstandes mittels eines Trichters eine gewisse Menge roter Tinte einige Zentimeter über dem Sande eingeführt und die Zeit notiert, welche verstrich, bis das unten abfließende Wasser rote Färbung zeigte. Beim Eintritt der roten Tinte in die Wassersäule wurde dieselbe etwas erhöht, die Erhöhung aber möglichst bald aufzuheben versucht, indem mit dem Daumen die Hahnöffnung zugehalten und die Wasserzufuhr dadurch so lange gehemmt wurde, bis die Wassersäule wieder die normale Höhe zeigte.

Die Ergebnisse sind in 180 Sekunden: die abfließende Wassermenge betrug bei:

	Sandhöhe	Wasserhöhe	abfließende Wassermenge
A)	10 <i>cm</i>	10 <i>cm</i>	203 <i>cm</i> <sup>3</sup>
B)	10 "	20 "	287 "
C)	10 "	30 "	344 "
D)	10 "	40 "	399 "
E)	20 "	10 "	213 "
F)	20 "	20 "	247 "
G)	20 "	30 "	281 "
H)	20 "	40 "	293 "
I)	30 "	10 "	106 "
K)	30 "	20 "	142 "
L)	30 "	30 "	181 "
M)	40 "	10 "	78 "
N)	40 "	20 "	100 "

Die Zeit, welche die rote Tinte benötigte, um die entsprechenden Sandsäulen unter den sub *A—N* bezeichneten Verhältnissen, die jetzt mit  $\alpha—n$  rubriert sind, zu durchfließen, war bei:

	Sandhöhe	Wasserhöhe	Sekunden
<i>b</i> )	10 <i>cm</i>	20 <i>cm</i>	25
<i>c</i> )	10 "	30 "	20
<i>d</i> )	10 "	40 "	18
<i>e</i> )	20 "	10 "	69
<i>f</i> )	20 "	20 "	65
<i>g</i> )	20 "	30 "	57
<i>h</i> )	20 "	40 "	53
<i>i</i> )	30 "	10 "	220
<i>k</i> )	30 "	20 "	155
<i>l</i> )	30 "	30 "	127
<i>m</i> )	40 "	10 "	290
<i>n</i> )	40 "	20 "	255

Aus diesen Reihen kann die Geschwindigkeit des Wassers im Sande sowie außerhalb desselben und die Durchlässigkeit des Sandes berechnet werden. Dividiert man die Quantität des sub *A—N* abgeflossenen Wassers durch den Querschnitt der Glasröhre, =  $12.6 \text{ cm}^2$ , und durch die Zeit, = 180 Sekunden, so erhält man die Menge des Wassers, die in einer Sekunde unten durch ein Quadratcentimeter abfließt. Z. B. sub *N* ist bei 40 *cm* Sandhöhe und 20 *cm* Wasserhöhe die Menge des in 180 Sekunden abgeflossenen Wassers = 100;  $100 : 12.6 = 7.9$ ;  $7.9 : 180 = 0.044$ ;  $0.044 \text{ cm}^3$  ist die Menge des in einer Sekunde durch ein Quadratcentimeter der Basis abfließenden Wassers, oder 0.044 *cm* ist der Weg, den die Wassersäule nicht im Sande, sondern nach dem Austritte aus dem Sande in einer Sekunde zurücklegt, demnach die ganze Basisfläche in einer Sekunde mit einer 0.044 *cm* tiefen Wasserschichte überziehen würde, was aber durch Abfließen verhindert wird. Es ist die mittlere Geschwindigkeit des offenen Wassers in der Röhre ober und unmittelbar unter dem Sande. Der Sand füllt den Raum in der Säule nicht vollständig aus, sondern einen gewissen Teil dieses Raumes benötigt das Wasser

zum Durchgang. Beträgt der vom Wasser in Anspruch genommene Raum den 2., 3., etc. Teil des Gesamtraumes, so muß das Wasser dann mit einer 2-, 3-, etc. mal größeren Geschwindigkeit, als die des offenen Wassers ist, durch den Sand fließen, um die entsprechende Quantität bei seinem Austritte, der auch nur an dem 2., 3. etc. Teile der Oberfläche stattfindet, zu liefern; umgekehrt kann aus der Geschwindigkeit des offenen Wassers und aus der Geschwindigkeit des Wassers, welches den Sand durchfließt, berechnet werden, wieviel Prozent des Gesamtraumes das durchströmende Wasser einnimmt. Die Geschwindigkeit des Wassers im Sande wird aus der Zeit, in welcher die rote Tinte die Sandsäule durchfloß, und aus der Höhe der letzteren gefunden. Z. B. Sub *n* bei 40 *cm* Sandhöhe, 20 *cm* Wasserhöhe ist die Zeit mit 255 Sekunden angegeben, also  $40 : 255 = 0.16$ . 0.16 *cm* ist die wirkliche Geschwindigkeit des Wassers im Sande. Diese Geschwindigkeit dividiert durch die Geschwindigkeit des unter dem Sande ausfließenden Wassers ist:  $0.16 : 0.044 = 3.7$ . Die wirkliche Geschwindigkeit ist 3.7 mal größer als die Geschwindigkeit des offenen Wassers und der Raum, den das den Sand durchströmende Wasser einnimmt, ist der 3.7 Teil des Gesamtraumes,  $100 : 3.7 = 28$ , also 28%. Ich habe die Geschwindigkeit aus dem Wege und der Zeit berechnet, da meiner Ansicht nach die Geschwindigkeit des Wassers im durchtränkten Boden vom Druck abhängig und gleichmäßig ist. In ähnlicher Weise ergeben sich aus sub *A—N* und *a—n* angeführten Daten nachstehende Zahlenreihen, die in bezug auf die obigen wieder mit *a—n* rubriert sind. Die erste vertikale Ziffernreihe mit der Überschrift „Geschwindigkeit“ gibt die Geschwindigkeit des Wassers im Sande an; die zweite vertikale Zahlenreihe mit der Überschrift „Geschwindigkeit *w*“ gibt die Geschwindigkeit des offenen Wassers an; die dritte Zahlenreihe mit der Überschrift „Verhältniszahl“ gibt an, wieviel mal die erstere Geschwindigkeit größer ist als die zweite; die vierte vertikale Reihe mit der Überschrift „Prozent“ gibt an, wieviel Prozent des mit Sand gefüllten Raumes das durchfließende Wasser beansprucht.

	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit <i>w</i>	Verhältniszahl	Prozent
b)	0.4 <i>cm</i>	0.13 <i>cm</i>	3.1	32
c)	0.5 „	0.15 „	3.3	30
d)	0.56 „	0.18 „	3.1	32

	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit $w$	Verhältniszahl	Prozent
e)	0·28 <i>cm</i>	0·093 <i>cm</i>	3·2	31
f)	0·31 "	0·11 "	2·8	36
g)	0·35 "	0·12 "	2·9	34
h)	0·38 "	0·13 "	2·9	34
i)	0·14 "	0·047 "	3·0	33
k)	0·19 "	0·063 "	3·0	33
l)	0·24 "	0·08 "	3·0	33
m)	0·14 "	0·034 "	4·1	24
n)	0·16 "	0·044 "	3·6	28

Durchschnittlich ist die Geschwindigkeit des Wassers im ausgewaschenen Sande 3·2 mal größer als die Geschwindigkeit des ober dem Sande in der Glasröhre tiefer sinkenden oder des unten aus dem Sande austretenden Wassers; der Raum, den das solchen Sand durchfließende Wasser einnimmt, ist 3·2 mal kleiner als der Gesamtraum des Sandes oder 32% des Gesamtraumes dienen dem Wasser zum Durchfließen.

Die Wirkungen des erhöhten Druckes und der erhöhten Reibung treten bei diesen Reihen noch auffallender hervor. Der Einfluß der Reibung kann aus den sub *A—N* angeführten Daten bis zu einem gewissen Grade bestimmt werden. Infolge der Gesetze des freien Falles würde Wasser den vertikalen Weg von 20 *cm* in 0·2 Sekunden zurücklegen und mit einer Endgeschwindigkeit von 200 *cm* aus der Röhre unten austreten; bei 30 *cm* würden diese in 0·245 Sekunden durchfallen und die Endgeschwindigkeit ist 245 *cm*; bei 40 *cm* Höhe ist die Endgeschwindigkeit 283 *cm*, bei 50 *cm* Höhe 316 *cm* und bei 60 *cm* Höhe 347 *cm*. Daraus ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit für die Strecke von 20 *cm* per Sekunde 100 *cm*, für die Strecke von 30 *cm* per Sekunde 122 *cm*, für die Strecke von 40 *cm* per Sekunde 141 *cm*, für die Strecke von 50 *cm* per Sekunde 158 *cm* und bei der Strecke von 60 *cm* per Sekunde 173 *cm*. Sub *A* ist die Geschwindigkeit des aus dem Sande unten austretenden Wassers etwa 0·1 *cm* und, da nach früher Gesagtem die Geschwindigkeit im Sande 3·2 mal größer ist,  $0·1 \times 3·2 = 0·32$  *cm*. Die Höhe der Wassersäule in dem freien Falle ist 20 *cm*, daher die Endgeschwindigkeit des frei durchfallenden Wassers gleich 200 *cm*, die mittlere Geschwindigkeit ist per Sekunde 100 *cm* und  $100 : 0·32 = 310$ ; 310 ist der

Verzögerungswert, der angibt, wievielmals die mittlere Geschwindigkeit des frei fallenden Wassers verzögert wird, wenn dasselbe durch eine 10 cm hohe Sandschicht fließt. In ähnlicher Weise wurden für die anderen Angaben sub *A—N* der Verzögerungswert und die nach der eben angeführten Weise berechneten Geschwindigkeiten des Wassers im Sande bestimmt und in nachstehender Art übersichtlich zusammengestellt. Die Sand- und Wassersäulenhöhen entsprechen den unter dem Rubra *A—N* genannten Höhen. Des Vergleiches wegen ist die durch die Färbung des Wassers gemessene Geschwindigkeit unter der Überschrift „gemessen“ beigefügt.

