Beitrag zur Aufstellung einer allgemeinen Formel für die gleichförmige Bewegung des Wassers in Kanälen und Flüssen

Autor(en): **Ganguillet, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern**

Band (Jahr): **- (1868)**

Heft 654-683

PDF erstellt am: **16.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-318820

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

einer solchen Arbeit nicht lohnen würde und jedenfalls nicht mehr beweisen würde als schon bewiesen ist.

E. Ganguillet, Ober-Ingenieur.

Beitrag zur Aufstellung einer allgemeinen Formel für die gleichförmige Bewegung des Wassers in Kanälen und Flüssen.

(Vorgetragen den 31. Oktober 1868.)

Die Gesetze, nach welchen das Wasser in offenen Kanälen und in Flüssen sich bewegt, sind so complizirt, dass die Gelehrten, die sich mit der Aufsuchung derselben beschäftigt haben, so lange sie auf dem Wege der reinen spekulativen Forschung blieben, zu keiner befriedigenden Lösung der Aufgabe gelangten. Nur als der wahre Grundsatz festgesetzt wurde, dass eine richtige Erkenntniss dieser Gesetze aus den Resultaten der Beobachtungen hervorgehen müsse, blieben die Bemühungen der Hydrauliker nicht mehr fruchtlos.

Galilei soll der erste gewesen sein, der sich mit diesen Gesetzen beschäftigte. Wie wenig er jedoch der Wahrheit auf die Spur kam, zeigt folgender von Bernard in dem Werke: „Nouveaux principes d'hydraulique" (Paris 1787), angeführter Umstand: Es wurde vorgeschlagen, den durch seine öftern Ueberschwemmungen und Verheerungen schädlichen, in starken Serpentinen sich bewegenden Fluss Bisentio gerade zu legen. Galilei widersetzte sich diesem Projekte und behauptete unter Anderm, dass in zwei Flüssen, mit gleichem absolutem Gefälle, die Geschwindigkeit des Wassers die gleiche sein werde, welches auch die Verschiedenheit der Längen der Flüsse sei, und dass die Serpentinen, wenn sie nicht

sehr scharfe Winkel bilden, keine oder doch nur eine ganz unwesentliche Verzögerung des Wasserabflusses verursachen. Ein Ingenieur Bartolotti, der über die Nothwendigkeit der Geradelegung des Bisentio geschrieben hatte, konnte Galilei nicht widerlegen, indem er nicht im Stande war, die Unrichtigkeit der Anschauungsweise Galilei's nachzuweisen. Die Geradelegung des Bisentio unterblieb und — sagt Bernard — „Galilée eut alors le „malheur de faire triompher son opinion au préjudice „de la vérité.“

Von grosser Wichtigkeit war auch für diesen Theil der Hydraulik die Entdeckung, welche der Schüler Galilei's, der berühmte Torricelli, von dem Princip machte, dass, abgesehen von den Widerständen, die Ausflussgeschwindigkeit des aus einem Gefässe durch kleine Oeffnungen abfliessenden Wassers derjenigen gleich sei, welche ein im freien Raum fallender Körper erreicht, wenn die Fallhöhe der Druckhöhe des Wassers im Gefässe gleich ist. Auf dieses Theorem von Torricelli stützte Guglielmini, der am Ende des 17. Jahrhunderts das erste grosse Werk über die Hydraulik erscheinen liess, seine Theorie über die Bewegung des Wassers in den Flüssen. Nach derselben hat jedes Wassertheilchen das Bestreben, sich mit der Geschwindigkeit zu bewegen, mit welcher es aus einer in der gleichen Tiefe befindlichen Oeffnung eines Behälters abfliessen würde, mithin muss die Geschwindigkeit des Wassers, dem Parabelgesetze gemäss, von der Oberfläche nach der Tiefe zunehmen. Das sehr ausführliche und verdienstliche Werk von Guglielmini galt sehr lange als Autorität. Die aus seiner Theorie entstehende Folgerung, dass sich die grösste Geschwindigkeit des Wassers in einem Flusse an der Sohle und die kleinste an der Oberfläche befinde, konnte jedoch

nicht sehr lange von den Hydrotekten als richtig angesehen werden. Bei dem ersten Versuch von Geschwindigkeitsmessungen in verschiedenen Tiefen, musste der Widerspruch der Theorie Guglielmini's mit der Wirklichkeit in die Augen fallen. Auch wurde durch eine der Akademie der Wissenschaften in Paris im Jahr 1732 vorgelegte Abhandlung von Pitot, welche sich auf eine Reihe von Messungen stützt, die mittelst dem, von ihm erfundenen, Messungsinstrument ausgeführt worden waren, die Unrichtigkeit derselben nachgewiesen, was übrigens auch ungefähr zu gleicher Zeit auf dem theoretischen Wege durch das von Daniel Bernoulli aufgestellte Princip der lebendigen Kräfte bestätigt wurde.

