Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 91 (1973)
Heft: 8: SIA-Heft, Nr. 2/1973

Artikel: Die Formel von Prandtl-Colebrook und die Kanalisationstechnik
Autor: Munz, Walter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-71811

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: 02.10.2025

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

Anfertigung der Pläne und in der Bauaufsicht besteht, nicht um eine Arbeit handelt, die nach ihrer Leistung mit dem Bau körperlich verbunden ist wie die Bauleistungen der Handwerker und Unternehmer (BGE 65 II 1). Nach seiner sozialen Stellung gegenüber dem Bauherrn erscheine der Architekt – und folgerichtig auch der Ingenieur – des mit Art. 837 und 841 ZGB beweckten Schutzes nicht oder jedenfalls nicht in dem Masse bedürftig wie der Bauhandwerker und Unternehmer. Beim Erlass der Bestimmungen über das Bauhandwerkerpfandrecht sei der Architekt und – wie man hinzufügen muss – der Ingenieur bewusst ausgeschlossen worden, eben mit Rücksicht auf seine ganz anders geartete rechtliche Stellung.

c) Schliesslich folgt aus der Auftragsqualifikation des Ingenieurvertrages meines Erachtens, dass der dem Ingenieur erteilte Auftrag auf Grund von Art. 404 Abs. 1 OR jederzeit und bedingungslos widerrufen werden kann und nur bei unzeitigem Widerruf eine Schadenersatzpflicht gemäss Art. 404 Abs. 2 OR entsteht, während der Rücktritt des Bestellers beim Werkvertrag dazu führt, dass der Unternehmer gemäss Art. 377 OR voll schadlos gehalten werden muss (BGE 96 II 192). Folglich ist der in Art. 8 der Ordnung für Arbeiten und Honorare der Bauingenieure, Ausgabe 1969, für den Fall des Rücktritts des Auftraggebers vorgesehene Zuschlag von 15%, weil gegen Art. 404 Abs. 1 OR verstossend, ungültig *(Gautschi,* Art. 404 N 10 a und b sowie Vorbemerkung zu Art. 363—379 OR, N 5; Kassationsgericht St. Gallen in SJZ 42 Nr. 73 S. 187). Es sei nicht verschwiegen, dass diese Ansicht ihre Gegner hat. So hat z.B. *Stiffler* (Schweizerische Bauzeitung, *84* [1966], H. 28 S. 520–522) behauptet, die entsprechenden Zuschlagsklauseln der SIA-Honorarordnung seien nicht als Zuschlag im Sinne einer Konventionalstrafe gemeint, sondern stellten vielmehr eine Pauschalierung des erfahrungsgemäss immer schwer zu berechnenden Schadenersatzes dar. *Ruppert* weist darauf hin, dass es sich beim Ingenieurvertrag – was hier abgelehnt wurde – um einen Vertrag «sui generis» handle, bei dem der Zuschlag von 15% zulässig sei (Zum Widerruf des Bauherrn beim Architektenvertrag und dessen Folgen, SJZ 66 S. 284 ff.) *Reber* (Rechtshandbuch für Bauunternehmer, Bauherr und Architekt, S. 158) pflichtet der Ansicht Stifflers bei, derzufolge eine Pauschalierung des Schadenersatzes wegen des Rücktritts durch den Bauherrn vorliege. All diese Versuche aber, die Zuschlagsklauseln zu retten, vermögen nicht zu überzeugen. Einmal nämlich ist der Architektenvertrag ein Auftrag, kein Vertrag «sui generis», und sodann kann beim Architektenvertrag so wenig wie bei anderen Vertragstypen ein schützenswertes Interesse an einer Pauschalierung von Schadenersatz anerkannt werden. Es muss genügen, dass Art. 404 Abs. 2 OR dem Ingenieur einen Schadenersatzanspruch bei unzeitigem Widerruf gewährt, in welchem Falle es dem Ingenieur in aller Regel auch möglich sein wird, seinen Schaden zu beziffern. Das Schulbeispiel für einen unzeitigen Auftragswiderruf ist ja der Tatbestand, wo der Ingenieur im Hinblick auf einen speziellen Auftrag etwa qualifiziertes Personal angestellt, zusätzliche Büroräume gemietet hat und dergleichen. Hier dürfte es kaum je Schwierigkeiten bereiten, den dem Ingenieur entstandenen Schaden nachzuweisen. Sein Verdienstinteresse allein kann so wenig geschützt sein wie dasjenige des Arztes oder Anwaltes.

