



Waterslagverschijnselen in buisleidingen

1. Inleiding

Een voordracht over waterslag blijkt gewoonlijk een teleurstelling. Het onderwerp is te uitgebreid om in korte tijd te worden behandeld. Bovendien is een dergelijke voordracht voor diegenen die met de stof vertrouwd zijn overbodig en te gecompliceerd voor hen die dit niet zijn. Oorspronkelijk leek dit symposium een uitzondering hierop, omdat het in dit geval vooral gaat om de invloed van waterslag op de keuze van het buiswandmateriaal. Helaas bleek hierover nog zo weinig bekend, dat ook deze voordracht wel een teleurstelling zal worden.

2. Elementaire waterslagformules

2.1. Drukveranderingen

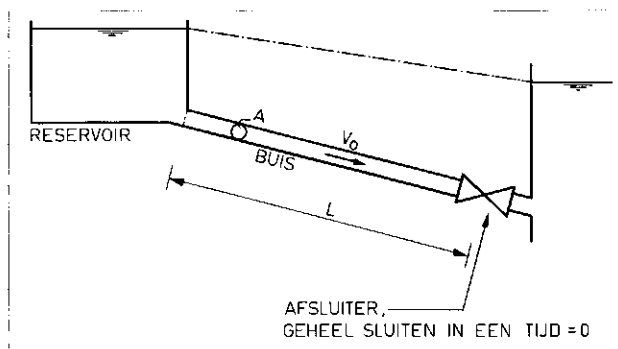
Vaak wordt de waterbeweging in buisleidingen berekend met de „starre kolom” methode. Dat deze methode, waarbij elasticiteit van buiswand en water verwaarloosd worden, niet bruikbaar is voor relatief snel verlopende verschijnselen blijkt uit het voorbeeld van afb. 1.

In dit voorbeeld wordt de afsluiter aan het rechter einde van de buis als extreem geval in een tijd nul gesloten. Toepassing van de wet van Newton: kracht = massa · versnelling op de starre kolom zou als resultaat hebben dat voor de druk een oneindig grote waarde wordt gevonden. De massa water mag dan ook niet als een onvervormbare kolom worden beschouwd.

Door de elasticiteit van buiswand en water ontstaat een golfverschijnsel in de buis: de door de afsluiter veroorzaakte verstoring: $v=0$ plant zich naar links voort. Met de impulsvergelijking, toegepast op een buiselement (gelegen tussen twee dwarsdoorsneden) dat wordt vertraagd van $v = v_0$ naar $v = 0$, wordt nu een eindige druk gevonden: $p_2 - p_1 = \rho c v_0 - \rho g(z_2 - z_1)$. De indices 1 en 2 duiden twee punten op de as van de buis aan. Met invoering van het piezometrisch niveau en na generalisatie vindt men:

$$\Delta h = \pm \frac{c}{g} \Delta v, \text{ de verandering in p.n.} = \pm \frac{c}{g} \cdot \text{de ver-}$$

Afb. 1



andering in snelheid. (Bijvoorbeeld uit $\Delta v = 1\text{m/s}$ en $c = 1000\text{m/s}$ volgt $\Delta h = 100\text{mwk}$).

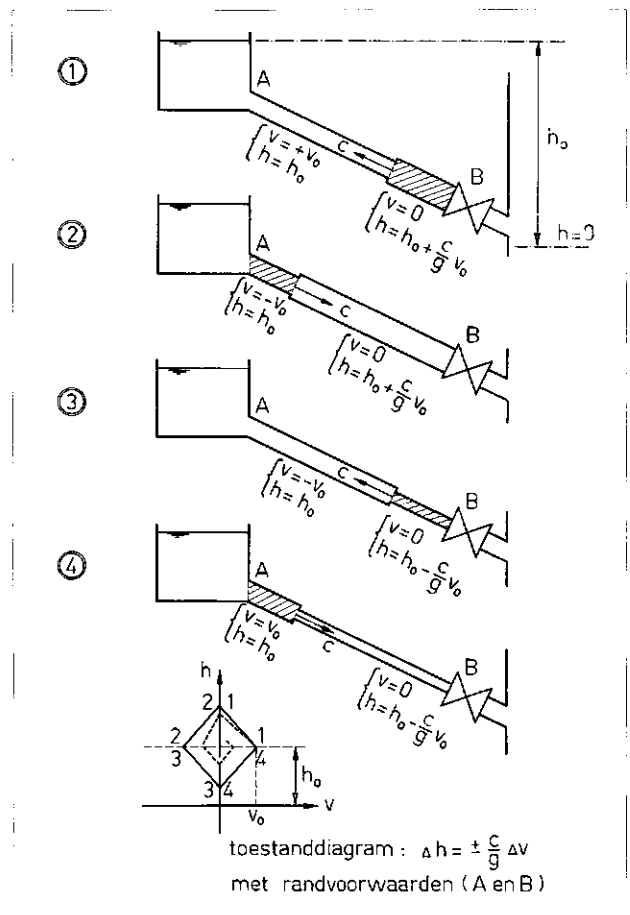
Dit eenvoudige resultaat geldt alleen, indien de afsluiter wordt gesloten in een tijd die kleiner is dan de looptijd van de golf heen en terug in de buis. Hierop wordt later teruggekomen.

