Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 101/102 (1933)

Heft: 12

Artikel: Comparaison de quelques formules qui experiment l' écoulement de l' eau en régime uniforme dans les conduites de section circulaire

Autor: Calame, Jules

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-82969

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: 12.07.2025

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

INHALT: Comparaison de quelques formules qui expriment l'écoulement de l'eau en régime uniforme dans les conduites de section circulaire. — Wettbewerb für neuzeitliche Holzhäuser, durchgeführt von der „Lignum" (Schweiz. Arbeitsgemeinschaft für das Holz) und dem SWB (Schweiz. Werkbund). — Schweizer Mustermesse Basel 1933. — Weltkraftkonferenz 1933. — Mitteilungen: Schweizer. Kongress für Touristik und Verkehr in Zürich. Fahrzeuge mit Frontsicht für Strasse und Geleise. Fortschritte im Bau elektrischer Kleinkocher. Metallisches Kalzium und seine Verwendung. Bau grosser Eisenbetonbrücken ohne feste Gerüste. Freizeitkurs für Ingenieure des Betriebswissenschaftl. Instituts an der E. T. H. Eisenbetonkonstruktionen der „Galeries Lafayette" in Paris. Aluminium-Ausleger und -Kübel für Baggerkrane. Schweiz. Autostrassen-Verein. Grundwasserbrunnen der Wasserversorgung Basel. Hauptversammlung der Vereinigung schweiz. Strassenfachmänner. — Nekrologe: Theodor Bell. Hans Schmid. A. Mesnager. Karl Straumann. — Wettbewerbe: Kirche in Renens. Schulhausanlage Höngg. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Vortrags-Kalender.

Band 101 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 12

Comparaison de quelques formules qui expriment l'écoulement de l'eau en régime uniforme dans les conduites de section circulaire.

Par JULES CALAME, ingénieur-conseil à Genève.

Ce qui enlève le plus de sécurité au calculateur consciencieux et pourvu de quelque scrupule qui cherche à exprimer l'écoulement de l'eau en régime uniforme, dans un canal ouvert ou une conduite forcée, ce n'est pas tant le foisonnement des formules, dont plusieurs sont aujourd'hui classiques, que le choix d'un *coefficient de rugosité* applicable aux parois.

L'état de neuf ou l'état d'usure des parois, munies ou non d'un enduit protecteur, la nature des matières tenues en suspension dans l'eau (sable plus dur que la paroi de la conduite ou moins dur qu'elle, paillettes schisteuses ou poussières calcaires, matières agglutinantes ou concrétions réduisant le diamètre, etc.) sont autant d'éléments de nature incertaine; aussi ne saurait-on jamais trop préciser, dans les rapports d'essais, les conditions exactes dans lesquelles le coefficient de rugosité a été calculé, ni trop tenir compte, dans les tronçons soumis au calcul, des particularités qui s'écartent de l'alignement droit et de la section constante, les seules conditions dans lesquelles ce coefficient puisse être établi sans ambiguïté.

Il est bon d'ailleurs de remarquer que les modes de construction, tant ceux des canaux que ceux des conduites, tendent à s'unifier de plus en plus; les catégories de rugosité se précisent ainsi, tout en se rapprochant les unes des autres. La tendance au plus lisse, qui est celle de l'économie, a eu certainement pour effet de délimiter la région de plus en plus étroite dans laquelle se placent les coefficients de rugosité qui se rencontrent pratiquement. C'est ainsi que certaines conduites sous pression, construites en béton armé et pourvues d'un enduit lissé, révèlent un coefficient de rugosité souvent fort peu différent de celui des conduites en tôle de même section.

Il n'en reste pas moins que, suivant les pays, la tradition ou la réputation de certaines formules les font préférer à d'autres; les expérimentateurs expriment alors la rugosité observée à l'aide des coefficients de ces formules et il serait souvent fort utile d'avoir à disposition un moyen simple de *les comparer entre elles.*

*

Or, si l'on excepte un instant la formule de *Ganguillet et Kutter* qui est apparemment fonction de la pente J du niveau libre (ou, si l'on préfère, de la perte de charge par unité de longueur), on remarque que la plupart des autres formules classiques utilisées aujourd'hui chez nous, celles de *Bazin*, de *Biel*, de *Strickler* et celle qu'on appelle communément la *petite formule de Kutter*, parmi d'autres, ne dépendent en revanche que du rayon hydraulique de la section et d'un certain coefficient de rugosité qui leur est propre.

Il paraît dès lors naturel de choisir comme commune mesure le rayon hydraulique $\mathcal{R}$, et nous nous proposons ici de le faire dans un cas particulier, celui de la *section circulaire*, pour laquelle $\mathcal{R} = D : 4$, et dans le cas de diamètres courants, supérieurs à environ 0,20 m.

On met dans ce cas volontiers en évidence la perte de charge sous la forme:

$$P_{w_0} = \lambda \frac{L}{D} \frac{W_0^2}{2g} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

dans laquelle P_{w_0} désigne la perte de charge calculée sur une longueur L, en alignement droit, d'une conduite circulaire de diamètre intérieur constant D, $W_0 = Q : {}^1/_4\, \pi D^2$ la vitesse moyenne d'écoulement dans la section.

La pente du niveau de l'eau qui, en régime uniforme, est la même que la pente de la ligne d'énergie, s'écrit alors

$$J = P_{w_0} : L \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

et c'est cette même pente qui intervient dans la formule de Chézy:

$$W_0 = C \sqrt{\mathcal{R} J}$$

qui s'écrit, dans le cas de la section circulaire:

$$W_0 = \frac{1}{2} C \sqrt{DJ} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Or, de (2) et (3) on peut tirer aussi:

$$P_{w_0} = L J = \frac{8g}{C^2} \frac{L}{D} \frac{W_0^2}{2g}$$

et, en comparant à (1)

$$\lambda = 8g : C^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

relation fondamentale qui permet d'exprimer le coefficient C de la formule de Chézy en fonction de λ ou inversément. Il est possible d'étendre ainsi aux conduites forcées les coefficients de rugosité définis par les formules des canaux à libre écoulement et vice versa.

