



Wrijvingsverliezen in buizen bij eenparige beweging

Inleiding

De voordracht blijft beperkt tot de eenparige beweging, omdat bij de berekening van geheel gevulde buizen in het algemeen het waterleidingnet of rioleringsstelsel verantwoord en duidelijk in eenparige bewegingsonderdelen gesplitst kan worden, terwijl netten met gedeeltelijk gevulde buizen, afgezien van gedeelten waar watersprongen voorkomen, praktisch altijd systemen zijn van semi-eenparige beweging, waarvan de berekening wederom kan geschieden op basis van de eenparige beweging.

Verder zal met het oog op de praktijk alleen aan eenparige beweging bij turbulente stroming aandacht gegeven worden; om de gedachten te bepalen voor getallen van Reynolds met de hydraulische straal als maatgevende lengte, groter dan circa 2000 (zie afb. 1).

In verband met de beknoptheid van de voordracht wordt slechts aandacht geschonken aan de vijf volgende onderwerpen:

Het eerste onderwerp, theoretisch-empirisch getint, behelst de vraag: Is er op het ogenblik niet eindelijk uit de grote hoeveelheid formules voor de stromingstoestand bij eenparige beweging een favoriete formule aan te wijzen voor geheel gevulde buizen?

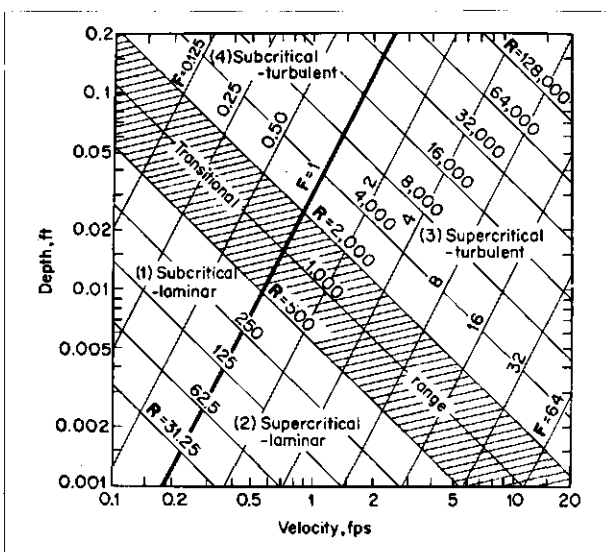
Onderwerp 2 vormt de vraag: Hoe staat het met formules in deze zin voor gedeeltelijk gevulde buizen?

Onderwerp 3 houdt zich bezig met de vraag of er reeds iets verstandigs te zeggen valt over de invloed van voegen bij buizen en overige storingen, bij controleputten, bijvoorbeeld.

Onderwerp 4 stelt als probleem: Is er iets zinnigs te zeggen over de toename in de tijd van de wandruwheid van de buizen?

Onderwerp 5: Vervuiling van buizen vernietigt het effect van alle nauwkeurig opgezette capaciteits- of debietberekeningen.

Afb. 1



AUTEUR	FORMULE	NOG VEEL GEBRUIKT IN
HANNING	$J = \frac{\bar{v}^2 \bar{v}^{-2}}{R^{4/3}}$	ENGLS SPREKENDE GEBIEDEN
HAZEN-WILLIAMS	$J = \frac{\bar{v}^{1.48} \cdot 0.001^{0.07V}}{R^{1.17} C_w^2}$	V.S.
CHEZY	$J = \frac{\bar{v}^2}{R} \cdot \frac{1}{C^2}$	-
BAZIN	$J = \frac{\bar{v}^2}{R} \cdot \left(\frac{n + \sqrt{R}}{87\sqrt{R}} \right)^2$	FRANKRIJK
KUTTER (1)	$J = \frac{\bar{v}^2}{R} \cdot \left\{ \frac{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{J} \right) \frac{n}{\sqrt{R}}}{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{J}} \right\}^2$	-
KUTTER (2)	$J = \frac{\bar{v}^2}{R} \cdot \left(\frac{n + \sqrt{R}}{100\sqrt{R}} \right)^2$	V.S. en DUITSLAND
PRANDTL-COLEBROOK	$J = \frac{\bar{v}^2}{R} \cdot \frac{1}{D^{.25} \left[2 \log \left(\frac{25.1 \cdot \bar{v}}{\bar{v} D \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{K}{3.7D} \right) \right]^2}$	-

Afb. 2

Wat zijn parameters en is er een zekere ondergrens aan te wijzen waar men boven moet blijven om hinderlijke vervuiling te voorkomen?

1. De kwestie van de favoriete formule bij geheel gevulde buizen

Het doet enigszins onbegrijpelijk aan, dat er nog zoveel formules zijn voor het bepalen van het benodigde energielijnverhang, terwijl er één is, die duidelijk kwalitatief beter is; bedoeld is natuurlijk de formule van Prandtl-Colebrook.

Afb. 2 toont enkele van de meest bekende en meest toegepaste formules.

Er zijn er echter nog een heleboel meer.

Met een variatie op de uitspraak van de Nieuw Zeelander Schneckenberg met betrekking tot watergangen, met turbulent stromend water en sediment-transport in alluviale gronden, moet een goede formule voor eenparige beweging de volgende parameters in zich bergen:

- het oppervlak van de natte doorsnede
 - de gemiddelde snelheid
 - de grootste snelheid aan het wateroppervlak
 - de natte omtrek
 - de hydraulische straal
 - een coëfficiënt, die maatgevend is voor de wandruwheid
 - de belasting aan gesuspendeerde sedimentstoffen
 - de belasting aan in beweging zijnd bodemmateriaal
 - de kinematische viscositeit van de vloeistof
 - de temperatuur van de vloeistof
- en bij gedeeltelijk gevulde buizen komen daar nog bij als parameters:
- de grootste waterdiepte in het profiel
 - het verhang van het wateroppervlak

In de formule van Prandtl-Colebrook is het overgrote deel van deze factoren inderdaad als aparte parameters in de formule aanwezig.

Andere zijn indirect aanwezig, zoals de temperatuur die in de kinematische viscositeitscoëfficiënt tot uiting komt. De sedimentbelasting kan eventueel ook in de kinematische viscositeitscoëfficiënt tot uiting worden gebracht.

Prof. Huisman geeft bv. in zijn boek „Stromingsweerstand in leidingen” op, dat de kinematische viscositeitscoëfficiënt van huishoudelijk afvalwater bij een temperatuur van $t=^{\circ}\text{C}$ gelijk zou zijn aan die van schoon water bij een temperatuur van $t-6^{\circ}\text{C}$.

