Anleitung

zur

Beurtheilung und Bestimmung

der

Brunnen-Ergiebigkeit

und zur

rationellen Ausnützung der Ergiebigkeit

von

Pumpenanlagen.

Für Brunnen- und Eisenbahn-Ingenieure verfasst

von

Alexander Perényi,

Ingenieur der königlich ungarischen Staatsbahnen.

Mit 10 Abbildungen.

Wien. Pest. Leipzig.

A. Hartleben's Verlag.

1900.

K. u. k. Hofbuchdrucker Fr. Winiker & Schickardt, Brünn.

Inhalts-Verzeichnis.

Erklärung der Zeichen.

α Nachfüllungscoëfficient der Grundwässer führenden Erdschichte. Gleich 1 für vollständig sofortigen, $= 0$ für Nichtersatz des Abganges.

a und b entsprechende Constanten der Näherungsparabel für die Schaulinie der Steigung des Brunnenwasserstandes.

d Differenzialzeichen.

$\triangle$ Differenzzeichen.

E Ergiebigkeit der Brunnen- und Pumpenanlage durchschnittlich in der verflossenen Stunde gehobenen Wassers, Ruhepausen inbegriffen (m^3 in der Stunde).

F F' Querschnittsfläche des Brunnens im Lichten, kurz Brunnenweite — m^2 —

f Summe der Öffnungsweiten aller in den Brunnen mündenden Quellen — m^2 —

h h' Wasserstandshöhe im Brunnen gemessen von der Saugrohrmündung an — m —

h_s Höhe einer ideellen Brunnenwassersäule, deren Inhalt gleich der Wassermenge ist, welche während des Auspumpens der h hohen Wassersäule zugeströmt ist — m —

H Größtmögliche Wasserstandshöhe im Brunnen — m —

$k_1, k_2, k_3 \ldots k_n$ die bestimmten Höhen der entsprechenden Wasserschichten, während $\triangle h$ im allgemeinen deren Größen bezeichnet — m —

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \ldots . \lambda_3$. Bedeuten auch solche nur höher gelegene Schichtenhöhen — m —

n bedeutet immer eine Anzahl.

p Pumpenleistung reducirt auf 1 m^2 Brunnenquerschnitt, m/min; oder Absenkung des Wasserspiegels (Meter in der Minute) durch Pumpen, wenn der Zufluss $= 0$ wäre.

P Leistung der Pumpe (m^3 Wasser in der Minute).

Q_1 Zuflussmenge während des Auspumpens des Brunnens in Cubikmetern.

Q_2 Zuflussmenge während der nach dem Auspumpen des Brunnens folgenden Ruhepause — m^3 —

Q Q' Gehobene oder hebbare Wassermenge durch gänzliches Auspumpen des Brunnens — m^3 —

Q_e ... Erforderliche Wassermenge — m^3 —

Σ Summenzeichen unstetig sich ändernder messbarer Größen.

$\int$ Summenzeichen stetig sich ändernder unmessbar kleiner Werte.

s, s_1, s_2 Tiefen verschiedener Wasserspiegel von einem oberirdischen Fixpunkte gemessen — m —

t im allgemeinen die Steigungsdauer des Wasserspiegels während der Ruhepause — Minuten. —

t_2 dasselbe nur zum Unterschied, wenn auch t_1 vorkommt.

t_1 die Absenkungsdauer des Wasserspiegels während des Pumpens — Minuten. —

T_2 Steigungsdauer des höchstmöglichen Wasserstandes während der Ruhepause — Minuten. —

T_1 Absenkungsdauer des höchstmöglichen Wasserstandes während des Pumpens — Minuten. —

ϑ_1, ϑ_2, ϑ_3 .... Bestimmte Zeitdifferenzen, in welcher die entsprechenden obern Wasserschichten sich füllen, gleich mit dem allgemeinen $\triangle t_2$ (Minuten).

τ_1, τ_2, τ_3 ..... Eben solche für die entsprechenden unteren Wasserschichten (Minuten).

v Geschwindigkeit der Einströmung in der Quellenmündung ($m : min$).

V täglicher Wasserbedarf — m^3 —

w Hubhöhe des Wasserstandes im lichten Brunnenquerschnitt ($m : min$) während der Ruhepause.

W momentane Zuflussmenge m^3 in der Minute im allgemeinen, oder Ergiebigkeit eines beliebig hohen Wasserspiegels im allgemeinen.

W_0 bestimmte Zuflussmenge, wenn der Wasserspiegel bis zur Saugrohrmündung abgesenkt ist ($m^3 : min$) oder die

Ergiebigkeit des Wasserspiegels an der Saugrohrmündung.

W_1, W_2, $W_3 \ldots . W_{n-2}$. W_{n-1}. Mittlere Ergiebigkeiten entsprechender seichter Wasserschichten oder Ergiebigkeiten bestimmter bis zur Hälfte der seichten Wasserschichten abgesenkter Wasserspiegel ($m^3 : min$).

W_n die Ergiebigkeit am obersten Wasserspiegel einer Wassersäule ($m^3 : min$).

x die effective Druckhöhendifferenz (Depression), welche das Wasser im Brunnen emportreibt — m —

ζ Verzögerungs-Verhältniszahl der Wasserbewegung im Brunnen und in der wasserdurchlassenden Erdschichte.

z die disponible Ruhepause vor dem Dienstantritt des Pumpenwärters — Minuten. —

Z die tägliche Bedienungsdauer der Pumpenanlage — Minuten. —

$$\left[med\ W\right]_{h_1}^{h_2} = \frac{\sum\limits_{h=h_1}^{h=h_2} \left(W \Delta h\right)}{h},$$ ferner statt $\left[med\ W\right]_0^h$

auch abgekürzt einfach *med W*, bedeutet die durchschnittlich mittlere Ergiebigkeit in der Wassersäule.

$\cong$ bedeutet annäherungsweise gleich.

§. 1. Einleitung.

Die versuchsweise Bestimmung der Brunnenergiebigkeit erscheint im allgemeinen als eine leicht vorzunehmende Aufgabe. Es liegt nämlich der Gedanke ganz nahe, dass die tägliche Brunnenergiebigkeit so viel beträgt, als man Wasser aus dem Brunnen während eines Tages wirklich versuchsweise zu schöpfen imstande ist. Es ist eben nicht sofort einleuchtend, dass die nach beliebiger Weise während einer bestimmten Zeitdauer von einem auspumpbaren Brunnen geschöpfte Wassermenge nicht als ein für alle Fälle giltiges Maß der Brunnenergiebigkeit gelten kann, weil eben die während einer bestimmten Zeit schöpfbare Wassermenge nicht nur von der Ergiebigkeit der Quelle, sondern auch von der Art und Weise, wie lange die Ruhepause vor dem Ausschöpfen des Brunnens gedauert hat, und auch von der Pumpgeschwindigkeit abhängig ist. Es ist daher lohnenswert, die auf die experimentelle Bestimmung der Brunnenergiebigkeit Einfluss habenden Umstände einer kritischen Untersuchung zu unterziehen. Aber auch, damit man die Resultate der gebräuchlichen Versuchsmethoden ihrem Werte nach schätzen könne und durch die gewonnenen Regeln die Versuche zweckmäßiger einleiten und zur gründlichen Beurtheilung der Güte des Brunnens gelangen könne, ist es angezeigt, den Gegenstand auch theoretisch zu behandeln. In der technischen Literatur ist über diesen Gegenstand kaum eine Andeutung zu finden. Man begnügt sich in der Praxis nur mit singulären Versuchsresultaten, welche an und für sich richtig sein können, jedoch über die Güte des Brunnens und der Pumpenanlage nur ein unvollkommenes, ja mitunter falsches Urtheil bilden lassen. In vorliegender Abhandlung möge nun der Versuch gemacht werden, die Bestimmung der Brunnenergiebigkeit zum Gegenstand einer wissenschaftlichen Untersuchung zu machen, indem wir die vielseitigen, theils unbeachteten, theils vermutheten Eigenthümlichkeiten des Brunnens auszuweisen trachten, deren Kenntnis behufs richtiger Beurtheilung und zweckentsprechender Anwendung der Versuchsresultate nöthig erscheint.

Wir verfolgen in den folgenden Erörterungen den hauptsächlichen Zweck, die Brunnenergiebigkeit mittelst praktischer Versuche, durch Beobachtung der Änderung des Brunneninhaltes und der Zeitdauer und nur mittelst Anwendung elementarer Rechnungsarten, in tabellarischer Form zusammengefasst, zu bestimmen. Zu einer rationellen Methode konnten wir aber eben aus theoretischen Betrachtungen gelangen, welche zugleich die Richtigkeit der resultirenden Methoden und Ansichten begründen. Deshalb sind wir genöthigt, auch didaktisch interessante Rechnungsresultate, theilweise unter Anwendung höherer Rechnungsarten, zu entwickeln, welche aber keineswegs den Zweck haben, in der Praxis direct angewendet zu werden, sondern nur zur klaren Erkenntnis der Umstände, welche auf die Brunnenergiebigkeit Einfluss haben, beitragen.

Wir unterscheiden erstens die Brunnenergiebigkeit am Wasserspiegel, dann die Ergiebigkeit der Quelle und die der ganzen Pumpenanlage. Wenn die Quelle auch unendlich ergiebig ist, so wird die Brunnenergiebigkeit dennoch durch die endliche Zuflussgeschwindigkeit beschränkt, weil die Widerstände der Zuleitung und die sich bildende Wassersäule im Brunnen dieselbe zu vermindern trachten. Andererseits, wenn auch der Brunnen mittelst der vorhandenen Pumpe unerschöpflich ist, so reicht die Ergiebigkeit der ganzen Anlage nur bis zur Leistungsfähigkeit der Pumpe. Ferner leitet die quellenführende Erdschichte (oder Canal, Rohr, Sickerschlitz) das Wasser entweder von unten, oder von oben, oder von seitwärts in den Brunnen; mit der veränderlichen Geschwindigkeit v ($m\,min^{-1}$) durch den Gesammtquerschnitt der Quellen f (m^2) [Abbildung 1.]. v nimmt mit dem Wachsen des Wasserstandes h (m) ab, wenn die Quelle von unten in den Brunnenschacht tritt. Hingegen bleibt die Quelleneinströmungs-Geschwindigkeit v lange Zeit hindurch constant, wenn die Quelle durch längere Zeit gleich ergiebig von oben in den Brunnen fließt. Dieser Fall ist nur ein specieller vom ersteren allgemeinen, daher wir vorerst den allgemeinen Fall, nämlich, dass die Quelle mit veränderlicher Geschwindigkeit in den Brunnen tritt, in Betracht ziehen.

§. 2. Brunnenergiebigkeit am abgesenkten Wasserspiegel.

Das in den Brunnen einfließende Wasser verbreitet sich am Boden des Brunnens über die Fläche F (m^2) [*Abbildung 1*]

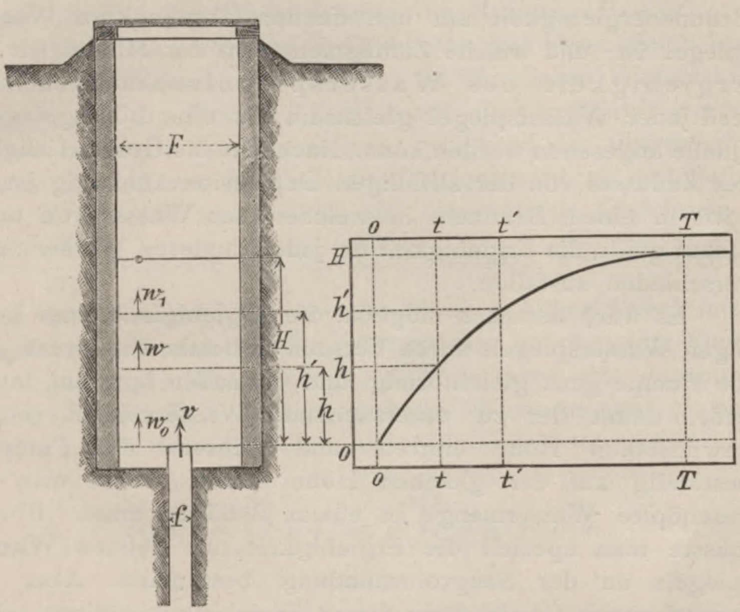

Abbildung 1.
Veranschaulichung der Steigung des Wasserstandes.

und erhebt den Wasserspiegel um eine bestimmte Höhe w ($m\ min^{-1}$). Wenn nun der höchste Wasserstand durch H (in Metern) und jeder beliebige niedere Wasserstand durch h (in M.) bezeichnet wird, so wird der Wasserspiegel während der unermesslich kurzen Zeit dt (min) sich um dh heben.

Nun ist die Geschwindigkeit w, mit welcher der Wasserspiegel infolge der Druckhöhendifferenz (Depression) $H—h$ emporgetrieben wird, offenbar

1. $$w = \frac{dh}{dt}.$$

Ferner ist die Wassermenge W, welche in der Minute zufließt und durch welche sich der Wasserspiegel hebt:

$$2. \qquad W = f\,v = F\,w = \frac{F\,dh}{dt}$$

welche Wassermenge, im Falle der Wasserspiegel durch fortwährendes Pumpen in derselben Höhe erhalten wird, die Brunnenergiebigkeit am betreffenden abgesenkten Wasserspiegel ist, und welche Zuflussmenge in der Minute wir die Ergiebigkeit des Wasserspiegels nennen können, weil jeder Wasserspiegel gleichsam als eine höhergelagerte Quelle angesehen werden kann. Nachdem die Geschwindigkeit des Zuflusses von der allfälligen Depression abhängig ist, so wird in einem Brunnen, in welchen das Wasser von unten hinauf quillt, die Ergiebigkeit bei jedem anderen Wasserstande verschieden ausfallen.

Es wäre demnach möglich, die Ergiebigkeit eines beliebigen Wasserspiegels durch Versuch zu bestimmen, wenn man die Pumpe ganz gleichförmig und dermaßen langsam laufen ließe, damit der zu untersuchende Wasserspiegel in der gewünschten Höhe eintrete und während des Pumpens beständig auf der gleichen Höhe bleibe, wobei man die geschöpfte Wassermenge in einem Behälter misst. Ebenso müsste man speciell die Ergiebigkeit des tiefsten Wasserspiegels an der Saugrohrmündung bestimmen. Aber die versuchsweise Bestimmung dieser Ergiebigkeit gelingt selten genau bei auspumpbaren Brunnen, welche mit Kolben- oder Kreiselpumpen bedient werden. Bei den mit Ejectoren oder Pulsometern versehenen Brunnen ist diese Bestimmung der Ergiebigkeit am Wasserspiegel nach angegebener Weise überhaupt nicht möglich, weil die Betriebsgeschwindigkeit derartiger Hebezeuge nicht so leicht regulierbar ist. In solchen Fällen kann man die Ergiebigkeit jedes Wasserspiegels vom Gesetze der Änderung des Wasserstandes während des Steigens desselben, welche versuchsweise zu beobachten ist, mit großer Genauigkeit bestimmen. Das Gesetz des Steigens des Wasserstandes weist die parabolische Curve in Abbildung 1, bei welcher die Ordinaten den jeweiligen Wasserstand und die Abscissen die Zeit darstellen.

§. 3. Gehobene Wassermenge und Leistung der Pumpe.

Wenn die Pumpe in der Minute $P = Fp$ Cubikmeter Wasser in der Minute hebt, so bedeutet p die Tiefe, um welche der Wasserspiegel im Brunnen sinken würde, wenn kein Zufluss vorhanden wäre. Weil aber der Zufluss während derselben Zeiteinheit $W = Fw$ ist, so beträgt die Senkung des Wasserspiegels während des Pumpens $p - w$ und die Verminderung des Wasserinhaltes im Brunnen $P - W$.

Wenn man während des Pumpens auf einen gleich hoch bleibenden Wasserstand trifft, so ist für diesen Wasserstand $w = p$, und der Brunnen kann somit nicht erschöpft werden. Wenn hingegen der Wasserstand während der unermesslich kurzen Zeit dt_1 um die Tiefe dh niedriger wird, so ist offenbar

3. . . . $dh = (p - w)\ dt_1$ allwo nach Gleichung 2. $w = \frac{dh}{dt_2}$, wenn wir nämlich die Ruhepause, während welcher sich der Wasserspiegel um die Höhe h heben kann, mit t_2 bezeichnen. Es sei nun die während der unermesslich kurzen Zeit gepumpte Wassermenge $d\,Q$, so wird die gesammte, während der Zeit t_1 ausgepumpte Wassermenge Q nach Gleichung 3. sein:

4. $$Q = F \int_0^{t_1} p\ d\,t_1 = F \int_0^{t_1} w\,d\,t_1 + F\,h.$$

Weil indessen der Wasserstand im Brunnen sich verhältnismäßig nur langsam ändert, so können die unmessbar kleinen Differentiale dh, dt_1, dt_2 innerhalb messbarer Grenzen groß genommen werden, ohne dass die Werte ihrer gegenseitigen Verhältnisse sich merklich ändern würden. Das heißt, sie können bis $\triangle h = n\,dh$, $\triangle t_1 = n\,dt_1$ und $\triangle t_2 = n\,\triangle t_2$ messbar groß genommen werden, weil sie vergrößert, noch immer sehr nahe linear proportional zueinander sich zugleich ändern. Infolge dessen wird die Wassermenge Q, welche aus einer Wassersäule von der Höhe h aus dem Brunnen emporgehoben werden kann, — wenn wir noch die Wassersäulenhöhe in messbare kleine Theile $\triangle h$ theilen, — für jede Wasserschichte sich ergeben:

5. $\Delta Q = F \frac{\Delta h}{\Delta t_2} \Delta t_1 + F \Delta h$ und für eine h meterhohe Wassersäule:

$$6. \quad Q = F \Sigma \left(\frac{\Delta h}{\Delta t_2} \Delta t_1 \right) + F h = Q_1 + Q_2,$$

wo $Q_2 = F h$ die Wassermenge bedeutet, welche während der Ruhepause aus der Quelle in den Brunnen fließt, und ähnlich $Q_1 = F h_s$ die Wassermenge bedeutet, welche während des Pumpens noch hinzuströmt, indem wir

$$F \Sigma \left(\frac{\Delta h}{\Delta t_2} \Delta t_1 \right) = \Sigma (W \Delta t_1) = F h_s \text{ setzen.}$$

Im Falle, dass die Leistung der angewendeten Pumpe P bedeutend größer ist, als die Ergiebigkeit des tiefsten Wasserspiegels W_0, kann man die gehobene Wassermenge Q durch eine Näherungs-Formel ausdrücken. Denn dann verhält sich nahezu jedes $\Delta t_1 : \Delta h = t_1 : h$, mit anderen Worten, dann wird nahezu die Auspumpdauer linear proportional zur ausgepumpten Schichtenhöhe werden, weil die Zuströmungsmengen während des Pumpens von Schichte zu Schichte unbedeutend verschieden sind. Aus erwähnter Relation folgt, dass dann in Gleichung 6.

