3092 1980

STROMINGSWEERSTAND IN EEN RIOOL-INSPEKTIEPUT

TEKST

BOB BAKKER

STROMINGSWEERSTAND IN EEN

RIOOL-INSPEKTIEPUT

Bob Bakker
Vlamingstraat 66
2611 KZ Delft.

Ir. C. Verspuy
Prof. Dr. Ir. M. de Vries

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

APRIL 1980

I N H O U D S O P G A V E.

		pag.
	Lijst van gebruikte symbolen	1
	Literatuuropgave	2
	Summary	3
1.	INLEIDING	4
2.	ALGEMENE BESCHOUWINGEN	6
	2.1. Probleemstelling	6
	2.2. Analyse van de stroming door de put; meting van het energieverlies	8
	2.3. Literatuuronderzoek	13
	2.4. Modelschaal	15
	2.5. Meetopstelling	22
3.	MODELONDERZOEK	27
	3.1. Meetprogramma	27
	3.2. Overzicht van de uitgevoerde metingen	30
4.	RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK	31
	4.1. Het energieverlies over de put, als funktie van het debiet, de waterstand en het buishoogteverschil	31
	4.2. Energieverlies in de afvoerbuis	40
	4.3. Foutenanalyse	42
	4.3.1. Weerstandcoëfficiënt c2	42
	4.3.2. Weerstandcoëfficiënt c3	47
5.	KONKLUSIES	49
6.	AANBEVELINGEN	52

Lijst van gebruikte symbolen.

A	= oppervlakte (horizontale) putdoorsnede (m^2)
c1	= weerstandscoëfficiënt; $H_t = c1 \times Q^2$ (sec^2/m^5)
c2	= weerstandscoëfficiënt; $H_t = c2 \times \frac{V^2}{2g}$ (-)
c3	= weerstandscoëfficiënt; $H_u' = c3 \times \frac{V^2}{2g}$ (-)
DB	= buishoogteverschil; vertikale afstand tussen de binnen onderkant van aan- en afvoerleiding(m)
g	= valversnelling (m/sec^2)
h	= waterstand in de put, gemeten t.o.v. binnen onderkant van de laaggelegen (afvoer)buis (m)
h_x	= stijghoogte in een punt x (m)
H_x	= energiehoogte in een punt x (m)
k	= wandruwheid vlg. Nikuradse (m)
n	= modelschaal
Q	= debiet door de put (l/sec)
T_{kl}	= tijd benodigd voor uitspoeling van 1 ml kleurstof ($kMnO_4$) (sec)
v	= stroomsnelheid in aan- en afvoerleiding (m/sec)
v_x	= stroomsnelheid in een punt x (m/sec)
α	= hoek tussen aan- en afvoerleiding (-)
Δh	= verschil in stijghoogte (mm)
Δh_t	= totale verlies aan stijghoogte over de put (mm)
ΔH_i; $\Delta H_i'$	= energieverlies door vertraging van het instromende water (mm)
ΔH_p	= energieverlies, dat optreedt bij de "vertikale" stroming in de put (mm)
ΔH_t	= totale energieverlies over de put (mm)
ΔH_u, $\Delta H_u'$	= energieverlies in de afvoerbuis (mm
ν	= kinematische viscositeits-coëfficiënt (m^2/sec)

Literatuuropgave.

1. Idel'cik I.E.,
Mémento des pertes de charge
Eyrolles, Paris, (1969)

2. Lencastre A.,
Manuel d'Hydrauliques Générale,
Eyrolles, Paris, 5 ème éd (1973)

3. Liebmann H.,
Der Einfluss von Einsteigschächten auf den
Abflussvorgang in Abwasserkanälen,
Schmidt, Bielefeld, (1970)

4. de Vries M.,
Waterloopkundig Onderzoek, collegehandleiding b 80
Technische Hogeschool Delft, afd. der Civiele Techniek
(1977)

Summary.

In a laboraty investigation, the flow resistance of a sewerage man-hole was determined.

Two lines were connected with a scale-model of such a pit. The height of the outlet was fixed at the bottom of the pit; the height of the inlet was varied. The angle between in- and outlet was 90 degrees.

The total loss of the energy head ΔH_t was determined as a function of the discharge Q, the water level h and the difference between the height of in- and outlet DB.

It was found that ΔH_t is about 1,6 times the velocity head of the inflowing water.

$$\Delta H_t = c2 \times \frac{V^2}{2g} \; ; \; c2 = 1{,}62 \pm 0{,}17.$$

In this figure a loss of energy $\Delta H_u'$ is included, caused by a delay in the outlet.

$$\Delta H_u' = c3 \times \frac{V^2}{2g} \; ; \; c3 = 0{,}5 \pm 0{,}07.$$

The influence of h and DB upon c2 is limited.

A variation of 2 40% was found.

C2 reaches a maximum, when the difference between h and DB exceeds a certain value ($h = h_{grens}$).

With the same reference plane for h and DB, h_{grens} - DB was about 1,00 (m).

1. INLEIDING.

Een riool-inspektieput vormt de toegang tot een rioolstelsel. De put die een diameter van tenminste 80 cm heeft, is voorzien van een schacht, die tot aan het straatniveau reikt. Via deze schacht zijn inspektie en onderhoud van het stelsel mogelijk.
Kenmerkend voor de inspektieput zijn de grote afmetingen. Het water dat door de put stroomt wordt dan ook sterk vertraagd. Desondanks wordt bij rioolnetberekeningen de putweerstand verwaarloosd.
In dit onderzoek nu, is nagegaan hoe groot het energieverlies is, dat bij stroming door de put optreedt.
Beschouwd is een situatie, waarbij dit energieverlies vrij groot zal zijn.
Op een put sluiten twee leidingen aan. De aanvoerleiding ligt hoog en de afvoerleiding laag. Bovendien maken de aan- en afvoerleiding een hoek van 90° met elkaar.
Deze kombinatie van een buishoogteverschil en een verandering van stromingsrichting treedt in de praktijk op bij een vermazing van het rioolnet. Hieronder verstaat men het maken van dwarsverbindingen tussen de hoofdtakken van het net. Zo ontstaan "mazen" waardoor het water langs meerdere "wegen" afgevoerd kan worden. Bij zo'n dwarsverbinding zal vaak de zijtak (het aanvoerriool) veel hoger liggen dan de hoofdtak (het afvoerriool).

Voor het onderzoek is een schaalmodel (schaal 1 : 4) van een riool-inspektieput gebouwd.
Naast de grootte van het energieverlies, is onderzocht of de waterstand in de put en het buishoogteverschil daarbij nog van invloed zijn. Daarvoor zijn aan de modelput op

verschillende hoogten aansluitpijpen bevestigd.
De afvoerleiding wordt aangesloten op een pijp onder in de put. De hoogte van de aanvoerleiding variëert.
Onderzocht zijn 8 meetposities; (verschillende waarden voor het buishoogteverschil). Voor elke meetpositie zijn verschillende waarden gekozen voor de waterstand in de put en het debiet door de put.
De resultaten van het onderzoek zijn gebruikt in een computer programma, waarmee, rekening houdend met de putweerstand, het effekt van vermazing is onderzocht.

2. ALGEMENE BESCHOUWINGEN.

2.1. Probleemstelling.

In de inleiding is het uitgangspunt voor dit onderzoek geschetst, een riool-inspektieput waarbij de aanvoerleiding een stuk hoger ligt dan de afvoerleiding terwijl de hoek tussen aan- en afvoerleiding 90^{o} is.

Een voorbeeld van zo'n situatie is getekend in fig.1. Het getekende rioolnet is een gemengd stelsel, dat wil zeggen dat zowel het huishoudelijk afvalwater als het regenwater via dit stelsel worden afgevoerd. Bij droog weer vindt afvoer plaats naar een gemaal G. De leiding AB helt daarom in de richting van B. Bij zware regenval zal de kapaciteit van G te kort schieten. Een deel van het water zal via de overstort O op het buitenwater worden geloosd.

In het punt C is een inspektieput geprojekteerd. Om nu de afvoer vanuit AB naar O te vergemakkelijken is de verbinding AC gemaakt. Het net is vermaasd. Hoe de aansluiting in C er uit ziet is getekend in fig. 2. De leiding AC voert het water boven in de put aan. De afvoerleiding CD ligt onder in de put.

Het energieverlies dat bij stroming van AC naar CD optreedt is in dit onderzoek bepaald. Dit energieverlies ΔH_t is gemeten als funktie van Q, h en DB.

