

# **Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

## **Der Maschinenbau**

**Redtenbacher, Ferdinand**

**Mannheim, 1863**

Fassung und Leitung des Wassers Anlage der Wehre, Kanäle,  
Wasserleitungen

[urn:nbn:de:bsz:31-270981](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-270981)

Umgegend des Orts, wo sich Wasserkraft vorfindet, auf das Genaueste zu unterrichten suchen, um zu erfahren, ob und unter welchen Bedingungen, so wie für welche Geldopfer der Grund und Boden, auf welchem die verschiedenen Bauten hergestellt werden müssten, als Eigenthum erworben werden kann. Dies alles erfordert einen Mann, der nicht nur technische Kenntnisse, sondern auch Menschenkenntniss, Geschäftskentniss und Lebenserfahrung besitzt.

Hat man alle Verhältnisse, welche den technischen Werth eines Wasserlaufes bestimmen, zuverlässig erforscht und für die Anlage einer Fabrik günstig gefunden, und ist man so glücklich gewesen, hierauf das Wasserbenutzungsrecht, so wie den zur Ausführung der verschiedenen Bauten erforderlichen Boden als Eigenthum zu erwerben, so kann man endlich mit dem Studium der zur Fassung und Leitung des Wassers erforderlichen Einrichtungen schreiten. Davon haben wir im Nachfolgenden zu sprechen.

### *Fassung und Leitung des Wassers. Anlage der Wehre, Kanäle, Wasserleitungen.*

**Allgemeines.** Um die Wirkungsfähigkeit, welche in einem Wasserlaufe enthalten ist, mittelst einer Kraftmaschine aufzusammeln, muss das natürliche Gefälle, welches der Wasserlauf auf eine gewisse Strecke seines Laufes darbietet, nach einem bestimmten Punkt in der Weise konzentriert werden, dass daselbst ein künstlicher Wasserfall entsteht, dessen Höhe gleich ist jener des Gefälles. Dies geschieht durch Wehre, durch Kanäle oder durch eine Wasserleitung in Röhren. Von dieser Fassung und Leitung haben wir nun zu sprechen.

#### *Anlage der Wehre.*

**Wirkung eines Wehres.** Ein Wehr ist ein dammartiger, quer durch den Fluss gelegter Einbau, wodurch das Wasser gestaut, und ein im Flusse vorhandenes natürliches Gefälle konzentriert wird.

Ist z. B., Fig. 1, Tafel I. A B C D das Flussbett, A, B, C, D, die Oberfläche des Wassers im Flusse vor der Errichtung des Baues, so kann das zwischen den Punkten B und C vorhandene Gefälle nach C hin konzentriert werden, wenn man daselbst einen dammartigen Querbau errichtet, dessen Scheitel nahe so hoch ist, als der Wasserspiegel bei B, denn errichtet man einen solchen Bau, so sammelt sich das

Wasser vor demselben, bis der Spiegel nahezu eine horizontale Ebene B, C, bildet und es entsteht dann bei C ein künstlicher Wasserfall, dessen Höhe gleich ist dem natürlichen Gefälle, welches vor der Errichtung des Baues zwischen den Punkten B, und C, vorhanden war. Dieses Gefälle wird mithin vermittelt des Wehres konzentriert.

Beantwortung der Frage, unter welchen Umständen die Erbauung eines Wehres zweckmäßig oder nothwendig ist. Die Erbauung eines Wehres ist nur dann möglich, wenn der Wasserspiegel eines Flusses auf eine längere Strecke über seinen natürlichen Stand gehoben werden darf. Die Erbauung eines Wehres ist zweckmässig oder nothwendig, 1) wenn kein natürliches Gefälle vorhanden ist und ein künstliches Gefälle hervorgebracht werden soll. 2) Wenn das vorhandene natürliche Gefälle nicht die wünschenswerthe Grösse hat, daher durch einen künstlichen Bau erhöht werden soll. 3) Wenn in einem Fluss oder Bach auf einer kurzen Strecke ein starkes Gefälle vorhanden ist, das auf einen Punkt konzentriert werden soll. 4) Wenn die natürlichen Veränderungen des Wasserstandes vermindert oder aufgehoben werden sollen. 5) Wenn das durch die Stauung hervorzubringende Gefälle nicht mehr als 2·5 Meter beträgt. 6) Wenn zwei oder mehrere von den so eben angegebenen Umständen gleichzeitig vorhanden sind.

Einige dieser Sätze bedürfen einer Erklärung. Durch die Erbauung eines Wehres wird der Wasserspiegel vom Wehr an bis auf eine gewisse Strecke stromaufwärts gehoben. Befindet sich auf dieser Strecke bereits ein Wasserwerk, z. B. eine unterschlächtige Mühle, so wird diese durch die Stauung mehr oder weniger unter Wasser gesetzt, so dass die Wirkung des unterschlächtigen Rades geschwächt oder ganz aufgehoben werden kann. Der Besitzer der Mühle wird also die Erbauung eines solchen Wehres nicht gestatten.

Wenn die Ufer des Flusses niedrig und Wiesen oder Felder daran liegen, müssen diese durch Uferdämme gegen Ueberschwemmungen, die die Stauung hervorbringen würde, geschützt werden; aber dessen ungeachtet können diese Grundstücke Schaden leiden, indem sie durch Horizontalwasser durchnässt werden. Die Eigenthümer dieser Grundstücke werden daher die Erbauung eines Wehres oftmals nicht zugeben.

Hieraus ist zu ersehen, dass die Eigenthumsverhältnisse oftmals die Errichtung eines Wehres nicht gestatten werden. Die Sätze 1, 2, 3 bedürfen keiner Erläuterung, wohl aber die Sätze 4 und 5. Zum Verständniss des Satzes 4 ist zu sagen, dass sich

bei Veränderung der Wassermenge die Höhe des durch ein Wehr gehobenen Wasserspiegels viel weniger verändert, als der Wasserspiegel des Flusses selbst. Durch die Anlage eines Wehres wird also stets die für den Betrieb von Wasserrädern und von Turbinen nützliche Wirkung hervorgebracht, dass sich der Wasserspiegel im Zuflusskanal bei veränderlichem Wasserzfluss nur wenig ändert. Die Richtigkeit des fünften Satzes wird man erkennen, wenn man bedenkt, dass eine hohe Stauung nicht nur ein hohes Wehr, sondern auch oftmals hohe und ausgedehnte Uferschutzbauten erfordert, dass demnach eine hohe Stauung kostspielige Bauten erfordert.