Wel ontbreekt in de formule van Prandtl-Colebrook een factor voor de vorm van de natte doorsnede, waarschijnlijk omdat de metingen voor de formule van Prandtl-Colebrook in eerste instantie alleen hebben plaatsgehad bij ronde buizen.

Hier wordt later nog op teruggekomen.

Zoals gezegd is de formule van Prandtl-Colebrook speciaal ontstaan uit metingen voor geheel gevulde buizen, terwijl de vorm van de andere formules voornamelijk is voortgekomen uit metingen aan open leidingen en deze formules met of zonder wijziging zijn overgenomen voor geheel gevulde buizen.

Bij de andere formules wordt de coëfficiënt C , n , k , C_w etc. slechts alléén of in hoge mate bepaald door de gemeten of aangenomen wandruwheid.

Het persisteren van het gebruik van wat met betrekking tot geheel gevulde buizen, de verouderde formules genoemd zouden kunnen worden, is waarschijnlijk te wijten aan: de grote marge van veiligheid die in de projecten wordt gehanteerd, het gebrek aan controlemetingen in de praktijk, traditie en de in het algemeen eenvoudige vorm van de formules.

Deze laatste reden mag echter in het huidige tijdperk waar computer en „time-sharing” ons ter beschikking staan geen argument tot handhaving van de verouderde formules zijn.

Daarenboven kan het toepassen en vooral het klakkeloos toepassen van de niet-Prandtl-Colebrook-formules gevaren met zich meebrengen.

Afb. 5

Buis-materiaal	Buis-diam.	Verhang	Debiet	Berekend debiet t.o.v. Prandtl-Colebrook	Debiet afwijking t.o.v. Prandtl-Colebrook	λ in formule Prandtl-Colebrook	Wand-ruwheid K	Relatieve wand-ruwheid "K-ruw"	Manning $1/n$	Chezy C
	(mm)	(o/oo)	(l/sec)				(mm)	(mm)		
BETON	Ø 1000	3	1352	100%	0	0.0199	1.000	1.050	79	63
	Ø 150	0.01	0.43	100%	0	0.0500	1.000	3.232	68.8	39.8
	Ø 150	0.01	0.494	115%	+ 15 %	--	--	--	79	--
	Ø 150	0.01	0.68	158%	+ 58 %	--	--	--	--	63
ASBEST-CEMENT	Ø 1000	3	1801	100%	0	0.0112	0.02	0.07	106	84
	Ø 150	0.01	0.46	100%	0	0.0437	0.02	2.252	73.6	42.6
	Ø 150	0.01	0.67	146%	+ 46 %	--	--	--	106	--
	Ø 150	0.01	0.91	197%	+ 97%	--	--	--	--	84

DIAMETER 100,00 CM RUWHEID 1,00 MM		Q	LAMBDA	KRUW MM
I	Q	Q		
0/00	L/SEC	M ³ /U		
0.01	72,58	261,29	TECHN, RUW, 0,0230	1,864
0.03	129,32	465,57	TECHN, RUW, 0,0217	1,499
0.10	241,04	867,75	TECHN, RUW, 0,0208	1,273
0.30	427,48	1520,91	TECHN, RUW, 0,0203	1,158
1.00	777,41	2798,68	TECHN, RUW, 0,0200	1,088
3.00	1352,18	4867,83	TECHN, RUW, 0,0199	1,050
10.00	2475,29	8911,04	HYDR, RUW, 0,0198	1,027
30.00	4293,25	15455,69	HYDR, RUW, 0,0197	1,016
100.00	7849,10	28242,35	HYDR, RUW, 0,0197	1,005

Afb. 3

DIAMETER 15,00 CM RUWHEID 1,00 MM		Q	LAMBDA	KRUW MM
I	Q	Q		
0/00	L/SEC	M ³ /U		
0.01	0,43	1,54	HYDR, GLAD, 0,0500	3,232
0.03	0,79	2,85	HYDR, GLAD, 0,0439	2,288
0.10	1,52	5,49	TECHN, RUW, 0,0396	1,706
0.30	2,73	9,82	TECHN, RUW, 0,0371	1,407
1.00	9,10	18,35	TECHN, RUW, 0,0354	1,223
3.00	16,94	32,19	TECHN, RUW, 0,0345	1,129
10.00	16,47	59,28	TECHN, RUW, 0,0339	1,071
30.00	28,65	103,14	HYDR, RUW, 0,0336	1,041
100.00	52,45	188,84	HYDR, RUW, 0,0334	1,022

Afb. 4

Laten we bv. aannemen, dat voor een betonbuis met een diameter van één meter, bij een verhang van 3 pro mille met behulp van de formule van Prandtl-Colebrook is bepaald, dat de gemiddelde wandruwheid K één millimeter bedraagt.

Even tussen haakjes: zou de buis alleen berekend zijn met de formule Prandtl voor hydraulisch ruwe buizen, dan zou men $K = 1,050$ mm hebben gevonden. Met behulp van de formule van Manning vinden we, dat de bijbehorende ruwheidscoëfficiënt $1/n$ dan 79 bedraagt en de C in de formule van Chezy: 63 (zie afb. 3).

Wij willen nu in een geheel gevulde riolering, waarin bij de werkende overstorten zeer geringe verhangen kunnen optreden, de capaciteit, het debiet, weten van een betonnen buis van bv. rond 150 mm met dezelfde wandruwheid voor een verhang van zeg $1/100$ pro mille.

Met behulp van Prandtl-Colebrook vinden we dan een debiet van 0.43 l/sec. Terugvertaald in de formule van Prandtl voor hydraulisch ruwe buizen is de wandruw-

heid als het ware gestegen tot 3,232 mm. Dat is een gevolg van de toename van de u bekende laminaire laag langs de wand van de buis. Deze laag, die net als de fysieke wandruwheid weerstand opwekt, neemt toe bij afnemende snelheid in de buis.

Nu opgelet!

Willen we met behulp van de formule van Manning voor de kleine buis het debiet bepalen en handhaven we daarbij dezelfde ruwheidscoëfficiënt als voor de grote buis, en waarom zouden we het dan niet doen, het is immers hetzelfde materiaal, dan vinden we 0,49 l/sec, een 15% te groot debiet (zie afb. 5).

Somtijds wordt ook de C uit de formule van Chezy klakkeloos als éénduidige ruwheidsconstante, als representatieve materiaalconstante dus, aangenomen. Het resultaat: een debietafwijking van liefst 58%.

Bij gladde buizen, waar niet zozeer de gemiddelde hoogte K van de wandruwelementen maatgevend is, maar de laminaire laagdikte langs de wand van de buis, of anders gesteld het getal van Reynolds, manifesteren de afwijkingen zich nog eens te meer.