Der erste Versuch, die Geschwindigkeit des Wassers aus dem Gefälle und dem Profil des Flusses herzuleiten, rührt nach Hagen, von Brahms her, welcher in seinen Anfangsgründen der Deich- und Wasserbaukunst vom Jahr 1753 annahm, dass die Beschleunigung, welche man nach den Gesetzen der Mechanik erwarten sollte, bei den Flüssen nicht vorkommt, dass vielmehr das Wasser in denselben eine constante Geschwindigkeit annimmt. Die Reibung des Wassers an dem benetzten Umfang wird von ihm als diejenige Kraft bezeichnet, welche der Beschleunigung entgegen wirkt. Sie ist, nach ihm, dem Flächeninhalt des Querschnitts, dividirt durch den benetzten Umfang, proportional.

Dubuat war indess der erste, welcher es unternahm, durch gründliche Experimente die Gesetze der Bewegung des Wassers zu erforschen. Zu diesem Zwecke führte er sowohl an einem besonders construirten hölzernen Kanal, als auch am Kanal du Jard und am Hainefluss in Frankreich sehr sorgfältige Messungen aus.

Die Formel, die er aus seinen Messungsresultaten

hergeleitet hat, wurde jedoch, weil etwas complicirt, nicht als praktisch angesehen, und ist desshalb wenig angewendet worden.

De Prony unterwarf die sorgfältigen Beobachtungen Dubuat's und Anderer einer streng wissenschaftlichen Krtik und stellte, gestützt auf die Resultate derselben, unter andern folgende, grösstentheils von Dubuat selbst angenommene, Sätze auf:

1. Das abfliessende Wasser leidet in einem Kanal Widerstände, welche als verzögernde Kräfte anzusehen sind. Diese Kräfte können die Wirkung der Schwere entweder ganz oder nur theilweise aufheben. Im letzten Fall haben wir eine ungleichförmige, im ersten dagegen eine gleichförmige Bewegung.
2. Die Widerstände, welche die Wirkung der Schwere vermindern oder aufheben, sind unabhängig von dem Gewicht, resp. von dem Druck des Wassers.
3. In einem Querschnitt haben die Wassertheilchen nicht überall die gleiche Geschwindigkeit. In einem offenen Kanal ist im Allgemeinen die grösste Geschwindigkeit an der Oberfläche und die kleinste an der Sohle.
4. Die Geschwindigkeit an der Oberfläche, die mittlere Geschwindigkeit und die Geschwindigkeit an der Sohle stehen zu einander in einem von der Form und der Grösse des Flussbettes unabhängigen Verhältnisse.
5. Es hängt sich an die Wände eine Wasserschichte, welche als die Umgebung der abfliessenden Wassermasse anzusehen ist.
6. Es scheint nach den Experimenten Dubuat's, dass die anziehende Kraft der Wände an dieser Schichte aufhöre. Dieser gewandte Beobachter will nämlich

erkannt haben, dass die Verschiedenheit des Materials, in welchem das Wasser fliesst, auf die Reibung keinen merklichen Einfluss ausübe.

7. Die Wassertheilchen kleben aneinander. Diese Cohäsion und die Adhäsion an die Wände sind gestützt auf die Resultate der von Coulomb angestellten Experimente über die Reibung zwischen Flüssigkeit und festen Körpern, im Allgemeinen durch zwei verschiedene Werthe auszudrücken, wovon der erstere mit der ersten, der andere mit der zweiten Potenz der Geschwindigkeit des Wassers proportional ist.

De Prony zweifelte an der Richtigkeit des 6. Satzes, musste ihn aber annehmen, so lange die von Dubuat angeführten Beobachtungen nicht durch gründlichere Experimente widerlegt werden konnten.

