

Waterslag in drinkwaterleidingen

Inleiding

In de Nederlandse literatuur is betrekkelijk weinig te vinden over het onderwerp waterslag. Waarschijnlijk vindt dit zijn oorzaak in het ontbreken van spectaculaire ongelukken veroorzaakt door waterslag in ons land.

Toch zal de ontwerper van watervoorzieningsinstallaties zich terecht wel eens zorgen maken over dit verschijnsel. Hetzij door verschijnselen die alleen maar onaangenaam zijn, zoals bv. het knallen van terugslagkleppen waardoor meetapparatuur ontregeld kan worden, of door het optreden van onderdrukken in de leidingen waardoor grondwater ingezogen wordt. Maar ook kan men zich afvragen hoe groot de veiligheid tegen ernstiger gevolgen zoals leidingbreuk bij een gegeven ontwerp nog is. Dit wordt vooral belangrijk bij de steeds grotere projecten waarbij het risico van een breuk minder aanvaardbaar wordt. Men denke hierbij aan de gevolgen van een breuk in een zware transportleiding bij een dijk kruising, de kruising van een kanaal in ophoging, of bij weg- of spoor kruisingen.

Onder waterslag moet worden verstaan het optreden van drukveranderingen als gevolg van snelheidsveranderingen. De snelheidsveranderingen kunnen opzettelijk te weeg gebracht worden door het manipuleren met afsluiters of door het schakelen van de pompen. Onopzettelijke snelheidsveranderingen treden op bij het uitvallen van pompen door stroomstoringen of het onjuist functioneren van afsluiters en terugslagkleppen. Ook leidingbreuk veroorzaakt tijdens graafwerkzaamheden kan aanleiding geven tot waterslag.

Voor plotselinge veranderingen in de leidingsnelheid kan de drukverandering berekend worden met de formule van Joukowski [1]:

$$\Delta H = \frac{c}{g} \cdot \Delta v \quad (\text{zie afb. 1})$$

waarin

ΔH = drukverandering in meters waterkolom;

c = voortplantingssnelheid van drukgolven in de leiding in m/sec.;

g = versnelling van de zwaartekracht (m/sec.²);

Δv = verandering van de stroomsnelheid in de leiding in m/sec.

Voor betonnen, gietijzeren, stalen of asbestcement leidingen geldt globaal $c = 1000$ m/sec. (zie ook [2]) zodat met $g \approx 10$ m/sec.² de formule wordt: $\Delta H \approx 100 \Delta v$ (beton, staal, asbestcement, gietijzer).

De formule van Joukowski geldt exact voor een geheel plotselinge snelheidsverandering (in $t = 0$ sec.), maar bij benadering ook nog indien de snelheids-

verandering binnen een tijd $t = \frac{2L}{c}$ sec.

plaatsvindt (L = lengte leiding in m).

Deze $t = \frac{2L}{c}$ sec. is de tijd die een

druk golf nodig heeft om van het punt van verstoring naar het leidingeinde en terug te lopen.

Als voorbeeld kan beschouwd worden een 2 km lange leiding waarin een stroomsnelheid $v = 1$ m/sec. heerst. Indien het leidingeinde een afsluiter binnen 4 sec. ($\frac{2L}{c} = \frac{2.2000}{1000} = 4$) wordt

gesloten kan een drukverhoging van 100 m waterkolom optreden. In kunststof leidingen is de voortplantingssnelheid c meestal aanzienlijk kleiner ($c \approx 300$ m/sec.), waardoor ook de optredende drukveranderingen evenredig kleiner zijn.

Het nauwkeurig berekenen van de in de praktijk vrijwel altijd geleidelijk optredende snelheidsveranderingen, vooral als

deze plaatsvinden in een tijd $t > \frac{2L}{c}$

sec., wordt al gauw veel moeilijker door de verstoringen die reflecties van drukgolven tegen het leidingeinde veroorzaken en door de invloed van de leidingweerstand.

Voor zeer langzame snelheidsveranderingen zoals bv. optreden bij slingeren van buffertoren of windketels, kunnen de verschijnselen redelijk nauwkeurig berekend worden met de eenvoudige „blokwater-methode” (massaslingering). Voor snellere verschijnselen geeft alleen de meer gecompliceerde karakteristieken methoden goede uitkomsten.