7*a*. . . $\Delta t_1 = \frac{t_1 \Delta h}{h}$ annähernd gesetzt werden kann,

womit die mit starker Pumpe gehobene Wassermenge annähernd ausgedrückt:

$$7b. \ldots \quad Q \cong F \frac{t_1}{h} \Sigma \left(\frac{(\Delta h)^2}{\Delta t_2} \right) + F h \text{ oder}$$

$$7c. \quad Q \cong \frac{t_1}{h} \cdot \Sigma (W \Delta h) + Q_2.$$

Diese Formel ist besonders geeignet zur Berechnung der gehobenen Wassermenge mit kräftiger Pumpe, wenn dieselbe in Ermanglung von einem genügend großen Wasserbehälter nicht direct gemessen werden kann.

Ferner kann man aus Gleichung 3 den Wert von p entwickeln; man erhält damit einen genauen Ausdruck für die Leistung der Pumpe, während sie die Wasserschichte, deren Höhe Δh ist, entleerte. Somit ist die Leistung der Pumpe in m^3 in der Minute:

$$8. \qquad P = Fp = F\left(\frac{\Delta h}{\Delta t_1} + \frac{\Delta h}{\Delta t_2}\right) = \frac{\Delta Q}{\Delta t_1}.$$

In dem speciellen Falle, dass die Pumpe, währenddem die Wassersäule, deren Höhe h ist, ausgeschöpft wird, mit constanter Geschwindigkeit arbeitet und die Leistung voraussichtlich größer ist als die Ergiebigkeit des tiefsten Wasserspiegels im Brunnen, kann man mit Anwendung der Gleichung 7*a*. und *b*. eine Näherungsformel aufstellen. Dann folgt aus Gleichung 8. und 7*b*., dass:

$$8a. \qquad P = \frac{Q}{t_1} \cong \frac{\Sigma\,(W \Delta h)}{h} + \frac{Q_2}{t_1}, \text{ wobei } P > 2\,W_1.^{*)}$$

Dies ist ein eigenthümliches Resultat, weil darin

$$8b. \qquad \frac{Q_1}{t_1} = \frac{\Sigma\,(W \Delta h)}{h} = medium\ W \text{ — nichts anderes ist,}$$

als das durchschnittliche Mittel aller Ergiebigkeiten, welche in der h hohen Wassersäule vorkommen, und welcher Mittelwert als diejenige Wassermenge, welche durchschnittlich in der Minute zugeströmt ist, erscheint.

Wir kehren nun zur Formel 6. zurück, welche zeigt, dass man die gehobene Wassermenge bloß durch die Beobachtungsdaten der Änderung des Wasserstandes bestimmen kann, wenn die gehobene Wassermenge nicht in Wasserbehältern aufgefangen werden kann. Ebenso zeigt die Formel 8., dass die Leistung der Pumpe auch bloß durch Beobachtung der Dauer des Ausschöpfens einzelner niedriger Wasserschichten und deren Anfüllungsdauer während der Ruhepause bestimmt werden kann.

Dort, wo für die Fassung großer Wassermassen keine Cisternen vorhanden sind, ist die Bestimmung der Leistung der Pumpe nach angegebener Weise das verlässlichste Mittel. Aber auch deshalb ist diese Bestimmungsweise

---

*) Warum die Näherungsformel gerade von diesem Grenzwerte an giltig ist, werden wir später (siehe Ungleichheit 11*a*.) erörtern.

nützlich, weil nach obiger Formel 8. die Veränderung der Leistung der Pumpe innerhalb der Schöpfdauer ersichtlich gemacht werden kann.

Die Gleichung 8. lässt sich nach Gleichung 2. noch umformen, weil nach letzterer Gleichung $F \frac{\Delta h}{\Delta t_2} = W$ ist und damit erhält man aus Gleichung 8.

$$9. \qquad \Delta t_1 = \frac{F \Delta h}{P - W}.$$

Wenn wir nun diesen Wert in Gleichung 5. einsetzen, so folgt nach einiger Umsetzung die Wassermenge, welche aus einer Schichte gehoben wurde:

$$10. \qquad \Delta Q = F \Delta h \frac{P}{P - W}$$

und folglich beträgt die von einer h hohen Wassersäule gehobene Wassermenge

$$11. \qquad Q = F \Sigma \left(\frac{P}{P - W} \Delta h \right).$$

In dieser Formel ist die Zeitdauer des Schöpfens Δt_1 schon nicht mehr enthalten. Wenn also die Leistung der Pumpe im vorhinein bekannt ist, so ist es gar nicht mehr erforderlich, die Dauer der Entleerung des Brunnens zu beachten, um auf die Menge des geschöpften Wassers zu folgern.

Dieses Ergebnis ermöglicht bei neugebauten Brunnen die Wassermenge im vorhinein zu bestimmen, welche durch eine neu anzuschaffende Pumpe aus einer bestimmt hohen Wassersäule gehoben werden kann. Aber außerdem ermöglicht es auch die Ausschöpfdauer des Brunnens zu berechnen.

Die Gleichung 11. lässt sich auch folgenderweise zu einer Näherungsformel umwandeln. Führen wir die angedeutete Division in der Bruchzahl, welche unter dem Summenzeichen steht, aus, so ist:

$$\frac{P}{P - W} = 1 + \frac{W}{P} + \left(\frac{W}{P} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{W}{P}}.$$

Nun kann das letzte Glied, welches $\left(\frac{W}{P}\right)^2$ enthält, gegen die übrigen nur in dem Falle vernachlässigt werden, wenn

$$\frac{W}{P} > \left(\frac{W}{P}\right)^2 \frac{1}{1 - \frac{W}{P}} \quad \text{als Bedingung}$$

besteht.

Hieraus folgt dann aber, dass

$$11a. \qquad \begin{cases} \frac{W}{P} < \frac{1}{2} \text{ oder hieraus folgernd} \\ P > 2\,W \text{ sein soll.} \end{cases}$$

Mit dieser Bedingung ist annähernd

$$11b. \qquad \frac{P}{P - W} \cong 1 + \frac{W}{P}.$$

Und wenn wir diesen Wert in Gleichung 11. einsetzen,

$$11c. \qquad \begin{cases} Q \cong Q_2 \left(1 + \frac{medium\,W}{P}\right) \text{ wo:} \\ medium\,W = \frac{\sum\limits_{0}^{h} (W \triangle h)}{h} \text{ und : } Q_2 = F\,h. \end{cases}$$

Letztere Näherungsformel ist nicht ganz mit Gleichung 7*c*. identisch, was man prüfen kann, wenn man die Gleichung 11*c*. mit der Ausschöpfdauer dividirt und beachtet, dass nach Gleichung 8*a*.

$$11d. \qquad P = \frac{Q}{t_1} \cong \frac{Q_2}{t_1} + \frac{Q_2}{Q}\,medium\,W.$$

Vergleicht man diese Näherungsformel mit der Gleichung 8*a*., so findet man den Unterschied, dass in letzterer Gleichung die Ergiebigkeit des Mittel-Wasserspiegels den Coëfficienten zu Gunsten größerer Genauigkeit $\frac{Q_2}{Q}$ hat.

Wollen wir ferner wissen, wie viel Wasser aus ein und demselben Brunnen und aus gleich hoher Wassersäule mit einer n-mal stärkeren Pumpe gehoben werden kann, so folgt nach Gleichung 11. und 11c., weil $\frac{n\,P}{n\,P - W} = \frac{P}{P - \frac{W}{n}}$ ist, dass:

$$12.\quad Q' = F\Sigma\left(\frac{P}{P - \frac{W}{n}}\,\Delta\,h\right) \cong Q_2\left(1 + \frac{med.\ W}{n\,P}\right).$$

Vergleichen wir die Werte der Wassermengen Q und Q' in den Formeln 11. und 12., so ist daraus sofort ersichtlich, dass eine n-mal stärkere Pumpe gleichsam die Brunnenergiebigkeit n-fach vermindert; mit anderen Worten, die Wassermenge, welche von derselben Wassersäule mit einer n-fach stärkeren Pumpe gehoben wird, ist gerade so viel, als man mit der schwächeren Pumpe aus einem n-fach schwächeren Brunnen Wasser ununterbrochen heben könnte.

§. 4. Zuströmung während des Pumpens.

Aus Formel 6. ist ersichtlich, dass die gehobene Wassermenge aus zwei Theilen zusammengesetzt ist, nämlich aus der Menge, welche während der Ruhepause, und aus derjenigen, welche während des Pumpens noch hinzuströmt. — Die zuströmende Menge, währenddem sich der Wasserspiegel um die Höhe $\Delta\,h$ hebt, ist ganz einfach mit dem Inhalte der Schichte gleich; welche Menge also ist:

$$13.\qquad \Delta\,Q_2 = F\,\Delta\,h.$$

Nun ist die Pumpe während der Zeit $\Delta\,t_1$ im allgemeinen imstande, mehr als diese Menge, und zwar $\Delta\,Q$ so zu heben, dass der Wasserspiegel um $\Delta\,h$ sinkt, wogegen diese $\Delta\,h$ hohe Wasserschichte während der Ruhepause $\Delta\,t_2$ sich füllte.

In den Abbildungen 2., 3. und 4. ist der Auftrieb $\Delta\,h_s$ für den untersten Wasserstand graphisch dargestellt. Wenn wir nämlich in wagrechter Richtung die verfließende Zeit und in senkrechter Richtung die Höhe des Wasserstandes auftragen und die für jeden Zeitpunkt aufgetragenen Höhenpunkte miteinander verbinden, so erhalten wir: Für die Dauer des Pumpens die Schaulinie $\overline{AO}$, welche die Abnahme des Wasserstandes, — und für die Dauer der Ruhepause die parabolische Curve $\overline{BO}$, welche die Zunahme des Wasserstandes darstellen. Die parabolische Schaulinie ist natürlich stets oben und links convex, hingegen die der Pumpdauer entsprechende logarithmische Schaulinie rechts und oben desto concaver gekrümmt, je langsamer die Pumpe arbeitet und je größer die Ergiebigkeit des Brunnens am untersten Wasserspiegel ist. — Theilen wir die beiden Curven in solche Theile, die augenscheinlich sehr annähernd messbare Stücke der an die Curven tangential sich anschmiegenden Geraden bilden, so gehört ein jedes solches Stück der Curve $\overline{BO}$ als Hypotenuse zu den entsprechenden Katheten $\triangle t_2$ und $\triangle h$. Ebenso gehört je ein gerades Stück der Curve $\overline{AO}$ als Hypotenuse zu den Katheten $\triangle t_1$ und $\triangle h$. Ziehen wir nun durch den Punkt O eine Senkrechte $\overline{KO}$; verlegen wir $\overline{AO}$ symmetrisch umgekehrt in den rechten Theil des durch $\overline{KO}$ getrennten Flächenraumes in die punktirte Lage $\overline{A'O}$; und nehmen wir noch auf beiden Curven $\overline{A'O}$ und $\overline{BO}$ dieselbe Schichthöhe $\triangle h$ an, so stellen die horizontalen Projectionen der Curventheile die Zeiträume $\triangle t_1$ und $\triangle t_2$ dar. Hierdurch erhalten wir zwei einander ähnliche, rechtwinkelige Dreiecke, in denen die Seiten zueinander in folgender Proportion stehen:

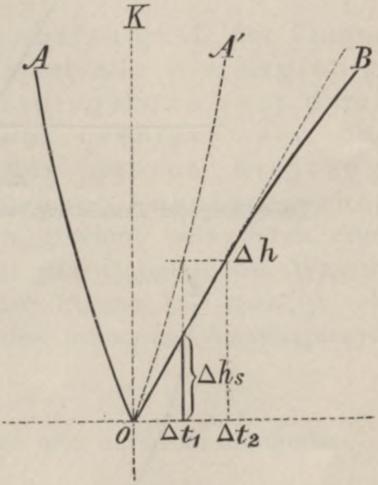

Abbildung 2.
Darstellung der Zuströmung, wenn $P > 2\,W$ und $\triangle Q < 2\,\triangle Q_2$.

$\triangle t_2 : \triangle t_1 = \triangle h : \triangle h_s$, woraus:

14. $$\triangle h_s = \frac{\triangle h}{\triangle t_2}\,\triangle t_1.$$

Also stellt diese Größe graphisch richtig den Auftrieb des mittleren Wasserspiegels während des Auspumpens der

$\triangle h$ hohen Wasserschichte dar. Freilich wird dieser Auftrieb innerhalb der Zeit $\triangle t_1$ durch die Pumpe vernichtet.

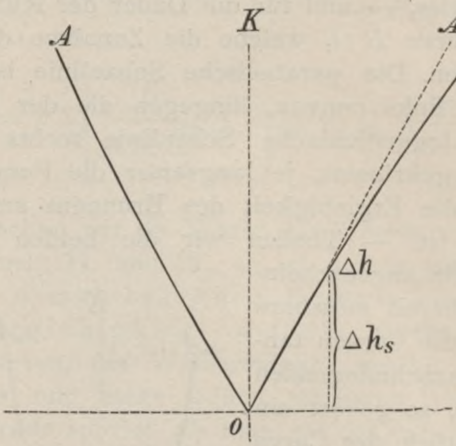

Abbildung 3.
Darstellung der Zuströmung, wenn $P = 2\,W$ und $\triangle Q = 2 \triangle Q_2$.

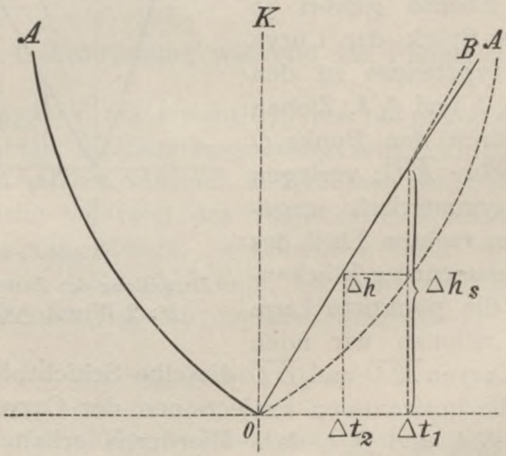

Abbildung 4.
Darstellung der Zuströmung, wenn $P < 2\,W$ und $\triangle Q > 2 \triangle Q_2$.

Nun folgt aus der Formel 14., dass, je nachdem $\triangle t_1 \begin{smallmatrix}<\\=\\>\end{smallmatrix} \triangle t_2$ ist, dementsprechend der Auftrieb $\triangle h_s \begin{smallmatrix}<\\=\\>\end{smallmatrix} \triangle h$ ausfällt, welche drei Fälle aus den Abbildungen 2., 3., 4. graphisch ersichtlich sind. Es ist dann folgerichtig auch:

$\Delta h + \Delta h_s \lesseqgtr 2 \Delta h$ und daraus nach Gleichung 5. und 13. $\Delta Q \lesseqgtr 2 \Delta Q_2$. Ferner hiemit aus Gleichung 10. $P \gtreqless 2 W$.

Hieraus folgt der Satz: Wenn die Leistungsfähigkeit der Pumpe mehr als doppelt so groß ist, als die Ergiebigkeit des mittleren Wasserspiegels einer Wasserschichte, so kann aus letzterer weniger Wasser gehoben werden, als die doppelte Menge des Schichteninhaltes beträgt und umgekehrt.

Ferner wenn die Leistungsfähigkeit der Pumpe mehr als doppelt so groß ist wie die Ergiebigkeit des untersten Wasserspiegels, so kann durch Auspumpen des Brunnens weniger als das Doppelte des Inhaltes der ganzen ursprünglichen Wassersäule im Brunnen ununterbrochen gehoben werden. Hingegen gewinnt man durch Auspumpen des Brunnens mehr als das Doppelte des Wasserinhaltes, wenn die Leistung der Pumpe kleiner ist, als die verdoppelte Ergiebigkeit des untersten Wasserspiegels beträgt.

§. 5. Brunnenentleerungsdauer und deren Beziehungen.

Die Entleerungsdauer und die Erneuerungsdauer der einzelnen Wasserschichten lassen sich miteinander in bestimmte Beziehung bringen, indem dieselben von der Leistung der Pumpe und der Ergiebigkeit der betreffenden Wasserschichte abhängen. So ist nämlich, wenn wir Gleichung 9. mit 13. verbinden:

15. $$\Delta t_1 = \frac{\Delta Q_2}{P - W}.$$

Und da nach Gleichung 2. $F \frac{\Delta h}{\Delta t_2} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t_2} = W$ ist, so folgt, dass

16. $$\Delta t_2 = \frac{\Delta Q_2}{W}.$$

Gleichung 15. und 16. verbunden gibt:

17. $$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{W}{P - W}.$$

Ferner indem man zu beiden Seiten dieser Gleichung die Einheit hinzuaddirt:

18. $$\frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{\Delta t_2} = \frac{P}{P - W}.$$

In ähnlicher Weise folgt aus Gleichung 17.:

19. $$\frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{P}{W}.$$

Mit Worten aus Gleichung 17.: Das Verhältnis zwischen der Entleerungs- und Füllungsdauer einer seichten Wasserschichte im Brunnen ist gleich zum Verhältnis, in welchem die Ergiebigkeit der Schichte zur Inhaltsverminderung in der Zeiteinheit während des Auspumpens steht.

Ferner aus Gleichung 18.: Die ganze Dauer der Entleerung und Erneuerung einer seichten Wasserschichte im Brunnen verhält sich zur Dauer der Erneuerung wie die Leistung der Pumpe zur Verminderung des Inhaltes der Wasserschichte in der Minute.

Und schließlich aus Gleichung 19.: Die ganze Dauer der Entleerung und Erneuerung einer seichten Wasserschichte im Brunnen verhält sich zur Dauer der Wiederfüllung wie die Leistung der Pumpe zur Ergiebigkeit der Wasserschichte in der Minute.

Die Sätze bilden die Mittel, mit welchen man auf Grund der Beobachtungsdaten entweder die unbekannte Leistung der Pumpe oder die Entleerungsdauer jeder Wasserschichte, besonders mittelst elementarer Rechnungsarten, berechnen kann.

