

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 78 (1960)
Heft: 41

Artikel: Die effektive hydraulische Leistungsfähigkeit von Beton-Rohrleitungen
Autor: Bättig, Karl
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-64968>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.03.2025

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

Die effektive hydraulische Leistungsfähigkeit von Beton-Rohrleitungen

Von Karl Bättig, dipl. Ing., Lyss

DK 621.643.253:532.54

A. Problemstellung

Die hydraulische Leistungsfähigkeit einer Betonrohrleitung wird sowohl durch zeitlich veränderliche wie auch durch von der Zeit unabhängige Einflüsse bestimmt. Veränderlich sind die Wassertemperatur, das spezifische Gewicht, die Wassergeschwindigkeit, Art und Menge der transportierten Feststoffe, die losen Ablagerungen in den Leitungen, sowie die Korrosionen und Inkrustationen. Ueber die meisten dieser Erscheinungen wurden verschiedentlich wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht, welche gestatten, bei bekannten Gegebenheiten die Strömungswiderstände zu berechnen. Andere wiederum harren in ihren praktischen Auswirkungen noch einer umfassenden Abklärung.

Im folgenden wenden wir uns allein den von der Zeit unabhängigen Einflüssen zu, welche die hydraulische Leistungsfähigkeit der Rohrleitungen in erster Linie bestimmen. Hier seien genannt die Gefällsverhältnisse, die Leitungslänge, der Rohrdurchmesser, die Wandrauigkeit, die Länge der Einzelrohre, die Ausbildung der Rohrstöße und die Gestalt der Leitungssaxe im Grundriss und Längenprofil. Wir beschränken uns auf volllaufende Betonrohrleitungen und setzen ferner voraus, dass sich die Dichtungen der Rohrstöße, die je nach der Art ihrer Ausbildung zeitlich veränderlichen Verformungen unterworfen sein können, in einem gleichbleibenden Zustand befinden. Tatsächlich verbleiben als veränderliche Grössen die Rohrlänge, die Konstruktion der Rohrstöße und die Form der Leitungssaxe. Dabei soll unter «Form der Leitungssaxe» deren tatsächlicher Verlauf im Vergleich zu der im Projekt vorgeschriebenen ideellen Führung verstanden sein.

B. Hydraulische Grundlagen

Als Endziel der Betrachtungen soll die Darstellung des Rauigkeitsbeiwertes k nach Manning-Gaukler-Strickler, in Funktion des Leitungsdurchmessers und der mittleren Wassergeschwindigkeit, festgehalten werden. Es gelten die Bezeichnungen:

v mittlere Geschwindigkeit in m/s,

k Rauigkeitskoeffizient in $m^{1/3}s^{-1}$,

F benetzte Fläche in m^2 ,

P benetzter Umfang in m,

D Nenndurchmesser der Leitung in m,

$R = F/P$ hydraulischer Radius in m,

J absolutes Energieliniengefälle,

λ dimensionslose Widerstandsziffer in der allgemeinen Abflussformel,

c' dimensionslose Konstante zur Charakterisierung der Rauigkeitsart,

d_r mittlere Höhe der Rauigkeitserhebungen in m,

ν kinematische Zähigkeit in m^2/s ,

$Re = \frac{vD}{\nu}$ Reynoldssche Zahl.

Für die Geschwindigkeit bei turbulentem Abfluss gilt bekanntlich die Formel

Tabelle 1 Kinematische Zähigkeit von Reinwasser und Abwasser in $10^6 m^2/s$

Temp. °C	6	8	10	12	14	16	18	20
Reinwasser	1,468	1,385	1,306	1,235	1,172	1,112	1,060	1,007
von	1,671	1,562	1,468	1,385	1,306	1,235	1,172	1,112
Abwasser	—	1,730	1,615	1,516	1,425	1,345	1,272	1,206
bis								

$$(1) \quad v = \left(\frac{8g}{\lambda} \right)^{1/2} R^{1/2} J^{1/2}$$

Im hydraulisch *glatten* Rohr findet der Uebergang von laminarer zu turbulenter Strömung bei Reynoldszahlen von 1000 bis 6000 statt. Die kinematische Zähigkeit hängt sowohl von der Art der Flüssigkeit wie auch von der Temperatur ab. Tabelle 1 gibt die Zahlen für Reinwasser und für Abwasser.