Adresse des Verfassers: Dr. iur. *Georg Aschwanden,* Rechtsanwalt, Claridenstrasse 36, 8002 Zürich.

Die Formel von Prandtl-Colebrook und die Kanalisationstechnik

DK 628.223

Von **W. Munz,** Dübendorf

Ein Grundproblem der Hydraulik ist die Berechnung des Schluckvermögens einer geraden Rohrleitung. In der Kanalisationstechnik wird diese Aufgabe mit Hilfe der sog. Stricklerschen Gleichung gelöst:

$$Q = F \cdot k_{St} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

(mit F = Querschnittsfläche, R = hydraulischer Radius, J = Gefälle, k_{St} = Rauhigkeit nach Strickler),

die von *Gauckler* und *Manning* entwickelt worden war. Eine ähnliche Potenzformel entwickelten *Chezy, Ganguillet* und *Kutter.*

Eine Reihe von Strömungsforschern (u. a. *Prandtl, Nikuradse* und *Colebrook*) lösten das Problem dann auf dem Boden der Wissenschaft, während die bisherigen Formeln auf reiner Empirie beruhten. Die Formel von Prandtl-Colebrook lautet:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \left[-2 \lg \left(\frac{2.51\,\nu}{\varnothing \sqrt{2g \cdot J \cdot d}} + \frac{k}{3.71\,d} \right) \right] \cdot \cdot \sqrt{2g \cdot J \cdot d}$$

worin k = Rauhigkeitsbeiwert nach Prandtl-Colebrook, $N\nu$ = kinetische Zähigkeit, d = Rohrdurchmesser.

Wenngleich an der theoretischen Überlegenheit dieser Formel keinesfalls gezweifelt werden soll, so überlegt sich der Praktiker doch zuerst, ob der Ersatz einer so einfachen Formel (Strickler) durch eine so komplizierte auch den erwarteten Gewinn bringe. Ganz am Rande sei noch darauf hingewiesen, dass die in der Kanalisationstechnik vorkommenden Fälle alle in den Bereich zwischen glatten und rauhen Rohren fallen, wo die Berechnungen nach Nikuradse und Colebrook erheblich divergieren.

1. Schluckvermögen

Wozu dient die Berechnung des Abflussvermögens oder Schluckvermögens in der Kanalisationstechnik? Diese im ersten Moment überflüssig scheinende Frage weist auf ein von den Strömungsforschern nicht beachtetes Problem,

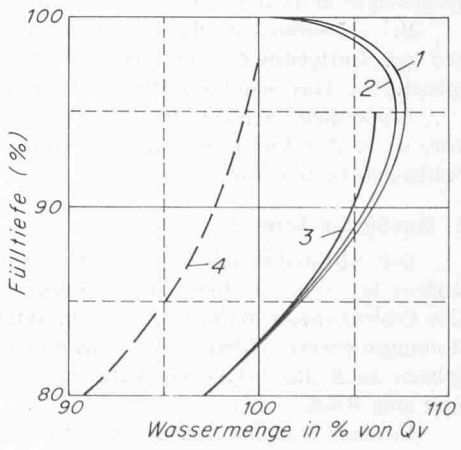

Bild 1. Teilfüllungskurven im oberen Bereich (nach [1])
1 Strickler
2 Prandtl-Colebrook
3 Sauerbrey
4 Thormann

