

# Der Durchfluß des Wassers durch Röhren und Gräben insbesondere durch Werkgräben großer Abmessungen

von

**Dr. Philipp Forchheimer**

Hofrat, Professor, korr. Mitglied der Akademie  
der Wissenschaften in Wien

Mit 20 Textabbildungen



**Berlin**  
Verlag von Julius Springer  
1923

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.

ISBN-13:978-3-642-89688-0

e-ISBN-13:978-3-642-91545-1

DOI: 10.1007/978-3-642-91545-1

## Vorwort.

Den Anstoß zu der vorliegenden Untersuchung bot ein in der „Wasserkraft“ vom 15. April 1920 veröffentlichter und zu gleicher Zeit an Fachleute, Unternehmungen und Industriefirmen verschickter „Aufruf zu Beiträgen für Modellversuche und sonstige hydraulische Untersuchungen an großen Kanälen“. Er trug die Unterschrift von Professor Dr.-Ing. Camerer, Professor Dantscher, Dr.-Ing. h. c. Ministerialrat v. Hensel, dem Staatskommissar für den Ausbau der Mittleren Isar, Regierungs- und Baurat Krieger, Regierungsbaumeister a. D. Dr. Rümelin, dem Direktor der Landesstelle für Gewässerkunde Oberregierungsrat Sommer und Geh. Hofrat Universitätsprofessor Dr. Sommerfeld. Ein tragisches Geschick wollte es, daß dieselbe Zeitschrift innerhalb zweier Jahre den Tod von drei Unterzeichnern -- Dr. Rümelin, Professor Camerer und Ministerialrat v. Hensel -- beklagen mußte. Ihrer sei hier dankend gedacht.

Der Aufruf hatte den Erfolg, daß schon im Sommer 1920 mit den Arbeiten begonnen werden konnte. Mir wurde die Aufgabe übertragen, mich mit der Strömung in großen Kanälen zu befassen, oder enger umschrieben, das Gefälle anzugeben, das für die Förderung einer gegebenen Wassermenge durch ein Gerinne von großen Abmessungen erforderlich ist. Die Beantwortung dieser Frage bildet daher den Hauptinhalt der nachstehenden Schrift. Ferner befaße ich mich in ihr, weil hierüber der deutschen Fachwelt zur Zeit keine gesammelten Daten vorliegen, mit dem Durchfluß durch Betonröhren, sowie auch mit dem Fließen im allgemeinen.

Zur Vornahme eigener Messungen wurden mir die nötigen Mittel zur Verfügung gestellt; auch wurde ich in meinen Arbeiten von verschiedenen Seiten gefördert, wie dies aus der Schrift selbst hervorgeht. Insbesondere stand mir die bayerische Landesstelle für Gewässerkunde hilfreich bei. Spender und Förderer hatten vor allem die Sicherung und Verbesserung der hydraulischen Grundlagen für den Entwurf von Wasserkraftwerken im Auge. Demselben praktischen Ziel trachtete ich bei dieser meiner Arbeit näher zu kommen.

Wien, im Oktober 1922.

Ph. Forchheimer.

## Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Bemerkungen über die bisherigen Messungen . . . . .	1
2. Zur Bauweise der Fließformeln . . . . .	5
3. Beziehung zwischen geschlossenen und offenen Gerinnen .	7
4. Der Exponent $\nu$ des Gefälles bei Fließen in Röhren . . .	8
5. Die Exponenten $\nu$ und $\mu$ und der Koeffizient $\lambda$ für das Fließen in Betonröhren . . . . .	11
6. Der Exponent $\nu$ des Gefälles bei Fließen in festen offenen Gerinnen . . . . .	15
7. Der Exponent $\nu$ des Gefälles bei Fließen in Erdbetten . .	19
8. Der Exponent $\mu$ des Profilradius bei Fließen in festen offenen Gerinnen . . . . .	20
9. Der Koeffizient $\lambda$ für Gerinne mit fester Wandung . . .	26
10. Der Exponent $\mu$ des Profilradius bei Fließen in Erd- und Kiesbetten . . . . .	37
11. Der Koeffizient $\lambda$ für Erd- und Kiesbetten . . . . .	43
12. Die Beziehung zwischen $\lambda$ und $n$ . . . . .	50

## 1. Bemerkungen über die bisherigen Messungen.

Soweit es sich um die Bewegung des Wassers in künstlichen Gerinnen handelt, sind heute noch die wichtigsten Beobachtungen jene, die Darcy einleitete, dann Bazin durchführte und mit noch einigen fremden 1865 unter dem Namen *Recherches experimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts*<sup>1)</sup> veröffentlichte. Im ganzen sind es 50 mit Nummern bezeichnete Versuchsreihen, von welchen die Nummern 1 bis 17, 19 bis 27 und 32 bis 35 für die erwähnte Frage von Bedeutung sind<sup>2)</sup>, während bei 18 anscheinend Fehler unterliefen, 28 bis 31 sich auf Profilradien von nur 1 bis 3 cm beziehen und die zu meist in Erdstrecken veranstalteten Serien 36 bis 50 zu große Unregelmäßigkeiten<sup>3)</sup> aufweisen, um in Betracht zu kommen. Der bleibende Wert der Arbeit Bazins beruht darauf, daß er mit Genauigkeit voringing, regelmäßige Gerinne von vorgeschriebenen Querschnitten und Oberflächen herstellen ließ, für gleichmäßigen Durchfluß sorgte, das Gefälle durch Messung der Tiefenlage des Wasserspiegels unter Querlatten bekannter Höhenlage feststellte und Längenprofile des Spiegels aufnahm. Nicht ausreichend in Anbetracht der Bedürfnisse der heutigen Technik waren die Querschnittsabmessungen seiner Kunstgerinne, denn deren größte Tiefe betrug bei dreieckigem Querschnitt und der tiefsten Stelle in der Mitte 0,995 m, bei Halbkreisquerschnitt 0,720, welche Tiefen aber nur Ausnahmen bildeten. Bazin faßte seine Ergebnisse in einer Fließformel (seiner älteren) zusammen, die, wenn  $J$  das Spiegelgefälle,  $R$  den Profilradius in m,  $U$  die Geschwindigkeit in m/sec bedeutet,

$$(1) \quad \frac{RJ}{U^2} = 0,00015 \left( 1 + \frac{0,03}{R} \right) \text{ bis } 0,00028 \left( 1 + \frac{1,25}{R} \right)$$

oder

$$(1a) \quad U = \frac{81,65}{\sqrt{1 + \frac{0,03}{R}}} \sqrt{RJ} \text{ bis } \frac{59,8}{\sqrt{1 + \frac{1,25}{R}}} \sqrt{RJ}$$

lautet.

---

<sup>1)</sup> Paris, Mémoires présentés par divers savants à l'académie des sciences, 59 (1865).

<sup>2)</sup> Vgl. Abb. 6, S. 22. <sup>3)</sup> Vgl. Abb. 7, S. 23.

Bald nach den Recherches wurden in Europa Humphreys und Abbots Mississippi-Messungen bekannt, welche damals für genau galten. Sie bewogen die Schweizer Ingenieure Ganguillet und Kutter<sup>1)</sup>, ihren bekannten Ausdruck

$$(2) \quad U = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{J}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \sqrt{RJ}$$

aufzustellen, der sich wesentlich dadurch kennzeichnet, daß nach ihm, je nachdem der Profilradius  $R \geq 1$  m ist, die de Chézysche Zahl  $c$  des Ausdruckes  $U = c \sqrt{RJ}$  mit wachsendem Gefälle  $J$  ab- oder zunimmt. Trotz ihrer Umständlichkeit und dem Mißstande, daß die Rauheit  $n$  im Zähler als unbenannte Zahl und im Nenner als Längenwurzel erscheint, hat in Deutschland, England und Amerika Gl. (2) ihre große Verbreitung gefunden, so daß die Rauheiten  $n$  den meisten mit Wasserbauentwürfen beschäftigten Ingenieuren geläufig sind. Dabei stand das Beobachtungsmaterial, welches Ganguillet und Kutter dem Bazinschen hinzufügen konnten, an Güte beträchtlich hinter diesem zurück. Die alten Mississippi-Messungen, die nur mit Doppelschwimmern vorgenommen worden waren, sind seitdem als ungenau erkannt worden<sup>2)</sup> und die eigenen Schwimmermessungen Kutters waren als solche mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Einen wesentlichen Vorzug der Bazinschen Versuche hatte ferner, soweit sie Gerinne betrafen, ihre Vornahme in ganzen Serien gebildet, während der neue Stoff fast ganz aus Einzelbestimmungen bestand. Dagegen schien eine bessere Eignung für natürliche Gewässer ein Vorzug der Schweizer Formel zu sein.

Genaue tiefreichende Aufnahmen in großen Flüssen mit Hilfe von Woltmannflügeln nahmen ein Jahrzehnt später ihren Anfang mit denen Harlachers in Böhmen. Andere Länder folgten schrittweise nach, und so wurden die Durchflüsse mehr und mehr bekannt. Diese wollte man in erster Linie erfahren und höchstens nebenbei den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Profilradius und Gefälle aufhellen, welches letzteres daher häufig gar nicht erhoben wurde. Zudem ging man bei der Gefällsbestimmung meist unzweckmäßig vor. Während das Wasser eines Stromes, wie unbeirrt durch örtliche Störung, gleichmäßig dahinfließt, ist das Gefälle örtlich und zeitlich beständigem Wechsel unterworfen. Einen Beleg hierfür bieten z. B. die Messungen, die in der

<sup>1)</sup> Z. österr. Ing.- u. Arch.-Ver. 21 (1869), S. 6, 46.

<sup>2)</sup> E. Beyerhaus bemängelt besonders die Gefällebestimmung, Zentralbl. Bauv. 41 (1921), S. 168. Er betont mit Recht, daß überhaupt das Gefälle der Energielinie, welche die Änderung der Geschwindigkeitshöhe berücksichtigt, vom Spiegelgefälle oft stark abweicht. Über die Mängel der Doppelschwimmer s. H. Bazin, Ann. Ponts Chauss. (6) 7<sup>1</sup>, S. 554, 1884.

Donau an der Kaiser-Franz-Joseph-Brücke bei Wien 1898 und in Stein 1897 stattfanden, und mit Einführung des örtlichen Gefälles als Gefälle  $J$  für die Geschwindigkeit zu den Ausdrücken <sup>1)</sup>

$$(3) \quad U = 204 R^{0,39} J^{0,67} \text{ bzw. } 1,37 R^{0,71} J^{0,09}$$

führten. Dieses Gefälle  $J$ , welches damals in Wien zwischen 0,000439 und 0,000576 und in Stein zwischen 0,00045 und 0,0013 schwankte, kann offenbar nicht als das für eine gleichförmige Bewegung zutreffende gelten. Den schlagenden

Nachweis, daß dem auf kurzer Strecke herrschenden Gefälle nur eine geringfügige Bedeutung für die mittlere Geschwindigkeit zukommt, lieferte Ende 1919 Ministerial-

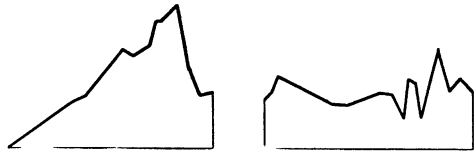


Abb. 1. Wasserstand und Gefälle in Firgental.

— die augenblicklichen Gefälle lehrenden — Albrechtschen Gefällsmesser. Insbesondere sei auf zwei Messungen <sup>2)</sup> im Trostberger Kanal hingewiesen, wo trotz fast gleichem Querschnitt, Durchfluß und Wandzustand in Firgental im Mittel  $J = 0,00012$  und bei der Mußenmühle = 0,000437 bestimmt wurde, wobei allerdings bemerkt werden muß, daß die schwankende Turbinenbelastung in Werkgräben besonders starke Gefällswechsel verursachen kann.

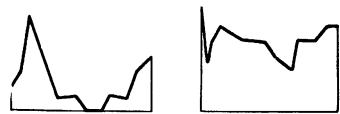


Abb. 2. Wasserstand und Gefälle in Firgental.

Die Figuren links geben die Wasserstände, die Figuren rechts die Gefälle während der Messung an. Jeder mm Länge stellt  $\frac{1}{3}$  Minuten dar. Links sind die Höhen

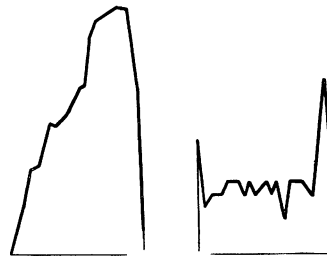


Abb. 3. Wasserstand und Gefälle an der Mußenmühle.

in  $\frac{3}{4}$  der wirklichen Größe aufgetragen, rechts bedeutet 1 mm Höhe 0,0133‰ Gefälle. Es war in Firgental am 2. XII. 1919 (Abb. 1) der Querschnitt  $F = 41,4 \text{ m}^2$ , der Profilradius  $R = 2,17 \text{ m}$ , der Durchfluß  $Q = 48,4 \text{ m}^3/\text{sec}$ , am 3. XII. (Abb. 2)  $F = 41,4 \text{ m}^2$ ,  $R = 2,17 \text{ m}$ ,  $Q = 47 \text{ m}^3/\text{sec}$ , an der Mußenmühle am 3. XII. 1919 (Abb. 3)  $F = 42 \text{ m}^2$ ,  $R = 2,17 \text{ m}$ ,  $Q = 49,3 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

Ursprünglich glaubte man aber, wie gesagt, daß das Gefälle auf recht kurzer Strecke zu erheben sei. So wurde es in Österreich Vorschrift, bei kleinen Wasserläufen das Gefälle einer Strecke von der Länge gleich

<sup>1)</sup> Hydrographischer Dienst in Österreich, Jahrb. d. hydrograph. Zentralbureaus 6 = 1898 (Wien 1900), Donaugebiet S. 304, 308, 311.

<sup>2)</sup> Unveröffentlicht. S. auch Wasserkraft. Heft 18, 1919.

der dreifachen Flußbreite zu messen <sup>1)</sup>;  $\frac{2}{3}$  der Strecke sei vom Meßquerschnitt stromauf,  $\frac{1}{3}$  stromab zu nehmen, obwohl doch in Flüssen nach Boussinesq der Abflußvorgang von unten beherrscht wird.

Heute ist man bedacht, gleichförmige Flußstrecken aufzusuchen. Früher war das weniger der Fall. So mag es zur Kennzeichnung der Wandlung unserer Ansichten von Interesse sein, die 1907 veröffentlichten Angaben der schweizerischen Behörde <sup>2)</sup> aufzuzählen und anzudeuten, warum sie trotz sorgfältiger Erhebungen des Durchflusses nur ausnahmsweise einen Schluß auf das Widerstandsgesetz zulassen:

Dohle im Simplontunnel: der Spiegel war so wellig, daß der Bericht nur das Sohlengefälle in Betracht zieht; Zuleitungskanal Rheinfelden: die Meßstelle lag bei 55,73 m Spiegelbreite nur 190 m unterhalb des Grobrechens; Rhein bei Rheinfelden: Meßquerschnitt an etwas verengter Stelle eines Flußbogens 300 m unterhalb der Untergrabenmündung; Tavernbach: unregelmäßiger Bach; Rhone bei Zenhäusern: unregelmäßiger Fluß; Simme: bei 17,6 m Spiegelbreite wurde das Gefälle nur längs 20 m bestimmt. Mühlebach in Burgdorf: Meßquerschnitt anscheinend 10 m unterhalb der Radstube, Spiegelbreite 3,7 m, Gefälle längs 20 m bestimmt; Kanal des Elektrizitätswerkes Aarau: Gefälle längs 200 m zu 0,000120 bestimmt, brauchbar; Impianto idraulico di S. Giovanni Lupatoto: der Bericht sagt, daß wegen Schwankungen das Gefälle sich nicht genau ermitteln ließ; Sitter-Tunnel: wertvolle Serie; Rhein bei Nol und Mastrils: Schwimmermessungen.

Falls es hiernach, wie die Beispiele zweier Länder zeigen, an systematischen Versuchsreihen fehlte und die Genauigkeit der Gefällsbestimmung recht zu wünschen ließ, so fanden dafür Einzelmessungen in solcher Menge statt, daß sich bei deren Zusammenfassung die Fehler mehr oder weniger ausglich. So war es möglich, bei Wahl einer Fließformel (z. B. der von Ganguillet und Kutter) diese durch Bestimmung der in sie einzusetzenden Beiwerte (in diesem Falle die Rauheit  $n$ ) brauchbar zu machen. Deren willkürliche Wahl hörte auf, als man für die Flüsse mit beweglichem Bett zu den Formeln ohne Rauheitsziffer vorschritt. Wieder war es neben der kritischen Auswahl der Beobachtungen in erster Linie das Heranziehen solcher in großer Zahl — zu vielen Hunderten — durch welches man zur Lösung zu kommen trachtete. Die Ausdrücke ohne Rauheitsziffer — meistens Exponentialmonome — bilden also die rechnerische Zusammenfassung der zahlreichen in offenen natürlichen Läufen ausgeführten Durchflußbestimmungen. Stellt man statt dessen die Messungen zusammen, die an ein und derselben Flußstelle gemacht worden sind, wofür unter anderem die Jahrbücher des österreichischen hydrographischen Zentralbureaus viele Beispiele bieten,

<sup>1)</sup> Vgl. z. B. R. Siedek, Z. österr. Ing.- u. Arch.-Ver. Bd. 55 (1903), S. 104.

<sup>2)</sup> Die Entwicklung der Hydrometrie in der Schweiz. Bern 1907.



so kommt man immer wieder auf Unstimmigkeiten, die in der Unregelmäßigkeit des Bettes, der Ungleichförmigkeit des Fließens (also dem Vorhandensein einer Beschleunigung oder Verzögerung) oder der ungenauen Gefällsermittlung ihren Grund haben mögen.

Während die Literatur, wie gesagt, von zahlreichen Messungen in natürlichen Läufen aller Art vom Riesel bis zum Strom berichtet, fehlen solche in regelmäßigen künstlichen Gerinnen großer Abmessungen. Um den in ihnen auftretenden Reibungswiderstand zu erfahren, waren daher neue Messungen nötig. Wie aus dem Nachfolgenden hervorgehen wird, hat der Verfasser mit Unterstützung der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, sowie der „Mittleren Isar“ solche in 8 Strecken der Werkkanäle von Deutsch-Feistritz-Peggau, Trostberg-Tacherting, Garching-Neukirchen und des Uppenbornwerkes nördlich München vorgenommen, welchen Messungen die genannte Landesstelle noch solche am Werkgraben der Lechwerke bei Stettenhofen beifügte. Außerdem stellte ihm das österreichische hydrographische Zentralbureau unveröffentlichte Messungen zur Verfügung, die an 7 Stellen des Betonrinnen des Wienflusses in Wien vorgenommen worden waren, und der ehemalige Bauleiter der Wasserkraftanlage der Bayerischen Stickstoffwerke in Trostberg und Tacherting, der damalige Regierungsbaumeister a. D. Dr. Th. Rümelin, die nach Fertigstellung des Baues von ihm daselbst angeordneten Erhebungen. Auf die Einzelheiten wird im Laufe der Abhandlung eingegangen werden.

## 2. Zur Bauweise der Fließformeln.

Oben sind bereits zwei Fließformeln — die ältere von Bazin und die von Ganguillet und Kutter — angegeben worden. Letztere, die sich für

$$\frac{1}{n} + \frac{0,00155}{J} = 77$$

zu

$$U = \frac{100 \sqrt{R}}{(100n-1) + \sqrt{R}} \sqrt{RJ} = \frac{100}{1 + \frac{100n-1}{\sqrt{R}}} \sqrt{RJ}$$

vereinfacht, bewog Bazin, seinen älteren Ausdruck durch

$$(4) \quad U = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \sqrt{RJ}$$

zu ersetzen<sup>1)</sup>, worin  $\gamma$  für Holz, Quader, Ziegel = 0,16, für Pflaster und regelmäßiges Erdbett = 0,85 und für Erdkanäle üblichen Zustandes

<sup>1)</sup> Ann. Ponts Chauss. (7), 7<sup>4</sup>, (1897), S. 55.

= 1,30 zu setzen sei. Die Fließformel (4) ist heute, wenn auch kaum mit Recht, vielleicht die beliebteste. In Bayern insbesondere stark in Gebrauch ist jedoch die von Biel, die für nicht allzu kleine Abmessungen und Geschwindigkeiten

$$1000 J = \frac{U^2}{R} \left( 0,12 + \frac{f}{\sqrt{R}} \right)$$

oder

$$(5) \quad U = \frac{\sqrt{1000}}{\sqrt{0,12 + \frac{f}{\sqrt{R}}}} \sqrt{RJ} = \frac{91,29 R^{3/4}}{\sqrt{\sqrt{R} + 8,33 f}} \sqrt{J}$$

lautet, worin man für älteren Beton  $f = 0,12$ , für Erde  $f = 0,45$  zu nehmen pflegt<sup>1)</sup>, so daß man

$$(5a) \quad U = \frac{91,29 R^{3/4}}{\sqrt{\sqrt{R} + 1}} \sqrt{J} \quad \text{bzw.} \quad = \frac{91,29 R^{3/4}}{\sqrt{\sqrt{R} + 3,75}} \sqrt{J}$$

hat.