Q = debiet door de put

h = waterstand in de put; referentievlak is de binnen onderkant van de afvoerbuis

DB = buishoogte verschil.

Het prototype van de onderzochte put is getekend in fig. 3. De put heeft een cirkelvormige doorsnede met een diameter van 1,00 m. Deze "Normal schacht", die in Duitsland op grote schaal wordt toegepast, bestaat uit een aantal betonnen ringen. Onder in de put is een stroomgeleidende goot uitgespaard. Dit wordt gedaan om slibafzetting en stroomvertraging zoveel mogelijk te voorkomen.

Voor het onderzoek zijn de volgende aannamen gedaan:

1. De diameter van aan- en afvoerleiding is gelijk. Gekozen is voor $D_1 = D_2 = \varnothing\ 300$ (zie fig. 2).
2. Aan- en afvoerleiding liggen horizontaal.
3. De hoek tussen aan- en afvoerleiding is konstant en gelijk aan 90^o.

2.2. Analyse van de stroming door de put; meting van het energieverlies

Hoe de stroming door de put er mogelijk uitziet is aangegeven in fig. 4.

- Door de plotselinge verruiming van het dwarsprofiel wordt het inkomende water vertraagd. Er vindt een overdracht van energie plaats op zowel het watervolume in de put als op de putwand zelf.
- De stromingsrichting verandert van een horizontale beweging in een neerwaartse stroming.
  Waarschijnlijk wordt slechts een deel van de putdoorsnede hierin betrokken. Een verruiming van het stroomprofiel en dus vertraging, kan daarom optreden.
- Onder in de put wordt het water versneld.
  De vertikale beweging wordt omgezet in een horizontale stroming.
- In de afvoerbuis zal stroomkontraktie optreden.
  De daarop volgende verwijding van het stroomprofiel gaat gepaard met vertragingsverliezen.

In fig. 5 is op basis van deze beschrijving het verloop van de energiehoogte H en het piëz. niveau h getekend.

Het totale energieverlies over de put ΔH_t bestaat uit 3 komponenten (zie fig. 5).

$$\Delta H_t = \Delta H_i + \Delta H_p + \Delta H_u$$

ΔH_i = "intreeverlies", veroorzaakt door vertraging van het instromende water

ΔH_p = energieverlies dat optreedt bij de stroming in de put.

ΔH_u = "uittreeverlies", veroorzaakt door de vertraging (na kontraktie) in de afvoerbuis.

Wanneer de snelheidshoogte in aan- en afvoerleiding gelijk is dan geldt:

$\Delta H_t = \Delta h_t$ (zie fig. 5)

ΔH_t = energieverlies over de put

Δh_t = verlies van stijghoogte over de put.

Dit biedt de mogelijkheid om door meting van de stijghoogten in een punt BO (bovenstrooms) en BE (benedenstrooms) van de put ΔH_t te bepalen.

$$\Delta H_t = \Delta h_t = h_{BO} - h_{BE}$$

Hoe groot de deelkomponenten ΔH_i, ΔH_p en ΔH_u zijn is moeilijk vast te stellen. Wel kan men een vereenvoudiging doorvoeren. Stel de energiehoogte in een punt B, halverwege het buishoogteverschil tussen de leidingen gelijk aan H_B. De energiehoogten in BO en BE zijn H_{BO} respektievelijk H_{BE}.

Dan geldt : $H_{BO} - H_B = \Delta H_i + c \times \Delta H_p = \Delta H_i'$

$$H_B - H_{BE} = \Delta H_u + (1-c) \times \Delta H_p = \Delta H_u'$$

$$(c \leqslant 1)$$

Hoogstwaarschijnlijk is ΔH_p klein.

$$\Delta H_i \approx \Delta H_i'$$

$$\Delta H_u \approx \Delta H_u'$$

$\Delta H_i'$ en $\Delta H_u'$ kan men bepalen via meting van Q, h_B, h_{BE} en h_{BO}.

De grootte van $\Delta H_i'$ en $\Delta H_u'$ is van belang bij het inpassen van de putweerstand in een rioolnetberekening.

Dit kan geïllustreerd worden met een voorbeeld (zie fig. 6).

In de bovenste figuur aangeduid met een romeinse I is de uitgangssituatie geschetst.

Het energieverlies dat optreedt bij de stroming door de put B is verwaarloosd. Q_{put} en $Q_{leiding}$ volgen uit het verloop van de energielijn die is aangeduid met een index 0. Stel nu dat $\Delta H_i'$ en $\Delta H_u'$ als funktie van Q_{put} bekend zijn. Het is dan mogelijk om het aangenomen verloop van de energielijn te korrigeren.

In fig. II is aangegeven hoe dit gebeurt; getekend zijn de oorspronkelijke lijn 0 en de verbeterde lijn met index 1. Uit deze nieuwe energielijn 1 resulteert een nieuwe waarde voor Q_{put} , en dus ook nieuwe waarden voor $\Delta H_i'$ en $\Delta H_u'$, enz., enz.

Uiteindelijk resulteert een energielijn r, die in overeenstemming is met de weerstand van put en streng.

De waarde van $\Delta H_u'$, $\Delta H_i'$ is, dat het energieverlies over de put wordt verdeeld in twee komponenten, die men toewijst aan de leidingen die op de put aansluiten.

Hoe men $\Delta H_u'$ kan meten is aangegeven in fig. 7.

Aan een peilnaald, bevestigd op een U-vormig aluminium profiel, is een "statische" buis geklemd. Hiermee wordt de stijghoogte in het punt B gemeten. Wanneer men de snelheidshoogte in B verwaarloost, dan geldt:

$$\Delta H_u' = H_B - H_{BE} = h_B - (h_{BE} + \frac{v_{BE}^2}{2g}).$$

$$\frac{v_{BE}^2}{2g} = \text{snelheidshoogte in BE.}$$

De snelheidshoogte in BE volgt uit Q.

Door meting van h_B en h_{BE} kan men dan $\Delta H_u'$ bepalen.

Resumerend :

1. Voor de bepaling van het energieverlies over de put moet men het verschil in stijghoogte tussen een punt BO (bovenstrooms) en BE (benedenstrooms van de put) bepalen.

2. Op grond van rekentechnische motieven is het van belang om het energieverlies in de afvoerbuis te kennen. Voor de bepaling daarvan moet men de stijghoogte in een punt B (halverwege het buishoogte verschil) en de stijghoogte in BE (benedenstrooms van de put) meten.

2.3. Literatuuronderzoek.

Via een kort literatuuronderzoek is nagegaan of er gegevens bestaan over de grootte van ΔH_t en $\Delta H_u'$.
Om met $\Delta H_u'$ te beginnen; uit de literatuur (Idel'cik, 1960 en Lencastre, 1969) volgt een waarde voor $\Delta H_u'$ van ongeveer 0,5 x $\frac{v^2}{2g}$.
Gegevens over de grootte van ΔH_t, voor het hier onderzochte geval, zijn niet voorhanden.
Er zijn twee publukaties die een indikatie kunnen geven.

1. Het proefschrift van Horst Liebmann getiteld:
   "Der Einfluss von Einsteigschächten auf den Abfluss vorgang in Abwasserkanälen (Liebmann, 1970)
2. Memento des pertes de charge van Idel'cik.
   (Idel'cik, 1960).

Het proefschrift van Liebmann is een studie naar het weerstandsverlies in een riool-inspektieput en de gevolgen daarvan op de afvoer via het rioolstelsel. Hij heeft verschillende putten onderzocht, waaronder de "Normal-schacht" (zie fig. 3).
Bij zijn onderzoek lagen de aan- en afvoerbuis op gelijke hoogte, terwijl bovendien de stromingsrichting niet veranderde. Variabelen binnen het onderzoek waren o.a. de helling van het riool, het debiet en de waterstand in de put.
Voor het energieverlies over de put werd een maximum waarde van 0,9 x $\frac{v^2}{2g}$ gevonden.

De tweede publikatie, het boek van Idel'cik is een standaardwerk op het gebied van stromingsweerstand. Onderzocht is of er situaties in beschreven staan, die op de stroming door de put lijken.
Bijlage no. 1 toont een schematisatie waarbij de put is vervangen door een vertikale buis.
Wat het resultaat van een dergelijke schematisatie is, blijkt uit het voorbeeld dat op bijlage 1 is uitgewerkt. Voor ΔH_t wordt een waarde van $\pm 3 \times \frac{v^2}{2g}$ gevonden.