Pour établir la comparaison, il nous suffira maintenant de reporter dans un système de coordonnées cartésiennes, en abscisse, le diamètre intérieur D (fig. 1 et 2) de la section circulaire et, en ordonnée, le facteur λ tel qu'il ressort des formules suivantes:

1° *Formule de Bazin* (1897):

$$C = 87 : (1 + \gamma : \sqrt{\mathcal{R}}) = 87 : (1 + \frac{1}{2} \gamma : \sqrt{D})$$

Traçons la courbe $\lambda = f(\gamma, D)$ pour les diverses catégories de rugosité définies par Bazin, soit pour:

$$\gamma = 0{,}06 \div 0{,}16 \div 0{,}46 \div 0{,}85 \div 1{,}30.$$

2° *Formule de Biel* (1907): (en laissant tomber le terme relatif à la variation de température)

$$\lambda = 0{,}0196\,(0{,}12 + b : \sqrt{\mathcal{R}})$$
$$= 0{,}0785\,(0{,}12 + 2b : \sqrt{D})$$

Traçons les courbes $\lambda = f(b, D)$ correspondant aux catégories $b = 0{,}018 \div 0{,}036 \div 0{,}054$ et $0{,}072$.

3° *Formule de Strickler* (1923):

$$W_0 = k\ \mathcal{R}^{2/3} J^{1/2}$$
$$W_0^2 = k^2\, \mathcal{R}^{4/3} P_{w_0} : L$$

d'où

$$P_{w_0} = \frac{L}{k^2} \frac{W_0^2}{\mathcal{R}^{4/3}} = \frac{2g\, 6{,}35}{k^2 D^{1/3}} \frac{L}{D} \frac{W_0^2}{2g}$$

c'est à dire:

$$\lambda = \frac{12{,}7\, g}{k^2 D^{1/3}}$$

Nous tracerons les courbes $\lambda = f(k, D)$ correspondant à diverses catégories variant de 10 en 10, de $k = 40$ à $k = 100$.

4° *„Petite formule de Kutter"*:

$$\lambda = 8g : C^2$$

où

$$C = \frac{100 \sqrt{\mathcal{R}}}{m + \sqrt{\mathcal{R}}} = \frac{50 \sqrt{D}}{m + \frac{1}{2} \sqrt{D}}$$

Nous nous bornerons à tracer les trois courbes de $\lambda = f(m, D)$ pour $m = 0{,}15$, $m = 0{,}25$ et $m = 0{,}35$.

Les graphiques (fig. 1 et 2) qu'on obtient ainsi sont des plus instructifs, car ils montrent bien l'étendue des domaines respectifs des diverses formules classiques.

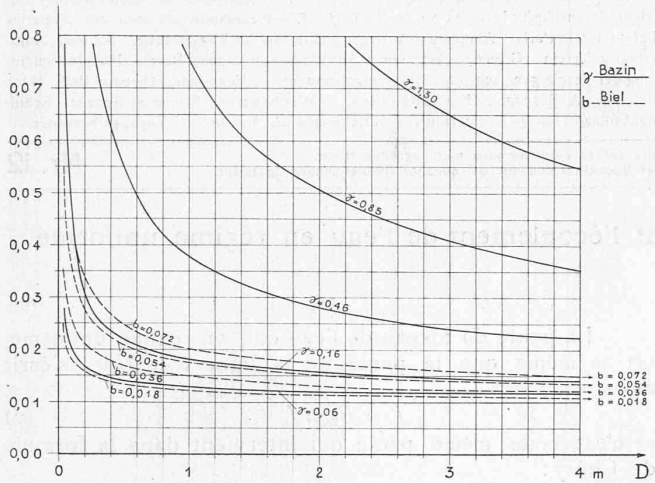


Fig. 1.

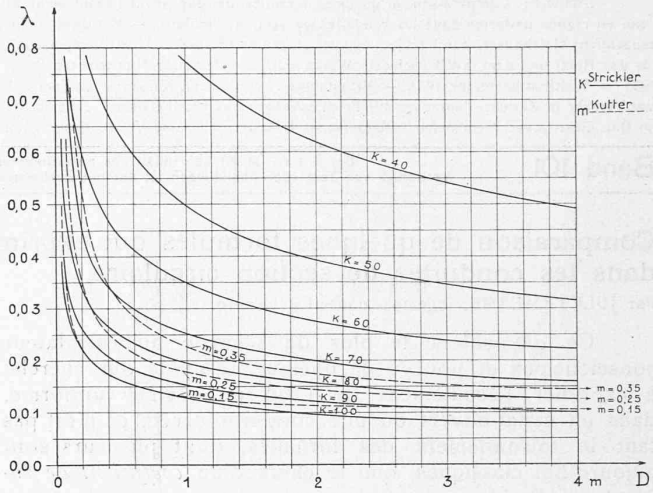


Fig. 2.

On remarquera tout d'abord les domaines étendus que silonnent les courbes de *Bazin* et de *Strickler* et la grande variation que représentent leurs différents coefficients de rugosité.

La formule de *Biel* et la petite formule de *Kutter*, en revanche, n'embrassent qu'une région très limitée du domaine précédent. Si l'on prend la peine de tracer des hachures dans la zone comprise entre les deux courbes extrêmes de la formule de Biel (fig. 1) ou de celle de Kutter (fig. 2), on aura assez bien l'étendue du domaine dans lequel se meuvent les coefficients de rugosité à admettre pour des conduites forcées métalliques soudées, entre l'état de neuf et l'état d'usure.