Um 4 bis 7 °C wärmeres Abwasser hat gleiche Zähigkeit wie Frischwasser.

Auch für das *rauhe* Rohr haben die selben Reynoldszahlen als Grenzwerte Geltung. Voll ausgebildete Turbulenz stellt sich jedoch erst ein, wenn Re den Wert 10 000 übersteigt. Somit berechnet sich die Grenzgeschwindigkeit

$$(2) \quad v_{\text{grenz}} = \frac{0,013}{D}$$

Sie wird in normalen Fällen immer erreicht. Neben den Extremfällen des absolut glatten und des rauhen Rohres gibt es Rohre mit glatttem und solche mit welligem Charakter.

Die allgemeine Gleichung für das Energieliniengefälle lautet

$$(3) \quad J = \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Die Widerstandsziffer λ hängt von Re und vom Charakter der Rohrrauigkeit ab. Bild 1 zeigt den grundsätzlichen Zusammenhang. Dazu ist folgendes zu bemerken:

1. Die absolut glatte Leitung weist einen mit zunehmender Reynoldszahl abnehmenden λ -Wert auf. Der Grund für diese Abnahme liegt in der kleiner werdenden Stärke der laminaren Grenzschicht. Nikuradse gibt für die Widerstandsziffer die Beziehung

$$(4) \quad \lambda_{\text{glatt}} = 0,0032 + 0,221 Re^{-0,237}$$

Hermann berechnet für den selben Wert

$$(5) \quad \lambda_{\text{glatt}} = 0,5 \left(0,0027 + \frac{0,161}{(2 Re')^{0,3}} \right) \quad \text{wobei } Re' = \frac{vR}{\nu}$$

2. Im Bereich konstanter Widerstandsziffern hat Nikuradse bei den Leitungen mit körniger Rauigkeit den Wert bestimmt zu

$$(6) \quad \lambda_{\text{körnig}} = \frac{2}{(4,75 + 5,75 \lg \frac{2R}{d_r})^2}$$

Hierin bedeutet d_r die Korngrösse und $2R/d_r$ die relative Rauigkeit. Im Uebergangsbereich, wo sich λ mit Re verändert, ist die Turbulenz noch nicht voll ausgebildet. Die Grenze für voll ausgebildete Turbulenz wurde bereits früher mit $Re = 10\,000$ angegeben.

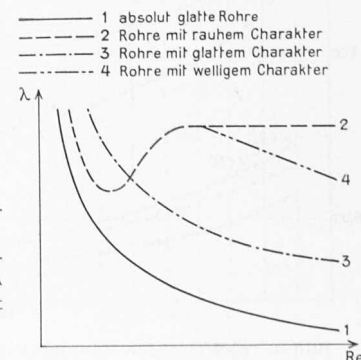


Bild 1. Grundsätzliches Verhalten der Widerstandsziffer λ in Abhängigkeit der Reynoldszahl