Herhalen we dezelfde soort berekeningen, maar nu voor asbestcementbuizen van rond 1000 mm en rond 150 mm (zie afb. 6 en 7).

Bij 3 pro mille wordt voor de buis van rond 1000 mm met behulp van de formule van Prandtl-Colebrook een gemiddelde fysieke wandruwheid gevonden van 0,02 mm; met de formule van Prandtl voor ruwe buizen zouden we $7/100$ mm gevonden hebben. Het effect van de laminaire grenslaag is dus reeds duidelijk aanwezig bij de buis van 1000 mm. En bij de buis van rond 150 mm vinden we zelfs 2,252 mm.

Voor de ruwheidscoëfficiënten van Manning en de Chezy wordt bij de buis van rond 1000 mm respectievelijk 106 en 84 gevonden.

Bij klakkeloos handhaven van deze coëfficiënten vinden we voor een buis van rond 150 mm bij een verhang van $1/100$ pro mille dan debietafwijkingen van 46% bij Manning en 97% bij de Chezy.

2. Welke formule te kiezen voor gedeeltelijke gevulde buizen

Yarnell, Willcox en vele anderen hebben metingen verricht aan gedeeltelijk gevulde buizen.

Vooraf bekend zijn de metingen door Camp en zeer betrouwbaar lijken de metingen aan bestaande, schone rioolleidingen door Pomeroy (zie afb. 8).

Uit al deze metingen blijkt dat de ruwheidscoëfficiënt van Manning varieert met de waterlaagdikte in de buis en dat men een gevoelige fout maakt Manning (of Strickler) toe te passen voor de gedeeltelijk gevulde buis, uitgaande van de gevonden of aangenomen ruwheidscoëfficiënt bij een geheel gevulde buis.

Maar dit geldt ook voor Prandtl-Colebrook. In veel gevallen wordt de diameter D in de formule van Prandtl-Colebrook vervangen door viermaal de hydraulische straal en dan meent men bij de gedeeltelijke vulling zonder correctie voor R de hydraulische straal behorende bij het gedeeltelijk gevulde profiel in te kunnen vullen. Dit geeft onjuiste resultaten.

Diverse onderzoekers en auteurs hebben getracht dit bezwaar te ondervangen door het invoeren van corrigerende coëfficiënten.

Kirchmer doet dit bv. door in de formule van Prandtl-Colebrook onder de logaritmische de vorm-factor a in te

DIAMETER RUWHEID		100,00 CM 0,02 MM			
I	Q	Q		LAMBDA	KRUW
0/00	L/SEC	M ³ /U			MM
0.01	79,71	286,95	HYDR, GLAD	.0190	0,884
0.03	146,68	528,76	HYDR, GLAD	.0168	0,519
0.10	285,41	1027,46	HYDR, GLAD	.0149	0,293
0.30	520,94	1873,93	HYDR, GLAD	.0134	0,178
1.00	999,40	3597,84	HYDR, GLAD	.0121	0,104
3.00	1800,99	6482,12	HYDR, GLAD	.0112	0,070
10.00	3405,22	12258,81	HYDR, GLAD	.0104	0,047
30.00	6044,45	21740,03	TECHN, RUW	.0099	0,036
100.00	11248,19	40493,48	TECHN, RUW	.0096	0,029

Afb. 6

DIAMETER RUWHEID		15,00 CM 0,02 MM			
I	Q	Q		LAMBDA	KRUW
0/00	L/SEC	M ³ /U			MM
0.01	0,46	1,65	HYDR, GLAD	.0437	2,252
0.03	0,87	3,14	HYDR, GLAD	.0362	1,308
0.10	1,75	6,30	HYDR, GLAD	.0300	0,726
0.30	3,27	11,77	HYDR, GLAD	.0258	0,427
1.00	6,44	23,19	HYDR, GLAD	.0221	0,243
3.00	11,86	42,71	HYDR, GLAD	.0196	0,149
10.00	22,97	82,69	HYDR, GLAD	.0174	0,091
30.00	41,61	149,78	HYDR, GLAD	.0159	0,061
100.00	78,97	284,30	HYDR, GLAD	.0147	0,042

Afb. 7

voeren en deze gelijk te stellen aan 0.75. Het resultaat is, gezien de metingen van Camp en Pomeroy, niet erg overtuigend.

Bekend is ook de adaptatie door Thormann, gepubliceerd in het handboek van de Abwassertechnische Vereinigung, welke ook niet tot een bevredigend resultaat voert. Uit de door hem met grote nauwkeurigheid gedane metingen aan bestaande rioolleidingen komt Pomeroy tot de volgende relatie tussen de toestand bij gedeeltelijke vulling en gehele vulling („vol“):

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_{vol}} = 1.093 \left(\frac{A}{A_{vol}} \right)^{0.316} \quad \text{of} \quad \frac{Q}{Q_{vol}} = 1.093 \left(\frac{A}{A_{vol}} \right)^{1.316}$$

waarin:

\bar{V} = gemiddelde snelheid in m/sec

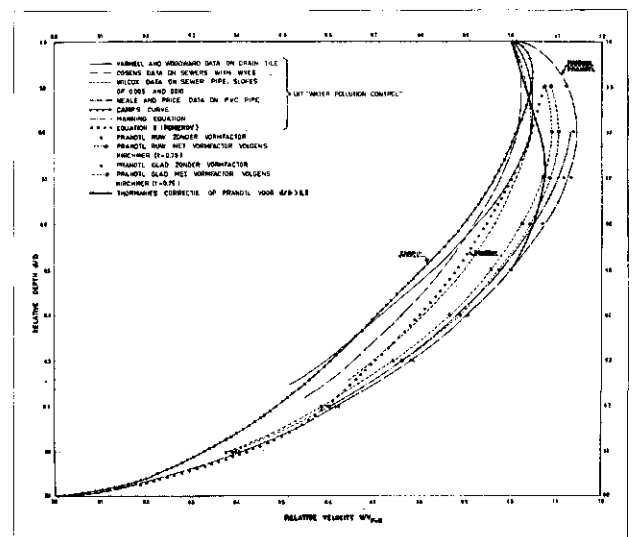
A = oppervlak van de natte doorsnede in m²

Q = debiet in m³/sec

en voor een directe bepaling van de gemiddelde snelheid bij gedeeltelijke vulling, zonder een omweg te hoeven maken via de toestand bij gehele vulling tot:

$$\bar{V} = K I^{0.41} Q^{0.24}$$

Afb. 8



waarin:

- I = het buisverhang
- K = een weerstandscoefficient

De grootte van K moet geschat worden aan de hand van gedane metingen aan diverse buizen van verschillend materiaal en verschillende diameters.