Die angegebenen Gl. (1) bis (5) deuten bereits die Verschiedenartigkeit der für die Fließformeln gewählten Bauweisen an. Fast seit Beginn der einschlägigen Forschung nahm ein Teil der Fachleute keinen Anstand, mehr oder weniger verwickelte Ausdrücke aufzustellen, vorausgesetzt, daß diese nur erste und zweite Potenzen und Wurzeln enthielten, während andere Forscher als Geschwindigkeits- oder Gefälleausdruck ein Monom verlangten und dafür gebrochene Exponenten zuließen. Formeln wie die Biels mit dritten oder vierten Wurzeln bildeten gewissermaßen den Übergang zwischen beiden Gruppen<sup>2)</sup>. Der erste, der eine Exponentialgleichung, und zwar für Röhren, gab, war Woltmann<sup>3)</sup> 1791, dem später Eytelwein 1796, de Saint-Venant 1851 und Hagen 1854, dieser mit dem Ausdruck<sup>4)</sup>

$$(6) \quad J = \text{konst.} \frac{U^{1,75}}{R^{1,25}},$$

folgten. Der Unterschied der beiden Bauweisen ist übrigens mehr ein formaler als ein sachlicher, da im allgemeinen keine Ableitung aus einem Grundgesetz versucht wurde. Denkt man sich nun nach einer Fließformel der erstgenannten Gruppe, falls man sie für genau halten sollte, die Profilradien und Gefälle, also  $R$  und  $J$ , als zueinander rechtwinklige Koordinaten aufgetragen und die Geschwindigkeiten  $U$  als senkrechte Koordinaten, so erhält man eine Fläche. Es ist dann immer

<sup>1)</sup> Mitteilungen über Forschungsarbeiten, Heft 44. Berlin 1907. Biel selbst gibt allerdings für so große Rauigkeit hier keine Zahlen.

<sup>2)</sup> Näheres s. Forchheimer, Hydraulik. Leipzig 1914. S. 37, 62.

<sup>3)</sup> Woltmann, Beiträge zur hydraulischen Architektur 1. Göttingen 1791.

<sup>4)</sup> Über den Einfluß der Temperatur auf die Bewegung des Wassers. Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften. Berlin 1854.

möglich, innerhalb eines beschränkten Gebietes sich dieser Fläche mit einer neuen

$$(7) \quad U = \lambda R^\mu J^\nu$$

durch passende Wahl der Zahlen  $\lambda$ ,  $\mu$  und  $\nu$  so zu nähern, daß die eine Fläche praktisch durch die andere ersetzt werden kann. Wo die beiden Flächen merklich voneinander abweichen würden, kann man durch Einführung neuer Werte von  $\lambda$ ,  $\mu$  und  $\nu$  dann abermals genügende Übereinstimmung erlangen. Hier sei nur betont, daß die Annäherung an die Wirklichkeit bei Gebrauch der Bauweise (7) eine enge ist, für ganz glatte Röhren, sogar innerhalb der Genauigkeitsgrenzen unserer Beobachtungen liegt. In offenen Gerinnen steht andererseits die Proportionalität der Geschwindigkeit  $U$  mit einer Potenz  $R^\mu$  innerhalb weiter Grenzen fest, liefert doch z. B. die Auftragung von  $\log R$  und  $\log U$  nach Bazins Versuchen als Koordinaten in über 30 Fällen gerade, in weniger als 20 Fällen unregelmäßig gebrochene (also bedeutungslose) und nur in 1 oder 2 Fällen solche Punktfolgen, die man als Punkte gesetzmäßig verlaufender Kurven auffassen könnte. So sind denn in den Vereinigten Staaten die Hydrauliker schon seit einigen Jahren dazu übergegangen, die Form (7) den mehr oder weniger willkürlichen sonstigen Bauarten vorzuziehen, wovon man sich beim Durchblättern der Lehrbücher von F. C. Lea <sup>1)</sup>, H. J. Hughes und A. T. Safford <sup>2)</sup> oder E. A. Moritz <sup>3)</sup> überzeugen kann.

### 3. Beziehung zwischen geschlossenen und offenen Gerinnen.

Die experimentelle Bestimmung von  $\mu$  und  $\nu$  böte keine besondere Schwierigkeit, wenn man wüßte, daß in Röhren und offenen Gerinnen ein und dasselbe Gesetz gilt, denn in Röhren kann man unschwer das Gefälle  $J$  (also das Verhältnis des Druckhöhenverlustes zur Rohrlänge), in offenen Läufen die Füllung und hiermit den Profilradius  $R$  verändern, ohne daß sich dabei in den Röhren  $R$ , in den Offenläufen  $J$  ändern. Leider liegen als Beleg für das übereinstimmende Verhalten der beiden Gerinnearten nur zwei Versuche von Bazin mit Kastenleitungen von 0,8 m Weite auf 0,5 m Höhe bzw. 0,48 m Weite auf 0,3 m Höhe vor<sup>4)</sup>, die man später durch Abtragen der oberen Hälften in offene

<sup>1)</sup> Hydraulics. New-York und London. Vorrede von 1907.

<sup>2)</sup> A Treatise on Hydraulics. New York 1911.

<sup>3)</sup> Working Data for Irrigation Engineers. New York und London 1915.

<sup>4)</sup> Mémoires présentés par divers savants 19 (1865), Serie 19 und 20, S. 176. Ein Versuch von Christen (Das Gesetz der Translation des Wassers. Leipzig 1903. S. 48) kommt schon deswegen nicht in Betracht, weil er seiner Röhre von 0,0406 m Durchmesser und 2,55 m Länge 0,010 und 0,0142, seiner Halbröhre aber 0,0387 Gefälle gab.

Gerinne verwandelte. Bei gleichem Gefälle 0,0043 im einen, 0,006 im anderen Falle stellten sich in beiden Gerinnen gleiche mittlere Geschwindigkeiten ein. Dabei war die Geschwindigkeitsverteilung im späteren halben Gerinne eine andere wie früher in der Unterhälfte. Etwas besser glich die Verteilung in einer Halbkreisrinne der in einem vollen Rohr. Bazin drückt die Erscheinungen in den Worten aus, daß das Wasser durch die Luftreibung nicht merklich verzögert werde. Die Übereinstimmung der mittleren Geschwindigkeit im geschlossenen Gerinne und seinen Hälften ist offenbar nur möglich, wenn der Profilradius in den beiden Bewegungsgesetzen dieselbe Rolle spielt, was mit der herrschenden Ansicht im Einklang steht. Neben der Länge des Profilradius zeigte sich aber auch die Querschnittsform von Belang, denn das Wasser nahm bei gleichem  $R$  und  $J$  in einer Halbkreisrinne eine etwa 1,1 mal so große mittlere Geschwindigkeit wie in einem rechteckigen oder trapezförmigen Gerinne an. Bazin<sup>1)</sup> schloß hieraus, daß es wesentlich die Ecken sind, welche bei polygonalem Querschnitt eine Geschwindigkeitsabnahme verursachen. In der Tat zeigen z. B. auch die seitdem vorliegenden vielen Aufnahmen, daß in den Ecken nur ein unbedeutender Durchfluß vor sich geht. Die Bedeutung dieser Erscheinung für die Übertragung eines Meßergebnisses von einem Gerinne auf ein anderes, sowie für die praktische Wahl der Querschnittsform eines Werkgrabens liegt auf der Hand.

#### 4. Der Exponent $\nu$ des Gefälles bei Fließen in Röhren.

Versuchsreihen, bei welchen man ein und dieselben Röhren mit verschiedenen Druckverlusten durchfließen ließ, liegen in beträchtlicher Menge vor. Wenn man die Logarithmen der  $J$  einer Reihe als Abszissen, die Logarithmen der  $U$  als Ordinaten aufträgt, so erhält man, wie O. Reynolds gezeigt hat, Punkte, die in einer Geraden liegen, womit der Nachweis erbracht ist, daß  $U$  der Potenz  $J^\nu$  proportional ist, falls  $\nu$  das Verhältnis der Lotrechten zu den Wagrechten bezeichnet. Auf Grund eigener Versuche, sowie solcher von Reynolds, Saph und Schoder und Lang hat speziell für ganz glatte Röhren und Wasser von 15° C Blasius<sup>2)</sup> gezeigt, daß

$$(8) \quad J = 0,000\,093\,34 \frac{U^{5/4}}{R^{5/4}}$$

oder die größtmögliche Geschwindigkeit bei gleichförmiger Bewegung

$$(8a) \quad U = 201 R^{5/7} J^{4/7} = 201 R^{0,71} J^{0,57}$$

ist, womit hier  $\nu = 0,57$  wäre.

<sup>1)</sup> a. a. O. S. 17, 102.

<sup>2)</sup> Z. V. d. I. 56 (1912), S. 639; Forchheimer, Hydraulik. Leipzig 1914. S. 54.

Die Versuche, auf die sich Blasius stützte, waren mit engen Röhren und verschiedenen Metallen gemacht worden; dasselbe  $\nu$  geben auch Holzrohre großen Durchmessers. So bestimmten in einem neuen Daubenrohr von 1841,5 mm Weite Marx, Wing und Hoskins <sup>1)</sup> für

$$U = 0,356 \quad 0,610 \quad 0,914 \quad 1,067 \text{ m/sec}$$

$$1000 J = 0,0851 \quad 0,204 \quad 0,408 \quad 0,557$$

womit sich unter der Voraussetzung, daß der Exponent  $\mu = \frac{5}{7}$  sei

$$\lambda = 131 \quad 136 \quad 137 \quad 134$$

oder genügend genau

$$(8b) \quad U = 135 R^{1/7} J^{4/7} = 135 R^{0,71} J^{0,57}$$

findet. Mit der Verrauhung der Innenleibung sank  $\nu$ , denn aus den Messungen, welche dieselben Ingenieure 2 Jahre später am gleichen Rohre vornahmen, berechneten Hughes und Safford <sup>2)</sup> für Fußmaß  $1000 J = 0,0473 \nu^{1,96}$  oder für metrisches Maß

$$(8c) \quad U = 49,06 J^{0,51} = 85,4 R^{0,71} J^{0,51}$$

Das Ergebnis von 28 Versuchsreihen mit zusammen 286 Messungen, welche teils von ihm selbst, teils von anderen Beobachtern an Holzleitungen — fast durchweg Daubenröhren — gemacht worden waren, faßt Scobey <sup>3)</sup> in die Formel

$$(8d) \quad U = 122 R^{0,65} J^{0,556}$$

zusammen, in der  $\nu = 0,556$  erscheint. Daß die Rauheit eine Abnahme von  $\nu$  bewirkt, geht auch aus nachstehender Zusammenstellung <sup>4)</sup> hervor:

Holzröhren			Neue Gußröhren		
Beobachter	Durchm. mm	$\nu$	Beobachter	Durchm. mm	$\nu$
Noble . . . . .	1118	0,578	Darcy . . . . .	82	0,508
„ . . . . .	1372	0,571	„ . . . . .	137	0,508
Marx, Wing u. Hoskins	{ 1841	0,581	„ . . . . .	189	0,512
			{ 1841	0,518	„ . . . . .
			Williams . . . . .	413	0,538
			Lampe . . . . .	419	0,536
			„ . . . . .	500	0,543
			Sherman . . . . .	914	0,500
			Stearns . . . . .	1219	0,521

<sup>1)</sup> Transactions of the American Society of Civil Engineers 40 (1898), S. 512.

<sup>2)</sup> Ebenda 44 (1900), S. 48.

<sup>3)</sup> The Flow of Water in Wood-Stave Pipe by Fred. C. Scobey, United States Department of Agriculture. Bulletin 376 (besprochen in Wasserkraft 16 (1921), S. 341).

<sup>4)</sup> Entnommen aus Lea, Hydraulics S. 137 mit Fortlassung aller engen und einiger sonstiger Röhren. Versuche an Röhren bis höchstens 6 Zoll (152 mm) Durchmesser machten Schoder und Gehring, Eng. Record 58 (1908), S. 241.

Genietete Schmiedeeisenrohre			Gereinigte Gußrohre		
Beobachter	Durchm. mm	$\nu$	Beobachter	Durchm. mm	$\nu$
Giltner u. Ketchum.	76	0,532	Darcy . . . . .	306	0,500
Ham. Smith . . . . .	279	0,569	Fitzgerald . . . . .	1255	0,498
„ „ . . . . .	298	0,529	„ . . . . .	1255	0,515
„ „ . . . . .	381	0,515			
Kuichling . . . . .	965	0,500			
Herschel . . . . .	1067	0,518			
„ . . . . .	1219	0,500			
Marx, Wing u. Hoskins	{1829	0,502			
Herschel . . . . .	{1829	0,541			
	2616	0,481			

Alte Gußrohre mit Ansätzen		
Beobachter	Durchm. mm	$\nu$
Darcy . . . . .	36	0,503
„ . . . . .	99	0,515
„ . . . . .	343	0,505
Sherman . . . . .	523	0,5
Fitzgerald . . . . .	1255	0,490
„ . . . . .	1255	0,500

Hiernach zeigten im Mittel

Glatte Metallrohre	Holzrohre	Neue Gußrohre	Genietete Schmiedeeisenrohre	Gereinigte Gußrohre	Alte Gußrohre mit Ansätzen
$\nu = 0,571$	0,562	0,528	0,519	0,504	0,502

und sinkt  $\nu$  vom höchsten Wert 0,571 mit zunehmender Rauheit auf 0,5 herab, welcher Schlußwert damit im Einklang steht, daß bei Einzelhindernissen wie plötzlichen Erweiterungen, Hähnen u. dgl. der Druckverlust, soviel man weiß, proportional  $U^2$  ist. Auffallend ist es, daß bei wachsendem Durchmesser  $\nu$  eher abzunehmen als zuzunehmen scheint. Man könnte denken, daß das Verhältnis der Unebenheiten zu den sonstigen Abmessungen im Strömungsgesetz dadurch zum Ausdruck kommt, daß für ein engeres, glatteres Rohr dasselbe  $\nu$  gilt wie für ein weiteres von rauherer Innenfläche. Das ist anscheinend nicht der Fall<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> H. Lang fand nach der Hütte (22. Aufl., 1915, Bd. 1) bei großer Geschwindigkeit — sie stieg bis 54 m/sec —  $J$  proportional  $U^2$ . Nach freundlicher Mitteilung verwendete er Kupfer- und Messingrohre bis zu 11 mm Lichtweite. — C. Camichel [Fortschritte der Physik im Jahre 1918, 74. Jahrg., 1. Abt., S. 76 u. Beibl. z. d. Ann. d. Physik 43 (1919), S. 758 nach Comptes Rendus Acad. des Sciences 167 (1918), S. 525] fand für  $U = 25$  bis 80 m/sec  $U$  proportional  $J^{1,93}$  in einem 3 mm weiten Rohr. — Es fehlt an Messungen bei großer Geschwindigkeit und größeren Durchmessern. —

### 5. Die Exponenten $\nu$ und $\mu$ und der Koeffizient $\lambda$ für das Fließen in Betonröhren.

Für den Vergleich der geschlossenen und offenen Gerinnen ist das Verhalten von Betonröhren belangreich: Erd- oder Pflasterflächen kommen ja in Röhren überhaupt nicht, Metallwände in offenen Läufen nur ausnahmsweise vor, Betonwandungen gibt es hingegen sowohl in den einen wie in den anderen. Da sei denn zunächst bemerkt, daß das Verhalten von Betonsträngen von deren Herstellungsweise abhängig ist. Am glattesten sind fugenlose (monolithische) Stränge, deren Beton im Rohrgraben über geölte Eisenformen (oder mit Blech verkleidete Holzschalung) gestampft wird, am rauhesten aus Einzelrohren zusammengesetzte Leitungen, bei denen man es versäumt hat, den beim Zusammenschieben an den Fugen austretenden Mörtel zu entfernen. Auch bezüglich der Betonleitungen ist Scobey<sup>1)</sup> eine Zusammenstellung zu ver-

Betonröhren.

Scobey's N mmer	Innen-Dm. = 4 R mm	Geschwin- digkeit U m/sec	Gefälle in ‰ = 1000 J	Länge der Meß- strecke m	Reihengleichungen	
					Ausdruck für 1000 J	Ausdruck für U unter Annahme der Formel $U = \lambda R^{0,7} J^\nu$
5	305	0,46—1,14	1,69 —7,65	56	6,38 $U^{1,813}$	98,6 $R^{0,7} J^{0,552}$
10	405	0,52—0,74	1,00 —2,09	578	3,66 $U^{1,985}$	83,4 $R^{0,7} J^{0,504}$
16	500	0,11—0,45	0,056—0,781	339	3,41 $U^{1,863}$	91,4 $R^{0,7} J^{0,537}$
17	500	0,19—0,60	0,102—0,946	235	2,61 $U^{1,981}$	87,1 $R^{0,7} J^{0,505}$
18	506	0,27—0,77	0,200—1,278	639	2,05 $U^{1,906}$	109,2 $R^{0,7} J^{0,524}$
19	509	0,29—1,23	0,230—3,20	—	2,10 $U^{1,903}$	108,3 $R^{0,7} J^{0,526}$
21	610	0,19—0,40	0,103—0,495	319	3,52 $U^{2,078}$	57,4 $R^{0,7} J^{0,481}$
22	759	0,20—0,57	0,094—0,806	701	2,61 $U^{2,054}$	57,9 $R^{0,7} J^{0,487}$
23	762	0,32—0,75	0,150—0,745	268	1,27 $U^{1,862}$	114,6 $R^{0,7} J^{0,537}$
26 <sup>2)</sup>	774	1,49—1,76	2,280—3,727	694	0,647 $U^{3,18}$	31,1 $R^{0,7} J^{0,315}$
27	799	0,91—2,01	0,673—3,275	40	0,844 $U^{1,971}$	111,9 $R^{0,7} J^{0,507}$
29	914	1,66—2,76	2,072—5,30	2220	0,652 $U^{2,166}$	83,0 $R^{0,7} J^{0,462}$
30	1067	0,31—0,80	0,076—0,530	4,16	0,671 $U^{1,889}$	120,6 $R^{0,7} J^{0,529}$
31	1067	0,30—0,79	0,042—0,429	115	0,777 $U^{2,432}$	47,4 $R^{0,7} J^{0,411}$
32	1164	0,43—0,97	0,096—0,544	2979	0,598 $U^{2,166}$	79,0 $R^{0,7} J^{0,462}$
35	1612	0,98—1,95	0,289—1,581	347	1,363 $U^{2,40}$	29,5 $R^{0,7} J^{0,417}$
36	2201	0,44—1,24	0,066—0,496	1280	0,324 $U^{1,912}$	101,5 $R^{0,7} J^{0,523}$
39	4419	0,48—1,42	0,031—0,253	2566	0,136 $U^{2,109}$	63,4 $R^{0,7} J^{0,474}$
40	4419	0,48—1,42	0,033—0,269	4249	0,134 $U^{2,029}$	75,6 $R^{0,7} J^{0,483}$
41	5486	1,22—6,10	0,108—2,397	1971	0,0812 $U^{1,93}$	105,9 $R^{0,7} J^{0,518}$

<sup>1)</sup> The Flow of Water in Concrete Pipe by Fred. C. Scobey, United States Department of Agriculture: Bulletin 852. Washington 1920 (besprochen in Wasserkraft Bd. 17 (1922), S. 1).

<sup>2)</sup> Das eigentümliche Verhalten ( $\nu = 0,315$ ) dieses Stranges vermag Scobey nicht zu erklären.