	Verzögerungswert	Geschwindigkeit berechnet	gemessen
<i>a</i> <sub>1</sub> )	310	0·32 <i>cm</i>	
<i>b</i> <sub>1</sub> )	291	0·42 „	0·4 <i>cm</i>
<i>c</i> <sub>1</sub> )	295	0·48 „	0·5 „
<i>d</i> <sub>1</sub> )	272	0·58 „	0·56 „
<i>e</i> <sub>1</sub> )	408	0·3 „	0·28 „
<i>f</i> <sub>1</sub> )	404	0·35 „	0·31 „
<i>g</i> <sub>1</sub> )	415	0·38 „	0·35 „
<i>h</i> <sub>1</sub> )	413	0·42 „	0·38 „
<i>i</i> <sub>1</sub> )	943	0·15 „	0·14 „
<i>k</i> <sub>1</sub> )	790	0·20 „	0·19 „
<i>l</i> <sub>1</sub> )	667	0·26 „	0·24 „
<i>m</i> <sub>1</sub> )	1436	0·11 „	0·14 „
<i>n</i> <sub>1</sub> )	1239	0·14 „	0·16 „

Der größte Unterschied zwischen der berechneten und der gemessenen Geschwindigkeit des Wassers im Sande ist 0·04 *cm*. Ich machte die Versuche zwar mit möglichster Genauigkeit und Objektivität, jedoch die Verschiedenheit des Sandes, ferner auch der Mangel an den Hilfsmitteln, die allen Anforderungen entsprechen, als Chronograph etc., und an Hilfskräften — mit Ausnahme des Versuches mit roter Tinte, bei welchem mir ein Schuliener geholfen hat — sind Ursache der nicht genau stimmenden Resultate. Die Differenzen sind aber so klein, daß der annähernd richtige Wert der Zahlen kaum bezweifelt werden kann. Bei einer Höhe der Sandsäule von 10 *cm* hat die Wasserhöhe

einen deutlich ausgedrückten Einfluß auf den Verzögerungswert; bei der Höhe der Sandsäule von 20 *cm* ist kein Einfluß aus den Zahlen bemerkbar; jedoch bei der Höhe von 30 und 40 *cm* der Sandsäule wird nach obigen Daten der Verzögerungswert durch die höhere Wassersäule, also bei größerem Drucke auffallend kleiner. Die Ursache der jedenfalls fehlerhaften Daten bei der zweiten Gruppe ist darin zu suchen, daß zuviel rote Tinte über den Sand eingeführt wurde, welche eine Erhöhung der Wassersäule über den Sand zur Folge hatte, die nicht gleich behoben werden konnte. Bei größerem Drucke wird der Verzögerungswert kleiner, infolge dessen ist der Verzögerungswert bei den fehlerhaften Daten zu klein angegeben. Die Durchschnittszahlen der Verzögerungswerte sind: für 10 *cm* Sand 292, für 20 *cm* Sand 410, für 30 *cm* Sand 800, für 40 *cm* Sand 1337. Sie verhalten sich zu einander wie  $292 : 410 : 800 : 1337 = 1 : 1.4 : 2.7 : 4.6$ , annähernd wie  $1 : 2 : 3 : 4$ . Aus den Durchschnittswerten 292, 410, 800, 1337 der Sandsäulen von 10, 20, 30, 40 *cm* Höhe berechnet sich der mittlere Verzögerungswert für je eine Sandsäule von 10 *cm* Höhe auf 274, d. h.: die dem Wasser nach den Gesetzen des freien Falles für eine gewisse Höhe zukommende mittlere Geschwindigkeit wird beim Durchfließen von je 10 *cm* Sand je 274 mal verkleinert, wenn der Druck einer Wassersäule von 10 *cm* auf das fließende Wasser einwirkt. In bezug der Grundwasserströme, deren Gefälle in der Regel sehr klein ist, können wir aus dem großen Verzögerungswerte schließen, daß das Fließen dieser Ströme der Hauptsache nach nicht durch die Fallgeschwindigkeit, sondern durch den Druck erzeugt wird. Ist der Druck maßgebend, so gelten die Gesetze, wie sie aus den Vorgängen in den vertikalen Röhren, also aus den sub *A—N*, *a—n*, *a<sub>1</sub>—n<sub>1</sub>* angeführten Daten geschlossen werden können, nur daß dabei nebst der Höhe auch die Länge der Sandsäule, welche vom Wasser durchflossen wird, in Betracht zu ziehen ist. Bei Berücksichtigung der Fallgeschwindigkeit im Raume mit Beziehung auf das Gefälle und den Verzögerungswert erhalten wir bei einem Gefälle von 1 : 300 für den in der Zeiteinheit zurückgelegten Weg  $s = \frac{gt^2}{2} 0.003 = 0.017 \text{ m}$  oder 1.7 *cm*. Fließt das Wasser durch Sand, so ist für die Strecke von 1.7 *cm* der Verzögerungswert etwa 50, und  $1.7 : 50 = 0.034 \text{ cm}$  d. h. in einer Sekunde würden 0.34 *mm* zurückgelegt. Bei einer größeren Sandstrecke

wird die Geschwindigkeit entsprechend kleiner. Die Geschwindigkeit des Grundwasserstromes in Lauterach wird später mit 9 *mm* bestimmt; sie ist demnach 26 mal größer als die Geschwindigkeit, welche das Wasser im Sande in der Zeiteinheit durch den freien Fall bei einem Gefälle von 1 : 300 aufweist.

## II. Versuch

Ein feines Roßhaarsieb ist zwischen Holzreifen eingespannt und der eine Holzreifen ragt normal 10 *cm* über das Sieb empor. Die Vorrichtung wurde bis an den Rand mit Sand gefüllt. Durch eine Röhre, deren unteres Ende mit einem Badeschwamm verstopft war, wurde Wasser zugeführt, das demnach fast ohne Druck in den Sand eindrang. Der Sand absorbierte zuerst alles Wasser und erst, nachdem er bis zu einem gewissen Grade durchfeuchtet war, tropfte unten Wasser ab. Machte ich im Sande eine Grube, so füllte sich diese nur in einer bestimmten Tiefe mit Wasser, und zwar je näher der Quelle, nämlich dem Zuleitungsrohr, desto höher stand das Wasser in der Grube. Auf den feuchten Sand stellte ich vertikal eine zweite, mit trockenem Sand gefüllte Röhre. In dieser war infolge von Adhäsion das Wasser nach vier Tagen 30 *cm* hoch gestiegen. Der feuchte Sand bildete in der Röhre eine kompakte Masse, so daß der trockene Sand durch Umstürzen der Röhre von selbst herausfiel und die Höhe der durch Adhäsion durchfeuchteten Sandsäule leicht gemessen werden konnte. Eine Vertiefung in unmittelbarer Nähe dieser Röhre unten im Sande angebracht, wies in ungefähr 1 *cm* Vertikalabstand vom unteren Ende der Röhre Wasser auf.

Durch Adhäsion kann Wasser je nach dem Materiale ziemlich hoch aufgesaugt werden, es ist jedoch nicht frei beweglich und vermag einen größeren Hohlraum nicht zu füllen. Wenn die Durchfeuchtung einen gewissen Sättigungsgrad erreicht hat, übt das weiter nachsickernde Wasser einen Druck aus, der das Wasser beweglich macht, das ist: das Fließen desselben in vollständig durchtränktem Boden verursacht.

## III. Versuch

Denke ich mir eine Partie des Grundwasserstromes des Rheintales, der tiefer liegt als die Ache, und eine damit in Zusammenhang stehende Partie der Bregenzer Ache mit ihrem

Grundwasser derart herausgehoben, daß die Zuflüsse und Abflüsse noch tätig sind, so ist die Form des Apparates gegeben. In Fig. 1 ist der benützte Apparat in etwa ein Fünftel der natürlichen Größe dargestellt. Die beiden Dreilaufrohren aus Glas *A* und *B* sind vertikal gestellt. Ihre Querarme sind mit einer Kautschukröhre *K* verbunden und der Zeichnung entsprechend sind die Röhren *A* und *B* samt der Querröhre *K* mit gewöhnlichem Flußsand *S* gefüllt. Wenn der Sand zuerst gesiebt oder ausgewaschen wird, so spielen sich die Vorgänge in viel kürzerer Zeit ab und das Endresultat ist das eines gut wasserdurchlässigen Bodens. Ich wählte den wenig durchlässigen Sand, um den Vorwurf zu vermeiden, daß das Material künstlich präpariert sei. Das untere Ende der Röhre *A* ist mit Gaze versehen, damit wohl das Wasser abfließen, aber der Sand nicht mitgerissen werden kann. Die Röhre *B* ist unten wasserdicht verschlossen und steht mittels des Kautschukrohres mit der Röhre *A* in Verbindung. Die Hähne *x*, *y* dienen zur Regulierung des Wasserzufflusses, und zwar das aus dem Gefaße durch den Hahn *x* zufließende Wasser stellt den zuströmenden Grundwasserstrom, das aus dem Hahne

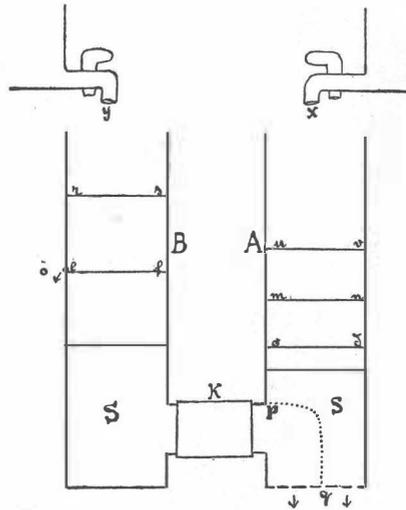


Fig. 1

*y* zufließende Wasser die Bregenzer Ache dar, von welcher Wasser unter einem von der Wasserhöhe abhängigen Druck in den Boden, hier in den Sand eindringt. In der Röhre *B* könnte allenfalls ein von oben bis zum Sande reichender schmaler, rechteckiger Streifen ausgeschnitten werden, welcher mit einer Platte verschlossen ist, an der eine verschiebbare Ausflußöffnung *ö* die Wasserstandshöhe beliebig zu fixieren gestattet. Da mir eine solche Vorrichtung nicht zur Verfügung stand, wurde die Wasserhöhe in der Röhre *B* durch entsprechende Wasserzufuhr aus dem Reservoir durch den Hahn *y* fixiert. Bei der weiteren Erörterung nehme ich kurzweg das Vorhandensein der Ausflußöffnung *ö* an. Durch Einleiten von Wasser wird aus dem Sande

in *B* und *K* die Luft zuerst entfernt. Verschließt man das Kautschukrohr, so stellt die Röhre *A* und das Wasser, welches die Röhre *A* durchströmt, eine Partie des Grundwasserstromes dar, welcher die Brunnen speist und in der Natur von wasserführendem Boden, im Apparate seitlich vom Glase begrenzt ist. Das aus dem Hahne *x* zufließende Wasser entspricht dem zuströmenden Grundwasserstrom, der nicht nur im Boden weiter sickert, sondern dessen Bewegung auch durch Druck gefördert wird. Infolge geeigneter Einstellung des Hahnes *x* wird das unten abfließende Wasser, das das abströmende Grundwasser darstellt, ersetzt und auch die über dem Sande befindliche Wassersäule *c*, *d* gleich hoch erhalten, letzteres, damit der Druck konstant bleibt. Die Richtung der Bewegung des Grundwasserstromes ist in Wirklichkeit nicht vertikal nach abwärts gerichtet, sondern zeigt vielmehr einen sehr kleinen Neigungswinkel. Es stellt daher die vertikale Röhre *A* den Aufriß (Vorderansicht) des schiefen Grundwasserstromes dar; oder es kann der Weg *s*, den der Grundwasserstrom in der entsprechend geneigten Röhre in einer Sekunde macht, zunächst ohne Rücksicht auf Reibung nach der Formel  $s = \frac{gt^2}{2} \sin \alpha$  berechnet werden;  $\sin \alpha$  ist das Gefälle des Grundwasserstromes. Die mit Sand gefüllte Kautschukröhre versinnbildlicht den Zusammenhang des Achwassers mit dem Grundwasser.

Werden die Wasserspiegel *c—d* und *e—f* in den Röhren *A* und *B* der Zeichnung entsprechend fixiert und der Verschuß des Kautschukrohres beseitigt, so dringt das Wasser der Röhre *B* durch das Kautschukrohr in die Röhre *A* ein und staut dort das Wasser, bis es die Höhe *m—n* erreicht hat. Erhöht man die Wassersäule in der Röhre *B* durch Höherstellen der Ausflußöffnung *ö* bis zur Linie *r—s*, so wird der Druck der Wassersäule in der Röhre *B* größer und der erhöhte Druck macht sich fast momentan auch in der Röhre *A* bemerkbar; das Wasser steigt dort allmählich bis zur Linie *u—v* und hält sich dann in dieser Höhe. Verschieben wir die Öffnung *ö* wieder auf ihre ursprüngliche Lage bis zur Linie *e—f* ohne weitere Änderung, so sinkt der Wasserspiegel in der Röhre *B* naturgemäß auf sein früheres Niveau *e—f*, aber auch in der Röhre *A* macht sich gleich der geringere Druck bemerkbar und der Wasserspiegel in derselben beginnt langsam zu sinken, bis er seinen früheren Stand *m—n* wieder erreicht hat. Wird die Wassersäule in der Röhre *B*

zwei-, dreimal etc. höher als eben erwähnt eingestellt, so steigt in gleichem Verhältnisse auch die Wassersäule in der Röhre *A*; beim Sinken der Wassersäule in der Röhre *B* sinkt auch dementsprechend die Wassersäule in der Röhre *A*. Das aus der Röhre *B* kommende Wasser möchte ich als Druckwasser, das oberhalb des Punktes *p* befindliche Wasser in der Röhre *A* als Stauwasser bezeichnen.

