Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 84 (1966)
Heft: 23

Artikel: Kritische Betrachtungen zur Rohrhydraulik
Autor: Kropf, André
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-68932

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Table 1: Déplacements verticaux

Point	1	2	3	4	5	6
valeur approchée	32,955	31,954	28,989	24,144	17,566	9,446
valeur exacte	34,275	33,232	30,133	25,073	18,208	9,757

approximations pour les déplacements des nœuds, soient obtenues en utilisant des formules de quadrature d'un plus haut degré de précision.

Cependant, l'application à l'exemple considéré d'équations obtenues à partir de formules d'intégration basée sur une interpolation quadratique, donne de moins bons résultats que ceux de la table 1. Par exemple, on obtient pour le déplacement du point 1, la valeur 32,695.

Remerciement. Les auteurs sont reconnaissant à M. le Professeur Mahmut Tanrikulu de l'Université Technique d'Istanbul qui a attiré leur attention sur une erreur numérique dans leurs résultats originaux.

Références

[1] *Argyris, J. H.:* Recent Advances in Matrix Methods of Structural Analysis, Pergamon Press, London, 1964.

[2] *Clough, R. W.:* The Finite Element Method in Structural Mechanics, Chapitre 7 de Stress Analysis, édité par O. C. Zienkiewicz and G. S. Holister, John Wiley & Sons, Ltd., London, 1965.

[3] *Zienkiewicz, O. C., Cheung, Y. K.* et *Stagg, K. G.:* Stresses in Anisotropic Media with Particular Reference to Problems of Rock Mechanics, University of Wales, Research Report No. C/R/20/65 (1965).

[4] *Çakiroglu, A.* and *Kayan, I.:* Exact Forms of Finite Difference Equations for Certain Differential Equations, Istanbul Teknik Üniversitesi Bülteni 16 (1963) 77–104.

[5] *Favre, H.:* Cours de Mécanique, vol. 3, p. 29–37, Dunod, Paris, 1949.

Adresses des auteurs: voir page 436.

Kritische Betrachtungen zur Rohrhydraulik

Von **André Kropf**, dipl. Bau-Ing. ETH, Zürich

DK 532.542

Hierzu Tafeln 21-24

I. Einleitung

Bis zu seiner Ernennung zum Dozenten für Mechanik war Prof. Dr. H. Favre Adjunkt der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH unter der Leitung von Prof. Dr. E. Meyer-Peter. Aus dieser Zeit stammt eine der grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiet der Hydraulik, nämlich seine «Contribution à l'étude des courants liquides» im nichtstationären Zustand. Damit hat Favre dem Praktiker ein Hilfsmittel in die Hand gegeben, das ihm ermöglicht, verschiedene, relativ komplizierte Probleme rechnerisch zu erfassen, die sich in der Praxis oft wiederholen, aber in den seltensten Fällen eingehendere Modellversuche rechtfertigen. Dies trifft namentlich zu bei der angenäherten Bestimmung des erforderlichen Sohlenabsturzes bei seitlichen Einmündungen, bei der Dimensionierung seitlicher Überfallwehre (Regenauslässe) und bei der Ermittlung der Wasserspiegellage in Sammelrinnen von Klärbecken. Es ist nur zu bedauern, dass Favres grundlegende Studien nicht fortgesetzt wurden, um auch jene Fälle zu erfassen, in denen die allgemeine Formel der nicht stationären Bewegung ihre strenge Gültigkeit einbüsst, weil gewisse Voraussetzungen nicht mehr erfüllt sind.

In meiner praktischen Tätigkeit hat mir die Formel von Prof. Dr. Favre, selbst ausserhalb ihres strengen Gültigkeitsbereiches, als Näherungsformel, so gute Dienste geleistet, dass ich es als ein Bedürfnis empfinde, ihm aus Dankbarkeit den nachstehenden Beitrag zu seinem 65. Geburtstag zu widmen.

II. Auszug aus früheren Arbeiten

Die allgemeine Abfluss-Formel [1, 5][1]) der Rohrhydraulik lautet:

$$J = \lambda \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} \tag{1}$$

worin J, D, v und g die übliche Bedeutung haben, während mit λ die Widerstandsziffer bezeichnet wird.

Gleichung (1) nach v aufgelöst und an Stelle des Durchmessers D der hydraulische Radius $R = \frac{D}{4}$ eingesetzt, ergibt Gl. (1a):

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}\, J^{\frac{1}{2}} R^{\frac{1}{2}} \tag{1a}$$

die der Form nach mit der Formel von Chésy

$$v = C\sqrt{JR} \quad \text{übereinstimmt.}$$

Im Baufach ist die Strickler-Gaukler-Manningsche Formel geläufiger, deren Ansatz lautet:

$$v = k J^{1/2} R^{2/3} \tag{2}$$

Zwischen dem k-Wert der Stricklerschen Formel und dem λ-Wert der allgemeinen Formel besteht somit die einfache Beziehung:

$$k = \frac{1}{R^{1/6}} \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \tag{3}$$

[1]) Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

Der Umstand, dass zur Ermittlung der selben Grösse, neben den bereits erwähnten Formeln, noch andere nebeneinander bestehen können, deutet bereits darauf hin, dass keine derselben voll befriedigt. Dies geht schon aus dem Umstand hervor, dass weder λ noch k wirkliche Konstanten sind, sondern komplexe Funktionen der Reynoldschen Zahl und der relativen Rauhigkeit. Es soll deshalb versucht werden, gestützt auf die publizierten Messresultate Nikuradses, deren Richtigkeit vorausgesetzt wird, eine möglichst allgemeine Abflussformel herzuleiten, in welcher die Widerstandsziffer nur von der Beschaffenheit der Rohrwandung abhängen soll.

Als Ausgangspunkt unserer Betrachtungen nehmen wir folgenden Ansatz an:

$$v = k J^{\alpha} R^{\beta} \tag{4}$$

worin k eine Konstante sein soll, während die Exponenten α und β noch zu ermitteln sind.

Bisher haben die meisten Autoren für α den Wert 1/2 eingesetzt, in der Annahme, dass im turbulenten Bereich der Widerstand immer streng mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunehme, was aber nicht immer zutrifft.

Noch grössere Zweifel wirft die allgemein anerkannte λ-Formel auf, weil darin der Exponent von R mit $\beta = \frac{1}{2}$ offensichtlich nicht stimmen kann, ansonst die in der Praxis bewährte Strickler-Formel ($\beta = 2/3$) falsch sein müsste. Es ist deshalb verständlich, dass die Widerstandsziffer λ nicht allein von der Wandrauhigkeit abhängt, sondern gleichzeitig einen Korrekturfaktor implizit einschliesst. Wenn die Formel (1a) dennoch richtige Resultate liefert, so nur deshalb, weil frühere Autoren den Verlauf der λ-Funktion auf Grund eingehender Messungen im Laboratorium und an ausgeführten Leitungen empirisch ermittelt haben [5, 1].

Die neuere Forschung unterscheidet drei Gruppen von Leitungen, je nach dem generellen Verlauf der λ-Funktion, nämlich:

Gruppe A: Glatte Rohre

Für *absolut glatte* Rohre[2]) ist λ eine Funktion der Reynoldsschen Zahl $R_e = \frac{vD}{\nu}$, also proportional der Geschwindigkeit v, dem Rohrdurchmesser D und umgekehrt proportional der kinematischen Zähigkeit ν (siehe Kurve a in Bild 1)[3]).