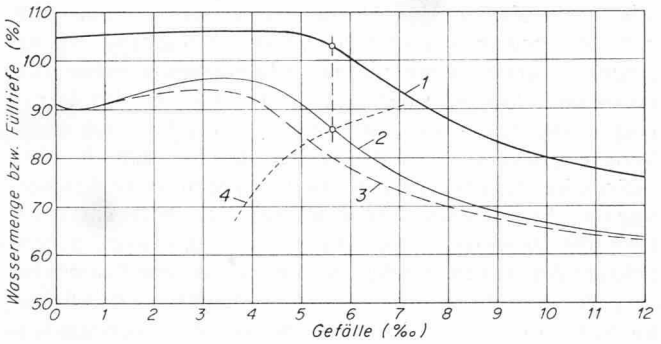

Bild 2. Umschlagspunkt in der Versuchsanlage mit Schächten (nach [1])

1 Dabei erreichte Wassermenge (Zuschlagen) in % von Q_v
2 Fülltiefe, die beim Zuschlagen erreicht wird (in % der Fülltiefe bei Q_v)
3 Fülltiefe, bei der die Leitung aufschlägt (in % der Fülltiefe bei Q_v)
4 Grenzlinie Strömen-Schiessen

zu Recht nicht beachtet, denn ihnen ging es um die Untersuchung von Rohren unter Druck, während bei der Kanalisation meist ein Abfluss mit freiem Wasserspiegel vorliegt und erst im Extremfall ein ganz gefülltes Rohr. Damit stossen wir auf die Diskrepanz zwischen Schluckvermögen und Abfluss bei voller Füllung Q_V. In jüngster Zeit hat sich vor allem *Sauerbrey* [1] mit dem Problem der Teilfüllung beschäftigt und dabei die Theorie von *Thormann* [2] widerlegt, die besagt, dass Schluckvermögen und Q_V identisch seien. So zeigt Bild 1, wie bei einer Teilfüllung von über 80 % der Wassertiefe Q_V überschritten wird, sowohl nach Theorie (Kurven 1, 2, 3) als auch nach den praktischen Versuchen von *Sauerbrey* (Streuung rund $\pm$ 2 %).

Ob allerdings diese hohen Werte erreicht werden, ist nicht sicher. Denn die erschwerte Luftzuführung bei höheren Füllungsgraden erzeugt unstabile Fliesszustände, die ein Zuschlagen der Leitung bewirken.

Bild 2 zeigt die Abhängigkeit der Fülltiefe, bei der der Kanal bei steigender Wassermenge zuschlägt (und bei der er bei sinkender Wassermenge wieder aufschlägt), in Abhängigkeit des Gefälles sowie die dazugehörigen Wassermengen. Bei Gefällen über 6 ‰ ist also keine Wassermenge über Q_v mehr zu erwarten. Wie gross das Schluckvermögen unter diesen Umständen ist, geht aus [1] nicht hervor.

Dazu kommt, dass bei grösseren Gefällen der Fliesswechsel vom Schiessen zum Strömen bei diesen Wasserspiegellagen eintreten kann [3, Diagramm IV 3].

Bei grösseren Gefällen bildet sich in Freispiegelleitungen ein Luftgemisch, das mehr Querschnittsfläche beansprucht [6]. Das Schluckvermögen wird dadurch verringert.

Ausserdem liegt in der Praxis selten Normalabfluss vor, d. h. das Energieliniengefälle stimmt nicht mit dem Sohlengefälle überein [1].

2. Rauhigkeitsbeiwert

Die Abflussformeln ergeben den Normalabfluss eines Rohres bei voller Füllung in Funktion der Wandreibung. Die Grösse dieser Reibung wird charakterisiert durch den Reibungsbeiwert. Neben der momentanen Wandrauhigkeit spielen auch die möglichen Veränderungen im Laufe der Zeit eine Rolle.