**Eintheilung der Wehre und Anwendbarkeit derselben.** Die Wehre können in Grundwehre, Ueberfallwehre, Schleusenwehre und Ueberfall-Schleusenwehre eingetheilt werden. Ein Grundwehr ist ein Wehr, dessen Krone nicht bis an die ursprüngliche Oberfläche des Wassers im Fluss reicht. Fig. 2, Tafel I., A B C die Oberfläche des Wassers vor dem Einbau, D die Krone des Wehres, sie reicht nicht bis B. Grundwehre werden angelegt, wenn die Wassermenge des Flusses nicht sehr veränderlich und die hervorzubringende Stauung nicht gross ist.

Ein Ueberfallwehr ist ein Wehr, dessen Krone höher liegt, als der ursprüngliche Wasserspiegel. Fig. 1, Tafel I., A, B, C, D, der ursprüngliche Wasserspiegel vor Errichtung des Wehres, D die Wehrkrone, sie liegt höher als C. Ein solches Wehr wird angelegt, wenn die hervorzubringende Stauung gross und die Wassermenge des Flusses nicht viel veränderlich ist.

Ein Schleusenwehr ist ein Einbau, dessen stauende Wirkung jederzeit ganz beseitigt werden kann. Es besteht in der Regel aus einer oder aus mehreren Schleusen, die durch Aufzugsvorrichtungen in die Höhe gezogen werden können. Fig. 3, Tafel I. Derlei Wehre werden gewählt, wenn die Lokalverhältnisse bei reichem Wasserabfluss eine Stauung nicht erlauben.

Ein Ueberfall-Schleusenwehr ist ein Einbau, welcher theils aus einem Ueberfallwehr, theils aus Schleusen besteht. [Fig. 4, Tafel I., B C Ueberfall, A B Schleuse.] Ein solches Wehr wird angelegt, wenn bei sehr veränderlichem Wasserzfluss der Wasserstand oberhalb des Wehres stets auf gleicher Höhe erhalten werden soll. Diese Forderung wird insbesondere gestellt, wenn mehrere Wasserwerke hinter einander in dem Fluss errichtet werden.

**Horizontale Trace des Wehres.** Hat man sich entschieden, dass ein Wehr gebaut werden soll, und von welcher Art es sein soll, so muss noch die Trace (die Richtung und Form des Wehrzuges)

und dessen Höhe bestimmt werden. Hinsichtlich der Trace sind verschiedene Anordnungen, Fig. 5, Tafel I., möglich, die wir einer Betrachtung unterwerfen wollen, um die praktische Brauchbarkeit kennen zu lernen.

Dabei ist zu beachten, dass die Veränderungen des Wasserstandes unter sonst gleichen Umständen um so kleiner sein werden, je grösser die Ausdehnung der Wehrkrone ist. Für ein Ueberfallwehr ist z. B.:

$$Q = k b h \sqrt{2 g h}$$

wobei  $Q$  die in einer Sekunde abfliessende Wassermenge,  $b$  die Breite des Wehres,  $h$  die Dicke der Wasserschicht und  $k$  einen Coefficienten bedeutet. Differenzirt man diesen Ausdruck, indem man  $Q$  und  $h$  als veränderlich,  $b$  als konstant betrachtet, so findet man

$$d h = \frac{d Q}{\frac{3}{2} b k \sqrt{2 g h}}$$

Dieser Ausdruck für  $d h$  gibt an, um wie viel sich der Wasserstand im Zuflusskanal ändert, wenn die Wassermenge um  $d Q$  wächst und wie man sieht, ist diese Aenderung des Wasserstandes der Breite  $b$  des Wehres verkehrt proportional.

Das Wehr A, Fig. 5, ist das einfachste, hat aber eine Krone von geringer Ausdehnung; die Veränderungen des Wasserstandes bei veränderlichem Wasserzuzfluss können demnach ziemlich gross ausfallen; es ist daher nur dann anwendbar und zweckentsprechend, wenn die Wassermengen des Flusses wenig veränderlich sind oder wenn sich die Wasserstände oberhalb des Wehres ziemlich stark ändern dürfen.

Das Wehr B ist nur wenig länger als A, ist schwieriger herzustellen und kostspieliger, leitet das Wasser an das rechte Ufer, greift es an und wühlt daselbst den Boden auf, ist also offenbar nicht zu empfehlen.

Die Wehre C, D, E, F sind ebenfalls von wenig oder keinem Werth, die Ausdehnung der Wehrkrone ist nicht merklich grösser als bei A. Diese Wehre sind schwieriger herzustellen als A, daher auch kostspieliger und das Wasser wird bei C und F an die Ufer, bei D und E nach der Mitte des Stromes geleitet, wodurch das Bett ungleich angegriffen wird.

Das Wehr G zeichnet sich aus durch die Grösse und Ausdehnung seiner Wehrkrone; selbst wenn es ganz als Ueberfallwehr gebaut wird, bewirkt es eine beinahe unveränderliche Höhe des Wasserstandes im Zuflusskanal; versieht man noch überdies

einzelne Theile, z. B.  $b c$  des Wehres mit Schleusen, so kann man selbst bei einem sehr veränderlichen Wasserzufluss einen konstanten Wasserstand hervorbringen. Es ist diese Anordnung insbesondere auch ganz zweckmässig, wenn zwei Fabriken bei  $a b$  und  $c d$  angelegt werden, so dass überhaupt in dem mittleren Theil des Flusses Raum für ein Wehr übrig bleibt, und da  $b c$  im Allgemeinen beliebig lang gehalten werden kann, so ist es möglich, mit dieser Anordnung der Anforderung eines konstanten Wasserstandes sehr wohl und in sehr vielen Fällen zu entsprechen. Allerdings ist der Bau eines solchen Wehres kostspielig und deshalb nur zu empfehlen, wenn man mit der Anordnung  $A$  nicht ausreichen kann. Das Ergebniss dieser Untersuchung ist also, dass wir die Anordnungen  $B, C, D, E, F$  verwerfen und nur  $A$  oder  $G$  zur Ausführung empfehlen.

*Genauere Entscheidung der Frage, ob ein Grundwehr oder ob ein Ueberfallwehr erbaut werden soll.* Hat man sich dahin entschieden, dass kein Schleusenwehr, sondern entweder ein Grundwehr oder ein Ueberfallwehr erbaut werden soll, so kann die Wahl zwischen diesen zwei Arten von Wehren in dem Falle zweifelhaft werden, wenn die hervorzubringende Stauung weder sehr gross noch sehr klein ist. Die Entscheidung kann in einem solchen Falle auf folgende Art geschehen. Nennt man:

$h$  die Stauung, welche durch das Wehr hervorgebracht werden soll,  
 $b$  die Breite des Wehres, die in der Regel mit dem Flussbett übereinstimmt und jedenfalls durch die Trace bekannt ist,  
 $Q$  die Wassermenge, welche in der Regel, und namentlich dann, wenn die Stauung die Höhe  $h$  haben soll, über das Wehr abfließt,

so ist annähernd  $0.57 b h \sqrt{2 g h}$  die Wassermenge, welche über das Wehr abfließen würde, wenn die Wehrkrone bis an den ursprünglichen Wasserspiegel reichen würde.