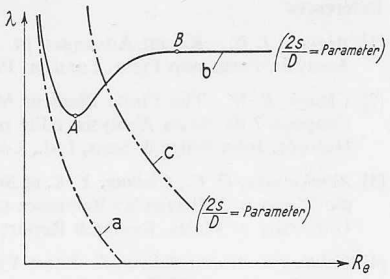
Gruppe B: Rohre mit rauhem Charakter.

Für diese Gruppe von Rohren ist λ zudem noch abhängig von der relativen Rauhigkeit $\frac{2s}{D} = \frac{s}{2R}$. ($s$ = absolute Rauhigkeit, d.h. mittleres Mass der Unebenheiten der Rohrwandung in mm). Die von Nikuradse [5] für diese Art von Rohren abgeleiteten Funktionen $\lambda\left(R_e, \frac{2s}{D}\right)$ verlaufen generell wie Kurve b in Bild 1. Für kleine

[2]) Hierzu wurden gezogene Messingrohre verwendet mit absolut glatter Wandung; die zugehörigen λ-Werte können daher als oberste Grenzwerte betrachtet werden.

[3]) Für Reinwasser bei 10 °C, $\nu = 1{,}31 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

Bild 1. Verlauf des Widerstandsgesetzes für:
a) absolut glatte Rohre
b) Rohre mit rauhem Charakter
c) Rohre mit glattem Charakter



Geschwindigkeiten nimmt λ zunächst ab bis zu einem Minimum, das durch den Punkt A dargestellt ist. In diesem Bereich verhält sich die Leitung mit rauhem Charakter beinahe wie ein absolut glattes Rohr. Mit zunehmender Reynoldsscher Zahl steigt der λ-Wert aber wieder an, um von B an konstant zu bleiben; es ist dies der Bereich des quadratischen Widerstandsgesetzes bei *voll ausgebildeter* Turbulenz. Dazwischen liegt das Übergangsgebiet A — B.

Gruppe C: Rohre mit glattem Charakter.

Zu dieser Kategorie gehören die Leitungen, deren Widerstandskoeffizient mit wachsender Reynoldsscher Zahl fällt, ohne einen konstanten Wert zu erreichen (Kurve *c* in Bild 1). Solche Leitungen verhalten sich ähnlich wie glatte Leitungen, daher die Bezeichnung «mit glattem Charakter», aber ihre Wandrauhigkeit und Welligkeit kommt doch zum Ausdruck in der Verschiebung der Kurve *c* gegenüber Kurve *a*.

III. Ableitung der neuen Abflussformeln

1. *Glatte Rohre*

Für die Widerstandsziffer der *glatten* Leitungen hat Nikuradse folgende, in einem sehr weiten Bereich gültige Beziehung in Abhängigkeit der Reynoldsschen Zahl R_e abgeleitet:

$$\lambda = 0{,}0032 + 0{,}221 \cdot R_e^{-0{,}237} \tag{5}$$

Demnach lässt sich der k-Wert für *glatte* Rohre, in Analogie zur Gleichung (3), anschreiben:

$$k^* = \frac{1}{R^{1/6}} \sqrt{\frac{8\,g}{0{,}0032 + 0{,}221 \cdot R_e^{-0{,}237}}} \tag{1b}$$

Die so errechneten k^*-Werte sind maximale Koeffizienten k, die für praktische Berechnungen und namentlich für die Rohre der Gruppe C nur um einige Prozente zu vermindern sind.

Ausgehend von obigen variablen k^*-Werten, bzw. von den zugehörigen λ-Werten, haben wir für Wasser bei 10 °C, mit $R = \frac{D}{4}$ als Parameter, die Beziehung $Q\,(J)$ rückwärts errechnet und die einzelnen Werte in einem doppellogarithmischen Koordinatennetz im Sinne nachstehenden Bildes 2 aufgetragen.

Es zeigt sich nun mit hoher Präzision, dass die einzelnen Funktionen $Q\,(J, D)$ Geraden ergeben, die untereinander praktisch parallel verlaufen, dies obwohl jedem Punkt des Netzplanes ein anderer k^*-Wert zugrundeliegt. Dieses überraschende Resultat ist von grosser Tragweite, sagt es doch aus, dass die Werte k, α und β in der Formel (4), für eine bestimmte Zähigkeit, angenähert konstant sein müssen. Demnach bedarf es lediglich einiger elementarer Umformungen, die der Kürze wegen ausgelassen werden, um aus dem Netzplan die gesuchten Werte abzuleiten.

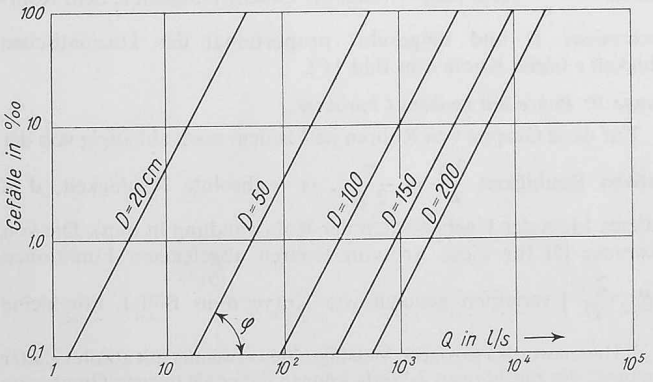


Bild 2. Wassermenge in Funktion des Gefälles für verschiedene Rohrdurchmesser

Die bereits angedeutete Abweichung von der strengen Parallelität ist äusserst klein, was daraus hervorgeht, dass der Neigungswinkel φ beim Übergang von $D = 0{,}2$ m zu 2,0 m sich von 61° 22′ zu 61° 36′ verändert. Trotzdem genügt diese geringfügige, aber systematische Abweichung, um die gesuchten Konstanten in einem gewissen Bereich variieren zu lassen. Durch Ausgleichung nach dem Gesetz der kleinsten Quadrate ergibt sich:

für $D = 0{,}2 \div 2{,}0$ m	$\alpha = 0{,}550 \div 0{,}542$	$\underline{\alpha_m = 0{,}546}$
für $J = 0{,}1 \div 100\,^0/_{00}$	$\beta = 0{,}652 \div 0{,}629$	$\underline{\beta_m = 0{,}640}$

Die Rauhigkeitsziffer k ihrerseits bleibt abhängig von der Reynoldsschen Zahl; sie ist also nach wie vor Funktion von D und v, allerdings in *wesentlich geringerem Masse als* λ, *bzw.* k^*. Im Bereiche der üblichen Geschwindigkeiten $v = 1 \div 10$ m/s schwankt der k-Wert innerhalb folgender Grenzen:

$D = 200$ cm	$k = 133{,}8 \div 133{,}2$	$k_m = 133{,}5$
150 cm	$135{,}2 \div 133{,}8$	134,5
100 cm	$137{,}4 \div 134{,}6$	136,0
50 cm	$139{,}0 \div 134{,}8$	136,9
20 cm	$139{,}2 \div 132{,}2$	135,7

Für die Praxis können wir also mit hinreichender Genauigkeit $k^* = 134$ setzen. Die gesuchte Abflussformel für *glatte Rohre* und solche *mit glattem Charakter* lautet demnach:

$$\underline{v = 134 \cdot J^{0{,}546} \cdot R^{0{,}640}}\ ^{4)} \tag{4a}$$

Hierbei ist $k^* = 134$ als Grenzwert zu betrachten, der nur unwesentlich überschritten werden kann. Um den unvermeidlichen Imponderabilien der Kanalisationspraxis (Ungenauigkeiten in der Rohrverlegung, Kalibertoleranzen, Sand- und Schlammablagerungen, Setzungen, Richtungswechsel, seitliche Einmündungen usw.) Rechnung zu tragen, empfiehlt es sich, in der Wahl des Rauhigkeitskoeffizienten eine gewisse Sicherheitsmarge einzuschliessen; deshalb empfehlen wir für die einzelnen Rohrarten folgende Werte:

Rohrart:	k-Wert:
Schleuderbetonrohre	115–120
Geschliffene Betonrohre Glatte geschweisste Stahlrohre mit intaktem Innenanstrich Kunststoffrohre	125
Eternitrohre	130

Vermutlich in die selbe Kategorie der glatten Rohre sind jene Profile einzureihen, deren Wandungen aus erstklassigem *Sichtbeton* oder Beton mit Zementmörtel*glattstrich* bestehen. Für diese empfiehlt sich vorderhand, mangels Angaben aus Kontrollmessungen, $k = 110$ bis 120 einzusetzen.