§. 6. Anwendung der theoretischen Betrachtungen auf Versuche.

Behufs praktischer Verwendung der bisher mitgetheilten Resultate möge folgendes Beispiel dienen:

Beispiel: Aus einem Brunnen, dessen Durchmesser 2 Meter ist, wurde mittelst eines Ejectors 63 Minuten lang Wasser ausgehoben. Währenddem sank der Wasserspiegel bis zur Saugrohrmündung 1·88 *m* tief. Nach Einstellung des Pumpens stieg der Wasserspiegel nach 80 Minuten bis zur anfänglichen Höhe wieder hinauf. Es fragt sich: Wie groß war die gehobene Wassermenge, welche in Ermangelung eines Wasserbehälters ins Freie floss? Wie groß ist die Ergiebigkeit des Brunnens bei verschiedenen Wasserständen? Und wie groß war die veränderliche Leistung des Ejectors während der Dauer des Pumpens?

Man notire zunächst die den verschiedenen Wasserständen entsprechenden Zeitpunkte in die entsprechenden Rubriken der Tabelle 1. hinein. Es ist zweckmäßig, jedoch nicht unbedingt erforderlich, wenn man gleich tiefe Wasserschichten annimmt, das heißt, wenn man die Zeitpunkte des Eintrittes gleich tiefer Absenkungen während des Pumpens und entsprechend gleich hohe Ansteigungen des Wasserspiegels während der Ruhepause beobachtet und notirt.

In unserem Beispiele wurden 20 *cm* voneinander abstehende Wasserstände, mit Ausnahme der untersten Schichte, entsprechend beobachtet und notirt. Sollte man eine Beobachtung zu notiren versäumen, so kann man dieses Versäumnis durch einfache Interpolation genügend genau nachholen, wenn man nur nicht in zu großen Zeiträumen die Beobachtungen macht.

Mittelst der notirten Daten können dann die Änderungen des Wasserstandes sowohl während des Auspumpens, als auch während der Ruhepause als Schaulinien, wie in Abbildung 5. und 6., dargestellt werden.

Man berechne sonach zunächst den Flächeninhalt F des lichten Brunnenquerschnittes, welcher in unserem Beispiele 3·14 m^2 ist.

Und nun berechnen wir aus den vier Beobachtungsgrößen: $\triangle h$, $\triangle t_1$, $\triangle t_2$, F nach einfachen, auch in der Tabelle 1. unten angegebenen Formeln die Ergiebigkeiten der mittleren Wasserspiegel und die Leistungen P der Pumpe schichtenweise.

Hiemit erhalten wir die aus verschieden hohen Wassersäulen gewonnenen Wassermengen Q durch Addition der Wassermengen $\triangle Q$, welche aus denjenigen Schichten gewonnen wurden, die, eben zusammengefasst, die Wassersäule bilden. Die Besprechung der letzten 4 senkrechten Rubriken der Tabelle folgt später. Es erübrigt uns hier noch, über die ersteren Rubriken Folgendes zu bemerken:

1. Es sind nur die Ergiebigkeiten der mittleren Wasserspiegel einer jeden Schichte angegeben. So ist zum Beispiel die Ergiebigkeit des höchsten Wasserspiegels, der $h = 2$ *m* hoch liegt, Null. Der um 22 *cm* tiefer liegende Wasserspiegel würde schon 26·1 *l* Wasser in der Minute abgeben, wenn man die Pumpe ebenso langsam laufen ließe, damit deren Leistung gleich der entsprechenden Ergiebigkeit wäre. Die andere wichtige Wasserschichte liegt an der Saugrohrmündung, wird 28 *cm* hoch angenommen und beträgt deren durchschnittliche Ergiebigkeit 219·9 *l/min.* Diese Menge ist zugleich die Ergiebigkeit des mittleren, das heißt, des über die Saugrohrmündung 14 *cm* hohen Wasserspiegels. Die Ergiebigkeit des Wasserspiegels an der Saugrohrmündung ist in der Tabelle nicht angegeben. Sie ist aber von den Beobachtungsdaten, die zu den zwei untersten Wasserschichten gehören, berechenbar, weil das Aufsteigen des Wasserspiegels wenigstens in zweien, sehr niedrigen Nachbarschichten sehr annähernd nach solchem parabolischen Gesetze mit dem Verlaufe der Zeit erfolgt, wobei der Parameter der Parabel nahezu constant bleibt. Es wird demnach die Höhe h des Wasserspiegels (Abbildung 1.) während der Ruhepause wenigstens auf kurze Distanzen mit der Zeit t nach folgendem parabolischen Gesetze steigen, wenn a und b passende Constanten bedeuten:

20. . . . $h = a\,t - b\,t^2$, woraus die Ergiebigkeit irgend eines Wasserspiegels, welcher sich nach der Zeit t einstellt, nach Gleichung 2. sein wird:

21. $$W = F \frac{dh}{dt} = F\,(a - 2\,bt).$$

Bezeichnen wir die messbar kleine Höhe (Abbildung 5.), von der Saugrohrmündung an gemessen, welche der Wasserspiegel während der messbar kleinen Zeit τ_1 noch sehr annähernd mit gleichförmiger Geschwindigkeit erreicht, mit k_1, und die weitere kleine messbare Höhe mit k_2, welche ebenso mit nahezu gleichförmiger Geschwindigkeit während der Zeitdifferenz τ_2 erreicht wird, so wird die Ergiebigkeit der

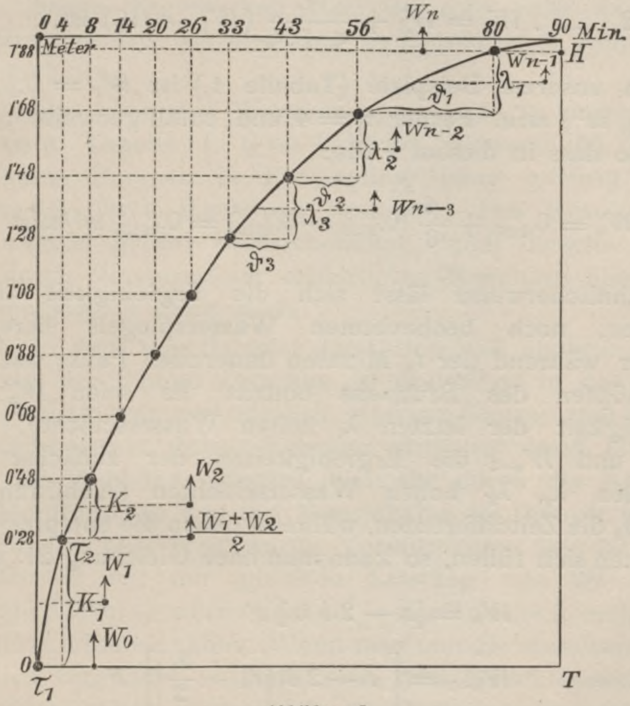

Abbildung 5.
Zur Bestimmung der Ergiebigkeit am tiefsten und höchsten Wasserspiegel.

mittleren Wasserspiegel sein, wenn wir die entsprechenden Variablen in Formel 21. einsetzen:

$$W_1 = F\frac{k_1}{\tau_1} = F\left((a - 2\,b\,\frac{\tau_1}{2}\right)$$

$$W_2 = F\frac{k_2}{\tau_2} = F\left(a - 2\,b\,\frac{(\tau_2 + \tau_1)}{2}\right)$$

und die Ergiebigkeit Wo an der Saugrohrmündung, weil dort $t = 0$ ist (nach Gleichung 21.)

$$W_0 = F\,a.$$

Aus diesen drei Gleichungen folgt nach Eliminirung der Constanten a und b, dass die Ergiebigkeit des tiefsten Wasserspiegels

$$22. \quad \ldots W_0 = W_1 + \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}\,(W_1 - W_2) \text{ ist.}$$

In unserem Beispiele (Tabelle 1.) ist $W_1 = 0._{2199}$, $W_2 = 0._{1570}\ m^3 / min.$ Ferner $\tau_1 = 4$ und zufälligerweise τ_2 auch $= 4$, so dass in diesem Falle:

$$W_0 = 0._{2199} + \frac{4}{8}\,(0._{2199} - 0._{1570}) = 0._{25135}\ m^3/min.$$

Ähnlicherweise lässt sich die Ergiebigkeit W_n des höchsten, noch beobachteten Wasserspiegels berechnen, welcher während der t_n Minuten dauernden Pause nach dem Ausschöpfen des Brunnens eintritt. Es seien W_{n-1} die Ergiebigkeit der letzten λ_1 hohen Wasserschichte, ferner W_{n-2} und W_{n-3} die Ergiebigkeiten der zunächst tiefer liegenden λ_2, λ_3 hohen Wasserschichten (Abbildung 5.), ϑ_1 ϑ_2 ϑ_3 die Zeitdifferenzen, während denen die entsprechenden Schichten sich füllen, so kann man nach Gleichung 21. setzen:

$$W_n = [a - 2\,b\,t_n]\,F$$

$$W_{n-1} = \left[a - 2\,b\left(t_n - \frac{\vartheta_1}{2}\right)\right] F$$

$$W_{n-2} = \left[a - 2\,b\left(t_n - \vartheta_1 - \frac{\vartheta_2}{2}\right)\right] F$$

$$W_{n-3} = \left[a - 2\,b\left(t_n - \vartheta_1 - \vartheta_2 - \frac{\vartheta_3}{2}\right)\right] F.$$

Aus diesen 4 Gleichungen die Constanten a, b und t_n eliminirt, folgt schließlich:

$$23. \quad \ldots\ldots W_n = W_{n-3} - \left(2 + \frac{\vartheta_3}{\vartheta_1 + \vartheta_2}\right)(W_{n-2} - W_{n-1}).$$

So ist in unserem Beispiel (Tabelle 1.) $W_{n-1} = 0._{0261}$, $W_{n-2} = 0._{0483}$, $W_{n-3} = 0._{0628}$ und $\vartheta_1 = 24$, $\vartheta_2 = 13$, $\vartheta_3 = 10$; folglich ist die Ergiebigkeit am 1·88 *m* hohen Wasserspiegel:

$$W_n = 0._{0628} - \left(2 + \frac{10}{24 + 13}\right)\left(0._{0483} - 0._{0261}\right) = 0._{0124}\, m^3 \,/\, min.,$$

also sehr gering, woraus folgt, dass der allerhöchste Wasserstand, dessen Ergiebigkeit Null ist, sehr nahe zu diesem Wasserstande ist, wie dies auch in Abbildung 5. ohneweiters ersichtlich ist.

2. Die gehobene Wassermenge wurde in unserem Beispiel laut Tabelle 1. $Q = 14{\cdot}36\ m^3$ während 63 Minuten dauerndem Pumpen in Ermanglung eines gehörig großen Hohlmaßes durch Rechnung bestimmt. Das Resultat steht dem mittelst großer Wasserbehälter durch directes Messen oder durch Wassermesser erhältlichen Resultate hinsichtlich der Genauigkeit kaum nach.

3. In dem zum Beispiel gewählten Fall änderte sich die Leistung der Pumpe zwischen 10 und 20 m^3 in der Stunde. Die Leistung war veränderlich, weil ein Ejector zum Pumpen gebraucht wurde, dessen Leistung nicht nur durch die Änderung der Hubhöhe, sondern vielmehr durch die Änderung des Dampfdruckes und des Nassgehaltes im Dampfe während dem Pumpen beeinflusst wurde. Vorausgesetzt, dass der Ejector fortwährend mit der gleichen Leistung von 260 *l* / *min.* gepumpt hätte, so würde man die in der Tabelle 2. enthaltenen Resultate erhalten haben. Wenn man nun die Resultate beider Tabellen vergleicht, so findet man, dass behufs Ausschöpfens der 1·88 *m* hohen Wassersäule des Brunnens im ersten Fall 63 Minuten und im zweiten Fall 52·7 Minuten erforderlich seien. Die Schöpfdauer der untersten Schichte jedoch ist im letzteren Fall deshalb größer, weil zufälligerweise die angenommene Leistung der Pumpe nur um wenig größer als die Ergiebigkeit des niedrigsten Wasserspiegels ausfällt.

Im gegebenen Fall deutet der geringe Unterschied zwischen Pumpenleistung und Ergiebigkeit des tiefsten Wasserspiegels auf ein bedeutend verzögertes Sinken des Wasserstandes, welches in Abbildung 6. durch die punktirte Schaulinie dargestellt ist.

Würden wir anstatt des Ejectors eine gleichmäßig laufende Pumpe, welche z. B. 456 *l* / *min.*, also nahezu doppelt so viel als im frühern Fall, hebt, anwenden, so würde die Entleerung der 1·88 *m* hohen Wassersäule in demselben Brunnen nach Tabelle 3. nur 17·56 Minuten lang währen.

Die gehobene Wassermenge wird auch dann geringer, nämlich 7·93 m^3, wogegen man mit beinahe halb so großer Geschwindigkeit aus derselben Wassersäule nach Tabelle 2.

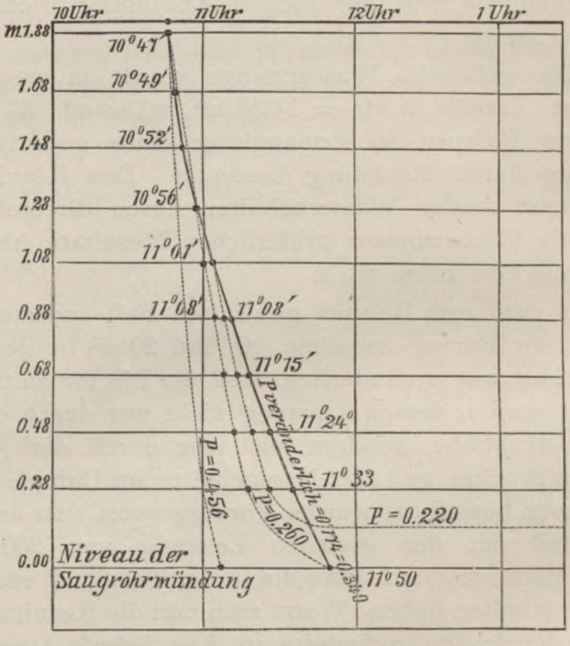

Abbildung 6.
Schaulinien der Absenkung des Wasserspiegels während dem Pumpen.

13·70 m^3 Wasser gewinnen kann. Daraus ist zu ersehen, dass eine größere Pumpe nur dann nützt, wenn nach langer Pause wenig Wasser, aber schnell, erforderlich ist, hingegen die kleinere Pumpe genügt und deren Anwendung empfehlenswert ist, wenn man zum Pumpen genügend viel Zeit zur Verfügung hat, und man den Brunnen mehr oder ganz ausnützen muss, weil viel Wasser erforderlich ist.

Auf die Frage der vortheilhaftesten Größe der Pumpe bei gegebenem Wasserbedarf werden wir später zurückkommen.

§. 7. Die Quellenergiebigkeit.

Gewöhnlich arbeitet die Pumpe unter fortwährendem Sinken des Wasserspiegels. Nur wenn der Wasserstand so tief gesunken ist, dass die Ergiebigkeit des abgesenkten Wasserspiegels mit der Leistungsfähigkeit der Pumpe gleich wird, bleibt der Wasserstand während gleichförmig geschwindem Pumpen in gleicher Höhe, vorausgesetzt, dass die Quellenergiebigkeit die gleiche bleibt. Diese kann aber bei wasserreichen Brunnen, unter die wir solche rechnen, bei welchen die zeitweise entnommene Wassermenge im Verhältnis zum Grundwasservorrath gering ist, Tage hindurch beinahe als unveränderlich betrachtet werden. Hingegen bei schwächeren Brunnen sinkt mitunter die Quellenergiebigkeit schon während des Pumpens augenscheinlich schnell, wenn die sickerfähige Erdschichte (sei es durch großen Widerstand oder infolge Vorhandenseins geringer Grundwassermenge) Wasser nur sehr verzögernd zuzuführen imstande ist. Es gibt auch Brunnen, aus welchen seit langer Zeit kein Wasser entnommen wurde, und die eben infolge dessen schwächer geworden sind, weil die früher sickerfähige Erdschichte sich verstopft hat. Solche Quellen können sich, wieder in Betrieb gesetzt, mit der Zeit allmählich stärken, nachdem die Quellenströmung den widerstehenden Schlamm allmählich aus dem Weg geschafft hat. Derartige Eigenschaften der Quelle können wir theils daraus ersehen, dass wir nach öfters wiederholtem Ausschöpfen des Brunnens das Gesetz des Emporsteigens des Wasserspiegels ebenso oft beobachten, also den Versuch wiederholen; theils daraus, dass wir die zeitweise Änderung des höchsten Wasserstandes H beobachten.

Die Literatur weist über die in vorliegender Abhandlung unterschiedlich sogenannte Quellenergiebigkeit viele wertvolle Abhandlungen auf, welche neu anzulegende Brunnen ins Auge fassend, die Ergiebigkeit der durch Brunnen absenkbaren Grundwässer erörtern; im Gegensatz zum Zweck der vorliegenden Abhandlung, worin wir nunmehr die rationelle Messung und Beurtheilung der Ergiebigkeit vorhandener Brunnenanlagen einer kritischen Erörterung unterziehen; es genügt daher, wenn wir hierorts auf die trefflichen Untersuchungen, welche in der vorersterwähnten Richtung geschaffen und veröffentlicht wurden, unter einem hinweisen.

Solche Erörterungen sind zu finden in:

Dupuit. Études theoretiques et pratiques sur les mouvements des eaux. 1863.

Frühling im Handbuch der Ingenieurwissenschaften. 3. Band, 3. Abtheilung.

Lueger's Lexikon der gesammten Technik unter dem Titel: Brunnenergiebigkeit.

F. Forchheimer in der Zeitschrift des Ingenieur- und Architektenvereines in Hannover. Jahrgang 1886. Sp. 539.

Von demselben in der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. Jahrgang 1895. S. 1305.

Von demselben in der Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines in Wien. Jahrgang 1899. Nr. 44, 45.

Indessen finden wir uns veranlasst, auf eine besondere Art der Vermehrung der Quellenergiebigkeit in Folgendem aufmerksam zu machen, um zu zeigen, wie besonders nach Beendigung der Bohrung artesischer Brunnen die Tiefe bestimmt werden kann, bis wohin die Saugrohrmündung reichen muss, um die erforderliche Brunnenergiebigkeit zu erhalten.