Je nachdem nun der Werth von  $0.57 b h \sqrt{2 g h}$  gleich  $Q$ , grösser als  $Q$  oder kleiner als  $Q$  ausfällt, ist im ersten Falle ein Wehr zu bauen, dessen Krone bis an den Wasserspiegel reicht, im zweiten Falle aber ein Ueberfallwehr und im dritten ein Grundwehr.

Der Coefficient  $0.57$  bezieht sich auf Wehre mit abgerundeter oder wenigstens mit nicht scharfkantiger Krone.

*Höhe eines Ueberfallwehres.* Hat diese eben erklärte Regel für die Errichtung eines vollkommenen Ueberfallwehres entschieden, so findet man dessen Höhe auf folgende Weise.

Nennt man, Fig. 1, Tafel I.:

$h = C_1 C_2$  die Stauhöhe,  $b$  die Wehrbreite,  $Q$  die in jeder Sekunde abfließende Wassermenge,  $t = C C_1$  die Tiefe des Wassers vor der Errichtung des Wehres,  $D C_2 = x$  die Tiefe der Wehrkrone unter dem gestauten Wasserspiegel, so ist wegen  $Q = 0.57 b x \sqrt{2 g x}$

$$x = \left( \frac{Q}{0.57 b \sqrt{2 g}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

und dann ist die Wehrhöhe  $C D = t + h - x$ .

**Höhe eines Grundwehres.** Fig. 2, Tafel I. Eine genaue Berechnung der über ein Grundwehr abfließenden Wassermenge ist mit unüberwindlichen Schwierigkeiten verbunden; man muss sich mit einer rohen Annäherung begnügen, indem man annimmt, dass der Wasserabfluss in dem Theile  $B E$  des Wasserquerschnitts wie bei einem vollkommenen Ueberfall, durch den Theil  $B D$  hingegen wie bei zwei kommunizirenden Gefäßen erfolgt, wenn in einem derselben der Spiegel um  $B E$  höher steht, als im andern. Unter dieser Voraussetzung ist

$$Q = 0.57 b h \sqrt{2 g h} + 0.62 b x \sqrt{2 g h}$$

wobei die Coeffizienten 0.57 und 0.62 nur als Schätzung zu betrachten sind. Hieraus folgt:

$$x = \frac{Q}{0.62 b \sqrt{2 g h}} - 0.92 h$$

**Stauweite.** Die Stauweite ist die Entfernung  $C_2 B_1$ , Fig. 1, Tafel I., vom Wehr an stromaufwärts gemessen, bis zu welcher sich die stauende Wirkung des Wehres erstreckt. Die Oberfläche des Wassers oberhalb des Wehres bildet streng genommen keine horizontale Ebene, sondern ist eine gewisse krumme Fläche, deren Gestalt *Navier* und *Belanger* zu bestimmen gesucht haben. Allein da die Bestimmungen dieser Flächen mit weitläufigen, mit der Wichtigkeit des Zweckes in keinem Verhältniss stehenden Rechnungen verbunden sind, und gewöhnlich die Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser dem Wehr zufließt, nur einen kleinen Werth hat, so kann man sich mit der Annahme begnügen, dass die Oberfläche eine vollkommene horizontale Ebene sei. Nennt man unter dieser Voraussetzung  $h$  die Stauhöhe,  $\alpha$  den Winkel, unter welchem die Wasserfläche vor der Errichtung des Wehres gegen den Horizont geneigt ist, so hat man für die Stauweite den Ausdruck

$$C_2 B_1 = h \cotg \alpha$$

**Ausführung eines Wehrbaues.** Das Spezielle der Anordnung und Ausführung eines Wehrbaues gehört in das Ingenieurfach, daher wir uns hier darauf beschränken, die wesentlichsten Bedingungen eines guten Wehrbaues zu bezeichnen und durch einige Beispiele zu erläutern.

Bei einem Wehrbau muss man dahin wirken, dass derselbe vom Wasser weder unterwaschen oder unterwühlt, noch an den Seiten umgangen werden kann. An den beiden Ufern müssen daher tief fundamentirte, in die Ufer selbst eingreifende Schutzbauten hergestellt werden, und die Unterwühlung des Wehres muss entweder durch tiefe Betonmassen oder durch Spundwände und Pfahlroste mit Bedielungen verhindert werden.

Fig. 6, Tafel I. ist ein hölzernes Wehr, *a b c* Spundwände, *d* bedielter liegender Rost, *e* dichte Balkenwand durch Zangen zusammengehalten und verstrebt, *f* Wehrkrone.

Fig. 7, Tafel I. Hölzernes Wehr mit einem steinernen Vorbau.

Fig. 8, Tafel I. Steinernes Wehr mit Betonfundament.

### Anlage der Kanäle.

**Zweck eines Kanals.** Ein Fabrikkanal ist eine künstliche Wasserleitung, vermittelt welcher das auf eine längere Flussstrecke vorhandene Gefäll nach einem beliebigen Punkt der Flussumgebung verlegt und daselbst konzentriert werden kann. Es sei Fig. 9, Tafel I. *AFB* eine Flussstrecke, *H* das auf derselben vorhandene Gefäll oder der Höhenunterschied des Wasserspiegels bei *A* und bei *B*, *C* sei ein beliebiger Punkt in der Umgebung des Flusses, nach welchem hin das Gefäll *H* konzentriert werden soll, *ACB* der zu diesem Behufe angelegte Kanal. Wie das Längenprofil des Kanals beschaffen sein muss, zeigt Fig. 10, Tafel I. *AA*, *BB* sind die Fortsetzungen der Wasserspiegel *AA*, und *BB*, das Gefälle *CE* ist gleich *H*. Ist *ADGB* der Durchschnitt des Terrains, so ist *AD* ein Durchschnitt, *DC* eine Aufdämmung, *BE* eine Ausgrabung. Man sieht, dass es theoretisch möglich ist, das Gefäll nach einem ganz beliebigen Punkt der Flussumgebung zu konzentriren, und hieraus ist zu erkennen, dass die Gewinnung oder Konzentration eines natürlichen Gefalles vermittelt eines Kanales im Allgemeinen der Konzentration vermittelt eines Wehres vorzuziehen ist, denn bei einer Anlage mit Wehr und ohne Kanal muss das zu treibende Werk in das Flussbett oder hart an das Ufer errichtet werden, ist also dem Hochwasser und der Nässe und Feuchtigkeit ausgesetzt. Bei Anwendung eines Kanals ist dagegen die Möglichkeit geboten,

für die Anlage der Fabrik eine Stelle zu wählen, an der man von der Einwirkung des Wassers im Fluss vollkommen geschützt ist, und die vielleicht in mancher anderen Hinsicht zweckdienliche Eigenschaften besitzt oder Annehmlichkeiten gewährt, die bei der Längeweile eines Fabrikbetriebes auch nicht zu verschmähen sind. Die alte Gewerbe-Industrie wusste die natürlichen Gefälle nur durch Wehre zu konzentriren, die neuere Industrie wendet überall Kanäle an, wo es die Lokalverhältnisse nur möglich machen. Auch dies ist einer der grossen Fortschritte der neueren Industrie. Noch muss hervorgehoben werden, dass vermittelst eines Kanals sehr hohe Gefälle, die auf einer sehr langen Strecke eines Flusslaufes vorkommen, konzentriert werden können.