Mais on remarquera surtout, dans toutes ces formules, *l'influence qu'a sur le coefficient λ le rayon hydraulique,* en l'espèce le diamètre de la section circulaire.

Où les auteurs diffèrent surtout entre eux, c'est dans les valeurs des λ relatifs à des diamètres inférieurs à 1,0 m, et il serait intéressant de pouvoir, dans le graphique de la fig. 1, consteller cette région de résultats d'essais nombreux et sûrs. La difficulté réside souvent, lors d'essais exécutés sur des conduites en exploitation, dans le fait que des coudes, des pièces à T ou des vannes interviennent entre les points des conduites où sont faites généralement les lectures manométriques qui servent aux mesures de puissance et de rendement; on a de ce fait la tendance à attribuer à l'alignement droit un coefficient trop élevé qui tient compte aussi, sans qu'on s'en doute toujours assez, des pertes provoquées par des changements de section ou de direction de la veine liquide. Dans de pareils cas, un calcul trop sommaire pourrait faire ressortir des coefficients de rugosité trop élevés et les courbes extrêmes déjà signalées peuvent utilement mettre en garde contre une interprétation erronée de la perte de charge totale.

*

Examinons maintenant aussi de plus près la formule de *Ganguillet et Kutter* (1869) qui fut probablement, jusqu'à ces dernières années, la plus couramment utilisée en Suisse. Elle n'a pas été établie, remarquons-le, pour des conduites de section circulaire, mais nous nous permettrons tout de même de l'interpréter à titre comparatif dans cette hypothèse, comme nous l'avons fait, plus haut, pour celles de Bazin et de Strickler.

Le calculateur pressé fait à cette formule un reproche légitime, c'est qu'elle conduit à des tâtonnements que sa structure rend aussi longs que fastidieux.

Il n'est toutefois pas inutile de chercher à la comparer aux formules précédentes et dans le même esprit, en l'interprétant par rapport au même système de coordonnées en D et en λ.

Or, en mettant le coefficient caractéristique sous la forme $\lambda = 8g : C^2$, λ n'est plus, dans la formule de Ganguillet et Kutter, simplement fonction de $\mathcal{R}$ et du coefficient de rugosité n, mais bien encore de la pente $J = P_{w_0} : L$ de la ligne d'énergie, puisqu'ici

$$C = \frac{1}{n} \frac{\frac{1}{n} + A}{\frac{1}{n} + \frac{A}{\sqrt{\mathcal{R}}}} \qquad \text{et } A = 23 + (0{,}00155 : J)$$

Remarquons en passant que, pour $\mathcal{R} = 1{,}0$ m, $C = 1 : n$.

n étant donné, on peut se proposer de calculer λ en fonction de $\mathcal{R}$ pour diverses valeurs déterminées de J. La figure 3 donne quelques courbes, dans le cas de la section circulaire, quand $n = 0{,}011$, et pour $J = 0{,}00005$, $J = 0{,}0001$, $J = 0{,}0002$ et $J = 0{,}001$.

Pour choisir sous cette forme la valeur de λ qui convient, on en est réduit à tâtonner. On admettra un certain λ, d'où P_{w_0} d'après (1); et $J = P_{w_0} : L$ devra, si l'on est tombé juste, être aligné au-dessus de $\mathcal{R}$ sur le λ admis.

Théoriquement même et à première vue, ce devrait être toute une région de la figure 3 qui devrait correspondre au coefficient $n = 0{,}011$, la région dans laquelle se meuvent les diverses courbes J; et cette région serait étendue, déjà pour ce seul exemple, comme on peut s'en rendre compte en traçant, à titre comparatif, les courbes de Bazin pour $\gamma = 0{,}06$ et $\gamma = 0{,}16$.

Mais, en réalité, *toutes les courbes de λ* qui peuvent être tracées pour $n = 0{,}011$ en fonction de D et pour diverses valeurs de J, *sont très proches les unes des autres, à tel point qu'on peut pratiquement les confondre, à l'échelle du diagramme.* Ce résultat, qui est d'ailleurs exact strictement pour $D = 4{,}0$ m (puisqu'alors $\mathcal{R} = 1{,}0$ m, $C = 1 : n$), le reste bien suffisamment pour des diamètres plus petits (jusqu'à 0,10 m) et pour de plus grands que 4,0 m, dans toutes les conditions ordinaires d'écoulement.

Si tel n'était pas le cas d'ailleurs, J étant proportionnel à P_{w_0} c'est-à-dire à W_0^2, cela reviendrait à dire que λ varierait dans la formule de Ganguillet et Kutter, non seulement en fonction du rayon hydraulique, comme c'est le cas dans les autres formules, mais aussi, et d'une manière appréciable, en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement W_0. Or on vient de voir qu'il n'en est rien.

L'examen des conditions courantes d'écoulement fait donc aboutir à ce résultat aussi précieux qu'inattendu, c'est que l'influence de J est pratiquement la même pour toutes les vitesses usuelles (et en tous cas pour celles comprises entre 1,0 et 5,0 m/s), quel que soit le diamètre D, et *qu'une seule courbe pour n* caractérise avec suffisamment de précision le facteur λ en fonction de D dans l'expression de Ganguillet et Kutter. Ces courbes, dans le domaine envisagé, sont reportées sur la fig. 4.

Le tâtonnement, qui est nécessaire pour tenir compte de J, on le fait une fois pour toutes en traçant les diverses courbes de la fig. 4 et l'on évite ensuite, par ce mode de représentation, le principal inconvénient de la formule.