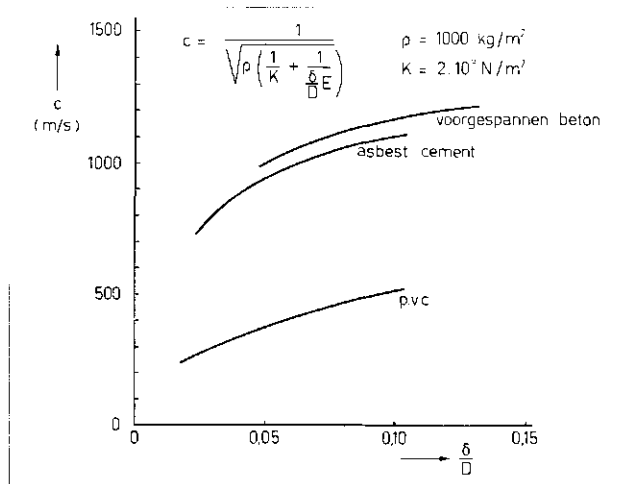
Ter illustratie is het verloop van het golfverschijnsel in het voorbeeld van afb. 1 weergegeven (zie afb. 2).

In A geldt de randvoorwaarde $h = h_0$ (constant) zodat de aankomende golf hier negatief wordt teruggekaatst. Na geval 4 treedt 1 weer op, er ontstaat een periodiek verschijnsel. Als de wrijving in rekening wordt gebracht treedt demping op, waardoor op den duur een evenwichtstoestand ontstaat met $h = h_0$ en $v = 0$.

Uit bovenstaande formule blijkt dat voor relatief snel verlopende verschijnselen de voortplantingssnelheid c van beslissende invloed is op de grootte van de opgewekte drukken.

Afb. 2





Afb. 3

2.2. De voortplantingssnelheid

Voor de voortplantingssnelheid kan een formule worden afgeleid door voor het genoemde buiselement een bergingsberekening op te stellen. Het resultaat is (met gebruikmaking van de formule van 2.1.):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{\delta E} \right)}}$$

Hierin vertegenwoordigt de term $\frac{1}{K}$ de berging t.g.v.

elasticiteit van de vloeistof en de term $\frac{1}{\delta E}$ de berging

t.g.v. de elasticiteit van de buiswand.

In afb. 3 is voor een drietal materialen die van belang zijn voor rioolleidingen de voortplantingssnelheid uitgezet tegen $\frac{\delta}{D}$. De buis is gevuld gedacht met zuiver

water. De lage voortplantingssnelheden voor kunststoffen zijn opvallend. Voor verschijnselen die relatief langzaam verlopen behoeft dit niet altijd een voordeel te zijn (zie 5a).