Die Höhe der Stauwassersäule gibt die Zone an, innerhalb welcher bei einem gewissen Gefälle die Stauwirkung sich bemerkbar macht. Das Steigen und Fallen der Wassersäule in der Röhre *A* beginnt fast zu gleicher Zeit mit dem Steigen und Fallen der Wassersäule in der Röhre *B*. Die vergrößerte oder verringerte Druckwirkung macht sich demnach fast momentan bemerkbar. Die Wassersäulen steigen und fallen gleichmäßig nur unter ganz bestimmten Verhältnissen, die in der Natur an den Stellen der seitlichen Berührung vorkommen. Erhöhen wir die Wassersäule in der Röhre *B* durch reichlichen Wasserzufluß und Verschiebung der Öffnung *ö* von *e—f* auf *r—s*, so macht sich der erhöhte Druck in Röhre *A* gleich bemerkbar und die Wassersäule in *A* beginnt langsam von *c—d* zu steigen, bis sie erst nach einiger Zeit die Höhe von *u—v* erreicht hat und dann beibehält. Dieses Steigen wird dadurch verursacht, daß infolge erhöhten Druckes in der Röhre *B* mehr Wasser durch das Kautschukrohr abfließt, die unter früheren Verhältnissen abfließende Stauwassermenge in der Röhre *A* einschränkt und das Steigen der Stauwassersäule so lange bedingt, bis infolge erhöhten Druckes in *A* die abfließende Wassermenge mit der Druckwassermenge in Gleichgewichtszustand kommt. Der Gleichgewichtszustand ist abhängig vom Druck und der abfließenden Wassermenge. Das Druckwasser tritt nicht über den Punkt *p*, es trägt zur Vermehrung der Stauwassersäule direkt nichts bei, vielmehr wird diese von jenem Stauwasser veranlaßt, das infolge der durchfließenden größeren Druckwassermenge am Abfließen verhindert war. Diese Menge nimmt mit dem Steigen der Stauwassersäule allmählich ab, daher das Steigen selbst allmählich langsamer vor sich geht. In der Regel tritt das Steigen der Stauwassersäule in verspätetem Sinne ein, es erreicht die größte Höhe später, als das Druckwasser sie erreicht.

Nun färbte ich das Wasser in der Röhre *B* mittels roter Tinte. Der Sand war wenig durchlässig und es vergingen 25 Mi-

nuten, bis das rote Wasser unten an der Röhre *A* abfloß. Die Grenze zwischen Druckwasser und Stauwasser ist sehr scharf und durch die punktierte Linie  $p-q$  gekennzeichnet. Hierauf verschloß ich die untere Öffnung der Röhre *A* mit der Hand, so daß das rote Druckwasser vermöge der Erscheinung bei kommunizierenden Röhren in das Rohr *A* aufsteigen mußte und dabei von unten nach oben allmählich das Stauwasser rot färbte. Nachdem die Färbung fast bis zum Sandniveau vorgeschritten war, gab ich die Öffnung wieder frei und in entsprechender Zeit wurde das Mischwasser bis auf die Grenzlinie  $p-q$  vollständig aus dem Stauwasser verdrängt. Die Bildung des Mischwassers findet demnach nur an den Berührungsflächen des Druckwassers und des Stauwassers statt, und zwar innerhalb sehr beschränkter Grenzen. Theoretisch tritt eine vollkommene Mischung zwischen Druck- und Stauwasser bis zum Stauwasserspiegel ein, wenn die Menge des Stauwassers im Verhältnisse zu der des Druckwassers verschwindend klein wird; ist das nicht der Fall, so können Stau- und Druckwasser ganz verschiedene chemische und physikalische Eigenschaften haben. Überträgt man diese Erscheinungen auf das Lauteracher Gebiet, so zeigt eine völlige Verschiedenheit in bezug der chemischen Zusammensetzung und der thermischen Verhältnisse des Achwassers und des Grundwassers innerhalb einer bestimmten Zone reines Stauwasser an. Jeder Faktor, der im Apparate ein Steigen oder Sinken der Wassersäulen bedingt (z. B. *a*) der verschiedene Druck, *b*) die Vergrößerung der Verbindungsröhre, ebenso die Verkürzung derselben, wodurch in beiden Fällen mehr Wasser aus der Röhre *B* in die Röhre *A* gelangen kann, verursachen unter sonst gleichen Umständen ein Steigen der Wassersäule in der Röhre *A*, das selbst bis zur Höhe des Druckwasserspiegels stattfinden kann, wenn die Erweiterung der Röhre den größten Wert erreicht und die Verkürzung = 0 wird, d. i., wenn Druckwasser und Stauwasser ohne Scheidewand aufeinander einwirken; die Verengung oder Verlängerung der Verbindungsröhre ruft ein Sinken der Wassersäule in der Röhre *A* hervor . . . etc.), wird in der Natur in ähnlicher Weise ein Heben und Senken der Wasserspiegel zur Folge haben.

Für den speziellen Fall, den wir verfolgen, hat die durch Druck hervorgerufene Stauung die größte Bedeutung. Diese Stauung tritt in der Umgebung von Lauterach, wie später ausführlicher begründet wird, und in allen Gebieten ähnlicher Formation auf.

Um nachzuweisen, daß der Druck durch die Reibung im wasserdurchtränkten Boden nicht unwirksam wird, machte ich verschiedene Versuche, von denen ich kurz folgenden bespreche:

Die Röhren *A* und *B* (der Einfachheit halber wähle ich zur Erklärung die Zeichnung der Fig. 1, und zwar ist auch die Röhre *A* zunächst als unten geschlossen zu betrachten) sind bis zu einer Höhe von 5 cm mit Sand gefüllt. Leite ich in die Röhre *B* Wasser ein und erhalte die Wassersäule in konstanter Höhe, etwa 40 cm über dem Sande, so daß der Druck derselbe bleibt, so stellen sich nach kürzerer oder längerer Zeit, je nachdem die Röhre *A* z. B. mit einer 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm höheren Sandschichte gefüllt wird, die Wassersäulen immer gleich hoch. Die größere oder geringere Durchlässigkeit des Sandes ändert nichts an dem Endresultate. Verlängere ich das mit Sand gefüllte Querrohr um 1 m, dann um 2 m, so erhalte ich auch hier schließlich dieselben Endresultate, d. h., die Wasserspiegel in beiden Röhren liegen in derselben Ebene. Öffne ich die Röhre *A* unten, so wird das Wasser mit demselben Drucke, mit dem es früher aufwärts gedrückt wurde, nach abwärts drücken und, wenn es auf Wasser stößt, auf dasselbe einen entsprechenden Druck ausüben. Aus diesen Versuchen ergibt sich: Durch das Experiment läßt sich der Einfluß von höher befindlichem, druckkräftigerem Wasser im Boden auf tiefer fließendes Wasser nachweisen. Durch die Reibung wird die Zeit, innerhalb welcher sich die Vorgänge abspielen, verzögert und in diesem Sinne auch nur die Endwirkung beeinflußt.

Bei artesischen Brunnen wird das Emporsteigen des Wassers allgemein dem Drucke zugeschrieben, der in den meisten Fällen auf bedeutend größere Distanzen als 1—2 km im wasserdurchtränkten Boden seine Wirkung ausübt.

Stauung kann ferner noch hervorgerufen werden durch ein geringeres Gefälle, durch weniger wasserdurchlässigen Boden und durch ein Hindernis, wie beispielsweise ein wasserdichter unterirdischer Felsrücken oder eine wasserundurchlässige Tonschichte das Grundwasser so lange ansammeln, bis es überfließt, oder wenn das Grundwasser sich in einen See ergießt, so kann dieses meist nur unter einem gewissen Drucke stattfinden. Wird das Gefälle steiler oder der Boden wasserdurchlässiger, so tritt eine negative Stauung ein, d. h. der Spiegel des zuströmenden Grundwassers wird dadurch erniedrigt. Es ist leicht möglich, daß zwei oder

mehrere Ursachen der Stauung im positiven oder negativen Sinne auf den Grundwasserstrom einwirken, dann ist naturgemäß die Lösung der Frage eine viel schwierigere.

Aller Wahrscheinlichkeit nach gleichen die hydrostatischen Verhältnisse unterirdischer Wässer jenen in offenen Gewässern, nur daß bei ersteren die Reibung, Adhäsion etc. eine größere Rolle spielen.

Beobachten wir beispielsweise die Einwirkung der Salzach bei Salzburg auf den Gersbach, der oberhalb der Karolinenbrücke in die Salzach mündet. Der Gersbach bezieht sein Wasser vom Gaisberg und aus dem Quellengebiete von Parsch und Aigen. Es ist wasserhell oder von dunkler Färbung und sticht vom Wasser der Salzach, das bei höherem Wasserstande, den wir voraussetzen, von schmutzig gelblichgrauer bis rötlichbrauner Färbung ist, sehr deutlich ab. Das Bett des Gersbaches ist in seinem Unterlaufe bis zur Mündung auf eine Distanz von 600 *m* ausgemauert und unmittelbar an seinem Auslaufe trichterartig erweitert. Die Erweiterung beträgt am oberen Ende (Südseite) kaum 1 *m*, unterhalb (Nordseite) 2 *m*. Die Richtung der Salzach bildet mit der Richtung des Gersbaches einen Winkel von 40°. Bei niederem Wasserstande der Salzach fließt der Gersbach über eine Stufe in die Salzach. Steigt das Salzachwasser z. B. 1 *m*, das Gersbachwasser aber bleibt ziemlich konstant, so wird der Gersbach gestaut.

Am 13. Juli 1906 war das Salzachwasser etwa  $\frac{1}{2}$  *m* höher als der Spiegel des Gersbaches und verursachte eine Rückstauung des Gersbaches. Die Grenze zwischen dem klaren Gersbachwasser und dem trüben Salzachwasser war oben bis zur Mitte ziemlich scharf. Ersteres drang oben unter das Salzachwasser, gegen die Mitte der Mündung und etwas unterhalb derselben auch an der Oberfläche und zwar strichförmig in jenes ein; am unteren Ende der Mündung trübte Salzachwasser bis zu 2 *m* Normalabstand von der Mündung das Gersbachwasser und versetzte es in kreisende Bewegung. Am 14. Juli stieg die Salzach bedeutend. Am 15. Juli früh begann sie wieder zu sinken, stand aber um 8 Uhr früh noch 2·4 *m* höher als am 13. Juli und führte sehr trübes Wasser. Der Gersbach war um 4 *dm* höher als am 13. und war auch etwas getrübt, so daß sein Wasser dunkel gefärbt erschien. Zeitweise warf oben über den flachkegelförmigen Damm die Salzach eine

Welle, die das Gersbachwasser trübte, sonst war oben die Grenze zwischen beiden Wässern in Form einer aus bacheinwärts konvexen, verschieden großen Kurven zusammengesetzten Linie deutlich sichtbar. Wolkenartig schob sich das Salzachwasser in das dunkle Wasser 1—4 *dm* weit vor, rückte langsam abwärts und bedingte die wechselnde Gestalt der Kurve. Unterhalb der Mitte drängte das gestaute Gersbachwasser die Salzach bis auf 2—3 *m* Abstand vom Ufer ab und mischte sich allmählich mit dem trüben Flußwasser, welches haufenwolkenartig bald in der Höhe, bald in der Tiefe in das Gersbachwasser sich hineinwälzte und streifenförmige Partien mit unregelmäßig veränderlichen Formen vom letzteren gleichsam abschnitt; dabei näherte sich die Grenze mehr und mehr dem Ufer und in der Entfernung von 50 *m* flußabwärts floß scheinbar nur mehr trübes, unvermishtes Salzachwasser. Die Ausdehnung des echten Stauwassers erstreckte sich auf 350 *m*, 60 *m* weiter war eine Art Übergangswasser und dann erst kam von der Stauung nicht betroffenes Bachwasser. Die Oberfläche des Stauwassers ist glatt, die des Übergangswassers unruhig und zeigt deutliche Wellenbewegung, die sich bachaufwärts steigert und im Gebiete, wo keine Stauung mehr einwirkt, gleichmäßig stark wird; die Grenzen sind jedoch nicht scharf ausgeprägt.