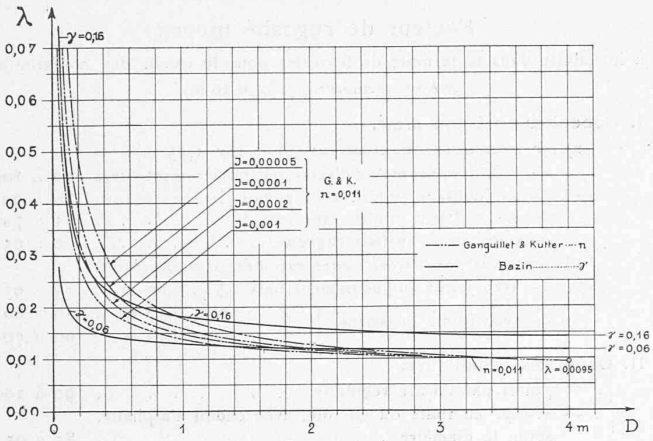


Fig. 3.

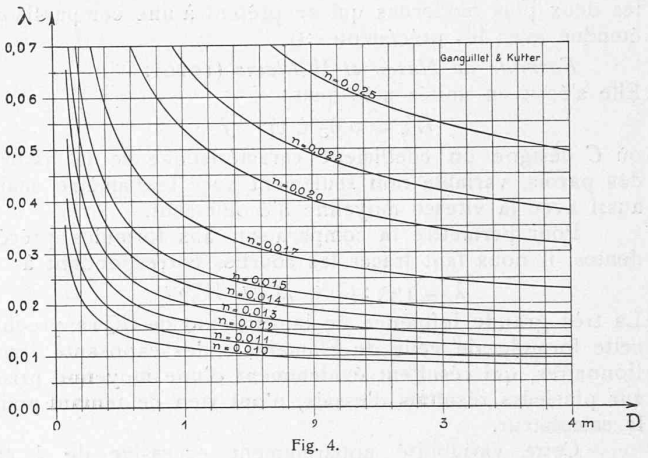


Fig. 4.

Mise sous cette forme, elle ressemble singulièrement aux autres formules classiques examinées dans les fig. 1 et 2, ce dont on se rendrait facilement compte si ces figures étaient transparentes et si on les reportait les unes sur les autres en faisant coïncider l'origine et les axes. En examinant de plus près la fig. 4, on voit combien les courbes de Ganguillet et Kutter, qui ont d'ailleurs leur allure propre, sont voisines de celles de Strickler (fig. 2), particulièrement quand $D > 1{,}0$ m. La variation du coefficient de rugosité de ces deux formules permet de les étendre l'une et l'autre à tous les domaines désirables avec la même facilité.

Mais comme la *formule de Strickler* est très simple à manipuler et comme son coefficient de rugosité s'exprime par un facteur facile à retenir, il est hors de doute que, dans ce pays tout au moins, cette dernière formule remplacera peu à peu la précédente.

*

A titre comparatif, la fig. 5 donne la valeur de $\lambda = f(D)$ des anciennes formules classiques de *Prony, Darcy, Weisbach*, ainsi que de celles de *Maurice Lévy* et de *Flamant* qui sont aujourd'hui encore couramment employées hors de chez nous, mais qui ne sont strictement valables (à l'exception de celle de Flamant) que pour des conduites *en fonte* déjà fortement incrustées.

Seules celles de Darcy et de Maurice Lévy peuvent s'exprimer dans tous les cas sous la forme adoptée $\lambda = f(D)$ avec l'équivalence suivante:

Formule de Darcy (1858):
pour des conduites *en fonte fortement incrustées:*

$$\lambda = 0{,}03978 + (0{,}0010174 : D)$$

et la moitié seulement de ce coefficient pour des conduites *neuves en fonte* (confronter fig. 5).

Formule de Maurice Lévy (1867):
pour des conduites *en fonte* recouvertes de dépôts

$$\lambda = 4g : (20{,}5)^2 \left(1 + 3\sqrt{D : 2}\right)$$

Les trois autres formules, en plus, dépendent de la vitesse d'une manière importante et leur courbe est tracée sur la fig. 5 pour deux vitesses, à savoir $W_0 = 1{,}0$ et $3{,}0$ m/s.

Formule de Prony (1804):

$$\lambda = 8g\,[0{,}000348 + (0{,}000017 : W_0)]$$

Formule de Weisbach (1845):

$$\lambda = 0{,}01439 + \left(0{,}0094711 : \sqrt{W_0}\right)$$

Formule de Flamant (1892):
dans le cas de tuyaux en tôle *légèrement incrustés.*

$$\lambda = 2g \cdot 0{,}00092 : \sqrt[4]{W_0\, D}$$

En réalité et comme le montre la fig. 5, la formule de Flamant, dite pour tuyaux „*légèrement incrustés*", correspond vraisemblablement aux parois lisses des conduites neuves, bien que Flamant indique pour ces dernières un coefficient plus faible encore, correspondant au facteur 0,00074, au lieu de 0,00092 ci-dessus qui est celui de la courbe représentée sur la fig. 5. La comparaison de ces formules officielles qui figurent dans de nombreux ouvrages d'Hydraulique avec des commentaires plus ou moins judicieux, est en soi déjà profitable. On voit d'ailleurs que *les formules de Maurice Lévy et de Flamant pourraient s'adapter, au même titre que d'autres formules, à divers degrés de rugosité, à condition d'indiquer, pour chaque catégorie, un coefficient approprié.* Encore faut-il remarquer que, seule parmi les formules françaises modernes, celle de *Flamant fait varier λ en fonction de la vitesse* d'une manière appréciable et semble ainsi contredire les conclusions auxquelles aboutissent les plus récents travaux.

Quant aux formules anciennes de Prony, Weisbach et Darcy, il est préférable de ne plus les utiliser.

