

1. Inleiding

Met betrekking tot de wrijvingsweerstand in buisleidingen geldt dat het hierdoor optredende drukverlies af hangt van de geometrie van de leiding (gekaracteriseerd door lengte, diameter en wandruwheid van de leiding), de fysische eigenschappen van de te transporteren vloeistof (gekaracteriseerd door de viscositeit en dichtheid van de vloeistof) en de stromingseigenschappen (gekaracteriseerd door de gemiddelde vloeistofsnelheid).

In [1] is voor water van 10 °C in uitvoerige

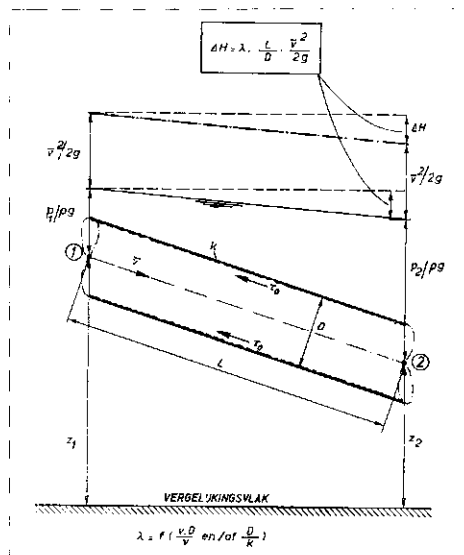


IR. J. WIJDIJKS

Hoofd afd. Pompen en Industriële Circulaties van het Waterloopkundig Laboratorium, Delft

nomogrammen het drukverlies per eenheid van lengte buisleiding als functie van de wandruwheid, leidingdiameter en het debiet aangegeven. De achtergronden van deze nomogrammen, alsmede enige benaderingsformules voor gebruik bij leidingnetwerkberoeeningen of optimaliseringsberoeeningen, zullen worden behandeld. Op de slechts spaarzaam bekende gegevens over de invloed van veroudering op de leidingweerstand zal worden ingegaan. Met betrekking tot het onderwerp waterslag zal na een algemene inleiding — waarin aan de orde komen het begrip waterslag, de oorzaken van waterslag en de hiermee verband houdende voorzieningen — in het bijzonder aandacht besteed worden aan het optreden en de gevolgen van vacuüm in transportleidingen t.g.v. pompuival. Dankzij, in de laatste jaren ontwikkelde en aan proeven getoetste, mathematische modellen is het mogelijk geworden in bepaalde gevallen buffertoren of windketels bij lange transportleidingen voor ruw- en drinkwater achterwege te laten.

Tot slot zullen enige richtlijnen gegeven worden die bij de keuze van terugslagkleppen van belang kunnen zijn, opdat schade door 'slaande' terugslagkleppen voorkomen wordt. Een relatief eenvoudig rekenmodel wordt voorgesteld waarmee de beweging van terugslagkleppen na pompuival voorspeld zou kunnen worden. Een aantal eigenschappen van terugslagkleppen, zoals stromingsweerstand en stromingskrachten als functie van het debiet, moet hiervoor bekend zijn. Indien dergelijke gegevens van terugslagkleppen beschikbaar komen kan de keuze van het toe te passen type terugslagklep aanzienlijk beter gefundeerd geschieden dan thans het geval is.



Afb. 1 - Schema wrijvingsverlies.

$$\Delta H = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (1)$$

of na vermenigvuldiging met ρg :

$$\rho g \Delta H = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 \quad (2)$$

waarin:

ΔH = energiehoofteverlies in m 'vloeistofkolom'

λ = wrijvingsfactor, dimensieloos

L = leidinglengte in m

D = leidingdiameter in m

\bar{v} = gemiddelde snelheid in m/s

g = versnelling van de zwaartekracht in m/s²

ρ = dichtheid van de vloeistof in kg/m³

Het drukverlies $\rho g \Delta H$, uitgedrukt in N/m², stelt in wezen het verlies aan potentiële energie per volume-eenheid vloeistof voor. Uit (2) blijkt dat dit een bepaald gedeelte van de kinetische energie $\frac{1}{2} \rho \bar{v}^2$ per volume-eenheid vloeistof is. De wrijvingsfactor λ wordt bepaald door de verhouding van de gemiddelde snelheid \bar{v} in de leiding en de schuifspanning τ_0 langs de omtrek van de vloeistofkolom. De waarde van λ hangt af van de mate van turbulentie (gekaracteriseerd door het getal van Reynolds

$Re = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu}$, waarin ν de kinematische viscositeit van de vloeistof voorstelt in m²/s) en van de grootte en vorm van de wandoneffenheden van de leiding (gekaracteriseerd door —, waarin k een maat voor de

ribbelhoogte en ribbelform van de wandoneffenheden is).

Een 4-tal stromingstypen kan hierbij onderscheiden worden (zie afb. 2):

1e. Laminaire stroming:

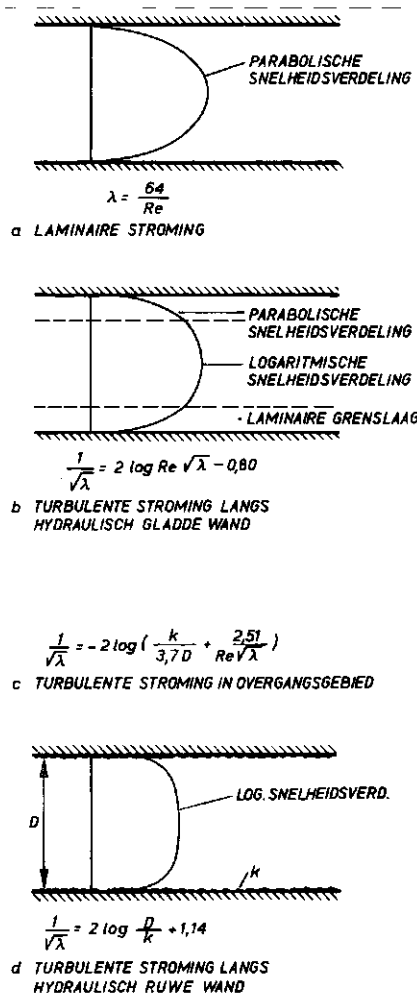
De waterlagen schuiven in het gehele profiel over elkaar heen. λ hangt slechts af van de kinematische viscositeit, gekarakteriseerd door Re . De wandoneffenheden spelen geen rol:

$$\lambda = \frac{Re}{64} \quad (3)$$

De snelheidsverdeling is parabolisch. Uit substitutie van (3) in (1) blijkt dat het energieverlies ΔH evenredig is met de gemiddelde snelheid \bar{v} . Dit stromingstype treedt op voor $Re < 2300$.

2e. Turbulente stroming langs een 'hydraulisch gladde' wand:

De stroming is in het centrum van de leiding turbulent (warrig). Door zijdelingse



Afb. 2 - Stromingstypen.

2. Wrijvingsweerstand in buisleidingen

2.1. Stromingstypen

Voor het wrijvingsverlies in leidingen met ronde doorsnede geldt volgens Darcy-Weisbach (zie ook afb. 1):

uitwisseling van vloeistofdeeltjes ontstaat aldaar een gelijkmatiger snelheidsprofiel (logarithmische snelheidsverdeling). Nabij de wand schuiven de waterlagen nog over elkaar heen. In deze zgn. laminaire grenslaag is de snelheidsverdeling parabolisch. De wandoneffenheden zijn klein t.o.v. de dikte van deze laminaire laag, zodat ze geen rol spelen. λ hangt hiermee weer alleen af van de vloeistofsnelheid, de leidingdiameter en de kinematische viscositeit, gekarakteriseerd door Re . De volgende empirische formule geldt:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = (2 \log Re \sqrt{\lambda}) - 0,80 \quad (4)$$

Bij een gegeven leidingdiameter D zal bij toename van Re (= vergroting van het debiet) de turbulentie toenemen, de laminaire laag dunner worden, λ kleiner worden; maar moet de relatieve wand-ruwheid — groter zijn om dit stromings-type te verkrijgen.

3e. *Turbulente stroming langs een 'hydraulisch ruwe' wand:*

De stroming is over de gehele leiding-doorsnede turbulent. Een laminaire grenslaag treedt niet meer op. λ hangt alleen af van de wandruwheid en de leidingdiameter;

gekaracteriseerd door $\frac{D}{k}$. Door Nikuradse

werd het verband tussen λ en $\frac{D}{k}$

empirisch vastgesteld voor stroming in leidingen beplakt met zandkorrels van nage-noeg constante diameter (aan te duiden als zandruwheid k):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = (2 \log \frac{D}{k}) + 1,14 \quad (5)$$

Voor in de praktijk gebruikelijke leidingen met een zgn. technische (ongelijkmatige) ruwheid wordt een equivalente zandruwheid opgegeven. Dit betekent dat de beschouwde praktijkleiding een zelfde wrijvingsweerstand heeft als een leiding beplakt met zandkorrels van de opgegeven grootte.

4e. *Turbulente stroming in het overgangsg gebied tussen 'hydraulisch glad' en 'hydraulisch ruw':*

Door Colebrook is voor praktijkleidingen bij afname van het getal van Reynolds beneden een bepaalde waarde een geleidelijke toename van λ aangetoond. De wijze waarop λ toeneemt hangt af van de aard van de wandruwheid (soort materiaal en

bewerking van de leiding). Er treedt een laminaire grenslaag op die door de grotere wandoneffenheden plaatselijk verstoord wordt. Als goed gemiddelde kan de volgende formule worden toegepast:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (6)$$

voor $0,6 \left(\frac{D}{k} \right)^{5/4} < Re < 800 \cdot \frac{D}{k}$

Deze formule nadert bij verwaarlozen van k — naar de formule voor 'hydraulisch glad' D

en bij verwaarlozen van $\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}}$ naar de formule voor 'hydraulisch ruw'.

In afb. 3 is het verband tussen λ , Re en $\frac{D}{k}$

grafisch aangegeven voor de 4 stromingstypen. Deze grafiek vormt de basis van een groot aantal nomogrammen in [1], waarin voor water van 10 °C direct het energieverlies per m leidinglengte afgelezen kan worden als functie van de leidingdiameter, de afvoer en de k -waarde.

Voor de vaststelling van λ zal in veel gevallen de waarde van k geschat moeten worden. Deze zgn. k -waarde kan liggen tussen 0,01 mm voor bijv. kunststofleidingen en 5 mm voor pokvormig aange-taste onbeschermde gietijzeren leidingen. In [1] is een richtlijn voor de verschillende buismaterialen aangegeven. In de opgegeven waarden is de invloed van voegen tussen de

afzonderlijke samenstellende leidingdelen inbegrepen. Bij het ontwerpen van een leiding zal men het tot op heden met een dergelijke eigen schatting of een opgave van de leidingfabrikant moeten doen. Met metingen aan de in bedrijf zijnde leiding zal dan aangetoond moeten worden of de gekozen waarde juist is. Ongewenste verrassingen achteraf zouden misschien voorkomen kunnen worden door *directe* meting van de ruwheid en hydraulische controle metingen, teneinde de equivalente zandruwheid per produkt vast te stellen. In bepaalde gevallen zou daarbij de noodzaak van het al of niet glad afwerken van bijv. grote betonbuizen vastgesteld kunnen worden.