Den 15. Juli, nachmittags 5 Uhr, war das Wasser weiter um 1·2 *m* gefallen. Am oberen Ende der Mündung trat Salzachwasser bis zu 1 *m* weit in die trichterartige Erweiterung ein. Das Stauwasser drang fast parallel der Bachrichtung bis auf 1—1·5 *m* Abstand vom Salzachufer in die Salzach hinaus und floß dann längs dem unteren Ufer ab. Es trat auch hier wieder Salzachwasser wolkenartig in das Gersbachwasser ein und zwischen den einzelnen trüben Ballen waren dunkle Wasserstreifen sichtbar. Am unteren Ende der Trichtermündung oder auch etwas unterhalb hob sich von Zeit zu Zeit bald mitten im dunklen Wasser, bald näher dem Ufer oder der Salzach aus der Tiefe eine mächtige Wolke trüben Wassers empor, welche Streifen vom Gersbachwasser abschnitt, die unter steter Formveränderung und Verkleinerung in einem Abstände von 30—40 *m* von der Mündung vollständig verschwanden. Die Rückstauung betrug etwa 300 *m*, davon entfallen ungefähr 40 *m* auf die Übergangsstrecke. Am 16. Juli, 5 Uhr nachmittags, war die Salzach nur mehr 2 *dm* höher als am 13. Juli. Gersbach- und Salzachwasser unterscheiden sich

durch auffallend verschiedene Färbung. Trübe Flußwasserwolken, welche langsam abwärts ziehen, ändern stets die Grenzlinie. Das Gersbachwasser taucht unter den Wolken in die Tiefe, von der Mitte an werden manchmal Streifen davon in den Fluß hinausgerissen. Am unteren Ende fließt es als ungefähr 1 m breites Band längs des Ufers ab und wird von aufsteigenden Wolken in einzelne Partien geteilt, die sich bald mit dem Salzachwasser mischen. Das Stauwasser reichte 110 m, das Übergangswasser 40 m weiter flußaufwärts.

Die gemeinsamen Stauungserscheinungen bei diesen Beobachtungen sind: Die Salzach schiebt sich in der Höhe vom Südufer bis unterhalb der Mitte der Mündung in Wolkenform bachwärts, während der Gersbach unter den Wolken entsprechend dem Böschungswinkel des Ufers mit zunehmender Tiefe mehr und mehr in die Salzach hineinragt. Von der Mitte an oder unterhalb derselben fließt das Gersbachwasser parallel der Salzach ab und bildet längs des Ufers ein mehr weniger schmales Band; davon werden öfter in der Tiefe, nicht selten auch an der Oberfläche Teile durch Salzachwolken, welche sich in das Band hineinwälzen, abgeschnitten, die dann unter wechselnder Form und mit dem Flußwasser sich mischend dem Auge allmählich entschwinden. Das Stauwasser ist in steter Bewegung, welche an der Mündung am geringsten ist, dort an einzelnen Stellen auch ganz aufhören kann, flußaufwärts aber allmählich zunimmt, bis zu dem von der Stauung ganz unabhängigen Gebiete des Baches, in welchem die Geschwindigkeit ein Maximum aufweist und auch konstant beibehält, so lange das Gefälle bachaufwärts sich nicht ändert. Die Oberfläche des Stauwassers bildet bis zur Maximumgrenze eine parabolische Kurve, deren Krümmung im Übergangswasser am größten ist.

Die Stauung tritt nicht überall gleichzeitig ein, sondern zuerst an der Mündung und von dort pflanzt sie sich gleichsam wellenförmig bachaufwärts fort. Steigt das Flußwasser höher als das Stauwasser, so wird infolge des erhöhten Druckes das Abfließen des Stauwassers in den Fluß so lange gehemmt, bis durch nachfließendes Stauwasser die Höhendifferenz ausgeglichen ist. Der Ausgleich schreitet vom Beginne des Stauterrains aufwärts bis zu seinem Ende mit einer Geschwindigkeit fort, die der Hauptsache nach von der Geschwindigkeit des nachfließenden Bachwassers abhängig ist (Versuch III). Fällt der Fluß, so verursacht

dies eine Senkung des Stauwassers an der Mündung und die Senkung pflanzt sich wieder gleichsam wellenförmig bachaufwärts fort.

Im Stauterrain lassen sich verschiedene Zonen unterscheiden:

Die I. Zone umfaßt das Gebiet des reinen Salzachwassers;

die II. Zone das Mischwasser der Salzach und des Gersbaches, die höchstens 3 m bachaufwärts reicht, flußabwärts unbegrenzt ist;

die III. Zone ist die des reinen Stauwassers;

die IV. Zone liegt innerhalb der Grenze, die theoretisch bestimmbar ist durch die Linien, in welchen der Spiegel des reinen Stauwassers nach aufwärts verlängert: a) den Spiegel, b) die Sohle des von der Stauung nicht beeinflussten Bachwassers schneidet;

der V. Zone gehört das von der Stauung unabhängige Bachwasser an. In Wirklichkeit sind die Grenzen zwischen den Zonen III, IV sowie IV und V nicht scharf ausgeprägt, können aber annähernd aus den Bewegungserscheinungen der Oberfläche, wie bereits erwähnt wurde, bestimmt werden. Würde die Salzach rascher steigen, so daß das nachfließende Gersbachwasser zur selben Zeit das Stauwasser nicht entsprechend erhöhen könnte, so fließt Salzachwasser über, mischt sich mit dem Stauwasser so lange, bis die Spiegelhöhe der Salzach erreicht ist, dann wird allmählich das Mischwasser hinausgedrängt und das Stauwasser enthält bis auf die Grenzpartie nur mehr Gersbachwasser.

Diese letztere Erscheinung beobachtete ich nicht an diesem Objekte, wohl aber an zwei kleinen Bächen, bei welchen ich den Vorgang durch mechanische Einwirkung hervorrief und genau verfolgen konnte.

Es unterliegt wohl keinem Zweifel, daß ähnliche Verhältnisse auch beim Zusammentreffen zweier verschieden hoch verlaufender Grundwasserströme oder eines Grundwasserstromes und eines Flusses herrschen und demnach vermag die Bregenzer Ache den Grundwasserstrom im Rheintale bis zu einer gewissen Grenze zu stauen, ferner kann z. B. Achwasser in das Grundwasser eindringen oder auch überfließen, wenn die Bregenzer Ache so rasch höher steigt, daß das Stauwasser durch das nachströmende Grundwasser die entsprechende Erhöhung nicht erreicht, aber nur so lange, bis das nachfließende Grundwasser die Wassermenge wieder ergänzt hat, welche notwendig ist, um die erwähnte Erhöhung

hervorzurufen. Dieses Überfließen von Achwasser in das Grundwasser könnte auch als Einsickern aufgefaßt werden.

Auf meine Veranlassung wurde unter Aufsicht des Herrn Bürgermeisters von Lauterach aus einem sogenannten guten Brunnen so viel Wasser möglichst rasch ausgepumpt, bis der Spiegel des Brunnenwassers 10 *cm* tiefer lag. Durch das „möglichst rasche Auspumpen“ soll der Fehler, den das Wasser bedingt, welches während des Pumpens in den Brunnen einströmt, möglichst verringert werden.

Die Menge des ausgepumpten Wassers war 60 *l*. Nach 5 Minuten füllte sich wieder der Brunnen bis zu seiner ursprünglichen Höhe. Das ausgepumpte Wasser stellte im Brunnen einen Hohlzylinder von 10 *cm* Höhe und 60 *dm*<sup>2</sup> Basis dar. Der Durchmesser der kreisförmigen Grundfläche ist 88 *cm*. Denken wir uns, daß das Grundwasser gleichsam als zusammenhängender Strom im Boden sich weiterbewegend durch den 88 *cm* langen Raum fließt und das Ende desselben in 300 Sekunden erreicht, so legt er in einer Sekunde  $(88 : 300) = 0.29$  *cm* zurück. Der Brunnen ist sehr gut, daher der Boden gut wasserdurchlässig ist. Aus dem Versuche I ergibt sich, daß im gut wasserdurchlässigen Boden die Geschwindigkeit des offenen Wassers 3.2 mal kleiner ist als die im wasserdurchtränkten Sandboden, daher ist die wirkliche Geschwindigkeit des Grundwasserstromes im Gebiete dieses Brunnen 0.93 *cm*, kurz 0.9 *cm*. Schon früher erwähnte ich, daß das offene Wasser im Schotter bei Salzburg eine Maximalgeschwindigkeit von 0.17 *cm* aufwies, daher die Geschwindigkeit im Sande 0.54 *cm* ist. Der oberflächliche Schotterboden in den Salzachsotterbänken ist weniger wasserdurchlässig als der Boden in Lauterach.

Auf Grund der im Versuche III erhaltenen Resultate wurde der direkte Nachweis des Zusammenhanges zwischen den Brunnen und Quellen in Lauterach und der Bregenzer Ache in folgender Weise durchgeführt:

Ich wählte eine Reihe von offenen Brunnen in verschiedener Entfernung von der Bregenzer Ache aus, und zwar die Brunnen bei den Häusern Nr. 1 (Geiger)<sup>1)</sup> in Wohlfurth, Nr. 235 (Bauer) in Lauterach, Nr. 229 (Ölz Kaspar) in Lauterach, Nr. 226 (Ölz Theodor), Nr. 206 (Krenkel), Nr. 121 (Schertler), Nr. 54 (Reiner)

<sup>1)</sup> 800 *m* östlich von Bauer, flußaufwärts gelegen.

in Lauterach und die Lauterach im Quellterrain. Die Entfernung der Brunnen von der Bregenzer Ache beträgt ungefähr bei Bauer 150 m, bei Ölz Kaspar 500 m, bei Ölz Theodor 550 m, bei Krenkel 750 m, bei Schertler 1200 m, bei Reiner 1250 m, den Lauteracher Quellen 1250 m. Bei diesen Brunnen und bei der Lauterach wurde in der Zeit vom 29. August 1905 bis 11. September 1905 täglich früh 7—8 Uhr und abends 5—6 Uhr die Wasserspiegelhöhe und zu gleicher Zeit die Spiegelhöhe der Bregenzer Ache von der städtischen Brücke und der Wohlfurthener Brücke aus gemessen. In der beifolgenden Tabelle sind die Resultate der Messung übersichtlich dargestellt, und zwar sind nur die Differenzen der jeweiligen Spiegelhöhen in Zentimetern angegeben. Das Zeichen + vor der Zahl bedeutet, daß der Wasserspiegel innerhalb der angegebenen Zeit um so viel Zentimeter, als die Zahl anzeigt, gestiegen, das Vorzeichen —, daß der Wasserspiegel um so viele Zentimeter gefallen ist. Ein Strich zeigt an, daß eine Messung zur betreffenden Zeit nicht stattgefunden hat. Die Größe der innerhalb der angegebenen Zeit stattgefundenen atmosphärischen Niederschläge ist den Aufschreibungen der meteorologischen Anstalt in Bregenz entnommen. Vergleicht man das etwas verspätete Steigen und Fallen der Brunnenpiegel mit dem Steigen und Fallen des Achwasserspiegels, so ist der Einfluß des Achwassers auf die Brunnen unzweifelhaft zu erkennen. Es kann nicht dem Steigen oder Fallen des Grundwasserspiegels zugeschoben werden, da sonst alle Brunnenpiegel gleichmäßig steigen müßten, oder ist der Boden in der Flußnähe mehr durchschlammt und würde dadurch eine Stauung des Grundwasserstromes hervorgerufen, so hätte diese Stauung eine Verspätung der Erhöhung des Brunnenwassers in der Nähe der Ache zur Folge, die Wasserspiegel würden dort nicht zuerst steigen, wie es tatsächlich der Fall ist, sondern zuletzt.