Um zu bewirken, dass unter allen Umständen und selbst bei sehr veränderlicher Wassermenge im Flusse der Eintritt des Wassers aus dem Fluss in den Kanal regelmässig und in hinreichender Menge erfolgt, ist es vortheilhaft, wenn der Wasserstand im Fluss an der Mündung des Kanals stets nahe auf gleicher Höhe erhalten wird, was, wie wir wissen, durch die Anlage eines Wehres geschehen kann. Für jede Kanalanlage ist daher ein Wehr ein sehr nützlicher Hilfsbau. Die gleichzeitige Erbauung eines Kanales und eines Wehres ist auch in dem Falle sehr zweckmässig, wenn das zwischen zwei Punkten A und B vorhandene Gefälle  $H_1$  nicht die wünschenswerthe Höhe hat. Legt man in diesem Falle unmittelbar unterhalb der Einmündung des Kanals ein Wehr an, durch das der Wasserspiegel bei A um  $H_2$  gestaut wird, so kann man vermittelst des Kanales das ganze Gefälle  $H_1 + H_2$  nach C hin konzentriren.

**Die horizontale Trace des Kanals.** Die Ein- und Ausmündungspunkte eines Kanals werden vorzugsweise durch das zu gewinnende Gefälle bestimmt. Die Linie, längs welcher der Kanal herzustellen ist, richtet sich theils nach Lokal- theils nach Eigenthumsverhältnissen. Gewöhnlich ist das dem Flussufer benachbarte Terrain ziemlich eben und kann der Kanal auf demselben in ziemlich gerader Richtung geführt werden.

Zuweilen zieht der Fluss längs eines Bergabhanges hin, und dann kann es zweckmässig werden, den Kanal nicht in die Ebene, sondern an dem Bergabhang selbst anzulegen. Kommen in der Nähe des Flusses höhere Berge vor, und untersagen die Eigenthümer des Thalbodens und des Bergabhanges die Anlage eines Kanales auf ihren Gründen, so kann man sich dadurch helfen, indem man den Kanal in einem Tunnel durch die Berge führt.

Eine derartige Kanalanlage wurde in Atzenbach im Wiesenthal hergestellt.

Die zweckmässigste Baustelle für die Errichtung der Fabrik richtet sich, abgesehen von Eigenthumsverhältnissen, nach den Terrainverhältnissen. Im Flachland und Hügelland ist es meistens am zweckmässigsten, das Fabrikgebäude in der Nähe des Kanal-anfanges zu verlegen, so dass der Zuflusskanal kurz, der Abflusskanal lang ausfällt. Die Gründe, welche für eine solche Anlage sprechen, sind folgende: 1) kann die Einlassschleuse leicht und schnell bedient werden; 2) im Obergraben bildet sich im Winter gewöhnlich Grundeis, welches weggeschafft werden muss; im Untergraben dagegen entsteht, wegen des in denselben eindringenden wärmeren Horizontalwassers, nicht leicht Grundeis, und wenn es sich auch bildet so kann es doch nicht leicht den Gang der Maschinen stören; 3) Veränderungen des Wasserstandes im Flusse verursachen wenn der Untergraben lang ist, nur eine geringe Stauung am Anfange des letzteren; 4) die wasserdichte Herstellung der Kanal-dämme des Obergrabens ist gewöhnlich mit vielen Schwierigkeiten und Kosten verbunden, und im Winter werden diese Dämme häufig durch Einfrieren zerrissen; die Böschungen des Untergrabens dagegen brauchen nicht wasserdicht zu sein, und das wärmere Horizontalwasser schützt auch gegen das Einfrieren; 5) in der Regel fällt das Terrain nach der Richtung des Kanalzuges, und dann ist eine Anlage mit kurzem Oberkanal am billigsten. In Gebirgsgegenden ist dagegen eine Kanalanlage mit einem langen Obergraben und kurzem Untergraben zweckmässiger, weil in einer solchen Lokalität der Kanal ohne Schwierigkeit an den Bergabhängen eingegraben und längs denselben fortgeführt werden kann.

Fig. 1, Tafel II. zeigt eine solche Kanalanlage. Fig. 2 ist ein Schnitt nach  $\alpha \beta$ .

**Geschwindigkeit des Wassers im Kanal.** Es darf nicht dem Zufall überlassen werden, mit welcher Geschwindigkeit das Wasser in einem Kanal fliesst, wenn derselbe hergestellt worden ist, sondern die Geschwindigkeit muss von vornherein festgesetzt werden, weil von derselben die Profile des Kanales und die dauernde Erhaltung desselben abhängen. Eine grosse Geschwindigkeit des Wassers hat zur Folge, dass das Querprofil des Kanals klein, dass dagegen das Gefäll des Kanales gross ausfällt. Eine grosse Geschwindigkeit vermindert also die Baukosten, verursacht aber einige Gefällverluste. Gewöhnlich sind die Kanäle in Sand- oder Kiesboden gegraben oder durch Auffüllung mit Sand und Kies gebildet. Soll das Bett

eines solchen Kanales durch das Wasser nicht aufgewühlt werden, so darf die Geschwindigkeit desselben eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Diese grössten Geschwindigkeiten, welche ein Kanalbett noch nicht merklich angreifen, sind:

Aufgelöste Erde . . . . .	0·076 <sup>m</sup>
Fetter Thon . . . . .	0·152 <sup>m</sup>
Sand . . . . .	0·305 <sup>m</sup>
Kies . . . . .	0·609 <sup>m</sup>
Abgerundete Kiesel . . . . .	0·914 <sup>m</sup>
Eckige Kiesel . . . . .	1·22 <sup>m</sup>
Conglomerat . . . . .	1·52 <sup>m</sup>
Geschichtete Felsen . . . . .	1·83 <sup>m</sup>
Ungeschichtete Felsen . . . . .	3·05 <sup>m</sup>

Bei Kies und Sand beträgt diese Geschwindigkeit 0·3 bis 0·5. Um für alle Fälle sicher zu sein, ist es angemessen, für Kanäle aus Sand und Kies den Werth von 0·3 Meter in Rechnung zu bringen. In hölzernen Kanälen kann man 0·6 Meter bis 1 Meter nehmen, weil dadurch die Baukosten vermindert werden.