Es sei F die Weite des artesischen Rohres in m^2, welches in Abbildung 7. mit R bezeichnet ist, und bis in die wasserführende Erdschichte $\overline{S\,S}$ hineinreicht. In derselben Abbildung ist ein cylindrisches Rohr C gezeichnet, welches ideell mit seiner gleichmäßigen Weite f die Erdschichte $\overline{S\,S}$ so vertreten könnte, dass deren Weite gerade so die Zuführung des Wassers zum Brunnenrohr R, wie die Erdschichte $S\,S$ es bewirkt, zu verzögern imstande sei. Man stelle sich ferner das cylindrische Rohr so vor, dass während dem Ausströmen seines Inhaltes nach Rohr R, der Abgang in C ganz oder theilweise ersetzt werde; wie dies ähnlich in Wirklichkeit in der Erdschichte $\overline{S\,S}$ vorzugehen pflegt. Nun kann man sofort nach Beendigung der Bohrungsarbeiten den höchsten Wasserstand im Rohre R in einer von oben gemessenen Tiefe $\underline{s_z}$ finden.

Es stellt sich nun die Aufgabe, diejenige Tiefe zu bestimmen, bei welcher der durch Pumpen abgesenkte Wasserspiegel mittelst der endgiltig anzubringenden Pumpe die erforderliche Wassermenge ununterbrochen bieten könne. Es wird also eine Tiefe s_1 gesucht, bis wohin die definitive Pumpe den Wasserspiegel abzusenken imstande sein wird, um daraus die erforderliche Wassermenge W_1 $m^3 : min.$ ununterbrochen zu heben.

Nun findet man, dass mittelst Probirpumpen geringerer Leistungsfähigkeit der Wasserspiegel im Rohr R nur bis zur

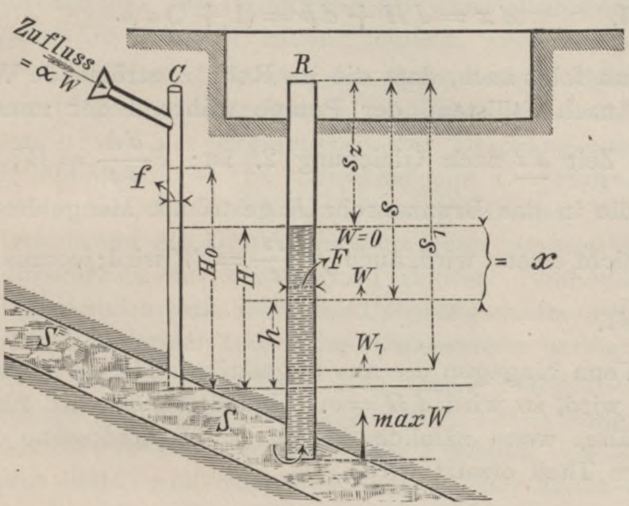

Abbildung 7.

Zur Bestimmung der nöthigen Wasserspiegelabsenkung behufs Erreichung der erforderlichen Wasserergiebigkeit.

geringeren Tiefe $\underline{s}$ herabgesenkt werden kann. Also wird die Ergiebigkeit des Wasserspiegels in dieser Tiefe der Leistung der Pumpe gleich sein, welche wir mit $\underline{W}$ bezeichnen. Bezeichnen wir noch die Absenkung des Wasserspiegels, welche durch Pumpen erzeugt wird, mit x.

Ferner ist aus der Abbildung 7. ersichtlich, dass:

I. $$s - s_z = H - h = x.$$

Wenn nun h und $d\,h$ wächst, indem die Wassermenge $F\,d\,h$ nach Stillstand der Pumpe ins Brunnenrohr R strömt, so muss eben eine solche Menge in der Erdschichte ersetzt werden; wenn nicht, so sinkt die Depression um dH. Im letzteren allgemeinen Fall ist aber $F\,dh = f\,dH$, woraus wenn wir $\frac{F}{f} = \zeta$ bezeichnen:

$$\text{II.} \qquad dH = \zeta\, dh.$$

Durch Wachsen von h und Abnehmen von H wird auch x Absenkung abnehmen um $x - dx = H - dH - (h + dh)$, woraus mittelst Gleichung II. folgt:

$$\text{III.} \qquad dx = dH + dh = (1 + \zeta)\, dh.$$

Nun folgt auch, dass die ins Rohr R strömende Wassermenge nach Stillstand der Pumpe während der unmessbar kurzen Zeit dt nach Gleichung 2. ist: $F\frac{dh}{dt} = W$, wobei, wenn die in das Brunnenrohr R geströmte Menge im Cylinder C nicht ersetzt wird, auch $f\frac{dH}{dt} = W$ wird; woraus $dH = \frac{W}{f}\, dt$.

Wenn hingegen die aus C geströmte Menge sofort ganz ersetzt wird, so wird $dH = o$. Und demnach wird für mittlere Fälle, wenn nämlich die aus C übergeflossene Menge nur zum Theil ersetzt wird:

$$\text{IV.} \qquad dH = (1 - \alpha)\frac{W}{f}\, dt,$$

wo α eine Bruchzahl zwischen Null und Eins ist, und den wievielten Theil der während dt Zeit ins Brunnenrohr geströmten Wassermenge bedeutet, welcher in der wasserführenden Schichte sofort ersetzt wird.

Durch Einsetzen des Wertes dh aus Gleichung 2. in Gleichung III. erhalten wir

$$\text{V.} \qquad dx = (1 + \zeta)\frac{W}{F}\, dt$$

für den Fall, dass die in das Brunnenrohr zugeflossene Wassermenge nicht während dt Zeit ersetzt wird.

Durch Einsetzen des Wertes dh aus Gleichung 2. und des dH aus Gleichung IV. in Gleichung III. erhalten wir, wenn wir noch für $f = \frac{F}{\zeta}$ setzen

$$\text{VI.} \qquad dx = \Big((1 - \alpha)\,\zeta + 1\Big)\,\frac{W}{F}\,dt$$

für den Fall, dass die in das Brunnenrohr R zugeflossene Wassermenge theilweise sofort ersetzt wird.

Man ersieht, dass Gleichung VI. ganz allgemein giltig ist, und auch Gleichung V. in sich schließt, wenn $\alpha = o$ wird.

Der Coëfficient ζ ist von den Querschnittsverhältnissen der wasserführenden Erdschichte und des Rohres R, der Coëfficient α von der Ergiebigkeit der Ursprungsquelle im Erdreich abhängig. — Je schwächer die Ursprungsquelle, desto größer ist der Coëfficient $(1 - \alpha)$. Dessen Wert ist gleich Eins, wenn die Ursprungsquelle ganz versiegt ist, und zum Rohrbrunnen nur der Vorrath zufließt. Schließlich ist dessen Wert gleich Null, wenn die Ursprungsquelle ergiebiger ist, als der momentane Zufluss im Brunnenrohr beträgt.

Aus Gleichung VI. ließe sich durch Integration die Wasserspiegelergiebigkeit W als Function der Absenkung x ausdrücken, wenn die Zeitdauer t als Function von W sich ausdrücken ließe, was nach Gleichung 21. nur annäherungsweise möglich ist. Der Wasserspiegel hebt sich nämlich während der Ruhepause nach einem zusammengesetzten parabolischen Gesetze. Wenn wir nun für den Parameter einer einfachen Parabel eine Mittelzahl b in Gleichung 20. einsetzen, die am besten passt, um näherungsweise das Gesetz des Aufsteigens des Wasserspiegels darzustellen, so wird die Gleichung dieser einfachen Näherungsparabel die Form haben wie Gleichung 20., woraus die Gleichung 21. folgt, nämlich:

$$W = (a - 2\,b\,t)\,F$$

woraus durch Umsetzung und durch Differenciren:

$$\text{VII.} \qquad dt = -\,\frac{d\,W}{2\,b\,F}.$$

Diesen Wert in Gleichung VI. eingesetzt, erhalten wir

VIII. $$\frac{2\,b\,F^2}{(1-a)\,\zeta+1}\,d\,x = -\,W\,d\,W.$$

Für den Fall, dass nach mehrmaligem Auspumpen mittelst der Probirpumpe bis zur Tiefe s, beobachtet wird, dass nach Einstellen des Pumpens der Wasserspiegel wieder auf dasselbe höchste Niveau, welches in der Tiefe s_z liegt, hinaufsteigt, kann $\alpha = o$ gesetzt, und H wie auch s_z als Constante betrachtet werden.

In allen solchen Fällen kann aus Gleichung VIII. durch Integration zwischen den Grenzen einerseits von $x = s_1 - s_z$ bis $x = s - s_z$ und anderseits von $W = W_1$ bis W erhalten werden:

IX. $$\frac{4\,b\,F^2}{1+\zeta}\,(s_1 - s) = W_1^2 - W^2.$$

Ferner durch Integration zwischen den Grenzen

von $x = s_1 - s_z$ bis $x = o$
und $W = W_1$ bis $W = o$

X. $$\frac{4\,b\,F^2}{1+\zeta}\,(s_1 - s_z) \cong W_1^2.$$

Schließlich erhalten wir durch Division der Gleichung IX. durch Gleichung X. die folgende Verhältniszahl:

XI. $$\frac{s_1 - s.}{s_1 - s_z} \cong 1 - \left(\frac{W}{W_1}\right)^2.$$

Hieraus folgt, dass der Wasserspiegel, dessen Ergiebigkeit W_1 eben die erforderliche Wassermenge mit der erwünschten Geschwindigkeit bieten kann, in der folgenden Tiefe liegt:

XII. $$s_1 \cong \left(\frac{W_1}{W}\right)^2 (s - s_z) + s_z.$$

Diese Näherungsformel, welche in der Praxis zur Vorausbestimmung der auszubauenden Tiefe des Brunnenschachtes gute Dienste leisten kann, beruht eben auf folgendem Satz, welcher von Gleichung XII. durch Umsetzung folgt; nämlich:

$$\text{XIII.} \qquad \sqrt{\frac{s_1 - s_z}{s. - s_z}} \cong \frac{W_1}{W}.$$

Das heißt: Die Ergiebigkeiten an verschiedenen durch Pumpen abgesenkten Wasserspiegeln verhalten sich annäherungsweise so zueinander, wie die Quadratwurzeln der vom höchsten Wasserstande aus gemessenen Absenkungen derselben.

Hiezu ist noch zu bemerken, dass die Ergiebigkeit W durch Pumpversuche zu ermitteln ist. Ferner kann der artesische Brunnen natürlich nicht jede erwünschte Ergiebigkeit bieten. Es gibt nämlich ein Maximum W am Ende des Rohres R, in der Tiefe Maximum s. Es muss also die folgende Bedingung bestehen, welche aus Gleichung XIII. folgt:

$$\text{XIV.} \quad W_1 < max.\, W \cong W \sqrt{\frac{max.\ s_1 - s_z}{s - s_z}}$$

und welche immer beachtet werden muss.

Zum Beispiel: In einem Bohrloch von der Tiefe 100 *m* stehe der höchste Wasserstand 4 *m* tief. Durch Pumpversuche mittelst einer Centrifugalpumpe, welche 150 *l* in der Minute hob, werde ermittelt, dass der Wasserstand im artesischen Rohre 60 *cm* tiefer absinkt und während ununterbrochenem Pumpen in dieser Tiefe stehen bleibt. Frage: Wie groß ist die Ergiebigkeit der Quelle am Ende des Bohrloches? Ferner wie tief soll die Saugrohrmündung der endgiltig aufzustellenden Pumpe gesetzt werden, um 300 *l* in der Minute ununterbrochen heben zu können?

Die Antwort auf die erste Frage ist nach Gleichung XIV.

$$max.\, W = 0._{150} \sqrt{\frac{100 - 4}{0.60}} = 1._{897} \frac{m^3}{min.}.$$

Und auf die zweite Frage nach Gleichung XII.

$$s_1 = \left(\frac{300}{150}\right)^2 \times 0.60 + 4 = 6.4\ m.$$

§. 8. Ergiebigkeit der ganzen Anlage.

Wenn ein Brunnen mittelst der vorhandenen Pumpeneinrichtung unerschöpflich ist, so folgt daraus nur, dass dessen größte Ergiebigkeit mittelst der vorhandenen Einrichtung nicht ganz ausgenützt werden kann; ferner dass die Ergiebigkeit des ständig in gleicher Höhe bleibenden Wasserspiegels gleich ist mit der momentanen Leistung der Pumpe. Daher ist in einem solchen Falle die Ergiebigkeit der Anlage gleich der Leistung der Pumpe. Wenn hingegen die Leistung der Pumpe größer ist als die Ergiebigkeit des tiefsten Wasserspiegels, so schöpft die Pumpe den Brunnen während allmählichem Sinken des Wasserstandes bis zur Saugrohrmündung aus, wonach eine Ruhepause eintreten muss, während welcher der Brunnenschacht theilweise oder ganz bis zum möglichst höchsten Wasserstande sich wieder füllt. Infolge dessen kann man in der Praxis die größte Ergiebigkeit der Brunnenanlage, welche mit der Ergiebigkeit des niedrigst abgesenkten Wasserspiegels identisch ist, auch in diesem Falle nicht ausnützen. Dies wäre aber auch nicht wirtschaftlich, weil die Pumpe langsamer arbeiten müsste, also auf Kosten der besseren Ausnützung des Brunnens man die Pumpe minder ausnützen würde, was mechanische Effectverluste verursacht, indem die Widerstände der Bestandtheile der Dampfpumpe nahezu dieselben bleiben, ob die Leistung, auf welche sie in Anspruch genommen wird, größer oder kleiner ist. Andererseits entstände großer Arbeitsverlust dadurch, dass bei zu tiefem Wasserstande der Gang der Pumpe nicht so leicht der Ergiebigkeit des Wasserstandes constant anzupassen wäre und weil der Wasserspiegel in Wallungen geräth, somit zeitweise auch Luft angesaugt würde.

Aus den bisherigen Erörterungen ist es einleuchtend, dass die Kenntnis der Ergiebigkeit der durch Pumpen abgesenkten Wasserspiegel, das ist die Brunnenergiebigkeit bei verschiedenen Wasserständen genügt, um die Güte eines Brunnens beurtheilen zu können. Weil man aber von einem mit einer schwachen Pumpe combinirten, sehr ergiebigen Brunnen oder aus einem mit einer starken Pumpe combinirten schwachen Brunnen als Schlussresultat doch nur wenig Wasser erhält, so ist in der Praxis die Beurtheilung der Wasserergiebigkeit der ganzen Pumpenanlage die Hauptaufgabe, wenn nämlich diese Anlage als fertig gegeben ist. Wenn man eine Brunnenwassersäule, deren Höhe h ist, während der Zeit t_1 mittelst der vorhandenen Pumpenanlage auszupumpen imstande ist, während die Wassermenge Q gehoben wird; und wenn diese Wassersäule während der Ruhepause t_2 sich wieder füllt, so brauchte man schließlich zum Schöpfen der Wassermenge Q die Zeit $t_1 + t_2$; daher auf eine Stunde folgende Wassermenge (E) in m^3 entfällt:

24. $$E = \frac{60\,Q}{t_1 + t_2} \text{ wo } t_1 \text{ und } t_2 \text{ in Minuten,}$$

Q in m^3 einzusetzen sind. E ist nun die stündliche Ergiebigkeit der ganzen Pumpenanlage nach Ausschöpfen der h-hohen Wassersäule, welche mit Hilfe der Gleichung 9., 11. und Gleichung 18. verwandelt werden kann:

25. $$E = 60\,\frac{\Sigma\left(\frac{P}{P-W}\,F\,\Delta\,h\right)}{\Sigma\left(\frac{P}{P-W}\;\Delta\,t_2\right)}.$$

Für den speciellen Fall, dass die Leistung der Pumpe P gleichförmig constant bleibt, wird die Ergiebigkeit der Anlage, wenn wir in Gleichung 24. den Wert von der Wassermenge Q aus Gleichung 8. einsetzen:

26. $$E = \frac{60\,P\,t_1}{t_1 + t_2} \text{ (hiebei } P \text{ constant).}$$

Die Gleichung 24. ist zur Berechnung der Ergiebigkeit der Anlage im allgemeinen anwendbar, wenn die gehobene Wassermenge Q entweder in Wasserbehältern gemessen werden konnte oder in Ermanglung solcher nach rechnungsmäßiger Bestimmung der Zuflussmengen während des Pumpens und während der Ruhepause, wie dies in der Tabelle 1. beispielsweise geschah, berechnet wird. Diese Formel wird auch in der Praxis gewöhnlich angewendet, nur ist es unrichtig, wenn man das Resultat als absolute Brunnenergiebigkeit ansieht.

Die Gleichung 25. zeigt, wie die Ergiebigkeit der Anlage von der Leistung der Pumpe abhängig ist, und ohne Kenntnis der gehobenen Wassermenge auch mittelst der Ergiebigkeiten der seichten Wasserschichten und deren Füllungszeit während der Pause bestimmt wird. Auch müssen die Änderungen der Leistung der Pumpe wie in Tabelle 1. durch Rechnung schon bekannt sein.

§. 9. Zweckmäßigste Größe der Pumpe im allgemeinen.

Gleichung 26. zeigt, wie stark die Leistungsfähigkeit der Pumpe die Ergiebigkeit der Anlage beeinflusst. Um diesen Einfluss ziffernmäßig beurtheilen zu können, setzen wir voraus, dass der als Beispiel in Tabelle 1. dienende Brunnen einmal mit einer Pumpe, die in der Minute 260 *l* Wasser, nachher mit einer Pumpe, die in der Minute 456 *l* hebt, ausgepumpt werde; so wird, wie durch Vergleich aus den Tabellen 2. und 3. ersichtlich ist, zum Beispiel durch wiederholtes Ausschöpfen der $1._{88}$ *m* hohen Wassersäule stündlich durchschnittlich mit der schwächeren Pumpe $6._{197}$ m^3, hingegen mit der nahezu doppelt so starken Pumpe nur $4._{882}$ m^3 Wasser von demselben Brunnen und von derselben hohen Wassersäule erhältlich sein, wohingegen am abgesenkten Wasserspiegel an der Saugrohrmündung, wie wir es früher nach Gleichung 22. berechnet haben, $251._{35}$ *l min*, das heißt stündlich $15._{081}$ m^3 zufließt.