In einer Kanalisationsleitung sind aber neben der Reibung noch weitere Energieverluste zu verzeichnen: infolge Unebenheiten bei Rohrstössen, Liegenschaften- und Strassenanschlüssen, Kontrollschächten mit Erweiterung der Durchflussrinne über dem Bankett [1]), Kanalerweiterungen, Richtungsänderungen, Absätzen, Kanalvereinigungen, Sonderschächten und schliesslich infolge von Ablagerungen (Querschnittsveränderung und Rauhigkeitsänderung). Für die Formelrechnung werden auch diese in den Reibungsverlust einbezogen, indem der Beiwert der Rohrrauhigkeit vermindert und dadurch zum Beiwert der *Leitungs-* oder *Betriebsrauhigkeit* wird. Wenn die Dimension der Rauhigkeit als Grösse der mittleren Erhebung in mm bei der Materialrauhigkeit noch einen Sinn hat, so verliert sie diesen beim Katalog der übrigen Beeinträchtigungen weitgehend. Durch diese Begriffserweiterung wird der Boden der Wissenschaftlichkeit verlassen.

Handle es sich um die Betriebsrauhigkeit k_b nach Prandtl-Colebrook oder um den analogen Wert k_{St} nach Strickler – wir sind auf eine Schätzung angewiesen. Um diese Schätzung zu erleichtern bzw. zu ersetzen, wurden in den ATV-Richtlinien [8] für zwei «Kanalarten» (Sammelkanäle einerseits und gerade, schachtfreie Sonderstrecken wie Drosselstrecken andrerseits) und zwei «Ausführungsarten» (übliche einerseits und glättere Rohrwandungen mit besonders sorgfältiger Ausführung der Verlegung andrerseits) insgesamt vier Betriebsrauhigkeiten angegeben.

Werden die vier Kategorien für mittlere Gefälle und Durchmesser (6 ‰, Durchmesser 70 cm) verglichen, so ergibt sich zwischen den beiden Kanalarten ein Unterschied von 5 %, zwischen den beiden Ausführungsarten ein solcher von 16 %.

Da man bei Prandtl-Colebrook auf Tabellenwerte angewiesen ist, die keine Zwischenwerte aufführen, muss man zwischen diesen Kategorien wählen, die Abstände von 5 %, 11 % und 5 % aufweisen. Das ist praktisch kein Nachteil, zählt jedoch als Argument gegen die Überbetonung der Genauigkeit.

Wenn für den Stricklerschen Rauhigkeitsbeiwert Richtwerte angegeben werden müssten, so müsste ebenfalls nach der Kanalart unterschieden werden: auf der einen Seite die üblichen Sammelleitungen, auf der anderen Seite z. B. die gerade Drosselstrecke ohne Anschlüsse mit hydraulischer Detailberechnung und Verbindungsleitungen ausserhalb Baugebiet. Erhöhte Glätte (Eternit, Kunststoff) und grössere Sorgfalt bei der Erstellung der Leitung würden noch einen weiteren Zuschlag erlauben. Wenn bei der *generellen* Bemessung (generelles Kanalisationsprojekt, GKP) die Sohlenabsätze bei Kalibervergrösserungen vernachlässigt und dadurch zu grosse Gefälle angenommen werden (5 cm auf 50 m ergeben 1 ‰), kann dies durch eine grosszügige Durchmesserwahl berücksichtigt werden. Beim Bauprojekt ist ohnehin eine Neuberechnung mit genauen Sohlenkoten notwendig.

Die bisher in der Schweiz üblichen Werte [3] weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit den ATV-Richtlinien auf. Es wäre sehr zu wünschen, dass solche Richtwerte in die in Ausarbeitung begriffene SIA-Rohrnorm aufgenommen würden.

3. Genauigkeit der Durchmesserbestimmung

Wenn eine Methode durch eine andere verdrängt wird, so kann dies zwei Gründe haben. Entweder ist die neue Methode genauer bzw. es zeigt sich, dass die alte falsche, untragbare Ergebnisse lieferte, oder die Anwendung der neuen Methode ist viel praktischer, weniger aufwendig und vielseitiger.

[1]) *Liebmann* [4] gibt für Normalschächte in 50 m Abstand eine Leistungsverringerung von 4 bis 5 % an (3 % bei Schächten mit Bankett auf Scheitelhöhe).

Das letztere wird bei Prandtl-Colebrook angesichts des notwendigen Tabellenwerks (z. B. *Lautrich* [5]: 263 Seiten für Abflussvermögen) wohl kaum behauptet werden. So muss es also an der Genauigkeit liegen, woran wir keineswegs zweifeln. Hingegen ist jetzt zu entscheiden, wo die einfachere Strickler-Methode untragbare Resultate liefert.