**Querprofil des Kanals.** Aus der mittleren Geschwindigkeit  $u$ , welche das Wasser im Kanale annehmen soll, und aus der Wassermenge  $Q$ , welche in 1 Stunde fortgeleitet werden soll, ergibt sich der Querschnitt  $\Omega$  des Wasserkörpers im Kanale. Er ist nämlich

$$\Omega = \frac{Q}{u}$$

Die Gestalt des Querschnittes richtet sich theils nach dem Material, theils nach der Wassermenge. Hölzerne und gemauerte Kanäle erhalten rechteckige, aufgefüllte Kanäle symmetrisch dossirte trapezförmige Profile. Die Dossirung kann, wenn sie mit Steinen gepflastert wird, 60° betragen, ist sie aber aus gestampfter Erde, so darf sie höchstens 45° sein.

Das relative Gefälle, welches das Wasser im Kanal haben muss, wenn es mit einer gewissen Geschwindigkeit fortfließen soll, und folglich auch der Gefällsverlust, welchen der Kanal verursacht, hängt einerseits von der Geschwindigkeit  $u$ , andererseits von dem Verhältniss ab zwischen dem Inhalt des Querschnittes des Wasserkörpers und dem Theile seines Umfanges, welcher mit dem Kanale in Berührung steht, welchen Theil man den „benetzten Umfang“ zu nennen pflegt.

Je kleiner dieses Verhältniss ist, desto geringer ist der Gefällsverlust. In dieser Hinsicht wären das halbe Quadrat und das halbe

reguläre Sechseck die zweckmässigsten Profilformen; allein sie können wenigstens bei grösseren Wassermengen nicht angewendet werden, weil es in diesem Falle sehr schwierig ist, die Kanäle wasserdicht herzustellen, indem ihre Tiefe zu gross ausfällt. Wegen dieses Umstandes ist es überhaupt nicht möglich, eine rationelle Regel für das Verhältniss der Breite und Tiefe des Wasserkörpers aufzustellen, man muss sich daher mit einer empirischen Regel begnügen.

Durch Vergleichung der Dimensionen von ausgeführten Kanälen habe ich gefunden, dass man nehmen darf:

$$\frac{b}{t} = 2.7 + 0.9 \Omega$$

wobei  $b$  die Breite des Grundbettes,  $t$  die Wassertiefe und  $\Omega$  den Querschnitt des Wasserkörpers bedeutet. Bezeichnet man den Böschungswinkel mit  $\alpha$ , so ist:

$$\Omega = b t + t^2 \cotg \alpha = t^2 \left( \frac{b}{t} + \cotg \alpha \right)$$

man erhält demnach:

$$t = \sqrt{\frac{\Omega}{\frac{b}{t} + \cotg \alpha}}$$

und wenn  $t$  berechnet ist, ergibt sich  $b$  aus:

$$b = \left( \frac{b}{t} \right) t$$

Um die Querschnittsdimensionen eines Kanales zu berechnen, für welchen  $Q$ ,  $n$ ,  $\alpha$  gegeben ist, bestimme man zuerst den Werth von  $\Omega$ , dann den Werth von  $\frac{b}{t}$ , hierauf findet man den Werth von  $t$  und endlich  $b$ .

**Längenprofil des Kanales.** Um eine gleichförmige Bewegung des Wassers im Kanale hervorzubringen (welche bei durchaus gleichen Profilen einer unveränderlichen Wassertiefe entspricht) muss das relative Gefälle des Kanalbettes so gross sein, dass dadurch der Reibungswiderstand des Wassers an dem benetzten Umfang überwunden wird.

Zur Bestimmung dieses Gefälles hat man nach den Untersuchungen und Erfahrungen von *Prony* folgende Formel:

$$\frac{G}{L} = \frac{s}{\Omega} (0.0000444 u + 0.000309 u^2)$$

in welcher bedeutet:

$G$  das totale Gefälle des Kanals,

$L$  die Länge des Kanals,

$\Omega$  den Querschnitt des Wasserkörpers,

$s = b + \frac{2t}{\sin \alpha}$  den benetzten Umfang,

$u$  die mittlere Geschwindigkeit, welche das Wasser im Kanale annehmen soll.

Wenn es sich darum handelt, durch den Kanal möglichst wenig an Gefälle zu verlieren, muss man demselben der ganzen Ausdehnung nach das relative Gefälle  $\frac{G}{L}$  geben, welches durch die letzte Gleichung bestimmt wird, und die Wasserspiegel an den Ein- und Ausmündungen müssen in diesem Falle mit jenen, welche in dem Flusse vorhanden sind, übereinstimmen.

Gestatten aber die Verhältnisse, dass durch den Kanal einiger Gefällverlust entstehen darf, so ist es gut, wenn man den Wasserspiegel an der Einmündung etwas unter dem tiefsten Wasserstand des Flusses annimmt, und der ersten Strecke des Zufluss - so wie der letzten Strecke des Abflusskanales ein stärkeres relatives Gefälle gibt, als den übrigen Theilen des Kanales, weil dadurch der Zu- und Abfluss des Wassers erleichtert wird. Am Anfange des Kanales muss zur Regulirung des Wasserzuflusses eine Schleuse angebracht werden, und unmittelbar vor der Kraftmaschine ist eine zweite Schleuse nothwendig, durch welche das Ueberwasser (d. h. die Differenz zwischen der zufließenden Wassermenge und derjenigen, welche auf das Rad zu wirken hat) nach einem Leerkanal abfließen kann. Diese Schleuse und der Leerkanal sind insbesondere auch nothwendig, wenn das Rad abgestellt wird. Denn die Schleuse am Anfang des Kanales wird immer erst abgestellt, nachdem dies mit dem Rade geschehen ist, es muss also das in der Zwischenzeit in den Kanal eintretende Wasser irgend wo abfließen können. Gesetzt aber auch, dass die Schleuse am Anfang des Kanales gleichzeitig oder etwas früher als das Rad abgestellt würde, so wäre doch auch in diesem Falle ein Leergerinne mit Schleuse unmittelbar vor dem Rade nothwendig, weil das Wasser, nachdem die Einmündungsschleuse geschlossen worden ist, seine Bewegung im Kanale vermöge der Trägheit noch weiter fortsetzt, sich daher vor dem Rade sammeln und aufstauen würde, wenn daselbst keine Abflussöffnung angebracht würde.