2.2. *Benaderingsformules voor de wrijvings-factor λ*

De formule van Colebrook [6] is betrekkelijk ingewikkeld en schrikt daardoor voor directe toepassing wat af; λ is bovendien impliciet geschreven.

Voor voortgezette berekeningen zoals leidingnetberekeningen of optimaliserings-berekeningen bestaan de volgende mogelijk-heden:

a. *Toepassing van een iteratie-methode volgens [2]:*

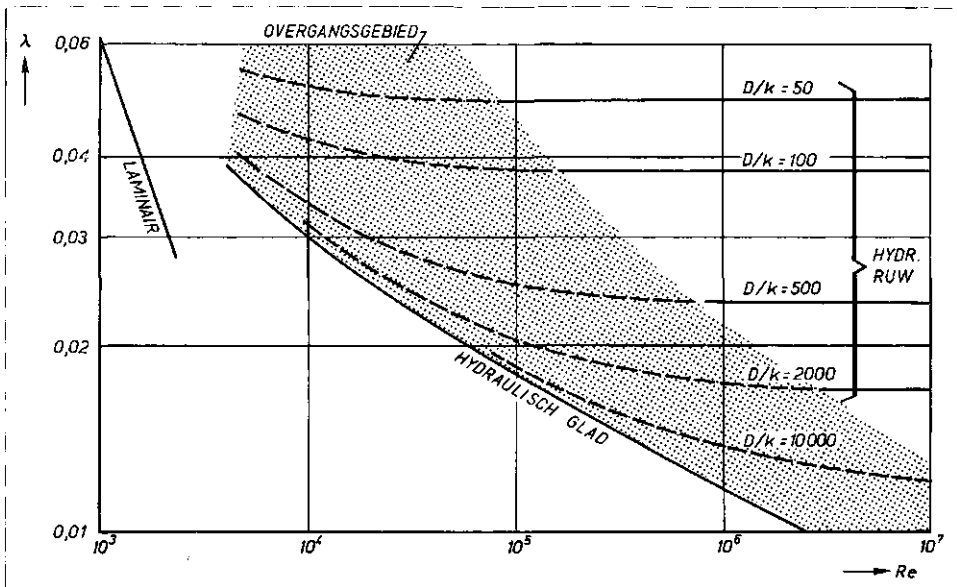
Schat λ_1 volgens

$$\frac{1}{\lambda_1} = -2 \log \frac{k}{3,7 D}$$

Bereken λ_2 volgens

$$\frac{1}{\lambda_2} = -2 \log \left(\frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda_1}} \right)$$

Afb. 3 - Stromingstypen en verband tussen λ , Re en $\frac{D}{k}$



Bereken λ_3 volgens

$$\frac{1}{\lambda_3} = -2 \log \left(\frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda_2}} \right)$$

Na resp. 2-3-6 iteraties wijkt de aldus berekende waarde van λ 5% - 1% - < 1% af van (6) bij gebruik van een rekenmachine. Bij gebruik van een rekenschuif zijn deze percentages afwijking resp.: 10% - 2% - < 2%.

b. Toepassing van exponentiële formules volgens Lamont [3]:

De exponentiële formules zijn allen van de gedaante:

$$\lambda = \frac{const.}{Re^\alpha \cdot \left(\frac{D}{k}\right)^\beta} \quad (7)$$

De volgende 'ruwheidsgebieden' worden hierbij onderscheiden:

zeer ruw	$\frac{D}{k} : 2 - 10$
matig ruw	$\frac{D}{k} : 10 - 200$
weinig ruw	$\frac{D}{k} : 200 - 20.000$
glad	$\frac{D}{k} > 20.000$

Voor elk van deze gebieden zijn de waarden van de const., α en β , alsmede de nauwkeurigheid van λ t.o.v. (4), (5) en (6), in tabel I aangegeven. Per ruwheidsgebied is een aantal factoren en exponenten mogelijk. De nauwkeurigheid waarmee λ volgens deze wijze bepaald wordt ligt in de orde van 5 - 7% t.o.v. (4), (5) en (6).

2.3. Afwijkingen van de ontwerpwaarde voor λ

Afwijkingen van de volgens het voorgaande

TABEL I - Exponentiële benadering volgens $\lambda = const. / Re^\alpha \cdot \left(\frac{D}{k}\right)^\beta$

Gebied	Formule	const.	α	β	Re	Fout
zeer ruw	R ₁ *	0,529	0	0,73	onbeperkt	4,6
matig ruw	R ₂ *	0,2578	0	0,414	onbeperkt	5,4
	T ₂	0,459	0,115	0,2745	> 3.000	5
weinig ruw	T ₃ *	0,2149	0,115	0,129	> 3.000	7
	R ₃	0,0933	0	0,22	onbeperkt	4,6
	S ₃	0,262	0,2292	0	3.000 - 10 ⁶	4,6
glad	S ₃ (< 300)	0,262	0,2292	0	3.000 - 10 ⁶	4,6
	S ₄ (> 300) *	0,1059	0,158	0	10 ⁵ - 10 ⁸	3,8

* meest waarschijnlijk

bepaalde waarde van λ kunnen optreden door de volgende oorzaken:

1. *Afwijking van de temperatuur van de vloeistof* t.o.v. de ontwerptemperatuur. Een afwijking van 10 °C t.o.v. 10 °C kan een afwijking van 10% in λ opleveren ten gevolge van wijziging van de viscositeit van de vloeistof.
2. Door *veroudering* kan de nuttige diameter afnemen en de k-waarde toenemen.
3. Door *luchtinsluitingen* in de leiding kan door plaatselijke extra wervelverliezen of drukopbouw de weerstand toenemen.

Voorspellen van verouderingseffecten is bijzonder moeilijk. Toename van de weerstand kan veroorzaakt worden door slijmvorming, bacteriëngroei, aanslibbing en aantasting van het leidingmateriaal. Het laatst genoemde kan zich manifesteren als plaatselijke knobbelvorming of als een min of meer gelijkmatige aankoeking (opbouw van aangetast materiaal met chemische bestanddelen uit de vloeistof).

Bij ruw water heeft een *gelijkmatige aanslibbing* weinig invloed op de k-waarde. De afname van de diameter speelt een ondergeschikte rol. *Ribbelvormige aanslibbing* kan echter tot aanmerkelijke weerstandsverhoging leiden. Een bekend voorbeeld is de Ecker transportleiding, waarin ten gevolge van tijdelijke afwijkende behandeling van het water aanslibbing met ribbels (lengte ca. 5 mm, hoogte ca. 0,7 mm) een wandruwheid overeenkomend met $k = 10$ mm werd opgebouwd. De

TABEL II - Enige voorbeelden van capaciteitsafname door veroudering

	Re	D in mm	λ_2/λ_1	Q_2/Q_1
Leitzachwerk	1 à 5.10 ⁶	2000	1,88	73%
Bévercé	1 à 5.10 ⁶	2000	1,70	77%
Cavaglia	1 à 3.10 ⁶	1200	2,25	67%
Ecker	1 à 6.10 ⁵	500	2,75	60%

$$\lambda_1 = \lambda \text{ 'nieuw' } \quad \lambda_2 = \lambda \text{ 'oud' }$$

$$Q_1 = Q \text{ 'nieuw' } \quad Q_2 = Q \text{ 'oud' }$$

capaciteit van de leiding nam hierdoor tot 60% af. Andere voorbeelden ontleend aan [4] zijn aangegeven in tabel II.

De invloed van *slijmvorming en bacteriëngroei* op de k-waarde kan globaal als functie van de tijd benaderd worden door:

$$k_t = k_0 + \alpha t \quad (8)$$

waarin:

k_t = k-waarde na t jaren in mm

k_0 = k-waarde nieuw in mm

α = toename van k in mm/jaar

t = tijd in jaren

De factor α is hierin afhankelijk van de soort water en het leidingmateriaal.

Door Lamont [3] wordt een aantal categorieën onderscheiden (zie tabel III).

TABEL III - Schatting 'k' tengevolge van slijmvorming en aantasting volgens $k_t = k_0 + \alpha t$

gebied	aantasting	α in mm/j
I	licht	0,025
II	middelmatig	0,075
III	aanmerkelijk	0,250
IV	zwaar	0,750

Afhankelijk van de categorie kan de k-waarde in 10 jaar toenemen met 0,2 tot 7,5 mm. In Engeland heeft men voor beklede gietijzeren leidingen deze categorieën kunnen vaststellen naar de herkomst van het ruwe water. Of in Nederland iets dergelijks mogelijk is, is niet bekend. Op grond van de literatuur kunnen nog de volgende algemene opmerkingen gemaakt worden:

1. Bij niet-beschermde betonnen en asbest-cement leidingen of leidingen met een cement bekleding kan λ in de eerste jaren met 5 à 10% toenemen door een schuurpapierachtig oppervlak dat dan ontstaat. Bestrijken van dergelijke leidingen met een bitumenverf voorkomt dit verschijnsel.
2. Gladde niet ijzerhoudende leidingen en kunststofleidingen ondergaan vrijwel geen wijziging van λ indien hierdoor normaal gezuiverd water wordt afgevoerd.
3. In leidingen bekleed met cement of bitumen kan bij *ruw water* slijmvorming optreden. Dit kan leiden tot een aanmerkelijke afname van het debiet.
4. Onbektelede gietijzeren leidingen kunnen bijzonder gevoelig zijn voor aantasting door ruw water.

Achterblijven van lucht in hoge punten van een leidingtracé kan leiden tot aanmerkelijk grotere leidingverliezen dan uit de k-waarde volgt. In opdracht van de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage is

onlangs door het Waterloopkundig Laboratorium een literatuuronderzoek verricht om na te gaan bij welke buishelling en watersnelheid lucht wordt meegesleurd. Zeer globaal kan de volgende formule als veilige benadering gebruikt worden (zie ook afb. 4).

$$v_{min} = 1,23 \sqrt{gD \sin \alpha} \quad (9)$$

waarin:

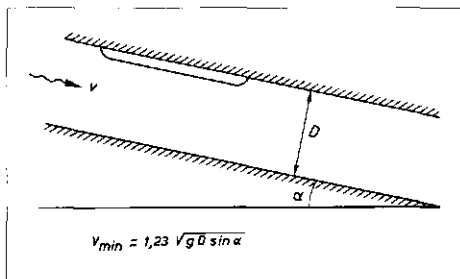
- v_{min} = minimale snelheid waarbij alle lucht wordt meegesleurd, in m/s
- g = versnelling van de zwaartekracht in m/s^2
- D = diameter van de leiding in m
- $\sin \alpha$ = helling van de leiding, dimensieloos

Dit betekent dat bij een leiding met diameter 1 m en helling 1 : 15 een watersnelheid van 1 m/s voldoende is om achterblijven van lucht te voorkomen. Voorgaande formule is een extrapolatie van proeven in leidingen met betrekkelijk kleine diameter (orde 1 - 10 cm). Behalve weerstandsverhoging kan achterblijven van lucht in een leiding ook leiden tot ongewenste waterslagverschijnselen (bijv. bij het aanzetten van pompen). Indien de economische belangen die hiermee samenhangen groot genoeg zijn, zou verder onderzoek gericht op grotere leidingdiameters door een samenwerkingsverband van bijv. de gezamenlijke drinkwaterleidingen en enige ingenieursbureau's gestimuleerd kunnen worden.