Opmerking !

De gevonden waarde voor ΔH_t is bijzonder hoog en slechts te verklaren door de rechthoekige doorsnede van de leidingen.
Dit impliceert dat de waarde als schematisatie voor het onderhavige onderzoek (ronde put) erg gering is.

2.4. Modelschaal.

Onderzoek met behulp van een schaal-model heeft verschillende voordelen.
Het onderzoek kan plaatsvinden onder optimale kondities, is vaak eenvoudiger en sneller uit te voeren, en daardoor ook goedkoper.
Essentiëel bij het vaststellen van de schaal van het model zijn de schaalregels die gelden en de nauwkeurigheid die men verlangt van de meetresultaten.
Deze twee aspekten zullen hier eerst aan de orde komen.

Schaalregels.

Bepalend voor de grootte van het energieverlies ΔH_t is de optredende vertraging van het water.
Energieverlies ten gevolge van wrijving langs de wand of visceuse wrijving in de vloeistof kan men verwaarlozen. De faktoren k (wandruwheid) en ν (kinematische viscositeitscoëfficiënt) blijven daarom buiten beschouwing.
De stroming door de put kan men met de volgende parameters beschrijven :

ΔH	=	het energieverlies
h	=	waterstand in de put
Q	=	debiet
DB	=	buishoogteverschil
g	=	valversnelling
A	=	oppervlak van de putdoorsnede.

Welke schaalregels voor deze grootheden gelden is uitgezocht via een dimensie-analyse beschreven in de collegehandleiding "waterloopkundig onderzoek" (de Vries, 1977).

Uitgedrukt in de basisgrootheden lengte (L) en tijd (T) geldt :

$$\Delta H = (L)$$
$$h = (L)$$
$$Q = \left(\frac{L^3}{T}\right)$$
$$DB = (L)$$
$$g = \left(\frac{L}{T^2}\right)$$
$$A = (L^2)$$

Wanneer men een willekeurige parameter aanduidt met p_i, waarbij i loopt van 1 tot n (n parameters), dan kan men uit p_i een aantal dimensieloze produkten vormen.

Stel : $p_i = L^{\alpha i} T^{\beta i} \quad i = 1 \rightarrow n.$

$$\Pi = P_1^{k1} \times P_2^{k2} \times \ldots . P_i^{ki} \ldots . \times P_{n-1}^{k(n-1)} \times P_n^{kn}.$$
$$\Pi = L^{\alpha 1 k1} \times T^{\beta 1 k1} \times \ldots \ldots . L^{\alpha i ki} \times T^{\beta i ki} \ldots \ldots \times L^{\alpha n kn} \times T^{\beta n kn}.$$
$$\Pi = L^{(\alpha 1 k1 + \alpha 2 k2 + \ldots \alpha i ki \ldots + \alpha n kn)} \times T^{(\beta 1 k1 + \beta 2 k2 + \ldots \beta i ki \ldots + \beta n kn)}.$$

Π is dimensieloos indien:

$$\left.\begin{aligned} \alpha 1 k1 + \alpha 2 k2 + \ldots \alpha i ki \ldots + \alpha n kn = 0 \\ \beta 1 k1 + \beta 2 k2 + \ldots \beta i ki \ldots + \beta n kn = 0 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Opmerking ! Voor de grootheden ΔH enz. zijn α_i en β_i bekend.

De coëfficiënten k kan men willekeurig kiezen, op voorwaarde dat aan de vergelijkingen (1) wordt voldaan. In dit geval kan men n - 2 = 4 dimensieloze kentallen vormen.

Juist het dimensieloos zijn is van belang, omdat Π (model) = Π (prototype).

De kunst is nu om in ieder geval de onderzoeksgrootheid ΔH en, de in het experiment te variëren grootheden h, DB en Q, in afzonderlijke kentallen onder te brengen. ΔH en de "meetkondities" h, DB en Q kan men dan direkt vertalen naar het prototype.

Toegepast op de stroming door de put.

		i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
		ΔH	Q	DB	h	A	g
αi	L	1	3	1	1	2	1
βi	T	0	-1	0	0	0	-2

Ingevuld in (1) :

$$k_1 + 3k_2 + k_3 + k_4 + 2k_5 + k_6 = 0$$

$$- k_2 - 2k_6 = 0$$

Uit deze vergelijkingen worden k_5 en k_6 (d.w.z. de machtscoëfficiënten van A en g) opgelost.

$$k_5 = - \tfrac{1}{2}k_1 - \tfrac{5}{4}k_2 - \tfrac{1}{2}k_3 - \tfrac{1}{2}k_4$$

$$k_6 = - \tfrac{1}{2}k_2.$$

k_1, k_2, k_3 en k_4 worden zo gekozen dat elk, één dimensieloos produkt vormt.

Bijv. $\pi 1 = (\Delta H)^1 \times Q^0 \times DB^0 \times h^0 \times A^{k5} \times g^{k6}$

$\pi 1 = (\Delta H)^1 \times A^{-\frac{1}{2}}$

$\pi 1 = \frac{\Delta H}{\sqrt{A}}$

Deze bewerking kan men samenvatten in een soort matrix notatie.

	ΔH	Q	DB	h	A	g
	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$
$\pi 1$	1	0	0	0	$-\frac{1}{2}$	0
$\pi 2$	0	1	0	0	$-\frac{5}{4}$	$-\frac{1}{2}$
$\pi 3$	0	0	1	0	$-\frac{1}{2}$	0
$\pi 4$	0	0	0	1	$-\frac{1}{2}$	0

Resultaat : $\pi 1 = \frac{\Delta H}{\sqrt{A}}$; $\pi 2 = \frac{DB}{\sqrt{A}}$;

$\pi 3 = \frac{Q}{\sqrt{g A^{\frac{5}{2}}}}$; $\pi 4 = \frac{h}{\sqrt{A}}$;

Wanneer men het model aanduidt met een index m en het prototype met een index p, dan moet dus gelden:

$$\left(\frac{\Delta H}{\sqrt{A}}\right)_m = \left(\frac{\Delta H}{\sqrt{A}}\right)_p \qquad (a)$$

$$\left(\frac{Q}{\sqrt{g A^{\frac{5}{2}}}}\right)_m = \left(\frac{Q}{\sqrt{g A^{\frac{5}{2}}}}\right)_p \qquad (b)$$

$$\left(\frac{DB}{\sqrt{A}}\right)_m = \left(\frac{DB}{\sqrt{A}}\right)_p \qquad (c)$$

$$\left(\frac{h}{\sqrt{A}}\right)_m = \left(\frac{h}{\sqrt{A}}\right)_p \qquad (d)$$

De voorwaarden a, c en d duiden op een meetkundige gelijkvormigheid tussen model en prototype.

Voorwaarde (b) betekent dat het Froude getal, Fr, in model en prototype gelijk moet zijn.

$$Fr^2 = \frac{v^2}{g\sqrt{A}} \qquad Fr^2 = \frac{Q^2}{g\,A^{\frac{5}{2}}} \qquad Fr = \frac{Q}{\sqrt{g\,A^{\frac{5}{2}}}}$$

Konsekwenties :

Stel dat de schaalfaktor gelijk is aan n dan moet gelden :

$$(DB)_m = \frac{1}{n}\,(DB)_p$$

$$(h)_m = \frac{1}{n}\,(h)_p$$

$$(Q)_m = \frac{1}{n^{\frac{5}{2}}}\,(Q)_p$$

Voor n = 4 betekent de laatstgenoemde eis :

$$(Q)_m = \frac{1}{32}\,(Q)_p$$

Meetnauwkeurigheid.