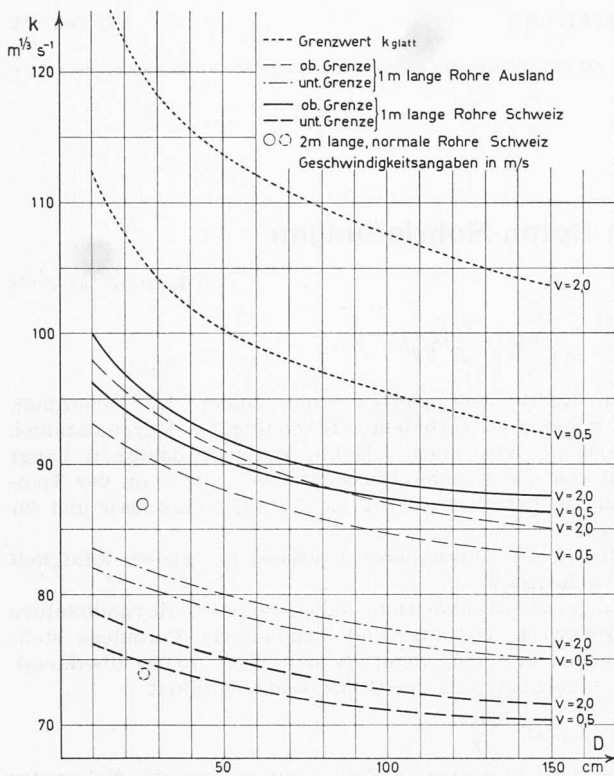


Bild 2. k -Werte für normale Betonrohre

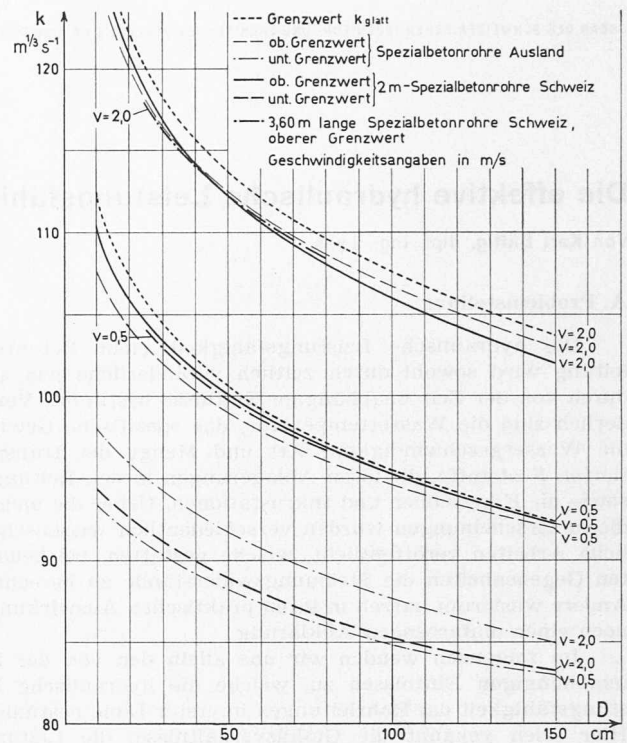


Bild 3. k -Werte für Spezialbetonrohre

3. Weder für Leitungen mit glattem noch für solche mit welligem Charakter liegen Messergebnisse in zusammenfassender Art vor.

Aus der Abflussformel nach Strickler

$$(7) \quad v = k R^{2/3} J^{1/2}$$

ergibt sich durch Vergleich mit den früher betrachteten Formeln für

$$(8) \quad k = \left(\frac{8g}{\lambda} \right)^{1/2} \frac{1}{R^{1/6}}$$

Setzt man hierin für λ den Ausdruck nach Nikuradse Gl. (4), so erhält man

$$(9) \quad k_{glatt} = \frac{1}{R^{1/6}} \left(\frac{8g}{0,0032 + 0,221 Re - 0,237} \right)^{1/2}$$

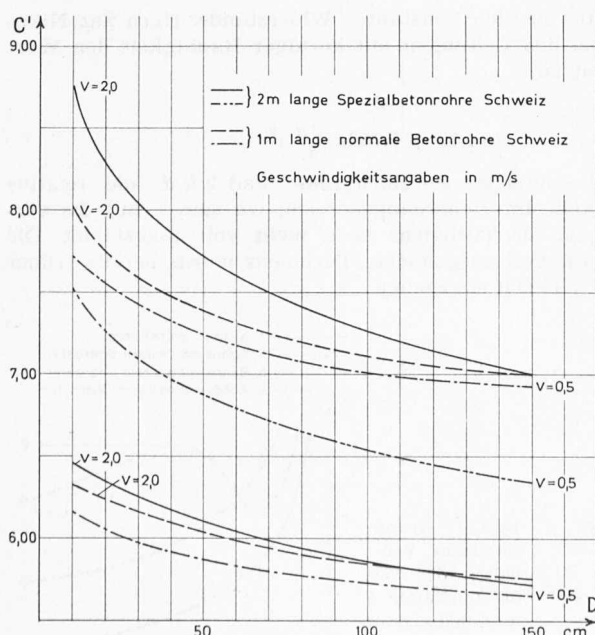


Bild 4. c' -Werte der Rauigkeitsart (Formel 14)