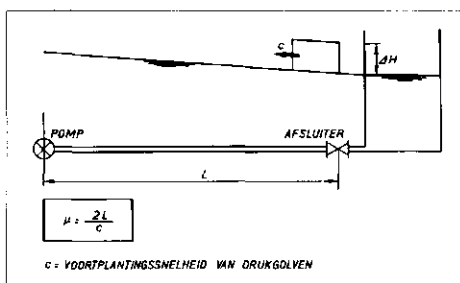
3. Waterslag

3.1. Optreden van waterslag

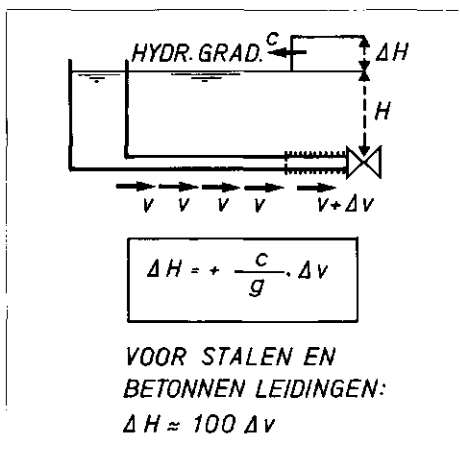
Waterslag is het best te definiëren als: Het optreden van drukveranderingen in gesloten leidingen veroorzaakt door snelheidsveranderingen in de vloeistofstroom. Waterslag kan daarom optreden in alle soorten vloeistofleidingen waarin *debiet*-veranderingen optreden. Dus zowel in *korte* als in *lange* leidingen voor olie, rioolwater, drinkwater, koelwater, baggerspecie enz. Hoe *groter* en *snel* de snelheidsveranderingen zijn hoe *groter* de drukveranderingen zullen zijn. *Snel* dient hierbij in relatie gezien te worden met de looptijd μ van drukgolven (zie afb. 5). Afhankelijk van het leidingmateriaal, de vloeistof, de diameter en wanddikte van de leiding kan de voortplantingssnelheid c van drukgolven liggen tussen 300 m/s en 1000 m/s. Bij vrije gasbellen in de vloeistof kan c nog *aanmerkelijk* lager zijn. Het verband tussen snelheidsverandering en drukverandering werd voor het eerst omstreeks 1900 door Joukowsky in een drinkwaterleiding van Moskou gemeten. Onder verwaarlozing van het wrijvingsverlies in de leiding en voor het geval dat



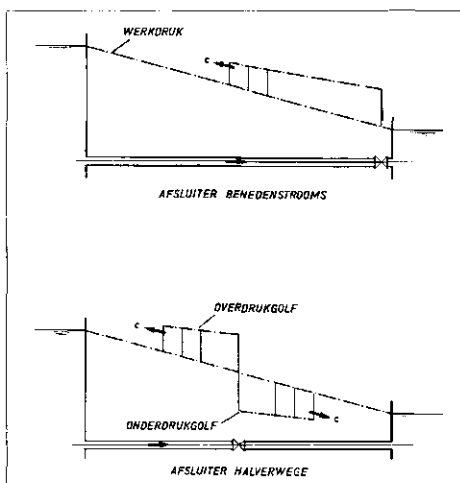
Afb. 4 - Meenemen van lucht in een hellende leiding.



Afb. 5 - Looptijd μ .



Afb. 6 - Formule van Joukowsky.



Afb. 7 - Gevolgen van het sluiten van een afsluiter.

de snelheidsverandering optreedt in een tijd korter dan de looptijd μ , leidde hij uit de wet van Newton af (zie afb. 6):

$$\Delta H = \frac{c}{g} \cdot \Delta v \quad (10)$$

Dit betekent dat bij relatief kleine snelheidsveranderingen reeds betrekkelijk grote drukhoogte-veranderingen zullen optreden. Bij een snelheidsverandering van 0,1 m/s in een stalen leiding zal een drukhoogte-verandering optreden van 10 m waterkolom = 1 atm.

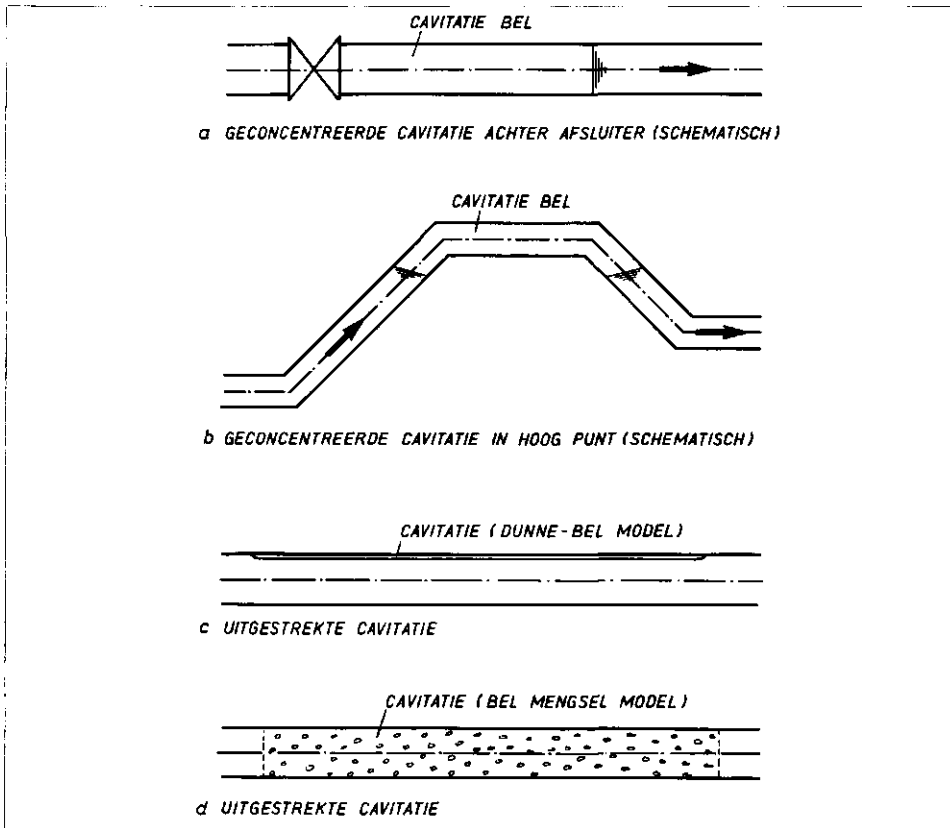
Het voorgaande is in de meeste gevallen slechts van kwalitatief belang omdat niet voldaan wordt aan de voorwaarden van Joukowsky:

1. De tijd waarin de snelheidsverandering optreedt, kan groter zijn dan de looptijd μ . Dit betekent dat de drukverandering kleiner wordt dan volgens (10), als gevolg van reflecties van de drukgolf tegen de leidingeinden.
2. Het wrijvingsverlies in de leiding kan *aanmerkelijk* zijn in vergelijking met de gemiddelde druk in de leiding. Dit betekent dat de drukveranderingen groter worden dan volgens (10).

In de loop der jaren zijn goede, aan de praktijk getoetste, berekeningsmethoden ontwikkeld: grafische methoden zowel als methoden geschikt voor de rekenmachine.

3.2. Oorzaken van waterslag in de praktijk

Waterslag kan in de praktijk o.a. veroorzaakt worden door *manipulaties met afsluiters*. Hierbij kunnen zowel over- als onderdrukken optreden (zie afb. 7). Bij onderdrukgolven kan de dampspanning van de vloeistof bereikt worden, er treedt dan cavitatie op ('holle ruimte'-vorming). In een lange leiding wordt vaak, afhankelijk van de wrijvingstoestand in de leiding, het debiet pas beïnvloed gedurende het laatste deel van het sluittraject van de afsluiter. Zo bedraagt voor een 20 km lange leiding met diameter 1 m en snelheid 1,2 m/s v^2 het wrijvingsverlies ongeveer $400 \frac{v^2}{2g}$. Indien een schuifafsluiter aan het benedenstroomse einde wordt dichtgedraaid bedraagt de weerstand over de schuifafsluiter v^2 in 88 % gesloten stand ongeveer $100 \frac{v^2}{2g}$. De totale weerstand bedraagt dan $500 \frac{v^2}{2g}$. Dat betekent dat het debiet dan nog zeker $\frac{400}{90\% (\sqrt{\frac{400}{500}})}$ van het oorspronkelijke 500



Afb. 8 - Cavitatievormen.

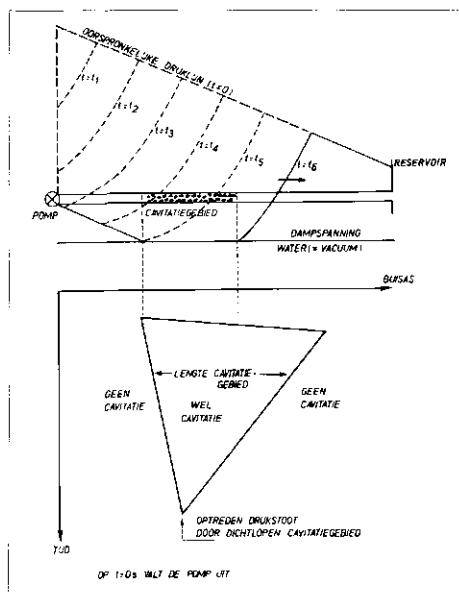
debiet bedraagt. Hieruit volgt dat voor een totale sluittijd van $10 \mu = 400$ s de afsluiter in feite het debiet in 1 looptijd terugbrengt van 90 % naar 0 %. Er zal dan bij de afsluiter een drukverhoging ontstaan van

$$c \quad . 0,9 \cdot 1,2 \approx 110 \text{ m waterkolom.}$$

g

Ten gevolge van de wrijving zal dit nog meer zijn.