Naast de schaalregels is van belang welke eisen men stelt aan de nauwkeurigheid van de metingen.
De resultaten van het onderzoek worden gebruikt in een computerprogramma, waarmee de stijghoogte h en het debiet Q in het rioolnet worden bepaald.
Voor Q en h gelden de volgende nauwkeurigheidseisen:

de absolute fout in Q = a(Q) = 0,05 (l/sec)

de absolute fout in h = a(h) = 0,5 (cm)

Op grond van de schaalregels betekent dit voor het model :

$$a\ (Q,m) = \frac{1}{n^{\frac{5}{2}}} \times a\ (Q) = \frac{1}{n^{\frac{5}{2}}} \times 0{,}05 \quad (l/sec)$$

$$a\ (\Delta h,m) = \frac{1}{n} \times a\ (h) = \frac{1}{n} \times 0{,}5 \quad (cm).$$

Opmerking ! de index m staat weer voor model.
Wat de konsekwenties zijn voor verschillende waarden van n, toont tabel 1

Uiteindelijk is gekozen voor een schaalfaktor van n = 4.
Volgens tabel 1 , moet de meetnauwkeurigheid met betrekking tot Q dan gelijk zijn aan 0,002 (l/sec).
Dit is niet haalbaar; de gebruikte meetflenzen geven Q tot in 0,01 (l/sec) nauwkeurig.
Dit is aanvaard, omdat enerzijds een kleinere waarde van n leidt tot een onhandelbaar groot model en anderzijds, een volumetrische debietsbepaling te veel

tijd zou vergen.
Wat betreft de afmetingen van het model; voor elke nieuwe meetpositie moet men de meetopstelling opnieuw opbouwen. Om dit op eenvoudige wijze te realiseren, is een schaalfaktor van n = 4 wel het minimum.

2.5. Meetopstelling.

In fig. 8 is de put getekend waarmee het onderzoek is uitgevoerd.

De put bestaat uit een betonnen cilinder met een diameter van 250 mm. De put is gestort in een stalen buitenmantel, gevormd door een pijp met een diameter van 350 mm. Aan deze buitenmantel zijn aansluitpijpen Ø 80 bevestigd (zie fig. 9).

Deze pijpen zijn voorzien van een flens voor de bevestiging van de aan- en afvoerleiding. De hoogte waarop ze zijn aangebracht verschilt. De afvoerleiding wordt bevestigd aan pijp 1 (zie fig. 8). De aanvoerleiding wordt achtereenvolgens aangesloten op de pijpen 1 t/m 8.

Zo worden 8 meetposities onderzocht. (8 vers. waarden voor DB)

Onder in de put is een "kruis" van stroomgeleidende goten aangebracht (zie fig. 10).

Een overzicht van de meetopstelling is gegeven in fig. 11

Vanuit de aanvoerput stroomt het water via een buis 1, naar de afsluiter a. Deze dient voor de regeling van het debiet. Op a sluit een slang s aan die de verbinding vormt met de buizen 2 en 3 (zie fig.12) Deze zijn qua hoogte verstelbaar en sluiten aan op de put. Tussen 2 en 3 is een meetflens f aangebracht waarmee Q wordt gemeten.

Afvoer vanuit de put gebeurt via de buis met nummer 4. Met de afsluiter b die hieraan is bevestigd, wordt de waterstand in de put geregeld.

De positie van de "drukpunten" BE en BO (zie hoofdstuk 2.2.) is aangegeven in fig. 13. Het "drukpunt" BE ligt op een afstand van 3 x buisdiameter, gemeten vanuit de putwand. Verondersteld is dat dit voldoende is om het volledige vertragingsverlies in de afvoerbuis te meten.

Voor de drukpunten, in de aansluitpijp en in de afvoerbuis, is een gaatje geboord met een diameter van 1 mm. Hierover heen is een schroefhuls gelast waarin men een slangnippel kan draaien.

Via meetslangen staan BO en BE in verbinding met twee meetreservoirs r (diameter $\pm$ 8 cm). Het niveauverschil in deze reservoirs wordt bepaald met behulp van peilnaalden (zie fig. 14).

Voor de meting van Q wordt het verschil in drukhoogte over de flens gemeten.
De manometerbuizen m zijn verbonden met punten ter weerszijde van de flens. Via twee ijkgrafieken kan men Q aflezen. (bijlagen 2 en 3)

Voor de meting van h is aan de buitenzijde van de put een peilslang p bevestigd. De slang staat via een opening onder in de put met het systeem in verbinding.

Vorafgaande aan de eigenlijke metingen,is onderzocht hoe het model zich gedraagt en of het meetsysteem beantwoordt aan de verwachtingen.
Nagegaan is welke variatie-mogelijkheden er met betrekking tot Q en h bestaan. Voor hoge waarden van Q is h gebonden aan een minimum. De variatiemogelijkheden worden hierdoor beperkt. Fig.15 geeft voor meetpos 1 hiervan een beeld (voor meetpos 1 liggen aan- en afvoerbuis op gelijke hoogte).

Bij verhoging van h via afsluiter b treedt een "terugstuwing" op, dat wil zeggen, dat Q daalt. Een bijregelen via afsluiter a is goed mogelijk.

Voor de meetpos 7 en 8, waarbij de aanvoerbuis vrij hoog ligt, treden er problemen op bij de meting van Q. Door de meetflens wordt lucht aangezogen vanuit de put. Daarom is voor deze meetpos. de meetflens geplaatst in de afvoerleiding.

Wat betreft het meetsysteem; dit blijkt goed te voldoen. Door de nauwe verbinding tussen meetslang en leiding en door de relatief wijde meetreservoirs worden fluktuaties in h_{BO} en h_{BE} sterk gedempt. Een meting m.b.v. peilnaalden is daardoor goed mogelijk.

Daar staat tegenover dat de metingen vrij veel tijd vergen. Een periode van 15 à 20 minuten is ten minste nodig om na wijziging van Q of h, een stabiele stromingstoestand te bereiken.

Bij de metingen voor $\Delta H_u'$ is gewerkt met een microvervalmeter. Door optische vergroting heeft dit instrument een hoge afleesnauwkeurigheid. De fluktuaties in de stijghoogte zijn achter dermate groot, dat de meerwaarde, van dit instrument, een snelle aflezing, verloren gaat door het kunstmatig (slangen - klemmen) aanbrengen van demping.

Bij de meting van Q blijken de variaties in de drukhoogte over de flens vrij klein (max. $\pm$ 1 cm water kolom = 0,01 l/sec). De afwijkingen zijn in ieder geval kleiner dan de door de fabrikant opgegeven nauwkeurigheid van 1 %.

De aflezing van de waterstand in de put, h, via de peilslang is vrij grof (aflezing in (cm)).

De variaties van h in de put zijn echter zo groot, dat dit voldoende is.

3. MODELONDERZOEK.

3.1. Meetprogramma.

Bij het opstellen van een meetprogramma, zijn allereerst de grenzen vastgesteld, waarbinnen Q, DB en h moeten variëren.

- Q Voor het maximum debiet door de put is beschouwd een situatie, waarbij door een rioolbuis Ø 300 water wordt afgevoerd. De max. stroomsnelheid in de buis is max. 2,5 m/sec.

  $Q_{max} = 177$ (l/sec)

  of omgerekend naar modelmaten:

  $Q_{max} = 6$ (l/sec).
- DB Gekozen is voor een maximum buishoogteverschil van 2,5 m.

  Voor het model betekent dit $DB_{max} = 0,63$ (m)
- h Voor de variatie van de waterstand in de put zijn als grenswaarden gekozen een minimum, waarbij h nog juist groter is dan het buishoogteverschil en een maximum waarbij de put volledig gevuld is.

Binnen deze grenzen zijn de volgende tussenwaarden gekozen :

Q = 1,0 - 2,0 - 3,0 - 4,5 en 6,0 (l/sec).

h = 0,20 - 0,40 en 0,75 (m).

DB = 0 - 0,05 - 0,10 - 0,15 - 0,20 - 0,25 - 0,38 en 0,63 (m).

Meting ΔH_t.

Elke waarde voor DB bepaalt 1 meetpositie.

Meetpos.	DB (m)
№ 1	0
№ 2	0,05
№ 3	0,10
№ 4	0,15
№ 5	0,20
№ 6	0,25
№ 7	0,30
№ 8	0,63

Voor elke meetpositie is voor verschillende kombinaties van Q en h het verschil in stijghoogte $h_{BO} - h_{BE}$ gemeten (zie fig. 5).

Per meetpositie zijn ten hoogste 15 (3 x 5) kombinaties van Q en h mogelijk.

Niet alle kombinaties blijken uitvoerbaar (zie pag. 25).

Welke metingen precies zijn gedaan is aangegeven in tabel. 2

Meting $\Delta H_u'$.

Voor de bepaling van $\Delta H_u'$ is gekozen voor meetpos 4. Het verschil in stijghoogte $h_B - h_{BE}$ (zie fig. 7) is voor twee verschillende waarden van Q bepaald.

Bij de bepaling van het stijghoogteverschil $h_{BO} - h_{BE}$, respektievelijk $h_B - H_{BE}$ zijn meerdere waarnemingen gedaan.