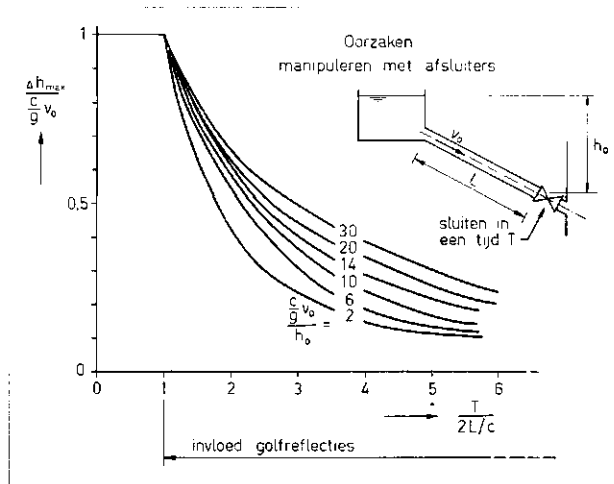
Eventueel in het water aanwezig gas verlaagt de voortplantingssnelheid sterk, waarbij de verschillen in de voortplantingssnelheden voor de verschillende materialen veel kleiner worden. Juist voor rioolbuizen geeft afb. 3 daarom geen direct bruikbaar resultaat.

3. Ontwerpgrafieken voor leidingen waarin waterslag kan optreden

Voor relatief snel verlopende verschijnselen (dat wil zeggen $T < \frac{2L}{c}$) zouden met de formules uit 2.1. en 2.2.

ontwerpgrafieken gemaakt kunnen worden. De te verwachten snelheidsverandering bepaalt de verandering in de druk; de extremen van de druk bepalen de buiswanddikte en daarmee bij benadering de kosten van het buiswandmateriaal.

De snelheidsveranderingen zouden dan horizontaal, de kosten voor een aantal buiswandmaterialen verticaal kunnen worden uitgezet. Dit zou moeten worden uitgevoerd voor verschillende statische drukken, bovenbelastingen,



Afb. 4

gasconcentraties e.d. Een complicatie treedt verder nog op als de snelheidsveranderingen relatief langzaam zijn (zie 4a).

Met behulp van deze grafieken zou dan het voor een bepaald geval meest voordelige buiswandmateriaal kunnen worden vastgesteld. Het aantal grafieken zou echter zeer groot worden, bovendien zou het waterslagaspect voor de meeste gevallen teveel de nadruk krijgen.

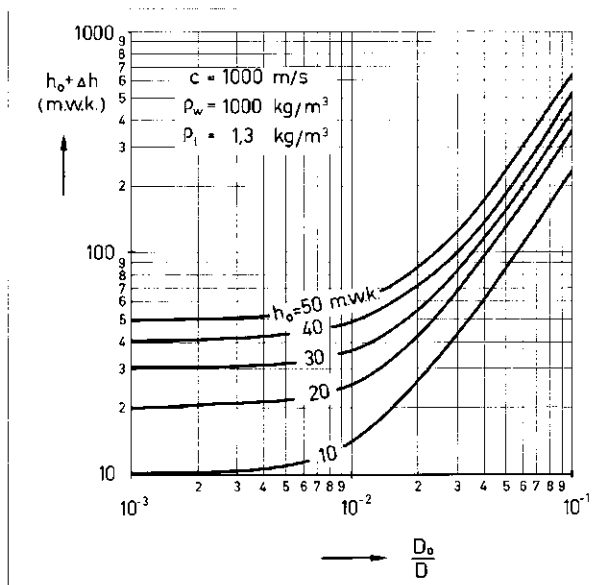
4. Oorzaken van waterslag

Waterslagverschijnselen kunnen worden veroorzaakt door onder andere:

a. Openen en sluiten van afsluuters

Dit geval werd al genoemd in 2.1. In afb. 4 is een grafiek weergegeven voor het geval dat de afsluiter in een tijd T wordt gesloten. De stroming is wrijvingloos verondersteld. Als de sluittijd groter is dan tweemaal de looptijd van de golf door de buis ($T > \frac{2L}{c}$) dan beïnvloedt de bij het reservoir teruggekaatste golf de druk bij de afsluiter

Afb. 5



tijdens het sluiten. Gevolg hiervan is dat dan de drukverandering kleiner is dan zou volgen uit de formule van 2.1.

b. Leidingbreuk bij afpersen

Door het plotseling wegvallen van de druk bij leidingbreuk worden in de buis twee onderdrukgolven opgewekt. Als bij het weerkaatsen van deze golven tegen een gesloten buiseinde de druk daalt beneden de dampspanning van water ontstaat een caviteit (ruimte in de buis gevuld met waterdamp en uit het water vrij gekomen gassen). Door het weer verdwijnen van de caviteit na verloop van tijd kunnen drukken ontstaan die hoger zijn dan de persdruk voor het moment van breuk. Onder bepaalde veronderstellingen vindt men voor de maximale toename van het piezometrisch niveau: 2. (p.n. van de atmosferische druk — p.n. van de dampdruk), of ca. 20 mwk.