Waterslag kan ook opgewekt worden door aan- en uitschakelen van pompen of door pomputval als gevolg van storing in de energievoorziening (zie afb. 9). Ook hierbij kan de onderdruk golf zo groot zijn dat ergens in de leiding cavitatie optreedt. Voornoemde cavitatie kan op een vaste plaats optreden, waarbij een groot gedeelte van de leidingdoorsnede door gas of damp wordt ingenomen (uitgestrekte cavitatie) of in uitgestrekte leidingdelen, waarbij een klein gedeelte van de leidingdoorsnede door gas of damp wordt ingenomen (geconcentreerde cavitatie) of in uitgestrekte leidingdelen, waarbij een klein gedeelte van de leidingdoorsnede door gas of damp wordt ingenomen (uitgestrekte cavitatie). Geconcentreerde cavitatie kan optreden direct benedenstrooms van een afsluiter of in een hoog punt van het leidingtracé (zie afb. 8a-b). Het kan ook optreden direct achter een pomp indien de persleiding aldaar hoog ligt t.o.v. het zuigpeil van de pomp (bijv. bij grondwaterpompen met een persleiding 10 - 15 m boven de grondwater-spiegel). Uitgestrekte cavitatie kan in lange



Afb. 9 - Pomputval met uitgestrekte cavitatie.

transportleidingen bij pomputval als volgt optreden (zie afb. 9). Na pomputval ontstaat een onderdruk golf. Deze plant zich door de leiding voort; een uitgestrekt gebied met cavitatie ontstaat en loopt daarna ten gevolge van de benedenstroomse hogere druk weer dicht. Zowel bij het dichtlopen van geconcentreerde als uitgestrekte cavitatie kunnen hoge drukken optreden.

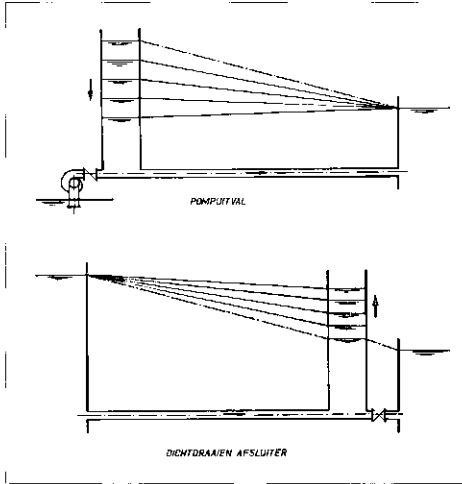
3.3. Berekeningsmogelijkheden en waterslagvoorzieningen

Met rekenmachineprogramma's is het reeds geruime tijd mogelijk gecompliceerde leidingsystemen op waterslag door te rekenen. Men dient zich er echter terdege rekenschap van te geven dat in wezen de juistheid van de randvoorwaarden bepalend is voor de nauwkeurigheid van de uitkomsten. Onder randvoorwaarden zijn niet alleen te verstaan de karakteristieken van pompen, afsluiters of terugslagkleppen, maar ook het gedrag van de vloeistof voor die gevallen waarin de dampspanning benaderd wordt.

Op grond van berekeningen kan vastgesteld worden of bijzondere voorzieningen nodig zijn. Waterslagvoorzieningen worden toegepast om de volgende redenen:

1. Ter voorkoming van te hoge drukken.
2. Ter voorkoming van onderdrukken. Bijv. bij drinkwaterleidingen wegens de kans op aantrekken van vreemd water of wegens niet bestand zijn van de leiding of leidingverbinding tegen onderdruk.
3. Ter voorkoming van geconcentreerde of uitgestrekte cavitatie, meestal alleen in die gevallen waarbij het dichtlopen ontoelaatbare drukken geeft of frequent voorkomen van dit verschijnsel ongewenst is.

De voorzieningen berusten er allen op de snelheidsverandering in de leiding minder snel te maken ofwel de debieten geleidelijker te laten toe- of afnemen. Bij normaal bedrijf betekent dit regeling van de afsluiters en pompen. Hoe dit moet gebeuren kan zonodig bepaald worden met waterslagberekeningen. Bij noodgevallen, als snelsluitende afsluiters of pomputval door storing in de energievoorziening worden de snelle snelheidsveranderingen voorkomen door het leidingdebiet te laten 'overnemen' door een voorziening die 'zelf' zorgt voor geleidelijke afname. Een veel toegepaste voorziening is de buffertoren of de windketel. De werking van een buffertoren is aangegeven in afb. 10. Een windketel werkt volgens hetzelfde principe. De vloeistof is in dat geval laag opgeslagen met daarboven een luchtkussen. Enige resultaten van berekeningen, uitgevoerd voor een recent gebouwde transportleiding met buffertoren, zijn aangegeven in afb. 11 en 12. Wegens de relatief kleine schachtdiameter van de toren (2 m) is een ruime kelder (diameter 4 m, lengte 25 m) nodig om leegslingeren van de toren — met luchtaanzuiging naar de leiding — te voorkomen. De max. onderdruk in de leiding is beperkt tot ca. 0,5 m waterkolom. Het leidingdebiet neemt zeer geleidelijk in ca. 200 s af tot nul. Bij der-

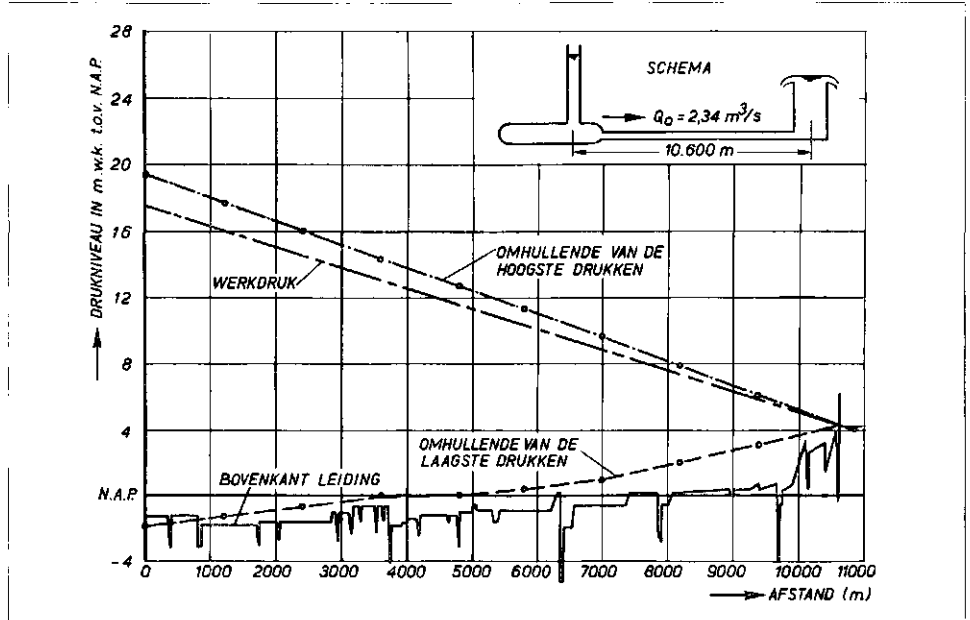
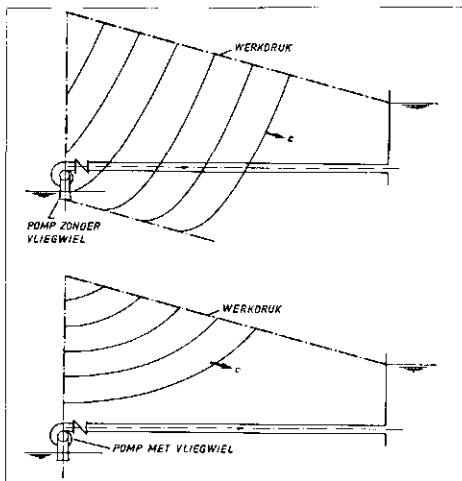


Afb. 10 - Effect van een buffertoren.

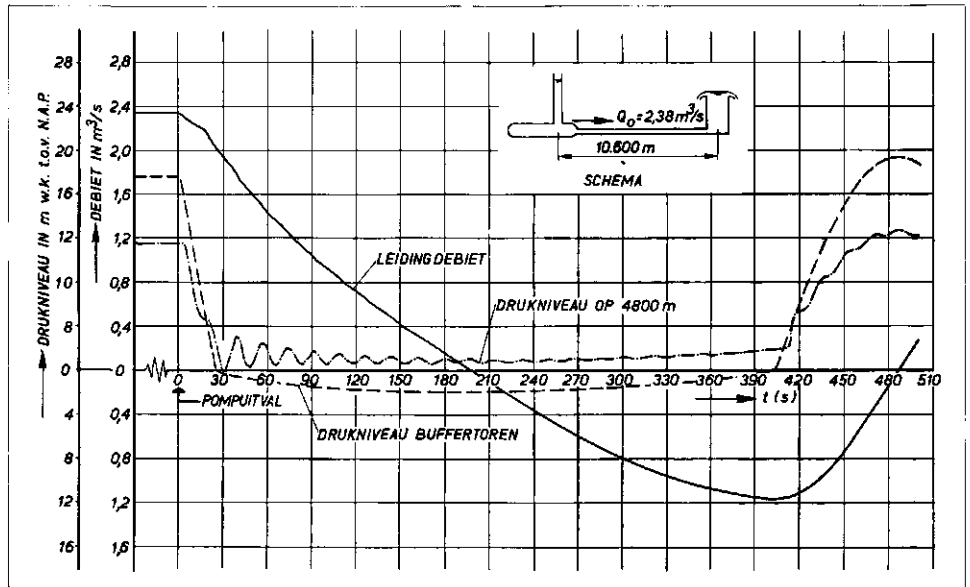
gelijke voorzieningen dient veel aandacht besteed te worden aan de keuze van de terugslagkleppen. Hierop wordt in 3.5 nader ingegaan. Een andere waterslagvoorziening die nogal eens wordt toegepast om grote onderdrukken bij pomputval te vermijden is een vliegwiel op de pomp. In afb. 13 is het effect van een dergelijke voorziening aangegeven: zonder vliegwiel bestaat kans op cavitatie in de leiding, met vliegwiel neemt het debiet geleidelijker af en treden minder grote onderdrukken op als gevolg van reflecties van drukgolven tegen het benedenstroomse reservoir. Toepassing van vliegwielen is in het algemeen slechts zinvol voor leidingen korter dan 3 km.

Om olieleidingen en hoge-druk watertransportleidingen tegen ontoelaatbare overdrukken te beschermen worden nogal eens zgn. drukbegrenzers (pressure relief valves) toegepast. Twee principes zijn aangegeven in afb. 14. Van belang is dat deze voorzieningen in staat zijn de gewenste hoeveelheid vloeistof af te voeren bij de gewenste drukbegrenzingswaarde en dat ze

Afb. 13 - Effect van een vliegwiel.