Pomeroy geeft voor ronde buizen de volgende gemiddelde waarden voor K op.

Asbestcement 18.9, Grès 17.8, Beton 15.2.

Een duidelijk nadeel van deze directe bepalingsmethode is, dat men dan weer te doen heeft met een factor K, die alleen afhankelijk gesteld wordt van de wandruwheid.

Bij het berekenen van gedeeltelijk gevulde buizen geven wij op kantoor de voorkeur aan de berekening via de omweg van de geheel gevulde buis, omdat voor de berekening van de toestand bij geheel gevulde buis de formule van Prandtl-Colebrook gehanteerd kan worden.

Verder geven wij dan voor het bepalen van de toestand bij de gedeeltelijke vulling de voorkeur aan de relatiecurve van Camp omdat deze als een soort „ongunstige waarde-omhullende” van de diverse metingen door anderen fungeert. Formule van Camp:

$$\frac{V}{V_{vol}} = 1.067 \left(\frac{A}{A_{vol}} \right)^{0.41} \quad \text{of} \quad \frac{Q}{Q_{vol}} = 1.67 \left(\frac{A}{A_{vol}} \right)^{1.41}$$

ook wel somtijds gepresenteerd met iets gewijzigde factoren:

$$\frac{V}{V_{vol}} = 1.0755 \left(\frac{A}{A_{vol}} \right)^{0.41} \quad \text{of} \quad \frac{Q}{Q_{vol}} = 1.0755 \left(\frac{A}{A_{vol}} \right)^{1.41}$$

Achteraf gezien is het vrij duidelijk dat ten behoeve van de berekening van gedeeltelijk gevulde buizen niet volstaan kan worden met de simpele vervanging van de factor D in de formule van Prandtl-Colebrook door 4 R. Immers bij gelijkblijvend bodemverhang, wandruwheid en kinematische viscositeit kan niet alleen de veranderende hydraulische straal bij gedeeltelijke vulling maatgevend zijn, maar moet ook de veranderende vorm van de natte doorsnede en de zich wijzigende snelheidsverdeling binnen de natte doorsnede van invloed zijn (zie afb. 9). Dit laatste brengt ons op het volgende:

De hoogte van de energielijn wordt, zoals bekend, onderverdeeld in plaatshoogte, drukhoogte en snelheidshoogte.

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + \text{snelheidshoogte}$$

De snelheidshoogte wordt als volgt gedefinieerd:

$$\text{Snelheidshoogte} = \alpha \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$\text{en } \alpha = \frac{\int V^3 dA}{\bar{V}^3 A} \approx \frac{\sum V^3 \Delta A}{\bar{V}^3 A}$$

\bar{V} = gemiddelde van de plaatselijke snelheden in de gehele natte doorsnede A.

V = gemiddelde snelheid van het deeltje dA van de natte doorsnede.

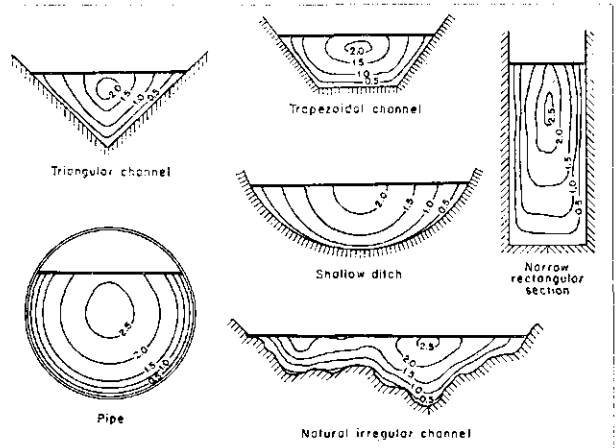
Deze factor α nu is geïncorporeerd, als het ware verstoppt, in de factor van de formule van Prandtl-Colebrook voor geheel gevulde buizen (zie afbeelding 2), waarbij $\lambda = D.I. 2g/V^2$

Aangezien α reeds varieert bij geheel gevulde buizen (zie afb. 10) en de snelheidsverdeling in gedeeltelijk gevulde

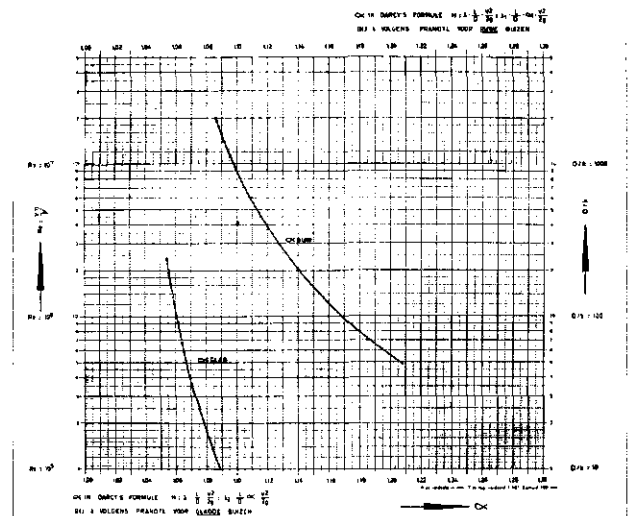
buizen een geheel andere is, dan die in geheel gevulde buizen, moet het vrij duidelijk zijn waarom het simpele vervangen van D door 4 R in de formule Prandtl-Colebrook niet leidt tot overeenstemming tussen formule-uitkomst en gemeten resultaat bij gedeeltelijk gevulde buizen.

Voorgesteld zou kunnen worden λ te splitsen in de factoren α en λ_1 , aldus $\lambda = \alpha \times \lambda_1$.

Voor geheel gevulde buizen zou dan λ_1 , in formule-vorm

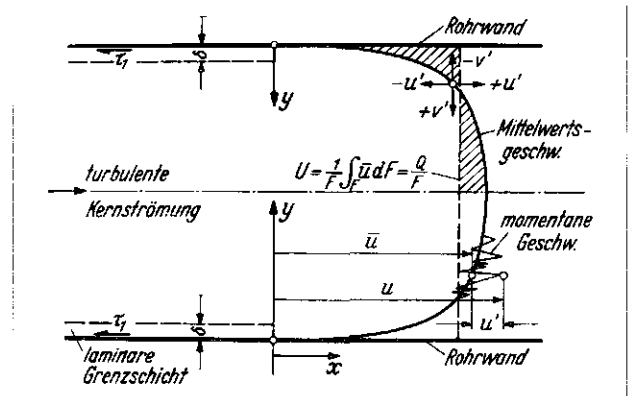


Afb. 9



Afb. 10

Afb. 11



uitgedrukt kunnen worden, aangezien en λ en α in formule zijn uit te drukken, en wel: λ volgens de formule van Prandtl-Colebrook (zie afb. 2) en α met behulp van de benaderingsformule $\alpha = 1 + 3 \varepsilon^2 - 2 \varepsilon^3$

$$\text{waarin } \varepsilon = \frac{V_{\max}}{V} - 1$$

welke o.a. is gebaseerd op de aanname dat de grootte van de snelheid V in de lengterichting van de buis logaritmisch verloopt over de doorsnede (zie afb. 11).