12 Die Exponenten  $\nu$  u.  $\mu$  u. d. Koeffizient  $\lambda$  für das Fließen in Betonröhren.

Sobey's Nummer	Leitung oder Leitungsnetz	Beobachter	Innen-durchmesser $D = 4R$ mm	Baujahr	Alter Jahre	Bauweise	Länge der Röhre cm	Geschwindigkeit $U$ während d. Messungen m/sec	Gefälle abgerundet ‰	Werte von $\lambda$ in der Formel $U = \lambda R^\mu J^\nu$						Rauhigkeitsziffer Kantgülit-Kutters
										$\lambda = 0,1$	$\lambda = 0,15$	$\lambda = 0,2$	$\lambda = 0,25$	$\lambda = 0,3$	$\lambda = 0,35$	
1	Pomona . . . . .	S	203	1885	30	ZB	—	0,97—1,09	10,8	84	92	73	46	0,0123		
2	" . . . . .	"	254	1888	27	"	—	0,62—0,64	3,1—3,4	76	85	69	44	0,0134		
3	Ontario . . . . .	"	254	—	10	"	—	1,45—1,48	15,9	80	87	71	46	0,0128		
8	Oakdale . . . . .	"	300	—	—	"	61	0,39—0,47	1,3—1,8	68	77	63	40	0,0147		
4	Pomona . . . . .	"	305	—	30	"	—	0,49	1,8	70	79	65	41	0,0146		
5	" . . . . .	"	305	1885	30	"	—	0,46—1,11	1,7—7,6	77	85	70	44	0,0138		
6	Ontario . . . . .	"	305	1911	4	"	—	1,78	14,8	89	97	80	53	0,0120		
7	" . . . . .	"	305	1900	15	"	—	0,59—0,61	1,4—1,5	95	108	90	57	0,0113		
9	Pomona . . . . .	"	406	1883	32	"	—	0,30—0,43	0,5—0,6	69	80	67	44	0,0138		
10	" . . . . .	"	406	1883	32	"	—	0,52—0,74	1—2	80	91	77	52	0,0128		
11	" . . . . .	"	406	—	32	"	—	0,52	1	83	95	80	52	0,0127		
12	Umatilla . . . . .	N	406	—	2	"	61	0,82—1,06	3,8—4,5	72	82	68	46	0,0144		
13	" . . . . .	"	406	—	2	"	—	0,75	1,9	85	96	84	54	0,0125		
14	Oakdale . . . . .	S	457	—	—	"	—	0,60—0,66	1,6—1,9	67	76	64	44	0,0149		
15	" . . . . .	"	457	—	—	"	—	0,29	0,3	74	87	74	50	0,0132		
16	Kamloops . . . . .	"	457	1911	5	"	—	0,11—0,45	0,06—0,8	70	81	68	44	0,0144		
17	" . . . . .	"	500	1911	5	"	—	0,19—0,60	0,1—0,9	84	96	82	55	0,0125		
18	Temescal . . . . .	"	506	bfg. 1910	4	ZB	91	0,27—0,77	0,2—1,3	92	105	90	61	0,0117		
19	—	F	509	vor 1880	—	Verkd	—	0,29—1,23	0,2—3,2	91	102	88	61	0,0117		
21	Kamloops . . . . .	S	597	—	5	ZB	—	0,19—0,40	0,1—0,5	66	79	69	46	0,0148		



20	Oakdale . . . . .	S	602	1912	4	M B	—	0,57—0,59	0,4—0,5	90	105	91	70	0,0117
22	Temescal . . . . .	"	762	1911	4	Z E	—	0,20—0,57	0,1—0,8	65	74	55	47	0,0155
23	Umatilla . . . . .	"	762	1910	5	Z B	122	0,32—0,75	0,1—0,8	85	100	88	61	0,0124
24	Dieselbe Strecke . . . . .	N	762	1910	neu	"	122	1,03—1,10	1,1	104	120	106	75	0,0106
25	Umatilla . . . . .	"	762	—	4	"	—	0,83	0,9	95	109	92	70	0,0119
26	Sunnyside . . . . .	S	775	1911	5	Z E	122	1,49—1,76	2,2—3,7	94	106	94	67	0,0117
27	—	Ba	800	1895	neu	M B	—	0,90—2,00	0,7—3,3	108	121	113	73	0,0106
28	Oakdale . . . . .	S	914	1912	4	M—	—	0,55—0,59	0,4—0,6	73	85	76	56	0,0139
29	Boise . . . . .	"	914	1912	3	Z E	183	1,08	1,2	89	101	91	65	0,0123
29b	Dieselbe Strecke ;	"	914	1912	5	"	183	1,66—2,76	2—5,3	103	115	103	76	0,0109
30	Victoria Aquädukt.	"	1067	1914	2	"	—	0,31—0,89	0,08—0,5	97	113	102	72	0,0112
31	" . . . . .	"	1067	1914	2	"	—	0,30—0,79	0,04—0,4	103	119	106	79	0,0103
32	Umatilla . . . . .	"	1168	1909	5	"	—	0,43—0,97	0,1—0,5	98	118	108	78	0,0105
33a	Dieselbe Strecke . . . . .	N	1168	1909	üb. 1	"	—	0,24—0,31	0,8—1	96	111	101	76	0,0112
33b	Anderson-Cott. . . . .	S	1219	vor 1910	4	Z E	—	0,35	1,1	81	89	82	61	0,0137
34	Sunnyside . . . . .	"	1372	1909	7	—	—	0,38	1,2	91	104	96	73	0,0118
35	Sun River . . . . .	"	1613	1907/8	7	M E	—	0,98—1,95	0,3—1,6	92	105	98	82	0,0108
36	Perlmoos . . . . .	Bu	2200	1913	neu	"	—	0,44—1,24	0,1—0,5	85	99	94	76	0,0120
38	Catskill Aquädukt . . . . .	M	2794	vor 1915	3	Verkl	—	0,06—0,09	0,2—0,3	72	85	84	69	0,0139
39	" . . . . .	"	4420	"	neu	"	—	0,48—1,42	0,03—0,3	83	99	99	82	0,0124
40	" . . . . .	"	4420	"	"	"	—	0,48—1,42	0,03—0,3	81	95	96	82	0,0124
41	Ontario-Kraftwerk.	J	5486	vor 1913	4	M E	—	1,22—6,10	0,1—2,4	100	113	116	84	0,0102

Es bedeutet S Scobey, N Newell, Ba Bazin, Bu Budau, M Moore, J Johnston, Z Zusammensetzung aus Einzelröhren, B Beton, E Eisenbeton, M Monolith, Verkl verkleidetes Eisenrohr.

Wenn im gleichen Strang bei verschiedenen Geschwindigkeiten gemessen wurde, entspricht jeder Messung ein anderes  $\lambda$ ; das Mittel dieser  $\lambda$  ist in der Tabelle angegeben.

danken, die seine vielen eigenen und alle ihm aus der Literatur zugänglichen Messungen umfaßt. Sie bestehen teils aus Einzelbeobachtungen, teils aus Reihen, nämlich aus Beobachtungen, die in größerer Zahl an einer und derselben Strecke bei verschiedenem Gefälle gemacht worden sind. Die Logarithmen-Auftragung führte bei ihnen auf Potenzen  $J^\nu$ , deren Exponent  $\nu$  freilich, wie dies auch bei den Holzröhren der Fall gewesen war, sich nicht bei allen Strängen derselben Gattung gleich groß zeigte: bisher unbekannte Ursachen können ihn also ändern. Das Ergebnis der Versuchsreihen bringt die erste der beiden vorstehenden Tabellen zum Ausdruck.

Auf Grund dieser Zahlen entschied sich Scobey für  $\nu = 0,5$ ; für  $\nu = 0,5$  und  $\nu = 0,52$  ergeben sich mit  $\mu = 0,7$  und  $0,625$  drei Spalten der zweiten Tabelle, zu denen bemerkt werde, daß der Strang 14 vermutlich Ablagerungen enthielt, 20 auf Holzschalung, 30, 31 und 36 bis 41 auf geölte Eisenformen gestampft und 41 überdies sehr sorgfältig geschliffen wurde<sup>1)</sup>.

Aus dieser Zahlentafel könnte man bei flüchtigem Überblick folgern, daß  $U$  einer höheren Potenz von  $R$  als  $R^{0,7}$  proportional wachse, weil die für  $\lambda$  gegebenen Spalten eine Zunahme von  $\lambda$  mit dem Rohrdurchmesser aufweisen. Zum Teil kommt letztere aber daher, daß die engen Stränge zumeist aus einer Zeit stammten, in der man beim Verlegen wenig sorgsam verfuhr, und daß es überhaupt leichter ist, in weiten Strängen eine glatte Innenleibung herzustellen als in engen. Dazu kommt noch, daß Luftblasen und Ablagerungen den Durchfluß in den engen Strängen mehr behindert haben werden als in den weiten. Die Zunahme von  $\lambda$  ist also nur zum Teil auf eine hydraulische Ursache zurückzuführen. Immerhin erscheint es gerechtfertigt, von Scobey abzuweichen, der  $\mu = 0,625$  haben will und  $\mu = 0,7$  — wenn schon nicht größer als  $0,7$  — doch gleich  $0,7$  zu setzen. Dann gilt für<sup>2)</sup>

- (9) alte mit wenig Sorgfalt aus Einzelröhren zusammengesetzte Stränge . . . . .  $U = 76 R^{0,7} J^{0,5}$
- (9a) einige Jahre in Betrieb stehende aus Einzelröhren zusammengesetzte Stränge . . . . .  $U = 85 R^{0,7} J^{0,5}$
- (9b) monolithische über geölte Eisenformen gestampfte Stränge . . . . .  $U = 88 R^{0,7} J^{0,5}$
- (9c) monolithische geschliffene Stränge größter erzielbarer Glätte . . . . .  $U = 100 R^{0,7} J^{0,5}$

<sup>1)</sup> G. Sasváry fand für  $U = 0,435$  bis  $1,242$  m/sec in einem  $2584$  m langen,  $1,2$  m weiten Eisenbetonrohr  $J$  im Mittel  $= 77,2 \sqrt{R\bar{J}}$ , also  $\lambda = 98,2 m^{0,3}/sec^{0,7}$ . Die Herstellungsweise des Rohres ist nicht angegeben. Magyar Mernök és Epitési Egylet Közlönye 1916.

<sup>2)</sup> Da die folgenden Werte Mittelwerte darstellen, muß bei ihrer praktischen Anwendung noch ein Sicherheitszuschlag gemacht werden.

Betonröhren verhalten sich hiernach ähnlich wie Eisenröhren, denn für gebrauchte bzw. neue Gußröhren fand Flamant, gestützt auf Messungen von über 20 Vorgängern,

$$U = 148 \text{ bzw. } 166 R^{1/2} J^{1/2} = 148 \text{ bzw. } 166 R^{0,714} J^{0,571}$$

oder für ein Gefälle  $J$  von ungefähr 0,001 wie oben

$$U = 90 \text{ bzw. } 101 R^{0,714} J^{0,5}$$

Bei sehr kleinem Gefälle wird die Abweichung der Gleichungen (9b) bis (9c) von der Flamantschen Formel übrigens größer, denn für  $J = 0,0001$  ergibt letztere z. B.  $U = 76$  bzw.  $85 R^{0,714} J^{0,5}$ . Freilich kann seine Formel, deren Exponent  $\nu$  gemäß der Zusammenstellung auf Seite 10 nur für ganz glatte Rohre zutrifft, bloß als angenähert richtig gelten.

## 6. Der Exponent $\nu$ des Gefälles bei Fließen in festen offenen Gerinnen.

Trotz der erwähnten Schwierigkeit der Ermittlung von  $\nu$  in offenen Gerinnen geben die eingangs genannten Versuche Bazins einigen Aufschluß, so die Reihen 6, 7, 8, welche er in Strecken verschiedenen Gefälles desselben aus ungehobelten Brettern bestehenden Kastengerinnes von 1,99 m Innenweite durchführte <sup>1)</sup> und ebenso die Reihen 9, 10, 11, welche er in den gleichen Strecken vornahm, nachdem der Boden, der sich geworfen hatte, in der früheren Weise wiederhergestellt war <sup>2)</sup>. Bei Auftragung von  $\log R$  und  $\log U$  als Abszissen und Ordinaten ordnen sich die Punkte in gerade Linien, aus deren Neigung  $\mu$  folgt, mit dessen Kenntnis man dann weiter  $\lambda$  und  $\nu$  der Grundgleichung (7) ausrechnen kann. Hier die einzelnen Zahlen:

Bazins Serie	Profilradius $R$ m	Geschwindigkeit $U$ m/sec	Gefälle $J$	$\mu$
6	0,073 bis 0,28	0,64 bis 1,59	0,00208	0,710
7	0,057 „ 0,22	0,83 „ 2,18	0,0049	0,717
8	0,045 „ 0,19	1,07 „ 2,61	0,00824	0,610
9	0,084 „ 0,30	0,55 „ 1,42	0,0015	0,744
10	0,052 „ 0,21	0,91 „ 2,35	0,0059	0,685
11	0,045 „ 0,19	1,08 „ 2,66	0,00839	0,624

} Rechteckiger Querschnitt 1,98 m 1,99 m breit

Die Gruppe 6, 7, 8 gibt  $U = 134 R^{0,679} J^{0,582}$ , die Gruppe 9, 10, 11 gibt  $U = 140 R^{0,684} J^{0,587}$ , so daß die 6 Serien zusammen für ungehobelte, aber gut aneinander schließende Bretter

<sup>1)</sup> a. a. O. 78, Taf. VII. <sup>2)</sup> a. a. O. S. 85, 86, Taf. VII.

$$(10) \quad U = 136 R^{0,68} J^{0,58}$$

liefern <sup>1)</sup>.

Für die nächsten Versuche ließ Bazin <sup>2)</sup> die Bretter des gleichen Kastengerinnes innen mit Latten von 27 mm Breite und 10 mm Dicke benageln, und zwar für die Reihen 12, 13, 14 derart, daß zwischen benachbarten Latten Querfugen von 10 mm Weite, für 15, 16, 17 derart, daß Querfugen von 50 mm Weite freibleiben. Diese geregelte Rauigkeit bewirkte ein gesetzmäßiges Wachstum von  $U$  mit  $R$ , nämlich Einordnung in eine Gerade bei Auftragung von  $\log U$  und  $\log R$  gemäß den beiden Gleichungen

$$(10a) \quad U = 70 R^{0,7} J^{0,5} \text{ für Fugen von 10 mm Weite,}$$

$$(10b) \quad U = 46 R^{0,7} J^{0,5} \text{ „ „ „ 50 „ „}$$

denen wegen der Beschaffenheit der Oberfläche wohl besondere Bedeutung zukommt und deren Gültigkeit aus nachstehender Zusammenstellung erhellt:

Rechteckiger Querschnitt. Mit Latten benagelte Bretter.

Profil- radius $R$ in m	Mittlere Geschwindigkeit $U$ in m/sec		Profil- radius $R$ in m	Mittlere Geschwindigkeit $U$ in m/sec		Profil- radius $R$ in m	Mittlere Geschwindigkeit $U$ in m/sec	
	berechn.	gemess.		berechn.	gemess.		berechn.	gemess.
	Serie 12			Serie 13			Serie 14	
0,0921	0,51	0,50	0,0626	0,77	0,76	0,0556	0,87	0,87
0,1346	0,67	0,66	0,0922	1,01	1,02	0,0831	1,15	1,14
0,1932	0,86	0,87	0,1347	1,32	1,34	0,1227	1,52	1,50
0,2361	0,99	1,01	0,1684	1,55	1,55	0,1520	1,76	1,76
0,2710	1,09	1,13	0,1959	1,72	1,72	0,1775	1,96	1,95
0,3004	1,17	1,21	0,2182	1,85	1,87	0,2005	2,14	2,09
0,3281	1,24	1,28	0,2409	1,98	1,97	0,2214	2,29	2,21
	Serie 15			Serie 16			Serie 17	
0,1153	0,39	0,39	0,0805	0,61	0,58	0,0706	0,68	0,67
0,1675	0,51	0,51	0,1170	0,79	0,78	0,1076	0,91	0,87
0,2367	0,65	0,67	0,1687	1,02	1,03	0,1551	1,17	1,14
0,2870	0,74	0,74	0,2092	1,18	1,18	0,1913	1,36	1,31
0,3270	0,81	0,81	0,2410	1,31	1,31	0,2210	1,50	1,48
0,3649	0,88	0,88	0,2688	1,41	1,42	0,2476	1,63	1,59
0,3960	0,93	0,93	0,2942	1,50	1,50	0,2699	1,73	1,70

Die Gefälle  $J$  waren bei Serie 12 und 15 0,0015, bei Serie 13 und 16 0,0059, bei Serie 14 und 17 0,00886.

<sup>1)</sup> Schoklitsch berechnet in einer ungedruckten Arbeit aus Bazins Recherches  $U = 130 R^{0,69} J^{0,57}$ .

<sup>2)</sup> a. a. O. S. 85, 87, Taf. VII.

Die Serien 32 und 33 fanden in 2 Strecken eines in Zementmörtel gemauerten Bruchsteingerinnes <sup>1)</sup> von flacher 1,8 m breiter Sohle und fast lotrechten, nämlich unter  $\frac{1}{10}$  Anlage aufsteigenden Seitenmauern statt. Die Kopfflächen der Steine waren sorgfältig abgespitzt, die Sohle mit einer leichten Schlammdecke überzogen, die trotz der aufgetretenen Strömung haften blieb. Die Serien geben zwar  $\nu = 0,5$  zu erkennen, lassen sich aber nicht so gut vereinigen wie die vorhergehenden. Sie ergeben im Mittel

$$(11) \quad U = 66 R^{0,74} J^{0,5}$$

und im einzelnen folgende Werte:

Gefälle $J = 0,101$ .			Gefälle $J = 0,037$ .		
Profilradius $R$ in m	Mittlere Geschwindigkeit $U$ in m/sec		Profilradius $R$ in m	Mittlere Geschwindigkeit $U$ in m/sec	
	berechnet	gemessen		berechnet	gemessen
0,0989	3,75	3,01	0,1294	2,76	2,80
0,1424	4,93	4,96	0,1889	3,49	3,70
0,1767	5,69	5,82	0,2272	4,13	4,24
0,2017	6,43	6,42	0,2597	4,60	4,68

Ebenso wie bei Röhren ist nach dem Mitgeteilten zu schließen, daß für Profilradien bis zu etwa 1 m bei glatter Wand der Exponent  $\nu =$  ungefähr 0,57 ist und mit zunehmender Rauigkeit rasch auf 0,50 sinkt.

Für größere Abmessungen bleibe  $\nu$  noch unsicher, wenn nicht glücklicherweise für eine Strecke großen Querschnittes Messungen vorlägen, welche bei ziemlich gleichbleibender Tiefe aber wechselndem Gefälle vorgenommen worden waren. Es war dies der betonverkleidete Werkgraben mit Trapezquerschnitt der Bayerischen Stickstoffwerke zwischen Trostberg und Tacherting an der Alz. Hier hatte der Erbauer Dr. Rümelin im Oktober 1910 nach Fertigstellung des Baues eingehende Abnahmeversuche vornehmen lassen, bei welchen der Wasserstand wenig geändert wurde, während man den Durchschnitt recht verschieden wählte.

Grundriß und Querschnittsskizzen des betreffenden Werkgrabens finden sich in der Schweizerischen Bauzeitung <sup>2)</sup>. An das Trostberger Krafthaus, die Zentrale I, schließt sich eine etwas unregelmäßige, etwa 300 m lange Erdstrecke an, welche neben dem Wasser dieses Werkes noch  $4,3 \text{ m}^3/\text{sec}$  einer älteren kleinen Anlage durch den sog. Riegerkanal bezieht. Dann folgen (s. Abb. 4) rund 600 m Betonschale mit flachgewölbter Sohle, senkrechten Seitenwänden und eigentümlichen Abtrep-

<sup>1)</sup> a. a. O. S. 111, Pl. XIII.