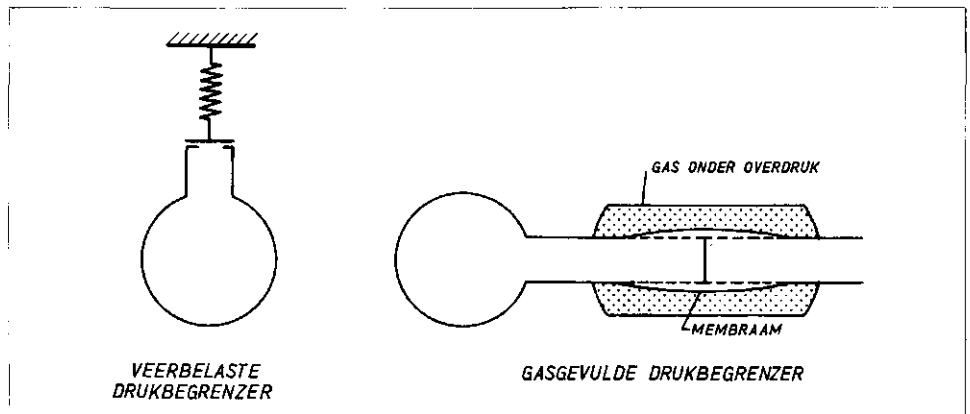


Afb. 11 - Extreme drukken in een leiding met buffertoren.



Afb. 12 - Debiet- en drukverloop in een leiding met buffertoren.

Afb. 14 - Voorbeelden drukbegrenzertypen.

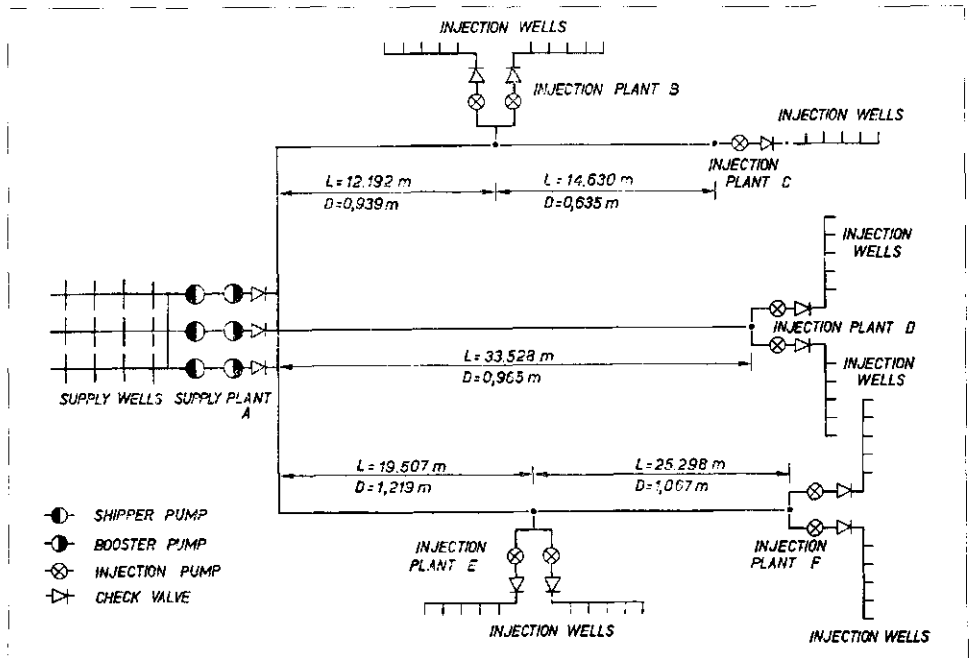


snel reageren. Het laatste houdt in dat ze zo dicht mogelijk op de leiding geplaatst moeten worden en dat ze een kleine traagheid hebben. Benodigde aantallen en typen kunnen op grond van waterslagberekeningen bepaald worden. Recent werden drukbegrenzers toegepast op een waterinjectiesysteem voor de oliewinning ter beveiliging van de leiding bij uitval van de 'injectieplants' (zie afb. 15). Bij deze installatie bedraagt de normale werkdruk aan de perszijde van de 'supply plant' 700 m waterkolom.

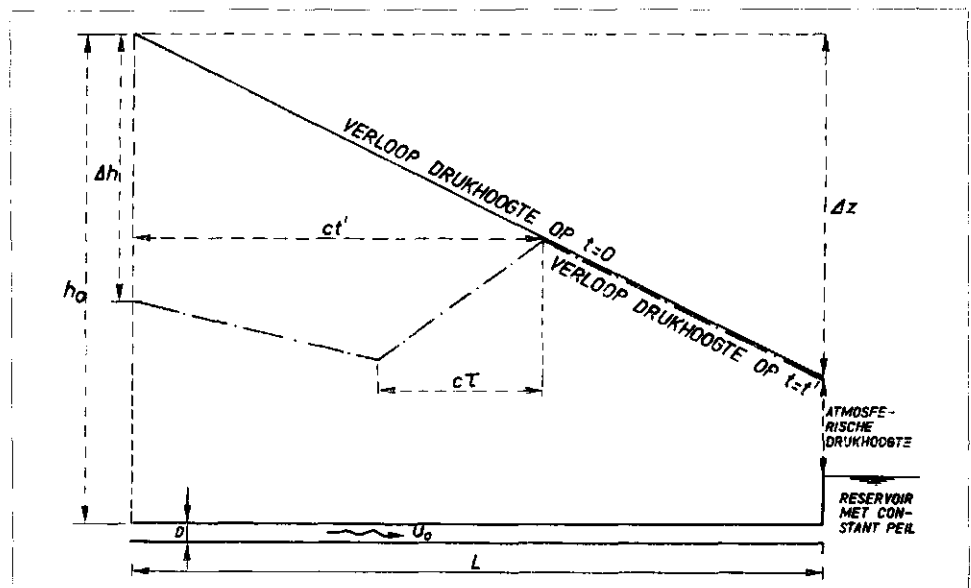
3.4. Uitgestrekte cavitatie

Zoals reeds is opgemerkt kan in lange transportleidingen uitgestrekte cavitatie ontstaan t.g.v. pompuitval. Tot voor enige jaren werden veel buffertoren of windketels gebouwd om dit verschijnsel te voorkomen wegens onbekendheid met de gevolgen van het dichtlopen van dergelijke uitgestrekte cavitatie. Bij de Technische Hogeschool Delft (Laboratorium voor Vloeistofmechanica) en het Waterloopkundig Laboratorium zijn daarom theoriën ontwikkeld die dit verschijnsel beschrijven [8]. Toetsing van deze theoriën heeft inmiddels met succes in modellen plaats gevonden. Op grond hiervan zullen belangrijke transportleidingen zoals Biesbosch-Berenplaat (27 km met diameter 1,80 m) en Andelse Maas-duinen niet van een buffertoren of windketel worden voorzien. In principe gebeurt na pompuitval het volgende (zie afb. 9): de druk bij de pomp daalt snel — er loopt een onderdukgolf de leiding in — op een bepaalde plaats ontstaat cavitatie — een cavitatiegebied ontstaat en breidt zich uit — het cavitatiegebied loopt weer dicht. Voor het cavitatiegebied zijn twee mathematische modellen ontwikkeld (zie afb. 8): het 'dunne bel model' en het 'belmengselmodel'. Beide methoden leidden tot een zelfde praktisch resultaat.

Met de twee mathematische modellen is een groot aantal berekeningen uitgevoerd voor een leiding als aangegeven in afb. 16. Aan het bovenstroomse leidingeinde werd in een tijd τ een drukdaling Δh geïntroduceerd. De drukhoogte blijft daarna constant op een waarde van $h - \Delta h$. De grootheden τ , Δh , Δz , L , D , u_0 en c werden gegroepeerd tot dimensieloze grootheden en over een zó groot gebied gevarieerd, dat veel praktijkgevallen hier binnen vielen. Diffusie van gas uit de vloeistof naar de cavitatiebellen werd verwaarloosd. Een voorbeeld van de toestanden die achtereenvolgens langs de leiding optreden, is aangegeven in afb. 17. Er bleek dat de druk na dichtlopen van het cavitatiegebied niet of nauwelijks groter werd dan de druk aan het begin van de leiding vóór de drukdaling. Op grond van



Afb. 15 - Water-injectiesysteem beveiligd met druk begrenzers.



Afb. 16 - Schema voor berekeningen met dimensieloze grootheden.

dit theoretische onderzoek werden eveneens berekeningen uitgevoerd voor een aantal in ontwerp zijnde leidingen. Voor een dergelijke leiding (Biesbosch-Berenplaat) is het schema aangegeven in afb. 18. Bij pompuitval daalt de persdruk onder die van het Biesboschreservoir, de terugslagklep in de by-pass gaat open en grote hoeveelheden water worden nagezogen. De druk aan het bovenstroomse leidingeinde blijft daardoor nagenoeg constant. De maximaal en minimaal optredende drukhoogten zijn in afb. 19 aangegeven. Duidelijk is te zien dat geconcentreerde cavitatie in de hoge punten optreedt en uitgestrekte cavitatie in een zeer groot deel

van de leiding. De maximale drukhoogte is niet groter dan de werkdruk aan het bovenstroomse leidingeinde vóór pompuitval. Deze conclusie geldt slechts voor de beschouwde situatie: na korte tijd weer starten van de pompen kan aanmerkelijk hogere drukken geven. Omdat op grond van deze berekeningen verwacht mocht worden dat een buffertoren of windketel achterwege kon blijven, zijn uitgebreide proeven in een model uitgevoerd teneinde de mathematische modellen te verifiëren (zie afb. 20). Een schema van de proefleiding en de resultaten van metingen en berekeningen voor één situatie zijn aangegeven in afb. 21.