In het navolgende zal onder een meting worden verstaan, de "gelijktijdige" aflezing van Q(meetflens), h (peilslang) en de serie aflezingen van het verschil in stijghoogte. Over een periode van ten minste 5 minuten en bij een stabiel niveauverschil Δh zijn minimaal 3 waarnemingen voor het stijghoogteverschil gedaan.

3.2. Overzicht van de uitgevoerde metingen.

De meetresultaten zijn samengevat in de tabellen 3 t/m 11

In tabel 3 is voor meetpos 1, $h_{BO} - h_{BE}$ gegeven als funktie van Q.

De tabellen 4 t/m 10 geven de meetresultaten voor de meetposities 2 t/m 8.

De opgegeven waarden voor $h_{BO} - h_{BE}$ zijn de gemiddelden per meting. Een volledig overzicht van alle waarnemingen is gegeven op bijlage 4

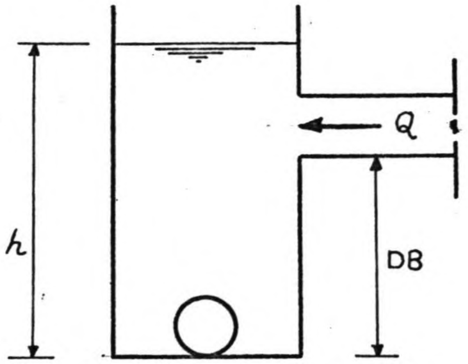
Naast het verschil in stijghoogte is voor een aantal meetposities de tijd T_{KL} genoteerd, benodigd voor een volledige uitspoeling van 1 ml $KMnO_4$. Deze kleurstof werd op T = 0 aan het wateroppervlak toegediend, waarna de tijd werd gemeten die verstrijkt voordat de laatste kleurresten uit de put zijn verdwenen.

Tabel 11 bevat de waarnemingen, gedaan voor de bepaling van $\Delta H_u'$.

Voor de meting van h_B, met behulp van de statische buis (zie par. 2.2.), zijn 4 posities in het horizontale vlak door B onderzocht. De plaats van deze posities ten opzichte van aan- en afvoerbuis is in de schets bij de tabel aangegeven.

4. RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK.

4.1. Het energieverlies over de put, als funktie van het debiet, de waterstand en het buishoogteverschil.



In fig. 16 is voor meetpos 1 (DB = 0) het verband aangegeven tussen ΔH_t en Q. Getekend zijn drie lijnen; de stippellijn geeft de relatie voor h = 0,20 m, de streep-punt-lijn geeft de relatie voor h = 0,40 m en de getrokken lijn voor h = 0,75 m.

In de fig. 17 t/m 23 is dit verband ΔH_t - Q voor de meetpos 2 t/m 8 getekend.

De relaties ΔH_t - Q zijn samengevat in de fig. 24 t/m 26

Fig. 24 geeft voor de 8 verschillende meetposities, het verband, zoals dat geldt voor h = 0,75 m.

In de fig. 25 en 26 is dit gedaan voor h = 0,40 m en h = 0,20 m.

In deze figuren zijn ΔH_t en Q op lineaire schaal uitgezet. In fig. 27 is voor de meetposities 1, 4 en 8 en voor h = 0,75 m de relatie getekend op dubbel-logaritmisch papier.

Fig. 28 en 29 tonen het verband log (ΔH_t) - log(Q) voor h = 0,40 m en h = 0,20 m.

Welke konklusies kan men op grond van deze figuren nu trekken:

1. Geheel volgens de verwachting blijkt voor ΔH_t te gelden :

$$\Delta H_t = c1 \times Q^2.$$

In de fig. 27, 28 en 29 wordt een rechte lijn gevonden met een richtingscoëfficiënt van 2. Uitgedrukt in de snelheidshoogte van het aanstromende water, $\frac{v^2}{2g}$, blijkt voor ΔH_t te gelden :

$$\Delta H_t = c2 \times \frac{v^2}{2g} \text{ ; } c2 = \pm 1,7.$$

2. Uit de fig. 24 t/m 26 blijkt dat er geen éénduidig verband bestaat tussen het energieverlies enerzijds en DB en h anderzijds. Op de relatie tussen h en ΔH_t, resp. DB en ΔH_t, wordt nader ingegaan.

Opmerking!

De resultaten van het onderzoek zijn hier niet gepresenteerd in de vorm van dimensieloze grootheden. Het aantal verschillende waarnemingen bleek daarvoor te klein.

Bovendien is gemikt op resultaten die direkt toepasbaar zijn (inpassing van de putweerstand in een rioolnetberekening).

Het verband tussen h en ΔH_t is in detail onderzocht voor meetpos 4. (DB = 0,15 m). Voor een konstante waarde van Q (Q = 2,8 l/sec) is voor toenemende waarden van h, ΔH_t bepaald. In fig. 30 is op de horizontale as ΔH_t uitgezet en op de vertikale as h.
Bij een bepaalde waarde voor h (h = h grens) wordt een maximum voor ΔH_t gevonden. In dit geval voor h_{grens} = 0,40 m. Zowel voor de waarden van h kleiner dan h_{grens} als voor grotere waarden is ΔH_t kleiner.
Dit komt tot uiting in een variatie van c2 tussen een minimum van 1,58 en een maximum van 1,95 (zie fig. 30).
Naast ΔH_t, is ook het stromingsbeeld boven in de put vastgelegd. Hoe dit stromingsbeeld varieert toont het rechter gedeelte van fig. 30 . Voor $h < h_{grens}$ is er boven in de put sprake van "opstuwing". Het water wordt gestuwd tegen de putwand.
Voor waarden van h groter dan h_{grens} geldt een ander stroombeeld. Aanvankelijk zijn er slechts kleine instabiele neren, boven de instroom-opening. Bij verhoging van h bestrijken deze de gehele putdoorsnede. Uiteindelijk ontstaat een situatie waarbij het water in de put vrij langzaam ronddraait. (circulatie).

De variatie in ΔH_t loopt parallel met een verandering van het stromingsbeeld boven in de put.
Door Liebmann (Liebmann, 1970) is een soortgelijk verschijnsel gekonstateerd.

Fig. 31 is een overdruk van abb. 15 uit zijn proefschrift.

Hij vermeldt daarbij, (letterlijk geciteerd):

"Ab einer Schachtwassertiefe t von ca. 35 - 36 (cm) bzw. einer Überstauung in Schacht von 5 - 6 (cm) (diameter van aan- en afvoerbuis zijn gelijk aan 30 cm (B)), tritt ein Phänomen auf, das in seiner Erscheinung wohl erst selten beobachtet worden ist, da man bisher den Strömungsverlauf in einem Schacht nicht einsehen konnte.

Die Schwingbewegungen in Schacht hören plötzlich auf. Die seitlichen zwei sich gegensinnig drehenden Walzen auf den Auftrittsflächen (bodemvlak van de put (B)) gehen in eine Walze mit vertikaler Achse über, die jetzt den gesamten Schachtquerschnitt einnimmt" (Liebmann, 1970; S.81)

De overeenkomst tussen de figuren 30 en 31 is treffend. Dat in fig. 30 ΔH_t voor $h >> h_{grens}$ niet meer stijgt, komt doordat het water vrij langzaam ronddraait. Voor hogere waarden van Q is zo'n stijging wel gekonstateerd.

Voor een verklaring van de verandering in stroombeeld en het verloop van ΔH_t is voor een aantal meetposities onderzocht hoe lang het duurt voordat 1 ml $KMnO_4$, toegevoegd aan het wateroppervlak, uit de put is verdwenen. Deze tijd is T_{Kl} genoemd, (zie 3.2.). In tabel 12 zijn de waarden voor T_{Kl}, zoals die voor de meetpos 2, 5, 7 en 8 zijn vastgesteld, weergegeven. De algemene tendens die uit de tabel blijkt, is dat een vergroting van DB leidt tot kleinere waarden voor T_{Kl}. Dit wijst op de geleidelijke overgang van een "gemengd systeem" naar een "propstroming". Opmerkelijk zijn de geringe verschillen tussen de meetpos 7 en 8. Voor meetpos 7 geldt: DB = 0,38 m en voor meetpos 8: DB = 0,63 m. Desondanks worden voor meetpos 8 gelijke, of zelfs hogere waarden dan voor meetpos 7 gevonden.