Die letztere Ergiebigkeit kann aber ohne Verlängerung des Saugrohres nicht ausgenützt werden, denn mit einer schwächeren Pumpe kann der tiefste Wasserspiegel bei der Saugrohrmündung nie erreicht werden. Eine stärkere Pumpe hingegen entleert den Brunnen, wonach eine Pause eintreten muss, wodurch eben die stärkere Pumpe die Ergiebigkeit der Anlage schwächt. Deshalb, und weil auch eine stärkere Pumpe eine größere Capitalsanlage erfordert, ist es (namentlich dort, wo die nöthige Zeit, entsprechendes Personal und genügend große Wasserbehälter zur Verfügung stehen, um die erforderliche Wassermenge verhältnismäßig langsam herbeizuschaffen) unnöthig und unwirtschaftlich, eine stärkere Pumpe anzuwenden als eine, deren Leistungsfähigkeit die Ergiebigkeit des tiefsten Wasserspiegels nicht übertrifft. Die Anwendung einer Pumpe mit größerer Leistungsfähigkeit, damit der Brunnen möglichst schnell ausgepumpt werde, ist nur in den besonderen Fällen gerechtfertigt, wenn die zur Bedienung der Pumpe verfügbare Zeit oder die Größe des Wasserbehälters beschränkt und nebenbei allenfalls die erforderliche Wassermenge geringer ist, als diejenige, welche durch das allerlangsamste Erschöpfen der höchsten Wassersäule erhalten werden kann. — Demnach sind folgende vier Anordnungen zu unterscheiden:

§. 10. — 1. Anordnung.

Pumpen während continuirlichem Absenken des Wasserspiegels bis zu einem bestimmten Wasserstande, wonach dann noch das Pumpen beliebig lang fortgesetzt werden kann. In diesem Falle muss die Leistung der Pumpe kleiner sein als die Ergiebigkeit des niedrigsten Wasserspiegels an der Saugrohrmündung. Ist die erforderliche Wassermenge $\overline{Q_e}$ während der Zeit $\overline{t_1}$, so folgt nach Gleichung 8., dass die Pumpenleistung sein muss:

$$27. \qquad P = \frac{Q_e}{t_1} < W_0.$$

Diese Anordnung ist auch überall als vortheilhaft anzuwenden, wo genügende Arbeitszeit des Personals zur Verfügung steht und größere Wassermassen zu heben sind, als die höchste Wassersäule ergibt. Die Ungleichung 27. deutet eben darauf hin, dass Q_e und t_1 so gegeben seien, dass die Brunnenanlage hinsichtlich ihrer Ergiebigkeit, deren Maßstab W^0, nämlich die Ergiebigkeit des tiefsten Wasserstandes ist, auch den Erfordernissen entspreche. Der Fall erwünscht also eine Pumpe, die nicht imstande sei, den Brunnen auszupumpen. Natürlich soll der Brunnen so wasserreich sein, dass die erforderliche Wassermenge bei einem über der

Saugrohrmündung liegenden, constant hoch bleibenden Wasserspiegel gehoben werden könne.

Es ist wohl möglich, auch mit einer Pumpe von normal größerer Leistungsfähigkeit so zu pumpen, dass man sie nicht ausnützt, sondern sie nur so langsam laufen lässt, als es die Leistung erfordert. Diese Anordnung ist aber nicht wirtschaftlich, denn die inneren Widerstände einer größeren Pumpe verschlingen einen Theil der Arbeitsleistung, welcher bei Anwendung einer der erforderlichen Leistung angepassten Pumpe erspart werden kann. — Andererseits wird die allgemeine Ergiebigkeit des Brunnens am möglichst besten ausgenützt, wenn die Leistung der Pumpe $= W_1$, nämlich gleich der Ergiebigkeit des bis zur Mittleren abgesenkten Wasserspiegels in der tiefsten pumpbaren Wasserschichte ist.

Zur Erläuterung möge folgendes Beispiel dienen:

Beispiel zur ersten Anordnung. Ein Brunnen soll mit einer Pumpe versehen werden, welche 80 m^3 Wasser während sechsstündigem, ununterbrochenem Pumpen liefern soll. Die Ergiebigkeit des niedrigsten Wasserspiegels im Brunnen ist $W_0 = 0 \cdot_{2523}\ m^3 : min.$ Frage: Wird dies überhaupt möglich sein und wie stark soll die Pumpe sein?

Zunächst ist die Bedingung in Formel 27. zu beachten, nach welcher, weil in diesem Beispiel $Q_e = 80$ und $t_1 = 6 \times 60$ ist, folglich wird: $P = \frac{80}{60 \times 6} = 0._{2222} < 0._{2513}$, also zur Anwendung sich empfehlen.

Mithin müsste eine Pumpe angeschafft werden, die 222 l Wasser in der Minute zu heben imstande ist.

Die Frage könnte aber auch umgekehrt auftauchen, nämlich: Wenn die Ergiebigkeit des 14 cm über die Saugrohrmündung liegenden Wasserspiegels $0._{2199}\ m^3\ min.$ ist und die Pumpe auch so stark angeschafft werden soll, wie viel Zeit wird man brauchen, um den täglichen Bedarf von 80 m Wasser ununterbrochen zu heben? Nun, nachdem man sich überzeugt hat, dass dann $P < W_0$ wird, ist die Antwort nach Gleichung 27. ganz einfach, dass die erforderliche, ununterbrochene Pumpdauer: $t_1 = \frac{Q_e}{P} = \frac{80}{0._{2199}} = 364$ Minuten $= 6._{07}$ Stunden sei.

§. 11. — 2. Anordnung.

Ausheben der größtmöglichsten Wassermenge bei fortwährendem Sinken des Wasserstandes mittelst einer Pumpe, deren Leistung genau so groß ist, wie die Ergiebigkeit des tiefst abgesenkten Wasserspiegels bei der Saugrohrmündung.

In diesem Fall wird der Brunnen bis zur Saugrohrmündung, jedoch so langsam als nur möglich ausgepumpt, und ist Bedingung, dass P $= W_0$, und die erforderliche Wassermenge Q_e von derjenigen Wassersäule gewonnen wird, die während der Ruhepause t_2 entstehen konnte. Die zum Pumpen der Wassermenge Q_e erforderliche Zeit ist dann aus Gleichung $8a$:

$$28. \qquad t_1 = \frac{Q_e}{W_0} < max\, t_1 = \frac{max\, Q}{W_0}.$$

In der Tabelle 4. sind die mit einer solchen Pumpenleistung erhältlichen größten Wassermengen und die größtmöglichen entsprechenden Pumpdauern und Ergiebigkeiten der Anlage für den Brunnen, welcher allen unseren Beispielen zur Grundlage dient, zusammengestellt.

Nach Ungleichung 28. muss die erforderliche Wassermenge geringer gegeben sein als die größtmögliche Wassermenge, welche aus der Wassersäule, welche während der Pause t_2 entstanden ist, mit einer solchen Pumpe gehoben werden kann. Das Pumpen nach dieser Weise ist also beschränkt auf eine maximale Wassermenge, die nur verhältnismäßig langsam und ununterbrochen gehoben werden kann. — Diese Pumpweise kann daher nur dort Anwendung finden, wo mehr Wasser ohne Unterbrechungen gehoben werden soll und das Pumpen nicht eilig ist, also bei kleineren Pumpenanlagen mit genügend großen Wasserbehältern, wie Handpumpenanlagen, wo die im Taglohn arbeitende Bedienungsmannschaft möglichst ausgenützt werden soll, ohne kurze Pausen halten zu müssen. Die Leute können somit lange ununterbrochen die möglichst größte Wassermenge, die den Bedarf für längere Zeit deckt, pumpen, bis der Brunnen gänzlich entleert ist, und können dann anderwärts beschäftigt oder entlassen werden.

§. 12. — 3. Anordnung.

Heben der erforderlichen Wassermenge bei fortwährend sinkendem Wasserstande mit einer Pumpe, deren Leistung die Ergiebigkeit des niedrigst abgesenkten Wasserspiegels übertrifft.

Diese Anordnung ist nur dann gerechtfertigt, wenn während möglichst kurzer Zeit ohne Unterbrechung Wasser gehoben werden soll, welche Wassermenge geringer sein kann, als die von einer bestimmten Wassersäule erhältliche größtmögliche Menge. Ein auffallendes Beispiel hiefür bieten die Wasserstationsanlagen der Eisenbahnen von localem Interesse. Der Zug kommt in der Station an, sein Aufenthalt ist beschränkt. Der Dampfwagen des Zuges muss sich dann mittelst Ejectoren, welche Pumpenart mit dem eigenen Dampfe des Dampfwagens in Wirksamkeit gebracht werden muss, aus einem vorhandenen Brunnen den nöthigen Wasservorrath in seinen Wasserkasten heben, und muss nach wenigen Minuten weiter fahren. In solchen Fällen also kann die größtmöglichste Ergiebigkeit der Brunnenanlage nicht ausgenützt werden, weil die geringe Dauer des Zugaufenthaltes als Hauptsache gilt. Man wendet daher überaus kräftige Pumpen an, fordert umsomehr geringe Pumpdauer auf Kosten der erhaltbaren Wassermenge, weil ja nur geringe, 2—4 m^3 Wasser, eiligst erforderlich sind.

Ein anderes Beispiel bieten für diese Anordnung Wasserstationen mit kleinen Wasserbehältern, welche weniger Wasser fassen, als die größtmöglichste Wassermenge beträgt, welche vom Brunnen ununterbrochen gehoben werden könnte. In allen solchen Fällen gilt als Bedingung, dass die erforderliche Wassermenge Q_e, welche aus der während der vorher zur Verfügung gestandenen Ruhepause t_2 emporgestiegenen Wassersäule ununterbrochen geschöpft werden soll, kleiner sein kann, als die größtmöglich erhaltbare Menge $max\ Q$, infolge dessen man an Zeit gewinnen kann, wenn man eine möglichst starke Pumpe anwendet.

Wenn wir aber bedenken, dass dieselbe erforderliche Wassermenge Q_e auch größtmöglich aus einer niederern Wassersäule mittelst der langsam arbeitenden Pumpe, deren Leistung $= W_0$ ist, unter einer längeren Pumpdauer $max\ t_1$, erhalten werden könnte, welche Wassersäule nur eine kleinere Pause t''_2 braucht, um sich zu bilden, so können wir hiemit die Größe der erforderlichen Wassermenge als Function sowohl einer bekannten, als auch einer unbekannten Pumpenleistung ausdrücken. — Und zwar folgt aus der Doppelgleichung $8a$, dass, wenn voraussichtlich $P > 2\ W_0$

29. $$t_1 \cong \frac{Q_e - Q_2}{med\ W} \cong \frac{Q_2}{P - med\ W} \text{ und}$$

30. $$P \cong \frac{Q_e}{Q_e - Q_2} \cdot med\ W.$$

Wie aus den beiden letzteren Gleichungen ersichtlich ist, muss nur die erforderliche Wassermenge Q_e und die zur Verfügung gestandene Ruhepause t_2 nebst den Beobachtungsdaten, mittelst welcher das Gesetz des Steigens des Brunnenwasserstandes bekannt ist, gegeben sein, um daraus die Auspumpdauer und die erforderliche Pumpenleistung zu bestimmen.

Es scheint, dass, wenn einmal die erforderliche Wassermenge Q_e und die Pumpdauer t_1 gegeben sind, man die Pumpenleistung P sofort nach Gleichung $8a$. berechnen könnte. Dem ist aber nicht ganz so; denn man muss früher prüfen, ob die erforderliche Wassermenge aus dem Brunnen, auf welche sich die Rechnungsaufgabe bezieht, durch Auspumpen der Wassersäule während der gewünschten Zeit auch wirklich möglich ist. Nun bildet sich eine Wassersäule in bestimmter, zur Verfügung stehender Ruhepause t_2, also muss auch deren Dauer bekannt sein und in Rechnung gezogen werden, was so möglich wird, wenn man behufs Kenntnis der Eigenschaft des Brunnens auf Grund eines Versuches die Daten ähnlich, wie sie in Tabelle 4. zusammengestellt sind, aufnimmt.

Wir fordern also, dass die während t_2 entstandene Wassersäule die erforderliche Wassermenge Q_e unter Leistung P biete. Deswegen kann Q_e wenigstens so groß gegeben sein, wie der Inhalt Q_2 der sich während der Pause gebildeten Wassersäule.

Die erforderliche Wassermenge soll aber auch kleiner sein, als diejenige, welche nach der vorhergewesenen Ruhepause $\underline{z}$ größtmöglich mit einer Pumpenleistung W_0 gehoben werden könnte. Die somit verringerte Ergiebigkeit der Anlage genügt dann dennoch, wenn aus der nach der zur Verfügung gestandenen Pause t_2 sich gebildeten Wassersäule nur die erforderliche Wassermenge Q_e während der möglichst kurzen Pumpdauer t_1 herausgeschöpft werden kann. Ferner muss die disponible Ruhepause $\underline{z}$ so groß sein, dass eine genügend hohe Wassersäule sich bilden könne, welche die erforderliche Wassermenge bieten kann. Andererseits muss eine kürzere Pumpdauer t_1 als Resultat der Rechnung sich ergeben, als die größtmögliche, mit der Leistung W_0 erhältliche Pumpdauer. Ferner muss eine größere erforderliche Pumpenleistung resultiren, als 2 W_0, weil sonst die Näherungsform kein genügend genaues Resultat ergibt. Demnach müssen folgende Bedingungen beachtet werden, und zwar:

$$31a. \qquad \left\{ \begin{array}{l} Q_e < max\ Q \\ Q_e > Q_2 \\ z \geqq t_2 \leqq T_2 \end{array} \right\} \text{ in der Aufgabe,}$$

wo T_2 die zur Bildung der allerhöchsten Wassersäule erforderliche Ruhepause bedeutet. Ferner:

$$31b. \qquad \left\{ \begin{array}{l} t_1 < max\ t_1 \\ P > W_0 \end{array} \right\} \text{ im Resultat.}$$

Im Fall auch nur eine dieser Bedingungen nicht besteht, ist der Brunnenbetrieb nach der 3. Anordnung, wonach man geringe Wassermengen am schnellsten gewinnen kann, nicht ausführbar. Weil aber die Wassersäule sich während einer voranbestandenen Pause bildet, die nicht zur Dienstzeit des Pumpenwärters gehört, ist die *3. Anordnung, vereint mit der ersten, die beste Art, wie man Brunnenanlagen rationell betreiben soll, damit man deren Ergiebigkeit gänzlich ausnütze.* Denn wie wir bei der 1. Anordnung gesehen haben, ist es am besten, wenn die anzuwendende Pumpe bei normalem Lauf die Leistung $P = W_1$ aufweist. Eine solche Pumpe ist der Brunnenanlage rationell angepasst. Der Brunnen wird damit unerschöpflich und die Ergiebigkeit einer solchen Pumpenanlage ist ein Maximum. Ist dann die erforderliche Wassermenge gehoben und folgt dann eine lange Ruhepause nach, während welcher sich eine hohe Wassersäule bilden kann, so verfahre man nach der 3. Anordnung, indem man dieselbe Pumpe schneller, d. h. mit größerer Leistung, laufen lässt.

Der umgekehrte Vorgang, nämlich eine starke Pumpe, die bei normalem Lauf $P > W_0$ leistet, anzuschaffen (wie dies in der Praxis sehr häufig zu finden ist) und sie, nachdem man den Wasserspiegel 10—15 *cm* über die Saugrohrmündung bei normalem Lauf abgesenkt hat, dann langsam laufen zu lassen, ist aus schon erwähntem Grunde nicht wirtschaftlich.

Die Ersparnis an Arbeitszeit, welche man durch Anwendung der letzterwähnten combinirten Anordnung gewinnt, können wir folgenderweise ausweisen:

Wenn wir den zu ersetzenden Wasserverbrauch in m^3— n mit V bezeichnen, und wenn wir mit der Leistung P in t_1 Minuten die hohe Wassersäule bis nahe zur Saugrohrmündung größtentheils ausgepumpt haben, ferner dann die Pumpe mit normaler Geschwindigkeit so laufen lassen, dass sie mit der Leistung W_1 in $Z - t_1$ Minuten bei constant niederem Wasserstand die restliche noch erforderliche Wassermenge $V - Q$ emporhebt, so ist dann mit Hilfe der Gleichung 8*a*. und 29.

32. $$V = P\,t_1 + W_1\,(Z - t_1) = Q + W_1\,Z - \frac{W_1}{P}\,Q =$$
$$= \frac{P - W_1}{P}\,Q + W_1\,Z \cong \frac{P - W_1}{P - med\,W}\,Q_2 + W_1\,Z.$$

Hingegen wenn bloß durch Leistung W_1 der ganze Wasserbedarf V während einer längeren Dauer Z' ersetzt wird, so ist dann:

33. $$V = W_1\,Z'.$$

Durch Verbindung der Gleichungen 32. und 33. folgt, dass die Zeitersparnis durch Anwendung der combinirten Anordnung ist:

34. $$Z' - Z \cong \frac{P - W_1}{P - med\,W} \cdot \frac{Q_2}{W_1}.$$

Also ist die Zeitersparnis desto größer, je höher die in der vorhergehenden Ruhepause entstandene Wassersäule im Brunnen war, und je schneller man anfangs die Pumpe laufen lässt, um den hohen Wasserspiegel abzusenken, und dann mit normaler Geschwindigkeit weiter zu pumpen.

1. Beispiel zur 3. Anordnung. Es ist ein Wasserbehälter von nur $6._5$ m^3 Rauminhalt vorhanden. Der Wasserverbrauch ist während $1^1/_2$ Stunden 6 m^3, welcher dann sofort ersetzt werden muss. Wie stark soll die Pumpe arbeiten, damit diese erforderliche Wassermenge ohne Unterbrechung von unserem Brunnen möglichst schnell geschöpft werden könne? Und wie lange muss man pumpen?

Hier sind gegeben $Q_e = 6$ und $t_1 + t_2 = 90$. Gesucht sind t_1 und P. — Man muss nun zunächst die Bedingungen nach Ungleichung 31*a*. beachten. Es soll demnach $Q_e = 6 < max\ Q$ sein. Man findet, dass Tabelle 4. dieser Bedingung genügt, wenn $t_2 = 4$ ist. Ferner soll $Q_e = 6 > Q_2$ sein. Dem leistet genüge, wenn $t_2 = 80$; dann wird

$$t_1 = 90 - 80 = 10 \text{ und } P = \frac{Q_e}{t_1} = \frac{6}{10}.$$

2. Beispiel zur 3. Anordnung. Ein Wasserbehälter von 10 m^3 Inhalt soll nach je 3 Stunden von unserem Brunnen etwas schneller gefüllt werden. Wie stark soll die Pumpenleistung sein, damit man ohne Unterbrechung schnell pumpen könne? Und wie lange muss man pumpen?