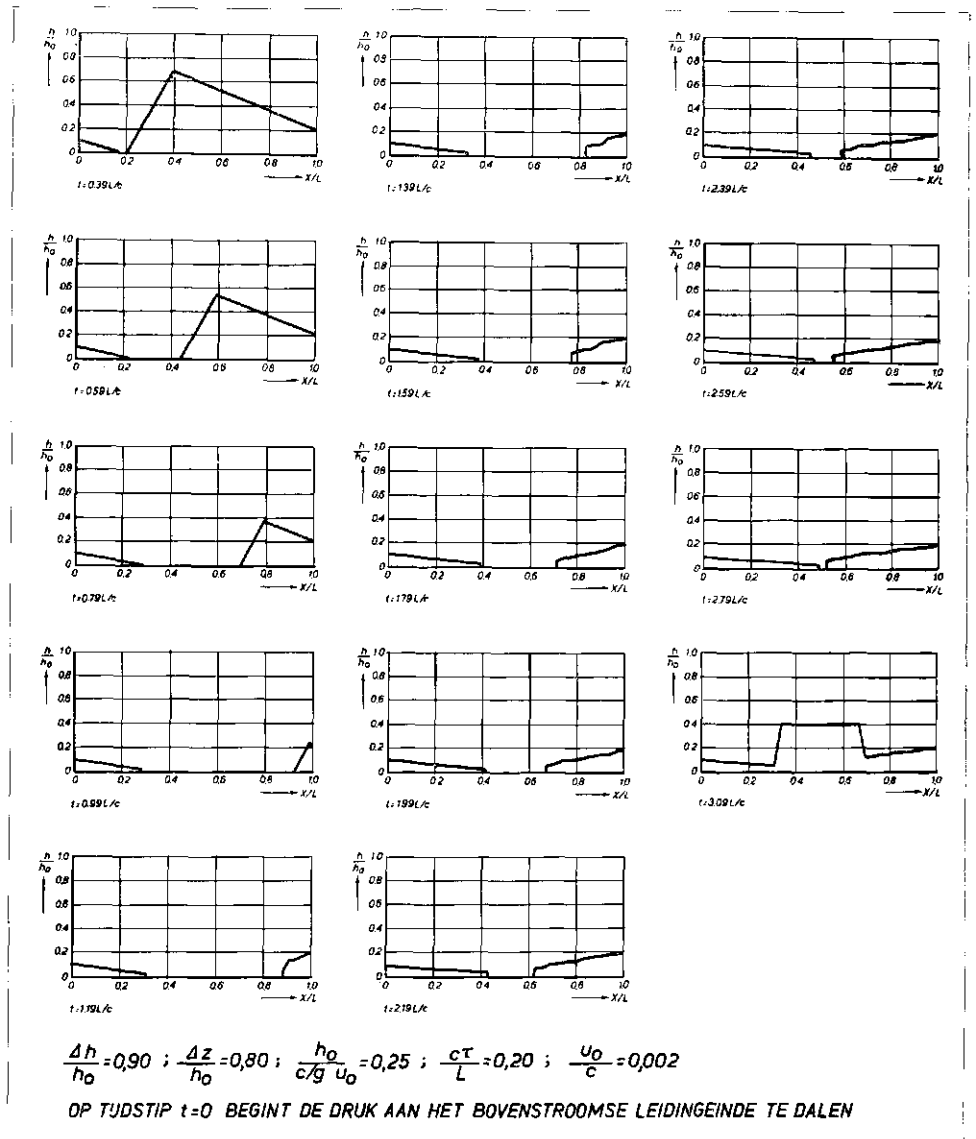
De drukval aan het bovenstroomse leidingeinde wordt verkregen door omschakeling van twee gekoppelde bolafsluiters. Hierdoor daalt de druk aan het bovenstroomse leidingeinde in ca. 0,5 s van een hoge druk H_1 (instelbaar van 30 tot 60 m waterkolom abs.) naar een lage druk H_2 (instelbaar van 10 tot 30 m waterkolom abs. *). Drukmetingen werden op 10 plaatsen langs de leiding verricht met piezo-elektrische drukopnemers; debietmeting werd op 2 plaatsen uitgevoerd met speciaal daartoe ontwikkelde snelle elektromagnetische debietmeters. In meetpunt 4 heerst aldus voor een proef met $H_1 = 60$ m waterkolom abs., $H_2 = 10$ m waterkolom abs. en $H_3 = 20$ m waterkolom abs. gedurende ca. 1,5 s vacuüm. Daarna treedt een zeer snelle drukstijging op van 10 à 20 m waterkolom in minder dan 0,01 s.

De resultaten van berekeningen met het belmengselmodel en het dunne-bel model stemmen zeer goed overeen met de metingen. Een derde eenvoudiger te hanteren berekeningsmodel is eveneens gecontroleerd. Dit berekeningsmodel gaat er van uit dat bij waterslagberekeningen de leiding vaak in een groot aantal rekenpunten wordt verdeeld. Door in elk rekenpunt met geconcentreerde cavitatie te rekenen kan, met enige aanvullingen, een zelfde resultaat verkregen worden als met de 2 eerder genoemde modellen.

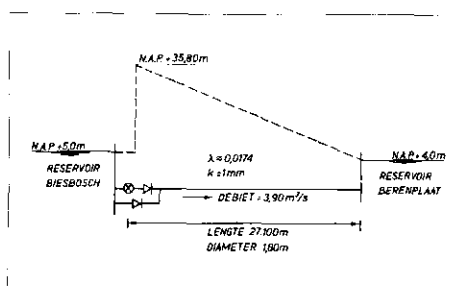
Op grond van het voorgaande zullen in een aantal grote transportleidingen van de NV Waterwinningsbedrijf Brabantse Biesbosch en de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage geen buffertoren of windketels worden toegepast. In hoeverre een bepaald buismateriaal tegen veelvuldig optreden van snelle drukstijgingen bestand is, is niet bekend. Reden waarom vooralsnog het geregeld laten optreden van cavitatie ontraden wordt. Dit stelt eisen aan de normale schakelprocedures van de pompen.

De controleproeven werden door het Waterloopkundig Laboratorium uitgevoerd in opdracht van de NV Waterwinningsbedrijf Brabantse Biesbosch, de Duinwaterleiding van 's Gravenhage en het Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (NV KIWA). Een speurwerkbijdrage werd geleverd door het Waterloopkundig Laboratorium en het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen (COW). De Technische Hogeschool Delft (Laboratorium voor vloeistofmechanica) trad als adviseur van het Waterloopkundig Laboratorium op. De kosten van het onderzoek bedroegen ca. f 700.000,—.

* 10 m waterkolom absoluut ≈ 1 ata



Afb. 17 - Verloop drukhoogten langs de leiding op een aantal tijdstippen (belmengselmodel).



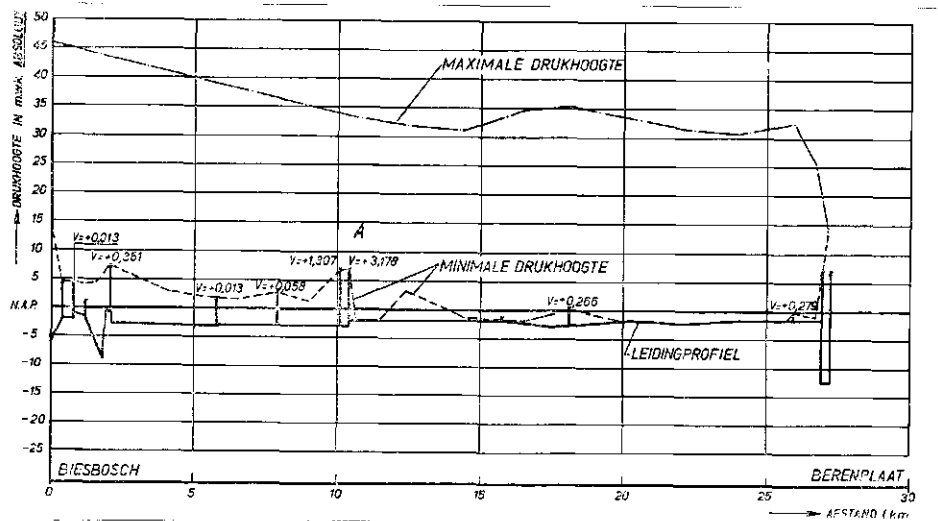
Afb. 18 - Ruw-water transportleiding Biesbosch-Berenplaat.

3.5. Terugslagkleppen

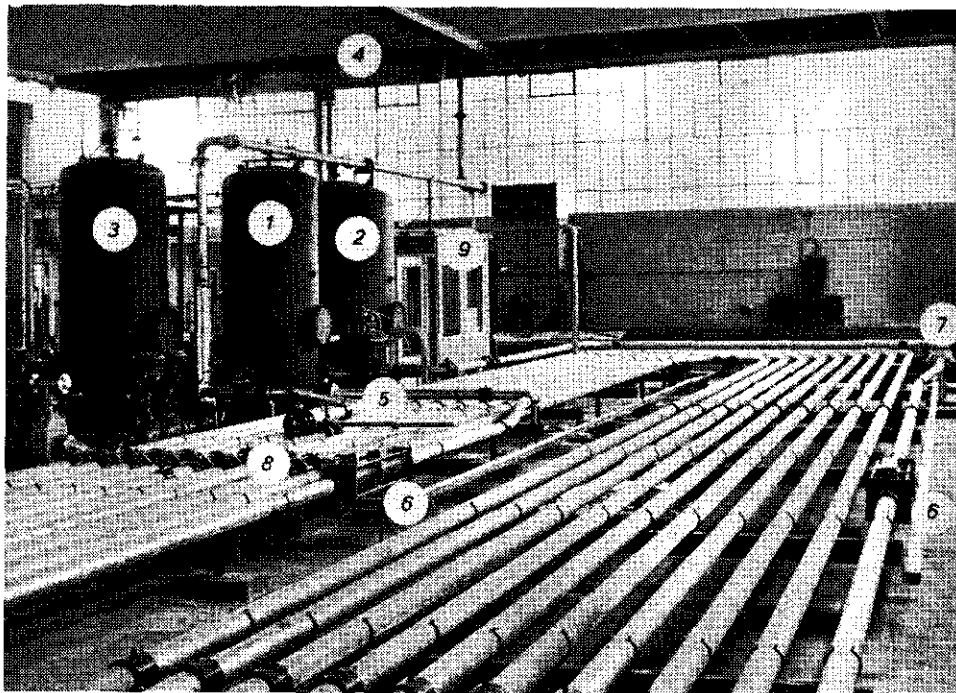
Tussen de pompen en een transportleiding — al dan niet voorzien van een buffertoren of windketels — worden veelal terugslagkleppen geplaatst (zie afb. 22). Indien slechts een gedeelte van de geïnstalleerde pompen in bedrijf is, wordt door deze kleppen retourstroming via de niet in bedrijf zijnde pompen voorkomen.

In de situatie dat meerdere pompen in bedrijf zijn en daarna één pomp wordt uitgeschakeld (of uitvalt door storing) zal het debiet in de leiding L snel afnemen onder invloed van het drukverschil H dat op de vloeistofkolom L werkt. Indien de terugslagklep deze debietafname niet voldoende snel kan volgen, zal een groot debiet naar de zuigkelder gaan terugstromen. De volgende problemen kunnen zich hierbij voordoen:

1. De terugslagklep wordt door de retourstroming op z'n zitting geslagen, met kans op beschadigingen en extreme drukken in de leiding.
2. Bij te lange retourstroming kan de draairichting van de uitgeschakelde pomp omkeren, hetgeen in bepaalde gevallen niet toelaatbaar is.
3. Een eventuele buffertoren of windketel kan te ver leeg lopen, waardoor lucht in de transportleiding komt.



Afb. 19 - Extreme drukhoogten na pompuitval bij toelaten van cavitatie.



Afb. 20 - Overzicht proefopstelling voor cavitatie-onderzoek.

1. Hogedruktank; 2. Lagedruktank; 3. Eindtank; 4. Ontluchtingstank; 5. Star gekoppelde bolafsluiters; 6. Elektromagnetische debietmeters voor snelle fluctaties; 7. Elektromagnetische debietmeters voor de permanente situatie; 8. Doorzichtige perspexstukken met drukaansluitingen; 9. Meetcabine.