<sup>2)</sup> Bd. 68 (1916), Nr. 3, S. 21 im Aufsatz: Th. Rümelin, Die Fließwirbel. Forchheimer, Durchfluß des Wassers.

pungen zwischen der Sohle und den Seitenwänden, schließlich einige Kilometer des genannten gleichmäßigen Betongerinnes von Trapezquerschnitt bis zum Tachertinger Werk, der Zentrale II. Zwischen dem Einfang des Trostberger Obergrabens an der Alz und der Mündung des Tachertinger Untergrabens hatte Dr. Rümelin 20 Pegel aufstellen

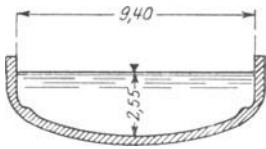


Abb. 4. Betongerinne bei Trostberg.

lassen, an welchen während der Abnahmeversuche alle 5 Minuten abgelesen wurde<sup>1)</sup>. Für die Betontrapezstrecke kommen hier die Pegel 12 und 13 in Betracht, weil sie bei genügendem gegenseitigen Abstand über eine von Störungen möglichst freie Strecke Aufschluß geben. Der Pegel 11 lag nämlich bei Kilometer 1,031 ungefähr an der Übergangsstelle der engeren Schale in die trapezförmige, der Pegel 12 von ihr 1172 m entfernt bei Kilometer 2,203, der Pegel 14 schon nahe bei der Tachertinger Stufe bei Kilometer 4,497. Die Erhebung der Durchflüsse geschah auf Grund der elektrischen Leistung. Sollte der Wirkungsgrad

selbst ein etwas anderer als der damals angenommene gewesen sein, so würde die Schlußfolgerung auf das  $\nu$  dennoch aufrecht bleiben. Zu den, den Akten des Dr. Rümelin entnommenen Ziffern sei noch bemerkt, daß am 21. Oktober der Durchfluß einmal mit Stilllegung der Trostberger, das andere Mal mit Stilllegung der Tachertinger Turbinen, also das eine Mal der Durchfluß im Tachertinger, das andere Mal der im Trostberger Werk gemessen wurde, und daß am 24. Oktober die Erhebung in Trostberg, am 22. Oktober in beiden Werken geschah. An diesem Tage führte der Riegerkanal wegen Bachauskehr kein Wasser, während sonst zum Triebwasser der Trostberger Turbinen, wie Flügelmessungen ergaben, noch  $4,3 \text{ m}^3/\text{sec}$  aus dem Riegerkanal hinzuflossen. Zur einen Messung vom 21. Oktober ist noch zu erwähnen, daß, wie die alle 5 Minuten wiederholten Aufschreibungen zeigen, sich in der Zeit zwischen 4 Uhr 28 (Nachm.) und 4 Uhr 34, also in 360 Sekunden, eine 0,207 hohe Staustufe

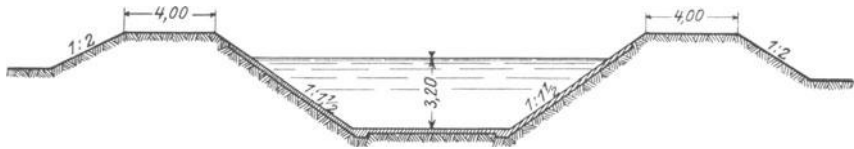


Abb. 5. Werkgrabenquerschnitt Trostberg-Tacherting. 1 : 300 w. Gr.

selbst ein etwas anderer als der damals angenommene gewesen sein, so würde die Schlußfolgerung auf das  $\nu$  dennoch aufrecht bleiben. Zu den, den Akten des Dr. Rümelin entnommenen Ziffern sei noch bemerkt, daß am 21. Oktober der Durchfluß einmal mit Stilllegung der Trostberger, das andere Mal mit Stilllegung der Tachertinger Turbinen, also das eine Mal der Durchfluß im Tachertinger, das andere Mal der im Trostberger Werk gemessen wurde, und daß am 24. Oktober die Erhebung in Trostberg, am 22. Oktober in beiden Werken geschah. An diesem Tage führte der Riegerkanal wegen Bachauskehr kein Wasser, während sonst zum Triebwasser der Trostberger Turbinen, wie Flügelmessungen ergaben, noch  $4,3 \text{ m}^3/\text{sec}$  aus dem Riegerkanal hinzuflossen. Zur einen Messung vom 21. Oktober ist noch zu erwähnen, daß, wie die alle 5 Minuten wiederholten Aufschreibungen zeigen, sich in der Zeit zwischen 4 Uhr 28 (Nachm.) und 4 Uhr 34, also in 360 Sekunden, eine 0,207 hohe Staustufe

<sup>1)</sup> Auf Grund der damaligen Aufschreibungen konnten auch Schlüsse auf die Wiedergewinnung von Geschwindigkeitshöhe gezogen werden. Schweiz. Bauz. 75 (1920), S. 249.

von Pegel 12 bis Pegel 11 auf eine Länge von 1172 m aufbaute. Das erforderte bei 16 m Spiegelbreite  $(0,207 \cdot 1172 \cdot 16) : 360 = 10,8 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Zu den  $35,4 \text{ m}^3/\text{sec}$ , welche die Tachertinger Turbinen damals beaufschlagten, hat man daher noch  $10,8 \text{ m}^3/\text{sec}$  hinzuzufügen, um den Grabendurchfluß zu erhalten. Das übrige besagen nachstehende Zahlenspalten:

	Vollwasserversuche			Kleinwasser-
	21. Okt.	21. Okt.	24. Okt.	versuch
				22. Okt.
Durchschnittl. Durchfluß . . . $\text{m}^3/\text{sec}$	46,2	41,27	43,0	17,21
Höhenunterschied . . . . . m	0,285	0,292	0,255	0,064
Gefälle in $\text{‰} = 1000 J$ . . .	0,1690	0,1737	0,1512	0,03794
Mittlere Tiefe $t$ . . . . . m	3,25	2,95	2,95	2,752
Fläche $F$ . . . . . $\text{m}^2$	38,58	33,70	33,70	30,62
Profilradius $R$ . . . . . m	2,061	1,893	1,893	1,810
Mittlere Geschwindigkeit $U$ . $\text{m}/\text{sec}$	1,197	1,225	1,276	0,5620

Aus diesen Spalten gehen nachstehende Reihen hervor:

Vollwassermessung				Kleinwasser-	Vollwassermessung	
				messung	im Mittel	
$R$	=	2,061	1,893	1,893	1,810	—
1000 $J$	=	0,1690	0,1737	0,1512	0,03794	—
$U$						
$R^{0,7} J^{0,52}$	=	66,0	70,7	79,1	73,8	71,9
$U$						
$R^{0,5} J^{0,5}$	=	64,2	67,5	75,4	67,8	69,0
$U$						
$R^{0,7} J^{0,5}$	=	55,5	59,4	66,4	60,2	60,4

wonach für neuen Beton, dessen Sichtfläche nur mit der Latte abgestrichen worden ist <sup>1)</sup>, in Gerinnen großer Abmessungen ein Exponent  $\nu = 0,5$  bis  $0,52$  am wahrscheinlichsten erscheint und für alten angegriffenen Beton  $\nu = 0,5$  zu erwarten ist. Auf dieselben  $\nu$  hatten die Beobachtungen an Röhren geführt (s. oben S. 14).

## 7. Der Exponent $\nu$ des Gefälles bei Fließen in Erdbetten.

Für unveränderliche Erdbetten gilt offenbar ein ähnliches  $\nu$  wie für alten Beton, auch ist für sie in den Formeln mit Rauigkeitsziffer die Potenz  $J^{0,5}$  gang und gäbe; für natürliche Flüsse und Bäche, die ihr

<sup>1)</sup> So nach mündlicher Mitteilung des damaligen Bauleiters Dr. Th. Rümelin.

Geschiebe selbst aufbereiten, für die also in den einschlägigen mathematischen Ausdrücken die Rauheitsziffern logischerweise entfallen, haben aber neuere Verfasser sich veranlaßt gesehen, den Exponenten zu verringern, und zwar hat sich Matakiewicz für 0,48 bis 0,5, Lindboe für 0,42 bis 0,47 und O. Gröger, wenn die Tiefe 2 m übersteigt, für 0,43 entschieden. Diese Abweichungen erklären sich dadurch, daß in der Gesamtheit der Läufe mit beweglichem Bett die großen Gefälle mit den groben Geschieben, die geringen Neigungen mit den feinen Sanden und dem Schlamm örtlich zusammenfallen. Je größer  $J$  ist, desto rauher ist daher im allgemeinen das Bett. Wäre ohne diesen Umstand  $U$  der Potenz  $J^{0,5}$  proportional, so muß infolge seines Bestehens  $U$  einer niedrigeren Potenz annähernd proportional sein. Für  $\nu = 0,5$  bewirkt z. B. eine Verdoppelung des Gefälles eine Steigerung von  $U$  auf das 1,414fache, für  $\nu = 0,45$  aber nur auf das 1,366fache. Die Genannten mußten also durch ihre Zusammenfassung der Gewässer auf niedrigere Gefällpotenzen als  $J^{0,5}$  kommen, wenn für Strömung in einem und demselben Bett  $U$  proportional mit  $J^{0,5}$  wächst. Auf noch einen Umstand, der aber von geringerer Bedeutung sein dürfte, macht E. Beyerhaus<sup>1)</sup> aufmerksam, nämlich darauf, daß die stärkeren Gefälle in der Regel in den Strecken, in denen sich das Wasser beschleunigt, und die schwächeren Gefälle in den Verzögerungsstrecken liegen. Die Änderung der Geschwindigkeitshöhe wirke also meist dem Spiegelgefälle entgegen und ermäßige scheinbar den Gefälleexponenten.

## 8. Der Exponent $\mu$ des Profilradius bei Fließen in festen offenen Gerinnen.

Zunächst werde zur Bewertung von  $\mu$  für Gerinne mit unveränderlicher Wandung geschritten, für welche die Sachlage einfacher als für Betten ist, deren Oberfläche mit der Fließgeschwindigkeit wechselt. Gemäß den angeführten Gleichungen (4) (2) und (5) ist für Beton nach

Bazin (neuere Formel)

$$U = \frac{87 R}{0,1 + \sqrt{R}} \sqrt{J} \text{ bis } \frac{87 R}{0,2 + \sqrt{R}} \sqrt{J}$$

Ganguillet und Kutter,  $n = 0,013$

$$J = 0,001 \\ U = \frac{101,45 R}{0,3191 + \sqrt{R}} \sqrt{J}$$

$$J = 0,0001 \\ U = \frac{115,4 R}{0,5005 + \sqrt{R}} \sqrt{J}$$

Biel

$$U = \frac{91,29 R^{3/4}}{\sqrt{1 + \sqrt{R}}} \sqrt{J}$$

<sup>1)</sup> Bauing. 2 (1921), S. 486.



In diesen Ausdrücken sind nur ein Teil der Faktoren von  $R$  abhängig, und zwar nehmen sie folgende Werte an:

$R$ in m	=	1	2	3	4	5
Bazin	$\left\{ \begin{array}{l} R : (0,1 + \sqrt{R}) \\ R : (0,2 + \sqrt{R}) \end{array} \right.$	0,909	1,321	1,637	1,905	2,140
Ganguillet u. Kutter	$\left\{ \begin{array}{l} R : (0,3191 + \sqrt{R}) \\ R : (0,5005 + \sqrt{R}) \end{array} \right.$	0,758	1,155	1,464	1,725	1,957
Biel $R^{3/4}$	$\sqrt{1 + \sqrt{R}}$	0,707	1,082	1,379	1,633	1,858

Die Zahlen einer Zeile stehen hier im folgenden gegenseitigen Verhältnis:

	$R =$	1	2	3	4	5
Bazin	$\left\{ \begin{array}{l} R : (0,1 + \sqrt{R}) \\ R : (0,2 + \sqrt{R}) \end{array} \right.$	1	1,45	1,80	2,10	2,35
Ganguillet u. Kutter	$\left\{ \begin{array}{l} J = 0,001 \\ J = 0,0001 \end{array} \right.$	1	1,49	1,86	2,18	2,46
Biel		1	1,52	1,93	2,28	2,59
		1	1,57	2,02	2,40	2,74
		1	1,53	1,95	2,31	2,63

Andererseits ist für

$R =$	1	2	3	4	5
$R^{0,54}$	1	1,45	1,81	2,11	2,38
$R^{0,56}$	1	1,47	1,85	2,17	2,46
$R^{0,58}$	1	1,50	1,89	2,23	2,54
$R^{0,60}$	1	1,52	1,93	2,30	2,63
$R^{0,62}$	1	1,54	1,98	2,36	2,71
$R^{0,64}$	1	1,56	2,02	2,43	2,80

Hiernach wächst bei zunehmendem Profilradius und gleichbleibendem Gefälle die Geschwindigkeit nach

Bazin                      Ganguillet und Kutter      Biel  
 proportional mit  $R^{0,54}$  bis  $R^{0,57}$                        $R^{0,6}$  bis  $R^{0,63}$                        $R^{0,60}$

Die Bazinschen Messungen selbst führen auf höhere Potenzen als die Formeln, seine eigene einbegriffen. Wenn man seine Angaben ausrechnet, die Rauigkeit der Wandung schätzt und die Angaben nach dieser Rauigkeit ordnet, erhält man nachstehende Zahlentafel:

Wand- beschaffenheit	Querschnitts- form	Bazins Serie	$\mu$	$R$ m
Zement	Rechteck	2	0,600	0,23 — 0,45
	Halbkreis	24	0,678	0,11 — 0,32
Desgl. mit $\frac{1}{3}$ Feinsand	„	25	0,673	0,115 — 0,32
Ziegel	Rechteck	3	0,638	0,058 — 0,24
Bretter	„	6—11	0,682	0,045 — 0,30
„	„	19—20	0,748	0,045 — 0,30
„	Trapez, Seiten 1:1	21	0,617	0,10 — 0,33
„	Trapez, eine Seite lotrecht, andere 1:1	22	0,675	0,078 — 0,26
„	Dreieck, Seiten 1:1	23	0,670	0,10 — 0,26
„	Halbkreis	26	0,696	0,12 — 0,35
Latten in 1 cm Abstand	Rechteck	12—14	0,701	0,056 — 0,33
Desgl. in 5 cm Abstand	„	15—17	0,714	0,071 — 0,40
Bruchsteinmauerwerk in Zementmörtel	wagrechte Sohle 1,8 m breit, Seiten 1/10 Anlage	32	0,758	0,099 — 0,20
„	Sohle flache Kurve Seiten lotrecht	33	0,733	0,13 — 0,26
Mauerwerk		45	1,14	0,30 — 0,49
Trockenes Steinpflaster mit Moos und Rasen fast bedeckt	Trapez	34	1,12	0,26 — 0,52
Desgl. gereinigt	„	35	0,917	0,21 — 0,45
Festgemauerte vorspringende Kiesel, Korn 1—2 cm	Rechteck	4	0,733	0,076 — 0,28
Desgl. Korn 1—2 cm	Halbkreis	27	0,743	0,14 — 0,31
Desgl. Korn 3—4 cm	„	5	0,823	0,089 — 0,30

Nach diesen Zahlen war bei größter Glätte  $\mu = 0,6$  und stieg bei rauher Wand bis 0,7 und darüber, wobei freilich der Umstand mitwirkte, daß mit wachsendem  $R$  die Querschnittsform günstiger wurde. Der

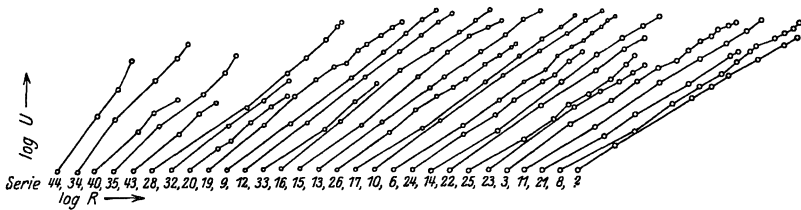


Abb. 6. Bazins regelmäßige Serien.

Zusammenhang zwischen Rauigkeit und Exponent ist aber keineswegs ein einfacher, wie daraus erhellt, daß man bei Ordnung der Serien nach den Werten von  $\mu$  eine ganz andere Reihenfolge der Serien erhält wie die in obiger Zahlentafel, und das, obgleich innerhalb derselben Serie  $\mu$  sich nicht ändert. Dies bringt Abb. 6 zum Ausdruck, die ich Ingenieur Walter von Sauer verdanke. Das Sprunghafte des Exponenten ist

übrigens eine bei vielen hydraulischen Vorgängen wiederkehrende Erscheinung.

Anders wie offene Rinnsale scheinen sich Röhren zu verhalten, denn für vollkommene Glätte wies Blasius, für Gußeisenwandung Flamant nach, daß die Geschwindigkeit proportional mit  $R^{0,714}$  wächst, von welcher Zahl 0,714 sich  $\mu$  in Röhren, soweit heute die Erfahrung reicht, nie weit zu entfernen scheint.

Über einige Leitungen und Siele mit freiem Spiegel berichtet die englisch-amerikanische Literatur. Im Sudbury-Aquädukt von 0,000189 Sohlengefälle nahmen Fteley und Stearns<sup>1)</sup> Messungen vor, auf Grund deren Hughes und Safford<sup>2)</sup> be-

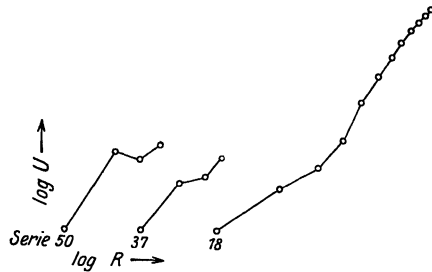


Abb. 7. Unregelmäßige Serien Bazins.

rechnen (in metrisches Maß umgerechnet), für Hufeisenquerschnitt von 2,74 m Lichtweite, 2,35 m Lichthöhe und sorgfältige Klinkerverkleidung

$$(12) \quad U = 82,1 R^{0,62} J^{0,5}$$

für den gleichen Querschnitt und Zementverputz

$$(12a) \quad U = 87,2 R^{0,62} J^{0,5}$$

für Betonsohle und zackige Stollenwände

$$(12b) \quad U = 61,1 R^{0,62} J^{0,5}$$

Für den Croton-Aquädukt der Stadt New-York und Betonverkleidung war nach Lea<sup>3)</sup> in metrisches Maß umgerechnet für

$$R \text{ in m} \quad = 0,305 \ 0,381 \ 0,457 \ 0,533 \ 0,610 \ 0,686 \ 0,762 \ 0,838 \ 0,913 \\ 0,991 \ 1,069 \ 1,143 \ 1,170$$

$$U \text{ in m/sec} = 0,417 \ 0,485 \ 0,546 \ 0,594 \ 0,643 \ 0,692 \ 0,735 \ 0,768 \ 0,808 \\ 0,847 \ 0,881 \ 0,914 \ 0,920,$$

woraus er mit  $\nu$  willkürlich = 0,532

$$(12c) \quad U = 100 R^{0,612} J^{0,532}$$

ableitet. Für eine Klinkerverkleidung derselben Wasserleitung und die Sohlenneigung 0,00013257 berechnen Hughes und Safford (in Metermaß umgewandelt)

$$(12d) \quad U = 73,1 R^{0,56} J^{0,5}$$

<sup>1)</sup> Transactions of the American Society of Civil Engineers (12) S. 114.

<sup>2)</sup> H. J. Hughes und A. T. Safford, A Treatise on Hydraulics. New-York 1911. S. 366.

<sup>3)</sup> Aqueduct Commissioner's Report 1895. F. C. Lea, Hydraulics S. 203.

Berichtet wird auch<sup>1)</sup> über Messungen im Felsstollen, welcher Wasser vom Loch (See) Katrine nach Glasgow bringt, welcher Stollen zwar eine durchgehende Betonsohle erhielt, aber an den Ulmen nur zu 0,53 seiner Länge mit Beton verkleidet wurde und zu 0,47 seiner Länge unverkleidet und 60 cm breiter blieb. Die Messungen erstreckten sich nur auf Profilradien zwischen 0,37 und 0,58 m und scheinen bezüglich des Gefälles sich auf das der Sohle — 0,0001818 — beschränkt zu haben. Hieraus ginge ein Mittelwert  $\mu = 0,646$  hervor.

Zwei Unratsiele untersuchte Th. Horton<sup>2)</sup>; beide waren in Ziegeln gemauert, mit Zementmilch getüncht (cement-washed brickwork). Nachstehend die Daten:

East Boston (Massachusetts)	Charlestown (Massachusetts)
$J = 1:3000$	$J = 1:2000$
Kreisquerschnitt	Korbbogenquerschnitt
$R = 0,19$ bis $0,70$ m	$R = 0,34$ bis $0,65$ m
$U = 0,43$ bis $1,77$ m/sec	$U = 0,70$ bis $1,01$ m/sec
Nach Lea bei Eröffnung:	
$U = 109,8 R^{0,612} J^{0,532}$	$U = 92,8 R^{0,612} J^{0,532}$
Nach 4 Betriebsjahren:	
$U = 95,3 R^{0,612} J^{0,532}$	$U = 80,6 R^{0,612} J^{0,532}$

oder nach Ersatz des willkürlichen  $\nu = 0,532$  durch  $\nu = 0,5$

(12e) bei Eröffnung  $U = 85,0 R^{0,612} J^{0,5}$  bzw.  $= 72,7 R^{0,612} J^{0,5}$

(12f) nach 4 Betriebsjahren  $U = 73,7 R^{0,612} J^{0,5}$  bzw.  $= 63,2 R^{0,612} J^{0,5}$

Die Messung war mit Sorgfalt geschehen, da jedoch die Flüssigkeit aus Jauche bestand und die Beschaffenheit der Sielhaut daher von der Geschwindigkeit und der Spiegelschwankung abhing, ist eine Folgerung auf das Verhalten von Wasser unsicher<sup>3)</sup>.

Auf den Wasserstollen, der von der Sitter unter 0,000555 Gefälle zum Elektrizitätswerk Kubel führt und durchweg mit geglättetem Beton verkleidet ist, wurde bereits oben hingewiesen. Die Annahme  $\mu = 0,7$  und  $\nu = 0,5$  führt auf nachstehende  $\lambda$

gemessen	$\left\{ \begin{array}{l} U \text{ in m/sec} = 0,88 \quad 1,25 \quad 1,35 \quad 1,45 \quad 1,50 \\ R \text{ in m} = 0,270 \quad 0,436 \quad 0,515 \quad 0,573 \quad 0,586 \end{array} \right.$
Hieraus folgt <sup>4)</sup> in $m^{0,3}/\text{sec}$	

<sup>1)</sup> A. F. Bruce, Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 123 (1896), S. 414.

<sup>2)</sup> Transactions of the American Society of Civil Engineers 46 (1901), S. 78.

<sup>3)</sup> Ebenda S. 87 führt R. Hering das verschiedene Verhalten der beiden Siele auf ihre ungleiche Spiegelschwankung zurück.