Es ist hier gegeben $Q_e = 10$, $z = 3 \times 60 > T_2 = 154$. Nun ist es Bedingung, dass, wenn $z > T_2$ ist, $t_2 = T_2$ genommen werden muss. Nach Tabelle 4. ist $T_2 = 154$. Dem entspricht $Q_2 = 6._{28} < Q_e$ und *medium* $W = 0._{1007}$. Demnach erhalten wir aus Gleichung 29.

$$t_1 \cong \frac{10 - 6._{28}}{0._{1007}} \cong 37 \text{ Minuten}$$

und aus Gleichung 30.

$$P \cong \frac{10 \times 0._1}{10 - 6._{28}} \cong 0._{262}.$$

Prüfen wir das Resultat mit der Bedingungsungleichung 31*b*., so finden wir, dass P sich nicht genügend von W_0 unterscheidet. Die Näherungsgleichung 30. gibt in solchen Fällen einen bedeutend kleineren Wert; es darf daher das Resultat der Rechnung nur als sehr roh annähernd anerkannt werden.

B e i s p i e l z u r c o m b i n i e r t e n 1. u n d 3. A n o r d n u n g. — Unsere Brunnenanlage ist mit einer Pumpe versehen, welche bei normalem Gange eben $0._{22} \frac{m^3}{min}$, das heißt, so viel leistet, als eben der Ergiebigkeit der niedrigen Wasserschichte, deren Höhe 28 *cm* ist, entspricht. Es soll nun mittelst dieser Pumpe, welche auch doppelt so viele Kolbenhübe machen kann, täglich 40 m^3 Wasser gepumpt werden. Frage: Wie lange muss die tägliche Bedienung der Wasserstation währen?

Hier sind gegeben: $V = 40$, $P = 2\ W_1$, $W_1 = 0._{22}$; demnach ist die erforderliche Dienstdauer bei normaler Leistung der Pumpe $Z' = \frac{V}{W_1} = \frac{40}{0._{22}} = 181$ Minuten. Nachdem sich aber während der langen Pause vor Beginn des Dienstantrittes die höchste Wassersäule von 2 *m* Höhe bilden konnte, so können wir aus letzterer mit doppelter Leistung $P = 0._{44} \frac{m^3}{min}$ während der Zeit t_1 annähernd die Wassermenge nach Gleichung 29.

$$Q \cong \frac{Q_2}{1 - \frac{med\ W}{P}} = P\, t_1$$

schöpfen.

Da nun P gegeben ist, und während langer Pause die höchste Wassersäule, deren Inhalt nach Tabelle 4. $Q_2 = 6._{28}$, und demselben entsprechend med W $= 0._{10}$ ist, so erhalten wir annähernd die bei Leistung P hebbare Wassermenge:

$$Q \cong \frac{6._{28}}{1 - \frac{0._{10}}{0._{44}}} = 8._{13}\ m^3$$

und folglich ist die dazu nöthige Zeit:

$$t_1 = \frac{8._{13}}{0._{44}} = 18._5 \text{ Minuten.}$$

Ferner ist der Gewinn an Bedienungszeit, wenn nach der combinirten Anordnung, also nicht immer mit normaler Geschwindigkeit, gepumpt wird, in diesem speciellen Fall nach der Näherungsgleichung 34.

$$Z' - Z \cong \frac{2 - 1}{0._{44} - 0._{10}} \cdot 6._{28} = 18._5 \text{ Minuten.}$$

Nach der ersten Anordnung wäre, wie oben berechnet, $Z' = 181$ Minuten, und nach der combinirten Anordnung zum Pumpen von 40 m^3 Wasser nur $Z = 181 - 18._5 = 162._5$ Minuten erforderlich.

§. 13. — 4. Anordnung.

Ausheben der erforderlichen Wassermenge durch öfteres Auspumpen des Brunnens. Dieser Fall kann nur bei überstarker Pumpenleistung eintreten, wenn die

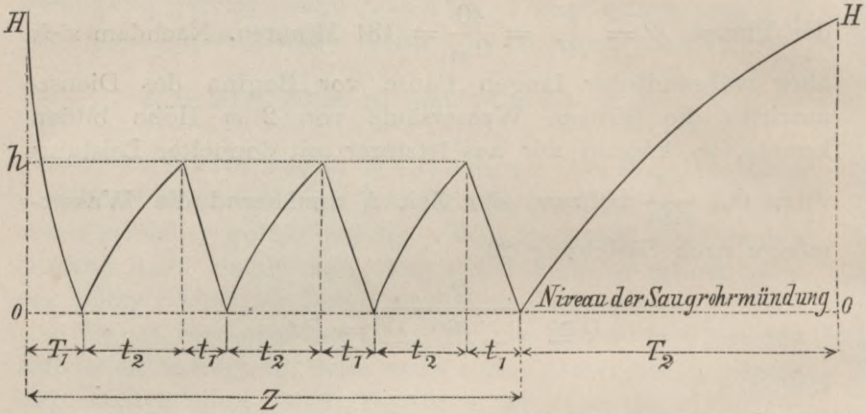

Abbildung 8.
Wasserstandsänderungen beim Pumpen mit Unterbrechungen während einer beschränkten Dienstzeit.

erforderliche Wassermenge größer ist, als die aus der sich gebildeten Wassersäule ausschöpfbare Menge. Bezeichnen wir den gesammten Wasserverbrauch des Tages mit V (m^3); ferner dessen Theile, welche nach verschieden t_2 lange dauernden Unterbrechungen theilweise gehoben werden müssen, mit Q, so erscheint diese Anordnung als Vervielfältigung der vorhergehenden Anordnungen, indem dann im allgemeinen sein wird:

35. $$V = \Sigma\,(Q) = P\,\Sigma\,(t_1).$$

Im speciellen Fall, wenn vor Beginn des ersten Auspumpens eine lange Pause war, während der sich eine hohe Wassersäule bilden konnte, zu deren Entleerung eine Zeitdauer T_1 Minuten erforderlich ist, kann eine verhältnismäßig größere Wassermenge Q' gehoben werden, als nach den folgenden Pausen. Wenn man nun behufs Deckung des Wasserverbrauches V durch öftere gleiche und kürzere Pausen t_2 unterbrochen, n-mal wiederholt pumpen muss, wie dies in Abbildung 8. mittelst Schaulinien dargestellt ist, so folgt aus Gleichung 35., dass in diesem speciellen Fall

$$36. \qquad V = Q' + n\,Q = P\,(T_1 + n\,t_1).$$

Q bedeutet hier die Wassermenge, welche während der Zeit t_1 aus derjenigen Wassersäule gehoben werden soll, welche während der Pause t_2 sich bilden konnte, und deren Höhe h aus der tabellarischen Zusammenstellung der Versuchsresultate, welche für jeden Brunnen gemacht werden soll, ersichtlich ist.

Für die Praxis ist der Fall von Wichtigkeit, wenn die Dienstdauer des Pumpenwärters beschränkt ist, und als gegeben angenommen wird, unter welcher Zeit der tägliche Wasserverbrauch V gehoben werden soll. Wenn wir die Dienstdauer des Pumpenwärters mit Z (in Minuten) bezeichnen, so besteht dieselbe, wie dies aus Abbildung 8. zu übersehen ist, aus der Gesammtdauer aller Perioden des Pumpens; — jedoch mit Ausnahme der nach dem letzten Ausschöpfen des Brunnens folgenden Pause, während deren Dauer eine hohe Wassersäule sich bilden kann, die nur während des nächsten Tages ausgenützt werden soll. Daher besteht in diesem speciellen Fall die Gleichung:

$$37. \qquad Z = T_1 + n\,(t_1 + t_2)$$

Demnach erfolgt aus Gleichungen 36. und 37.

$$38. \qquad P = \frac{V}{Z - n\,t_2}.$$

Diese Formel gibt die kleinste erforderliche Pumpenleistung für einen bestimmten täglichen Wasserverbrauch und für eine bestimmte Dienstdauer.

Aber es muss, wie dies aus der Formel ersichtlich ist, die Anzahl der Unterbrechungen n und die nachfolgende Dauer der Pausen t_2 auch angegeben sein. Diese können aber nicht ganz willkürlich angenommen werden, denn sie sind von den eigenthümlichen Ergiebigkeiten des Brunnens abhängig. Vor allem muss es sofort auffallen, dass:

$$38a. \qquad n < \frac{Z}{t_2}$$

gegeben sein muss, da sonst die Formel eine unmögliche negative Pumpenleistung ergeben würde. Diese Bedingung sagt eben, dass aus einer Wassersäule natürlich nicht mehr gehoben werden kann, als ihrem Inhalt entspricht, wenn das Auspumpen rapid schnell geschehen soll, d. h., wenn im äußersten Falle $T_1 = n\,t_1 = 0$. wäre. Denn dann ist nach Gleichung 37. $n\,t_2 = Z$ und $P = \infty$, und dem entsprechend $Q = Q_2$.

Die zweite Bedingung folgt aus der folgenden Auseinandersetzung: Sollte man wünschen, dass während des Pumpens immer die größtmöglichste Wassermenge aus der disponiblen Wassersäule ausgehoben werden soll, damit die Anzahl der Unterbrechungen möglichst gering = *minimum n* werden sollen, so müsste die Leistung der Pumpe $P = W_0$ sein. Hiemit aber folgt aus der Formel 38., dass:

$$min.\, n = \left(Z - \frac{V}{W_0}\right)\frac{1}{t_2},$$

daraus folgt die Bedingung, dass:

$$38b. \qquad n \geqq \left(Z - \frac{V}{W_0}\right)\frac{1}{t_2}$$

sein muss.

Endlich ist noch eine dritte Bedingung zu beachten, welche daraus folgt, dass die Ruhepausen nicht größer sein sollen, als die Pause T_2, während welcher sich die höchste Wassersäule bilden kann; also soll:

$$38c. \qquad t_2 \leqq T_2 \leqq 24 \times 60 - Z.$$

Die Gleichung 38. ist immer in Verbindung mit ihren drei Bedingungsungleichungen 38*a*, *b*. und *c*. zu benützen; und zwar so, dass man trachten muss, dass unter den gegebenen Grenzen t_2 möglichst groß, und n möglichst klein ausfalle; mit andern Worten: trachten, dass t_2 sich dem Werte T_2, und n dem Werte Null nähere. Man setze daher probeweise in der Bedingungsungleichung 38*b*.

$t_2 = T_2$ und sehe, welchen minimalen Wert dieselbe für n ergibt. Passt dieser erhaltene Wert in die erste Bedingungsungleichung 38*a*., indem man auch dort $t_2 = T_2$ setzt, so behält man ihn, und wendet ihn in Gleichung 38. an. Im entgegengesetzten Fall probirt man mit einem etwas niedrigeren Wert als T_2 das n aus den beiden Bedingungsgleichungen 38*a*. und *b* zu bestimmen, und fährt so fort, bis man auf die den Bedingungen entsprechenden Werte von t_2 und n kommt, mittelst welchen man dann die den herrschenden Umständen am besten entsprechende Stärke der Pumpe nach der ziemlich einfachen Formel 38. berechnen kann.

Indessen ist das Heben der erforderlichen Wassermenge mit Unterbrechungen durch Anwendung einer überstarken Pumpe überhaupt irrationell, weil ein solches Verfahren eine längere Dienstdauer erfordert, als das Verfahren nach den früher erörterten Anordnungen. Trotzdem ist jedoch diese Anordnung in der Praxis zumeist deshalb weiter verbreitet, weil man von dem Vorurtheil ausgeht, dass, weil eine größere Pumpe mehr Wasser emporschaffen kann, eine solche auch überall mit Vortheil anwendbar sei.

Der Irrthum steckt nur darin, dass man meint, es wäre die Ergiebigkeit der Brunnenanlage von der Pumpenleistung und vom Verfahren mit derselben ganz unabhängig, was, wie bewiesen, bei Brunnen, in welche das Wasser von unten quillt, nicht der Fall ist.

Wir können nun den Zeitverlust, welcher durch Anwendung dieser irrationellen Anordnung entstanden, mit der combinirten 3. Anordnung durch Zahlen ausgedrückt, folgenderweise bestimmen:

Es sei wieder der zu ersetzende Wasserverbrauch V die Dienstdauer des Pumpenwärters nach der 3. combinirten Anordnung Z' und nach der 4. Anordnung Z. Nachdem nun in beiden Fällen nach der langen Ruhepause T_2 mittelst überstarker Leistung P unter T_1 Zeit die Wassermenge Q' schon gehoben wurde, so bleibt es nur noch übrig, dass wir nach der 1. Anordnung mittelst Leistung W_1 die Wassermenge $V - Q'$ während der Zeit $Z' - T_1$ oder nach der 4. Anordnung dieselbe Wassermenge mittelst Leistung P nach n-fachen Unterbrechungen, deren Dauer einzeln t_2 Minuten ist, heben. Demnach folgt aus Gleichung 38. und 8*a*.:

39. ..... $$Z = \frac{V}{P} + n\,t_2$$

$$Z' = \frac{V - Q'}{W_1} + T_1 \text{ und da } Q' = P\,T_1.$$

40. ..... $$Z' = \frac{V}{W_1} - Q'\left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{P}\right).$$

Ziehen wir nun von der Dienstdauer nach der 4. Anordnung die Dienstdauer nach combinirter Anordnung ab, so erhalten wir den Zeitverlust, welcher durch die Pumpanordnung mit Unterbrechungen gegenüber der combinirten Anordnung entsteht, in Zahlen ausgedrückt. Und zwar beträgt der Verlust an Bedienungszeit:

41*a*. $$Z - Z' = n\,t_2 - (V - Q')\left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{P}\right)$$

oder auch, weil nach den Zwischenpausen n-mal die mittelst Leistung P die Wassermenge Q gepumpt wird, so muss natürlich auch:

41*b*. $V - Q' = n\,Q$ sein. Bezeichnen wir den Inhalt der mit Leistung P aus der nach T_2 Pause entstandenen Wassersäule zum Unterschied der von der niederen Wassersäule hebbaren Menge mit Q'_2 und die derselben entsprechende mittlere Ergiebigkeit mit $med\ W'$, so ist nach Gleichung 11*c*.:

41*c*. $$Q' \cong Q'_2\left(1 + \frac{med\ W'}{P}\right) \text{ und}$$

41*d*. $$Q \cong Q_2\left(1 + \frac{med\ W}{P}\right)$$

Durch Verbindung der drei Gleichungen 41*b*., *c*., *d*. mit 41*a*. folgt zunächst, dass

41*e*. $$n = \frac{V P - Q'_2\,(P + med\ W')}{Q_2\,(P + med\ W)}.$$ Ferner:

41*f*. $$Z - Z' = n\left\{t_2 - Q_2\left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{P}\right)\left(1 + \frac{med\ W}{P}\right)\right\}.$$

Hiezu ist zu bemerken, dass der Inhalt der Wassersäule Q_2 und deren mittlere Ergiebigkeit $med\ W$ nicht beliebig unabhängig von einander gewählt werden können; denn beide Größen sind gemeinsam von der Eigenthümlichkeit des zu beurtheilenden Brunnens und von der Pause t_2 abhängig und sind speciell für unser Beispiel aus Tabelle 4. zu entnehmen. Ebenso sind in Formel 41*e*. die Werte von Q' und $med\ W'$ von der Pause T_2 abhängig, also nicht willkürlich annehmbar.

Aus Gleichung 41*f*. ist ersichtlich, dass der Zeitverlust, welcher infolge Anwendung der 4. Anordnung statt der combinirten 1. und 3. Anordnung entsteht, destomehr empfunden werden kann, je größere Ruhepausen zugelassen werden.

Beispiel. Wie groß ist der Zeitverlust, welcher beim Pumpen von 40 m^3 Wasser täglich entsteht, wenn bei unserem Brunnen mittelst einer Pumpenleistung 0·44 $\frac{m^3}{min}$ mit Unterbrechungen gepumpt wird, statt, dass nach dem Auspumpen des Brunnens die Geschwindigkeit der Pumpe gemäßigt wird, damit bei 14 *cm* hohem Wasserstand der abgesenkte Wasserspiegel stehen bleibe, wenn im ersteren Fall nur 33 Minuten dauernde Pausen zugelassen werden?

Die Ergiebigkeit des 14 *cm* hohen Wasserspiegels ist nach Tabelle 4. rund $W_1 = 0{\cdot}22\ \frac{m^3}{min}$. Anfangs war die Ruhepause größer als $T_2 = 145$ Min., so dass die höchste Wassersäule vom Inhalte $Q'_2 = 6{\cdot}28$ entstehen konnte. Die mittlere Ergiebigkeit dieser Säule ist $med\ W' = 0{\cdot}10$. Andererseits entsteht während der Zwischenpausen $t_2 = 33$ laut Tabelle 4. wiederholt je eine $h = 1{\cdot}28\ m$ hohe Wassersäule, der entspricht $Q_2 = 4{\cdot}02$ und $med\ W = 0{\cdot}126$. Schließlich überzeugen wir uns, dass, weil $\frac{W_1}{P} = \frac{0{\cdot}22}{0{\cdot}44} = \frac{1}{2}$ ist, Näherungsformeln anwendbar sind. Außerdem ist gegeben $V = 40\ m^3$. Hiemit folgt aus Gleichung 41*e*., dass die nöthige Anzahl der Unterbrechungen sein muss:

$$n \cong \frac{40 \times 0{\cdot}44 - 6{\cdot}28\,(0{\cdot}44 + 0{\cdot}10)}{4{\cdot}02\,(0{\cdot}44 + 0{\cdot}126)} \cong 6{\cdot}27.$$

Ferner hiemit der Zeitverlust nach Gleichung 41*f.*:

$$Z - Z' \cong 6{\cdot}27\left\{33 - 4{\cdot}02\left(\frac{1}{0{\cdot}22} - \frac{1}{0{\cdot}44}\right)\left(1 + \frac{0{\cdot}126}{0{\cdot}44}\right)\right\} \cong 133\,\text{Min.}$$

Und zwar brauchte man laut Gleichung 39. nach der 4. Anordnung Zeit $Z = \frac{40}{0{\cdot}44} + 6{\cdot}27 \times 33 = 298$ Min., hingegen nach der combinirten Anordnung nur die Zeit $Z' = 165$ Min.

§. 14. Wirkung der Erweiterung des Brunnenschachtes.