Bij verwaarlozing van de traagheid van de pompen kan — door toepassing van de wet van Newton op de vloeistofkolom L — de tijd geschat worden waarin het debiet na pompuitval tot nul afneemt:

$$t = \frac{v_0 L}{g H} \quad (11)$$

waarin:

- t = tijd waarin debiet nul wordt in s
- v₀ = beginsnelheid in de leiding waarvan de pomp uitvalt, in m/s
- L = leidinglengte tussen zuigkelder en broekstuk in m

g = versnelling van de zwaartekracht in m/s²

H = drukverschil tussen zuigkelder en broekstuk in m vloeistofkolom

De werkelijke tijd waarin het debiet in het leidingdeel L tot nul afneemt zal groter zijn dan uit (11) volgt wegens:

1. Het drukverschil H daalt tijdens het uitvallen van de pomp. Bij een leiding met buffertoren of windketel is deze drukdaling verwaarloosbaar omdat de druk aldaar slechts langzaam daalt in verhouding tot de tijdsduur van de verschijnselen in de leiding L.

2. Ten gevolge van het polaire massa-traagheidsmoment van de draaiende delen van de uitvallende pomp

$$(I_p = \frac{GD^2}{4}) \text{ wordt nog gedurende}$$

enige tijd na pompuitval 'energie' geleverd.

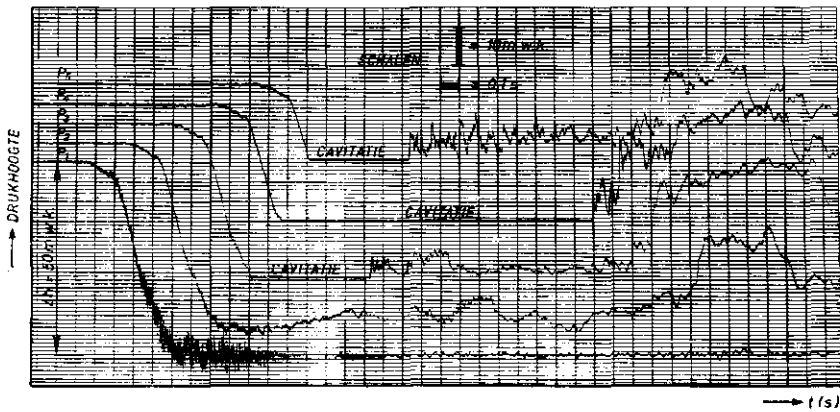
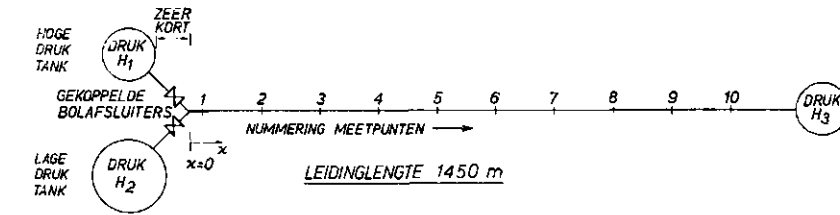
Uit (11) blijkt dat vergroting van v₀ en L een langere tijd oplevert waarin het debiet in de leiding L nul wordt. Uiteraard heeft vergroting van het polair massa-traagheidsmoment van de draaiende delen van de pomp een zelfde effect.

Het resultaat van een berekening waarin het I_p mede betrokken is, is aangegeven in afb. 23. Voor een relatief grote lengte van AB (= 50 m) neemt het debiet na uitval van beide pompen in ca. 1,3 s tot nul af. Duidelijk is te zien dat de druk in B slechts weinig afneemt. De geleidelijke drukval in A wordt voornamelijk veroorzaakt door het polair massa-traagheidsmoment van de pompen. Bij deze berekening is aangenomen dat de terugslagkleppen de waterbeweging zonder verlies volgen, waardoor tevens terugstroming voorkomen wordt. Voor kortere leidinglengten zijn aldus tijden van minder dan 0,5 s mogelijk. Bij de keuze van terugslagkleppen kan men in de ontwerpfase uitgaan van twee principes:

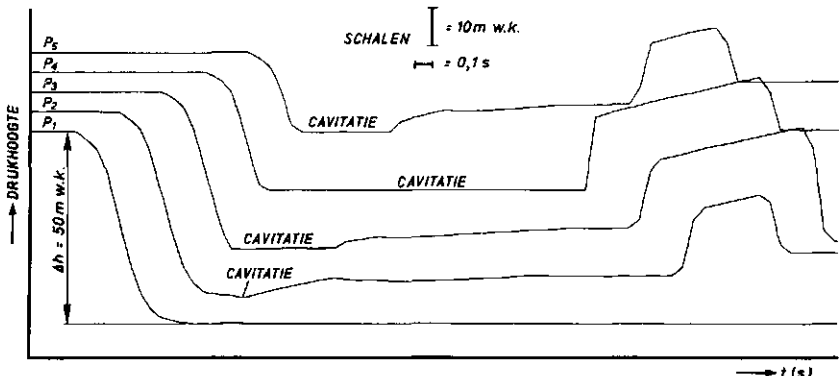
1. Pas een 'snelle' klep toe, die de debietafname zeer nauw volgt en die op het moment dat het debiet nul is, gesloten is.
2. Pas een 'progressief-beremde' klep toe. Deze klep moet over het eerste gedeelte van het sluittraject snel bewegen. Over het laatste gedeelte van het sluittraject mag de klep slechts relatief langzaam bewegen om 'slaan' te voorkomen. Hierbij moet gedurende korte tijd enige retourstroming toegestaan zijn.

Twee 'snelle' kleppen zijn aangegeven in afb. 24. Bij normaal pompbedrijf wordt een veerbelaste ring of schotel door de stroming opengedrukt gehouden. Na pompuitval wordt de klep door de veerdruk gesloten. Toepassing van de juiste veer is belangrijk, omdat anders toch nog slaan van de klep optreedt (te slappe veer) of bij pompbedrijf een te groot weerstandverlies over de klep optreedt (te stijve veer). De snelle sluiting is mogelijk dankzij de betrekkelijk geringe massa van de bewegende delen van de klep en de relatief korte sluitweg die moet worden afgelegd. Analoge eigenschappen heeft de terugslagklep met rubber membraan (zie afb. 26).

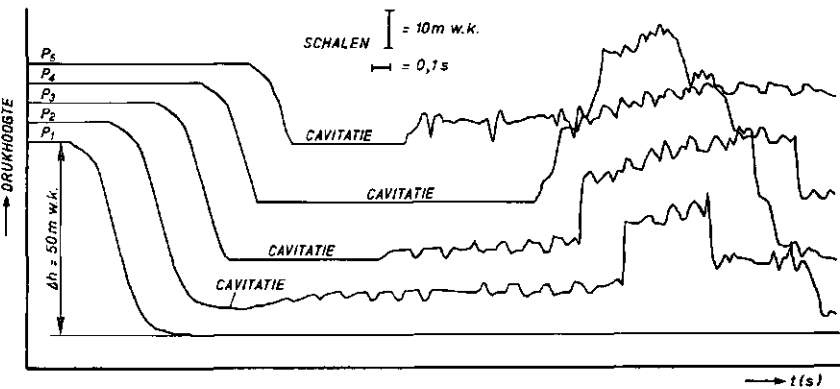
Valkleppen (zie afb. 26) zijn in het algemeen ongeschikt voor snelle sluiting. Zij zijn goed bruikbaar bij kleine leidingdiameters



DRUKHOOGTEN IN PROEFLEIDING (METING)

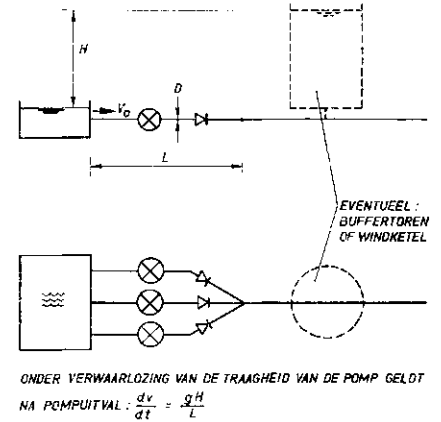


DRUKHOOGTEN IN PROEFLEIDING (VOLGENS BELMINGSSEL METHODE)



DRUKHOOGTEN IN PROEFLEIDING (VOLGENS DUNNE-BEL METHODE)

Afb. 21 - Drukhoogten in cavitatie-proefleiding (metingen en berekeningen).

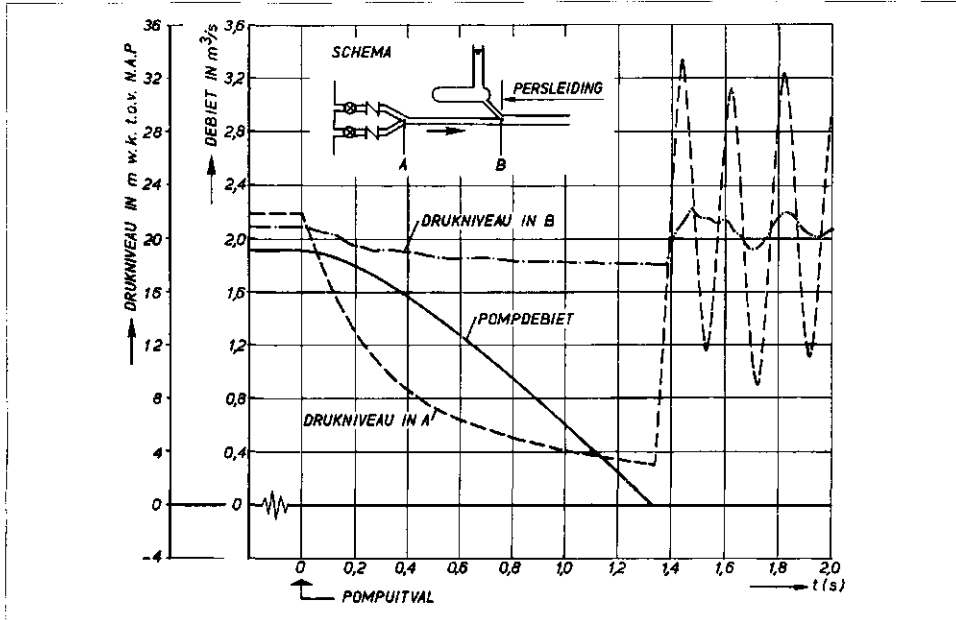


Afb. 22 - Schema-opstelling van terugslagkleppen.

of in leidingen waarin de debietafname langzaam is. Voorbeelden van 'progressief beremde' kleppen zijn de a-symmetrische vlinderklep met rem (zie afb. 26) en kleppen die over het gehele sluittraject min of meer beremd worden (zie afb. 25). Bij toepassing van dit principe is het van groot belang dat de juiste beremmingskarakteristiek gekozen wordt. 'Doe het zelf' in de vorm van zelf aanbrengen van een remcilinder op een daartoe niet ontworpen klep kan leiden tot ernstig slaan met schade of afdraaien van de klepas: Bij een te lichte rem zal de klep namelijk over het eerste gedeelte van het sluittraject een langere tijd nodig hebben dan in het onberemde geval. De retourstroming kan zich ontwikkelen en de klep zal door de dan te lichte rem heengedrukt worden. Bij een te zware rem zal de klep nog langer blijven open staan, waardoor zich een fors retour debiet kan ontwikkelen. De stromingskrachten die hierbij op de klep uitgeoefend worden kunnen dan leiden tot afdraaien van de klepas.