Voor hydraulisch gladde leidingen geldt:

$$V_{\max} = 5,75 \sqrt{gRI} \log \frac{18 R \sqrt{gRI}}{\nu}$$

en voor hydraulisch ruwe leidingen:

$$V_{\max} = 5,75 \sqrt{gRI} \log \frac{60 R}{K}$$

Grafisch ziet het resultaat er zo uit voor geheel gevulde hydraulisch gladde en hydraulisch ruwe buizen (zie afb. 12).

Verondersteld zou nu bijvoorbeeld kunnen worden dat voor hydraulisch ruwe buizen de relatie tussen λ_1 en D/k bij volle buizen dezelfde zal blijken te zijn als die tussen λ_1 en $4 R/k$ bij gedeeltelijk gevulde buizen en dat bij hydraulisch gladde buizen de relatie tussen λ_1 en het getal van Reynolds voor volle buizen dezelfde zal blijken te zijn voor gedeeltelijk gevulde buizen.

Alsdan zou voor de berekening van gedeeltelijk gevulde buizen in de formule Prandtl-Colebrook de variërende waarde van α de gezochte vormfactor kunnen zijn.

Wij hebben getracht deze veronderstelling te toetsen aan de curven van Camp en Pomeroy.

Aangezien het echter praktisch onmogelijk is α theoretisch te berekenen voor gedeeltelijk gevulde buizen, vooral voor waterdiepten groter dan de $\frac{1}{2}$ diameter van de buis, kan het toetsen van deze veronderstelling alleen geschieden door het bepalen van α via proeven in een waterloopkundig laboratorium. Dit is nog niet gebeurd. Het beeld wordt nog iets ingewikkelder gemaakt door het volgende feit:

In het voorgaande is steeds verondersteld of er alleen sprake zou zijn van een snelheidsfactor in de richting van de lengte-as van de buis.

Ten gevolge van het optreden van de grootste langssnelheid in het midden en de kleinste langssnelheden langs de buiswand, is er ook sprake van piezometrische hoogteverschillen dwars op de lengte-as van de buis en dienvolgt van dwarsstromingen (zie afb. 13).

Diverse auteurs achten echter de invloed van deze dwarsstromen op de energieverliezen in de lengterichting van de buis te verwaarlozen.

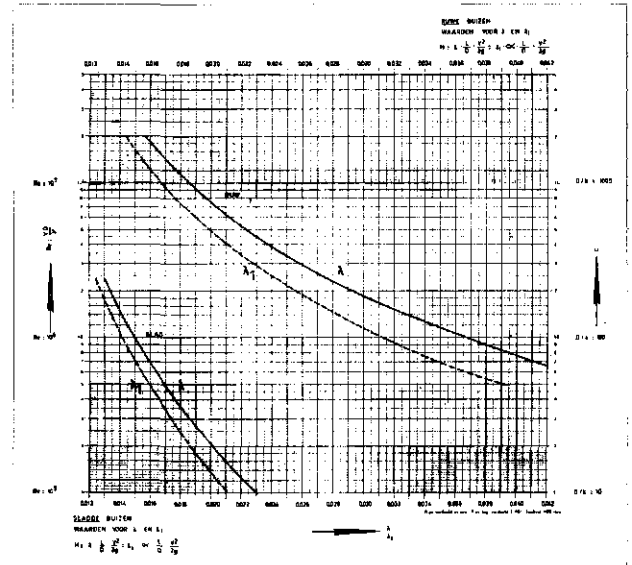
Voorlopig nog lijkt de beste berekeningsmethode gedeeltelijk gevulde buizen te berekenen via de formule Prandtl-Colebrook voor geheel gevulde buizen en de empirisch gevonden relatielijnen van Camp of Pomeroy, waarbij Camps curve aanleiding geeft tot iets „veiliger” ontwerpen.

3. Energieverliezen door voegen, het kniksgewijs liggen van buizen etc.

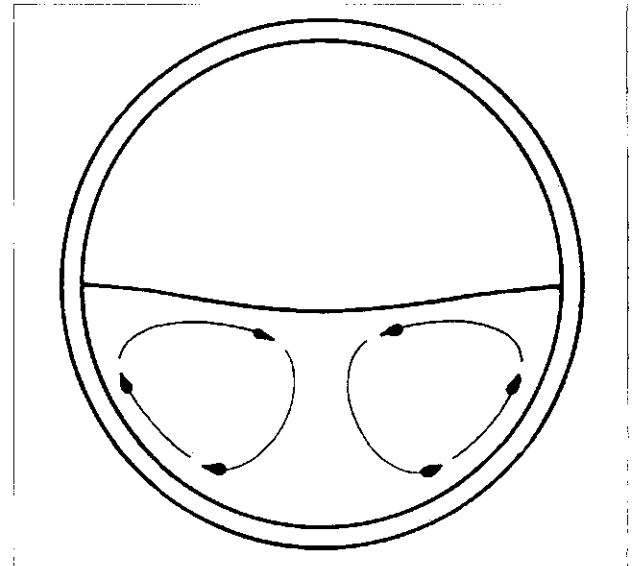
Over dit onderwerp is nog veel te weinig bekend, aangezien bij de bepaling van de waterstandsverliezen in een leiding grote delen leiding als zodanig, met voegen en al,

doorgemeten worden en aldus de verliezen ten gevolge van voegen in het geheel verborgen blijven.

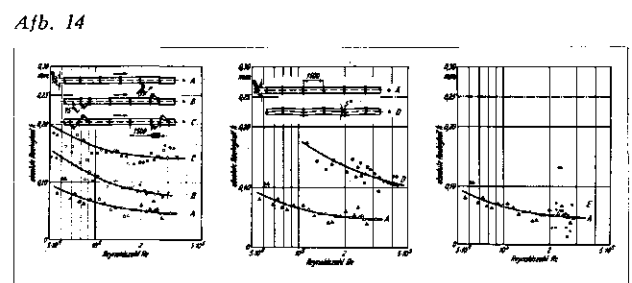
Het energieverlies, opgewekt door een voeg, is vrijwel niet te berekenen. Enerzijds veroorzaakt de onderbreking in de wand een verstoring van het stromingsbeeld in de buis zelf met een kans op energieverlies gevende wervels. Anderzijds wordt door het stromende water in de buis de massa water in de voegruimte zelf in een wervelende beweging gebracht; het energieverlies hiervoor is te



Afb. 12



Afb. 13



Afb. 14

schrijven als $\frac{1}{2} m v^2$, waarbij m staat voor de massa water in de voegruimte. Voor de aan te nemen waarde van v is zelfs bij benadering geen relatie aan te geven met betrekking tot de gemiddelde snelheid in de buis.