Stellen wir uns vor, dass neben einem Brunnen ein oder mehrere senkrechte Schachte — sogenannte Sammelbrunnen — gebaut werden, die mit dem Hauptbrunnen, wie in Abbildung 9., durch Canäle verbunden sind. Somit wird das in den Hauptbrunnen quellende Wasser sich auf einer n-fach größeren Niveaufläche verbreiten können. Dasselbe geschieht, wenn man den Brunnenschacht gleich nach Beendigung der Bohrungsarbeiten n-fach weiter macht. Hiemit taucht die Frage auf, wie die Eigenthümlichkeiten einer bestimmten Brunnenanlage, deren Weite ursprünglich $F\ m^2$ beträgt, sich ändern, wenn letztere unter Voraussetzung, dass die Zuströmungsöffnungen der Quelle dadurch nicht vermehrt werden, n-fach erweitert würde.

Nun kann man zunächst aus Gleichung 1. und 2. sofort folgern, dass, weil die zufließende Menge sich auf eine n-fache Fläche vertheilt, der Wasserstand n-mal langsamer steigen, hingegen die Füllung einer bestimmt hohen Wasserschichte n-fach länger dauern wird. Demnach wird also: $w' = \frac{\Delta h}{n\,\Delta t} = \frac{w}{n}$ und:

42. ..... $$W' = n\,F.\,\frac{w}{n} = F\,w = W.$$

Folglich können wir den Satz aussprechen: Die Ergiebigkeit eines jeden abgesenkten Brunnenwasserspiegels ist unabhängig von der Brunnenweite.

Hingegen ist ohneweiters einzusehen, dass die Füllungsdauer t'_2 und der Brunneninhalt Q'_2 für eine bestimmt hohe Wassersäule desto größer ausfällt, je größer die Brunnenweite ist. Denn, weil $\triangle t'_2 = n \triangle t_2$ wird, so folgt, dass:

43*a*. $t'_2 = n\, t_2$,

43*b*. $Q'_2 = n\, F.\, h = n\, Q_2$. Es folgt somit nach Gleichung 11. auch:

43*c*. $Q' = n\, Q$. Ferner aus Gleichung 9.:

43*d*. $t'_1 = n\, t_1$.

Also mit Worten: Durch die Erweiterung des Brunnenschachtes werden sowohl die Füllungs- und Entleerungsdauer einer jeden Wassersäule,

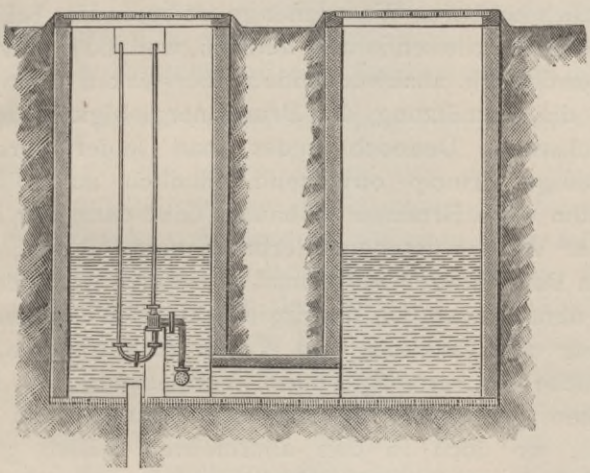

Abbildung 9.
Vermehrung der ununterbrochen hebbaren Wassermenge durch Sammelbrunnen.

als auch deren Inhalt und die aus derselben hebbare Wassermenge gleichmäßig proportional vermehrt.

Schließlich folgt mittelst Gleichung 43*a*., *c*. und *d*. aus Gleichung 24.:

$$44. \qquad E' = \frac{60\, Q'}{t'_1 + t_2} = \frac{60\, n\, Q}{n\,(t_1 + t_2)} = E.$$

Demnach mit Worten: Die Ergiebigkeit der Pumpenanlage nach einer bestimmten hohen Wassersäule ist von der Brunnenweite unabhängig.

Diese Eigenthümlichkeit ermöglicht, die Ergiebigkeiten von Brunnen mit verschiedenen Durchmessern so zu vergleichen, dass man immer nur eine bestimmt hohe Wassersäule, gewöhnlich von 1 Meter Höhe, zur Grundlage der Bestimmung der Ergiebigkeit der Pumpenanlage annimmt. — Andererseits kann durch Vergrößerung der Brunnenweite die Vermehrung der ununterbrochen hebbaren Wassermenge bewirkt werden, wenn nur eine genügend große Ruhepause zur Verfügung steht, während deren Dauer die größere Wassermenge im Brunnen sich sammeln kann.

Die Anwendung von Sammelbrunnen zur Vermehrung der plötzlich hebbaren Wassermenge ist besonders bei Wasserstationen der Localeisenbahnen nützlich, weil die nothwendigerweise gewöhnlich anzuwendenden überstarken Dampfstrahlpumpen die Ausnützung der Brunnenergiebigkeit beiweitem nicht zulassen. Dennoch findet man leider gerade das gegentheilige Princip obwaltend, nämlich aus Billigkeitsrücksichten enge Brunnen zu bauen. Gibt dann der Brunnen kaum 3 m^3 Wasser unter ununterbrochenem Pumpen, wie viel für einen Dampfwagen auf einmal zu nehmen genügen würde, so wird daran gegangen, die Ergiebigkeit des Brunnens durch Vertiefung oder Zuleitung von Wasser zu vermehren, um die erforderliche Wassermenge durch Vermehrung des Druckes von unten gleichsam im schmalen Brunnenraum emporzutreiben, wo doch in den allermeisten Fällen genügend große Ruhepausen zur Verfügung stehen, womit demnach keine große Ergiebigkeit, wohl aber langsam zufließende größere Menge naturgemäß verlangt werden muss.

Dieser Zweck kann aber durch Erweiterung oder Vervielfältigung des Brunnenschachtes in vielen Fällen mit größerer Sicherheit erreicht werden.

Nachdem bei Anwendung von überstarken Dampfstrahlpumpen und Pulsometern für Localeisenbahnen die größere und größte Ergiebigkeit des Brunnens nicht beliebig ausgenützt werden kann, so muss man darauf achten, ob die disponible Pause zwischen der Abfahrt des einen und Ankunft des anderen Zuges genügt, damit im eventuell entleerten Brunnen eine so hohe Wassersäule sich bilden könne, welche die erforderlichen 1—4 m^3 Wasser für den Dampfwagen des letzteren Zuges bieten könne. Deshalb kann man sich namentlich bei schwächeren Brunnen der Localeisenbahnen in der Beurtheilung der Güte der Anlage leicht täuschen, wenn man aus der Ergiebigkeit nach einem beliebig angenommenen Wasserstand oder nach der Zuströmung bei niedrigstem Wasserspiegel auf das Entsprechen der Anlage folgert. Denn man muss sich überzeugen, ob sich während der disponiblen Ruhepause, welche aus der Fahrordnung ersichtlich ist, auch wirklich eine genügend hohe Wassersäule bilden kann. So zum Beispiel braucht ein Dampfwagen in einer Zwischenstation höchstens 4 m^3 Wasser in etwa 13 Minuten zu heben, um mit diesem Vorrath im eigenen Wasserkasten weiter zu fahren. Der Ejector im Brunnen soll also durchschnittlich mindestens $\frac{4}{13} \cong 0{\cdot}3 \frac{m^3}{min}$ leisten. Wenn nun nach vielen früheren Zügen der Dampfwagen des letzten Zuges vor $z = 30$ Minuten den Brunnen entleert hat, und ein später angelangter Dampfwagen noch 4 m^3 Wasser vom Brunnen soll entnehmen können, so muss der Wasserstand im Brunnen inzwischen so hoch gestiegen sein, dass mittelst der Leistung $P = 0{\cdot}3$ die erforderliche Wassermenge $Q_e = 4\ m^3$ gehoben werden kann.

In Tabelle 5. sind beispielsweise Versuchsergebnisse eines schwachen Brunnens aufgenommen, und darin die bei verschiedenen Wasserständen mittelst einer Pumpenleistung von $0._3\ m^3 : min$ ununterbrochen hebbaren Wassermengen nebst anderen Daten zusammengestellt. Es ist daraus aus Rubrik Q sofort zu ersehen, dass aus diesem Brunnen ununterbrochen 4 m^3 Wasser überhaupt nicht gehoben werden könnten, weil eben die Weite seines Schachtes zu gering ist. Es stellt sich nun die Aufgabe in den Vordergrund, dessen Weite so zu ändern, dass nach der disponiblen Pause von $z = 30$ Minuten mittelst der vorhandenen Pumpe (nicht, wie laut Tabelle 5. bei geringer Weite $2._{184}\ m^3$, sondern) 4 m^3 ununterbrochen ausgepumpt werden können.

In Abbildung 10. sei nun $\overline{A\,O}$ die Schaulinie der Wasserstandsänderung im Brunnen, dessen Weite F; und $\overline{B\,O}$ die Schaulinie der Änderung des Wasserstandes im erweiterten Brunnen, dessen Weite F' bezeichnet. Ferner ist auch aus der Abbildung ersichtlich, dass, wenn während der Pause t

der Wasserstand im engen Brunnen h Meter hoch war, und aus der diesem Stande entsprechenden Wassersäule nur die Menge Q gehoben werden kann, man immer eine geringere Zeitdauer t' wird finden können, unter welcher in einem weitern Brunnenschacht eine entsprechend niederere Wassersäule sich bildet, welche eben dieselbe Menge Q mittelst derselben Pumpenleistung bieten kann. Oder auch umgekehrt findet sich immer eine Brunnenweite F', in welchem Brunnen sich während der geringeren Zeit t' eine niederere Wassersäule

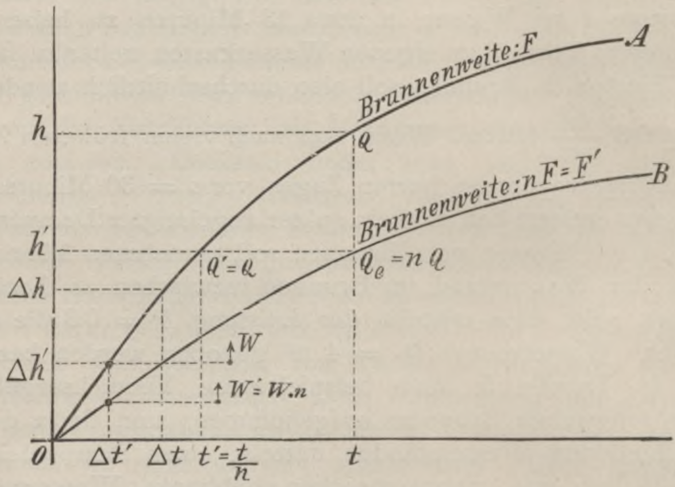

Abbildung 10.

Schaulinien der Wasserstandsänderungen bei Veränderung der Brunnenweite.

von der Höhe h' bildet, die der Pumpe eben dieselbe Wassermenge Q, wieviel aus dem engen Brunnen nach Pause t erhältlich ist, unter ununterbrochenem Pumpen darbieten kann. Nun folgt nach Gleichung 43., dass, wenn eben $t = n$ t' ist, aus derselben h' hohen Wassersäule im F weiten Brunnen die Menge Q, und aus dem $F' = n\,F$ weiten Brunnen die Menge $n\,Q$ gehoben werden kann. Wir brauchen also nur zu fordern, dass die letztere Menge so groß sei, wie die erforderliche Wassermenge Q_e, um die Größe der erforderlichen Weite F' des Brunnenschachtes zu bestimmen. Demnach muss $Q_e = n\,Q$, $F' = n\,F$ werden, woraus folgt, dass der Brunnenschacht erweitert werden muss auf:

45. $$F' = \frac{Q_e}{Q}\,F.$$

Für unser Beispiel ist nach Tabelle 5. gegeben $F = 3._{14}\,m^2$ $t = 30$ Minuten, welcher Pause in der Tabelle für Pumpenleistung $0._3\,m^3 : min$ die hebbare Wassermenge $Q = 2._{184}\,m^3$ entspricht. Hingegen sei die erforderliche Menge $Q_e = 4\,m^3$.

Hieraus folgt nach Gleichung 45., dass der Brunnen entweder auf:

$$F' = \frac{4}{2._{184}}\,3._{14} = 5._{75}\,m^2$$

erweitert oder ein Sammelbrunnen angelegt werden müsste, dessen Weite: $F' - F = 5._{75} - 3._{14} = 2._{61}\,m^2$. Aus diesem Brunnen könnten dann ununterbrochen $4\,m^3$ Wasser gepumpt werden, wenn der Zeitunterschied zwischen Abfahrt des einen und Ankunft des andern Zuges nicht weniger als 30 Minuten beträgt.

Ist nun während der Ruhepause t in einem Brunnen die Wassersäule, deren Höhe h ist, emporgestiegen, und bietet dieselbe mittelst einer bestimmten Pumpenleistung die förderbare Wassermenge Q während der Pumpdauer t_1, so wird aus einem n-mal weiteren Brunnen, aus niederer h' hohen Wassersäule, die während gleich langer Pause t entstanden ist, die n-fache Wassermenge mittelst derselben Leistung der Pumpe während n-facher Pumpdauer förderbar sein. Demnach wird

46. $$t_1' = n\,t_1 \text{ und } Q' = n\,Q.$$

Diese Werte in Gleichung 24. eingesetzt, zeigen die Ergiebigkeit E' der Anlage mit n-fach erweitertem Brunnen:

47. $$E' = \frac{60\,n\,Q}{n\,t_1 + t} = 60\,\frac{Q}{t_1 + \frac{t}{n}}$$

was wir mit Worten so ausdrücken können: Wenn nach jedem Auspumpen des Brunnens eine bestimmt lange Pause eingehalten wird, so wird die Ergiebigkeit der Anlage bei n-fach weiterem Brunnen gerade so groß sein, wie diejenige, welche bei n-fach engerem Brunnen nach n-mal kürzeren Pausen nach jedesmaligem Auspumpen erhalten werden kann. Die Ergiebigkeit der Pumpenanlage ist demnach beim Einhalten gleicher Pausen desto größer, je größer die Brunnenweite gemacht wurde; wächst aber nicht mit letzterer in linearer Proportion. Daher eignen sich die Ergiebigkeitsbestimmungen der Anlage auf Grund gleichgehaltener Ruhepausen nicht zu einem Vergleich, bei welchem etwa auf mindere oder größere Quellenstärke verschieden weiter Brunnen geschlossen werden könnte; wohingegen die Ergiebigkeitsbestimmungen auf Grund gleichgehaltener Wasserstände auch in verschieden weiten Brunnen einen ähnlichen Vergleich und logischen Schluss zulassen.

Zum Beispiel: Aus einem $3._{14}\ m^2$ weiten Brunnen wurde mittelst der vorhandenen Pumpe $4\ m^3$ Wasser in 15 Minuten aus der während einer disponiblen Pause von 60 Minuten entstandenen Wassersäule gehoben. Wie groß ist die stündliche Ergiebigkeit dieser Anlage, und wie groß würde sie sein, wenn die Brunnenweite $7._{07}\ m^2$ wäre?

Nun ist nach Gleichung 24. die Ergiebigkeit des engeren Brunnens unter der gegebenen Bedingung:

$$E = \frac{60 \times 4}{15 + 60} = 3._2\ m^3 : \text{Stunde}$$

und die des $n = \frac{7._{07}}{3._{14}} = 2._{25}$-mal erweiterten Brunnens nach Gleichung 47.

$$E' = \frac{60 \times 4}{15 + \frac{60}{2._{25}}} = 5._{77}\ m^3 : \text{Stunde.}$$

Beide verschiedene Resultate gehören zu ein und derselben starken Quelle; es leuchtet damit ein, dass man die Quellenstärke nach derartigen Ergiebigkeitsbestimmungen bei ungleich weiten Brunnen vergleichsweise nicht beurtheilen darf.

§. 15. Freier Quellenzufluss.

Wenn das Wasser in den Brunnenschacht von einer hochgelegenen seitlichen Öffnung, oder aus einem hoch emporragenden artesischen Rohre herunterfließt, so ist natürlich die Ergiebigkeit des Brunnens gleich der Ergiebigkeit der zufließenden Quelle. Ist deren Zufluss gleichmäßig, so werden die Ergiebigkeiten jedes Wasserspiegels W alle gleich sein. Wenn man nun einen solchen Brunnen mit beliebig großer Pumpenleistung auspumpt, so wird, weil $P - W$ in jedem Zeitpunkte constant bleibt, die Pumpdauer der Entleerung einer jeden gleich tiefen Wasserschichte dieselbe sein, wie dies auch aus Gleichung 9. folgt. Ferner werden die Schaulinien der Steigung und Senkung des Wasserstandes, welche durch abwechselnde Ruhepausen und Auspumpen entstehen, als gerade Linien erscheinen. Schließlich wird die Ergiebigkeit der Anlage nach Gleichung 25., weil die constanten und zueinander gleich gewordenen Coëfficienten der Summenglieder $\frac{P}{P - W}$, sowohl im Zähler als im Nenner vor das Summenzeichen Σ herausgestellt werden können:

$$48. \qquad E = 60 \frac{\Sigma (\Delta Q_2)}{\Sigma (\Delta t_2)} = 60 \frac{F \Delta h}{\Delta t_2} = 60 \, W.$$

Das heißt: Die Ergiebigkeit der Pumpenanlage ist bei freiem Zufluss gleich der Ergiebigkeit jedes abgesenkten Wasserspiegels.

§. 16. Schlussbemerkungen.

Zum Schlusse wollen wir noch die hauptsächlichen Principien und Resultate zusammenfassen, welche aus vorliegender Abhandlung resultiren, und unter einem auf einige unrichtige Ansichten hinweisen, die in Bezug auf Brunnenergiebigkeit eben deshalb verbreitet sind, weil der eindringlicheren Betrachtung des zur Grundlage dienenden hydrodynamischen Problemes und dessen Anwendung zur Beurtheilung der Richtigkeit der Pumpanordnung beim Brunnenbetrieb, ferner zur Verbesserung der Brunnenanlage zu wenig Beachtung geschenkt wird. So wird gewöhnlich die Frage aufgestellt; wie groß ist die Ergiebigkeit dieses oder jenes Brunnens? Auf welche Frage man doch ohne Zufügen der Bedingung keine Antwort geben kann, indem die Ergiebigkeit von der Art und Weise, wie schnell und von welcher Wasserschichte gepumpt wird, sehr abhängig ist; ausgenommen es bezieht sich die Frage auf einen Brunnen mit freiem Zuflusse. Man betrachtet auch mitunter die durch eine singuläre Pumpenprobe während eines Tages hebbare Wassermenge, wobei noch Auspumpen und Ruhepause abwechseln, als die absolute Ergiebigkeit des Brunnens; was entschieden aus doppelten Gründen unrichtig ist. Denn erstens kann der Brunnen eventuell zu dem Zweck, welcher Bedingungen stellt, die beim Probepumpen nicht beachtet wurden, — nicht dienen; zweitens gibt es eigentlich bei einem Brunnen mit unfreiem Quellenzufluss keine absolute Ergiebigkeit, welche nämlich allgemein oder unbedingt giltig wäre.