Men kan deze verschijnselen verklaren door aan te nemen, dat over het algemeen in de put drie zônes zijn te onderscheiden, de zônes I, II en III in fig. 32

- In zône I wordt het instromende water vertraagd. Kenmerkend voor deze zône is een sterke turbulentie. De omvang van de zône bepaalt de grootte van het intreeverlies $\Delta H_i'$ (zie par. 2.2.).
- Zône II wordt gevormd door "stagnant" water. Het water cirkuleert om een vertikale as. De gemiddelde verblijftijd van het water in deze zône is vrij hoog. De energieverliezen zijn gering en hangen voornamelijk af van de cirkulatiesnelheid.

- Zône III tenslotte is de afvoerzône.
  Hier treden vrijwel geen verliezen op; het water wordt versneld.

In fig.32 zijn deze zônes voor de meetpos 2, 5, 7, en 8 en voor h = 0,75 (m) getekend.
De omvang van zône I is het grootst voor meetpos 5.
In fig.24 worden voor meetpos 5, ook hogere waarden voor ΔH_t gevonden dan voor de meetpos. 2, 7 en 8.
Voor meetpos 2 overlappen de zônes I en III elkaar.
De omvang van I wordt beperkt door enerzijds het kleine buishoogteverschil en anderzijds de relatief hoge waterdruk ter plaatse van het scheidingsvlak tussen I en II.
Voor de meetpos. 7 en 8 vormt het wateroppervlak de beperkende faktor. Een zône II kan zich niet ontwikkelen.
Het verschijnsel dat ΔH_t daalt bij het overschrijden van een zekere grens waterdiepte (h_{grens}), kan men nu verklaren door het ontstaan van een zône II boven de zône I. De omvang van zône I wordt daardoor beperkt wat tot uiting komt in een daling voor ΔH_t.
In fig. 32 is ook aangegeven hoe T_{Kl} zou veranderen wanneer men de kleurstof niet aan het wateroppervlak maar op een willekeurige hoogte zou toedienen. De hoge waarden voor T_{Kl}, gevonden voor de meetpos 2 en 5 worden veroorzaakt doordat men de kleurstof toedient in zône II.

Uit fig.32 blijkt dat men afhankelijk van de grootte van h en DB drie situaties kan onderscheiden. In fig.33 zijn deze drie apart weergegeven.

- <u>situatie 1.</u> Het buishoogteverschil is klein en beperkt daarmee de omvang van zône I (meetpos 2 in fig.32).
- <u>situatie 2.</u> Noch het buishoogteverschil, noch de waterspiegel vormen een beperking voor de omvang van zône I. Deze situatie is hier verder aangeduid met "vrije expansie". (meetpos 5 in fig.32).
- <u>situatie 3.</u> De waterspiegel beperkt de omvang van zône I (meetpos 8 in fig.32).

Dit idee, het onderscheiden van drie verschillende situaties, die afhankelijk van de grootte van h en DB kunnen optreden, is uitgewerkt voor meetpos 4. Verondersteld is dat voor deze meetpos het buishoogteverschil (DB = 0,15m) geen beperkende faktor vormt. Men heeft dus te maken met hetzij "vrije expansie" (situatie 2), hetzij een beperkte waterdiepte (situatie 3).

Het onderscheid tussen beiden ligt bij het overschrijden van de grensdiepte. Gezocht is nu naar een relatie tussen de coëfficiënt c2 (zie pag.32) , en h - DB. Voor situatie 2, $h > h_{grens}$ geldt, dat een verhoging van h leidt tot een daling van c2 (zône I wordt kleiner). Voor situatie 3 geldt het omgekeerde; een verhoging van h leidt tot grotere waarden voor c2 (zône I kan zich ontwikkelen).

Voor situatie 2, "vrije expansie" is verondersteld

$$c\,2 = f\,1\left(\frac{1}{h-DB}\right)$$

Voor situatie 3, beperkte waterdiepte, is een lineair verband tussen c2 en h-DB aangenomen

$$c\,2 = f\,2\,(h-DB).$$

In fig.34 zijn de "meetpunten" van figuur 30 opnieuw aangegeven.

Op de vertikale as zijn uitgezet ΔH_t en c2 en op de horizontale as h.

Voor waarden van h kleiner dan de grensdiepte h_{grens} geldt een lineair verband tussen c2 en h - DB.

Voor $h > h_{grens}$ treedt een geleidelijke daling van c2 op. Met behulp van een kleinste kwadratenmethode zijn de best passende curven bepaald (zie fig.34).

In de fig. 16 t/m 23 zijn voor elke meetpositie en de daarbij onderscheiden waarden voor h, lijnen getekend die het verband tussen ΔH_t en Q weergeven.

In par. 4.3. zal voor elke kombinatie (h, DB) een coëfficiënt c2 berekend worden (zie tabel 15).

In fig.35 zijn deze waarden voor c2 uitgezet tegen h - DB.

Analoog aan hetgeen voor meetpos 4 is gevonden kan men twee gebieden onderscheiden:

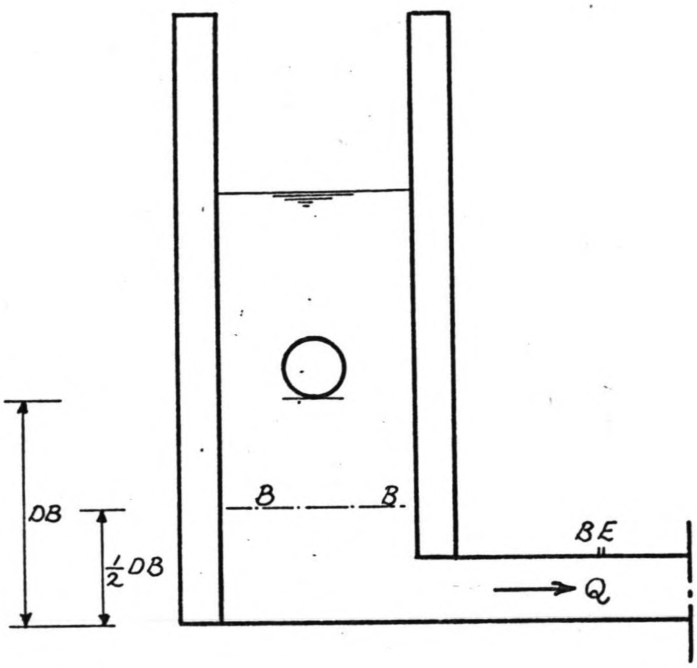
$h < h_{grens}$: beperkte waterdiepte

$h > h_{grens}$: "vrije expansie".

De grensdiepte blijkt ongeveer te liggen bij
h - DB = 0,20 m.
Met een kleinste kwadratenmethode zijn ook hier de relaties c2, (h - DB) bepaald (zie fig. 35).

4.2. Energieverlies in de afvoerbuis.

In par. 2.2. is aangegeven hoe het vertragingsverlies ΔH_u' wordt bepaald.



Voor meetpos 4 (DB = 0,15 m) is voor twee verschillende waarden van Q, het verschil in stijghoogte bepaald tussen een vlak B, op ½ DB van de onderzijde en het punt BE in de afvoerbuis.

Wanneer men de snelheidshoogte in B verwaarloost en aanneemt dat BE voldoende ver benedenstrooms ligt, dan geldt (zie par. 2.2.) :

$$\Delta H_u' = h_B - h_{BE} - \frac{v_{BE}^2}{2g}$$

Gedefiniëerd is nu een coëfficiënt c3,

$$\Delta H_u' = c3' \frac{v_{BE}^2}{2g}$$

c3 geeft dus de grootte van ΔH_u' als funktie van de snelheidshoogte in de afvoerbuis.

Voor c3 geldt:

$$c3 = \frac{(h_B - h_{BE}) - \frac{v_{BE}^2}{2g}}{\frac{v_{BE}^2}{2g}}$$

In tabel 11 zijn de waarnemingen vermeld. Voor de berekeningen van $\Delta H_u'$ en c3 zijn de posities B2 en B3 in het vlak B aangehouden (zie tabel 11). De stijghoogteverschillen $h_B - h_{BE}$ die voor deze posities zijn gemeten, zijn gemiddeld.
In tabel 13 zijn hieruit $\Delta H_u'$ en c3 berekend.
Voor c3 wordt een waarde gevonden van c3 $\approx$ 0,5.