*

Il est profitable de comparer encore aux formules qui précèdent celles qui furent ou qui sont d'un usage courant aux Etats-Unis. On ne retiendra ici cependant que

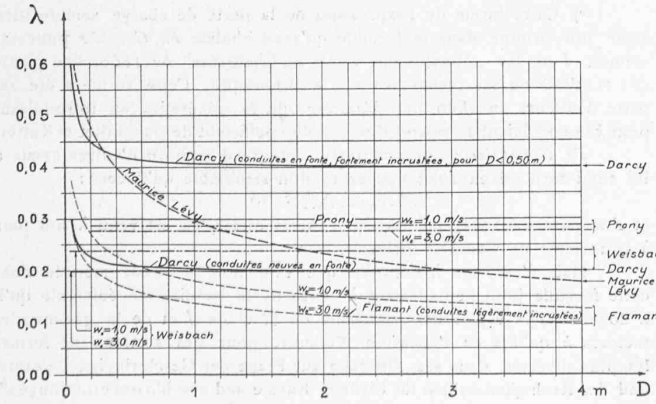


Fig. 5.

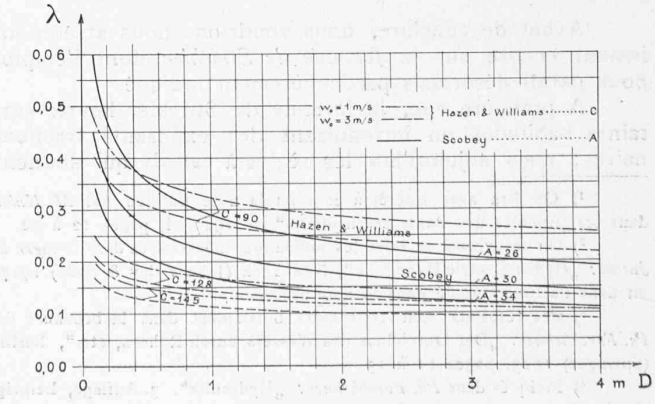


Fig. 6.

les deux plus modernes qui se prêtent à une comparaison étendue avec les précédentes:[1])

Formule de Hazen et Williams (1920):
Elle s'écrit en unités métriques:

$$W_0 = 0{,}85\, C\, \mathcal{R}^{0{,}63}\, J^{0{,}54}$$

où C désigne un coefficient caractéristique de la nature des parois, variable non seulement avec le diamètre, mais aussi avec la vitesse moyenne d'écoulement.

Pour permettre la comparaison aux formules précédentes, il nous faut tracer les courbes correspondant à

$$\lambda = 133 : C^{1{,}85},\ D^{0{,}167},\ W_0^{0{,}15}$$

La très grande influence de la variation de W_0 rapproche cette formule de celle de Flamant, et les exposants fractionnaires, qui résultent évidemment d'une moyenne prise sur plusieurs résultats d'essais, n'ont rien de tentant pour le calculateur.

Cette variabilité apparemment excessive de λ en fonction de W_0 a conduit leurs auteurs à donner séparément et pour chaque catégorie de conduite un tableau des valeurs définitives de C, à corriger en fonction du diamètre de la vitesse moyenne.[2]) On en est conduit ainsi à calculer par tâtonnement et l'on retombe dans les pratiques semblables à celles qu'on a si souvent dénoncées comme l'inconvénient majeur de la formule de Ganguillet et Kutter.

Comme valeurs moyennes du coefficient C, on peut détacher entre autres, pour un premier tâtonnement:

$C = 145$ pour des canaux lisses ou des conduites neuves en fonte;
$= 128$ pour des conduites en béton armé après un certain temps d'usage;
$= 90$ pour des conduites métalliques en service, soit en tôle rivée, soit en fonte légèrement incrustée.

La figure 6 montre l'influence de W_0 sur la valeur de λ pour de tels C provisoires et la nécessité de corriger ensuite C en fonction de D et de W_0 d'après le barême auquel on vient de faire allusion.

Formule de Scobey (1920):

$$W_0 = A\, D^{0{,}625}\, J^{0{,}5}$$

Elle résulte de l'interprétation de nombreux essais, en majorité sur des conduites en béton armé aux Etats-Unis[3]), dont les diamètres variaient entre 0,30 et 5,50 m.

Sur la figure 6, on a tracé trois courbes de

$$\lambda = 2g : A^2\, D^{0{,}3}$$

correspondant aux coefficients caractéristiques suivants[4])

$A = 34$ pour des conduites en béton armé de section circulaire complètement lisses;
$= 30$ dans des conduites formées par des tronçons jointifs;
$= 26$ dans des conduites dont les joints restent grossiers ou qui sont fortement rugueuses.

Toutefois le tracé de ces trois courbes (fig. 6) fait apparaître une rugosité sensiblement plus grande que celle caractérisée par les formules d'usage en Europe.

*

Avant de conclure, nous voudrions nous arrêter un instant encore sur la *formule de Strickler* dont l'emploi nous paraît désormais particulièrement indiqué.

A première vue, la formule de Strickler heurte certaines habitudes en introduisant des exposants fractionnaires; mais aujourd'hui les règles à calculs qui donnent les carrés et les cubes en regard de la base, ou celles même qui permettent de calculer immédiatement une puissance fractionnaire quelconque, fournissent sans aucune peine le résultat cherché.[5])

On peut, dans le cas de la *section circulaire*, exprimer immédiatement le débit d'écoulement Q en fonction du diamètre D et de la perte de charge J par unité de longueur:

$$Q = SW_0 = \frac{\pi D^2}{4} k \frac{D^{2/3}}{4^{2/3}} J^{1/2} = 0{,}312\, k D^{8/3} J^{1/2}$$

Cette dernière égalité peut être chiffrée très facilement aussi à l'aide de l'abaque logarithmique de la fig. 7, page 139, en l'écrivant:

$$\log Q - \log k = \frac{1}{2} \log J + \left(\frac{8}{3} \log D + \log 0{,}312\right).$$

Cet abaque, dont la lecture est des plus simples, remplace aujourd'hui avantageusement, pour la section circulaire, ceux de *Darcy, Weisbach, Lévy* ou *Flamant*, car il permet de faire varier, dans chaque cas particulier, le facteur de rugosité k. On pourra estimer la valeur de ce dernier sur le tableau ci-dessus.