**Anwendung der Regeln über den Wehr- und Kanalbau.** In einer Flusskrümmung sei zwischen zwei Punkten A und B, Fig. 9, Tafel I., deren Horizontalabstand 1500 Meter beträgt, ein natürliches Gefälle von 3 Metern vorhanden. Man beabsichtigt daselbst eine Fabrik anzulegen, die zu ihrem Betrieb einen absoluten Effekt von 80 Pferdekräften erfordert. Die Terrainverhältnisse seien so beschaffen, dass das concave Ufer steil und hoch, das convexe Ufer dagegen flach ist und circa zwei Meter über dem Spiegel des Flusses liegt. Die Kanäle können und dürfen in gerader Linie auf dem flachen convexen Ufer angelegt werden. Die Wassermenge im Fluss beträgt im Minimum 4, im Maximum 5 Kubikmeter. Es sei erlaubt, bei A eine Stauung von 1.5 Meter zu bewirken.

Wenn das natürliche Gefälle von 3 Metern konzentriert werden könnte, wäre eine Wassermenge von  $\frac{75 \times 80}{1000 \times 3} = 2$  Kubikmeter notwendig. Diese Quantität liefert zwar der Fluss auch beim Minimum der Wassermenge, allein für eine Kraft von 80 Pferden ist nach der Seite 21 gegebenen Erläuterung ein Gefälle von 3 Metern nicht günstig, und da der Voraussetzung zufolge eine Stauung von circa 1.5 Kubikmeter gestattet ist, so wird es angemessen sein, nebst dem Kanal auch ein Wehr anzulegen und dieses so einzurichten, dass ein nutzbares Gefälle von  $3 + 1.5 = 4.5$  Meter gewonnen wird.

In diesem Falle beträgt die der Fabrik zuzuleitende Wassermenge per 1 Sekunde  $\frac{75 \times 80}{4.5 \times 1000} = 1.33$  Kubikmeter.

Nehmen wir für das Wasser im Kanal eine mittlere Geschwindigkeit von  $u = 0.4$  Meter an, so erhalten wir vermittelst der für eine Kanalanlage aufgestellten Regeln:

Querschnitt des Wasserkörpers im Kanal:

$$\Omega = \frac{Q}{u} = \frac{1.33}{0.4} \dots \dots \dots = 3.32 \text{ Quadratmeter}$$

Verhältniss zwischen Breite und Tiefe:

$$\frac{b}{t} = 2.7 + 0.9 \Omega \dots \dots \dots = 5.69$$

Tiefe des Wassers:

$$t = \sqrt{\left( \frac{\Omega}{\frac{b}{t} + \cotg \alpha} \right)} \dots (\alpha = 45^\circ) \dots = 0.70 \text{ Meter}$$

Breite des Kanals:

$$b = \left( \frac{b}{t} \right) t \dots \dots \dots = 4.00 \text{ Meter}$$

Der benetzte Theil des Umfangs:

$$S = b + \frac{2 t}{\sin \alpha} \dots \dots \dots = 6.00 \text{ Meter}$$

Totalgefälle des Kanals:

$$G = L \frac{S}{Q} (\alpha u + \beta u^2) \dots \dots \dots = 0.18 \text{ Meter}$$

Um den Eintritt des Wassers in den Kanal zu erleichtern, wollen wir den Wasserspiegel an der Einlassschleuse um 0.2 Meter tiefer legen als im Flusse, und um das Abfließen des Wassers aus dem Abflusskanal zu befördern und die Rückstauung zu schwächen, wollen wir den Wasserspiegel am Ende des Abflusskanals um 0.2 Meter höher annehmen als im Fluss. Unter dieser Voraussetzung muss der Kanal so angelegt werden, dass der Wasserspiegel im Flusse oberhalb des Wehres um  $0.20 + 0.18 + 0.20 + 4.5 = 5.08$  Meter höher steht als im Fluss an der Ausmündung des Abflusskanals. Nun ist das natürliche vorhandene Gefälle 3 Meter; durch das Wehr muss also eine Stauung von  $5.08 - 3 = 2.08$  Meter hervor gebracht werden. Es ist klar, dass ein Ueberfallwehr angelegt werden muss, und dass dieses für die geringste Wassermenge im Fluss zu berechnen ist. Die Wassermenge, welche bei der geringsten Menge über das Wehr abfließt, beträgt  $4 - 1.33 = 2.67$  Kubikmeter, die Wehrbreite sei 16 Meter, dann ist die Tiefe  $x$  der Wehrkrone unter dem gestauten Wasserspiegel

$$x = \left( \frac{2.67}{0.57 \times 16 \times \sqrt{2 \times 9.81}} \right)^{\frac{2}{3}} \dots \dots = 0.163 \text{ Meter}$$

Beträgt die Wassertiefe im Fluss vor dem Einbau des Wehres 0.4 Meter, so ist die Wehrhöhe  $0.4 + 2.08 - 0.163 = 2.317$  Meter.

Fig. 3, Tafel II. zeigt das Längenprofil des Kanales mit allen Gefällverlusten.

### Leitung des Wassers in Röhren.

Bei der Leitung des Wassers in Röhren kommen jederzeit Widerstände vor, zu deren Ueberwindung ein Theil des Gefälles aufgeopfert werden muss, so dass die Erfolge, welche durch die Leitung hervorgehen, kleiner und schwächer ausfallen, als wenn diese Widerstände nicht vorhanden wären. Die Berechnung dieser Gefällverluste soll in Folgendem gezeigt werden.

#### Adhäsion des Wassers an den Röhrenwänden. Röhrenwiderstände.

Wenn in einer Röhre Wasser fließt, entsteht zwischen den längs

der Wand fließenden Theilchen und der Wand selbst eine Wechselwirkung, ein Adhäsions- oder Reibungswiderstand, welcher der Bewegung des Wassers entgegenwirkt. *Eitelwein*, *Prony* und in neuerer Zeit *St. Venant* haben Versuche angestellt, um das Gesetz dieses Widerstandes zu ermitteln. Man hat gefunden, dass dieser Widerstand 1) von dem Material, aus welchem die Röhre besteht, nicht abhängt, 2) der Dichte der Flüssigkeit proportional ist, 3) der Berührungsfläche proportional zu setzen ist, 4) von der Geschwindigkeit  $u$  des Wassers in der Röhre abhängt, und annähernd ausgedrückt werden kann durch

$$\gamma C L (\alpha u + \beta u^2)$$

wobei  $\gamma$  das Gewicht von 1 Kubikmeter Flüssigkeit,  $C$  den Umfang der Röhre,  $L$  die Länge der Röhre,  $u$  die Geschwindigkeit des Wassers und  $\alpha, \beta$  zwei Erfahrungscoefficienten bedeuten. Nach den Versuchen von *Prony* ist

$$\alpha = 0.00001733$$

$$\beta = 0.0003483$$

Nennt man  $z$  die Höhe der Flüssigkeitssäule, welche durch ihr Gewicht im Stande ist, den Reibungswiderstand zu überwinden,  $\Omega$  den Querschnitt der Röhre, so ist  $\gamma \Omega z$  das Gewicht dieser Flüssigkeitssäule, man hat daher

$$\gamma \Omega z = \gamma C L (\alpha u + \beta u^2)$$

daher

$$z = L \frac{C}{\Omega} (\alpha u + \beta u^2) \dots \dots \dots (1)$$

Für eine cylindrische Röhre vom Durchmesser  $D$  ist  $C = D \pi$ ,  $\Omega = \frac{D^2 \pi}{4}$ , demnach wird

$$z = L \frac{4}{D} (\alpha u + \beta u^2) \dots \dots \dots (2)$$

Die Werthe von  $\alpha u + \beta u^2$  für verschiedene Werthe von  $u$  sind in der Tabelle Seite 131 der Resultate zusammengestellt, und zwar sind es die von *Prony* gefundenen Werthe.