Um die Anwendung der Formel (4a) zu erleichtern, wird als Beilage das Abflussdiagramm I für $k' = 100$ eingeführt. Die abgelesenen Werte sind also im Verhältnis k/k' zu multiplizieren, um die effektiven Abflusswerte Q und v zu erhalten.

Interessehalber wird noch als Abschluss dieses Kapitels der Vergleich mit früheren Formeln angeführt, die auf Grund von Messungen für glatte Rohre hergeleitet wurden.

Quelle:	k	α	β
Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH für Eternit-Rohre ⌀ 250 mm	135	0,526	0,68
Laboratoire de recherches hydrauliques de l'EPUL Eternit-Katalog	140	0,555 ($^5/_9$)	0,645

2. *Rohre mit rauhem Charakter*

Zur Gruppe der rauhen Leitungen gehören u. a. die gewöhnlichen Stampfbetonrohre, die Gussrohre und die genieteten Stahlrohre in

[4]) Gleichung (4a) genügt dem Reynoldsschen Ähnlichkeitsgesetz, da die Bedingung [1] $1 + \beta - 3\alpha = 0$ erfüllt ist.

Diagramm I: Abflussdiagramm für glatte Rohre ⌀ 20 bis 200 cm

$$v = k \cdot J^{0,546} \cdot R^{0,640}, \quad k' = 100$$

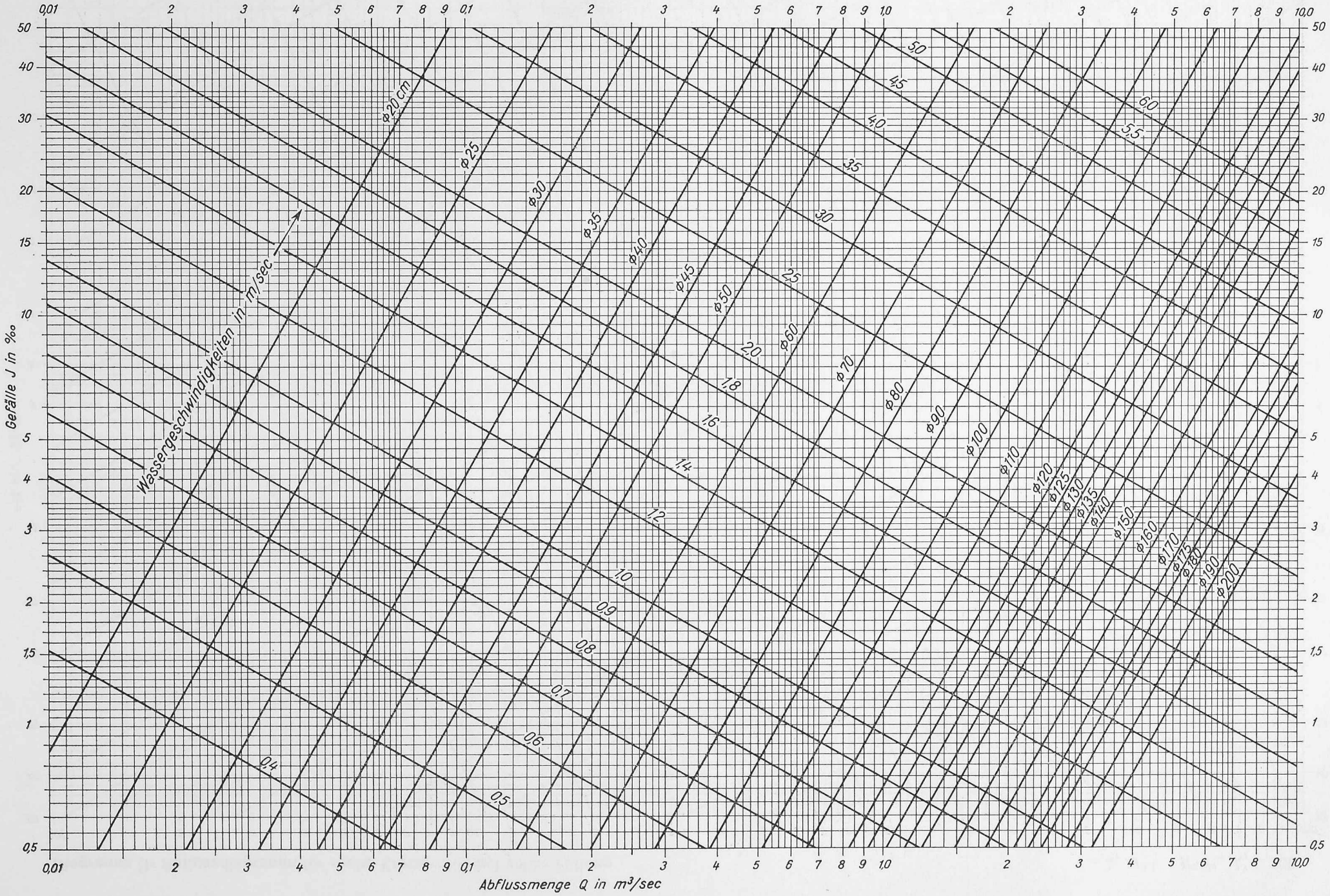


Diagramm II: Abflussdiagramm für rauhe Kreisprofile bei voller Füllung

$v = k_r \cdot J^{0,5} \cdot R^{0,620}, \; k'_r = 100$

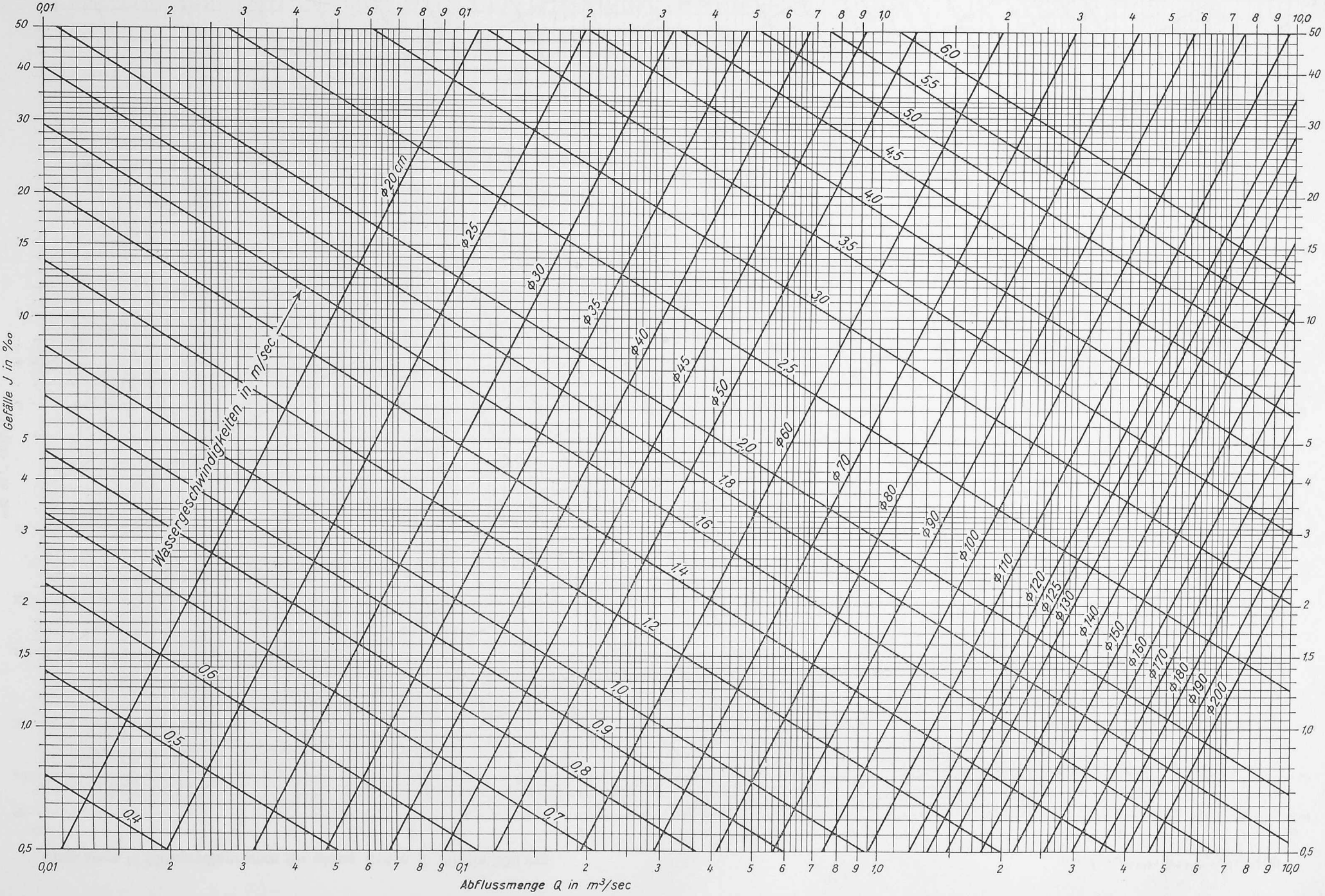
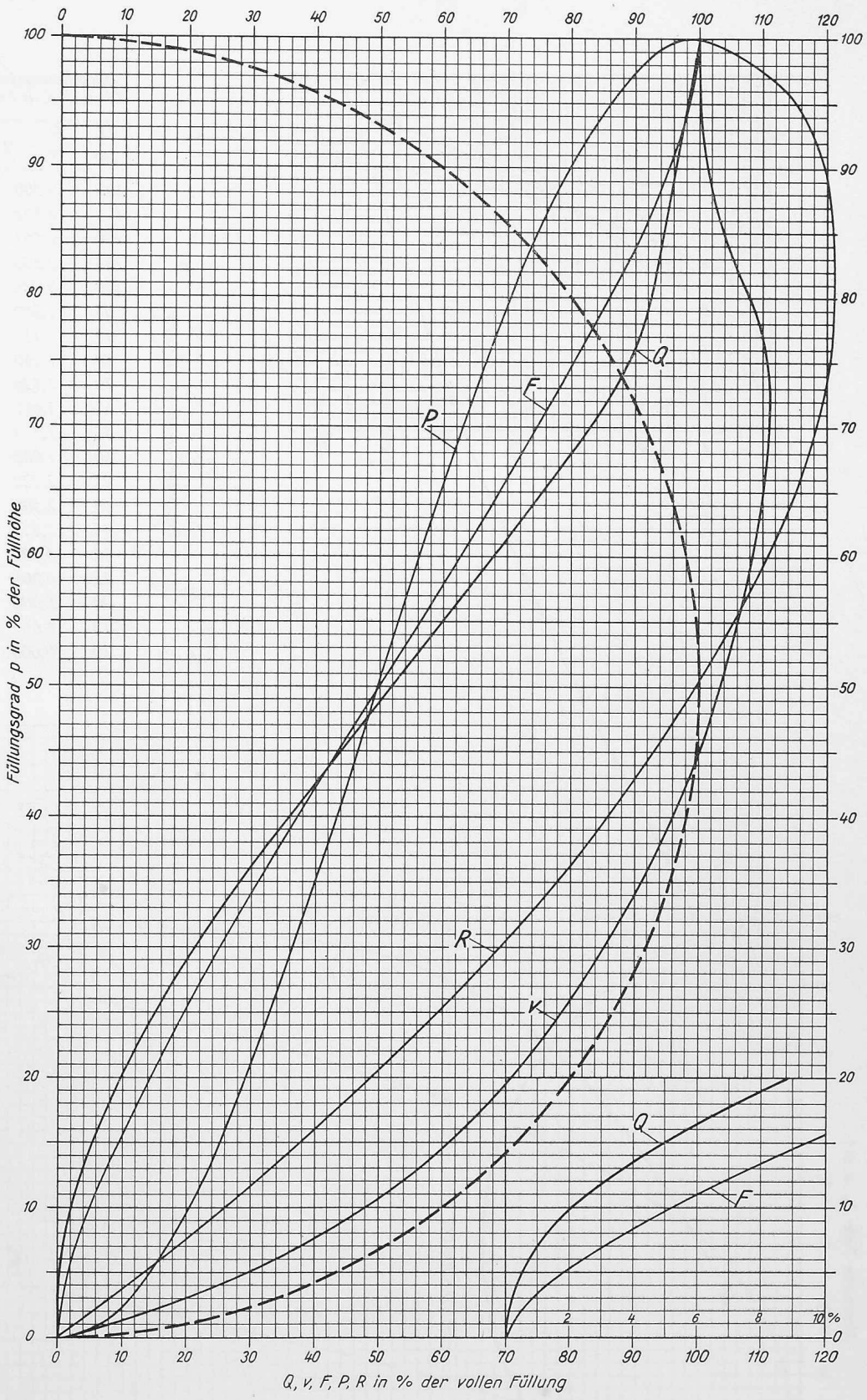
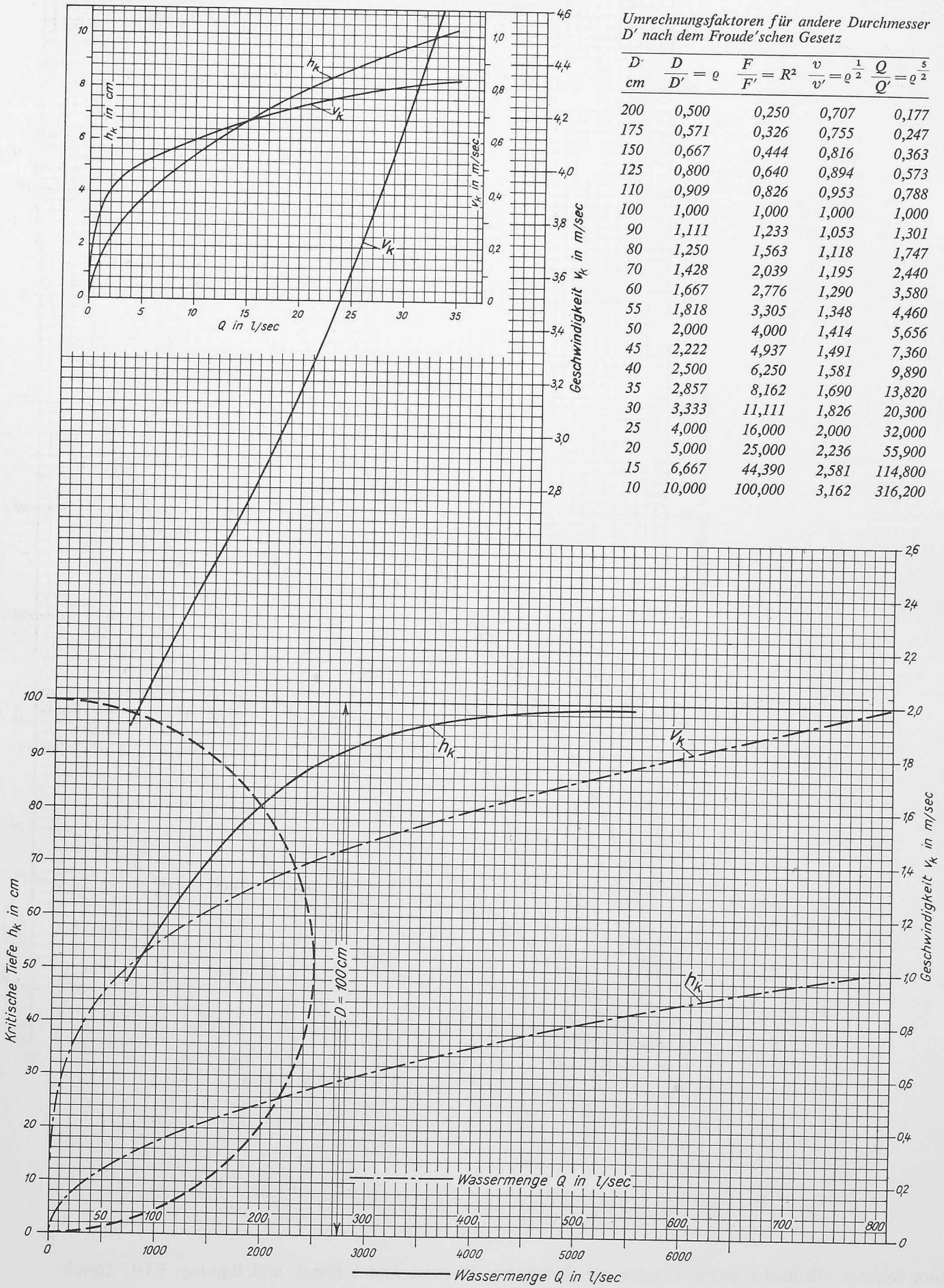