Facteur de rugosité moyen

à introduire dans la formule de Strickler pour le calcul des *conduites de section circulaire* ($\varnothing > 0{,}20$ m).

I. Conduites en béton armé.	
a) *de construction monolithique* ($\varnothing >$ env. 1,25 m):	
— exécutées sur moule d'acier, particulièrement lisses	90 à 100
— sur coffrage jointif, avec enduit lissé	80 à 90
— sur coffrage jointif, sans enduit	65 à 70
— paroi usée, surface rugueuse	60 à 65
b) *constituées par éléments séparés* exécutés sur moule d'acier:	
— avec joints soigneusement finis $\varnothing > 0{,}80$ m	85 à 95
— avec joints grossiers $\varnothing >$ env. 0,50 m	70 à 80
— avec joints grossiers $\varnothing <$ env. 0,50 m	60 à 70
II. Conduites métalliques.	
— polies par l'usure régulière	90 à 100
— *neuves*, en fonte ou en tôle, avec enduit d'asphalte, selon le diamètre	85 à 95
— *en service* depuis plusieurs années,	
— en fonte ordinaire / — en acier coulé, selon le diamètre	75 à 80
— en tubes étirés (sans soudure) ou en tôle soudée longitudinalement, avec joints rivés coniques, les rivets hors du profil utile	80
— en tôle soudée longitudinalement	
joints à brides	80
joints rivés (cylindriques)	75
— en tôle rivée longitudinalement et transversalement (joints rivés cylindriques), selon le diamètre	65 à 75
— avec marques de corrosion ou d'incrustation, surface rugueuse	60 à 70
— particulièrement usées	55 à 60
III. Conduites en douves de bois.	
— neuves	95
— en service	85
— usées	65

NB. Les grands chiffres se rapportent aux plus grands diamètres.

[1]) On lira avec intérêt à ce sujet la note publiée par *M. Hubie* dans les „Annales des Ponts et Chaussées" de 1927. I, pages 12 à 22.

[2]) On trouvera à ce sujet les indications nécessaires dans *Creager & Justin:* „Hydro-electric Handbook", New York (John Wiley & Sons) 1927, ou dans l'article signalé dans la note précédente.

[3]) Ces résultats sont reproduits notamment dans la brochure de *Ph. Forchheimer:* „Der Durchfluss des Wassers durch Röhren, etc.", Berlin (Springer) 1923, pages 11 à 15.

[4]) Indiqués dans *Ph. Forchheimer:* „Hydraulik". 3. Auflage, Leipzig (Teubner) 1930.

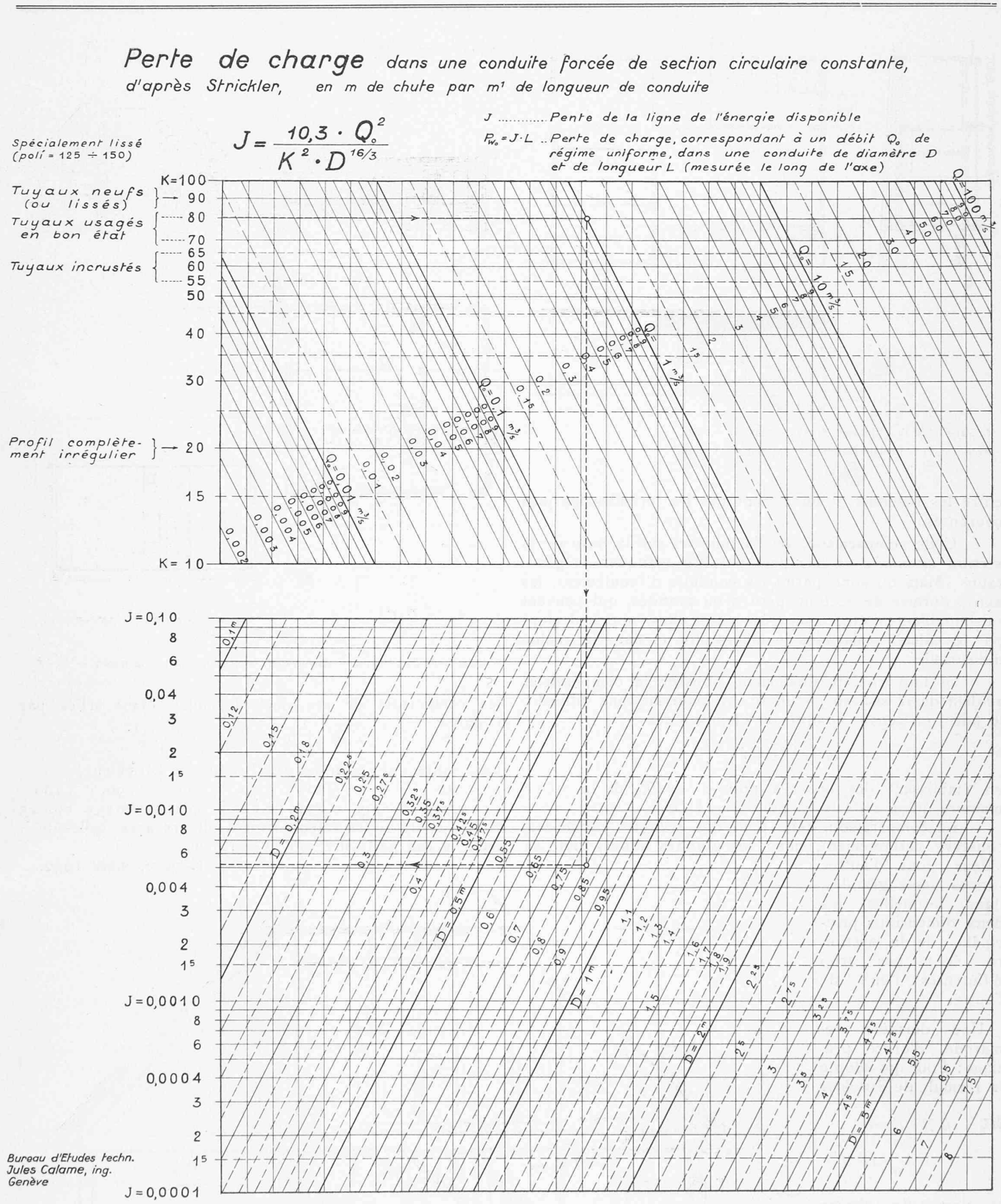
[5]) Cette forme de l'expression de la perte de charge semble bien avoir son origine dans la formule qu'avait choisie *Ph. Gauckler* pour exprimer, dans les „Annales des Ponts et Chaussées" de 1868, une partie des résultats de ses recherches sur le Mississippi. Cette forme a été reprise d'ailleurs en 1890 par *Manning* qui la généralisa en introduisant pour k le coefficient $1 : n$, soit l'inverse du coefficient de Ganguillet et Kutter.