<sup>4)</sup> Für diese  $U$  und  $R$  findet sich

Chézys  $c = 83,1 \quad 81,3 \quad 79,8 \quad 77,3 \quad 71,8$   
Ganguillet und Kutters  $n = 0,0113 \quad 0,0115 \quad 0,0115 \quad 0,0116 \quad 0,0115$ .

Die Übereinstimmung der errechneten  $\lambda$ , die als Mittel 91,82 liefern, bestätigt das Zutreffen der Annahme  $\mu = 0,7$ . Als beste Lösung erscheint

$$(13) \quad U = 91,82 R^{0,7} J^{0,5},$$

welche Gleichung als Summe der Fehlerquadrate nur ein 0,55tel der Fehlerquadratsumme des Ansatzes

$$(13a) \quad U = 92,06 R^{0,69} J^{0,5}$$

gibt.

Zuverlässige Erhebungen an dem ganz mit Beton verkleideten Bette der Wien in Wien wurden, wie schon eingangs erwähnt, vom österreichischen hydrographischen Zentralbureau dem Verfasser mitgeteilt. Die Ergebnisse erhellen aus nachstehender Zahlentafel:

Meßstelle	Ungarbrücke			Rudolfbrücke			Reinprechtsbrücke
	13. V. 1910	4. V. 1910	3. V. 1910	19. IV. 1906	7. VI. 1906	3. V. 1910	3. V. 1910
Querschnitt m <sup>2</sup> .	7,06	33,67	49,92	9,0	16,7	25,22	22,05
Spiegelbreite m .	24,00	26,19	24,00	16,0	17,0	16,77	16,25
Mittlere Tiefe m .	0,294	1,28	1,896	0,56	0,98	1,50	1,36
Größte Tiefe m .	0,50	1,53	2,18	0,90	1,36	1,87	1,70
Profilradius $R$ m .	0,292	1,158	1,785	0,558	0,965	1,38	1,259
Gefälle in ‰ . . .	0,5746	0,509	0,535	3,2455	3,3	3,3	4,0
Mittl. Geschwindigkeit $U$ m/sec .	0,72	2,00	2,84	2,99	4,47	5,61	6,42
Größte Geschwindigkeit $U_{max}$ m/sec . . . . .	1,06	2,50	3,60	3,59	5,60	—	—
Durchfluß $Q$ . . . . .	5,11	6,73	141,6	26,9	74,6	141,6	141,6
$c = U : \sqrt{RJ}$ . . . . .	56,78	80,78	93,84	70,26	79,20	83,43	90,51
Ganguillet und Kutters $n$ . . . . .	0,0148	0,0126	0,0113	0,0134	0,0126	0,0126	0,0113
$\lambda = U : R^{0,7} J^{0,5}$ . . . . .	71,1	80,0	81,8	79,0	79,8	78,0	86,4
$\lambda = U : R^{0,7} J^{0,52}$ . . . . .	82,6	93,1	95,2	88,5	89,5	87,3	96,5
$\lambda = U : R^{0,68} J^{0,52}$ . . . . .	80,5	93,4	96,2	87,5	89,4	87,9	96,9

Von diesen Erhebungen ist die erste mit nur 0,29 m Tiefe mit den übrigen offenbar nicht in Verbindung zu bringen, diese übrigen aber führen bei Auftragung der Logarithmen ebenfalls auf eine ähnliche Formel. Auch gibt die Gleichung  $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$  besser übereinstimmende Werte von  $\lambda$  als  $U = \lambda R^{0,7} J^{0,52}$  oder  $U = \lambda R^{0,68} J^{0,52}$ , wie man aus den letzten drei Tafelzeilen ersieht. Hiermit ist  $\mu = 0,7$  und für das Wienbett

$$(13b) \quad U = 80,1 R^{0,7} J^{0,5}$$

gefunden.

Eine Bestätigung dieses Ansatzes  $\mu = 0,7$  für große Gerinne liefern schließlich Messungen, die bei verschiedener Füllung im Kanale Garching-Neukirchen und im Lechwerkkanaale vorgenommen wurden, von denen weiter unten (s. S. 32 u. 46) die Rede sein wird.

## 9. Der Koeffizient $\lambda$ für Gerinne mit fester Wandung.

Wieder geben die Bazinschen Versuche Aufschluß, soweit es sich um geringe Abmessungen handelt, und zwar werden, da  $\nu$  und  $\mu$  jetzt mehr oder weniger bekannt sind, auch Einzelerien verwendbar, die bisher keinen Schluß auf  $\lambda$  zuließen. Das übrige besagt nachstehende Tafel. Auf den in ihr vorkommenden Wert  $\nu = 0,58$  haben die Versuche mit Brettern geführt. Dahingestellt bleibt, ob nicht mit Rücksicht auf die für glatte Rohre geltende Blasiusche Gleichung (8a) der Ansatz  $\nu = 0,57$  den Vorzug verdienen würde.

Wandbeschaffenheit	Querschnitt	Serie Bazins	$U$ ist =
Zement	Rechteck	2	136 $R^{0,60} J^{0,58}$
Desgl. mit $\frac{1}{3}$ Feinsand Bretter	Halbkreis	24	177
	Rechteck, Trapez, Dreieck'	25	163
	Halbkreis	6—11, 19—23	135
„ Ziegel	Rechteck	3	70 $R^{0,61} J^{0,58}$
Latten in 1 cm Abstand	„	12—14	69,5
„ „ 5 „ „	„	15—17	46,0
Bruchstein in Zementmörtel	fast Rechteck	32, 33	66 $R^{0,745} J^{0,5}$
Kiesel 1—2 cm in Zement	Rechteck	4	62 $R^{0,73} J^{0,5}$
„ 3—4 „ „ „	„	5	37,7 $R^{0,82} J^{0,5}$

Auf die weiteren in den Gleichungen (8) bis (14a) enthaltenen Werte von  $\lambda$  wird später noch zurückgekommen werden. Hier aber werde zunächst auf die Beobachtungen eingegangen, die gegenwärtig an Werkgräben großer Abmessungen vorliegen.

Mit dem Canale Cavour befaßten sich P. Pasini und U. Gioppi<sup>1)</sup>. Eine der untersuchten Strecken hatte eine 20 m breite ebene Betonsole und seitlich Ziegelmauern von  $\frac{1}{20}$  Anlage. Leider war die Strecke nur 133 m lang, so daß bei den auftretenden Spiegelschwankungen erst wiederholte Messungen einen Schluß auf das Spiegelgefälle zuließen, welches die beiden Beobachter schließlich auf 0,00011 bewerten zu dürfen glaubten. Drei an verschiedenen Tagen vorgenommene Aufnahmen gaben

<sup>1)</sup> Giornale del genio civile 31 (1893), S. 60.

Cavour-Kanal.

Wassertiefe . . . . .	m	1,84	2,12	2,79
Mittlere Geschwindigkeit $U$ . . . . .	m/sec	1,074	1,147	1,337
Profilradius $R$ . . . . .	m	1,560	1,757	2,195
Gefälle $J$ . . . . .	—	0,00011	0,00011	0,00011
de Chézysche Zahl $c = \frac{U}{\sqrt{RJ}}$ . . . . .	$m^{1/2}/\text{sec}$	81,97	82,50	86,06
Ganguillet-Kuttersche Rauigkeit $n$ . . . . .	—	0,0130	0,0130	0,0129
$\lambda = U: R^{0,7} J^{0,5}$ . . . . .	$m^{0,3}/\text{sec}$	75,10	75,71	73,52

also im Mittel (für  $\mu = 0,7$  und  $\nu = 0,5$ )  $\lambda = 74,11$ .

Unter der Voraussetzung, es sei  $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$ , können die von Dr. Rümelin vor 12 Jahren veranlaßten Trostberger Aufnahmen einer Rechnung unterzogen werden. Dort war der Beton, wie schon erwähnt, nur mit der Latte abgestrichen worden. Die Rechnung nimmt folgende Gestalt an:

Trostberg-Tacherting 1910.

		Vollwasser			Mittel	Kleinw.
$U$ . . . . .	m/sec	1,197	1,225	1,276	1,233	0,5620
$R$ . . . . .	m	2,061	1,893	1,893	1,949	1,810
$1000 J$ . . . . .	—	0,1690	0,1737	0,1512	0,1646	0,03794
$\log R^{0,7}$ . . . . .	—	0,21986	0,19401	0,19401	—	0,18038
$\log J^{0,5}$ . . . . .	—	0,11395-2	0,11990-2	0,08975-2	—	0,78955-3
$\log \lambda$ . . . . .	—	1,74420	1,77423	1,82205	—	1,77981
$\lambda$ . . . . .	$m^{0,3}/\text{sec}$	55,50	59,46	66,38	60,45	60,23
$c = U: \sqrt{RJ}$ . . . . .	$m^{1/2}/\text{sec}$	—	—	—	66,94	67,82
Rauigkeit $n$ . . . . .	—	—	—	—	0,0167	0,0175

Danach mußte  $\lambda =$  ungefähr 60,3 gewesen sein. Es wird sich später zeigen, daß die sehr glatte neue Strecke Garching-Neukirchen nur  $\lambda = 59,0$  aufweist. Vermutlich ist in Trostberg-Tacherting der nur nach der elektrischen Leistung beurteilte Durchfluß seinerzeit etwas überschätzt worden und  $\lambda$  nicht größer als 59,0 gewesen.

Seitdem hat sich der Zustand der Betonoberfläche dort wesentlich verschlechtert; es sind Löcher bis zu 20 cm Ausdehnung und bis zu 5, ausnahmsweise auch wohl 10 cm Tiefe entstanden, so daß die Oberfläche der eines gewöhnlichen festgelagerten Kiesel gleicht, dessen eiförmige Kiesel 1 bis 5 cm Länge besitzen. Hier wurde während der dasselbst vorgenommenen 3 Durchflußmessungen der Spiegel einer 4000 m langen Strecke alle 400 m beobachtet. Es waren also 11 Beobachter nötig, deren jeder den Auftrag hatte, den Wasserstand während einer vorher festgesetzten Zeit von 46 Minuten alle 2 Minuten aufzuschreiben.

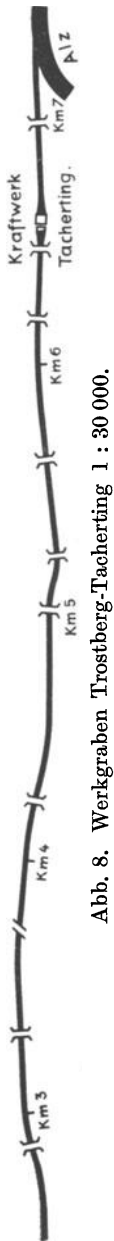


Abb. 8. Werkgraben Trostberg-Tacherting 1 : 30 000.

Dabei war angenommen worden, daß die Durchflußmessungen sicher nicht mehr als 46 Minuten<sup>1)</sup> erfordern werden.

Die üblichen Pegelpflöcke haben den Übelstand, zu nahe am Ufer und seinen Wirbeln zu stehen, das Wasser aufzustauen und wegen der Tiefenlage des Spiegels unter dem Standplatz des Beobachters für das Ablesen unbequem zu sein. Diese Übelstände wurden durch ein wesentlich von Bauführer (heute Oberbauverwalter) P. Thoma erdachtes Verfahren überwunden. Quer zur Uferlinie wurden auf der Uferfläche je 2 Pflöcke so eingeschlagen, daß die beiden

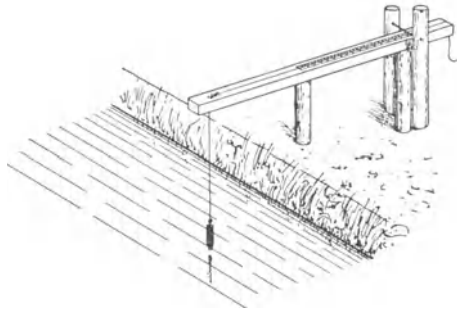


Abb. 9. Bestimmung der Spiegelhöhe.

Köpfe des Paares genau in gleiche Höhe kamen. Die Kopfflächen wurden dann in ein Nivellement einbezogen. Vor der Wassermessung legte man auf jedes Pflöckepaar eine Latte, in deren Oberseite ein Zweimeterstock eingelassen war und keilte die Latte gegen den Verbindungsdrahtstift zweier weiterer Pflöcke fest, die zu diesem Zweck rechts und links von der späteren Latte eingeschlagen worden waren<sup>2)</sup>. Der Nullpunkt des Meßstockes war der Landseite zugekehrt. Am wasserseitigen Ende trug die Latte ein Röllchen, über welches ein dünner Draht durch eine Bohrung der Latte hindurch lief; an ihm hing ein Eisenstück, welches schwer genug sein mußte, um den Draht zu spannen. Auf den Draht wurde eine Drahtranke geklemmt, die, wenn das Eisenstück z. B. 16 cm lang war und man es hinaufzog, bis seine obere Kante an die Unterseite der Latte anstieß,

<sup>1)</sup> Sie dauerten hier 28 bis 33 Minuten. Es ist kaum nötig, zu bemerken, daß alle Uhren vor der Messung auf gleiche Zeit gestellt wurden. Sämtliche Neuaufnahmen erliegen bei der Landesstelle für Gewässerkunde in München.

<sup>2)</sup> Die Verkeilung ist in der Abbildung fortgelassen.



über dem Teilstrich 16 des Meßstockes lag. Beim Messen ließ man das Eisenstück hinab, bis seine untere Spitze den Wasserspiegel traf. Dann gab der Teilstrich, über den die Ranke kam, unmittelbar die Tiefenlage des Spiegels unter den Pfahlköpfen an. Es war leicht, auf diese Weise die schwankende Spiegel-lage 3 bis 4 mm genau zu ermitteln, ja bei ruhigem Spiegel hätte sein Stand wohl mit 1 mm Genauigkeit festgestellt werden können.

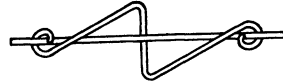


Abb. 10. Ranke.

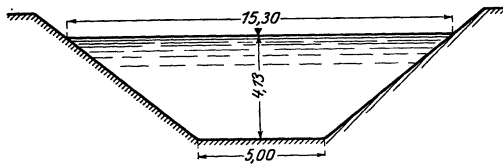
Die Meßergebnisse sind nachstehend zusammengestellt, wobei bei Aufsuchung der Gesamtmittel die für die 3 inneren Beobachtungspunkte gefundenen Daten mit doppeltem Gewicht eingeführt wurden.

Trostberg-Tacherting 1920.

Durchfluß $Q$ in $m^3/sec$	59,6	60,4	62,6	62,0	
Geschwindigkeit $U$ in $m/sec$					
Abstand vom Strecken-anfang m	Messung				Im Mittel
	I	II	III	IV	I bis IV
400	1,41	1,43	1,52	1,45	1,453
1200	1,30	1,33	1,40	1,38	1,353
2000	1,35	1,35	1,45	1,42	1,393
2800	1,37	1,37	1,48	1,44	1,415
3600	1,43	1,42	1,58	1,50	1,483
	Gesamtmittel				1,407
Profilradius $R$ in m					
400	2,23	2,22	2,20	2,24	2,223
1200	2,28	2,28	2,24	2,24	2,260
2000	2,23	2,23	2,17	2,21	2,210
2800	2,22	2,23	2,19	2,20	2,210
3600	2,15	2,17	2,09	2,15	2,140
	Gesamtmittel				2,216
Gefälle in $\text{‰} = 1000 J$					
400	0,2505	0,2390	0,2625	0,2805	0,2506
1200	0,2718	0,2650	0,2908	0,2770	0,2761
2000	0,2730	0,2680	0,3000	0,2805	0,2804
2800	0,2648	0,2643	0,2995	0,2773	0,2765
3600	0,2945	0,2885	0,3385	0,2860	0,3019
	Gesamtmittel				0,2773
Koeffizient $\lambda$ für $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$					
400	51,0	53,2	53,4	52,2	52,5
1200	44,5	46,8	46,5	47,3	46,3
2000	46,8	47,0	48,6	48,8	47,8
2800	48,2	48,3	49,5	49,8	48,9
3600	48,8	48,2	51,3	52,0	50,1
	Gesamtmittel				48,6

Den Gesamtmitteln  $U = 1,407$ ,  $R = 2,216$ ,  $J = 0,0002773$  entspricht de Chézys Zahl  $c = 56,72$  m/sec und Ganguillet-Kutters Rauigkeit  $n = 0,020$ .

Das durch den Untergraben von Tacherting in die Alz zurückgekehrte Wasser wird gegenwärtig in einem zweiten Graben der Bayerischen

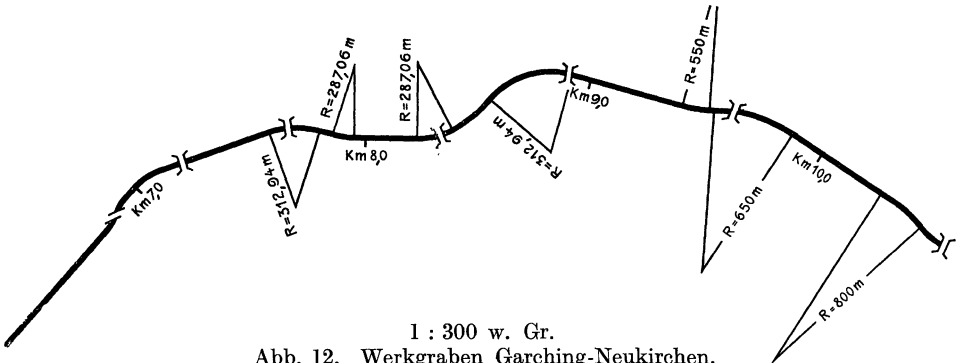


1 : 300 w. Gr.

Abb. 11. Werkgraben Garching-Neukirchen.

Stickstoffwerke abermals gefaßt, welcher Graben zwischen Garching und Neukirchen gute Meßgelegenheit bot. Er hat Trapezquerschnitt mit wagrechter Sohle von 5 m Breite, Böschungen von fast genau  $\frac{5}{4}$ -füßiger An-

lage und zeigte während der Messung 4,13 m Wassertiefe und 15,30 m Spiegelbreite. Sohle und Böschungen sind mit Beton vom Mischungsverhältnis 1:12 verkleidet, dessen Sand und Kies an Ort und Stelle ausgehoben worden war. Die letzten gleichzeitig mit dem übrigen Beton aufgebracht 2 bis 3 cm bilden einen mit Holzreibern



1 : 300 w. Gr.

Abb. 12. Werkgraben Garching-Neukirchen.

von etwa 20 auf 30 cm Fläche oder mit der Kelle geglätteten Putz<sup>1)</sup>. Die Betonierung war teils im Sommer 1917, teils im Sommer 1918, also 1 und 2 Jahre vor der Messung, hergestellt worden. Das Gerinne zeichnet sich durch Regelmäßigkeit, Gleichförmigkeit und guten Zustand seiner Oberfläche aus. Die Spiegelschwankungen waren gering, da das vom Gerinne versorgte Werk in Margarethenberg noch nicht in Vollbetrieb stand, also ein großer Teil des Wassers hier durch den Leerschuß abließ. Diese Umstände und die dreimalige Durchflußbestimmung

<sup>1)</sup> Vgl. H. Dietz, Z. V. d. I. Bd. 64 (1920), S. 723. Der Putz hatte die Mischung 1 : 3.

bei gleichzeitiger Spiegelbeobachtung an 10 Punkten längs einer Strecke von 3600 m, die wenige und nur flache Kurven enthielt, machen die Aufnahme zu einer besonders zuverlässigen. Sie liefert folgende Daten, wenn wieder bei der Gesamtmittelbildung die zweite bis vierte Reihe mit dem doppelten Gewicht der ersten und letzten bewertet wird.

Garching-Neukirchen 1920.