Zur Feststellung der Abweichungen der Potenzformel mit $\sqrt{J}$ wurden für einige Durchmesser und Gefälle für die vier k_b der ATV-Richtlinien jeweils die Werte $Q_{1‰} = Q/\sqrt{J}$ ausgerechnet und in Tabelle 1 zusammengestellt. Nach Strickler ergibt sich für alle Gefälle J derselbe Wert $Q_{1‰}$, der für die Dimensionierung verwendet werden kann, indem er nur noch mit $\sqrt{J}$ multipliziert werden muss. Die sich nach Prandtl-Colebrook ergebenden Abweichungen der extremen Werte bei 1 ‰ und 16 ‰ vom Mittelwert (bei etwa 6 ‰) sind zum Vergleich aufgetragen. Für die Kategorien «übliche Bemessung» liegen sie durchwegs unter 1 %, bei «besonderer Sorgfalt» ergeben sich bis 2 %. Wir halten diesen methodischen Fehler für tragbar.

Ein zweiter «systematischer» Fehler ergibt sich bei der Anwendung eines für alle Durchmesser konstanten Rauhigkeitswertes bei Strickler. In der letzten Kolonne sind die k_{St}-Werte aufgeführt, die dieselben Abflussmengen (Mittelwert bei 6 ‰) ergeben wie die genaue Berechnung. Danach müsste der Rauhigkeitsbeiwert mit dem Durchmesser veränderlich angenommen werden, was auch *Kropf* schon vorgeschlagen hat. Demgegenüber wurde geltend gemacht, dass bei grösseren Rohren bei der Fugenausbildung eine grössere Sorgfalt angewendet werden kann, was den theoretischen Nachteil wieder ausgleicht.

Diese theoretischen Fehler von höchstens einigen Prozenten könnten jedoch nur in Erscheinung treten, wenn die wahre Rauhigkeit bekannt wäre. Den wirklichen Fehler machen wir bei der Annahme des Beiwertes, sei es nun nach Strickler oder nach Prandtl-Colebrook. Man denke auch daran, dass der Beiwert sich im Laufe der Jahre um mehr als 10 % verändern kann. Die Abweichung vom wirklichen Beiwert ist jedoch nicht nur ein Fehler, sondern stellt auch die bewusste Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors dar. Bei Drosselstrecken, wo die Abflussmenge möglichst genau eingehalten werden soll, ist eine Sicherheit allerdings nicht am Platz.

Am Rande sei noch bemerkt, dass der Sprung von einem auf den nächstgrösseren lieferbaren Durchmesser eine Kapazitätsvergrösserung von 32 bis 62 % bewirkt, die nicht immer durch eine Gefällverminderung auf die gewünschte Kapazität reduziert werden kann.

4. Genauigkeit der zu schluckenden Wassermenge

Für die Würdigung des Gesichtspunktes der Genauigkeit darf die Kanalbemessung nicht isoliert betrachtet werden. Sie ist das letzte Glied einer Kette von Entscheidungen, die schliesslich die finanziellen Aufwendungen für die Entwässerung zur Folge haben. Vorher muss die abzuleitende Wassermenge berechnet werden. Dies geschieht entweder nach der Fläche oder der Einwohnerzahl bei Vollausbau:

$$Q_{max} = r_{max} \cdot \psi s \cdot F + QTW$$

worin F = Fläche des Baugebietes in 50 (?) Jahren, ψs = Abflussbeiwert, r_{max} = Regenspende, die im Mittel alle zehn (oder fünf) Jahre einmal überschritten wird; oder

$$Q_{max} = \text{Vielfaches des Trockenwetteranfalles } QTW = sp \cdot jqtw \cdot E$$

worin sp = Verhältnis Spitzenanfall/Jahresmittel, $jqtw$ = Schmutzwasseranfall pro Einwohner im Jahresmittel, E = Einwohner + Industriegleichwerte in 50 (?) Jahren.