Het is thans in veel praktijkgevallen niet mogelijk behoorlijk gestaafd te voorspellen of een gekozen terugslagklep direct na inbouw zal voldoen. Gevallen zijn bekend waarbij de klep direct na inbouw vervangen moest worden door een ander type klep of waarbij belangrijke wijzigingen aan het klepmechanisme moesten worden aangebracht. Twee, nog niet getoetste, methoden zijn beschikbaar die gebruikt kunnen worden voor de vaststelling van het type toe te passen klep:

1. De proefondervindelijke methode. Bepaald wordt de sluittijd van de klep in stilstaand water. Deze tijd wordt vergeleken met de tijd die uit een waterslagberekening



Afb. 23 - Druk- en debietverloop na pomputval tussen pompen en buffertoren.

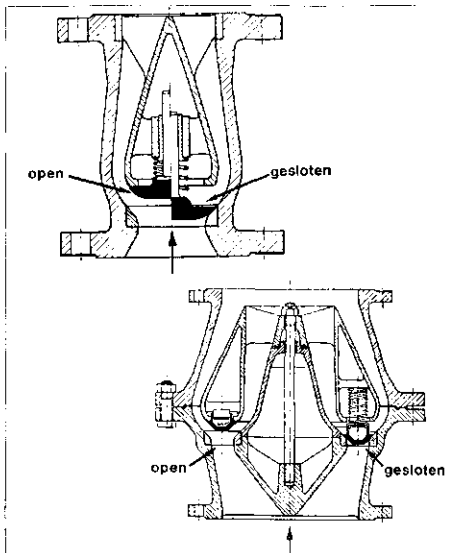
voor pomputval volgt. Hierbij wordt aangenomen dat de terugslagklep de waterbeweging verliesloos volgt. Indien de sluit-tijd in stilstaand water veel kleiner is dan de berekende tijd, is slaan van de klep onwaarschijnlijk (zie ook [11]).

2. Volledige berekening van de klep-beweging.

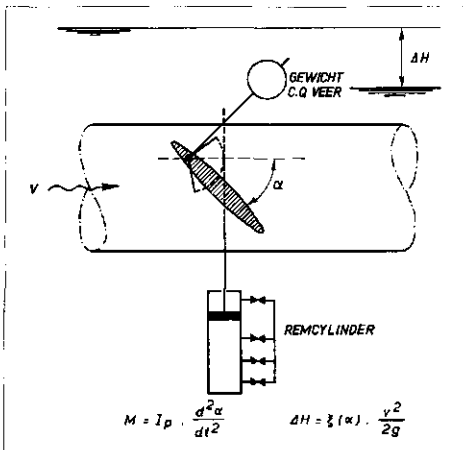
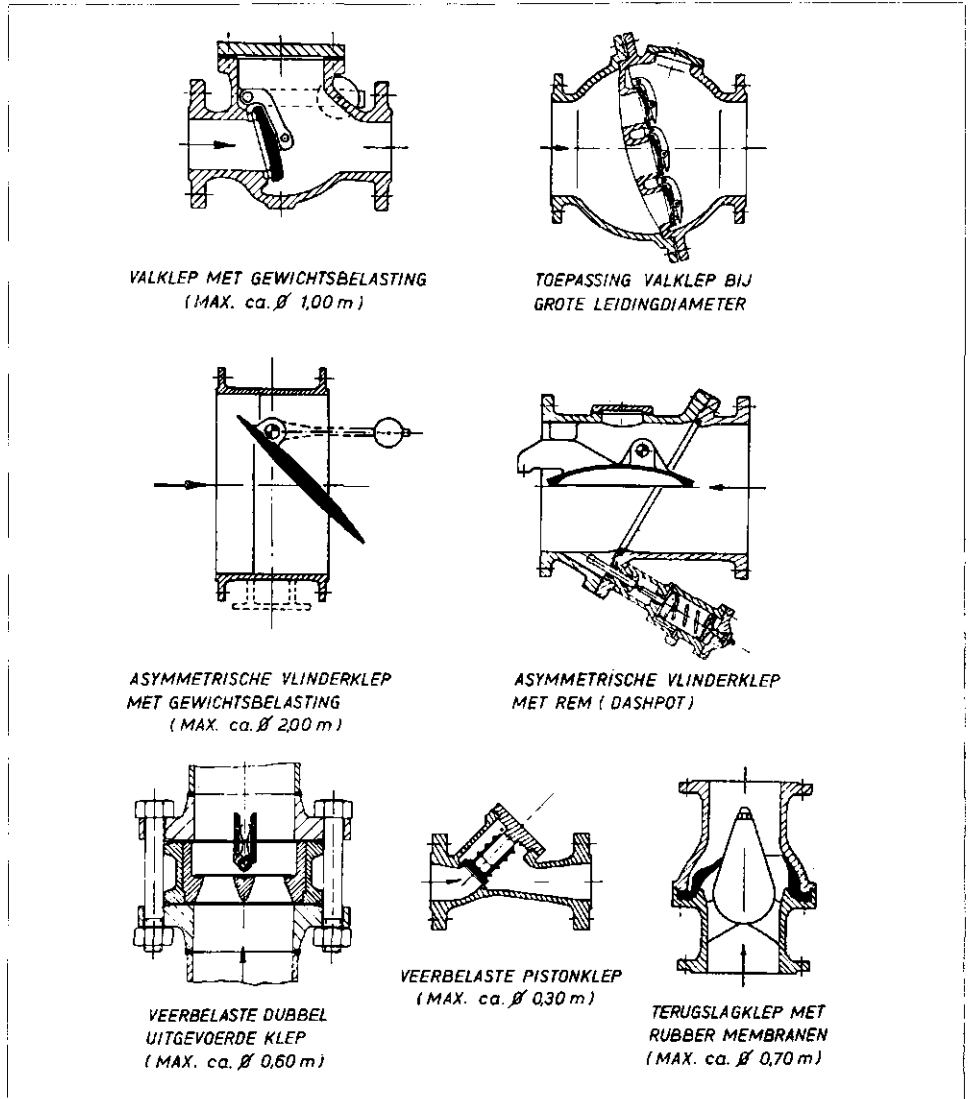
Een waterslagberekening wordt uitgevoerd waarin alle eigenschappen van de terugslagklep zijn opgenomen (zie afb. 25). In het waterslagprogramma worden naast de bewegingsvergelijking van de pomp (zie [9]) de bewegingsvergelijking en de weerstand van de klep opgenomen:

$$M = I_p \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \tag{12}$$

$$\Delta H = \xi(\alpha) \cdot \frac{v^2}{2g} \tag{13}$$



Afb. 24 - Ring- en schotel terugslagklep.



Afb. 25 - Schema progressief-beremde terugslagklep.

Afb. 26.

$$M = I_p \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \quad \Delta H = \xi(\alpha) \cdot \frac{v^2}{2g}$$

waarin:

- M = totaal op de klep uitgeoefende koppel in Nm
 I_p = polair massa traagheidsmoment van klep en eventueel sluitgewicht t.o.v. draaiingsas in kgm^2
 α = stand van de klep
 ΔH = drukverlies over de klep in m vloeistofkolom
 ξ = verliescoëfficiënt dimensieloos
 v = snelheid in de leiding in m/s
 g = versnelling van de zwaartekracht in m/s^2

Het totale koppel M is opgebouwd uit een aantal deelpoppels te weten: koppel ten gevolge van eigen gewicht van de klep en eventuele gewichtsbelaasting, koppel ten gevolge van de beremming (in het algemeen een constante maal de snelheid waarmee de remcylinder beweegt), koppel ten gevolge van aswrijving.

Voor de 2e methode is een groot aantal gegevens nodig die deels aan tekeningen ontleend worden en deels door de fabrikant verstrekt zullen moeten worden.

Verificatie van voornoemde methoden zou plaats kunnen vinden in het Waterloopkundig Laboratorium m.b.v. de nog beschikbare druktanks van het cavitatie-waterslagonderzoek (zie afb. 20).

Literatuur

Voor de samenstelling van deze voordracht werd de volgende literatuur geraadpleegd, waaruit tevens een aantal figuren werd ontleend:

- Huisman, L. *Stromingsweerstand in leidingen*. Mededeling nr. 14 van het Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA NV, 2e druk 1969.
- Yao, K. M. *Pipe friction factor calculation*. Water and sewage works — reference number — 1963, pages 312 - 318.
- Lamont, P. A. *The choice of pipe flow laws for practical use*. Water and Water Engineering, No. 875-876, Jan. and Febr. 1969.
- Franke P. G., *Einige Rauheitswerte von Fernwasserleitungen*. Das Gas und Wasserfach. Heft 10, 7 März 1969.
- Holtorff, G. *Die Riffelbildung von Rohrleitungen*. Das Gas und Wasserfach. Heft 48, 28 November 1969.
- Kirschmer, O. *Reibungsverluste in Rohren und Kanälen*. Das Gas und Wasserfach. Heft 50, 16 Dezember 1966.
- Schwing, V. *Rauheitsmessungen in Wasser-versorgungsleitungen als Grundlage exakterer Rohrnetzberechnungen*. Das Gas und Wasserfach, Heft 8, 24 Februar 1966.
- Manuel, A. R. *Waterslag in druckleidingen*. Land en Water januari/februari 1968.
- Kalkwijk, J. P. Th., Kranenburg, C., Vreugdenhil, C. B., Vries, A. H. de. *Cavitation caused by water hammer in horizontal pipelines*. Delft University of Technology and Delft Hydraulics Laboratory (Publ. No. 97, uitge-
- geven door Waterloopkundig Laboratorium, March 1972).
- KIVI - Symposium: *'Niet-stationaire hydrodynamische verschijnselen in transportleidingen voor vloeistoffen'*. Bijdragen van A. H. Kloosterman, C. Kranenberg, A. H. de Vries, J. Wijdiëks uitgegeven als publ. 109N van Waterloopkundig Laboratorium.
- Eschment und Zedlitz, *Rückschlagorgane in Rohrleitungen*. Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau, Mai 1966.
- Lewinsky-Kesslitz, H. P. *Über das dynamische Verhalten von Rückschlagklappen im Hinblick auf Klappenschlag und Druckstossbildung*. KSB - Technische Berichte no. 9 - 1965.
- Nagel, G. *Technische Hinweise für den Einsatz von Rückflussverhinderern*. Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau. Sept. 1972.
- Diverse rapporten van het Waterloopkundig Laboratorium.