nach Hermann (Gl. 5) ergibt sich

$$(10) \quad k_{glatt} = \frac{1}{R^{1/6}} \left(\frac{4g}{0,0027 + 0,161(2Re') - 0,3} \right)^{1/2}$$

Für offene Gerinne fand Strickler durch systematische Messungen die Zusammenhänge

$$(11) \quad k = \frac{c}{d_r^{1/6}}$$

c ist ein Mass für die Rauigkeitsart.

Aus den Gleichungen (8) und (11) folgt

$$(12) \quad \left(\frac{8g}{\lambda} \right)^{1/2} = \frac{c}{d_r^{1/6}} R^{1/6}$$

Somit ergibt sich für die allgemeine Geschwindigkeitsformel

$$(13) \quad v = c \frac{R^{1/6}}{d_r^{1/6}} R^{1/2} J^{1/2}$$

oder durch Einführung einer dimensionslosen Konstanten

$$c' = c/g^{1/2}$$

$$(14) \quad v = c' g^{1/2} \left(\frac{R}{d_r} \right)^{1/6} R^{1/2} J^{1/2}$$

Diese Beziehung darf auch für Abflüsse unter Druck Verwendung finden.

C. Zusammenstellung der Messungen

Die Ergebnisse der bisher an verlegten Rohrleitungen durchgeführten Versuche befriedigen noch keineswegs. Trotzdem soll versucht werden, aus ihnen einige Zusammenhänge abzuleiten. Um sie miteinander vergleichen zu können, werden sie auf Reinwasser von 10 °C umgerechnet. Weiter sind nur Messungen an geraden Leitungen in Betracht gezogen worden, die durch keine Krümmungen, Erweiterungen, Verengungen, Gabelungen, Einläufe oder Schächte gestört waren.

Bild 2 zeigt die k -Werte von Leitungen, die aus normalen Betonrohren zusammengestellt sind. Sie gehören eindeutig in die Kategorie der Leitungen mit rauhem Charakter, was aus dem Vergleich der gemessenen k -Werte mit dem Wert für glatte Rohre hervorgeht. Die Ergebnisse gesammelter ausländischer und schweizerischer Messungen wurden getrennt auf-

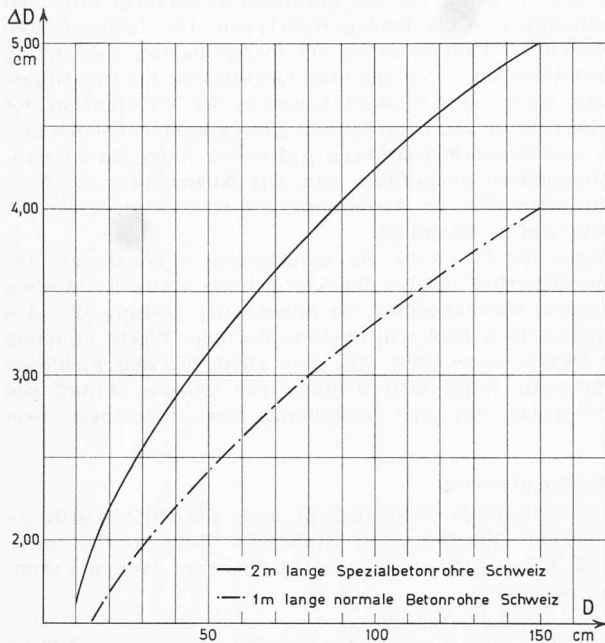


Bild 5. Querschnittseinengungen ΔD , berechnet nach der Formel $\Delta \Delta Z_e = 1,5 (\Delta v^2 / 2g)$

geführt, vor allem, weil bei den ausländischen Berichten die Versuchsbedingungen nicht in allen Beziehungen klar umschrieben waren. Dennoch darf die Übereinstimmung als gut bezeichnet werden. Für 2 m lange, normale Betonrohre, von 25 cm Durchmesser, fand in der Schweiz eine Laborprüfung statt, deren k -Wert als Einzelpunkt ebenfalls angegeben ist.