Diese Widerstandshöhe oder dieser Gefällverlust ist, wie Gleichung (2) zeigt, der Länge der Röhrenleitung direkt, ihrem Durchmesser aber verkehrt proportional. Ist  $u$  klein, z. B. 0.3, so kann das Glied  $\beta u^2$  gegen  $\alpha u$  vernachlässigt werden. Für kleine Geschwindigkeiten ist demnach der Reibungswiderstand beinahe der

ersten Potenz der Geschwindigkeit proportional. Ist dagegen  $u$  ziemlich gross, z. B. 0.6 bis 1, 2, 3 Meter, so ist im Gegentheil  $\alpha u$  gegen  $\beta u^2$  eine kleine zu vernachlässigende Grösse. Für grosse Geschwindigkeiten ist daher der Widerstand nahe dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional.

In den meisten Fällen ist der Werth von  $z$  im Vergleich zu dem vorhandenen Gefälle nur dann von Belang, wenn die Länge der Leitung sehr beträchtlich ist, z. B. mehr als 100 Meter beträgt. Es ist selten der Fall, dass das zum Betrieb einer Maschine bestimmte Wasser aus sehr grossen Entfernungen in Röhren herbeigeleitet wird, degegen kommt es oft vor, dass Trinkwasser aus Entfernungen von 2000 bis 4000 Meter und mehr in Röhren fortgeleitet werden muss, und dann kann der Werth von  $z$  sehr beträchtlich ausfallen, insbesondere, wenn kleine Wasserquantitäten mit ziemlich grosser Geschwindigkeit geleitet werden sollen. Zur Erläuterung des so eben Gesagten mögen folgende Beispiele dienen.

In einer Röhrenleitung soll in jeder Sekunde  $Q = 0.8$  Kubikmeter Wasser einer Turbine zugeleitet werden. Die Länge der Leitung sei  $L = 100$  Meter, die Geschwindigkeit des Wassers in der Röhre 1 Meter, dann hat man:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi u}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.8}{3.14 \times 1}} = 1 \text{ Meter (nahe)}$$

und wird vermöge (2) und Tafel Seite 131 der Resultate

$$z = \frac{100 \times 4}{1} 0.0003656 = 0.146 \text{ Meter}$$

Der durch die Reibung entstehende Gefällverlust beträgt also nur nahe 15 Centimeter.

Auf eine Entfernung von  $L = 4000$  Meter soll in jeder Sekunde 0.4 Kubikmeter Trinkwasser mit einer Geschwindigkeit von 0.8 Meter fortgeleitet werden. Dann ist:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 0.4}{3.14 \times 0.8}} = 0.69, \quad z = \frac{4000 \times 4}{0.69} 0.0002368 = 5.6 \text{ Meter}$$

Auf eine Entfernung von 4000 Meter sollen in jeder Sekunde 0.03 Kubikmeter Trinkwasser mit 1.3 Meter Geschwindigkeit fortgeleitet werden. In diesem Falle wird:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 0.03}{3.14 \times 1.3}} = 0.172, \quad z = 4000 \frac{4}{0.172} \times 0.0006111 = 55.5 \text{ Meter}$$

Der Gefällverlust oder die Widerstandshöhe beträgt also in diesem dritten Beispiele 55·5 Meter.

**Eckige und abgerundete Knieröhrenstücke.** Bei jeder raschen Ablenkung des Wassers aus seiner geregelten Bahn entstehen nothwendig Wellenbewegungen oder Wirbelungen, so wie Erschütterungen an den Röhrenwänden, wodurch die lebendige Kraft der Fortschrittsbewegung des Wassers geschwächt wird. Die hierdurch entstehenden Gefällverluste lassen sich selbstverständlich genau nicht berechnen, denn alle derlei Vorgänge sind viel zu komplizirt, als dass sie durch eine korrekte Rechnung verfolgt werden könnten. Die nachfolgenden Regeln beruhen auf Versuchen.

*Weisbach* hat durch Versuche gefunden, dass ein winkliges Kniestück, Fig. 4, Tafel II., einen Gefällverlust verursacht, der durch folgenden Ausdruck berechnet werden kann:

$$z = \frac{u^2}{2g} (0.9457 \sin \delta^2 + 2.047 \sin^4 \delta)$$

wobei  $u$  die Geschwindigkeit des Wassers in der Röhre  $\delta = \widehat{CBE} = \widehat{EBD} = \frac{1}{2} \widehat{CBD}$  die Hälfte des Ablenkungswinkels bedeutet.

Für  $\delta = 10^\circ \quad 20^\circ \quad 30^\circ \quad 40^\circ \quad 50^\circ \quad 60^\circ$

$$\text{wird } \frac{z}{\frac{u^2}{2g}} = 0.046 \quad 0.139 \quad 0.364 \quad 0.740 \quad 1.260 \quad 1.861$$

Für  $\delta = 45^\circ$  wird nahezu  $0.9457 \sin \delta + 2.047 \sin^4 \delta = 1$  und  $z = \frac{u^2}{2g}$ , d. h. wenn der Ablenkungswinkel  $90^\circ$  beträgt, geht die lebendige Kraft verloren, die der Geschwindigkeit  $u$  entspricht.

Für abgerundete Kniestücke, Fig. 5, Tafel II., hat *Navier* aus Versuchen folgende Formel abgeleitet:

$$z = \frac{u^2}{2g} (0.0039 + 0.0186 r) \frac{s}{r^2}$$

wobei  $u$  die Geschwindigkeit des Wassers in der Röhre,  $r$  den Krümmungshalbmesser des Kniestückes und  $s$  die Länge  $AB$  des gekrümmten Theils des Kniestückes bezeichnet.