Diagramm III: Teilfüllungskurven für Kreisprofil



Zum Aufsatz «Kritische Betrachtungen zur Rohrhydraulik» von **André Kropf,** dipl. Bau-Ing. ETH, Zürich

Diagramm IV: Kritische Abflussverhältnisse im Kreisprofil, D = 100 cm



Umrechnungsfaktoren für andere Durchmesser D′ nach dem Froude'schen Gesetz

D' cm	$\frac{D}{D'} = \varrho$	$\frac{F}{F'} = R^2$	$\frac{v}{v'} = \varrho^{\frac{1}{2}}$	$\frac{Q}{Q'} = \varrho^{\frac{5}{2}}$
200	0,500	0,250	0,707	0,177
175	0,571	0,326	0,755	0,247
150	0,667	0,444	0,816	0,363
125	0,800	0,640	0,894	0,573
110	0,909	0,826	0,953	0,788
100	1,000	1,000	1,000	1,000
90	1,111	1,233	1,053	1,301
80	1,250	1,563	1,118	1,747
70	1,428	2,039	1,195	2,440
60	1,667	2,776	1,290	3,580
55	1,818	3,305	1,348	4,460
50	2,000	4,000	1,414	5,656
45	2,222	4,937	1,491	7,360
40	2,500	6,250	1,581	9,890
35	2,857	8,162	1,690	13,820
30	3,333	11,111	1,826	20,300
25	4,000	16,000	2,000	32,000
20	5,000	25,000	2,236	55,900
15	6,667	44,390	2,581	114,800
10	10,000	100,000	3,162	316,200

gebrauchtem Zustand. Hier liegen die Verhältnisse etwas komplizierter, weil λ ausser von der Reynoldsschen Zahl auch noch von der relativen Rauhigkeit $\frac{2\,s}{D}$ abhängt. Rechts vom Punkt B in Bild 1 wird indessen, für eine bestimmte relative Rauhigkeit $\frac{2\,s}{D}$ als Parameter, λ konstant. In diesem Bereiche der *vollausgebildeten* Turbulenz gilt das quadratische Widerstandsgesetz, weil der Widerstand in der Tat genau mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt. Ausgehend von den λ-Funktionen, die in der Dissertation Hoeck [1, Abb. 45] wiedergegeben sind, haben wir, analog wie für die glatten Rohre, die Werte α, β_r und k_r rückwärts errechnet und dabei folgendes festgestellt:

— der Exponent $\alpha = 0{,}5$ ist konstant;

— der Exponent β_r ist beinahe konstant und nur im 2. Glied von der *absoluten* Rauhigkeit s (mm) abhängig; durch Ausgleichung findet sich hierfür der im Bereich $s = 0 \div 2$ mm gültige Ausdruck:

(5) $$\beta_r = 0{,}612 + 0{,}0124 \cdot s$$

(Beispiel: Stampfbetonrohre ungeschliffen:

$s \cong 0{,}25$ mm, $\beta_r = 0{,}615$)

— die Widerstandsziffer k_r hängt von der absoluten Rauhigkeit s (mm) ab; in den untersuchten Grenzen $s = 0{,}25 \div 2{,}0$ mm variiert k_r zwischen 86,4 und 69,6 gemäss der in Diagramm 1 angegebenen Funktion $k_r(s)$. Für *rauhe* Rohre lautet die Abflussformel demnach:

(4b) $$\underline{v = k_r\, J^{\frac{1}{2}}\, R^{\beta_r}}$$

Im Diagramm 1 sind zudem jene zwei Linien gestrichelt eingetragen, die den Punktscharen A und B in Bild 1 entsprechen und daher den Gültigkeitsbereich der Formel (4b) begrenzen. Oberhalb der B-Linie befinden wir uns im Bereiche der vollausgebildeten Turbulenz, für den Gleichung (4b) ermittelt wurde. Unterhalb der A-Linie verhalten sich selbst rauhe Rohre wie glatte Rohre; hier gilt Gleichung (4a).

Bei den in der Praxis vorkommenden Geschwindigkeiten bewegen wir uns meistens im Übergangsbereich zwischen beiden Begrenzungslinien. Unsere Untersuchungen zeigen jedoch, dass in diesem Übergangsbereich Gleichung (4b) gleichwohl mit hinreichender Genauigkeit gültig ist, weil die maximale Abweichung vom Sollwert (Punkt A) höchstens 4–7% beträgt und zwar im negativen Sinne, d. h. im Sinne einer zusätzlichen Sicherheit. Für den Praktiker ist diese Erkenntnis von grosser Bedeutung, da er somit bei den rauhen Rohren mit einer einzigen Abflussformel auskommt.