In Bild 3 sind die Ergebnisse der Messungen an Leitungen dargestellt, die aus Spezialbetonrohren zusammengesetzt sind. Auch hier decken sich die ausländischen Werte mit den in der Schweiz gemessenen sehr gut. Vor allem fällt auf, dass fast alle Spezialbetonrohre bei sauberem Verlegen und einwandfreier Ausbildung der Dichtung als hydraulisch glatt gelten können. In Wirklichkeit sind diese Voraussetzungen allerdings nur recht selten erfüllt; namentlich verursacht bei den kleineren Rohrdurchmessern die saubere Ausführung der Dichtungen erhebliche Schwierigkeiten. Jene Leitungen von kleinerem Durchmesser, die im Labor geprüft wurden, haben die Grenze k_{glatt} praktisch erreicht. Für den unteren Grenzwert mit der Geschwindigkeit $v = 0,5$ m/s sind leider zu wenig zuverlässige schweizerische Messungen vorhanden, als dass eine Kurve hätte eingezeichnet werden können. Es ist aber mit Sicherheit anzunehmen, sie verlaufe ähnlich wie jene für $v = 2,0$ m/s.

D. Auswertung

Zunächst ist festzustellen, dass die absolute Rauigkeit d_r für alle Fabrikate die selbe ist. Das ergibt sich für die normalen Betonrohre aus der ähnlichen Struktur des Betongefüges. Die meisten Rohre werden auf sich verwandten Maschinen hergestellt, weshalb die bisher bekannten Werte für die absolute Rauigkeit nicht stark voneinander abweichen. Der Mittelwert dieser Zahlen beträgt 0,25 mm. Spezialbetonrohre verschiedener Herkunft erreichen im günstigsten Fall die Grenze des absolut glatten Rohres, sie weisen also die selbe absolute Rauigkeit auf. Nach Berechnungen kann hier $d_r = 0,1$ mm gesetzt werden.

Wie aus den Bildern 2 und 3 ersichtlich, bestehen zwischen den oberen und den unteren Grenzwerten grosse Unterschiede. Eine eindeutige Erklärung hierfür ergab sich aus einem Laborversuch, der mit einer äusserst sorgfältig und einer nachlässig verlegten Rohrleitung durchgeführt wurde. Die verwendeten Rohre waren von normaler Rauigkeit, also $d_r = 0,25$ mm; der Durchmesser betrug 25 cm und die Länge der Einzelrohre 2 m. Die für das Verlegen aufgewendete Sorgfalt kommt eindeutig in den ermittelten k -Werten nach Strickler zum Ausdruck. Für die einwandfrei verlegte

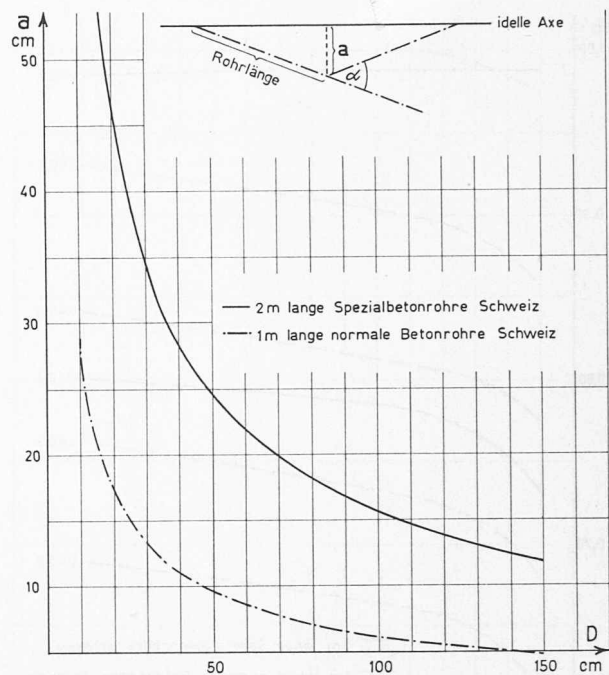


Bild 6. Abweichungen a aus der ideellen Leitungsaxe, berechnet nach Formel $\Delta \Delta Z_e = 1 - \cos a (v^2 / 2g)$