Durchfluß $Q$ in $m^3/sec$	57,3	56,7	56,5	
Geschwindigkeit $U$ in $m/sec$				
Abstand vom Streckenanfang m	Messung			Im Mittel
	I	II	III	I bis III
800	1,365	1,35	1,35	1,355
1200	1,345	1,345	1,33	1,340
1600	1,34	1,33	1,33	1,333
2000	1,35	1,34	1,335	1,342
2400	1,35	1,335	1,33	1,338
3200	1,31	1,30	1,305	1,305
			Gesamtmittel	1,337
Profilradius $R$ in m				
800	2,29	2,27	2,27	2,277
1200	2,31	2,29	2,30	2,300
1600	2,30	2,31	2,31	2,317
2000	2,31	2,30	2,30	2,303
2400	2,31	2,31	2,31	2,310
3200	2,35	2,33	2,34	2,340
			Gesamtmittel	2,308
Gefälle in $\text{‰} = 1000 J$				
800	0,1630	0,1600	0,1603	0,1611
1200	0,1680	0,1640	0,1638	0,1653
1600	0,1684	0,1658	0,1638	0,1660
2000	0,1650	0,1598	0,1586	0,1611
2400	0,1570	0,1500	0,1485	0,1518
3200	0,1515	0,1525	0,1505	0,1515
			Gesamtmittel	0,1581

Aus obigen Zahlen geht durch Zusammenstellung der Mittel hervor:

Abstand vom Streckenanfang m	Profilradius $R$ m	Gefälle in $\text{‰}$ 1000 $J$	Geschwindigkeit $U$ m/sec	Koeffizient $\lambda$ in $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$
800	2,277	0,1611	1,355	60,01
1200	2,3	0,1653	1,340	58,18
1600	2,317	0,1660	1,333	57,46
2000	2,303	0,1611	1,342	58,96
2400	2,310	0,1518	1,338	60,43
3200	2,340	0,1515	1,305	58,47
			Gesamtmittel	58,92

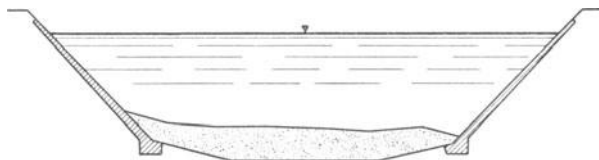
Von besonderem Belang ist es, daß  $\frac{5}{4}$  Jahre später neue Messungen bei halbvollem Kanal vorgenommen wurden. Es zeigte sich:

	Durchfluß $Q$ m <sup>3</sup> /sec	Profilradius $R$ m	Gefälle in ‰ = 1000 $J$	Geschwin- digkeit $U$ m/sec	$\lambda$ in $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$
Messung I	22,6	1,88	0,077	0,79	57,9
„ II	22,2	1,88	0,077	0,78	57,1
„ III	22,9	1,88	0,077	0,80	58,6

also  $\lambda$  unwesentlich kleiner als früher, was durch eine tatsächliche Veränderung der Wandungen verursacht worden sein kann.

Das Mittel aller Zahlen gibt für den vollen Werkgraben  $U = 1,335$ ,  $R = 2,308$ ,  $J = 0,0001595$ ,  $c = 69,63$ ,  $n = 0,0163$  und für den halbvollen Werkgraben  $U = 0,79$ ,  $R = 1,88$ ,  $J = 0,000077$ ,  $c = 65,66$ ,  $n = 0,0172$ .

Weniger genau wie die angeführten Messungen war die im Obergraben des Elektrizitätswerkes Peggau-Deutsch-Feistritz der

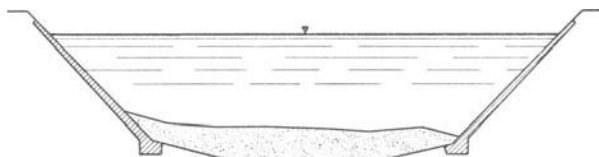


1 : 300 w. Gr.

Abb. 13. Werkgraben Peggau-D. Feistritz bei km 0,300.

Steiermärkischen Elektrizitätsgesellschaft. Dieser Obergraben erstreckt sich auf über 1 km Länge vom betreffenden Wehr des Flusses Mur bis zu einem Stollen von rund 400 m Länge, von dem aus wieder ein offener Graben von rund 600 m Länge zum Krafthaus führt. Die Gräben haben eine wagrechte Sohle von 6 m Breite zwischen Wehr und Stollen und von 5 m zwischen Stollen und Krafthaus, an welche Sohle beidseitig flachgeneigte Streifen von je 3 m Grundrißbreite anschließen, die den Übergang zu den Böschungen bilden. Die Neigung der Übergangstreifen beträgt 1:4 zwischen Wehr und Stollen, 1:2 zwischen Stollen und Krafthaus, die der Böschungen durchwegs 1:1. Durch die Übergangflächen erscheinen, besonders zwischen Stollen und Krafthaus, die toten Ecken in günstiger Weise sehr eingeschränkt. Oberhalb des Stollens sind die Böschungen mit Beton versichert und war die Sohle überall mit Schlamm und Kies bedeckt. Gemessen wurde von Profil 100 bis 600 (vom Wehr aus bezeichnet) und von 700 bis 1049,5, und zwar

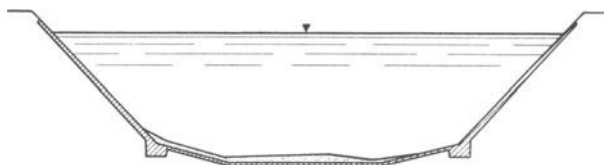
weil diese Teile gerade sind, während zwischen ihnen ein Bogen liegt. Auch vom Stollen abwärts, wo der ganze Umfang betoniert ist, wurde gemessen. Die Messungen begannen am 9. April 1920 zwischen Wehr und Stollen, und die Untersuchung zeigte Sohle und Übergangsstreifen — wie schon angedeutet — von einem Gemenge von Schlamm und Urgebirgsschotter bedeckt, welche letzterer aus Sand und Kies mit abge-



1 : 300 w. Gr.

Abb. 14. Werkgraben Peggau-D. Feistritz bei km 0,900.

rundeten (also nicht ganz runden) Körnern bis Gansseigröße bestand. Der Beton ist gut erhalten, zeigt in der Kiessohlenstrecke Algenansatz, keinen solchen im übrigen Graben. Die Gefällsermittlung litt unter der Kürze der Einzelstrecken und unter fortwährenden Spiegelschwän-



1 : 30 000 w. Gr.

Abb. 15. Werkgraben Peggau-D. Feistritz bei km 2,450.

kungen, zeigte sich doch das Gefälle auf 100 m Länge bisweilen negativ, so daß nur der Mittelwert des Spiegelgefälles auf brauchbare Lösungen führt. Am 10. April fand eine Spülung statt, bei der die Geschwindigkeit aber nicht über 2 m stieg, da man der Kiessohle wegen nicht wagte, kräftiger vorzugehen, so daß die Deckschicht an den Meßstellen zwar verändert und etwas vermindert, aber nicht fortgeschafft wurde. Die Meßergebnisse sind die folgenden, wobei für jeden Punkt, soweit zugänglich, sowohl das jeweilige örtliche wie auch das ausgeglichene Gefälle eingesetzt wurde.

## Peggau-Deutsch Feistritz 1920.

Entfernung vom Grabenanfang km	Vor der Spülung			$\lambda$ in $U =$ $\lambda R^{0,7} J^{0,5}$ $m^{0,3}/sec$
	$U$ m/sec	$R$ m	1000 $J$	
0,100	1,21	2,48	0,0904	64,0
0,100	1,21	2,48	0,130	53,3
0,100	1,26	2,51	0,178	49,7
0,100	1,26	2,51	0,210	45,7
0,300	1,15	2,55	0,0904	63,0
0,300	1,15	2,55	0,130	52,3
0,300	1,20	2,62	0,178	46,0
0,300	1,20	2,62	0,210	42,3
0,500	0,947	3,07	0,0465	63,5
0,500	0,947	3,07	0,0503	60,7
0,500	1,09	2,85	0,146	43,3
0,700	1,00	3,01	0,096	47,2
0,900	0,925	3,23	0,0874	43,7
0,900	0,925	3,23	0,096	40,6
1,0495	0,91	3,20	0,0874	43,1
1,0495	0,91	3,20	0,096	41,1

Der Durchfluß  $Q$  betrug bei den 3 vorgenommenen Durchflußmessungen 70,2, 70,2 und 75,2  $m^3/sec$ .

Entfernung vom Grabenanfang km	Nach der Spülung			$\lambda$ in $U =$ $\lambda R^{0,7} J^{0,5}$ $m^{0,3}/sec$
	$U$ m/sec	$R$ m	1000 $J$	
0,100	1,22	2,51	0,146	53,0
0,100	1,28	2,46	0,150	55,7
0,100	1,26	2,53	0,186	48,5
0,100	1,21	2,53	0,186	46,5
0,300	1,18	2,05	0,1195	54,7
0,300	1,13	2,70	0,124	51,0
0,300	1,14	2,68	0,133	49,8
0,300	1,18	2,68	0,133	51,7
0,500	1,10	2,81	0,0804	59,2
0,500	1,06	2,82	0,0804	57,0
0,500	1,10	2,79	0,089	57,0
0,500	1,055	2,84	0,103	49,3
0,500	1,10	2,81	0,133	46,5
0,700	1,01	2,85	0,0635	59,8
0,700	0,965	3,00	0,086	48,0
0,900	0,925	3,24	0,0369	68,0
0,900	0,89	3,21	0,0369	66,0
0,900	0,90	3,22	0,0497	56,0
0,900	0,954	3,11	0,0635	56,4
1,0495	0,94	3,22	0,0369	69,0
1,0495	0,91	3,21	0,0369	67,3
1,0495	0,91	3,22	0,0497	57,0
1,0495	0,945	3,17	0,0635	56,0

Zwei Durchflußmessungen ergaben  $Q = 74,6$  und  $72,6 m^3/sec$ .

Entfernung vom Grabenanfang km	Nach der Spülung			$\lambda$ in $v =$ $\lambda R^{0,7} J^{0,5}$ m <sup>0,3</sup> /sec
	$U$ m/sec	$R$ m	1000 $J$	
2,450	1,06	3,08	0,0612	62,0
2,450	1,04	3,10	0,0612	60,5
2,450	1,06	3,08	0,0632	60,6
2,650	1,07	3,07	0,0612	62,6
2,650	1,05	3,07	0,0612	61,4
2,650	1,07	3,07	0,0632	61,5
2,850	1,02	3,17	0,0612	58,3
2,850	1,00	3,17	0,0612	57,2
2,850	1,02	3,17	0,0612	57,4

Zwei Durchflußmessungen ergaben  $Q = 74,0$  bzw.  $75,5$ .

Diese 3 Zahlentafeln liefern als Mittel für den Graben:

vom Wehr zum Stollen vor der Spülung . . .  $\lambda = 50,0$  m<sup>0,3</sup>/sec  
 „ „ „ „ nach „ „ . . .  $\lambda = 55,8$  „  
 vom Stollen zum Krafthaus nach der Spülung . .  $\lambda = 60,2$  „

Hiernach hat die Spülung zwischen Wehr und Stollen eine Glättung der Sohle bewirkt. Zwischen Stollen und Krafthaus, wo der Spülstrom kräftiger wurde, tat sie das vermutlich in höherem Grade. Die wesentliche Ursache, daß hier  $\lambda$  größer war als weiter stromauf, bestand aber wohl im günstigeren Verhältnis der Betonböschungen zur versandeten Sohle. Es waren nämlich die Anteile von Beton einerseits, Schlamm und Kies andererseits am benetzten Umfang

	Schlamm u. Kies	Beton
von km 0,100 bis km 1,0495 vor der Spülung . .	0,52	0,48
„ „ 0,100 „ „ 1,0495 nach „ „ . .	0,50	0,50
„ „ 2,450 „ „ 2,850 „ „ „ . .	0,22	0,78

Man sieht, daß eine schmale Sohle, die man schon wegen der hydraulisch günstigeren Umrißform heute gerne wählt, auch durch die Einschränkung der Schlamm- oder Kiesdecke wesentlichen Vorteil bietet.

Vorstehende Daten ergeben ferner

Entfernung vom Grabenanfang km	Vor der Spülung			de Chézys $c$ m <sup>1/2</sup> /sec	Ganguillet- Kutters $n$
	$U$ m/sec	Im Mittel $R$ m	1000 $J$		
0,100	1,235	2,495	0,1521	67,15	0,0172
0,300	1,175	2,585	0,1521	59,26	0,0199
0,500	0,961	2,993	0,0809	63,94	0,0193
0,700	1,000	3,01	0,096	58,83	0,0210
0,900	0,925	3,23	0,0917	53,75	0,0237
1,0495	0,910	3,20	0,0917	53,12	0,0240

Entfernung vom Grabenanfang km	Nach der Spülung Im Mittel			de Chézys $c$ $m^{1/2}/sec$	Ganguillet- Kutters $n$
	$U$ m	$R$ m	1000 $J$		
0,100	1,243	2,508	0,1670	64,72	0,0192
0,300	1,158	2,528	0,1274	64,56	0,0182
0,500	1,083	2,814	0,0972	65,48	0,0184
0,700	0,988	2,925	0,07475	66,82	0,0184
0,900	0,917	3,195	0,04675	75,20	0,0169
1,0495	0,926	3,205	0,04675	75,65	0,0168
2,450	1,053	3,087	0,06187	76,19	0,0162
2,650	1,063	3,070	0,06187	77,13	0,0159
2,850	1,013	3,170	0,06187	72,33	0,0173

oder im Gesamtmittel

von km 0,1	bis 1,0495	vor der Spülung	. . . . .	$c = 59,3$	$n = 0,0209$
„ „ 0,1	„ 1,0495	nach „ „	. . . . .	$c = 68,1$	$n = 0,0180$
„ „ 2,450	„ 2,850	„ „ „	. . . . .	$c = 75,2$	$n = 0,0165$

Ähnlichkeit mit dem Peggauer Kanal besitzt der des Elektrizitätswerkes zu Aarau, von dem Epper<sup>1)</sup> folgende Daten angibt:

$U = 1,014$  m/sec,  $R = 2,016$  m,  $J = 0,000120$ , Sohle aus feinem Kies, linke Wandung Betonmauer mit Neigung 1,1 wagrecht auf 1 lotrecht, rechte Wandung 1,2 wagrecht auf 1 lotrecht, also Anteil des Kieses am Umfang 0,74, Anteil des Betons am Umfang 0,26,  $c = 65,19$  m<sup>1/2</sup>/sec,  $n = 0,0173$ . Das ergibt  $\lambda = 56,66$  oder

$$(13c) \quad U = 56,66 R^{0,7} J^{0,5}$$

Der Versuchstoff, der nunmehr für die Beurteilung fester Gerinne, besonders solcher aus Beton, vorliegt, ist nicht unbeträchtlich, und zwar sei vorerst der folgende in Erinnerung gebracht, in welchem  $\mu$  oder  $\nu$  oder beide Exponenten von den Werten 0,7 bzw. 0,5 abweichen.

	$R$ in m im Mittel	$U$ in m/sec ist =
Ganz glattes Rohr Gl. (8) . . . . .	—	201 $R^{0,71} J^{0,57}$
Brettergerinne Gl. (10) . . . . .	0,20	136 $R^{0,69} J^{0,58}$
Sudbury-Aquädukt in Klinker Gl. (12) . . . . .	0,43	82,1 $R^{0,82} J^{0,5}$
„ „ „ Zementputz Gl. (12a) . . . . .	0,43	87,2 $R^{0,82} J^{0,5}$
Croton „ „ Klinker Gl. (13a) . . . . .	0,75	73,1 $R^{0,59} J^{0,5}$
Siele in Massachusetts, getünchte Ziegel, neu (Jauche) Gl. (13b) . . . . .	0,47	72,7 $R^{0,612} J^{0,5}$
Desgl. nach 4 Betriebsjahren (Jauche) Gl. (13c)	0,47	63,2 $R^{0,612} J^{0,5}$

Tut man den Ausdrücken den Zwang an, nur die Bauweise  $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$  zuzulassen und schließt man ihnen jetzt die Fälle an, in

<sup>1)</sup> Entwicklung der Hydrometrie in der Schweiz, Pl. 83, 84.



denen  $\mu = 0,7$ ,  $\nu = 0,5$  gefunden oder vorausgesetzt wurde, so erhält man als Zahlenspalte für  $\lambda$ :

Ganz glattes Rohr für $J = 0,0001$ . . . . .	104,4
Glattes Holzgerinne für $J = 0,005$ . . . . .	90,5
Sudbury-Aquädukt in Klinker . . . . .	87,8
„ „ „ Zementputz . . . . .	93,3
Croton „ „ Klinker . . . . .	75,4
Sittertunnel in Beton . . . . .	91,8
Wienbett in Beton . . . . .	80,1
Werkgraben Garching-Neukirchen, 1 bis 2 Jahre alter Beton . . . . .	59,0
„ „ „ $\frac{3}{4}$ Jahre später . . . . .	57,9
„ Trostberg-Tacherting, neuer Schalenbeton . . . . .	60,3
„ „ „ nach 10 Betriebsjahren . . . . .	48,6
„ Peggau zu 0,78 Beton, zu 0,22 Schlamm und Kies . . . . .	60,2
„ „ „ 0,5 „ „ 0,5 „ „ „ . . . . .	55,8
„ „ „ 0,48 „ „ 0,52 „ „ „ . . . . .	50,0
„ Aarau zu 0,26 Beton, zu 0,74 Feinkies . . . . .	56,6

Die Unterschiede der Glättezahlen  $\lambda$  erklären sich nicht nur durch die Herstellungsweise, von deren Einfluß bereits oben auf Seite 14 die Rede war, sondern auch durch den Erhaltungszustand und die Reinheit der Wandungen. So bleiben geschlossene Leitungen freier von pflanzlichem Ansatz als offene Rinnsale. Die Glätte des Wienbettes kommt, wenigstens zum Teil daher, daß vor jeder Messung, die man bei höherem Wasserstande vornahm, das Hochwasser das Bett rein gespült hatte. Vergleichsweise ungünstiger verhalten sich die meisten Werkgräben, besonders solche mit breiter flacher Sohle.

Hiernach gilt für ablagerungsfreien Beton im allgemeinen

(14) 
$$U = 59 R^{0,7} J^{0,5}$$

für alten angegriffenen Beton

(15) 
$$U = 50 R^{0,7} J^{0,5}$$

### 10. Der Exponent $\mu$ des Profilradius bei Fließen in Erd- und Kiesbetten.

Es ist bereits S. 21 mitgeteilt worden, auf welche Potenzen des Profilradius drei der üblichsten Formeln führen. Für Erd- und Kiesbetten nimmt die entsprechende Ableitung nachstehende Form an:

Geschwindigkeit m/sec	Bazin	
	regelmäßige Erdbetten	Kanäle üblichen Zustandes
$U =$	$\frac{87 R}{0,85 + \sqrt{R}} \sqrt{J}$	$\frac{87 R}{1,3 + \sqrt{R}} \sqrt{J}$

Geschwindigkeit m/sec	Ganguillet und Kutter $n = 0,025$ $J = 0,001$ $J = 0,0001$		Biel mit seinem $f = 0,45$
	$U =$	$\frac{63,16 R}{0,5789 + \sqrt{R}} \sqrt{J}$	

Die von  $R$  abhängigen Teile stehen in nachstehendem Verhältnis zueinander:

Von $R$ abhängig $R$ in m	$R =$	1	2	3	4	5
$R : (0,85 + \sqrt{R})$ . . . . . =		1	1,62	2,11	2,54	2,93
$R : (1,3 + \sqrt{R})$ . . . . . =		1	1,69	2,27	2,78	3,25
$R : (0,5789 + \sqrt{R})$ . . . . . =		1	1,58	2,05	2,45	2,80
$R : (0,6138 + \sqrt{R})$ . . . . . =		1	1,59	2,06	2,47	2,83
$R^{3/4} = \sqrt{3,75 + \sqrt{R}}$ . . . . . =		1	1,61	2,12	2,57	2,98

Andererseits ist für obige  $R$

$R =$	1	2	3	4	5
$R^{0,64}$ . . . . . =	1	1,56	2,02	2,43	2,80
$R^{0,66}$ . . . . . =	1	1,58	2,07	2,50	2,89
$R^{0,68}$ . . . . . =	1	1,60	2,11	2,57	2,99
$R^{0,70}$ . . . . . =	1	1,63	2,16	2,64	3,09
$R^{0,72}$ . . . . . =	1	1,65	2,21	2,71	3,19
$R^{0,74}$ . . . . . =	1	1,67	2,26	2,79	3,29

Hiernach soll bei zunehmendem Profilradius die Geschwindigkeit nach

Bazin                      Ganguillet und Kutter      Biel  
 proportional mit  $R^{0,70}$  bis  $R^{0,74}$        $R^{0,65}$  bis  $R^{0,66}$        $R^{0,68}$

wachsen, wobei besonders die Bielsche Gleichung mit dem Exponentialausdruck gut übereinstimmt.

Versuche, die Bazin mit einem rechteckigen Gerinne von 1,8 m Weite machte, dessen Innenfläche mit vortretenden Kieseln von 1 bis 2 cm Korn verkleidet war (Serie 4), ergaben bei  $R = 0,076$  bis  $0,25$  m,  $J = 0,0049$

(16) 
$$U = 62 R^{0,733} J^{0,5}$$

während bei gleicher Auskleidung aber Halbkreisquerschnitt von 1,22 m Durchmesser und  $R = 0,14$  bis  $0,31$  m,  $J = 0,0015$  (Serie 27)

(16a) 
$$U = 74 R^{0,743} J^{0,5}$$

und bei rechteckigem Gerinne von 1,8 m Weite und dem Kieselkorn von 3 bis 4 cm,  $R = 0,09$  bis  $0,26$  m,  $J = 0,0049$  (Serie 5)

$$(16b) \quad U = 38 R^{0,823} J^{0,5}$$

war. Die hohen Werte von  $\mu$  sind überraschend und jedenfalls nicht, wie sich zeigen wird, auf Gräben von großen Abmessungen übertragbar.