Die Erklärung der Verspätung des Steigens und Fallens von Stauwasser gründet auf den Erscheinungen des Versuches III, nach welchen die erhöhte oder verminderte Druckwirkung sich fast momentan bemerkbar macht, aber das Steigen oder Fallen des Stauwassers allmählich vor sich geht, und auf den Erscheinungen bei offenen Gewässern, bei welchen je größer die Entfernung von der Stauquelle ist, desto später die Reaktion eintritt. Es ist daher auch möglich, daß das Achwasser sinkt und die Wirkung des Sinkens sich auf die Brunnen bemerkbar macht, bevor dieselben ihre dem früheren hohen Stande des Flusses entsprechende

Datum	Niederschlagsmenge	Achein Lauterach	Achein Kennelbach	Geiger Wohlfurth Nr. 1 200 m	Bauer Lauterach Nr. 235 150 m	Ölz Kaspar Nr. 229 500 m	Ölz Theodor Nr. 226 550 m	Krenkel Nr. 206 750 m	Schertler Nr. 121 1200 m	Reiner Nr. 54 1250 m	Lauteracher Ache
29./8. abends 5—6	mm 14·7	cm —	cm —	cm —	cm —	cm —	cm —	cm —	cm —	cm —	cm —
30./8. früh 7—8	1·4	— 59·0	—	— 7·5	— 8·0	—	—	+ 7·0	+ 7·0	+ 5·0	—
30./8. a.	0	— 19·0	—	— 6·0	— 7·0	—	—	+ 1·5	+ 2·0	0	—
31./8. f.	0	— 13·0	—	— 8·0	— 7·0	—	—	0	0	— 2·0	— 0·2
31./8. a.	0	— 5·0	—	— 5·0	— 4·5	— 2·0	—	0	— 1·0	+ 4·0	+ 0·7
1./9. f.	0	— 10·0	—	— 6·5	— 4·5	— 3·0	—	— 1·5	— 2·0	— 1·5	0
1./9. a.	0	— 3·0	—	— 3·5	— 4·0	— 3·0	—	— 1·0	— 1·5	— 1·5	+ 0·2
2./9. f.	0	— 7·0	—	— 5·0	— 5·0	— 4·0	—	— 3·0	— 2·5	— 2·0	+ 0·1
2./9. a.	0	0	—	— 3·0	— 3·5	— 1·5	—	— 2·0	— 2·0	— 1·5	+ 0·2
3./9. f.	8·3	0	—	— 2·0	— 2·0	— 3·0	—	— 0·5	— 1·5	— 1·5	0
3./9. a.	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4./9. f.	6·0	+ 51·0	—	+ 15·5	+ 16·0	+ 7·5	—	0	0	+ 0·5	— 0·3
4./9. a.	0	+ 13·0	—	+ 0·5	0	+ 0·5	—	+ 0·5	+ 0·5	+ 1·0	+ 0·5
5./9. f.	1·0	— 20·5	— 21·5	+ 0·5	+ 1·5	+ 1·5	—	+ 0·5	+ 1·0	+ 0·5	+ 0·1
5./9. a.	—	— 14·5	— 7·0	— 2·5	— 3·0	— 0·5	— 0·5	+ 1·0	— 0·5	0	0
6./9. f.	0	— 16·0	— 17·5	— 5·5	— 6·0	— 3·5	— 2·5	— 2·0	— 1·0	— 5·0	+ 0·7
6./9. a.	—	— 3·0	— 6·5	— 6·0	— 4·0	— 2·0	— 2·5	— 0	— 1·0	— 1·5	— 0·7
7./9. f.	2·5	— 3·5	— 3·5	— 5·0	— 4·0	— 4·0	— 3·0	— 2·5	— 1·0	— 1·5	+ 0·8
7./9. a.	—	— 2·5	— 6·5	— 1·5	— 3·5	— 1·5	— 1·5	— 2·0	— 0·5	— 1·0	+ 0·2
8./9. f.	0	— 5·5	— 3·5	— 4·0	— 1·5	— 3·0	— 3·0	— 1·5	— 2·0	— 1·5	— 0·1
8./9. a.	—	— 3·5	— 3·5	— 4·0	0	— 3·0	— 2·0	— 1·5	— 0·5	— 0·5	+ 0·1
9./9. f.	5·4	+ 2·5	— 2·5	— 6·0	— 1·0	— 2·0	— 3·0	— 4·5	— 2·5	— 3·0	+ 0·2
9./9. a.	—	—	—	+ 1·0	0	— 1·0	— 2·0	0	— 1·5	— 0·5	+ 0·2
10./9. f.	1·0	— 11·0	— 9·0	— 1·0	— 2·0	— 1·0	— 2·0	— 0·5	— 1·0	— 0·5	+ 0·1
10./9. a.	—	— 1·0	— 5·0	0	0	— 1·0	0	— 1·0	— 1·0	0	0
11./9. f.	0	— 6·0	— 6·0	— 4·0	— 6·0	— 3·0	— 2·5	— 1·5	— 2·0	— 0·5	+ 0·1

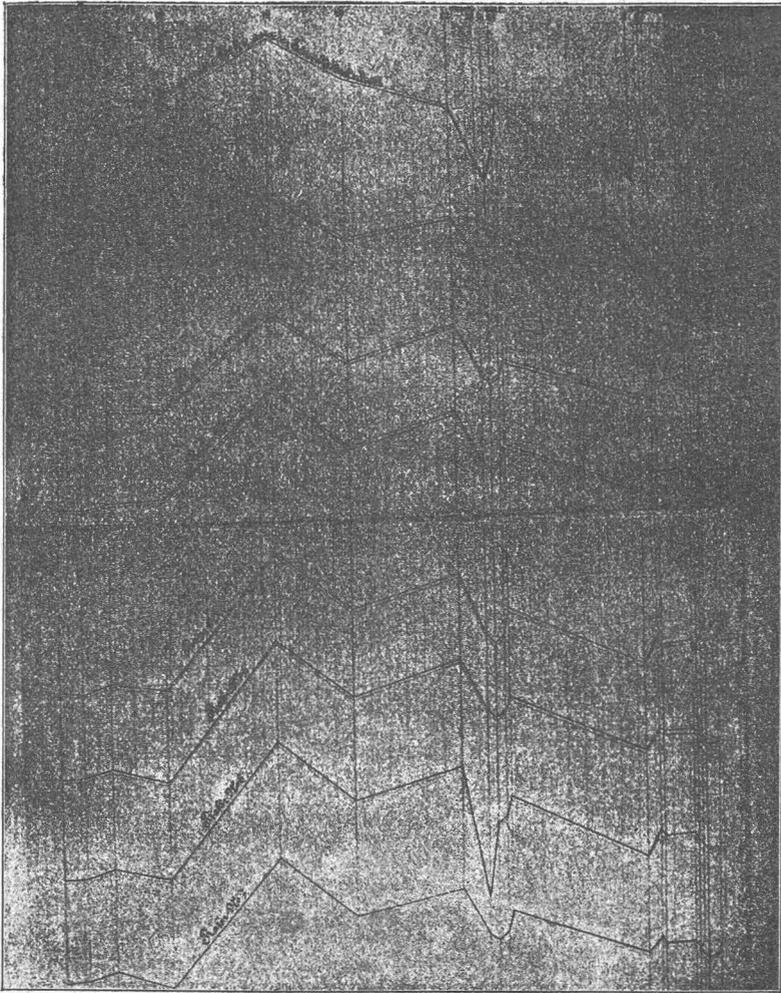


Fig. 2. Herrn Faigles Röhrenbeobachtungen

Die oberste Kurve gibt die Schwankungen des Wasserspiegels der Bregenzener Ache vom 20. Juni bis 20. November 1905 an. Die darunter befindlichen Kurven zeigen der Reihe nach die entsprechenden Spiegelschwankungen des Wassers in den Versuchsrohren I—VII während desselben Zeitraumes an

höchste Lage erreicht haben. Die wirkliche Größe der Einwirkung der Ache auf die Brunnen kann infolgedessen richtiger aus der Fallperiode vom 5. bis 11. September berechnet werden. Während dieser Zeit ist die Ache in Lauterach 84,5 cm, in Kennelbach 92 cm gefallen. Die Brunnenpiegel sind während dieser Zeit ge-

fallen: bei Geiger 38·5 *cm*, Bauer 31 *cm*, Ölz Kaspar 25·5 *cm* etc., das sind, wenn wir das Fallen der Ache mit 92 *cm* berücksichtigen, in Prozent umgerechnet: 42 ‰, 33 ‰, 28 ‰ etc. Der besseren Übersicht halber ist das Verhältnis der Abnahme der Brunnenpiegelhöhen je nach ihrer Entfernung von der Ache infolge Steigens der Achhöhe um 1 *m* über den mittleren Wasserstand in Fig. 3 graphisch dargestellt (*b* ist die Spiegelhöhe der Ache).

Herr Fabrikant Faigle in Hard ließ längs des äußeren, linksseitigen Wehrdammes der Ache 10 Röhren in den Boden schlagen und zwei Gruben ausheben. In der Zeit vom 20. Juni bis zum 20. November 1905 wurden dort täglich Beobachtungen über den Wasserstand in diesen Objekten und der Ache gemacht, laut welchen die Wasserspiegelhöhen in den Röhren und Gruben mit dem Steigen und Fallen der Ache im selben Verhältnisse sich hoben und senkten.

Innerhalb des Zeitraumes vom 14. bis 23. November wurden einige Brunnen Lauterachs von anderer Seite untersucht und aus den Messungen resultierte, daß im Verhältnisse des Steigens und Fallens der Wasserhöhen der Ache anfangs September und Mitte November auch das Steigen und Fallen der Brunnenpiegel zur selben Zeit im gleichen Verhältnisse stattfand.

Ich glaube, daß durch die erwähnten Beobachtungen die Größe des Einflusses der Ache auf den Grundwasserstrom und die Einflußsphäre, d. i. der Gürtel, innerhalb welchem der Einfluß der Ache sich noch bemerkbar macht, hinlänglich bewiesen ist.

Die Fig. 3 stellt zugleich den Querschnitt eines liegenden dreiseitigen Wasserprismas dar, dessen eine Fläche die Mantelfläche eines parabolischen Zylinders ist.