Leitung ergab sich $k = 87$ und für die nachlässig verlegte $k = 74$. Leider stehen die dabei verwendeten Ungenauigkeiten, sowohl in der Führung der Leitungsaxe als auch in der Ausbildung der Rohrstösse, nicht in Zahlen zur Verfügung. Als Gründe für das unterschiedliche Verhalten von Abflussvorgängen unter scheinbar ähnlichen Verhältnissen und gleichen Reynoldszahlen sind somit die Ausbildung der Rohrstösse, der Verlauf der Leitungsaxe in horizontaler und vertikaler Sicht und die Länge der Einzelrohre anzusehen.

Um diese Erscheinungen besser deuten zu können, greifen wir auf die allgemeine Geschwindigkeitsformel (14) zurück. Die dimensionslose Konstante c' charakterisiert die Rauigkeitsart. Sie gibt also Auskunft über die Formrauigkeit, unabhängig von der absoluten Rauigkeit d_r der Einzelrohre, welche ihrerseits nur ein Mass für die Qualität der Rohrrinnenwand ist. Auf Bild 4 ist der Verlauf der c' -Werte dargestellt. Grosse c' -Zahlen bedeuten kleine Reibungswiderstände, wie aus Formel (14) hervorgeht.

Betrachtet man die oberen Grenzwerte, so zeigt sich, dass für 2,0 m/s die Spezialbetonrohre bei den kleinen Leitungsdurchmessern wesentlich höhere c' -Werte als Normalrohre aufweisen. Bei den grösseren Durchmessern werden die Unterschiede geringer. Für 0,5 m/s sind die c' -Werte von normalen Betonrohren erstaunlicherweise bedeutend höher als die von Spezialrohren. Bei den unteren Grenzwerten liegen leider nur die Zahlen für eine Geschwindigkeit von 2,0 m/s vor. Im Gebiet der kleineren Durchmesser weisen die Spezialbetonrohre etwas höhere c' -Werte auf, bei den grossen Durchmessern verschwindet der Unterschied. Aus diesen Vergleichen ist zu schliessen:

1. Für Leitungsdurchmesser unter etwa 100 cm und Wassergeschwindigkeiten über 1,0 m/s spielt die Länge der Einzelrohre und damit auch die Anzahl der Rohrstösse sowie deren Ausbildung für die hydraulische Leistungsfähigkeit eine entscheidende Rolle.

2. Die Rohrstösse begehrter Leitungen werden sorgfältiger ausgeführt als diejenigen nicht begehrter Leitungen.

Um die Unterschiede der Formrauigkeit zu erklären, sei von den Formeln für den Energieverlust bei plötzlichen Veränderungen des Leitungsquerschnittes und der Leitungsaxe ausgegangen.

Borda-Carnot liefert unter Anwendung des Impulssatzes den Ansatz für die Verlusthöhe bei einer plötzlichen Erweiterung mit

$$(15) \quad \Delta Z_{eE} = \frac{(v_o - v_u)^2}{2g} = \frac{(\Delta v)^2}{2g}$$