4.3. Foutenanalyse.

In de paragrafen 4.1. en 4.2. zijn de coëfficiënten c2 en c3 bepaald.

$$H_t = c2 \times \frac{v^2}{2g}$$

$$H_u' = c3 \times \frac{v^2}{2g}$$

Voor c2 is een waarde gevonden van $\pm$ 1,7 en voor c3 een waarde van ongeveer 0,5.
Hoe nauwkeurig deze getallen zijn is nog niet vastgesteld.
Daarvoor deze fouten-analyse.

In eerste instantie wordt de aandacht gericht op c2.
Voor elke meetpositie en de daarbij onderscheiden waterstanden wordt de meest aannemelijke waarde voor c2 berekend. Daarnaast wordt een 90% betrouwbaarheidsheid voor de coëfficiënten bepaald.
Voor c3 is volstaan met een afschatting van de maximum fout. Het waarnemingsmateriaal is te beperkt voor een verdergaande analyse.

4.3.1. Weerstandscoëfficiënt c2.

Voor c2 geldt: $c2 = \dfrac{\Delta H_t}{\dfrac{v^2}{2g}}$

Uitgedrukt in de gemeten grootheden Q en h:

$$c2 = \frac{\pi^2 g D^4}{8} \times \frac{h_{bo} - h_{be}}{Q^2} \qquad (1)$$

Ter vereenvoudiging van de schrijfwijze is voor $h_{bo} - h_{be}$ de notatie Δh gebruikt.
Naast Q en Δh is de buisdiameter D gemeten.

De metingen voor Q en Δh zijn ongekorreleerd, dat wil zeggen dat er geen verband bestaat tussen de waarnemingen. De kovariantie cov (Δh,Q) is dus gelijk aan 0. .
Voor de standaard afwijking in c2 ,s(c2), geldt dan (zie o.a. de Vries, 1977 , pag. 14):

$$s(c2)^2 \approx s(\Delta h)^2\left(\frac{\partial(c2)}{\partial(\Delta h)}\right)^2 + s(Q)^2\left(\frac{\partial(c2)}{\partial(Q)}\right)^2 + s(D)^2\left(\frac{\partial(c2)}{\partial(D)}\right)^2 \qquad (2)$$

Uit (1) volgt :

$$\frac{\partial(c2)}{\partial(\Delta h)} = \frac{\pi^2 g D^4}{8} \times \frac{1}{Q^2} = \frac{c2}{\Delta h} \qquad (3)$$

$$\frac{\partial(c2)}{\partial(Q)} = \frac{\pi^2 g D^4}{8} \times -2\frac{\Delta h}{Q^3} = -2\frac{c2}{Q} \qquad (4)$$

$$\frac{\partial(c2)}{\partial(D)} = \frac{4\pi^2 g D^3}{8} \times \frac{\Delta h}{Q^2} = 4\frac{c2}{D} \qquad (5)$$

Substitutie van (3), (4) en (5) in vergelijking (2) geeft:

$$s(c2)^2 \approx s(\Delta h)^2 \times \frac{c2^2}{\Delta h^2} + s(Q)^2 \times 4\frac{c2^2}{Q^2} + s(D)^2 \times 16\frac{c2^2}{D^2} \qquad (6)$$

De juiste waarde voor c2, Δh, Q en D is onbekend. De meest aannemelijke waarde is het gemiddelde van de waarnemingen voor de desbetreffende grootheid ($\overline{c2}$, $\overline{\Delta h}$, $\overline{Q}$, $\overline{D}$).
Voor $\overline{c2}$ geldt :

$$\overline{c2} = \frac{\pi^2 g \overline{D}^4}{8} \times \frac{\overline{\Delta h}}{\overline{Q}^2} \qquad (7)$$

Substitutie van $\overline{c2}$, $\overline{\Delta h}$, $\overline{Q}$ en $\overline{D}$ in vergelijking (6) geeft:

$$\frac{s(c2)^2}{\overline{c2}^2} \approx \frac{s(\Delta h)^2}{\overline{\Delta h}^2} + 4\frac{s(Q)^2}{\overline{Q}^2} + 16\frac{s(D)^2}{\overline{D}^2} \qquad (8)$$

Wanneer de standaardafwijkingen s(Q), s(Δ h) en s(D) bekend zijn kan men met de vergelijkingen (7) en (8), c2 en s(c2) voor een bepaalde kombinatie van Q, h en DB bepalen.

De berekening van s(Δh) en $\overline{\Delta h}$ is aangegeven op bijlage no 4.
S(Q) moet men afschatten. Naast het feit, dat Q varieert, moet men letten op de onnauwkeurigheid van de meetflens.
Voor de variatie in Q is een maximum van 1 cm waterkolom geregistreerd. Voor de nauwkeurigheid van de flenzen wordt door de fabrikant een waarde van 1% opgegeven. In fig.36 zijn beiden getekend. De onnauwkeurigheid van de flens blijkt te allen tijde een grotere afwijking ΔQ te veroorzaken dan de waargenomen variatie in Q.
Voor s(Q) is gekozen $\frac{1}{2}\sqrt{2}$ x maximale fout in Q:

$$\frac{1}{2}\sqrt{2} \times 0{,}01 \times Q.$$

Voor de bepaling van $\overline{D}$ en s(D) is met een schuifmaat, van drie verschillende aansluitpijpen, de diameter bepaald. Per buis zijn twee waarnemingen gedaan. In tabel 14 zijn $\overline{D}$ en s(D) berekend.

Uit Q, h en DB en uit s(Q), s(Δh) en s(D) is, op bijlage no. 5, voor de 89 metingen die zijn gedaan, $\overline{c2}$ en de stand. afw. s(c2) berekend.
Deze 89 metingen hebben betrekking op 16 verschillende kombinaties van h en DB.
Voor elke kombinatie is in fig. 11 t/m 22 een lijn getekend.
Wanneer voor de meting i geldt:
$h = h_0$, $DB = DB_0$ terwijl $\overline{c2} = \overline{c2(i)}$ en $s(c2) = s(c2(i))$, dan geldt voor de verzameling metingen waarvoor $h = h_0$ en $DB = DB_0$

$$\overline{c2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \overline{c2(i)} \tag{9}$$

$$s(c2) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} s(c2(i))^2} \tag{10}$$

De vergelijkingen (9) en (10) zijn gebruikt om voor de verschillende kombinaties van h en DB een $\overline{c2}$ en s(c2) te bepalen. Het resultaat is aangegeven in tabel 15. Vermeld zijn de meest aannemelijke waarde voor $c2 = \overline{c2} = c2(50)$ en een 90%-betrouwbaarheids-interval c2(5) - c2(95).
In fig. 37 is voor verschillende waarden van h en DB de relatie $\Delta H_t - \frac{v^2}{2g}$ getekend met de daarbij geldende betrouwbaarheids-intervallen.

De figuur illustreert nogmaals dat een onderscheiden van verschillende waarden voor c2 als funktie van h en DB reëel is.

Voor praktisch gebruik is tabel 16 samengesteld. Hieruit kan men de putcoëfficiënt c2 als functie van h en DB aflezen.

4.3.2. Weerstandscoëfficiënt c3.

Volgens par. 4.2. geldt voor c3:

$$c3 = \frac{(h_B - h_{BE}) - \frac{v_{BE}^2}{2g}}{\frac{v_{BE}^2}{2g}}$$

of ook (zie par. 4.3.1.) :

$$c3 = \frac{\Delta h - \frac{v^2}{2g}}{\frac{v^2}{2g}}$$

Δh = te meten verschil in stijghoogte

$\frac{v^2}{2g}$ = snelheidshoogte van het water in de afvoerbuis.

Wanneer men de relatieve fout in een willekeurige grootheid G aanduidt met r (G) en de absolute fout met a (G), dan geldt voor c3:

$$r(c3) = r\left(\Delta h - \frac{v^2}{2g}\right) + r\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

$$r(c3) = \frac{a(\Delta h) + \frac{v^2}{2g} \times r\left(\frac{v^2}{2g}\right)}{\Delta h - \frac{v^2}{2g}} + r\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

Uitgedrukt in de gemeten grootheden Q en D geldt voor r $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$

$$r\left(\frac{v^2}{2g}\right) = r\left(\frac{8}{\pi^2 g} \times \frac{Q^2}{D^4}\right) = 2r(Q) + 4r(D)$$

Substitutie in de uitdrukking voor r(c3) geeft:

$$r(c3) = \frac{a(\Delta h) + \frac{v^2}{2g}\left(2r(Q) + 4r(D)\right)}{\Delta h - \frac{v^2}{2g}} + 2r(Q) + 4r(D).$$

Voor a(Δ h), r (Q) en r (D) zijn de volgende schattingen gemaakt:

Δh : Δh berust op de metingen gedaan in B2 en B3 (zie par.4.1.)
De absolute fout per meting is gesteld op 0,5 mm. Deze variatie werd met behulp van de mikrovervalmeter gekonstateerd.
$a(\Delta h) = 0{,}5$ mm.