Wird das Prisma von dem aus der höher liegenden Ache einsickernden Flußwasser erzeugt, so erscheint es in der Lage dem Spiegel des Grundwasserstromes aufgesetzt; wird es durch Stauung erzeugt, so ist es nach abwärts noch zu ergänzen. Wir nehmen zuerst den ersten Fall an. Die Seite *a—b* bezeichne ich als die Höhe des Prismas, da sie angibt, wie hoch diese Säule über den Grundwasserstrom emporragt. Die Höhe ist von Wohlfurt bis zu einer Entfernung von ungefähr 1300 *m* Abstand vom Bodensee ziemlich gleich, dann aber wird sie, von der Stauwirkung des Seewassers beeinflusst, gleichmäßig niedriger und am See selbst = 0, sie fällt mit dem Spiegel desselben zusammen. Die Höhe ist

im Verhältnisse 1 : 20 gezeichnet, daher 1 cm der Zeichnung gleich 20 cm der wirklichen Länge entspricht. Die Linie  $a-c$  ist in Wirklichkeit etwa 1300 m lang, also im Verhältnisse 1 : 20.000 gezeichnet. Sie versinnbildlicht die Querschnittslinie der Basis des Prismas und zugleich die Einflußsphäre. Die parabolische Linie  $b-c$  ist die Durchschnittslinie der Oberfläche jenes Bachwassers, das durch die Einwirkung der Ache über den Spiegel des Grundwasserstromes emporgehoben ist oder darüber sich ergossen hat.

Für die Sickerwassertheorie spricht: Eine genauere chemische Untersuchung von Wasser, das aus Brunnen in verschiedener Entfernung von der Ache stammte, stellte fest, daß die der Ache näher liegenden Brunnen ein Wasser aufweisen, das mit der Annäherung an die Ache auch in seiner Zusammensetzung sich etwas dem Achwasser nähert; ferner ist die Ache höher als das Grund-

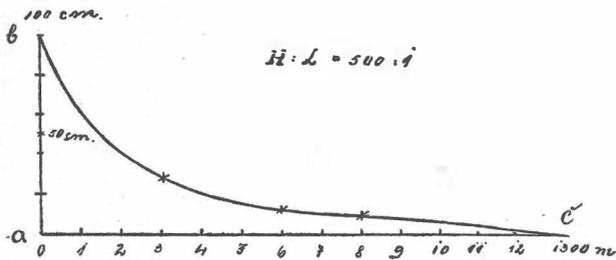


Fig. 3

wasser, es sickert daher das höhere Achwasser in den tieferliegenden Brunnen ein und erzeugt so das Wasserprisma, ohne einen wesentlichen Druck auf das Grundwasser auszuüben. Im nachstehenden sind die Gründe, welche für die Stauung und gegen die Wirkung des Sickerwassers sprechen, erörtert.

Das proportionale Steigen und Fallen der Ache und der Brunnenpiegel anfangs September und Mitte November, ebenso in den Röhren und Gruben vom 20. Juni bis 20. November wird viel einfacher durch die Stauwirkung als mit Hilfe der Sickertheorie erklärt. Es müßte nach letzterer die Fläche, durch welche das Wasser in den Boden einsickert, wobei vorausgesetzt wird, daß der Boden überall gleich wasserdurchlässig ist, mit dem Steigen des Achwassers im selben Verhältnisse zunehmen, was nur in gewissen Fällen zutrifft, während infolge Stauung bei jedem Steigen und Fallen der Ache auch die Brunnenpiegel im selben Ver-

hältnisse steigen und fallen. Durch Nivellement der Spiegelhöhen wurde das Gefälle und die Richtung des Grundwassers genau bestimmt. Flußwasser und Grundwasser fließen fast parallel zueinander, nur von Wohlfurt bis Lauterach bildet die Richtung des Grundwasserstromes mit der Richtung der Achse divergierend einen spitzen Winkel. Nehmen wir Sickerwasser als Ursache des Wasserprismas an, so muß die Richtung desselben nach dem Gefälle der Kurve Fig. 2 in unmittelbarer Nähe des Flusses normal, in der Entfernung von 300 m mindestens  $45^\circ$  zur Achse betragen, was nicht der Fall ist. Verursacht Stauung die Bildung des Prismas, so gelten wahrscheinlich wieder ähnliche Verhältnisse wie bei den Tagwässern. An der Berührungsfäche zwischen Fluß- und Stauwasser fließt dieses, wenn auch seine Richtung früher eine ganz andere war, fast parallel mit dem Flußwasser und behält diese Richtung bei.

Sub E ist die Differenz zwischen den Wassermengen der Achse in Kennelbach und Hard angeführt. Die Wassermenge eines Flusses bestimmt man in der Regel derart, daß gesucht wird, wie viel Wasser in der Sekunde durch den Querschnitt des Flusses hindurchströmt. Ich glaube, daß die Menge des Grundwasserstromes in ähnlicher Weise gefunden werden kann. Das vom Achswasser direkt gebildete Prisma zeigt im Querschnitte das parabolische Dreieck, dessen Basis 1300 m lang, dessen Höhe 1 m ist und dessen Flächeninhalt ein Drittel des Parabelrechteckes ist. Die Durchschnittsfläche beträgt demnach  $0,3 \times 1300 = 433 \text{ m}^2$ . Das Sickerwasser fließt im Boden, der gut wasserdurchlässig ist, und nimmt nach früheren den  $3,2$  Teil des Raumes ein, folglich ist die Größe  $433 \text{ m}^2$  durch  $3,2$  zu dividieren ( $433 : 3,2 = 135$ )  $= 135 \text{ m}^2$ . Die Geschwindigkeit des Wassers in Lauterach ist  $0,009 \text{ m}$ , daher ist die Wassermenge, welche in der Sekunde durch  $135 \text{ m}^2$  mit der Geschwindigkeit von  $0,009 \text{ m}$  fließt, gleich ( $135 \times 0,009 = 1,215$ )  $1,215 \text{ m}^3$ . Nehmen wir aber Stauung als Ursache der Bildung des Prismas an, so wird das Prisma vom Stauwasser gebildet und es kommt nur der Grundwasserstrom der Achse in Betracht. Die durchschnittliche Breite der Achse bei niedrigem Wasserstande sei 20 m, die Tiefe des Rheintal-Grundwasserstromes unter der Achse beträgt nach einer späteren Erörterung 3 m, folglich wäre der Querschnitt des Grundwasserstromes der Achse gleich  $60 \text{ m}^2$ . Bei Berücksichtigung derselben Bodendurchlässigkeit von  $32 \%$  und derselben Geschwindigkeit  $0,009 \text{ m}$  in

der Sekunde ist die Wassermenge, welche die Fläche von  $60 m^2$  in einer Sekunde durchfließt ( $60 : 32 = 19; 19 \times 0.009 = 0.17$ )  $= 0.17 m^3$ . Dringen in Kennelbach oder Wohlfurt per Sekunde  $0.17 m^3$  Achwasser in den Boden ein, so würden diese den Grundwasserstrom der Ache bilden, von dem ein ganz geringfügiger Teil sich mit dem Stauwasser vermischen wird. Bei einer Gesamtwassermenge der Ache von mindestens  $10 m^3$  kann die Menge von  $0.17 m^3$  leichter unbeachtet bleiben als ein Quantum von  $1.2 m^3$ . Die geringe Differenz zwischen den Wassermengen der Ache in Kennelbach und jener weiter abwärts spricht folglich eher für die Richtigkeit der Stautheorie.

Die Messung ergab jedoch eher eine Zunahme des Wasserquantums der Ache auf der Strecke von Kennelbach bis Hard. Nehmen wir die Messung in diesem Sinne als richtig an, so wird dadurch die Möglichkeit des Einsickerns von Achwasser in den Boden, also ein Verlust von Wasser, im allgemeinen ausgeschlossen.

Die Stauwirkung drückt das Grundwasser seitlich bis zur Höhe des Achspiegels empor und macht sich normal auf die Ache noch in einer Entfernung von  $1300 m$  bemerkbar. Sie wirkt jedoch nicht allein seitlich, sondern auch flußaufwärts bis auf ungefähr denselben Abstand und ebenso unterliegt das unter dem Achbette strömende Grundwasser diesem Drucke und wird gestaut. Das Gefälle des Flusses ist, wie bereits erwähnt, nicht gleichmäßig, sondern an den Schwellen größer und dort dringt auf Grund der verschiedenen Druckverhältnisse etwas Stauwasser in das Flußwasser ein und trägt zur Vermehrung desselben bei, so daß durch die Stauung die Vermehrung des Flußwassers ohne andere Zufüsse erklärt wird. Leider war bis jetzt eine weitere Begründung dieser Erscheinung durch Nachweis der chemischen Verschiedenheit des Achwassers und des nur wenig unter demselben befindlichen Stauwassers nicht durchführbar.

Die sub F angeführte Erscheinung läßt folgern, daß der Boden in der Nähe der Grube verschieden wasserdurchlässig ist, und zwar besser in der Richtung gegen die Ache hin.

Unter dem Rubrum C wurde als allgemeine Erscheinung der zeitweise trübfließenden Wässer die Durchschlammung des Untergrundes hervorgehoben. Findet eine derartige Durchschlammung des Bodens statt, so wird er weniger wasserdurchlässig, daher tritt auch Stauung auf. In dem Falle Lauterach wird jedoch eine aus-

gedehnte Durchschlammung durch das Stauwasser selbst verhindert. Im Terrain von Lauterach liegen die Spiegel der Ache und des Stauwassers in unmittelbarer Nähe der Ache in derselben horizontalen Ebene, daher ist der hydrostatische Druck der beiden Wässer annähernd gleich und es kann demnach nur eine Durchschlammung des Bodens bis zu den Berührungsgrenzen der beiden Wässer eintreten.

Auch unter dem Bette der Ache ist Stauwasser, so daß nur an bestimmten Stellen Flußwasser wenig in den Untergrund eindringt, also denselben nicht durchschlammern kann. So lange das Flußwasser hoch geht, wird der ganze Schotter bis zu einer bestimmten Tiefe in Bewegung sein und die feinsten Teilchen werden als die beweglichsten, da sie ihrer verhältnismäßig größeren Oberfläche wegen der reißenden Kraft des Wassers eine größere Angriffsfläche darbieten, nach oben getrieben, die größeren, weniger leicht beweglichen bleiben in der Tiefe. Dadurch wird das hauptsächlich im Stromstriche forttransportierte Material gleichsam sortiert und kommt derartiger Schotter irgendwo zur Ablagerung, so bildet er für den Grundwasserstrom einen ähnlich wasserdurchlässigen Boden, wie ihn der Schuttkegel der Bregenzer Ache, der doch auch aus solchem Materiale aufgebaut ist, noch gegenwärtig aufweist. Fällt der Fluß, so hört die Bewegung des Schottergrundes, je nach dem Gefälle, allmählich auf; der Fluß führt nur mehr feineres Material mit sich, das zunächst an den Stellen, wo die Geschwindigkeit des Wassers am kleinsten ist, sich zu Boden setzt und dort vielleicht wasserdichte Lagen bilden kann, während an anderen Orten, entsprechend der Steigung, sich mehr oder weniger solch Material absetzt, das aber selten imstande ist, alle Zwischenräume des Schottergrundes auszufüllen und auszudichten. An den Schwellen ist die Schotterauslese am größten und wegen des stärkeren Gefälles kommt es dort fast gar nicht zur Schlammabsonderung. Die Schwellen sind demnach am meisten wasserdurchlässig. Bei dem nächstfolgenden Hochwasser wird die obere, wasserdichtere Schichte neuerdings fortgeführt, der Schottergrund kommt wieder in Bewegung etc. und es kann, da der Vorgang in derselben Reihenfolge sich stets wiederholt, eine allgemeine Durchschlammung des Bodens nicht so leicht eintreten.