Für solche lassen sich Aufnahmen verwenden, welche das österreichische hydrographische Zentralbureau im Donaukanal<sup>1)</sup> vorgenommen hat. Sie empfehlen sich ganz besonders, weil sie in der Ermittlung von nicht weniger als 14 Staukurven im selben ziemlich regelmäßigen Bett bestehen, welche Staukurven den Vorteil bieten, daß sie das Gefälle mit Sicherheit erkennen lassen. Erzeugt wurde der Stau dadurch, daß man — wie dort üblich — bei Hochwasser im Hauptstrom, der „Großen Donau“ nur einen Teil des Wassers an der Abzweigstelle durch das dortige Schützenwehr in den Kanal treten ließ. Dann bewirkte der hohe Donauspiegel von der Kanalmündung hinauf einen Rückstau in den Kanal. In diesem befindet sich, nebenbei gesagt, ebenfalls ein Stauwehr, welches aber zur Zeit der Aufnahmen immer vollständig niedergelegt war.

Die Bearbeiter der Aufnahmen<sup>2)</sup> Ehrenberger und Kovařík fanden es zweckmäßig, den Donaukanal in die 4 Strecken

Jubiläumsbrücke — Brigittabrücke . . . . .	von km	0,75	bis	4,85
Kaiserbadschleuse — Ferdinandsbrücke . . . . .	„ „	4,85	„	6,80
Franzensbrücke — Gasrohrsteg . . . . .	„ „	6,80	„	11,00
Simmering — Donauuferbahnbrücke . . . . .	„ „	11,00	„	16,65

zu zerlegen. Von diesen Strecken scheidet bei der Besprechung, die jetzt folgen soll, die zweite aus, weil sie ein Wehr mit Kammerschleuse sowie den Mittelpfeiler der Ferdinandsbrücke enthält. Die Beobachtungen in den drei anderen Strecken lassen sich zu nachstehender Tabelle (s. S. 40) vereinigen:

In diesen Zahlenreihen kommt die mittlere Tiefe  $T$ , die im Donaukanale vom Profilradius nur wenig verschieden ist, und die de Chézy'sche Zahl  $c = U : \sqrt{RJ}$  vor. Soll die Exponentialgleichung (7) gelten, so müssen bei Auftragung von  $\log T$  und  $\log c$  als Abszissen und Ordinaten die Punkte in eine Gerade fallen. Das taten sie nicht genau, doch ordneten sie sich in 3 von links nach rechts ansteigende Scharen an. Die Aufsuchung der Geraden, welche die Fehlerquadrate der Logarithmen (also nicht, wie allerdings richtiger wäre, die der Beobachtungen selbst) zu einem Minimum machten, ergaben nach Ersatz der

<sup>1)</sup> Es ist eigentlich ein alter Donauarm, führt aber den Namen Donaukanal.

<sup>2)</sup> Öst. Wochenschr. f. d. öffentl. Baudienst 18 (1912), S. 746.

Donaukanal.

Tiefe $T$	Gefälle 1000 $J$	Geschwin- digkeit $U$	Chézys Zahl	Tiefe $T$	Gefälle 1000 $J$	Geschwin- digkeit $U$	Chézys Zahl	Tiefe $T$	Gefälle 1000 $J$	Geschwin- digkeit $U$	Chézys Zahl
1,67	0,285	1,23	56,4	2,20	0,284	0,96	38,3	2,68	0,190	0,81	35,9
1,72	0,299	1,13	50,4	2,37	0,211	0,90	40,2	3,03	0,193	0,91	37,8
1,72	0,299	1,15	50,5	2,51	0,161	0,87	43,4	3,42	0,082	0,62	36,7
2,07	0,289	1,24	50,7	2,51	0,278	1,09	41,2	3,43	0,160	0,86	36,9
2,19	0,324	1,28	48,0	2,75	0,243	1,07	41,4	3,77	0,145	0,93	39,9
2,22	0,255	1,14	47,9	3,00	0,231	1,16	44,5	3,83	0,052	0,57	40,5
2,43	0,314	1,38	49,9	3,39	0,170	1,05	43,6	4,61	0,085	0,75	38,0
2,49	0,290	1,41	52,6	3,44	0,143	1,03	46,4	4,66	0,070	0,83	46,0
2,53	0,299	1,50	48,4	3,45	0,093	0,77	43,0	4,72	0,077	0,73	38,3
2,53	0,290	1,34	55,4	3,50	0,170	1,12	46,1	4,89	0,035	0,53	40,8
2,57	0,245	1,30	51,8	3,61	0,132	0,97	44,5	4,96	0,055	0,65	39,6
2,66	0,235	1,27	50,9	3,85	0,193	1,28	46,9	5,04	0,099	0,99	47,1
3,00	0,245	1,64	60,4	4,04	0,087	0,88	46,5	5,34	0,075	0,92	46,0
3,05	0,235	1,58	59,1	4,04	0,164	1,21	47,1	5,57	0,032	0,61	44,8
im Mittel				im Mittel				im Mittel			
2,35	0,279	1,33	52,3	3,19	0,183	1,13	43,8	4,28	0,097	0,77	40,6

Tiefen  $T$  durch die Profilradien  $R$ , weil hier  $T =$  ungefähr  $1,04 R$  ist, die Beziehungen

- Bezeichnung  
in der Abb.
- (17) für Jubiläumsbrücke—Brigittabrücke . . .  $c = 43,3 R^{0,21}$  ○  
 (17a) „ Franzensbrücke—Gasrohrsteg . . .  $c = 31,6 R^{0,29}$  ⊗  
 (17b) „ Simmering—Donauuferbahnbrücke . . .  $c = 26,3 R^{0,30}$  ⊙

Messungen (mit + in der Abb. 16 bezeichnet), die von der Jubiläumsbrücke aus mit in üblicher Weise vollzogener Gefällsermittlung vorgenommen waren<sup>1)</sup>, 16 an der Zahl, ordneten sich zwischen den Scharen der Strecke Franzensbrücke—Gasrohrsteg und denen der Strecke Simmering—Donauuferbahnbrücke ebenfalls mit schrägem Anstieg an, während 15 Messungen im großen Strom (mit × in der Abb. 16 bezeichnet), die man von der dortigen Kaiser Franz Joseph-Brücke aus bewerkstelligt hatte, ein von der Tiefe scheinbar unabhängiges  $c$  vom Mittelwert 50,3 im nicht ausufernden und vom Mittelwert 46,7 im ausufernden Strom lieferten. Dies erkennt man zweifellos trotz der Streuung der Punkte, die sich durch die mit dem Wasserstande wechselnden Uferinflüsse, Strömungen, Veränderungen der Sohle und Messungsfehler erklärt. Daß die „Große Donau“ der Strömung im künstlichen, regelmäßigen Durchstich trotz einiger

<sup>1)</sup> Beiträge zur Hydrographie Österreichs (E. Lauda) 3. Die hydrometrischen Erhebungen an der Donau nächst Wien im Jahre 1897. Wien 1899, S. 60, 61.

tiefliedender Einbauten weniger Widerstand leistet als der größte Teil des Donaukanals, entspricht dem technischen Gefühle jener dort tätigen Ingenieure, mit denen hierüber gesprochen werden konnte. Die geringe Abnahme der Reibung im Bette der „Großen Donau“ mit deren Austreten über die Ufer ist um so eher begreiflich, als die Überschwemmungsfläche ganz eben, nur mit Gras bewachsen und gleichförmig breit ist.

Für den Wechsel der Rauheit im Donaukanal lassen sich verschiedene Ursachen angeben. Daß das Gefälle Franzensbrücke—Gasrohrsteg jenes bei Simmering übertrifft, mag daher kommen, daß erstere Strecke natürlichen Ursprungs ist und einen geschlängelten Lauf besitzt, während die zweite (wie eine Stromkarte aus dem Jahre 1819 zeigt) durch eine gerade Grabung entstanden ist und daher ein größeres Gefälle erhielt, welches

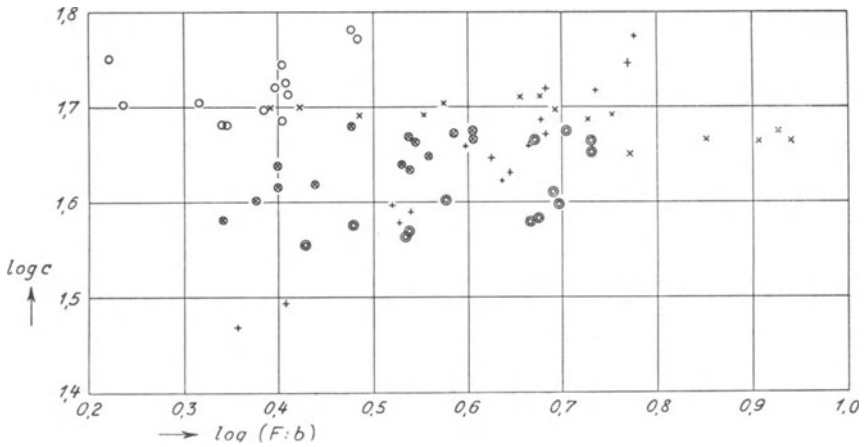


Abb. 16. De Chézysche Zahlen im Donaukanal und in der Großen Donau.

heute allerdings fast verschwunden ist. Erheblicher und auffallender ist die glattere Beschaffenheit zwischen der Jubiläums- und der Brigitta-brücke. Daß von der Brigittabrücke abwärts der Fluß im alten Stadtgebiete liegt, wo von Ufersicherungen herrührende Steine vielleicht selbst Pfahlreste den Abfluß behindern, kann nicht der Grund der verschiedenen Rauigkeiten sein, weil diese Steine und etwaigen Pfahlreste sicher nicht in hierfür genügender Zahl vorhanden sind. Der Krottenbach, der ab und zu Schotter bringt, die Wien und die Sammelkanäle, die bloß Schlamm führen, könnten nur das Entgegengesetzte bewirken von dem, was der Fall ist. Eine Vertiefung der Sohle um 50 bis 60 cm auf 3,2 m unter Null im Sommer 1902 kann wohl kaum die Flußteile ungleich beeinflußt haben. Auch der nach Beobachtungen des Wiener Stadtbauamtes vor sich gehenden Aufhöhung der Donaukanalsole ist die in Rede stehende Erscheinung schwerlich zuzuschreiben.

So bleibt als einzige Ursache die Dampfschiffahrt übrig. Die beiden unteren Strecken wurden bis zur Wienmündung von Schleppern der Süddeutschen Donau-Dampfschiffahrt-Gesellschaft sowie der Sandbagger-Gesellschaft befahren, das ist von Raddampfern von höchstens 1 bis 1,2 m Tauchung; auch fuhr ebensoweit ein paarmal im Jahr der Schraubendampfer der Donauregulierungskommission, dessen Heck während der Fahrt 1,5 m tief taucht. Die obere Strecke wurde aber nie von einem Dampfer aufgesucht. Die Dampfer sind es also, die die Sohle aufrauen.

Sehr erklärlich sind die Veränderungen, welche die Rauhigkeit an ein und derselben Stelle bei wachsender Tiefe aufweist. Auf der oberen Kanalstrecke herrscht ein Gesetz mit ähnlichen Exponenten wie bei Betonwandungen, nämlich nach Gl. (17)

$$U = 43,3 R^{0,71} J^{0,5}$$

Dies läßt darauf schließen, daß hier eine wenig veränderliche Sohle vorhanden ist, wie es in der Tat zutrifft. Bedeutendere Hochwässer werden nämlich an der Abzweigung des Kanales durch das schon erwähnte Nadelwehr mehr oder weniger zurückgehalten und auch der Stau von der Mündung gelangt gar nicht oder sehr ermäßigt bis über die Brigittabrücke. Die beiden unteren Strecken stehen dagegen ganz im Staubereiche, stieg doch an der Mündung der Spiegel während der Messung vom 16. Juli 1909 bis zur Höhe von 156,10 ü. M. an, während die Sohle an der Franzensbrücke im Mittel etwa 153,9 m ü. M. liegt. Der Stau muß nun Sand- und Schlammabsätze zur Folge haben, dadurch die Sohle glätten, welcher Vorgang sich in einer Vergrößerung des Exponenten  $\mu$  äußern muß. So kommt es, daß von der Franzensbrücke abwärts sich nach Gl. (17a) und (17b)

$$U = 31,6 R^{0,79} J^{0,5} \text{ bzw. } 26,3 R^{0,8} J^{0,5}$$

ergab. Ist im unteren Donaukanal bei wachsender Tiefe die Sohle glatter, so geschieht in der Großen Donau das Gegenteil. Hier hindert kein Sperrwerk den Wassereintritt und es geht das gleiche bei Hochwasser vor sich, wie in anderen Strömen: Die Sohle wird aufgewühlt und durch das Fortspülen des feineren Sandes rauher. Der Exponent  $\mu$  im Ausdruck für die Geschwindigkeit muß hierdurch eine Verringerung erfahren <sup>1)</sup> und wirklich zeigte sich, wie oben berichtet, im offenen Strom  $c$  konstant oder sinkt hier  $\mu$  auf 0,5 hinab. Somit liegen die Erscheinungen klar: es gilt für die Geschwindigkeit bei unveränderlicher Bettfläche

$$(18) \quad U = \lambda R^{0,7} J^{0,5},$$

in Geschiebetteben, wenn das Gefälle starker Aufwirbelung unterliegt,

$$(19) \quad U = \lambda R^{0,5} J^{0,5} = c \sqrt{R J},$$

in welcher Gleichung  $\lambda = c$  von der Rauhigkeit abhängt.

<sup>1)</sup> Vgl. die ähnliche Betrachtung bezüglich  $\nu$  auf S. 20.

Diese Abhängigkeit des Exponenten  $\mu$  von der Beweglichkeit der Sohle erfährt eine Bestätigung dadurch, daß nach Messungen, die Harlacher<sup>1)</sup> seinerzeit in der Elbe bei Herrnkretschken vornahm, wo die Sohle aus Fels und Geschiebe zusammengesetzt ist, sich mit  $\nu = 0,5$  sehr genau

$$(20) \quad U = 396 R^{0,642} J^{0,5}$$

zeigte, also ein  $\mu$  zwischen dem des beweglichen Grundes und dem des festen Bettes.

### 11. Der Koeffizient $\lambda$ für Erd- und Kiesbetten.

Auf welche Koeffizienten  $\lambda$  die älteren Messungen bei Profiltradien bis zu etwa 1 m führen, wird durch die auf ihnen beruhenden Formeln ausgedrückt. So haben bei geeigneter Schreibweise nach

Bazin	Ganguillet und Kutter	Biel
Erdkanäle üblichen Zustandes $\gamma = 1,30$	Kanäle in Erde, Bäche u. Flüsse $n = 0,025$ für $J = 0,0001$	Regelmäßige Erd-Betten, $f = 0,45$

$$U = \frac{87 R^{0,3}}{1,3 + R^{0,5}} R^{0,7} J^{0,5} \quad U = \frac{78,5 R^{0,3}}{0,9625 + R^{0,5}} R^{0,7} J^{0,5}$$

$$U = \frac{\sqrt{8333} R^{0,05}}{\sqrt{3,75 + \sqrt{R}}} R^{0,7} J^{0,5}$$

Man erkennt bei dieser Schreibweise sofort die Ausdrücke für  $\lambda$  und kann leicht ausrechnen, daß für

$R$ in m	1	2	3	4	5
Nach Bazin . . . . . $\lambda =$	37,8	38,6	39,6	39,6	39,5
„ Ganguillet und Kutter. . . . . $\lambda =$	40,0	40,7	40,3	39,6	39,6
„ Biel . . . . . $\lambda =$	41,9	41,6	41,2	40,8	40,4

sein soll.

Besondere Erwähnung verdienen die Erhebungen, die Pasini und Gioppi an 3 Strecken des Cavour-Kanales vornahmen, von denen die erste längs 600 m, die zweite stromauf und stromab über je einen Kilometer, die dritte längs eines beträchtlichen Stückes (per buon tratto) gerade und mit ungeändertem Querschnitt ohne störenden Einbau verläuft. In jeder Strecke fanden 3 Messungen an verschiedenen Tagen statt, die das folgende Bild geben<sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> Beiträge zur Hydrographie des Königreiches Böhmen, 3. Lieferung, 1875.

<sup>2)</sup> Giornale del genio civile 31 (1893), S. 62.

Durchfluß m <sup>3</sup> /sec .	39,694	48,891	75,113	39,734	48,961	75,313	37,54	45,84	51,98
Querschnitts- fläche m <sup>2</sup> . . .	36,97	42,62	56,18	42,06	48,95	66,74	40,35	46,13	50,10
Mittl. Geschwindig- keit $U$ m/sec .	1,074	1,147	1,337	0,945	1,000	1,128	0,930	0,994	1,038
Tiefe m . . . . .	1,84	2,12	2,79	1,93	2,20	2,85	1,71	1,92	2,06
Profilradius m . . .	1,560	1,757	2,195	1,575	1,780	2,228	1,446	1,608	1,714
Wände . . . . .	Ziegelmauerwerk			Böschungen in Grobkies, etwas angegriffen,					
	unter $\frac{1}{20}$ Anlage			stellenweise mit Pflaster 1 : 1					
Sohle . . . . .	20 m breit wagrecht			Grobkies und Steine					
Gefälle $J$ . . . . .	0,00037			0,00029			0,00033		
$c = U \cdot \sqrt{RJ}$ m <sup>3/2</sup> /sec <sup>-1</sup>	44,69	44,99	46,92	44,20	44,03	44,39	42,31	43,13	43,62
Ganguillet und Kutters $n$ . . . . .	0,0243	0,0246	0,0245	0,0247	0,0254	0,262	0,0254	0,0254	0,0254
$\lambda = U \cdot R^{0,7} J^{0,5}$ . . .	40,90	40,19	40,09	40,38	39,22	37,81	39,55	39,24	39,19
Berechneter Um- fang . . . . .	23,70	24,26	25,60	26,70	27,51	29,95	27,91	28,68	29,2

Ersetzt man die Ziegelwände der ersten Strecke schätzungsweise durch Kiesböschungen, welche die gleichen Widerstände hervorrufen, so kann man den benetzten Umfang hier zu 23,4 bzw. 23,9 bzw. 25,1 m bewerten und hat  $R = 1,58$  bzw. 1,78 bzw. 2,24 m und  $\lambda = 40,7$  bzw. 39,8 bzw. 39,5, also im Mittel = 40,0. Für die 3 Strecken ist dann

Strecke	I	II	III
$\lambda$ im Mittel	= 40,0	39,14	39,33
oder im Gesamtmittel	= 39,5.		



1 : 300 w. Gr.

Abb. 17. Obergraben des Uppenbornwerkes.

Die Messungen, die der Verfasser an nicht betonierten noch sonstwie gesicherten Kanälen großer Abmessungen vornahm, ergaben zumeist etwas kleinere Werte von  $\lambda$ .

Am wenigsten rauh stellte sich der geradlinige Oberwassergraben des Uppenbornwerkes<sup>2)</sup> dar. Dieser bezieht sein Wasser aus der Isar bei Moosburg ungefähr 50 km nördlich von München. Sein Bett besteht wesentlich aus Kalksteinschotter, dessen Stücke zwar gut abgerundet, aber nicht immer eiförmig sind und bis zu 5 cm Länge besitzen und dessen Zwischenräume durch Sand und Schlamm ausgeglichen sind. Nachstehend sind die Ergebnisse zusammengestellt, wobei für einige Punkte sowohl das Gefälle der Teilstrecke von 660 m als auch das der Gesamtstrecke von 1320 m Länge als  $J$  eingetragen ist, welche Punkte

<sup>1)</sup> Eine Beschreibung der Anlage durch den Bauleiter, den jetzigen Professor K. Dantscher, findet sich in Beton und Eisen, 6 (1907), S. 276, 317.



durch doppelte Eintragung mit doppeltem Gewicht auf das Mittel wirken.

## Uppenbornwerk 1920.

Entfernung vom Grabenanfang m	Geschwindigkeit $U$ m/sec	Profilradius $R$ m	Gefälle in ‰ $J$	$\lambda$ m <sup>0,3</sup> /sec
330	1,28	2,16	0,321	41,7
330	1,335	2,15	0,320	43,7
660	1,245	2,16	0,299	41,9
660	1,245	2,16	0,298	41,9
660	1,29	2,17	0,301	43,2
660	1,29	2,17	0,292	43,9
990	1,138	2,36	0,274	37,8
990	1,19	2,35	0,265	40,3
Mittel	1,25	2,21	0,29625	41,80

Für den Obergraben des Uppenbornwerkes gilt also

$$(21) \quad U = 41,80 R^{0,7} J^{0,5}$$

ferner im Mittel  $c = 48,91$ ,  $\sqrt{R} = 1,487$ ,  $n = 0,0231$ .

Ein geringeres  $\lambda$ , also größere Rauhigkeit, zeigt der Untergraben des Uppenbornwerkes, dessen Böschungen unregelmäßig geworden



1 : 300 w. Gr.