Tabelle 1. Vergleichswerte nach Prandtl-Colebrock

		Werte $Q_{1‰} = Q/\sqrt{J}$ für verschiedene k_b, J und d				△ [1] Abweichungen	k_{St} [2] nach Strickler
k_b	d	$J = 1$ ‰	4 ‰	9 ‰	16 ‰	± %	
0,25	30	*)	38,2	38,7	39,0	2,2	96,6
0,25	60	*)	237	239	239	1,5	94,4
0,25	120	1434	1453	1460	1464	1,0	91,0
0,40	30	*)	36,5	36,7	37,0	1,6	92,0
0,40	60	*)	226	227	288	1,1	89,9
0,40	120	1377	1390	1395	1397	0,7	87,0
1,00	30	32,3	32,7	32,8	32,8	0,8	82,3
1,00	60	203	204	204	205	0,5	81,0
1,00	120	1255	1260	1262	1263	0,3	78,8
1,50	30	30,7	30,9	31,0	31,0	0,5	77,8
1,50	60	193	193	194	194	0,3	76,8
1,50	120	1197	1201	1203	1203	0,2	75,1

*) $v < 1$ m/s (Bedingung für $k_b = 0{,}25$ und 0,40 nach ATV-Richtlinien nicht erfüllt).

[1]) Abweichungen △ vom Mittelwert ($J = 6‰$) in % (innerhalb der Werte der vorstehenden vier Kolonnen).

[2]) k_{St}-Werte, die nach Strickler ebenfalls den Mittelwert ergeben.

Auch wenn man von den entwicklungspolitischen Faktoren (Fläche, Einwohnerzahl) absieht, bleibt in den übrigen noch genügend Unsicherheit in den Annahmen. Der Abflussbeiwert ist ein sehr unvollkommenes Hilfsmittel, um die komplexen Vorgänge bei der Abflussbildung zu erfassen. Er wäre eher als administrativer Nennwert zu bezeichnen, damit alle Projekte auf ähnlicher Basis aufgebaut werden. Eine Überprüfung ist deshalb erschwert, weil es ohne weiteres 30 Jahre gehen kann, bis der Berechnungsregen einmal fällt.

Sind die Regenspitzen nicht mehr im Kanal (Verbindungsleitungen ausserhalb Baugebiet), so sind die Schwankungen nicht mehr so gross. Immerhin variiert auch der mittlere jährliche Wasserverbrauch nach der Statistik der schweizerischen Gas- und Wasserfachmänner noch von 150 bis 500 l pro Kopf und Tag bei den einzelnen Versorgungsbetrieben, wenn wir die Extremwerte weglassen und von der Industrie absehen.

Auch ohne die Anführung von konkreten Zahlen ist es klar geworden, dass es nicht auf die paar Prozente Ungenauigkeit bei der Kanalbemessung ankommt. Andrerseits soll auch nicht die Flinte ins Korn geworfen und auf jede Berechnung verzichtet werden. Die einzelnen Faktoren können durchaus vertretbar angenommen werden, nur muss man sich der Grössenordnung der Unsicherheit immer klar bewusst sein.

Bei Druckleitungen ist die Berechnung der Wassermenge nicht genauer, doch steht dort die Übereinstimmung mit der einmal gewählten Fördermenge der Pumpe im Vordergrund.

5. Vorteile der Stricklerschen Abflussformel

Den geringen Abweichungen bei extremen Werten von Gefälle und Durchmesser, die aber durch die Bedeutung der Wahl des Rauhigkeitsbeiwerts bei weitem überdeckt werden, stehen bei der Methode nach Strickler wesentliche praktische Vorteile gegenüber.