Die Betrachtung der B-Linie im Diagramm 1 ist recht aufschlussreich. Wir erkennen daraus, dass in einem Profil mit der absoluten Rauhigkeit $s = 2$ mm z. B. die vollausgebildete Turbulenz bereits bei einer Fliessgeschwindigkeit von 0,5 m/s herrscht, während für $s = 0{,}25$ mm der selbe Zustand sich erst bei Geschwindigkeiten von über 8 m/s einstellt.

Die deutliche Zunahme des Exponenten β_r mit der absoluten Rauhigkeit s deutet ferner darauf hin, dass wahrscheinlich β_r jenem Grenzwert 2/3 zustrebt, den Strickler für natürliche Flussprofile ermittelt hat. Aus diesem Grunde sind wir überzeugt, dass für *natürliche* Profile die Stricklersche Formel

(4c) $$v = k\, J^{1/2}\, R^{2/3}$$

als richtig betrachtet werden muss.

Für *künstliche* Profile mit relativ glatten Wandungen (Stampfbetonrohre, betonierte Kanäle usw.) wäre es theoretisch denkbar, auf dem Umweg über die absolute Rauhigkeit s auf die zugehörigen Werte β_r und k_r zu schliessen. Praktisch erscheint dies aber ein Ding der Unmöglichkeit, weil die Messung von s noch viel umständlicher wäre als die direkte Ermittlung von k aus den hydraulischen Daten. Deshalb schlagen wir vor, für β_r einen Mittelwert, z. B. 0,62, als konstant anzunehmen und davon ausgehend die zugehörigen k-Werte empirisch zu ermitteln, und zwar für folgende Wandarten:

— Ungeschliffene Stampfbetonrohre

— Beton, rohe bündige Schalung

— Beton, gehobelte Schalung

— Zementmörtelabrieb

— Plattenbelag

— Mauerwerk usw.

Leider ist der Verfasser nicht in der Lage, solche Untersuchungen selbst einzuleiten oder gar durchzuführen; deshalb kann er vorderhand keine verbindlichen Angaben über die zugehörigen Rauhigkeitskoeffizienten machen.

Um auch für die rauhen Rohre die Anwendung der zugehörigen Formel (4b) zu erleichtern, wird als Beilage das Abflussdiagramm II für $k'_r = 100$ beigefügt.

IV. Zusammenfassung und Schlusswort

1. Schon lange hat die Tatsache, wonach die Widerstandsziffer k in der Stricklerschen Formel keine effektive Konstante ist, die Fachleute gestört. Die Zuflucht zur allgemeinen λ-Formel führt nicht viel weiter, da in derselben der Exponent für den hydraulischen Radius R mit $\beta = 1/2$ offensichtlich der Wirklichkeit nicht entspricht.

2. Was aber der λ-Formel zugutekommt, ist der Umstand, dass verschiedene Autoren den Verlauf der λ-Funktion sehr gewissenhaft und unter den verschiedensten Verhältnissen ermittelt haben.

3. Ausgehend von den anderweitig publizierten und als richtig ange-

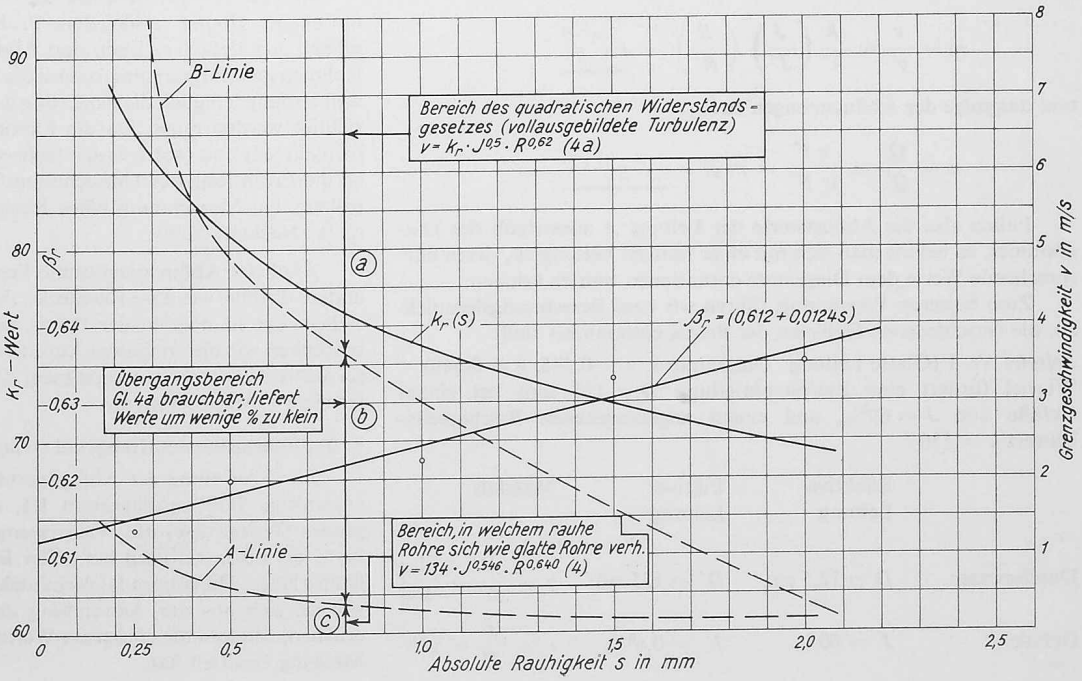


Diagramm 1

nommenen λ-Werten wurden rückwärts folgende zwei Abflussformeln hergeleitet:

a) für glatte Rohre und solche mit glattem Charakter

$$\underline{v = k^* J^{0,546} R^{0,640}} \qquad \text{wobei } k^* = 134 \text{ (Grenzwert)}$$

b) für rauhe Rohre

$$\underline{v = k_r J^{0,5} R^{0,620}}$$

Für Stampfbetonrohre ist $k_r \cong 75$, entsprechend $k = 80$ in der Stricklerschen Formel. Für andere Wandarten sind die zugehörigen Rauhigkeitskoeffizienten durch Modellversuche noch zu ermitteln.

Es ist zu hoffen, dass dieser bescheidene Beitrag eines Praktikers, der keinen Anspruch auf wissenschaftliche Vollständigkeit erheben kann, trotzdem den Anstoss zu weiteren Untersuchungen geben wird.

Anhang

1. Einleitung

Der heutige Beitrag ist im Grunde genommen eine längstens fällige Ergänzung unserer früheren Publikation «Dimensionierung von Kanalisationen» aus dem Jahre 1945, die lt. Angaben der Redaktion der SBZ immer wieder verlangt wird, obwohl sie seit Jahren vergriffen ist. Er kommt somit einer Neuauflage gleich, weshalb wir in diesem Anhang auf jene Punkte zurückkommen, die unverändert geblieben sind, aber im praktischen Gebrauch eine nützliche Hilfe darstellen.

2. Abflussdiagramme für volle Füllung

Für Kreisprofile gelten jetzt die zwei Abflussdiagramme I für glatte und II für rauhe Rohre, deren Gültigkeitsbereich durch Anwendung der nachstehenden Umrechnungsfaktoren auch auf solche Leitungen ausgedehnt werden kann, deren Abflusswerte aus den Diagrammen nicht direkt abzulesen sind.