In einem Wasserlaufe, dessen Gefälle gleichmäßig ist und der jahrein und jahraus annähernd gleichviel Wasser führt, wird,

wenn er zeitweise trüb geht, auch Schlamm abgelagert. Der bleibt aber liegen und kann die völlige Ausdichtung des Bodens verursachen. Stauwasser hindert die Durchschlammung des Bodens, Sickerwasser; wenn es öfter getrübt ist, fördert sie.

Die Schotterbank, welche auf der rechten Salzachuferseite neben dem Kaiser Franz Josefs-Parke liegt, endigt in eine 120 m lange, anfangs 32 m breite Zunge, welche die etwas höher liegende Salzach von einer bis zur Mündung in die Salzach ungefähr 16 m breiten Bucht trennt und deren Wasserspiegel von der Höhe des Salzachspiegels dort abhängig ist. Die Schotterbank selbst fällt steil in die Bucht ab, die Ufer der Zunge sind flach. Der Boden der Bucht ist schlammig. Das in der Schotterbank fließende Grundwasser sieht man deutlich an mehreren Orten in das Buchtwasser einströmen, daher ist der Spiegel des Grundwassers etwas höher als der Spiegel des Buchtwassers. Besonders scharf auffallend trat diese Erscheinung bei dem etwas höheren Wasserstande der Ache vom 10. bis 18. Oktober 1906 auf, während welcher Zeit sich eine Art Ebbe und Flut des Buchtwassers von 3—4 cm Höhendifferenz bemerkbar machte. Bei der Flut wurde das Grundwasser gestaut, das Ausfließen hörte auf, um dann bei der Ebbe desto intensiver wieder hervorzuströmen. Nach dem 18. Oktober beobachtete ich bei dem etwas niedrigeren Wasserstande der Salzach die Flutbildung nicht mehr; das Grundwasser trat gleichmäßig an mehreren Stellen am unteren Ende der Schotterbank aus. In einer Entfernung von 0·5—5 m Abstand vom Ufer beobachtete ich in der Bucht über 50 tätige Schlammvulkane von 3—30 cm Durchmesser. Die Vulkane waren auch während der Zeit, als Ebbe und Flut herrschte, meist gleichmäßig tätig. Das Grundwasser unmittelbar unter der Schlammschichte ist einem etwas größeren Drucke ausgesetzt als ihn das über dem Schlamme befindliche Buchtwasser auszuüben vermag. Die Schlammvulkane zeigen die Partien des mehr wasserdurchlässigen Grundes an, an welchen die Ablagerung des Schlammes bis jetzt noch durch das aufsteigende Grundwasser hintangehalten wurde. Sie sind so lange tätig, bis der Wind oder andere Faktoren so viel Sand und Staub in die Bucht wehen und dadurch die Schlammschichte am Boden so erhöhen, daß ihr Druck gleich wird dem Drucke, welcher das Grundwasser durch den Schlamm emportreibt. Es findet sich demnach unmittelbar unter der wenig oder gar nicht wasserdurchlässigen Schlammschichte Grundwasser, das vom Anfange

an das Einsickern von Buchtwasser in den Boden unmöglich machte.

Das Terrain vom Bodensee bis gegen die Eisenbahnbrücke hat ein Gefälle von 1:315 und von der Eisenbahnbrücke bis gegen Wohlfurt von 1:278. Das Gefälle des Grundwasserstromes ist etwas kleiner, sagen wir 1:400, da der Grundwasserspiegel mit der Entfernung vom Bodensee gegen Wohlfurt nicht in gleichem Abstände von der Erdoberfläche fließt, sondern der Abstand wird allmählich größer. Das durchschnittliche Gefälle der Kurve für eine Strecke von 500 *m* Abstand von der Ache ist kleiner. Wir suchen die Zeit, die das Sickerwasser ohne Druckwirkung vermöge der Fallgesetze braucht, um die Strecke von 500 *m* bei einer Höhendifferenz von 0·8 *m* zurückzulegen. Die Größe des Gefälles ist (0·8:500) = 0·0016. 0·0016 ist zugleich der Sinus des Neigungswinkels  $\alpha$  der schiefen Ebene. Aus der Formel für den Fall auf der schiefen Ebene  $s = \frac{gt^2}{2} \cdot \sin \alpha$ , wo  $s = 500$ ,  $\sin \alpha = 0·0016$  ist, ergibt  $500 = 5 t^2 \cdot 0·0016$  und  $t = 250$  Sekunden. Die Strecke von 500 *m* wird in 250 Sekunden zurückgelegt. Die mittlere Geschwindigkeit ist daher 2 *m* in der Sekunde. Das Wasser fließt jedoch die 500 *m* weit im Boden, der wahrscheinlich nicht besser wasserdurchlässig ist als der gewaschene Sand. Durch den Boden wird die Geschwindigkeit verzögert und den Verzögerungswert finden wir aus den im Versuche I angeführten Daten. Eine Sandsäule von je 10 *cm* Länge verzögert die Geschwindigkeit im Durchschnitte um das 274fache. Wir setzen den Verzögerungswert kurzweg zu 100 an, damit derselbe ja nicht zu groß angenommen wird. Für 500 *m* Bodenstrecke wird der Verzögerungswert dann 5000 mal größer ( $100 \times 5000 = 500000$ ) und die Geschwindigkeit des Wassers im Boden wird eine halbe Million mal kleiner ( $2:500000 = 0·000004$ ), sie beträgt per Sekunde 0·000004 *m*. Die Bodenstrecke von 500 *m* würde daher vom Wasser in ( $500:0·000004 = 125000000$ ) 125 000 000 Sekunden oder in etwa 4 Jahren zurückgelegt. In Wirklichkeit macht sich der Einfluß der Ache auf die Brunnen des Ölz in mehr als 12 Stunden bemerkbar, daher kann das bloße Einsickern, das Tiefersinken und Weiterfließen infolge der Fallgesetze obige Erscheinung nicht verursachen. Wird Druck als wirksame Kraft dabei berücksichtigt, so drückt das Achwasser nach allen Seiten und auch nach abwärts auf das Grundwasser

und staut dasselbe. Bewegt sich die Stauwelle, von der das Steigen der Brunnenspiegel, also auch jenes von Ölz abhängig ist, analog den Verhältnissen bei offenen Gewässern (s. auch Versuch III), mit der Geschwindigkeit ungefähr weiter, die das Bodenwasser in Lauterach hat, dessen Geschwindigkeit schon früher mit 0.9 cm bestimmt wurde, so macht sich die Wirkung der Ache auf den Brunnen des Ölz nach  $(500 : 0.009 = 55555 \text{ Sekunden})$  15.4 Stunden bemerkbar, was mit der Wirklichkeit ziemlich übereinstimmt.

Gehen wir zur Besprechung der chemischen Erscheinungen. Wird die Druckwirkung ausgeschlossen, so fließt das Sickerwasser vermöge seines Gewichtes nach abwärts und bildet das öfter erwähnte Wasserprisma. Das Grundwasser fließt unter dem Prisma ebenfalls nach abwärts. Das Prisma besteht daher nur aus Achwasser und eine Mischung mit dem Grundwasser kann erst unter dem Prisma stattfinden. Brunnen, die ihr Wasser nur aus dem Prisma beziehen, also besonders die Oberflächenwässer dieser Brunnen müßten reines Achwasser und nicht Mischwasser aufweisen. Soll eine Mischung in dem Prisma vorkommen, so müßte das Grundwasser aufwärts fließen, d. h., es muß gestaut werden oder aufwärts gedrückt werden. Das könnte durch weniger durchlässigen Boden, geringeres Gefälle und durch Druck veranlaßt werden. Für die ersten zwei Faktoren sind aber im Gebiete bis zum Ölz hin keine begründeten Ursachen nachzuweisen. Es muß daher das Wasser durch Druck aufwärts getrieben werden, um Mischwasser zu erzeugen. Der Druck kann aber nur durch das Achwasser hervorgerufen werden, da der durch das höher befindliche Sickerwasser erzeugte Druck infolge der hydrostatischen Gesetze nicht einseitig wirken, also nicht die eine Partie von Grundwasser hinauf, die andere hinab, sondern das ganze Grundwasser hinunterdrücken würde. Wird der Druck als Ursache der Mischwässer bis zum Ölz angenommen, so wirkt er auch weiter und es ist dann nicht zu bezweifeln, daß die Druckwirkung die Bildung des Prismas bedingt. Der Druck bewirkt aber die Stauung des Grundwasserstromes. Im Versuch III wurde gezeigt, daß das Stauwasser vom Druckwasser in chemischer und thermischer Beziehung unabhängig ist.

Weisen die der Ache näher liegenden Brunnen jedoch einen gewissen Zusammenhang in obiger Beziehung zwischen ihrem Wasser und Achwasser auf, so stelle ich mir die Ursache davon

in folgender Art vor: Das Achwasser dringt seitwärts und unten etwas in das Stauwasser ein, kann auch bei raschem Steigen der Ache oben überfließen, einsickern. Die Mischung geht auf der ganzen Strecke, soweit das Achwasser und das Grundwasser miteinander in Berührung treten, vor sich. Das Mischwasser tritt flußabwärts bei der nächsten Berührungszone schon als Stauwasser auf. Mit der Bewegung des Stauwassers nach Westen, flußabwärts, wird immer neues Mischwasser an den Berührungsflächen erzeugt, drängt das früher gebildete Mischwasser langsam in der Richtung von der Ache ab, landeinwärts, gelangt endlich auch zu den der Ache näherliegenden Brunnen und verursacht die chemische Zusammensetzung derselben. Das Wasser in den fraglichen Brunnen ist demnach nicht nur oben, sondern auch soweit nach unten, als das Achwasser in das Grundwasser eindringt, Mischwasser. Die chemische Zusammensetzung der der Ache näher liegenden Brunnen läßt sich folglich meiner Ansicht nach besser durch die Stau- als durch die Sickertheorie erklären. Ich glaube hiemit hinlänglich begründet zu haben, daß die Bildung des Wasserprismas durch Stauung des Grundwassers infolge Druckwirkung des Achwassers bedingt wird.

Wird das Grundwasser vom Achwasser gestaut, so ist zunächst die Ache und weiter das Stauwasser die Basis des Grundwassers.

Eine horizontale Linie, die bei dem durchschnittlichen Wasserstande der Ache, = 1 m von ihrem Spiegel normal auf die Achrichtung in das Gelände gezogen wird, trifft in der Entfernung von etwas über 1300 m den Grundwasserspiegel, ebenso aber auch in derselben Entfernung von 1300 m flußaufwärts, da die Stauung durch Druck hervorgerufen wird und der Druck sich nach allen Seiten bemerkbar macht. Damit ist das Mittel gegeben, um die Höhe des Stauwassers messen zu können. Bei einem Gefälle von 1:400 beträgt die Fallhöhe eines Stromes, der 1300 m Länge durchfließt, 3·25 m. Der Grundwasserspiegel ist 3·25 m tiefer als der Achwasserspiegel bei mittlerem Wasserstande oder 2·25 m tiefer als das Achbett. Die Stauwassersäule nach Fig. 2 muß ergänzt werden, indem ein zweites, dreiseitiges Prisma an der Basis des ersten nach unten angesetzt wird, das bei mittlerem Wasserstande von 1 m noch 2·25 m tief in den Boden hinabreicht.

Bei offenen Gewässern unterscheidet man mehr weniger deutlich mehrere Zonen im Stauterrain. Bei Grundwässern dehnen

sich diese Zonen auf weitere Strecken aus. Die erste Zone umfaßt das Gebiet des reinen Achwassers; die zweite Zone das Gebiet, in welchem Ach- und Grundwasser aufeinander treffen und auch Achwasser in das Grundwasser mehr weniger eingetrieben wird; die dritte Zone das Gebiet, in welchem durch Stauung allein die Brunnenhöhen beeinflußt werden; die vierte Zone, Übergangszone, wird bestimmt durch den Einfluß der Ache und des Grundwasserstromes, der für sich allein ja auch einem gewissen Steigen und Fallen unterworfen ist; die fünfte Zone umfaßt das Gebiet, in welchem das Steigen und Fallen des Grundwassers allein eine Änderung seines Wasserstandes verursacht.