Während für die Bemessung nach Prandtl-Colebrook ein umfangreiches Tabellenwerk erforderlich ist (wenn die Parameterabstände am Tabellenkopf nicht zu gross werden sollen), genügt je Rauhigkeitskategorie ein J/Q-Diagramm

nach Strickler, auf dem k_{St} auch sehr leicht mit dem Durchmesser variiert werden kann. Wird ein Leiternomogramm verwendet [3], so finden sogar zwei Kategorien auf demselben Blatt Platz. Besonders empfehlenswert ist aber die Berechnung mit $Q_{1‰}$. Wenn diese Werte (eine Zahl je Durchmesser und k-Wert) auf der Rückseite des Rechenschiebers notiert werden, wird für die Bemessung kein weiteres Hilfsmittel mehr benötigt: $Q = Q_{1‰} \cdot \sqrt{J}$ (J in ‰).

Die Stricklersche Formel gilt für alle offenen und geschlossenen Profilformen. In letzter Zeit sind auch Umrechnungstafeln erstellt worden, die gestatten, gewisse Spezialprofile auf Kreiswerte umzurechnen [5].

Dank ihrer einfachen mathematischen Form eignet sich die Potenzformel zur algebraischen Verwendung für hydraulische Probleme aller Art: Verhältnisse bei kritischem Abfluss (Grenztiefe), Staukurvenberechnung im Kreisprofil [6] usw. Bei der Berechnung von Druckleitungen erfolgt die Bestimmung des Reibungsverlustes in der dort üblichen Form

$$\Delta Z_e = \frac{L}{k_{St}^2} \cdot \frac{2g \cdot 4^{4/3}}{d^{4/3}} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

wobei der zweite Faktor in Funktion des Durchmessers tabelliert werden kann [3]. Bei Optimierungsrechnungen könnte zwar auch die kompliziertere Form nach Prandtl-Colebrook einprogrammiert werden, doch ist dieser Drang nach Perfektion fehl am Platze, wenn (um ein Beispiel zu nennen) andrerseits Pumpwerksbaukosten unabhängig von der Bautiefe, nur abhängig von Q eingesetzt werden [7].

Die Stricklersche Formel stimmt auch mit dem Modellgesetz von Froude überein.

6. Anders geartete Fragestellung in der Kanalisationstechnik

Oft werden Appelle zugunsten der Prandtl-Colebrook-Formel mit dem Hinweis untermauert, sie sei heute die einzige wissenschaftlich überall anerkannte Methode. Wenn man da nicht mitmacht, kommt man sich als Hinterwäldler vor. Wie die obigen Ausführungen zeigen, kann man aber auch mit guten Gründen eine einfachere Methode vorziehen. Denn nicht überall sind die Grundlagen gegeben, die zu einer wissenschaftlichen Behandlung des Problems führen müssen. Es besteht z. B. ein prinzipieller Unterschied zwischen den industriellen Betrieben, wo ein Entscheidungsgremium die Kapazität einer Anlage festlegt, und denjenigen, wo eine natürlich gegebene (Regen) oder andere vom Zufall abhängige Grössen verarbeitet werden müssen. Während die Leitungen bei den ersten relativ genau bemessen werden können, liegen bei den zweiten eigentlich stochastische Werte vor (bei denen die Wahrscheinlichkeitsrechnung die Hauptrolle spielt), die als (etwas wackelige) Grundlage für weitere Berechnung dienen müssen.