Abb. 18. Querschnitte des Untergrabens des Uppenbornwerkes.

sind, so daß stellenweise auf der rechten Seite ein Streifen von einigen Metern Breite nur schwach durchflossen wird. Auch ist das Verhältnis der Spiegelbreite von etwa 27 m zur mittleren Tiefe von etwa 2,2 m ungünstiger als beim Obergraben. Er verläuft geradlinig. Es ergaben sich folgende Zahlen:

## Uppenbornwerk 1920.

Entfernung vom Grabenanfang m	Geschwindigkeit $U$ m/sec	Profilradius $R$ m	Gefälle in ‰ $J$	$\lambda$ m <sup>0,3</sup> /sec
300	1,145	2,14	0,407	33,4
300	1,19	2,16	0,415	34,0
600	1,16	2,07	0,412	34,3
600	1,16	2,07	0,412	34,3
600	1,18	2,10	0,417	34,4
600	1,18	2,10	0,417	34,4
900	1,125	2,08	0,417	33,0
900	1,17	2,10	0,418	34,2
Mittel	1,164	2,10	0,41438	34,075

Für den Untergraben des Uppenbornwerkes gilt also

$$(21a) \quad U = 34,08 R^{0,7} J^{0,5}$$

und auch  $c = 39,36 \sqrt{R} = 1,449, n = 0,0294.$

So wie für das große Betongerinne von Garching-Neukirchen liegen für einen großen Erdgraben, nämlich den der Lechwerke bei Stettenhofen Messungen bei 2 verschiedenen Füllungen vor, die im Mittel auf



1 : 300 w. Gr.

Abb. 19. Lechwerk bei Stettenhofen.

dasselbe  $\lambda = 40,6$  führten. Die Sohle besteht daselbst aus Sand und Kies in allen Größen bis zu Gänsegröße, d. i. bis zu etwa 6 cm Länge. Die Böschungen sind zum Teil schlammig. Die Messungen ergaben:

Stettenhofen bei niedrigem Wasserstand 1921:

Entfernung vom Meß- strecken- anfang m	Durchfluß $Q$ m <sup>3</sup> /sec	Geschwin- digkeit $U$ m/sec	Profilradius $R$ m	Gefälle in ‰ = 1000 $J$	$\lambda$ in $U =$ $\lambda R^{0,7} J^{0,5}$
420	38,1	0,905	1,68	0,200	44,5
	38,0	0,910	1,67	0,206	44,4
	38,1	0,920	1,65	0,213	44,4
	37,6	0,895	1,67	0,202	43,5
840	38,1	0,855	1,68	0,219	40,1
	38,0	0,864	1,66	0,233	39,5
	38,1	0,873	1,65	0,241	39,7
	37,6	0,850	1,67	0,234	39,2
1200	38,1	0,862	1,73	0,211	40,5
	38,0	0,870	1,71	0,223	40,1
	38,1	0,882	1,70	0,226	40,4
	37,6	0,858	1,72	0,216	40,0
1220	38,1	0,862	1,73	0,210	40,4
	38,0	0,870	1,71	0,223	40,0
	38,1	0,882	1,70	0,228	40,2
	37,6	0,858	1,72	0,214	40,2
1600	38,1	0,810	1,76	0,203	38,3
	38,0	0,825	1,73	0,214	38,4
	38,1	0,835	1,72	0,212	39,2
	37,6	0,807	1,74	0,198	38,7
Mittel					40,6

Stettenhofen bei hohem Wasserstand 1921:

Entfernung vom Meß- strecken- anfang m	Durchfluß Q m <sup>3</sup> /sec	Geschwin- digkeit U m/sec	Profilradius R m	Gefälle in ‰ = 1000 J	$\lambda$ in $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$
420	65,0	1,15	2,07	0,277	41,7
	65,6	1,15	2,08	0,273	41,7
820	65,0	1,12	2,09	0,280	39,9
	65,6	1,10	2,13	0,284	39,1
1220	65,0	1,10	2,06	0,250	42,0
	65,6	1,10	2,08	0,241	42,5
1220	65,0	1,10	2,06	0,292	38,5
	65,6	1,10	2,08	0,285	39,1
1600	65,0	1,08	2,16	0,308	(36,2)
	65,6	1,02	2,19	0,302	(35,6)
Mittel					40,6

Im Mittel fand sich also sowohl für niedrigen als auch für hohen Wasserstand in Stettenhofen

$$(22) \quad U = 40,6 R^{0,7} J^{0,5}$$

ferner für niedrigen Stand

$$U = 0,865, R = 1,70, J = 0,2163 \text{‰}, c = 45,11, n = 0,0246,$$

ferner für hohen Stand

$$U = 1,115, R = 2,08, J = 0,2727 \text{‰}, c = 46,82, n = 0,0244.$$

Hierzu ist zu bemerken, daß bei höherem Wasserstande das Profil 1600 unter dem Einfluß der 40 m unterhalb liegenden Brücke stehen dürfte, aus welchem Grunde bei der Bildung des Mittelwertes von  $\lambda$ , dieses Profil nicht in Betracht gezogen wurde.



1 : 300 w. Gr.

Abb. 20. Untergraben bei Tacherting.

Am rauhesten stellte sich der Untergraben von Tacherting heraus, dessen Sohle aus eirunden Kalksteinen von etwa 1 bis 7 cm Länge des größten der drei Durchmesser besteht. Sie geht heute mit Abrundung in die beidseitigen 1½füßigen Böschungen über, deren jede zu oberst, nämlich zwischen 0,5 und ungefähr 0,9 m Wassertiefe durch eine Bohlen-

wand begrenzt ist. Die Wände werden alle 1,5 m durch wasserseitig vorgerammte Pfähle von 8 bis 10 cm Dicke gehalten. Die Strecke ist gerade (vgl. Abb. 8 und 30). Je nach Einführung des mittleren Gefälles der Strecke 0 bis 560 m oder 280 bis 560 m als  $J$  zeigte sich

Entfernung v. Graben- anfang m	Geschwin- digkeit $U$ m/sec	Profil- radius $R$ m	Gefälle in ‰ = 1000 $J$		$\lambda$	
			Strecke 0—560 m	Strecke 280—560 m	Strecke 0—560 m	Strecke 280—560 m
0	1,03	2,14	0,488	0,532	27,4	26,2
280	1,11	2,16	0,400	0,487	30,9	30,8
560	1,15	2,14	0,436	0,462	32,3	31,5
Mittel	1,097	2,147	0,441	0,494	30,2	29,5

Da den Gefällen der ganzen Strecke mehr Gewicht zukommt als denen der Unterstrecke, erscheint  $\lambda = 30,0$  am wahrscheinlichsten, und somit  
(23) 
$$U = 30,0 R^{0,7} J^{0,5}$$

Mit  $U = 1,097$ ,  $R = 2,147$ ,  $J = 0,000459$ , erhält man ferner de Chézys  $c = 34,95$ , Ganguillet-Kutters  $n = 0,0337$ .

Die künstlich hergestellten Erdgräben ergaben also

Obergraben des Uppenbornwerkes . . . .	$\lambda = 41,8$	$c = 49,0$	$n = 0,0231$
Graben der Lechwerke bei Stettenhofen .	$\lambda = 40,6$	$\left\{ \begin{array}{l} c = 45,1 \\ c = 46,8 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} n = 0,0246 \\ n = 0,0244 \end{array} \right.$
Cavour Kanal (wesentlich Grobkies) . . .	$\lambda = 39,2$		
Untergraben des Uppenbornwerkes . . . .	$\lambda = 34,1$	$c = 39,5$	$n = 0,0293$
„ bei Tacherting . . . . .	$\lambda = 30,0$	$c = 35,0$	$n = 0,0337$

Diese Zahlenreihe findet durch Beobachtungen an natürlichen Flüssen ihre Ergänzung, so lieferte der Donaukanal genannte Donauarm

$$U = 43,3 \text{ bis etwa } 31,6 R^{0,7} J^{0,5}$$

und kam E. Beyerhaus<sup>1)</sup> für 25 Gruppen von Messungen, die an natürlichen Flüssen vorgenommen worden waren, zu derselben Grundformel wie die vorliegende Abhandlung, und zwar im Mittel zu

$$(24) \quad U = 26,35 R^{0,7} J^{0,5}.$$

Dabei steigt sein  $\lambda$  von 23,9 (für die Memel bei Pagulbinnen) bis zu 30,63 (für den Mississippi bei Vicksburg) an. Beyerhaus läßt es in Zweifel, ob nicht die Einführung von  $J^{0,46}$  vor der von  $J^{0,5}$  den Vorzug verdiene. Diesbezüglich sei auf das auf S. 20 Gesagte hingewiesen und hiermit die Betrachtung abgeschlossen, die von mehr als 90  $R^{0,7} J^{0,5}$  bis zu jenen kleinen Werten von  $\lambda$  geleitet hat, ohne daß sich bei offenem Spiegel eine Abweichung von der Formel  $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$  oder eine Änderung von  $\lambda$  mit der Rinnsalgröße ergeben hätte.

<sup>1)</sup> Bauing. 2 (1921), S. 486, 523 f.

## 12. Die Beziehung zwischen $\lambda$ und $n$ .

Im vorstehenden wurde für die Berechnung der Wasserbewegung die Formel (18) oder  $U = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$  empfohlen. Sie bildet das Ergebnis einer Bestimmung von  $\lambda$ ,  $\mu$  und  $\nu$  für Werkgräben großer Abmessungen im Ausdrucke  $U = \lambda R^\mu J^\nu$ . Es zeigte sich dann, daß mit einer für praktische Zwecke genügenden Genauigkeit bei unveränderlichen Rohr- oder Bettwandungen allgemein  $\mu = 0,7$  und  $\nu = 0,5$  gesetzt werden darf und dabei  $\lambda$  innerhalb weiter Grenzen nur von der Wandbeschaffenheit, also der Rauhhigkeit abhängt. Ähnliches hat im Jahre 1890 bereits Manning gesagt<sup>1)</sup>, dessen Formel aber in England und Amerika nur wenig, in den übrigen Ländern so viel wie gar keine Beachtung fand. Mannings Ansatz, wie er nach Scobey heute in englischem Fußmaß gewöhnlich geschrieben wird, lautet

$$(25) \quad U = \frac{1,486}{n} R^{0,67} J^{0,5}$$

enthält also neben ähnlichen Exponenten wie Gl. (18) noch die Angabe, daß der Koeffizient der rechten Seite der Ganguillet-Kutterschen Rauhhigkeit  $n$  verkehrt proportional ist. Die Umrechnung auf metrisches Maß verwandelt (25) fast genau in<sup>2)</sup> die Form, die der Verfasser dieser Schrift angeführt hat

$$(26) \quad U = \frac{1,00}{n} R^{2/3} J^{0,5},$$

wonach in der empfohlenen Gleichung (18)

$$\lambda \text{ ungefähr} = \frac{1}{n}$$

sein müßte, genau und immer kann wegen des verschiedenen Baues der empfohlenen Gleichung und jener von Ganguillet-Kutter  $\lambda$  überhaupt nicht  $= 1 : n$  sein. Inwieweit nun  $\lambda$  mit  $1 : n$  vertauscht werden darf, müssen bereits die ausgerechneten Sonderfälle erkennen lassen. Es war bei den Betonröhren

$\lambda$	84	76	80	68	70	77	89	95	69	80	—	—
10 000 $n$	= 123	134	128	147	146	138	120	113	138	128	—	—
$1 : n$	= 81	75	78	68	68	72	83	88	72	78	—	—
—	—	103	98	96	81	91	92	85	72	83	81	100
—	—	103	105	112	137	118	108	120	139	124	124	102
—	—	97	95	89	73	85	93	83	72	81	81	98

<sup>1)</sup> Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland 12 (1890), S. 68.

<sup>2)</sup> Ph. Forchheimer, Hydraulik 1914, S. 70 und Grundriß der Hydraulik 1920, S. 47. Genau umgerechnet würde Gl. (25)  $1,004 R^{0,67}$  statt  $1,00 R^{2/3}$  ergeben.

ferner bei den untersuchten offenen Läufen

	Wienfluß	Cavour-Kanal	Trostberg-Tacherting			Garching-Neukirchen	
			1910	1910	1920	1-2 Jahre alt	$\frac{5}{4}$ Jahr später
$\lambda =$	86 bis 78	74 bis 75	60	60	49	59	58
10000 $n =$	113 „ 134	129 „ 130	167	175	200	163	172
1 : $n =$	88 „ 75	78 „ 77	60	57	50	61	58

	Peggau-Deutsch Feistritz			Elektr. Werk Aarau	Cavour-Kanal			Uppenborn		Stettenhofen		Tacherting Untergraben
	I	II	III		Obergraben	Untergraben						
$\lambda =$	50	56	60	57	40,0	39,1	39,3	41,8	34,0	40,6	40,6	30,0
10000 $n =$	209	180	165	173	245	253	254	231	294	246	244	337
1 : $n =$	47,8	56	61	58	40,8	39,5	39,4	43,3	34,0	40,7	41,0	29,7

Die Übereinstimmung der Glättezahl  $\lambda$  mit dem reziproken Wert der Rauigkeitszahl  $n$  ist offenbar eine solche, daß die Abweichung im Verlaufe beider Formeln geringer als der Fehler ist, der im allgemeinen durch die unvermeidliche Ungenauigkeit in der Schätzung der Rauigkeit entsteht. Ist der Profilradius  $R = 1$  m, so ergeben die Formeln, wie man sich überzeugen kann, für beliebiges Gefälle  $J$ , daß  $\lambda$  mit  $1 : n$  gleichbedeutend ist. Für andere  $R$  und  $J$  ist dies noch der Fall, wenn

$$(27) \quad \left( 23 + \frac{0,00155}{J} \right) n = \frac{R^{0,3} (1 - R^{0,2})}{1 - R^{0,3}}$$

oder z. B. für

$$R \text{ in m} = 0,1 \quad 0,3 \quad 0,5 \quad \text{fast } 1 \quad 1 \quad 1,5 \quad 2,0$$

$$\left( 23 + \frac{0,00155}{J} \right) n = 0,371 \quad 0,492 \quad 0,560 \quad 0,667 \quad \text{beliebig} \quad 0,738 \quad 0,791$$

ist. Insoweit Ganguillet-Kutters Gleichung zutrifft, kann man, wenn, wie dies vielfach heute der Fall ist, man durch eine Messung  $n$  bereits bestimmt hat, für veränderte Gefälle oder Wasserstände den Durchfluß unter Benutzung des einfachen Exponential-Ausdruckes

$$(28) \quad U = \frac{1}{n} R^{0,7} J^{0,5}$$

berechnen.

**Zur Bestimmung strömender Flüssigkeitsmengen im offenen Gerinne.** Ein neues Verfahren von Dipl.-Ing. Oskar Poebing, Betriebsleiter des Hydraulischen Institutes der Technischen Hochschule München. Mit 23 Textabbildungen und 1 Tafel. 1922. GZ. 1,7

---

**Betrachtungen über Abfluß, Stau und Walzenbildung bei fließenden Gewässern** und ihre Verwertung für die Ausbildung des Überfalles bei der Untertunnelung der Sihl durch die linksufrige Seebahn in der Stadt Zürich. Untersuchungen aus dem Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule in Karlsruhe. Von Th. Rehbock, Oberbaurat, Professor an der Technischen Hochschule „Fridericiana“ in Karlsruhe. Mit 28 Textabbildungen, 13 Plänen und 23 Tafeln mit 66 Photographien in Autotypie. 1917. GZ. 28

---

**Berechnung der Wasserspiegellage beim Wechsel des Fließzustandes.** Von Dr.-Ing. Paul Böß, Assistent am Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule zu Karlsruhe. Mit 13 Abbildungen und 7 Plänen. 1919. GZ. 2,4

---

**Strömungsenergie und mechanische Arbeit.** Beiträge zur abstrakten Dynamik und ihre Anwendung auf Schiffspropeller, schnelllaufende Pumpen und Turbinen, Schiffswiderstand, Schiffsesegel, Windturbinen, Trag- und Schlagflügel und Luftwiderstand von Geschossen. Von Paul Wagner. Oberingenieur in Berlin. Mit 151 Textfiguren. 1914. Gebunden GZ. 10

---

**Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen.** I. Teil: Rohrleitungen. Von Lorenzo Alliévi. Deutsche, erläuterte Ausgabe von Robert Dubs und V. Bataillard. II. Teil: Stollen und Wasserschloß. Von Robert Dubs. Mit 35 Textfiguren. 1909. GZ. 10

---

**Energieumwandlungen in Flüssigkeiten.** Von Dónát Bánki, Maschineningenieur, o. ö. Professor an der Technischen Hochschule, Mitglied der Akademie der Wissenschaften zu Budapest.  
Erster Band: Einleitung in die Konstruktionslehre der Wasserkraftmaschinen, Kompressoren, Dampfturbinen und Aeroplane. Mit 591 Textabbildungen und 9 Tafeln. 1921. Gebunden GZ. 15

---

**Handbuch der Hydrologie.** Wesen, Nachweis, Untersuchung und Gewinnung unterirdischer Wasser: Quellen, Grundwasser, unterirdische Wasserläufe, Grundwasserfassungen. Von Zivilingenieur E. Prinz. Mit 331 Textabbildungen. 1919. GZ. 12

---

**Technische Hydrodynamik.** Von Dr. Franz Prásil, Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Zweite Auflage. In Vorbereitung

---

*Die Grundzahlen (GZ.) entsprechen den ungefähren Vorkriegspreisen und ergeben mit dem jeweiligen Entwertungsfaktor (Umrechnungsschlüssel) vervielfacht den Verkaufspreis. Über den zur Zeit geltenden Umrechnungsschlüssel geben alle Buchhandlungen sowie der Verlag bereitwilligst Auskunft.*

# Handbibliothek für Bauingenieure

Ein Hand- und Nachschlagebuch für Studium und Praxis

Herausgegeben von

**Robert Otzen**

Geheimer Regierungsrat,  
Professor an der Technischen Hochschule zu Hannover

Enthaltend:

Teil I. Hilfswissenschaften . . . . .	5 Bände
Teil II. Eisenbahnwesen und Städtebau . . . . .	9 Bände
Teil III. Wasserbau . . . . .	8 Bände
Teil IV. Brücken- und Ingenieur-Hochbau . . . . .	4 Bände

III. Teil: Wasserbau. 2. Band.

**See- und Seehafenbau.** Von H. Proetel, Regierungs- und Baurat in Magdeburg. Mit 292 Textabbildungen. 1921. Gebunden GZ. 7,5

III. Teil: Wasserbau. 4. Band.

**Kanal- und Schleusenbau.** Von Friedrich Engelhard, Regierungs- und Baurat an der Regierung zu Oppeln. Mit 303 Textabbildungen und einer farbigen Übersichtskarte. 1921. Gebunden GZ. 8,5

III. Teil: Wasserbau. 7. Band.

**Kulturtechnischer Wasserbau.** Von E. Krüger, Geh. Regierungsrat ordentlicher Professor der Kulturtechnik an der Landwirtschaftlichen Hochschule zu Berlin. Mit 197 Textabbildungen. 1921. Gebunden GZ. 9,5

**Der Teichbau.** Anleitung zur Anlage und zum Bau von Teichen für Kultur-ingenieure, Studierende und praktische Teichwirte. Von Oberingenieur F. A. Zink. Mit 133 Textfiguren und 3 Tafeln. 1914. GZ. 9

**Wahl, Projektierung und Betrieb von Kraftanlagen.** Ein Hilfsbuch für Ingenieure, Betriebsleiter, Fabrikbesitzer. Von Friedrich Barth, Oberingenieur an der Bayrischen Landesgewerbeanstalt in Nürnberg. Dritte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 176 Figuren im Text und auf 3 Tafeln. 1922. Gebunden GZ. 15

**Die Wasserkräfte,** ihr Ausbau und ihre wirtschaftliche Ausnutzung. Ein technisch-wirtschaftliches Lehr- und Handbuch. Von Bauinspektor Dr.-Ing. Adolf Ludin. 2 Bände. Mit 1087 Abbildungen im Text und auf 11 Tafeln. Preisgekrönt von der Akademie des Bauwesens in Berlin. Unveränderter Neudruck. 1922. Gebunden GZ. 75

**Über Wertberechnung von Wasserkraften.** Von Dr.-Ing. Adolf Ludin, und Dr.-Ing. Dr. rer. pol. W. G. Waffenschmidt, Karlsruhe i. B. (Sonderdruck aus „Der Bauingenieur“ 1921, H. 4.) 1921. GZ. 0,45

---

*Die Grundzahlen (GZ.) entsprechen den ungefähren Vorkriegspreisen und ergeben mit dem jeweiligen Entwertungsfaktor (Umrechnungsschlüssel) vervielfacht den Verkaufspreis. Über den zur Zeit geltenden Umrechnungsschlüssel geben alle Buchhandlungen sowie der Verlag bereitwilligst Auskunft.*