Die Quellen der Lauteracher Ache gehören der vierten Zone an; Stauung, Steigen des Grundwasserstromes, Niederschläge können eine Änderung der Wasserhöhe dort bewerkstelligen. Aus der Tabelle und dem mir zur Verfügung gestellten Hilfsmateriale läßt sich kein bestimmter Schluß ziehen, da diese Mittel einseitig gehalten sind und nur die Stauung allein zur Anschauung bringen. Eine vollständige Ausschließung des Zusammenhanges zwischen Ache und Lauteracher Quellen ist bis jetzt nicht begründet. Die Lauteracher Quellen treten in einer Einsenkung des Terrains zutage, welche unter das Niveau des Grundwasserstromes reicht. Die Quellen kommen in der Regel von unten herauf, das Wasser wird heraufgedrückt. Die Druckkraft ist von der Höhe der über dem Niveau des Quellaustrittes liegenden Grundwassersäule abhängig. Die Quellen haben sich im Laufe der Zeit bis zu einer gewissen Entfernung vom Austritte gleichsam einen Kanal im Boden ausgewaschen, von dem Adern in das Gebiet des Grundwasserstromes sich abzweigen.

Sub (G) ist auch den Quellen eine Bedeutung in bezug der Beurteilung des Zusammenhanges zwischen Quellaustritt und Höhe des Grundwasserspiegels zugeschrieben, da es dort heißt: „Überall, wo Quellbäche austreten, findet man weiter aufwärts keine Anzeichen dafür, daß sie früher wesentlich höher ausgequollen seien, und doch müßte eine Senkung des Grundwasserspiegels um 1 oder 2 *dcm* bei der flachen Bodenlage schon lange Strecken alter Quellbachgerinne trockenlegen.“ Infolge des Druckes sickert das Quellwasser nicht aus dem Boden, sondern es wird aus dem Boden herausgepreßt. Sinkt der Spiegel des Grundwassers, so wird der Druck, unter welchem die Quellen austreten, geringer, es tritt weniger Wasser aus, aber es ist

nichts vorhanden, was begründet, daß bei niedrigerem Drucke das Wasser sich einen tiefer liegenden Austrittspunkt öffnet, den es bei höherem Drucke nicht zu öffnen imstande war. Beim Sinken des Grundwasserspiegels wird die Wassermenge der Quellen kleiner, es können auch höher- oder tieferliegende Quellen versiegen, aber neue Quellen kommen keine zum Vorschein. Durch das Steigen des Grundwasserspiegels wird der Druck erhöht, es wird mehr Wasser aus den Quellen ausfließen, oder es entstehen neue Quellen, die höher oder tiefer als die früheren zum Vorschein kommen können, je nachdem die Durchlässigkeit des Bodens es bei dem herrschenden Drucke gestattet. Der Austrittspunkt einer Quelle kann weiter durch Verstopfung etc. des Kanals verändert werden und das Quellwasser selbst vermag im Laufe der Zeit bei günstigen Bodenverhältnissen durch Auswaschung die Mündung zu erweitern und tieferzulegen.

Es handelt sich endlich noch den Einfluß des projektierten Kanales auf die Brunnen zunächst bei niedrigem Wasserstande zu besprechen. Die ganze Frage könnte leicht gelöst werden, wenn bei niedrigem Wasserstande der Bregenzer Ache das Kanalwasser in diese eingeleitet wird und dabei die nötigen Beobachtungen und Messungen der Achhöhe, der in Betracht zu ziehenden Brunnenspiegel und der Quellen in entsprechender Weise durchgeführt werden. Leider war bis jetzt die Einleitung unmöglich und wir müssen die Größe dieses Einflusses auf anderem Wege zu bestimmen versuchen.

Das Achbett ist, wenn es ungefähr  $10\text{ m}^3$  Wasser führt, durchschnittlich  $20\text{ m}$  breit und hat im Querschnitt mehr weniger die Form einer Parabel. Der Flächeninhalt der Parabel ist gleich  $\frac{2}{3}$  des Parabelviereckes. Denken wir uns das Viereck so um die Parabel gezeichnet oder gelegt, daß die Mitte der  $20\text{ m}$  langen horizontalen Seite den Scheitel der Parabel trifft und die  $10\text{ m}^3$  Wasser mit einer Geschwindigkeit von  $1\text{ m}$  in der Sekunde die Parabelfläche bis zu einer Höhe, die gleich ist der kurzen Seite des Viereckes, durchfließen, so ergibt sich die Höhe der Wassersäule =  $0.75\text{ m}$ . Für nachstehende Berechnungen nehmen wir  $0.7\text{ m}$  an. Größere Geschwindigkeit verringert die Höhe, eine kleinere vergrößert sie. Steigt die Ache  $70\text{ cm}$ , so steigen die Brunnenspiegel, bei welchen der Abstand von der Ache weniger als  $200\text{ m}$  beträgt, um mehr als  $30\text{ cm}$ ; die innerhalb eines Abstandes von  $300\text{ m}$  liegen, um mehr als  $20\text{ cm}$ ; die innerhalb

eines Abstandes von 600 *m* um mehr als 10 *cm*; die innerhalb eines Abstandes von 1300 *m* um weniger als 10 *cm*.

Wird die Basis eines Grundwasserstromes tiefer gelegt, so sinkt auch dementsprechend der ganze Grundwasserstrom; wird sie höher gelegt, so steigt dementsprechend der Grundwasserstrom. Wird die Achhöhe unter der städtischen Brücke kleiner, so wird auch das Prisma niedriger. Die Ache mit dem Stauwasser dort ist aber wieder die Basis des Grundwasserstromes zunächst unterhalb der Brücke und noch weiter die Basis auch für das Stauwasser und Grundwasser oberhalb der Brücke.

Da die Acheinwirkung oberhalb der Brücke sich noch auf eine Entfernung von 1300 *m* bemerkbar macht, demnach eine Veränderung der Basis sich auf einen Abstand von 1300 *m* erstreckt, so wird, wenn die Basis unterhalb der Brücke niedriger wird, sich die Wirkung davon ebenfalls auf einen Abstand von ungefähr 1300 *m* nicht nur nach seitwärts, sondern auch flußaufwärts erstrecken. Es werden durch die weitere Fortführung des Kanales nicht nur die Brunnen unterhalb der städtischen Brücke, sondern auch oberhalb derselben, so weit sie in die Zone von 1300 *m* flußaufwärts reichen, getroffen, und zwar je nach ihrer Entfernung in dem bereits besprochenen Maße.

Bei niedrigem Wasserstande ist es auch möglich, daß sämtliches Achwasser in den Fabrikskanal eingeleitet und das Achbett somit trockengelegt wird. Es verschwindet das Stauwasser vollständig, das Grundwasser fließt 2·25 *m* tiefer als die Achsole, daher sinken neben den früher angeführten Zahlen die Brunnenpiegel noch weiter

bis zu einer Entfernung von	200 <i>m</i>	von der Ache um mehr als	1·0 <i>m</i>
" " "	" 300	" " " " " "	0·6 "
" " "	" 600	" " " " " "	0·4 "
" " "	" 1300	" " " " " weniger	0·4 "

Bei diesen Daten wurde die Stausphäre, welche mit dem Sinken der Ache entsprechend kleiner wird und aus der Achhöhe sowie aus dem Gefälle des Grundwasserstromes und seinem Abstand vom Achspiegel bestimmt werden kann, nicht in Rechnung gezogen. Durch Stauung des Grundwassers dringt Achwasser auch etwas unter dem Spiegel des Stauwassers ein, bildet Mischwasser und kann von der Ache abseits in die Brunnen kommen. Ein Tieferlegen der Brunnen hat bei Stauwasser wenig

Bedeutung, jedoch könnte durch wasserdichte Ausmauerung der Wände, 2—3 *dm* unter dem normalen Brunnenwasserstande, das Mischwasser abgehalten und, was von größerer Bedeutung ist, das Eindringen von gefährlichen Fremdkörpern bei Hochwasser vermieden werden.

In allen Gebieten, die ähnlich gestaltet sind wie das von Lauterach, läßt sich auch in ähnlicher Art wie bei Lauterach der Beweis über den Zusammenhang zwischen ober- und unterirdischen Gewässern führen.

Bis jetzt wurde angenommen, daß der Grundwasserspiegel tiefer ist als der Fluß- oder Seewasserspiegel. Liegen Grundwasserspiegel und Fluß- oder Seespiegel im gleichen Niveau, so werden sich dieselben Erscheinungen bemerkbar machen wie im ersten Falle und der Zusammenhang zwischen beiden kann nach den besprochenen Prinzipien leicht nachgewiesen werden. Liegt der Spiegel des Grundwassers höher als der Fluß- oder Seespiegel, so wird ein Teil des Grundwassers zutage treten und in das offene Wasser sich ergießen und ein anderer Teil wird als Quelle im Flusse oder See aufsteigen. Das offene Wasser bildet aber für eine tiefer liegende Partie des Grundwassers die Basis und mit dem Steigen und Fallen der letzteren steigt oder fällt zunächst jene tiefer liegende Partie, welche dann auch das höherliegende Grundwasser entsprechend hebt oder senkt.

In allen Fällen kann der Zusammenhang, die Größe und Ausdehnungssphäre zwischen Fluß- oder Seewasser einerseits und Grundwasser andererseits auf die einfachste Weise durch entsprechende Messung der Spiegelhöhen festgestellt werden.

Bei der Regulierung der Flüsse wird das Flußbett in der Regel eingeengt. Diese Einschnürung bedingt ein schnelleres Abfließen des Wassers, eine intensivere Schotterabfuhr und infolgedessen eine Tieferlegung des Flußbettes. Dadurch wird die absolute Höhe des Flußwasserspiegels kleiner, die Basis des Grundwasserstromes wird erniedrigt, somit sinkt dementsprechend auch der Spiegel des Grundwasserstromes.

Zum Schlusse erwähne ich noch kurz eine Wirkung, die nicht nur im Gebiete großer Städte, sondern auch auf dem Lande von weitgreifender Bedeutung sein kann, wie schon Pettenkofer seinerzeit erörterte.

Bei Hochwasser der Flüsse und Ströme wird, auch wenn diese das Ufer nicht überfluten, so daß nicht direkt Wasser in

die Häuser eindringen kann, das Stauwasser von unten in die Keller hinaufgepreßt, überhaupt das ganze Terrain bis zu ungefähr 1 *km* Abstand, und zwar je näher dem Flusse oder Strome, desto höher, in nächster Umgebung derselben selbst bis zu ihrer Spiegelhöhe, durch das Stauwasser unterirdisch unter Wasser gesetzt. Das in die Höhe steigende Stauwasser nimmt dabei auch die verschiedenen Krankheitserreger, welche bis zu diesem Zeitpunkte in der Tiefe unschädlich waren, mit sich nach oben und lagert sie in Kellern oder anderen entsprechend tiefliegenden Lokalitäten ab, von welchen aus dieselben wieder weiter wandern und ihre Verderben bringende Wirkung auf Menschen und Tiere ausüben können. Da in dem Terrain, das dem Ufer näher liegt, die Stauung höher ist, folglich schon bei weniger hohem Wasserstande der Transport jener schädlichen Objekte an die Oberfläche stattfinden kann, so sind diese Gebiete öfter und intensiver der Einwirkung der gefährlichen Mikroorganismen ausgesetzt.

Salzburg, Juli 1906

---