Die von de Prony hergeleitete Formel ist wohl bekannt. Noch bis auf den heutigen Tag erscheint sie in allen Werken über Hydraulik, wenigstens der Form nach, als die beste. Sie ist folgende:

$$RJ = av + bv^2$$

In derselben bedeuten:

R die hydraulische Tiefe (rayon moyen), d. h. der Querschnitt des Wassers, dividirt durch den benetzten Umfang;

J das Gefälle, die Neigung der Wasseroberfläche;

v die mittlere Geschwindigkeit des Wassers;

$a \left(= \frac{\alpha}{g}\right)$ und $b \left(= \frac{\beta}{g}\right)$ zwei Erfahrungscoëfficienten, welche de Prony aus 30 Messungsangaben von Dubuat und einer von de Chézy bestimmte. Die von ihm angenommenen Werthe sind für das Metermaass:

$$a = 0{,}000044; \quad b = 0{,}000309.$$

Etwas später gab Eytelwein folgende neue Werthe für diese Coefficienten:

$$a = 0{,}000024; \quad b = 0{,}000366$$

Ausser obigen 31 Angaben, welche de Prony gewählt hatte, benutzte er 55, von den deutschen Hydraulikern Brünings, Woltmann und Funk in Flüssen ausgeführte Messungen.

Da bei den Geschwindigkeiten über 1 Meter der erste mit a affektirte Ausdruck der Reibung des Wassers gegenüber dem andern sehr klein ist, und in den meisten Fällen vernachlässigt werden kann, so sind viele Hydrauliker auf die schon in Deutschland 1753 von Brahms und in Frankreich 1775 von de Chézy aufgestellte einfache monomische Formel:

$$RJ = bv^2 \text{ worin } b = 0{,}0004$$

angenommen wurde, zurückgekommen.

Während der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts sind aus den Beobachtungen, die gemacht worden sind, keine neuen Thatsachen für die neue Theorie gewonnen worden. Alle seit de Prony aufgestellten Formeln waren nichts anders, als neue Darstellungen der nämlichen Experimentalsätze.

Die vielfachen Anwendungen, die man von diesen Formeln bei den zahlreichen grossartigen Kanal- und Flussbauten zu machen hatte, gaben Anlass zur Erprobung derselben. Die unerwarteten Resultate, die man bezüglich der Wassertiefe in schiffbaren Kanälen erhielt, die ungenügenden Profile, die sich bei Hochwassern, an eingedämmten Flüssen zeigten u. s. w., veranlassten ein gerechtes Misstrauen in die Zulässigkeit der gebrauchten Formeln. Viele Hydrotechniker suchten sich gegen die Täuschungen der allgemeinen Formel sicher zu stellen, indem sie die mittelst derselben erhaltenen Werthe mit

selbst bestimmten Reduktionscoëfficienten multiplicirten oder indem sie sogenannte Localformeln, die sich auf einen speziellen Fluss bezogen, aufstellten. Für alle Modificationen, die man in praktischen Anwendungen an den Coëfficienten vornahm, hatte man indess keine Regel. Schon lange hat man also die Nothwendigkeit eingesehen, neue gründlichere Untersuchungen vorzunehmen, um die zur Correction der alten Formeln nöthigen neuen Thatsachen zu erforschen. Dupuit sagt in seinem sehr schätzbaren Werke: Etude sur le mouvement des eaux courantes: „On a donc commis une étrange confusion en „cherchant, comme l'a fait Eytelwein, à déterminer la „valeur des coëfficients au moyen d'expériences variées „dans lesquelles il devait y avoir des valeurs très diffé„rentes. Il suit de là que la plus grande incertitude règne „sur la valeur des coëfficients qu'on emploie, et qu'il „ne faut accorder aux résultats de la formule de Prony „qu'une confiance très limitée. Toute cette partie de „l'hydraulique est à refondre sous le rapport expéri„mental."

Die Unsicherheit der Formeln musste zum Nachdenken veranlassen. Es ergaben sich indess gewisse Thatsachen, die man nicht erklären konnte, ohne einige Sätze, auf welche diese Formeln gestützt waren, aufzugeben. Es zeigte sich z. B. bei einigen Wasserversorgungen mit gusseisernen Leitungen, dass nach einigen Jahren diese nicht mehr das ursprünglich gelieferte Wasserquantum abführen konnten. Bei nähern Untersuchungen fand man in den Röhren eisenhaltige Knollen, die sich an ihre Wände angesetzt hatten. Man glaubte Anfangs in dem durch diese Knollen verminderten Querschnitte der Röhren die natürliche Ursache dieser Abflussverminderung finden zu können; jedoch erzeigte es sich bei

näherer Untersuchung, dass wenn man schon den Querschnitt im Verhältniss des von den Knollen eingenommenen Raumes reduzirte, die Formel immerhin noch zu grosse Resultate gab. Eine Erklärung dieser Thatsache konnte somit nicht gegeben werden, ohne anzunehmen, dass die Beschaffenheit der Röhrenwand einen grossen Einfluss auf die Reibungscoëfficienten habe.