Bekend zijn de proeven van Kirchmer op grèsbuizen met een inwendige diameter van 30 cm en voegen om de 1.50 m. Door hem zijn de volgende toestanden nagegaan:

- een leiding, bestaande uit zuiver in één lijn gelegde buizen
- zuiver recht gelegde leiding met enkelvoudige zij-spruiten
- zuiver recht gelegde leiding met tegenover elkaar lig-gende zijspruiten
- zigzag gelegde leiding zonder zijspruiten
- zuiver recht gelegde leiding met schachten.

Aangezien de leiding steeds inclusief de voegen is ge-meten, is het absolute effect van de voegen niet bekend. Uit de gemeten vervalverliezen is steeds met behulp van de formule Prandtl-Colebrook een maat voor de wand-ruwheid afgeleid.

Uit de metingen zou aldus op te maken zijn, dat de energieverliezen ten gevolge van de storingen relatief af-nemen bij toenemende snelheid. Naar alle waarschijnlijk-heid worden de wervels, die door deze storingen worden opgewekt, bij toenemende snelheid onderdrukt.

De invloed van schachten, vooral als deze goed aange-raseerd zijn, lijkt overigens te verwaarlozen.

De proeven geven wel steun aan de door de Abwasser-technische Vereinigung voorgestelde k -waarden (zie tabel), die nog voldoende veiligheid zouden bieden voor de mogelijkheid van zigzag gelegd buizen met tegenover-elkaar liggende spuitstukken.

Betriebliche Rauigkeit K in mm

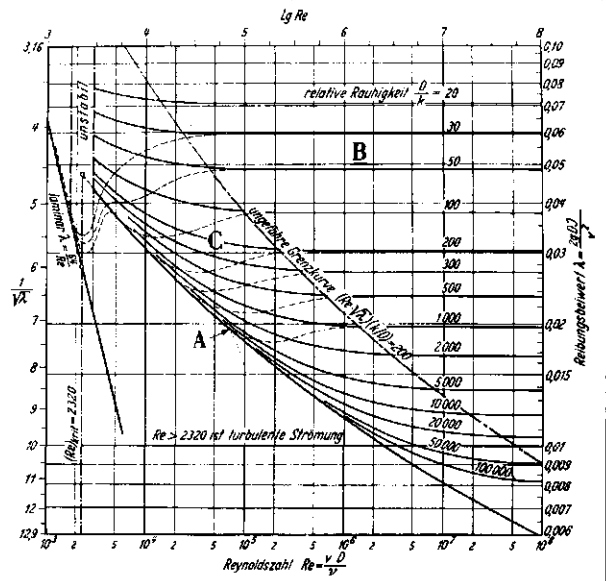
Kanal art	Ausführungsgruppe	
	I	II
Normale Kanalstrecken	1.50	0.40
Gerade Kanalstrecken		
Drosselstrecken		
Druckrohre	1.00	0.25

Overigens heeft de verandering in de kleine k -waarde bij gladde buizen (plastic, asbest, grès) ten gevolge van voegen, zigzag-ligging etc., geringe invloed op de weerstands-coëfficiënt λ van de buizen, minder invloed in ieder ge-val dan andere factoren, zoals de watersnelheid.

Dit is ten eerste te zien aan de hand van het bekende Moody-diagram (zie afb. 15) door bijvoorbeeld het quotiënt D/k te variëren tussen 1000 en 6000 binnen de proefgebiedsgrenzen van Kirchmer, namelijk Re variërend van $5 \cdot 10^4$ tot $5 \cdot 10^5$.

Ten tweede toont afb. 16 dat de veranderende snelheid tot veel grotere veranderingen in de k -waarde aanleiding geeft of beter gezegd, dat ten gevolge van het laminaire laag-effect op de wand bij gladde buizen de afnemende snelheid tot een snel toenemende afwijking leidt tussen optredende wandruwheid K en fysieke wandruwheid k (0,02 mm in dit geval).

Proeven, zoals door Kirchmer uitgevoerd op grèsbuizen zijn ons niet bekend voor ruwere materialen, zoals beton-buizen bv. Deze lijken ons wel gewenst. Tot nu toe lijken voor rioolbuizen de door de Abwassertechnische Ver-einigung aangegeven normen voor aan te nemen k -waarden, bij gebrek aan verdere meetresultaten, voor-lopig bruikbaar.

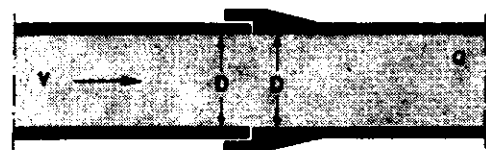


Afb. 15

DIAMETER RUWHEID	30.00 CM 0.02 MM	Q M ³ /U	LAMBDA	KRUW MM
I	0/00			
	Q	Q		
	L/SEC	M ³ /U		
	0.01	3.08	HYDR. GLAD	0.0309
	0.03	5.76	HYDR. GLAD	0.0244
	0.10	11.43	HYDR. GLAD	0.0225
	0.30	21.14	HYDR. GLAD	0.0198
	1.00	41.16	HYDR. GLAD	0.0173
	3.00	79.16	HYDR. GLAD	0.0156
	10.00	144.12	HYDR. GLAD	0.0142
	30.00	256.89	HYDR. GLAD	0.0132
	100.00	487.29	TECHN. RUW	0.0124

Afb. 16

Afb. 17



$$\Delta = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \left(\frac{4a}{D}\right)^2 \cdot \frac{v^2}{2g}$$



$$\Delta = \int \frac{v^2}{2g} = 0.45 \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2 \cdot \frac{v^2}{2g} = 1.8 \cdot \frac{a}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Vertragsverliezen bij voegen

Tenslotte zijn vermeldenswaard de door prof. Huisman opgegeven formules, voor extra energieverliezen ter plaatse van de voegen, indien de buizen enigszins taps verlopen (zie afb. 17).

Met deze formules toont hij duidelijk aan, dat de energieverliezen vele malen groter zijn, indien men het einde van de buis met de kleinere diameter stroomopwaarts legt, in plaats van stroomafwaarts.