c. Ontluchtingstoestellen met te grote capaciteit

De uitstroomsnelheid van lucht door een opening is groter dan die van water bij de zelfde overdruk. Als bij het ontluchten een hoeveelheid lucht is uitgedreven en water door de opening begint te stromen treedt dan ook een snelheidsdaling op. Deze snelheidsdaling resulteert volgens de formule van 2.1. in een drukverhoging. Afb. 5 geeft de totale overdruk (in mwk), afhankelijk van de begin-

druk h_0 en de diameterverhouding $\frac{D_0}{D}$, voor een ont-

luchting aan het (hooggelegen) einde van een leiding. Voorbeeld: voor $D = 1,00$ m, $D_0 = 0,025$ m en $h_0 = 50$ mwk vindt men $h_0 + h = 100$ mwk. Wil men de druk beneden 50 mwk houden dan moet men de lucht uitdrijven met een begindruk $h_0 = 20$ mwk of lager. Na het uitdrijven van de lucht kan de druk worden opgevoerd.

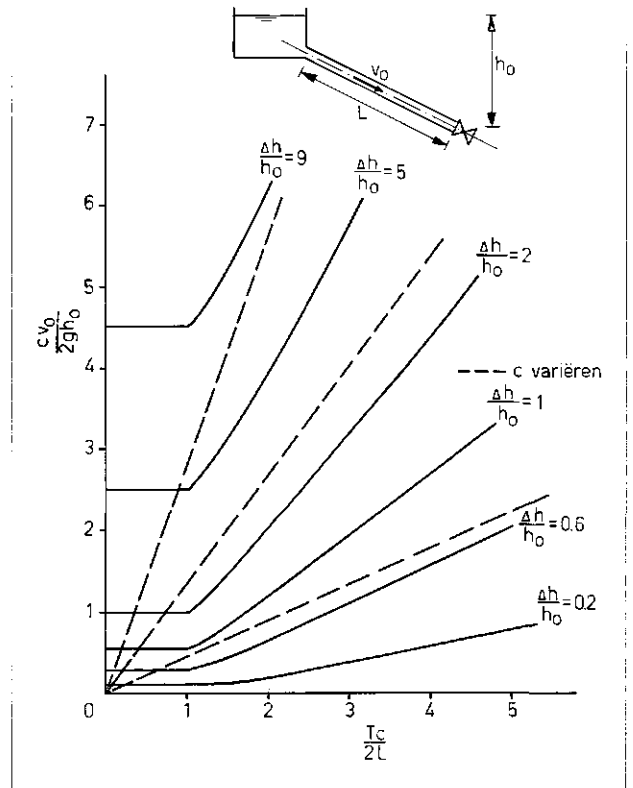
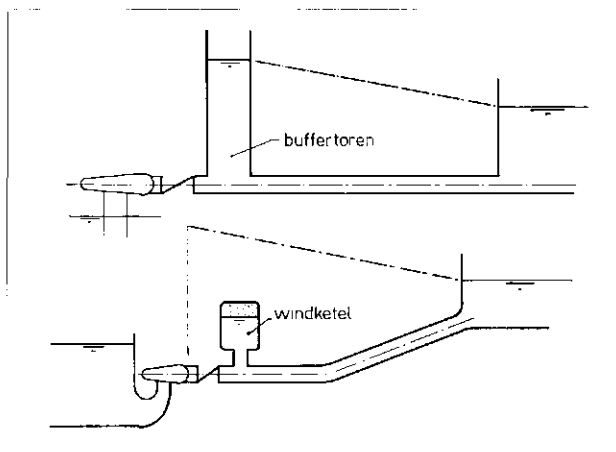
d. In- en uitschakelen van pompen