Hr. Darcy, inspecteur-général des ponts et chaussées, dem die Stadt Dijon ihre schöne Wasserversorgung verdankt, unternahm neue Untersuchungen an Röhren. Dieselben wiesen nach, dass die Beschaffenheit der Wand einen grossen Einfluss auf den Abfluss übt. Er fand die Geschwindigkeit desto grösser, je glätter und regelmässiger die innere Wandfläche war. Es ergab sich z. B. dass in alten Röhren die Widerstandscoëfficienten ungefähr doppelt so gross sind als in neuen, Darcy schloss mit Recht auf eine ähnliche Erscheinung in offenen Kanälen. Einzelne in gemauerten und mit Cement bestochenen Kanälen vorgenommene Messungen bestätigten überdiess die Richtigkeit seiner Annahme. Er unternahm nun mit Hülfe des Ingenieurs Bazin ausgedehnte Untersuchungen. Sowohl an einem eigens zu diesem Zweck angelegten Kanal von 596 Met. Länge, 2 Met. Breite und 1 Met. Tiefe, als auch an den Zuflusskanälen des Canal de Bourgogne, führte Bazin, nach dem früh eingetretenen Tode von Darcy, eine sehr zahlreiche Menge äusserst sorgfältiger Messungen aus. Die in den Experimentirkanal eingelassenen Wassermengen wurden mit grosser Genauigkeit bei den Einlassschleussen bestimmt. Auch wurden die Geschwindigkeiten des Wassers in verschiedenen Tiefen und in verschiedenen Vertikalen mittelst des »tube jaugeur“, der von Darcy verbesserten Pitot'schen Röhre, bestimmt. Die mittlere Geschwindigkeit konnte somit auf doppelte Weise ermittelt

werden, einmal indem die eingelassene Wassermenge durch den Wasserquerschnitt dividirt und ferner indem das arithmetische Mittel aus allen im gleichen Profil gemessenen Geschwindigkeiten berechnet wurde. Der Experimentirkanal bestand aus Abtheilungen mit verschiedenen Gefällen. Die innere Fläche wurde, um verschiedene Grade von Rauhheiten darzustellen, mit verschiedenartigen Verkleidungen versehen, z. B. mit reinem Cement, mit Backsteinen, mit kleinem und grobem Kies, mit gehobelten Brettern u. s. w.

Das Hauptergebniss der Untersuchungen von Bazin, bezüglich der gleichförmigen Bewegung des Wassers in offenen Kanälen, ist folgendes:

Die Reibungswiderstände des Wassers in Kanälen variiren mit dem Grade von Rauhheit der benetzten Fläche.

Der Satz, dass eine an die Wände angehängte Wasserschichte die eigentliche Umhüllung der Wassermasse bilde, an welcher die Reibung stattfinde, ist somit unrichtig. Die chemische Beschaffenheit hat zwar, wie Dubuat bemerkt, keinen Einfluss auf die Reibung, aber wohl die physische.

Bazin hat für die Formeln, welche er aus seinen Messungsresultaten hergeleitet hat, zwar die binomische Form angenommen, jedoch sind die beiden Ausdrücke, welche die Reibungswiderstände darstellen, nicht mehr wie bei de Prony, zwei Funktionen der Geschwindigkeit v, sondern es ist blos der eine eine Funktion von v und der andere eine Funktion der mittleren hydraulischen Tiefe R.

Wenn man also die einfache Formel nimmt:

$$V = C \sqrt{RJ},$$

in welcher man früher C als constant, oder nach der

de Prony'schen Formel als eine Funktion der Geschwindigkeit ansah, so ergibt sich aus der Formel von Bazin, dass C eine Funktion der hydraulischen Tiefe R ist.

Bazin hat auch eine Variation des Coëfficienten C mit der Variation des Gefälles wahrgenommen und zwar im Allgemeinen eine Zunahme dieses Coëfficienten C mit der Zunahme des Gefälles. Da indess dieser Einfluss des Gefälles sich als klein erwiesen hat, so glaubte er denselben in den Formeln vernachlässigen zu sollen, sowie auch den sehr gering gefundenen Einfluss der Form des Kanalquerprofils.