**Verengungen und Erweiterungen der Röhren.** Allmälige, stetige und sanft in einander übergehende Querschnittsänderungen verursachen keinen merklichen Kraftverlust. Plötzliche Querschnittsänderungen verursachen dagegen plötzliche Geschwindigkeitsände-

rungen und Wirbelungen, und verursachen nothwendig Kraftverluste, die mittelst des *Carnot'schen* Prinzipes annähernd in nachstehender Weise berechnet werden können.

Nennt man für eine Verengung, Fig. 6, Tafel II.,  $\Omega$  den Querschnitt der Röhre zu beiden Seiten der Verengung,  $\Omega_1$  den Querschnitt der Verengung,  $k_1$  den Contraktionscoefficienten,  $u$  die Geschwindigkeit des Wassers in dem Querschnitt  $\Omega$ ,  $u_1$  die Geschwindigkeit im Querschnitt  $\Omega_1$ ,  $Q$  die Wassermenge, welche per 1 Sekunde durch die Röhre fließt, so hat man

$$Q = \Omega u = \Omega_1 k_1 u_1 \quad \dots \quad (1)$$

Da nun das Wasser plötzlich aus der Geschwindigkeit  $u$ , in die Geschwindigkeit  $u_1$  übergeht, demnach plötzlich eine Geschwindigkeit  $u - u_1$  verliert, so entsteht ähnlich, wie bei dem Stoss unelastischer Körper ein Verlust an lebendiger Kraft, welcher der in jeder Sekunde stossenden Masse  $1000 \frac{Q}{2g}$  und dem Quadrat  $(u - u_1)^2$  der verlorenen Geschwindigkeit entspricht (Prinzipien Seite 98), die daher durch

$$1000 \frac{Q}{2g} (u - u_1)^2$$

ausgedrückt werden kann. Nennt man  $z$  den Gefällverlust, welcher diesem Verlust an lebendiger Kraft entspricht, so hat man

$$1000 Q z = 1000 \frac{Q}{2g} (u - u_1)^2 \quad \dots \quad (2)$$

Setzt man für  $u_1$  seinen aus (1) folgenden Werth  $u \frac{\Omega}{\Omega_1 k_1}$ , so erhält man aus (2)

$$z = \frac{u^2}{2g} \left( \frac{\Omega}{\Omega_1 k_1} - 1 \right)^2 \quad \dots \quad (3)$$

Es seien ferner für eine röhrenförmige Verengung, Fig. 7, Tafel II.,  $\Omega$ ,  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  die Querschnitte der Röhrentheile,  $u$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  die Geschwindigkeiten des Wassers in diesen Querschnitten,  $k_1$  der Contraktionscoefficient für den Uebergang aus  $\Omega$  in  $\Omega_1$ ,  $x$  die Geschwindigkeit des Wassers im Querschnitt  $\Omega_2$ , so hat man zunächst:

$$Q = \Omega u = \Omega_1 u_1 = \Omega_2 u_2 = \Omega_2 k_1 x$$

demnach

$$u_1 = \frac{\Omega}{\Omega_1} u, \quad u_2 = \frac{\Omega}{\Omega_2} u, \quad x = \frac{\Omega}{\Omega_2 k_1} u \quad \dots \quad (4)$$

Nun verliert das Wasser zuerst die Geschwindigkeit  $x - u$ , und hierauf  $u_1 - u_2$ , der totale Verlust an lebendiger Kraft ist demnach

$$1000 \frac{Q}{2g} \left[ (x - u)^2 + (u_1 - u_2)^2 \right]$$

oder mit Berücksichtigung von (1):

$$1000 \frac{Q}{2g} u^2 \left[ \left( \frac{\Omega}{\Omega_1} \right)^2 \left( \frac{1}{k_1} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\Omega}{\Omega_1} - \frac{\Omega}{\Omega_2} \right)^2 \right]$$

Dieser Verlust ist aber auch gleich  $1000 Q z$ , wenn  $z$  den Gefällverlust bezeichnet, daher hat man:

$$z = \frac{u^2}{2g} \left[ \left( \frac{\Omega}{\Omega_1} \right)^2 \left( \frac{1}{k_1} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\Omega}{\Omega_1} - \frac{\Omega}{\Omega_2} \right)^2 \right] \dots (5)$$

Eine Röhrenerweiterung, Fig. 8, Tafel II., verursacht, wie eine Röhrenverengung an zwei Stellen Verluste an lebendiger Kraft. Es ist in diesem Falle zunächst

demnach  $Q = \Omega u = \Omega_1 u_1 = \Omega_2 u_2 = \Omega_2 k_2 x$

$$u_1 = \frac{\Omega}{\Omega_1} u, \quad u_2 = \frac{\Omega}{\Omega_2} u, \quad x = \frac{\Omega}{\Omega_2 k_2} u \dots (6)$$

Man erhält demnach in diesem Falle:

$$1000 Q z = 1000 \frac{Q}{2g} [(u - u_1)^2 + (x - u_2)^2]$$

oder wegen (6):

$$z = \frac{u^2}{2g} \left[ \left( 1 - \frac{\Omega}{\Omega_1} \right)^2 + \left( \frac{\Omega}{\Omega_2} \right)^2 \left( \frac{1}{k_2} - 1 \right)^2 \right]$$

Alle diese Gefällverluste, welche Eckstücke, Kniestücke und Röhrenerweiterungen oder Verengungen verursachen, sind nur dann von Belang, wenn sie sich in ausgedehnten Leitungen oftmals wiederholen, was z. B. der Fall ist, wenn die Verbindungen der Röhrenstücke, aus welchen eine lange Leitung besteht, nicht sorgfältig hergestellt werden. Sehr beträchtlich kann auch dieser Widerstand werden, wenn sich an den Röhrenwänden unregelmässig geformte Krusten ansetzen, wodurch in der ganzen Leitung rasch aufeinander folgende plötzliche Querschnittsänderungen entstehen. Man sieht hieraus, wie wichtig es ist, dass eine Wasserleitung sorgfältig ausgeführt und unterhalten wird.

Nennt man  $\Sigma z$  die Summe aller Gefällverluste, welche eine Röhrenleitung wegen Reibungen, Krümmungen und Querschnittsänderungen verursacht,  $H$  das wirklich vorhandene Gefälle, so muss man, um den wirklichen Erfolg zu berechnen,  $\pm H \pm \Sigma z$  in Rechnung bringen, nämlich:

- +  $H + \Sigma z$  wenn Wasser gehoben werden soll, d. h. wenn die Ausflussmündung höher liegt als die Einmündung,
- $H + \Sigma z$  wenn Wasser fortgetrieben werden soll, aber die Ausflussmündung tiefer liegt als die Einmündung,
- +  $H - \Sigma z$  wenn die Ausflussöffnung um  $H$  tiefer liegt, als die Einmündung und entweder die Ausflussgeschwindigkeit oder der Druck berechnet werden soll, den das Wasser an der Ausflussöffnung hervorzubringen vermag.