Auch ist es unrichtig, aus den aus verschieden hohen Wassersäulen erhältlichen Ergiebigkeiten der Anlage eine Durchschnittszahl zu berechnen und diese für die allgemeine Brunnenergiebigkeit anzusehen. Denn diese Zahl ist dann wohl die Durchschnittszahl einiger zufälliger Versuchsresultate; jedoch nicht die durchschnittlich mittlere Ergiebigkeit des Brunnens, welche Benennung an und für sich einen sehr unbestimmten Begriff bezeichnet, weil es durchschnittlich mittlere Wasserspiegelergiebigkeiten in der Wassersäule und Anlageergiebigkeiten geben kann, die sich voneinander auch unterscheiden.

Wir haben ferner in vorliegender Abhandlung erörtert, dass:

1. Die größte Brunnenergiebigkeit mittelst einer entsprechenden Pumpe durch Absenken des Wasserspiegels bis zur Saugrohrmündung zu erreichen ist. Alle anders erhältlichen Ergiebigkeiten sind relativ geringer, als jene.

2. Ist die Quellenergiebigkeit nur bei freiem Quellenzuflusse gleich der allgemeinen Ergiebigkeit des Brunnens; und in entgegengesetzten Fällen immer größer als die übrigen voneinander sehr verschiedenen Ergiebigkeiten.

3. Die Anwendung der relativen Ergiebigkeit der Pumpenanlage hat immer eine unvollständige Ausnützung der größtmöglichen Brunnenergiebigkeit zur Folge.

4. Man kann die Leistung der Pumpe und die von einem Brunnen ausgeschöpfte Wassermenge auch in Ermanglung eines Messgefäßes bloß mittelst des Rauminhaltes des Brunnenschachtes ermitteln.

5. Bei gegebener oder bekannter Größe der Pumpenleistung ist die Beobachtung des Gesetzes, nach welchem der Wasserspiegel während dem Ausschöpfen des Brunnens herabsinkt, ganz entbehrlich.

6. Es ist nicht wirtschaftlich, überstarke Pumpen anzuwenden, wo entsprechend große Wasserbehälter vorhanden sind und die Bedienungsdauer der Pumpe unumschränkt ist. Die vortheilhafteste Pumpenanlage ist diejenige, bei welcher die Ergiebigkeit der niedrigsten pumpbaren Wasserschichte den Bedarf deckt und die Pumpenleistung derselben gleich ist.

7. Überstarke Pumpen sind nur dort anzuwenden, wo geringe Wasserbehälter vorhanden und schnelle Füllung derselben mit entsprechend geringen Wassermengen erforderlich ist. Hiezu ist aber Vorbedingung, dass die Brunnenanlage die erforderliche Wassermenge während vorangegangener disponibler Pause auch wirklich ergebe; daher in diesem Fall die Ergiebigkeit der Anlage nach der disponiblen Pause zu beurtheilen ist.

Tabelle 1.

Wasserstandsänderungen und Ergiebigkeiten eines Brunnens bei veränderlicher Pumpenleistung zwischen 174–340 $l : min$.

Wasserstandshöhe — m —		Während des Pumpens		Während der Ruhepause		Ergiebigkeit des mittleren Wasserspiegels in der Wasserschichte — $m^3 : min.$ —	Wasserzufluss — m^3 —		Gehobene Wassermenge — m^3 —		Leistung der Pumpe — m^3 —		Verflossene Zeitdauer — Minuten —		Ergiebigkeit der Pumpanlage nach jeder Wassersäule — m^3 : Stunde —
von den Saugrohrmündungen	Unterschied	Zeitpunkt	Zeitunterschied Minut.	Zeitpunkt	Zeitunterschied Min.		während des Pumpens	während der Pause	von jeder Schichte	von jeder Wassersäule	in der Minute	in der Stunde	Schichtenweise	Säulenweise	
h	$\triangle h$	St. Min.	$\triangle t_1$	St. Min.	$\triangle t_2$	W	$\triangle Q_1$	$\triangle Q_2$	$\triangle Q$	Q	P	$60\,P$	$\Delta t_1 + \Delta t_2$	$t_1 + t_2$	E
1·88	—	10·47	—	1·10	—	—	—	—	—	14·3616	—	—	—	143	6·026
1·68	0·2	10·49	2	12·46	24	0·0261	0·0521	0·6283	0·6807	13·6809	0·340	20·4	26	117	7·016
1·48	0·2	10·52	3	12·33	13	0·0483	0·1447	0·6283	0·7730	12·9079	0·258	15·5	16	101	7·668
1·28	0·2	10·56	4	12·23	10	0·0628	0·2512	0·6283	0·8795	12·0284	0·220	12·6	14	87	8·295
1·08	0·2	11·01	5	12·16	7	0·0897	0·4487	0·6283	1·0770	10·9514	0·216	13·0	12	75	8·761
0·88	0·2	11·08	7	12·10	6	0·1047	0·7326	0·6283	1·3609	9·5905	0·195	11·7	13	62	9·281
0·68	0·2	11·15	7	12·04	6	0·1047	0·7326	0·6283	1·3609	8·2296	0·195	11·7	13	49	10·077
0·48	0·2	11·24	9	11·58	6	0·1047	0·9423	0·6283	1·5706	6·6590	0·174	10·4	15	34	11·751
0·28	0·2	11·33	9	11·54	4	0·1570	1·4130	0·6283	2·0413	4·6177	0·226	13·6	13	21	13·193
0·00	0·28	11·50	17	11·50	4	0·2199	3·7382	0·8795	4·6177	—	0·271	16·2	21	—	—
Summen	1·88	—	63	—	80	—	8·4557	5·9059	14·3616	—	—	—	143	—	—

$$F = 3{\cdot}14\ .\ m^2;\ W = F\frac{\triangle h}{\triangle t_2};\ \triangle Q_1 = W \triangle t_1;\ \triangle Q_2 = F \triangle h;\ \triangle Q = \triangle Q_1 + \triangle Q_2;\ P = \frac{\triangle Q}{\triangle t_1};\ E = \frac{60\,Q}{t_1 + t_2}.$$

Tabelle 2.

Zur Bestimmung der Ergiebigkeiten einer Pumpenanlage bei einer Pumpenleistung von 260 $l : min$.

Höhe des Wasserstandes — m — von der Saugrohrmündung	Höhe der Schichte — m —	Während der Pause beobachteter Zeitpunkt	Zeitunterschied $min.$	Zeitdauer min	Ergiebigkeit des abgesenkten mittleren Wasserspiegels $m^3/min.$	Eingeströmte Wassermenge — m^3 — während des Pumpens	während der Pause	Zu hebende Wassermenge — m^3 — von der Wasserschichte	von der Wassersäule	Verminderung des Wasserinhaltes im Brunnen, m^3 in der Minute	Auspumpdauer der Wasserschichte — Minuten —	Summe der verflossenen Zeit — Minuten — Schichtenweise	Säulenweise	Ergiebigkeit der Pumpenanlage säulenweise stündlich — m^3 —
h	Δh	St. M.	Δt_2	t_2	W	ΔQ_1	ΔQ_2	ΔQ	Q	$P - W$	Δt_1	$\Delta t_1 + \Delta t_2$	$t_1 + t_2$	E
1·88	—	1·10	—	80	—	—	—	—	13·7013	—	—	—	132·6	6·197
1·68	0·20	12·46	24	56	0·0261	0·0701	0·6283	0·6984	13·0029	0·2339	2·686	26·7	105·9	7·365
1·48	0·20	12·33	13	43	0·0483	0·1434	0·6283	0·7717	12·2312	0·2117	2·968	16·0	89·9	8·162
1·28	0·20	12·23	10	33	0·0628	0·2001	0·6283	0·8284	11·4028	0·1972	3·186	13·2	76·7	8·920
1·08	0·20	12·16	7	26	0·0897	0·3310	0·6283	0·9593	10·4435	0·1703	3·690	10·7	66·0	9·491
0·88	0·20	12·10	6	20	0·1047	0·4236	0·6283	1·0519	9·3916	0·1553	4·046	10·0	56·0	10·062
0·68	0·20	12·04	6	14	0·1047	0·4236	0·6283	1·0519	8·3397	0·1553	4·046	10·0	46·0	10·878
0·48	0·20	11·58	6	8	0·1047	0·4236	0·6283	1·0519	7·2878	0·1553	4·046	10·0	36·0	12·146
0·28	0·20	11·54	4	4	0·1570	0·9570	0·6283	1·5853	5·7025	0·1030	6·100	10·1	25·9	13·210
0·00	0·28	11·50	4	—	0·2199	4·8230	0·8795	5·7025	—	0·0401	21·935	25·9	—	—
Summen	1·88	—	80	—	—	7·7954	5·9059	13·7013	—	—	52·703	132·6	—	—

$F = 3·14\ m^2$; $P = 0·260\ m^3/min$; $W = \frac{F \Delta h}{\Delta t_2}$; $\Delta Q_2 = F \Delta h$; $\Delta Q_1 = \frac{W}{P - W} \Delta Q_2$; $\Delta Q = \Delta Q + \Delta Q_2$; $\Delta t_1 = \frac{\Delta Q_2}{P - W}$; $E = \frac{60\ Q}{t_1 + t_2}$.

Tabelle 3.

Zur Bestimmung der Ergiebigkeiten einer Pumpenanlage bei einer Pumpenleistung von 456 $l : min$.

Wasserstandshöhe — m —		Während der Ruhepause		Ergiebigkeit des mittleren Wasserspiegels in der Wasserschichte — $m^3 : min$ —	Wasserzufluss — m^3 —		Gehobene Wassermenge — m^3 —		Verminderung des Wasserinhaltes im Brunnen — $m^3 : min$ —	Auspumpdauer jeder Schichte — Minuten —	Verflossene Zeitdauer — Minuten —		Ergiebigkeit der Pumpenanlage nach jeder Wassersäule — m^3 : Stunde —
von der Saugrohrmündung an	Unterschied	Zeitpunkt	Zeitunterschied Minuten		während des Pumpens	während der Pause	von jeder Schichte	von jeder Wassersäule			schichtenweise	säulenweise	
h	Δh	St., Min.	Δt_2	W	ΔQ_1	ΔQ_2	ΔQ	Q	$P-W$	Δt_1	$\Delta t_1 + \Delta t_2$	$t_1 + t_2$	E
1·88	—	1·10	—	—	—	—	—	7·9339	—	—	—	97·5	4·882
1·68	0·2	12·46	24	0·0261	0·0381	0·6283	0·6664	7·2675	0·4299	1·46	25·5	72·0	6·056
1·48	0·2	12·33	13	0·0483	0·0738	0·6283	0·7021	6·5564	0·4077	1·54	14·5	57·5	6·851
1·28	0·2	12·23	10	0·0628	0·1003	0·6283	0·7286	5·8368	0·3932	1·60	11·6	45·9	7·630
1·08	0·2	12·16	7	0·0897	0·1539	0·6283	0·7822	5·0546	0·3663	1·72	8·7	37·2	8·153
0·88	0·2	12·10	6	0·1047	0·1709	0·6283	0·7992	4·2564	0·3513	1·80	7·8	29·4	8·684
0·68	0·2	12·04	6	0·1047	0·1709	0·6283	0·7992	3·4552	0·3513	1·80	7·8	21·6	9·601
0·48	0·2	11·58	6	0·1047	0·1709	0·6283	0·7992	2·6570	0·3513	1·80	7·8	13·8	11·552
0·28	0·2	11·54	4	0·1570	0·3297	0·6283	0 9580	1·6990	0·2990	2·11	6·1	7·7	13·194
0·00	0·28	11·50	4	0·2199	0·8195	0·8795	1·6990	—	0·2360	3·73	7·7	—	—
Summen	1·88	—	80	—	2·0280	5·9059	7·9339	—	—	17·56	97·5	—	—

$F = 3{\cdot}14\, m^2;\ P = 0{\cdot}456\, m^3 : min;\ W = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t_2};\ \Delta Q_2 = F \Delta h;\ \Delta Q_1 = \frac{W}{P-W} \Delta Q_2;\ \Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2;\ \Delta t_1 = \frac{\Delta Q_2}{P-W};\ E = \frac{60\, Q}{t_1 + t_2}.$

Tabelle 4.

Zur Bestimmung der größtmöglichen hebbaren Wassermenge, Pumpdauer und Ergiebigkeit der Anlage während dem allerlangsamsten Sinken des Wasserstandes bei gleichförmiger Pumpenleistung, wenn $P = W_0$.

Wasserstandshöhe — m — von der Saugrohrmündung gemessen	Höhenunterschied	Während der Ruhepause: Zeitpunkt der Beobachtung	Zeitunterschied Minut.	Ganze Dauer Minuten	Ergiebigkeit des mittl. abgesenkten Wasserspiegels in der Schichte — $m^3 : min$ —	Kleinstmögliche Verminderung des Brunneninhaltes während des Pumpens — $m^3 : min$ —	Zugeflossene Wassermenge während der Ruhepause — m^3 — schichtenweise	säulenweise	Größt mögliche hebbare Wassermenge — m^3 — bei langsamstem Sinken des Wasserstandes: schichtenweise	säulenweise	Dauer des Pumpens — Minuten —: schichtenweise	säulenweise	Ergiebigkeit der g. Anlage m^3 i. d. St. nach jeder Wassersäule	Ergiebigkeit des mittleren abgesenkten Wasserspiegels in jeder Wassersäule — $m^3 : min$ —
h	$\triangle h$	St. Min.	$\triangle t_2$	t_2	W	$W_0 - W$	$\triangle Q_2$	$Q_2 = min\ Q$	$max \triangle Q$	$max\ Q$	$max \triangle t_1$	$max\ t_1$	$max\ E$	$med.\ W$
2·00	—	2·24	—	154	—	—	—	6·2828	—	15·4055	—	61·060	4·31	0·1007
1·88	0·12	1·10	74	80	0·0051	0·2472	0·3769	5·9059	0·3850	15·0205	1·525	59·535	6·47	0·1036
1·68	0·20	12·46	24	56	0·0261	0·2262	0·6283	5·2776	0·7009	14·3196	2·778	56·757	7·60	0·1064
1·48	0·20	12 33	13	43	0·0483	0·2040	0·6283	4·6490	0·7772	13·5424	3·081	53·676	8·40	0·1167
1·28	0·20	12·23	10	33	0·0628	0·1895	0.6283	4·0210	0·8367	12·7057	3·316	50·360	9·14	0·1259
1·08	0·20	12·16	7	26	0·0897	0·1626	0·6283	3·3927	0·9751	11·7306	3·865	46·495	9·71	0·1357
0·88	0·20	12·10	6	20	0·1047	0·1478	0·6283	2·7644	1·0727	10·6579	4·252	42·243	10·28	0·1443
0·68	0·20	12·04	6	14	0·1047	0·1478	0·6283	2·1361	1·0727	9·5852	4·252	37·991	11·06	0·1533
0·48	0·20	11·58	6	8	0·1047	0·1478	0·6283	1·5078	1·0727	8·5125	4·252	33·739	12·16	0·1675
0·28	0·20	11·54	4	4	0·1570	0·0953	0·6283	0·8795	1·6637	6·8488	6·594	27·145	13·26	0·1937
0·00	0·28	11·50	4	—	0·2199	0·0324	0·8795	—	6·8488	—	27·145	—	—	0·2199
Summen	2·00	—	154	—	—	—	6·2828	—	15·4055	—	61·060	—	—	—

$$F = 3{\cdot}14 . m^2; W - \frac{F \triangle h}{\triangle t_2}; P = W_0 = 0{\cdot}2523\, m^3 : min; \triangle Q_2 = F \triangle h; max \triangle Q = \frac{W_0 \triangle Q_2}{W_0 - W}; max \triangle t_1 = \frac{max \triangle Q}{W_0}; max\ E = \frac{max\ Q}{max\ t_1 + t_2}.$$

$$medium\ W = \frac{\Sigma\, (W \triangle h)}{h}$$

Tabelle 5.

Zur Bestimmung der ununterbrochen hebbaren Wassermenge aus einem schwachen Brunnen mit kräftiger Pumpe, Brunnenweite 3·14 m^2, Pumpenleistung 0·3 $\frac{m^3}{min}$.

Wasserstandshöhe — *m* —		Dauer der Ruhepause vor dem Pumpen — Minuten —		Ergiebigkeit des mittleren abgesenkten Wasserspiegels in der Wasserschichte — $m^3 : min$ —	Ergiebigkeit des durchschnittlich mittleren abgesenkten Wasserspiegels in der Wassersäule — $m^3 : min$ —	Wasserzufluss während der Pause — m^3 —		Hebbare Wassermenge von jeder Wassersäule — m^3 —	Dauer des Auspumpens — Minuten —
von der Saugrohrmündung an	Unterschied	Im ganzen	Unterschied			schichtenweise	säulenweise		
h	Δh	t_2	Δt_2	W	$med\ W$	ΔQ_2	Q_1	Q	t_1
0·93	—	80	—	—	0·0560	—	2·9132	3·582	11·93
0·92	0·01	70	10	0·0031	0·0564	0·0314	2·8818	3·550	11·83
0·87	0·05	60	10	0·0157	0·0586	0·1570	2·7248	3·387	11·29
0·79	0·08	50	10	0·0251	0·0620	0·2512	2·4736	3·118	10·39
0·68	0·11	40	10	0·0345	0·0652	0·3454	2·1282	2·718	9·06
0·54	0·14	30	10	0·0433	0·0672	0·4326	1·6956	2·184	7·28
0·38	0·16	20	10	0·0502	0·0689	0·5024	1·1932	1·549	5·16
0·20	0·18	10	10	0·0565	0·0628	0·5652	0·6280	0·794	3·97
0·00	0·20	—	10	0·0628	—	0·6280	—	—	—
Summen	0·93	—	80	—	—	2·9132	—	—	—

$$F = 3{\cdot}14\ m^2;\ P = 0{\cdot}3\ \frac{m^3}{min};\ \Delta Q_2 = F \Delta h;\ W = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t_2};\ med\ W = \frac{\Sigma\ (W \Delta h)}{h};\ Q = \frac{Q_2}{1 - \frac{med\ W}{P}};\ t_1 = \frac{Q}{P}.$$