Die Formel von Bazin hat folgende allgemeine Form:

$$RJ = \left(\alpha + \frac{\beta}{R}\right) v^2 \text{ woraus } v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \frac{\beta}{R}}} \sqrt{RJ}$$

Die Coefficienten α und β variiren in derselben mit der Rauhheit des benetzten Umfangs. Bazin hat theils aus seinen Messungsresultaten im Experimentirkanal, theils aus Messungsresultaten an andern Kanälen und an Flüssen, die Werthe dieser Coëfficienten für vier Kategorien von Kanalwänden, bestimmt, und wie folgt für das Metermaass gefunden:

I. Kanäle mit sorgfältig gehobelter Holzeinfassung oder mit reinem Cement ausgekleidet:

$$\alpha = 0{,}00015, \quad \beta = 0{,}0000045$$

II. Kanäle mit Einfassung aus ungehobelten Brettern oder aus Quadersteinen oder Backsteinen:

$$\alpha = 0{,}00019, \quad \beta = 0{,}0000133$$

III. Kanäle mit Einfassung aus Bruchsteinmauerwerk;

$$\alpha = 0{,}00024, \quad \beta = 0{,}0000600$$

IV. Kanäle in Erde:

$$\alpha = 0{,}00028, \quad \beta = 0{,}0003500$$

Es ist hier zu bemerken, dass noch mehr Kategorien

aufgestellt werden können. Ingenieur Kutter in Bern, welcher Coëfficiententafeln nach den Formeln von Bazin für das Schweizermaass berechnet hat, hat eine 5. Kategorie beigesetzt, nämlich für Flüsse oder Bäche mit Geschieben. Die Werthe der Coëfficienten wurden besonders aus Messungsresultaten von Schweizerflüssen hergeleitet, und festgesetzt wie folgt:

$$\alpha = 0.00040, \quad \beta = 0.0007000.$$

Beinahe zur gleichen Zeit, als Bazin seine werthvollen Untersuchungen in Frankreich ausführte, waren in Nordamerika die Ingenieure Capitain A. A. Humphreys und Lieutenant L. H. Abbot damit beschäftigt, im Auftrage ihrer Regierung die Ausdehnung und die physische Beschaffenheit des Ueberschwemmungsgebietes des untern Mississippi, vom Ohio bis zur Mündung bei New-Orleans, auszumitteln, und ein Projekt für die Eindämmung dieses Stromes und seiner Nebenflüsse auszuarbeiten.

Der Mississippi, der zweitgrösste Strom der Erde, hat auf der genannten Strecke ein Ueberschwemmungsgebiet, welches ungefähr dem Flächeninhalt Deutschlands gleichkommen mag. Sein Bett hat eine mittlere Breite von 1000 bis 1500 Meter und eine Maximaltiefe von 45 Meter. Unterhalb der Einmündung des Ohio in den Mississippi, beträgt der Unterschied des niedrigsten und höchsten Wasserstandes 15 Meter und die grösste Abflussmenge wird auf circa 33000 Kubikmeter per Sekunde angegeben, bei einer mittleren Geschwindigkeit von 2, 10 Meter.

Während ungefähr 10 Jahren, von 1850 bis 1860, arbeitete die sogenannte Mississippi-Commission, welche keine der bereits aufgestellten Geschwindigkeitsformeln für ihre Zwecke genügend fand und daher eine direkte Ermittlung der Gesetze der Bewegung des Wassers in

diesem Strome für nothwendig hielt, an den hydrometrischen, geologischen und physikalischen Erhebungen, sowie an den verschiedenen Vermessungen. Bei der grossen Breite und besonders bei den grossen Tiefen des Stromes, waren die Wassermessungen mit ungewöhnlichen Schwierigkeiten verbunden. Für die Erhebung der mittleren Geschwindigkeiten des Wassers in verschiedenen Tiefen konnten die gewöhnlichen Instrumente, wie der Woltmann'sche Flügel und die Pitot'sche Röhre, nicht gebraucht werden. Es wurden desshalb Doppelschwimmer angewandt, von denen der schwerere in der jeweilen bestimmten Tiefe, der leichtere dagegen an der Oberfläche schwamm. Beide waren durch ein dünnes Hanfseil verbunden. Die Linie, welche den Weg der Schwimmer bezeichnete, wurde von einer Basis am Ufer aus, mittelst zweier an den Enden derselben aufgestellten Theodolithe bestimmt und die Zeit, iu welcher die Schwimmer den Weg zwischen bestimmten Punkten zurücklegten, genau beobachtet. Es wurden so, in ausgewählten regelmässigen Stromstrecken, deren Querschnitt durch genaue, in bestimmten Abständen vorgenommene Tiefenmessungen ermittelt wurde, die Geschwindigkeiten des Wassers in mehreren Tiefen und an mehreren Stellen des Flussbettes gemessen.