Het uitschakelen van een pomp veroorzaakt een afneming van de snelheid van het water en daardoor een drukverlaging in de buis. Voor het berekenen van deze drukdaling is kennis vereist van pompkarakteristieken, de massastraagheidsmomenten van pomp en motor, tegenwerkend moment van de uitgeschakelde motor, eventueel aanwezige tandwielkast. Het kan noodzakelijk zijn het gedrag van de pomp buiten het normale gebruiksgebied te kennen. Het berekenen van de drukverlaging kan grafisch-numeriek of volledig numeriek geschieden.

e. Te laat sluitende terugslagklep

Om het water na het uitschakelen van een pomp te be-

Afb. 7



Afb. 6

letten terug te stromen wordt vaak onmiddellijk na de pomp een terugslagklep aangebracht. Als deze te laat sluit (b.v. door traagheidsverschijnselen) wordt de reeds terugstromende vloeistof plotseling tot stilstand gebracht. De drukverhoging kan weer met de formule uit 2.1. berekend worden als de terugstroomsnelheid op het moment van sluiten bekend is.

5. Verlagen van de drukvariaties

Uit het voorafgaande is duidelijk dat als middelen ter verlaging van de drukvariaties ter beschikking staan:

a. Verlagen van de voortplantingssnelheid

Uit de formule $\Delta h = \pm \frac{c}{g} \Delta v$ voor relatief snel ver-
lopende verschijnselen blijkt dat verlaging van c een verlaging van de drukverandering tot gevolg heeft. Een lage voortplantingssnelheid kan worden verkregen door het toepassen van kunststofbuizen.

Voor relatief langzaam verlopende verschijnselen kan het verlagen van c echter nadelig zijn. Dit blijkt o.a. uit afb. 6. Hier is de grafiek van afb. 4 (geleidelijk sluiten afsluiter) op een andere wijze uitgezet. De parameters op de assen bepalen een punt in de grafiek waardoor de overdruk Δh vastligt. Als men de voortplantingssnelheid verlaagt beweegt men zich lang een rechte door dit punt en de oorsprong in de richting van de laatste. Het blijkt dat slechts onder bepaalde omstandigheden de druk afneemt (links in de grafiek).

b. Het vertragen van de snelheidsveranderingen

Het langzamer doen verlopen van de snelheidsveranderingen kan bereikt worden met:

1. Onder- en overdrukventielen.
Beide hebben het nadeel gemakkelijk te weigeren door corrosie, vorst en vervuiling.
2. Geleidelijk openen en sluiten van afsluiters.
In afb. 4 is te zien dat dit slechts effectief is als $T > \frac{2L}{c}$ wordt.
3. Het aanbrengen van een vliegwiél op de pompas.
Dit blijkt alleen praktisch uitvoerbaar te zijn voor korte leidingen.
4. Het aanbrengen van een bufferschacht of windketel in combinatie met een pomp (afb. 7) of afsluiter.
Als de pomp afslaat wordt nog enige tijd water nageleverd door de bufferschacht of windketel. De snelheidsverandering wordt daardoor vertraagd en de drukverandering verminderd.
Het blijkt dat voor het berekenen van de waterstanden in een bufferschacht gebruik gemaakt kan worden van de „starre kolom” methode, terwijl voor de bepaling van de piezometrische niveaus in de buis het nodig kan zijn de elasticiteit van de buiswand en vloeistof in rekening te brengen.

Symbolen

A	oppervlakte dwarsdoorsnede buis	(m ²)
c	voortplantingssnelheid	(m/s)
D	buisdiameter	(m)
D ₀	diameter ontluchtingsopening	(m)
E	elasticiteitsmodulus buiswandmateriaal	(N/m ²)
g	versnelling zwaartekracht	(m/s ²)
h	piezometrisch niveau = $z + p/\rho g$	(m)
h ₀	piezometrisch niveau in begintoestand	(m)
K	kompressiemodulus van de vloeistof	(N/m ²)
L	buislengte	(m)
p	druk	(N/m ²)
T	sluittijd	(s)
v ₀	stroomsnelheid in begintoestand	(m/s)
z	plaatshoogte	(m)
δ	buiswanddikte	(m)
Δh	verandering van het piezom. niveau	(m)
Δh _{max}	maximale verandering v. h. piezom. niv.	(m)
Δv	snelheidsverandering	(m/s)
ρ, ρ _w	dichtheid water	(kg/m ³)
ρ _l	dichtheid lucht	(kg/m ³)