Zur Ermittlung dieser Umrechnungsfaktoren genügt es, die Beziehung zwischen homologen Grössen zweier Leitungen A und A′ aufzustellen, für die folgende Gleichungen gültig sind:

Leitung A: $\quad v = k J^{\alpha} R^{\beta}$

Leitung A': $\quad v' = k' J'^{\alpha} R'^{\beta}$

Bezeichnen wir mit:

$$\varkappa = \frac{k}{k'} \qquad \text{das Verhältnis der Rauhigkeitsbeiwerte,}$$

$$\iota = \frac{J}{J'} \qquad \text{dasjenige der Gefälle und}$$

$$\varrho = \frac{R}{R'} \qquad \text{dasjenige der Längen,}$$

so ergibt sich das Verhältnis der Geschwindigkeiten in den zwei Leitungen A und A' zu:

$$m = \frac{v}{v'} = \frac{k}{k'} \left(\frac{J}{J'}\right)^{\alpha} \left(\frac{R}{R'}\right)^{\beta} = \underline{\varkappa\, \iota^{\alpha}\, \varrho^{\beta}}$$

und dasjenige der Abflussmengen zu:

$$n = \frac{Q}{Q'} = \frac{v\,F}{v'\,F'} = m\,\varrho^2 = \underline{\varkappa\, \iota^{\alpha}\, \varrho^{(\beta+2)}}$$

Fallen also die Abflusswerte der Leitung A ausserhalb des Diagrammes, so behilft man sich mit einer fiktiven Leitung A', deren entsprechende Werte dem Diagramm entnommen werden können.

Zum besseren Verständnis führen wir zwei Berechnungsbeispiele an, die verschiedenen Gebieten der Praxis entnommen sind:

Beispiel Nr. 1 (Glatte Leitung: Diagramm I, $\alpha = 0{,}546$, $\beta = 0{,}640$)
Wieviel fördert eine Eternitrohrleitung $D = 125$ mm bei einem Gefälle von $J = 60\,^0/_{00}$ und einem angenommenen Rauhigkeitsbeiwert $k = 130$?

	Effektive Leitung	Fiktive Leitung	Masstab
Durchmesser	$D = 12{,}5$ cm	$D' = 125$ cm	$\varrho = \frac{D}{D'} = \frac{1}{10}$
Gefälle	$J = 60\,\%$	$J' = 0{,}6\,^0/_{00}$	$\iota = \frac{J}{J'} = 100$
Rauhigkeitskoeffizient	$k = 130$	$k' = 100$	$\varkappa = \frac{k}{k'} = 1{,}3$

$$m = \frac{v}{v'} = \varkappa\, \iota^{\alpha}\, \varrho^{\beta} = 1{,}3 \cdot 100^{0,546} \left(\frac{1}{10}\right)^{0,64} =$$

$$= 1{,}3 \cdot 12{,}4 \frac{1}{4{,}36} = 3{,}7$$

$$n = \frac{Q}{Q'} = m\,\varrho^2 = 3{,}7 \frac{1}{100} = 0{,}037$$

Die fiktive Leitung $D' = 125$ cm fördert bei voller Füllung gemäss Diagramm I bei $0{,}6\,^0/_{00}$ Gefälle $Q' = 1020$ l/s, bei einer Fliessgeschwindigkeit v' von 0,83 m/s. Demnach sind die gesuchten wirklichen Abflusswerte:

$$Q = Q'\,n = 1020 \text{ l/s } 0{,}037 = 38 \text{ l/s}$$

$$v = v'\,m = 0{,}83 \text{ m/s } 3{,}7 = 3{,}07 \text{ m/s}$$

Beispiel Nr. 2 (Rauhe Leitung: Diagramm II, $\alpha = 0{,}5$; $\beta_r = 0{,}620$)
Wie gross sind die Reibungsverluste Δz_e in einer Druckleitung $D = 105$ cm von 3,2 km Länge und einer Rauhigkeit $k_r = 75$ bei einer Wasserführung von $Q = 600$ l/s?

Der gesuchte Punkt liegt nicht im Diagramm, sodass der Umweg über die fiktive Leitung begangen werden muss.

	Effektive Leitung	Fiktive Leitung	Masstab
Durchmesser	D = 105 cm	$D' = 100$ cm	$\varrho = \frac{D}{D'} = 1{,}05$
Rauhigkeit	$k_r = 75$	$k'_r = 100$	$\varkappa = \frac{k}{k'} = 0{,}75$
Wassermenge	$Q = 600$ l/s	$Q' = 6000$ l/s	$n = \frac{Q}{Q'} = \frac{1}{10}$

$$i = \frac{J}{J'} = \left(\frac{n}{\varkappa\, \varrho^{\beta+2}}\right)^{1/\alpha} = \frac{n^2}{\varkappa^2\, \varrho^{5,24}} = \frac{1}{100 \cdot 0{,}56 \cdot 1{,}294}$$

$$= 0{,}0138$$

Für die fiktive Leitung beträgt das aus dem Diagramm II erhaltene Gefälle $J' = 32\,^0/_{00}$. Demnach ist das gesuchte Energieliniengefälle

$$J = J'\,i = 32\,^0/_{00} \cdot 0{,}0138 = \underline{0{,}44\,^0/_{00}}$$

und der zugehörige Reibungsverlust:

$$\Delta z_e = J\,L = 0{,}44\,^0/_{00} \cdot 3200 \text{ m} = \underline{1{,}41 \text{ m}}$$

An Hand obiger Beispiele hoffen wir erneut gezeigt zu haben, wie mit einiger Übung verschiedene Probleme der praktischen Hydraulik schnell und einfach zu lösen sind. Meistens liegt der gesuchte Punkt im Rahmen des Diagrammes, sodass die Berechnung sehr einfach ausfällt, weil alsdann lediglich die Änderung des k-Wertes ($m = n = \varkappa$) berücksichtigt werden muss. Da die Exponenten α und β in den Abflussformeln (4a) und (4b) von den früheren Werten 1/2 und 2/3 abweichen, ist die Ermittlung der Umrechnungsfaktoren etwas umständlicher als bisher; bei Verwendung eines Rechenschiebers mit e^x-Teilung fällt dieser Nachteil dahin.

Ähnliche Abflussdiagramme liessen sich ohne weiteres auch für andere Profile wie Ei-, Rechteck-, Maul-, Hauben-Profile usw. aufstellen. Da sie aber in der Praxis weit weniger oft vorkommen, beschränken wir uns in diesem Aufsatz auf die Kreisprofile; für Eiprofile sei auf frühere Arbeiten verwiesen, die allerdings noch auf der Stricklerschen Formel beruhen.

3. Teilfüllungskurven Kreisprofil (Diagramm III)

Zur Ermittlung der Abflussverhältnisse bei Teilfüllung dient das zugehörige Füllungsdiagramm III, das in Funktion des Füllungsgrades (Wassertiefe) die Wassermenge Q und die Geschwindigkeit v in % derselben Grössen bei voller Füllung angibt. Im Gegensatz zu früher liefert Diagramm III nicht mehr die theoretischen Abflusswerte, wie sie sich aus der Anwendung der Abflussformel auf Teilprofile ergäben, sondern die effektiven Werte, wie sie Bülow [7] durch direkte Messung ermittelt hat.

4. **Diagramm zur Ermittlung der kritischen Tiefe beim Kreisprofil** (Diagramm IV)

Die Kenntnis der kritischen Tiefe h_k ist für viele Sonderaufgaben der Hydraulik von Bedeutung. Vor allem ist man alsdann in der Lage zu beurteilen, ob der Abfluss strömend oder schiessend erfolgt und welcher Art der Übergang von einem Profil zum andern sein wird. Auch bei der Dimensionierung von Regenentlastungsbauwerken gestattet die Kenntnis von h_k eine rasche Orientierung. Ihre Ermittlung bei Kreis- und Eiprofilen ist aber zeitraubend und umständlich.