Ph. Forchheimer, en comparant un grand nombre d'autres essais a lui aussi formulé en 1923 une expression semblable qu'il écrit:

$$W_0 = k'\, \mathcal{R}^{0{,}7}\, J^{0{,}5}$$

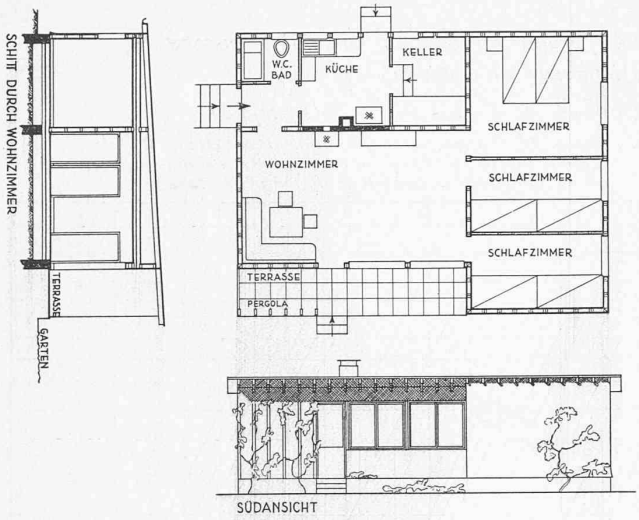
et *Lindqvist*, en 1926, en partant d'autres essais, en est venu à son tour à la formule de Gauckler-Strickler.

Mais c'est bien à *Strickler* que l'on doit la faveur méritée dont cette formule jouit actuellement à cause de la justification éclatante qu'il a donnée de la valeur des exposants de $\mathcal{R}$ et de J et de la gamme des facteurs k qu'il a eu l'occasion d'établir, pour des sections de formes les plus diverses, dans ses „Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen", publiés en 1923 par le Service fédéral des Eaux à Berne (Edition épuisée).

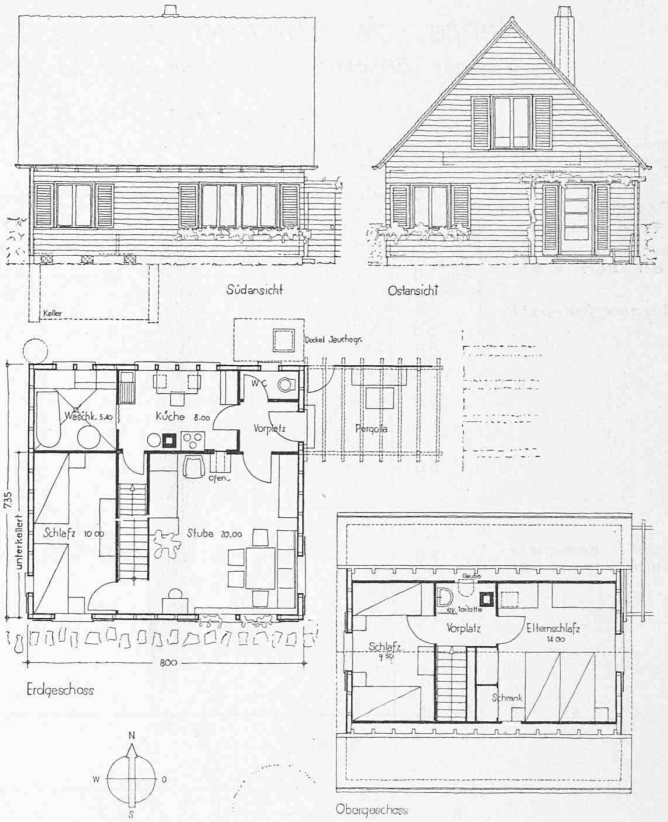


En résumé, cette comparaison des formules de l'écoulement en régime uniforme n'apporte en soi rien de nouveau, si ce n'est une mesure du résultat des efforts accomplis depuis plus d'un siècle pour donner une solution empirique à un problème qui n'est pas résolu. Le tourbillonnement et l'agitation locale jouent, on le devine, un rôle d'autant plus important que la section de passage est plus réduite. Quand la section est grande, ces phénomènes secondaires diminuent vraisemblablement d'importance, et c'est ainsi sans doute qu'il faut s'expliquer la concordance des formules classiques pour les grands diamètres.