Dit kan zowel het spieënde als het mofeinde van een buis zijn. Komt echter bij een bepaald type buis een afwijking steeds aan het spieënde of aan het mofeinde voor, dan houde men daar rekening mee.

N.B.: Bij rioleringen in gemengde stelsels moet het leggen van buizen niet afgestemd zijn op de toestand bij droogweerafvoer, maar op de toestand bij zware regen (werkende overlaten).

4. Toename van de wandruwheid in de tijd

Is er iets zinnigs te zeggen over de toename in de tijd van de wandruwheid van de buizen?

Dit is een moeilijke materie. Gegevens uit de rioleringspraktijk ontbreken praktisch op dit gebied. De meeste gegevens komen uit de waterleidingwereld.

Bij gietijzeren en stalen buizen, waarin drinkwater getransporteerd wordt, zou de wandruwheid bv. lineair met de tijd toenemen, afhankelijk van de zuurgraad van het water en de concentraties van het kation Calcium en het anion Bicarbonaatzuur.

In het algemeen kan men zeggen dat de wrijvingsverliezen in buizen met de tijd toenemen.

Hoe groot deze toename is, en hoe snel dit gaat, is met de huidige stand van de wetenschap praktisch niet te voorspellen.

Men hoort nog wel eens dat de wrijvingsweerstand bij ruwe buizen door slibafzettingen, vorming van bacteriologische slijmlagen, vetafzettingen in droogweerafvoerbuizen van een gescheiden stelsel zouden afnemen.

Dit is nog nergens, voor zover ons bekend, door proeven of metingen bevestigd en het lijkt veiliger hier niet al te veel op te rekenen en zelfs liever rekening te houden met een toename van de ruwheid ten gevolge van afzettingen. Berucht zijn de ribbelvormige afzettingen ten gevolge van de neerslag van fijne stoffen, die eerst in gesuspendeerde toestand in het water voorkomen.

Bekend is het voorbeeld van de Ecker-leiding van de Harzwasserwerke in Neder-Saksen. De toename van het wrijvingsverlies in de buis is veel groter dan geconcludeerd zou mogen worden uit de hoogte van de ribbels alleen (zie afb. 18).

Dit zou overeenkomen met de waarschuwingen door Morris die stelt, dat wat de wandruweheidsinvloed betreft niet alleen de hoogte van de oneffenheden als maatgevend beschouwd moeten worden.

Morris stelt dat de energieverliezen bij hydraulisch ruwe wanden in hoofdzaak te wijten zijn aan de wervelstraten die opgewekt worden achter ieder wandruweheidselement. De grootte van het energieverlies hangt af van de mate, waarin de wervels tot ontwikkeling kunnen komen en dit hangt onder meer af van de afstand tussen de wandruweheidselementen (zie afb. 19).

Morris maakt voor hydraulisch ruwe wanden aldus het volgende onderscheid:

- volledig ontwikkelde ruweheidswervels (isolated roughness flow)

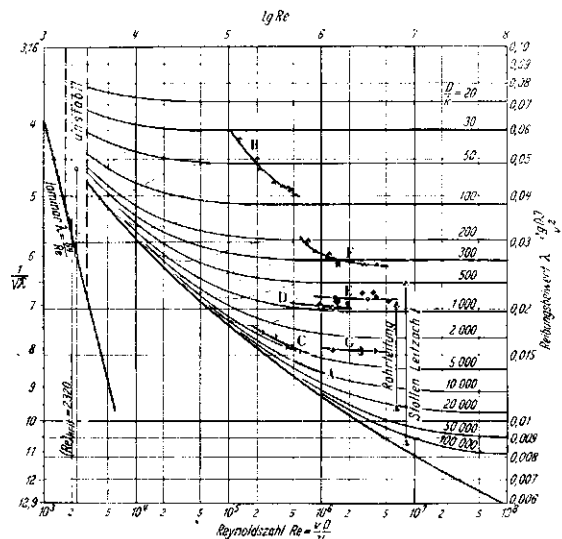
- gedeeltelijk tot ontwikkeling komende ruweheidswervels (wake interference flow)
- quasi hydraulisch glad (quasi smooth flow)

Bij de eerste categorie is de afstand tussen de elementen groot genoeg voor een volledige ontwikkeling van de wervels.

De significante parameter is k/λ .

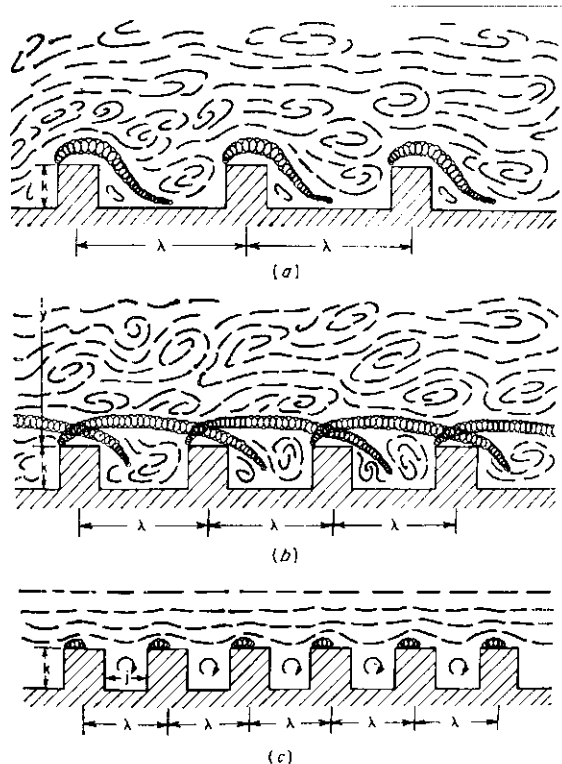
Bij de tweede categorie beïnvloeden de wervelstraten elkaar, hetgeen aanleiding geeft tot intense wervelingen en turbulente mengingsverschijnselen.

Morris stelt voor deze categorie niet de ruwheid k als parameter, maar het quotiënt R/λ , waarin R de hydrau-



Afb. 18

Afb. 19



lische straal voorstelt en λ de afstand h.o.h. tussen de wandruweheidselementen.

Bij de derde categorie, quasi hydraulisch glad, strijkt de stroom als het ware over de elementen heen. Hier stelt Morris k/λ voor als significante parameter of het quotiënt j/λ , waarin j de dagbreedte voorstelt tussen de ruweheidselementen.

Al met al zou het waarschijnlijk reëel zijn en misschien zelfs essentieel in de formule van Prandtl-Colebrook tevens de h.o.h. afstand tussen de wandruweheidselementen als parameter in te voeren, aangezien deze afstand in alle drie van de door Morris onderscheiden categorieën voorkomt.