Wohl lässt sich für Kreisprofile eine analytische Behandlung des Problems durchführen, wenn als unabhängige Variable der Füllungswinkel in Ansatz gebracht wird [3].

Um die Arbeit zu erleichtern, wurde das Diagramm IV aufgestellt, in welchem für das Kreisprofil $D = 100$ cm die kritische Tiefe h_k und ihre zugehörige Geschwindigkeit v_k in Funktion der Wassermenge Q aufgetragen sind. Um die kritische Tiefe für andere Kaliber zu bestimmen, verwendet man die auf Grund des Froudeschen Ähnlichkeitsgesetzes [4] abgeleiteten, im Diagramm tabellarisch zusammengestellten Umrechnungsfaktoren.

Tabelle 1.

	Umrechnungsfaktoren	Leitung $D = 100$ cm, $D' = 30$ cm	
Wassermenge in l/s	$\varrho^{5/2} = \frac{Q}{Q'} = 20{,}30$	$Q = 1420$	$Q' = 70$
Kritische Tiefe in cm	$\varrho = \frac{h_k}{h'_k} = \frac{D}{D'} = 3{,}33$	$h_k = 68{,}5$	$h'_k = 20{,}6$
Krit. Geschwindigkeit in m/s	$\varrho^{\frac{1}{2}} = \frac{v_k}{v'_k} = 1{,}826$	$v_k = 2{,}44$	$v'_k = 1{,}34$

Beispiel:

Wie gross ist die kritische Tiefe h'_k in einem Kreisrohr $D' = 30$ cm bei einer Wassermenge $Q' = 70$ l/s (siehe Tabelle 1).

Literatur-Verzeichnis

Ein Stern bei der Seitenzahl bedeutet, dass der betreffende Aufsatz Abbildungen enthält.

[1] *Hoeck, E.:* Druckverluste in Druckleitungen grosser Kraftwerke. Mitteilung No. 3 der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH.

[2] *Kropf, A.:* Dimensionierung von Kanalisationen. «Schweiz. Bauzeitung» Bd. 125, Nr. 19, S. 229* (12. Mai 1945).

[3] *Meyer-Peter, E.:* Neue Berechnungsmethoden aus dem Gebiete der Hydraulik. «Schweiz. Bauzeitung», Bd. 84, Nr. 1 und 2, S. 1* und 15* (1924).

[4] *Meyer-Peter, E.* und *Favre, H.:* Der wasserbauliche Modellversuch im Dienste der Wasserkraftnutzung und der Flusskorrektion. Festschrift: Die ETH dem S.I.A. zur Jahrhundertfeier. Zürich 1937.

[5] *Nikuradse, J.:* Widerstandsgesetz und Geschwindigkeitsverteilung von turbulenten Wasserströmungen in glatten und rauhen Rohren. Verh. des intern. Kongresses für technische Mechanik, Stockholm 1930.

[6] *Strickler, A.:* Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitt. des Amtes für Wasserwirtschaft 1923 und «Schweiz. Bauzeitung», Bd. 83, Nr. 23, S. 265* (1924).

[7] *v. Bülow:* «Gesundheitsingenieur», Jg. 31.

Adresse des Verfassers: *André Kropf*, dipl. Bau-Ing., 8001 Zürich, Waldmannstrasse 10.

Quelques aspects de la promotion de la recherche et de la formation des ingénieurs aux USA

DK 001.891:37:62.007.2

Par **Michel Cuénod**, ing. él. dipl. EPF, Dr sc. techn., Gainesville, Florida, USA

«From contemplation one may become wise, but knowledge comes only from study» (Newton)

1. Introduction

De tout temps la recherche et le progrès technique qui en est la conséquence ont eu une influence prépondérante sur le développement économique d'une société; cela est vrai en particulier aujourd'hui où le progrès technique prend une allure toujours plus rapide.

Ce qui est nouveau, c'est l'ampleur croissante des investissements que nécessite la recherche, et les méthodes de travail qu'elle utilise et qui font de plus en plus appel à un effort collectif.

On faisait autrefois la distinction entre la «*recherche pure*» conduisant à une connaissance toujours plus poussée du monde, et la «*recherche appliquée*» concernant l'utilisation de ces connaissances pour une fin pratique. Cette distinction paraît aujourd'hui artificielle, car il devient difficile de dire à quel moment une recherche cesse d'être «pure» pour devenir «appliquée».

L'une et l'autre sont vitales pour l'avenir d'un pays, et leur promotion est un problème d'intérêt national. On peut en effet constater une corrélation entre les investissements d'un pays dans la recherche et l'accroissement de son revenu national. Ce problème est étroitement lié à celui de la *formation* des chercheurs et de tous ceux qui ont à utiliser et à promouvoir la technique, et cela pour une double raison:

— parce que les compétences des chercheurs dépendent étroitement de l'entraînement qu'ils ont reçu et des connaissances qu'ils ont acquises.

— parce qu'une partie de la recherche se fait dans le cadre des Universités et Instituts universitaires.

Cette combinaison de recherche et d'enseignement est une des conditions essentielles de l'efficacité de cet enseignement.

La promotion de la recherche et la formation des chercheurs dépendent de quatre instances:

— l'Etat
— l'Industrie
— les Universités
— les chercheurs.

Dans le cadre de ce numéro spécial qui est dédié à un maître qui a consacré sa vie à la recherche et à la formation des ingénieurs, nous nous proposons de donner un aperçu de la façon dont ces quatre instances collaborent aux Etats-Unis, en nous basant sur l'expérience de près de deux ans d'enseignement dans une Université américaine et sur une abondante documentation qui a été mise à notre disposition.

Dans une deuxième partie, nous tâcherons de dégager quelques unes des conclusions que l'on peut en tirer pour la Suisse.

2. Besoin des Etats-Unis en ingénieurs et en chercheurs

Le tableau 1 donne la répartition des ingénieurs et hommes de science aux USA telle qu'elle se présentait en 1963, et telle qu'elle est prévue pour 1970 [1].

Nous voyons que le nombre des ingénieurs et hommes de science devra dépasser 2 millions à ce moment et l'augmentation de 50% que cela représente est plus forte que l'accroissement prévu de la population.

Le tableau 2 donne le nombre des ingénieurs qui ont été diplômés pendant l'année académique 1962–1963, ainsi que le nombre total des degrés académiques qui ont été délivrés cette année-là aux USA [2]. Nous voyons que les diplômes d'ingénieurs constituent le 8% du nombre total de ces diplômes. Environ 20% des jeunes Américains accèdent aux études supérieures.

3. Contribution de l'Etat à la promotion de la recherche

Les Etats-Unis sont profondément attachés au principe de l'économie libérale. Contrairement à ce qui se passe dans les pays de l'est, dans lesquels la recherche est effectuée presqu'exclusivement dans des laboratoires et instituts étatiques, la recherche aux USA est réalisée en majorité dans des entreprises privées, mais avec le soutien de l'Etat. Voici quelques indications concernant les organismes dont dispose le gouvernement américain pour remplir cette tâche, et le soutien qu'il apporte à l'industrie, aux universités et aux étudiants.

Pour orienter sa politique en matière de recherche, le gouvernement américain a mis au point un mécanisme très complexe [3 à 5].

Tout d'abord, le Président des USA s'entoure des avis d'un «President's special assistant for Science and Technology», et d'un «President's Science Advisory Committee» (PASC).

La liaison entre les agences gouvernementales spécialisées et le gouvernement est assurée par le «Federal Council for Science and