Les valeurs absolues de λ varient évidemment avec la structure de la formule employée et les coefficients de rugosité admis. Dans la région où les diverses courbes convergent, c'est-à-dire quand le diamètre de la section circulaire dépasse 1,0 m, il semble bien qu'il soit parfaitement superflu de s'encombrer de formules qui conduisent à de longs calculs. Dans la région où $D < 1{,}0$ m, les figures 1, 2, 4 et 5 permettent aisément une comparaison



1. Rang (1800 Fr.), Entwurf Nr. 91. — Masstab 1 : 200.
Architekten: J. Beeler (Zürich) und J. Zamboni (Luzern).



1. Rang (1800 Fr.), Nr. 18. — Architekten: M. Nabold und H. Gachnang. — 1 : 200.

entre les résultats qu'on obtient par les formules les plus courantes.

Cette comparaison, on l'a faite ici sur la base de la section *circulaire* et cela peut paraître manquer de généralité. Mais où sont parmi les conduits d'écoulement, les autres formes de section, petites ou grandes, qui peuvent raisonnablement être comparées entre elles, non seulement par le calcul, mais dans le laboratoire et dans la réalité industrielle?

Si l'on voulait finalement pousser la comparaison au-delà de la section circulaire, on pourrait sans difficulté le faire, en tenant compte de l'équivalence

$$\varphi \frac{L}{\mathcal{R}} \frac{W_0^2}{2g} = \lambda \frac{L}{D} \frac{W_0^2}{2g}$$

en établissant des courbes pour $\varphi = f(\mathcal{R})$ de la même manière qu'on l'a fait ici pour $\lambda = f(D)$.

La comparaison, faite pour des sections circulaires, conserve certainement, dans ses grandes lignes, toute sa valeur pour d'autres formes assez grandes, dans lesquelles les deux dimensions principales de la section ne sont pas trop différentes l'une de l'autre.

Une dernière remarque, d'ordre pratique: Pour qui adopte la formule de Strickler

$$W_0 = k\, \mathcal{R}^{2/3} J^{1/2} = \frac{k}{4^{2/3}} D^{2/3} J^{1/2}$$

la perte de charge $P_{w_0} = JL$ ne doit plus s'écrire, dans le cas de la section circulaire, sous la forme (1):

$$P_{w_0} = \lambda \frac{L}{D} \frac{W_0^2}{2g}$$

mais bien:

$$P_{w_0} = \lambda' \frac{L}{D} \frac{W_0^2}{2g}$$

les coefficients de ces deux formules étant reliés par l'égalité:

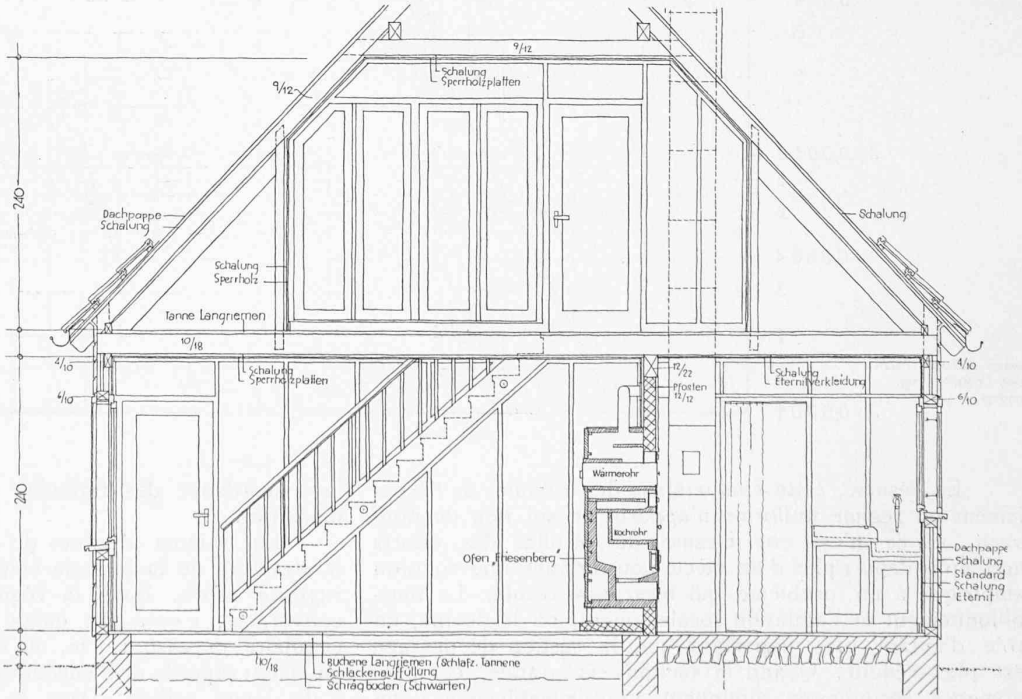
$$\lambda' = \lambda \sqrt[3]{D} = \frac{2g\, 4^{4/3}}{k^2} = \left(\frac{11{,}1}{k}\right)^2$$

c'est-à-dire que, pour les coefficients de Strickler

$k =$	40	50	60	70	80	90	100
$\lambda' \sim$	0,078	0,0495	0,0345	0,0255	0,0195	0,0155	0,0125

Ces dernières valeurs sont d'ailleurs aussi celles de λ, dans le cas particulier où $D = 1{,}0$ m.

Genève, mars 1932.



Entwurf Nr. 18. — Architekten: M. Nabold (Zürich) und H. Gachnang (Oberrieden). — Schnitt 1 : 60.