De ribbelvormige afzettingen in buizen lijken te passen in de tweede categorie, waarbij de energieverliezen zeer groot zijn en eerder afhankelijk zijn van de hydraulische straal en de afstand tussen de wandruweheidselementen dan van de hoogte van de wandruweheidselementen zelf. De ribbelvormige afzettingen in buizen doen sterk denken aan de duin- en ribbelvorming bij rivieren in alluviale gronden. Mogelijk dat uit de formules die voor duin- en ribbelvorming in rivieren ontwikkeld zijn, materiaal te putten valt voor het verschijnsel van ribbelvorming in buizen.

5. De vervuiling van rioolbuizen

Al onze fraaie berekeningen worden te niet gedaan, zelfs als we een marge hebben opengelaten voor ribbelruweheid, als opeenhopende vervuiling de debietvoerende capaciteit van de buizen drastisch vermindert.

Onder vervuiling wordt hier dus *niet* verstaan de zogenaamde microvervuiling, aangroeiing aan de wand, micro-sedimentatie tussen oneffenheden op de wand, etc., die eerder optreedt bij ruwe buizen dan bij gladde buizen, maar *macro*-vervuiling, zoals afzetting van dikke lagen zand, koffiedik e.d., waardoor de oppervlakte van het natte profiel duidelijk afneemt.

Indachtig aan wat reeds bekend is over bodemtransport en sedimentatie in alluviale rivieren, zijn er diverse parameters aan te wijzen, die maatgevend zijn voor het optreden van afzettingen in buizen.

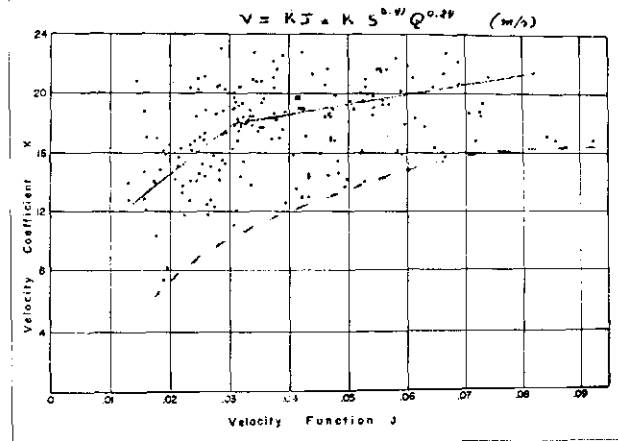
In het algemeen kan echter gesteld worden, dat de gemiddelde snelheid de belangrijkste parameter is voor de vervuiling in de rioolbuizen.

Immers waar de gemiddelde snelheid groot is, komen geen vuilafzettingen voor en waar de snelheden laag zijn wel. Of om Pomeroy te citeren: lage snelheden zijn een oorzaak en een gevolg van vervuiling.

In de officiële Franse ontwerpvoorschriften voor rioleringsstelsels voert men dan ook alleen de gemiddelde snelheid in als maatgevende factor.

Rioleringsstelsels in het gemengde stelsel moeten volgens deze voorschriften aan de eis voldoen, dat bij het maatgevende debiet zand *niet* tot afzetting kan komen; hiervoor wordt een snelheid van 60 cm/sec aangegeven. Tevens moeten in deze leidingen ten gevolge van de droogweerafvoer *geen* afzettingen van gemakkelijk rotbaar organisch materiaal voorkomen en hiervoor wordt als eis, ons nogal arbitrair lijkend, het volgende opgegeven:

„bij een debiet gelijk aan $1/10$ van het debiet bij geheel gevulde buis moet de gemiddelde snelheid minstens 60 cm/sec zijn, of bij een debiet gelijk aan $1/100$ van het volle buisdebiet, minstens 30 cm/sec”. (In Frankrijk worden de buizen in het gemengde stelsel meestal ontworpen voor een tienjarige bui.)



Afb. 20

Het is ons niet gelukt te traceren in hoeverre deze ontwerpen gebaseerd zijn op metingen, alhoewel men de laatste jaren, in Parijs bv., wel degelijk aan het meten is geslagen.

Voor droogweerafvoeringen bij het gescheiden stelsel wordt als eis gesteld, dat de gemiddelde snelheid nog minstens 30 cm/sec moet bedragen bij 20% vulhoogte. Met behulp van de curve van Camp (zie afb. 8) vindt men, dat dit overeenkomt met een gemiddelde snelheid van ± 60 cm/sec bij geheel gevulde buis.

Interessant is de wijze, waarop Pomeroy dit vraagstuk benadert, aan de hand van resultaten en metingen, die hij verrichtte aan 95 riolen, welke varieerden in diameter van 20 cm tot 60 cm.

Pomeroy maakt in zijn artikel geen onderscheid tussen droogweerafvoerriolen en regenwaterafvoerriolen.

Voor waarden van het produkt:

$I^{0.41} \cdot Q^{0.24}$ in de reeds geciteerde formule $\bar{V} = K \cdot I^{0.41} \cdot Q^{0.24}$, groter dan een bepaalde ondergrens, blijft de gemiddelde waarde van de stromingsweerstandcoëfficiënt K praktisch constant of vertoont slechts een lichte neiging tot stijgen (zie afb. 20).

Beneden de genoemde grens begint K vrij abrupt te dalen, hetgeen resulteert in een relatief snelle daling van de gemiddelde snelheid \bar{V} .

Pomeroy stelt, dat in het gebied waar K betrekkelijk snel daalt er kans op vervuiling is en hij stelt voor bij het ontwerpen van rioleringsstelsels er voor te zorgen, dat men boven die ondergrens blijft.

Die grens ligt ongeveer bij $I^{0.41} \cdot Q^{0.24} = 0.03$.

De gemiddelde waarde van K is dan circa 18 en de maatgevende minimum snelheid 0.54 m/sec.

Belangrijkste bibliografie

1. *Open Channel Hydraulics*; Ven Te Chow, Mac Graw Hill Book Co.
2. *Stromingsweerstand in leidingen 2e druk*; L. Huisman, mededeling no. 14 van het Keuringsinstituut voor Waterleiding-artikelen KIWA NV.
3. *Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik*; Abwassertechnischen Vereinigung C.V. in Bonn, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn.
4. *Instruction Technique relative à l'assainissement des agglomérations*, Ministère de la Réconstruction et de l'Urbanisme, Paris.
5. *Flow Velocities in Small Sewers*; Richard D. Pomeroy, Journal Water Pollution Control Federation, Annual Conference Issue, September 1967.
6. *Reibungsverluste in Röhren und Kanälen*; Otto Kirchner, Wasser und Abwasser Heft 50, 16 Dezember 1966.