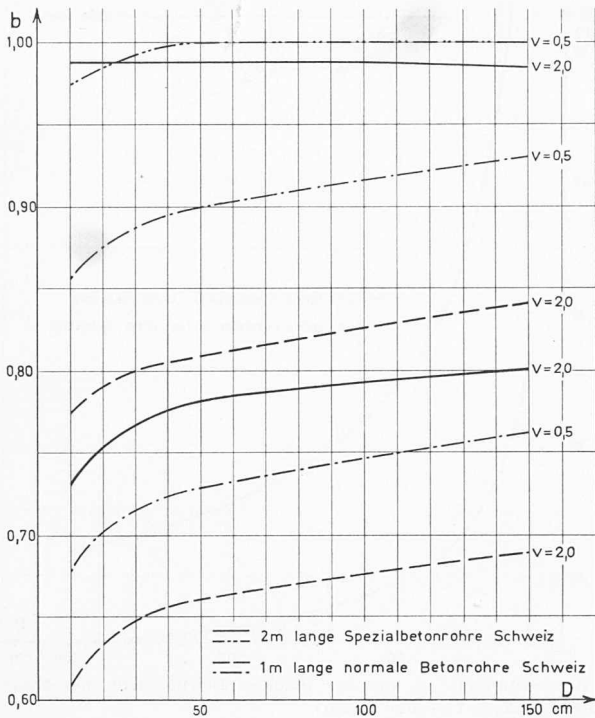


Bild 7. Tatsächliche Abminderung des idealen Rauigkeitskoeffizienten $k_{eff} = b k_{glatt}$

Analog dem Einlaufverlust gilt für plötzliche Verengungen

$$(16) \quad \Delta Z_{eV} = 0,5 \frac{(v_0 - v_u)^2}{2g} = 0,5 \frac{(\Delta v)^2}{2g}$$

Für eine Richtungsänderung der Rohraxe um den Winkel α verwenden wir den Ansatz

$$(17) \quad \Delta Z_{eK} = (1 - \cos \alpha) \frac{v^2}{2g}$$

Diese Gesetze gelten bei gleichförmigem Abflussvorgang genau. Dieser wird mit einer Einlaufstrecke von etwa $50 D$ erreicht, was in den betrachteten Fällen nicht erfüllbar ist. Trotzdem gibt ein auf den Formeln (15) bis (17) aufgebautes Resultat die effektiven Verhältnisse in brauchbarer Näherung wieder. Da wir unsere Untersuchung auf gerade, ungestörte Leitungen beschränken, setzen wir gemäss Strickler für den Reibungsverlust

$$(18) \quad \Delta Z_{eR} = \frac{v^2 \Delta l}{k^2 R^{4/3}}$$

Bei der Verschiedenheit der k -Werte nach den Bildern 2 und 3 kann die Differenz mittels der Energieverluste in den Rohrstössen erklärt werden. Dazu setzen wir

$$\Delta Z_{eRmax} = \frac{v^2 \Delta l}{k_{min}^2 R^{4/3}}, \quad \Delta Z_{eRmin} = \frac{v^2 \Delta l}{k_{max}^2 R^{4/3}},$$

$$\Delta Z_{eRmax} - \Delta Z_{eRmin} = \Delta \Delta Z_e$$

$$(19) \quad \Delta \Delta Z_e = \Delta Z_{eV} + \Delta Z_{eE} + \Delta Z_{eK} = 1,5 \frac{(\Delta v)^2}{2g} + (1 - \cos \alpha) \frac{v^2}{2g}$$

Damit die einzelnen Anteile der beiden verschiedenen Energieverlustarten, einerseits aus Querschnittsveränderungen und andererseits infolge Abweichung der Leitungsaue aus der Geraden, getrennt erfasst werden können, wurden aus den festgestellten Energieverlustunterschieden zunächst die dazu nötigen Geschwindigkeitsänderungen Δv bzw. die entsprechenden Durchmesseränderungen ΔD berechnet, wie wenn nur sie allein wirksam wären (Bild 5). Nachher wurden die dazu nötigen Abweichungen α der Leitungsaue aus der Geraden ermittelt (Bild 6), wiederum wie wenn nur sie den Energieverlust bewirkt hätten.