Aus diesen Messungen ergab sich:

1) Dass die grösste Geschwindigkeit des Wassers in einer Vertikalen, bei flussabwärts wehendem Winde, beinahe an der Oberfläche vorkomme, bei ruhiger Luft, nahezu 0,30 der ganzen Tiefe unter derselben liege, und bei flussaufwärts wehendem Winde, sogar unter die mittlere Tiefe hinabsinke, und dass von dem Punkt, wo sie am grössten ist, die Geschwindigkeit, sowohl abwärts bis auf die Sohle, als aufwärts bis an die Oberfläche abnehme;

2) Dass an der Oberfläche ebenfalls eine Geschwindigkeitsabnahme von der Mitte des Stromes gegen die Ufer stattfinde.

Humphreys und Abbot glaubten aus ihren Messungsresultaten schliessen zu können, dass diese Geschwindigkeitsabnahme, sowohl in der Vertikalen, als an der Oberfläche oder in einer horizontalen Querschnittsebene, nach einer Parabel stattfinde, deren Axe durch den Ort der grössten Geschwindigkeit geht und in welcher die Abscissen durch die Geschwindigkeiten selbst und die Ordinaten durch die Tiefen dargestellt werden. Dieses Parabelgesetz wird, wenigstens für die Geschwindigkeitsabnahme nach der Tiefe, auch von Bazin und anderen Autoren angenommen.

Die Ursache, dass die grösste Geschwindigkeit, selbst bei ganz stiller Luft, unter der Oberfläche liege, suchen die amerikanischen Beobachter von der Reibung der Luft und von dem Verlust an lebendiger Kraft herzuleiten. Da jedoch Bazin durch Experimente nachgewiesen hat, dass in kleinen Kanälen keine Reibung der Luft wahrnehmbar ist, wenn schon in denselben die grösste Geschwindigkeit auch nicht immer an der Oberfläche vorkommt, so kann die Richtigkeit obiger Ansicht bezüglich des Widerstandes der Luft in Zweifel gezogen werden.

Die Formel, welche nun Humphreys und Abbot aus ihren Beobachtungen und Messungen hergeleitet haben, ist folgende für das Metermaass :

$$v = \left[\sqrt{0{,}0025\, m + \sqrt{68{,}7\, R, \sqrt{J}}} - 0{,}05 \sqrt{m} \right]^2$$

wo

$$m = \frac{0{,}933}{\sqrt{R + 0{,}457}}$$

Die Buchstaben v und R haben hier die gleiche Bedeutung wie in den frühern Formeln und R, stellt den Flächeninhalt des Wasserquerschnitts dividirt durch den ganzen Umfang dieses Querschnitts dar.

Wie man sieht, ist diese Formel ziemlich complizirt und von den frühern sehr verschieden. Wenn man die einzelnen Ausdrücke derselben näher untersucht, so begreift man nicht, warum die beiden Funktionen von m in dieselbe eingeführt worden sind; denn sie geben immer sehr kleine Werthe, die nie einen grossen Einfluss auf das Gesammtresultat haben. Desshalb hat auch der deutsche Uebersetzer des Werks von Humphreys und Abbot, Hr. Grebenau, Baubeamter in Rheinbaiern, vorgeschlagen, diese Werthe in der Formel wegzulassen, wodurch dieselbe bedeutend vereinfacht wird und folgende Form annimmt:

$$v = K, \sqrt{R, \sqrt{J}}$$

Da R, nahezu die Hälfte von R ist, so kann man R, durch R ersetzen, woraus entsteht, wenn $\frac{K,}{\sqrt{2}} = K$ gegesetzt wird:

$$v = K \sqrt{R \sqrt{J}}$$

Der Coëfficient K ist, wenn man auf die ursprüngliche vollständige Formel Rücksicht nimmt, nicht ganz constant, aber, da die Variation desselben nur durch die weggelassenen Ausdrücke, die zwar Funktionen von R sind, aber doch mit diesen sehr wenig variiren, bedingt wird, so stehen die Grenzen, zwischen welchen er sich verändern kann, sehr nahe beisammen. Nach Berechnungen des Hrn. Kutter, zur Vergleichung dieser vereinfachten Formel mit der vollständigen, so-

wohl für Fälle mit grossen Tiefen und kleinen Gefällen, als für Fälle mit kleinen Tiefen und grossen Gefällen, variirt der Coëfficient K für das Metermass zwischen 5,7 und 5,0.

Stellen wir nun diese vereinfachte amerikanische Formel:

$$v = K \sqrt{R \sqrt{J}}$$

neben die Formel von Bazin:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \frac{\beta}{R}}} \sqrt{R J},$$

so sehen wir sofort, dass dieselben der Form nach weit auseinandergehen. Nach der ersten ist die Geschwindigkeit v der vierten Wurzel des Gefälles, nach der zweiten dagegen der Quadratwurzel des Gefälles proportional. Auch ist der Einfluss von R in beiden Formeln verschieden ausgedrückt. Nun entsteht die Frage, welche von beiden die richtige sei?