7. Zusammenfassung

- Die Kanalberechnung ist eine Kombination von Wahrscheinlichkeitserwägungen mit deterministischen Berechnungsmethoden.
- Dem Kanalbau werden die Besiedlungsverhältnisse bei «Vollausbau» des Gebietes, in einigen Jahrzehnten, zugrundegelegt mit allen Unsicherheiten der Entwicklungsprognosen.
- Die Ermittlung der zu schluckenden Wassermenge Q aus der Grösse des Einzugsgebietes bzw. der Einwohnerzahl ist eine äusserst unsichere «Berechnung» auf Grund stochastischer Grössen (Regenanfall und Wasserverbrauch) mit gewählter mittlerer Häufigkeit der Überschreitung.
- Die für Prandtl-Colebrook in Anspruch genommene strömungstechnische theoretische Richtigkeit gilt nur für Kreisprofile mit voller Füllung. Kanalisationen werden aber als Freispiegelleitungen betrieben. Hier wie auch bei den für grössere Querschnitte häufigen Sonderprofilen muss die Theorie angepasst werden.
- Die bei der Bemessung von Kanalisationsleitungen übliche Annahme des Normalabflusses ist selten erfüllt, stellt aber eine brauchbare Näherung dar.
- In beinahe voll gefüllten Rohren ist der (strömende) Abfluss wegen geringerer Reibung einige Prozente grösser als bei voller Füllung.
- Bei schwach schiessendem Abfluss liegt der Übergang zwischen Schiessen und Strömen nahe bei voller Füllung. Es kommt zu Pulsierungen, die zu einem plötzlichen Zuschlagen der Leitung führen. Über diese Verhältnisse sind Untersuchungen an der VAW im Gange.
- Bei stark schiessendem Abfluss bewirkt die Luftaufnahme des Wassers eine Verminderung des Schluckvermögens.
- Den Haupteinfluss auf die Genauigkeit der Berechnung hat – unabhängig von der gewählten Methode – die Annahme des Rauhigkeitsbeiwertes. Die Abweichungen von der idealen Leitungsführung (gerade, ohne Absätze usw.), allfällige Ablagerungen und die Alterung bedingen einen Zuschlag, der von der Rohrrauhigkeit zur Leitungs- oder Betriebsrauhigkeit führt.
- Bei der Wahl des k-Wertes (Leitungsrauhigkeit) ist zu unterscheiden, ob es sich um übliche Sammelleitungen handelt oder um Sonderfälle wie Drosselstrecken (Geraden ohne Anschlüsse und Schächte) und Druckleitungen, bei denen die hydraulischen Verluste im Detail berücksichtigt werden. Der Einbau besonders reibungsarmer Leitungen (Eternit, Kunststoff) rechtfertigt einen erhöhten k-Wert. Die Angabe von Richtwerten für diese Kategorien wäre zu begrüssen.
- Ein Vorteil der Methode Strickler liegt in der einfachen Handhabung für die Bemessung der Kanäle: ein Diagramm oder der Rechenschieber allein genügen im Gegensatz zum Prandtl-Colebrookschen Tabellenbuch.
- Ein weiterer Vorteil liegt in der mathematisch einfachen Form der Formel von Strickler, die die Anwendung für Spezialfälle und die algebraische Verwendung für weitere hydraulische Probleme gestattet.

All diese Punkte sprechen gegen eine generelle Übernahme der Methode Prandtl-Colebrook in der Kanalisationstechnik, wo die Projektierungsverhältnisse eben ganz anders liegen als in Industrieanlagen oder Wasserkraftanlagen.

Literaturverzeichnis

[1] *Sauerbrey, Manfred:* Abfluss in Entwässerungsleitungen. Reihe Wasser und Abwasser Nr. 1, Erich-Schmidt-Verlag, Bielefeld, 1969.

[2] *Thormann, Erich:* Füllhöhenkurven von Entwässerungsleitungen. «Gesundheits-Ing.» *67* (1944).

[3] *Munz, Walter:* Abwasser, ein Lehrmittel. Lehrmittelverlag Juventus, Zürich, 3. Auflage, 1972.

[4] *Liebmann, Horst:* Der Einfluss von Einsteigschächten. Reihe Wasser und Abwasser Nr. 2, Erich-Schmidt-Verlag, Bielefeld, 1970.

[5] *Lautrich, Rudolf:* Tabellen und Tafeln zur hydraulischen Berechnung. Verlag Wasser und Boden, Hamburg, 1969.

[6] *Hörler, Arnold:* Gefällswechsel in der Kanalisationstechnik. «Schweiz. Z. Hydrol.» 1967, Fasc. 2.

[7] *Meier, Peter M.:* Möglichkeiten zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung von Zweckverbänden. Reihe Wasser und Abwasser Nr. 4, 1972, Erich-Schmidt-Verlag, Bielefeld.

[8] ATV-Richtlinien, aufgeführt in [5].

Adresse des Verfassers: *Walter Munz,* dipl. Ing. ETH, EAWAG, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz an der ETH, 8600 Dübendorf, Überlandstrasse 133.