Bei den Leitungen aus Spezialbetonrohren liegen die berechneten Abweichungen ΔD im lichten Durchmesser zwischen 1,63 und 5,0 cm. Die entsprechenden Werte für Leitungen aus normalen Betonrohren bewegen sich zwischen 1,32

und 4,0 cm. Sie gelten für alle praktisch in Betracht fallenden Geschwindigkeiten bei beiden Rohrtypen. Die festgestellten Differenzen ΔD können neben der mangelhaften Ausbildung der Rohrstösse auch von späteren Quellungen des Dichtungsmaterials oder von Ungenauigkeiten in der Fabrikation der Rohre herrühren. Da die grösseren Abweichungen bei den Leitungen aus Spezialbetonrohren auftreten, muss ihre Verfüzung mangelhaft ausgeführt sein. Die Anwendung von Spezialmaterialien für die Ausbildung der Rohrstösse erfordert äusserste Aufmerksamkeit.

Würde die Differenz der gemessenen k -Werte nur auf den Energieverlust infolge der Abweichung a aus der ideellen Leitungsaue zurückgeführt, so müsste die Leitung die Abweichungen nach Bild 6 aufweisen. So hohe Werte kommen in der Praxis aber nicht vor. Vor allem bei den kleineren Durchmessern muss also weitaus der grösste Anteil am Energieverlust von der Ausbildung der Rohrstösse herrühren.

E. Zusammenfassung

1. Der Rauigkeitskoeffizient nach Strickler wurde an verschiedenen im Gebrauch stehenden Betonrohrleitungen ermittelt. Für Leitungen aus normalen, 1 m langen Betonrohren ergab sich

$$k = (0,61 \text{ bis } 0,93) k_{glatt}$$

für Leitungen aus 2 m langen Spezialbetonrohren (Bild 7)

$$k = (0,73 \text{ bis } 1,0) k_{glatt}$$

2. Leitungen aus 2 m langen Spezialbetonrohren können bei genauer Verlegung den Grenzwert für glatte Rohre erreichen.

3. Der entscheidende Einfluss auf die Leitungsrauigkeit kommt der Ausbildung der Rohrstösse zu. Ganz besonders gilt dies für die Anwendung von Spezialdichtungen bei kleinen Rohrdurchmessern.

4. Die vorliegenden Untersuchungen berücksichtigen nur die hydraulischen Eigenschaften von Betonrohrleitungen. Andere Forderungen, wie z. B. die Dichtheit, können ihrerseits in gewissen Fällen zu anderen Folgerungen führen.

5. An dieser Stelle weisen wir noch auf eine Analogie aus dem Flussbau hin. Für glatte Kanäle gilt der Ansatz $k = 26 \cdot d_r^{-1/6}$; wo infolge Sandbankbildung eine gewisse Welligkeit auftritt, setzt man $k = 21 \cdot d_r^{-1/6}$

Adresse des Verfassers: Karl Bättig, dipl. Ing., Sonnhalderrain 3, Lyss.

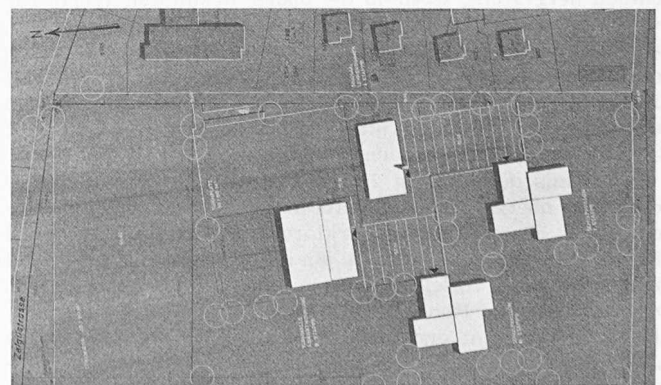
Projektwettbewerb Primarschulhaus im Engstringerquartier Schlieren

DK 727.1

Aus dem Bericht des Preisgerichtes

Innert der im Wettbewerbsprogramm auf den 1. Juni 1960, 20 Uhr, festgesetzten Eingabefrist sind zwölf Projekte eingereicht worden; sie sind in der Turnhalle «im Moos» in Schlieren ausgestellt worden.

Das Preisgericht versammelte sich Dienstag, den 28. Juni 1960. Die Vorprüfung der Projekte erfolgte durch Architekt



Lageplan 1:2500

1. Preis