Q : De relatieve fout in Q, r(Q) is gesteld op 0,01 (zie par. 4.3.1.)

D : Volgens tabel 14 is de relatieve fout in D, r(D) gelijk aan 0,0016.

Wanneer men deze waarden substitueert, voor de meting met Q = 2,4 l/sec, (zie tabel 11) dan blijkt r(c3) = 0,13.

Hieruit volgt c3 = 0,52 $\pm$ 0,07.

Voor de coëfficient c3 is een opgave, tot in tienden nauwkeurig, dus reëel:

<u>c3 = 0,5</u>

<u>Opmerking!</u>

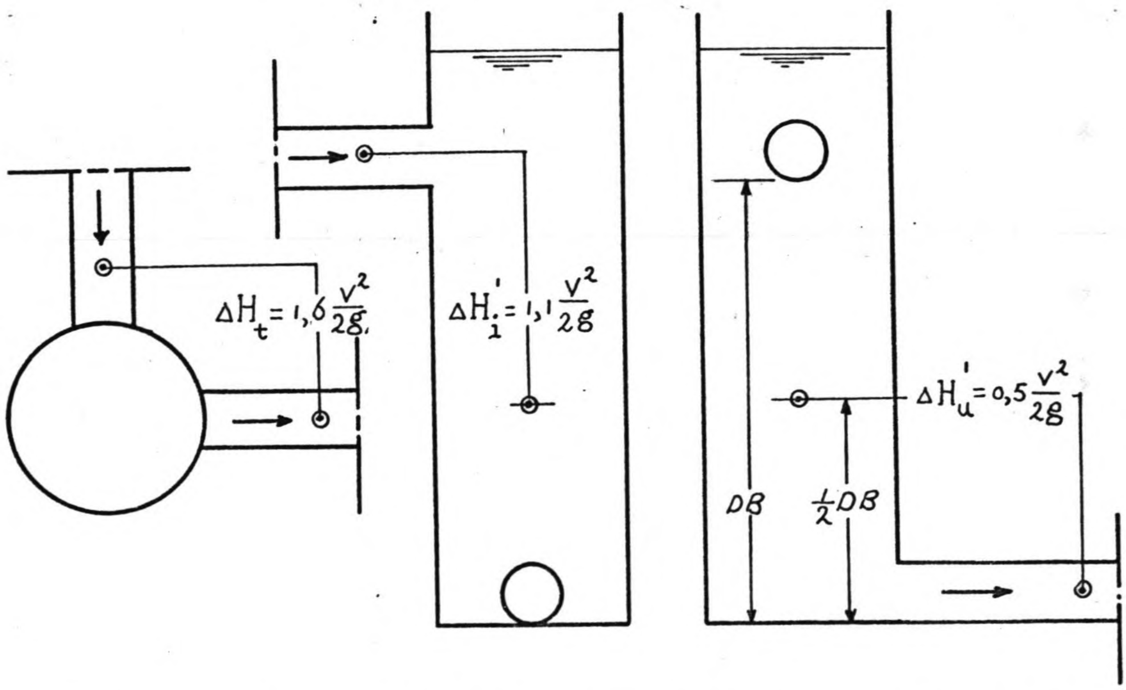
Rekening houdend met de aanwezigheid van de stroomgeleidende goot in de putbodem, is de gevonden waarde voor c3 vrij hoog. Door een meer geleidelijke overgang van buis op put zal c3 dalen (bijv. afronding van de rand).

5. KONKLUSIES.

Voor een juiste interpretatie van de resultaten van het onderzoek is het van belang te wijzen op de in par. 2.4. afgeleide schaalregels.

- Voor de afmetingen van de put, het buishoogteverschil en de gemeten verschillen in stijghoogte geldt een schaal faktor 4.
- Voor het debiet Q een schaalfaktor van 32.

Welke konklusies kan men nu uit het onderzoek trekken.



1. Voor de onderzochte put met cirkelvormige doorsnede (diameter 1,00 m) en voor de onderzochte situatie, aan- en afvoerleiding liggen op verschillende hoogte en maken een hoek van 90° met elkaar, geldt voor het energieverlies ΔH_t:

   $\Delta H_t = c2 \times \frac{v^2}{2g}$; $c2 = 1{,}62 \pm 0{,}17$

   ΔH_t = totale energieverlies over de put

   v = stroomsnelheid van het water in de aanvoerbuis.

2. Het totale energieverlies kan men verdelen in twee komponenten, $\Delta H_i'$ en $\Delta H_u'$.

$\Delta H_i'$ = vertragingsverlies in de put

$\Delta H_u'$ = vertragingsverlies in de afvoerleiding.

Voor $\Delta H_u'$ is gevonden:

$$\Delta H_u' = c3 \times \frac{v^2}{2g}; \; c3 = 0,5 \pm 0,07$$

3. De invloed van DB (het buishoogteverschil) en h (de waterstand in de put) op de grootte van c2 is over het algemeen vrij klein. Fig. 18 en 24 illustreren dit.
Wanneer men de extreme waarden gevonden voor DB = 0, h = 1,00 m en voor DB = 2,5, h = 3,0 m uitsluit,(zie tabel 15), blijkt c2 te variëren tussen c2 = 1,44 en c2 = 1,86.
Een variatie van ± 25% ; dit ondanks de ruime grenzen waarbinnen DB en h zijn gevariëerd ($0 \leq DB \leq 2,50$m en $1,0 < h < 3,0$m).
In ieder geval blijkt de veronderstelling dat een groot buishoogteverschil ook tot hoge waarden voor c2 leidt, onjuist (zie fig. 24).

4. De coëfficiënt c2 blijkt afhankelijk te zijn van het verschil h - DB.
Een maximum voor c2 wordt bereikt wanneer de waterstand h een bepaalde waarde overschrijdt ($h = h_{grens}$).
Bij dit onderzoek is gevonden:

$$h_{grens} - DB = \pm\ 1,00 \text{ m(prototype-maten)}$$

Tabel 16 geeft c2 als funktie van h - DB.

5. Uit een vergelijking van de hier gevonden resultaten met het onderzoek van Liebmann (Liebmann, 1970) blijkt, dat vooral de wijziging in stromingsrichting (hoek van 90^o tussen aan- en afvoerleiding), leidt tot hogere waarden voor ΔH_t.

   Opmerking! Door Liebmann werd voor c2 een maximum van c2 = 0,9 gevonden.

6. AANBEVELINGEN.

De direkte aanleiding voor dit onderzoek was een vraag uit de praktijk.

Hoe groot is de stromingsweerstand van een rioolinspektieput ?

Bij de opzet van het onderzoek is daarom getracht , die "praktijk" zo nauwkeurig mogelijk na te bootsen. Primair ging het om de grootte van het energieverlies ΔH_t. Door het onderzoek echter, worden vragen opgeworden, die veel meer betrekking hebben op de theorie achter de waargenomen verschijnselen.

Met name het "theoretische model" waarmee de grootte van c2 wordt verklaard, zou onderzocht moeten worden. De put die gebouwd werd laat een verfijning van het onderzoek, in die richting, niet toe.

Mijn suggesties voor nader onderzoek zijn dan ook tweeledig:

1. Een voortgezet praktijkgericht onderzoek naar bijv. de invloed van de hoek tussen de aan- en afvoerleiding op de grootte van het energieverlies.
2. Een onderzoek dat primair gericht is op een verklaring van het weerstandsmechanisme in de put. Hiervoor zou men ten minste over een doorzichtig (bijv. plexiglas) model moeten beschikken, waarmee visuele waarneming van de stroming in de put mogelijk is.

Wat betreft de resultaten van het onderzoek: belangrijk is om na te gaan wat de mogelijkheden zijn voor een in-

passing van de putweerstand in een rioolnetberekening. Uit het onderzoek blijkt immers, dat de energieverliezen vrij groot zijn, terwijl de weerstand van de put in de berekeningen wordt verwaarloosd.
Afhankelijk van de moeite (rekentijd) die dit kost en afhankelijk van het effekt op de uitkomsten van de berekening, kan men beoordelen of een dergelijke inpassing de moeite waard is.