Da die amerikanische Formel nicht nur den Messungsresultaten vom Mississippi und seinen Nebenflüssen angepasst ist, sondern auch mit den Resultaten, die Grebnau bei seinen Messungen am Rhein und an Bächen Rheinbaierns erhielt, und überhaupt mit Messungsresultaten an Gewässern mit kleinen Gefällen und mit Tiefen über 2 Meter ziemlich gut übereinstimmt, so glaubten sofort einige Fachmänner, diese Formel könne als allgemein gültig angenommen werden. Wählt man aber einen Fall mit starkem Gefälle, so erhält man durch dieselbe Resultate, welche so sehr von den Messungsresultaten und den Resultaten der gewöhnlichen Formeln abweicht, dass sofort das grösste Misstrauen entsteht.

Ingenieur Kutter und der Verfasser haben zur Prü-

fung dieser Formel an Kanälen mit starken Gefällen, an den Wildbachschalen des Thunersees und an der Alpbachschale bei Meiringen, im Sommer 1867, zur Zeit wo ein etwas erheblicher Wasserabfluss stattfand (bis 131 Kubikfuss per Sekunde). Messungen vorgenommen. Wir fanden:

1. An der Grünnbachschale zu Merligen:

   Gefälle $J = 0{,}083$ bis $0{,}107$; hydraulische Tiefe $R = 0{,}108$ bis $0{,}198$; beobachtete mittlere Geschwindigkeit $v = 3^m{,}6$ bis $5^m{,}8$; mittelst der amerikanischen Formel berechnete Geschwindigkeit $0^m{,}8$ bis $1^m{,}3$.

2. An der Gerbebachschale bei Merligen:

   Gefälle $J = 0{,}112$ bis $0{,}237$; hydraulische Tiefe $R = 0{,}059$; beobachtete mittlere Geschwindigkeit $v = 2^m{,}6$ bis $3^m{,}1$; mittelst der amerik. Formel berechnete Geschwindigkeit $0^m{,}7$ bis $0^m{,}8$.

3. An der Gontenbachschale:

   Gefälle $J = 0{,}042$ bis $0{,}046$; hydraulische Tiefe $R = 0^m{,}098$ bis $0^m{,}112$; beobachtete mittlere Geschwindigkeit $2^m{,}9$ bis $3^m{,}3$, mittelst der amerikan. Formel berechnete Geschwindigkeit $0^m{,}7$ bis $0^m{,}8$.

4. An der Alpbachschale bei Meiringen:

   Gefälle $J = 0{,}023$ bis $0{,}032$; hydraulische Tiefe $R = 0^m{,}209$ bis $0^m{,}229$; beobachtete Geschwindigkeit $v = 2^m{,}4$ bis $2^m{,}6$; mittelst der amerikan. Formel berechnete Geschwindigkeit $0^m{,}9$ bis $1^m{,}0$.

Diese Resultate zeigen zur Genüge, dass bei Gewässern mit starken Gefällen die amerikanische Formel viel zu geringe Geschwindigkeiten gibt, indem z. B. bei den drei ersten Schalen die berechnete Geschwindigkeit nur $^1/_4$, bei der letzteren nur $^1/_3$ der wirklichen beträgt. Uebrigens geht nicht nur aus diesen Messungen, sondern aus einer Menge anderer, namentlich aus denjenigen von

Bazin, die Unbrauchbarkeit der amerikanischen Formel bei starken Gefällen hervor.

Wir können daher die Gültigkeit dieser Formel nur für gewisse Fälle, nämlich bei grossen Flüssen mit geringen Gefällen, zugeben. Für unsere gewöhnlichen Flüsse in der Schweiz z. B. ist sie unzulässig.

In Bezug auf die Formeln von Bazin ergiebt sich aus einer nähern Vergleichung der für viele Fälle berechneten Geschwindigkeiten mit den gemessenen Geschwindigkeiten, dass diese Formeln im Allgemeinen bei kleinen Gewässern mit Gefällen über 1 p. $^{00}/_{00}$ recht gut passen, und selbst für unsere gewöhnlichen europäischen Flüsse, bei Tiefen unter 6 Meter, auch noch sehr brauchbare Resultate geben.

Bei unsern Messungen an den Wildbachschalen haben wir den Satz, dass die Rauhheit der benetzten Fläche einen grossen Einfluss auf den Abfluss ausübe, vollkommen bestätigt gefunden. An der Gontenbachschale, wo das Mauerwerk am sorgfältigsten, mit grossen ziemlich gut bearbeiteten Steinen ausgeführt ist, fielen die wirklichen Geschwindigkeiten ziemlich in die Mitte zwischen die, mittelst der Bazin'schen Formel für das Quadermauerwerk und die mittelst derjenigen für das Bruchsteinmauerwerk berechneten Geschwindigkeiten, während an der Alpbachschale, wo das Mauerwerk mehr aus rauhen Bruchsteinen besteht und schadhaft ist, die Formel für Bruchsteinmauerwerk noch zu grosse Resultate giebt, und wo somit ein Rauhheitsgrad zwischen dem der gewöhnlichen Bruchsteine und dem der Erdverkleidung anzunehmen ist.

Will man dagegen die Formel von Bazin am Mississippi, wo die Gefälle so übermässig klein sind, dass sie bis auf 0.0000034 herabsinken, anwenden, so sieht

man sofort, dass sie nicht mehr passen, sondern zu kleine Resultate geben. Die Geschwindigkeiten werden nämlich nach diesen Formeln am grössten, wenn man den Werth R am grössten, d. h. gleich unendlich annimmt, da in dem Ausdruck $\alpha + \frac{\beta}{R}$ der zweite Werth $\frac{\beta}{R} = 0$ und nur der Werth α bleibt. Mithin wird in allen Fällen, da

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \frac{\beta}{R}}} \sqrt{RJ}$$

$$v < \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \sqrt{RJ}$$

Nehmen wir fur α selbst den für die glättesten Wände angegebenen Werth, nämlich $\alpha = 0{,}00015$, so wird

$$v < 81{,}5 \sqrt{RJ}$$

Bei einem Gefälle von 0.0000038, und einer hydraulischen Tiefe R von $22^m{,}7$, beträgt z. B. am Mississippi die wirkliche mittlere Geschwindigkeit $1^m{,}21$. Es ist somit

$$\sqrt{RJ} = 0{,}009282 \text{ und } v = 130 \sqrt{RJ}.$$

Die Formel von Bazin gibt hier eine viel zu geringe Geschwindigkeit, während dagegen die amerikanische Formel mit der Messung genau passt, indem sie folgendes Resultat gibt:

$$v = \frac{5{,}7 \sqrt{RJ}}{\sqrt[4]{0.00000038}} = 130 \sqrt{RJ}.$$

Die Formel von Bazin kann mithin ebenfalls nicht Anspruch auf allgemeine Gültigkeit machen.

Die Differenz zwischen der Formel von Humphreys und Abbot und derjenigen von Bazin, lässt sich ganz gut aus dem Umstand erklären, dass sie gleichsam extremen Verhältnissen entspringen und dass in jeder eine Funktion entweder von R oder von J weggelassen wurde, je nachdem

der Einfluss der einen oder der andern dieser variablen Grössen weniger erheblich gefunden wurde. Daraus schliessen wir, dass die Geschwindigkeiten, weder stets der Quadratwurzel von R, wie die amerikanische Formel angibt, noch stets der Quadratwurzel von J, wie bei der Formel von Bazin, proportional seien. Setzt man z. B. $v = \alpha J^x R^y$, so wird, wenn die durch obige Formeln dargestellten Fälle als extreme Fälle angesehen werden, der Exponent x ungefähr zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{2}$ und der Exponent y zwischen $\frac{1}{2}$ und 1 variiren müssen, je nachdem J und R klein oder gross werden. Wir sehen daraus, dass eine monomische Formel, mit constanten Exponenten von J und R, die Messungsresultate in ihrer Allgemeinheit nicht richtig geben kann. Versuche, solche monomische Formeln aufzustellen, sind von S. Venant und von Ingenieur Gaukler in Frankreich und ganz kürzlich von Oberbaurath Hagen in Berlin gemacht worden. Nach unserm Dafürhalten führen diese Versuche nicht zum Ziele; es wird leicht werden nachzuweisen, dass die aus denselben hervorgegangenen Formeln mit vielen Messungsresultaten sehr schlecht passen.

Ingenieur Kutter und der Verfasser haben den Versuch gemacht, aus den Messungsresultaten vom Mississippi und denjenigen von Bazin eine allgemeine gültige Formel herzuleiten. Alle Rechnungen und Untersuchungen zur Bestimmung der Coëfficienten sind von Hrn. Kutter ausgeführt worden. Der Verfasser hat sich lediglich mit der mathematischen Entwickelung und der graphischen Darstellung der Formel befasst. Diese soll hier noch in Kürze, so gut als möglich, behandelt und resümirt werden.

(Schluss folgt im Jahrgang 1869.)