Het is hier niet de bedoeling om op deze

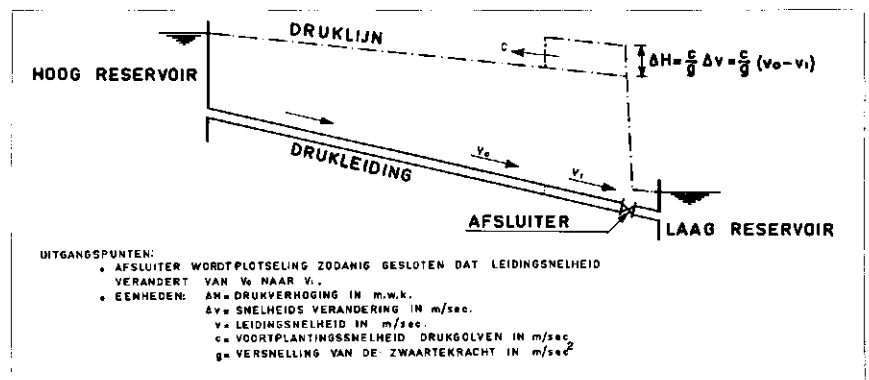
rekenmethoden nader in te gaan. Verwezen wordt naar de literatuur [2, 3, 4 en 5]. Opgemerkt wordt alleen nog dat de berekening van waterslagverschijnselen in samengestelde leidingsystemen al gauw zo tijdrovend wordt dat toepassing van de computer onvermijdelijk is.

Lange transportleidingen

Bij lange transportleidingen is het meest voorkomende geval van waterslag het ongecontroleerde gelijktijdig uitvallen van alle pompen. Aangezien pompen vrijwel uitsluitend nog door electromotoren aangedreven worden, kan dit geval bij stroomstoring optreden. Van de diverse beschikbare beveiligingsmethoden, zie [2], komen in de praktijk alleen de buffertoren (bv. de leiding van Bergambacht naar de Haagse waterleidingduinen) of de windketel (bv. de transportleidingen voor de WRK vanaf Jutphaas) in aanmerking. Beide methoden hebben de zelfde werking, nl. dat zij een hoeveelheid water beschikbaar houden onder voldoende druk, om na pompuitval onmiddellijk de waterlevering in de leiding over te nemen en deze zeer geleidelijk tot nul te laten dalen. Voorwaarde is dus een voldoende grote inhoud van de ketel of toren, waarvoor zeer globaal 0,01 QL m³ gesteld kan worden voor beide oplossingen (Q = leidingdebiet in m³/sec., L = leidinglengte in m).

Deze vuistregel mag alleen voor een eerste benadering gebruikt worden. Voor elk geval zal apart de juiste windketel of buffertoren berekend dienen te worden. Toepassing van een onjuist gekozen voorziening kan soms tot hogere drukken aanleiding geven dan wanneer in het geheel geen voorziening wordt getroffen. Dit wordt gedemonstreerd voor de leiding die in afb. 2 schematisch is aangegeven. Voor deze leiding is met behulp van de grafische karakteristieken metho-

Afb. 1 - De wet van Joukowski.



de het drukverloop aan het begin van de leiding na pompuitval berekend. Hierbij is het luchtvolume dat zich tijdens pompbedrijf in de windketel bevindt gevarieerd van 0 tot 3 m³. De hoogste drukken die bij elk geval optreden zijn in afb. 3 uitgezet tegen het bedrijfs-luchtvolume in de ketel. Duidelijk blijkt dat bij een bedrijfs-luchtvolume van 0,25 m³ een maximale druk van 129 m waterkolom optreedt. Bij een leiding zonder windketel zou slechts een druk van 77 m w.k. optreden. Afhankelijk van de ligging van de leiding in het lengteprofiel bestaat de mogelijkheid dat bij de leiding zonder ketel en bij de ketels met kleinere luchtinhouden, ontoelaatbare onderdrukken of zelfs cavitatieverschijnselen in de leiding optreden.

In het laatste geval zullen de gegeven resultaten geen juist beeld geven omdat bij de berekeningen aangenomen is dat er geen cavitatieverschijnselen optreden in de leiding.

De berekende hoogste drukken treden in alle gevallen op nadat de stroming tot stilstand is gekomen en van richting omkeert waarbij de lucht in de ketel samengeperst wordt.

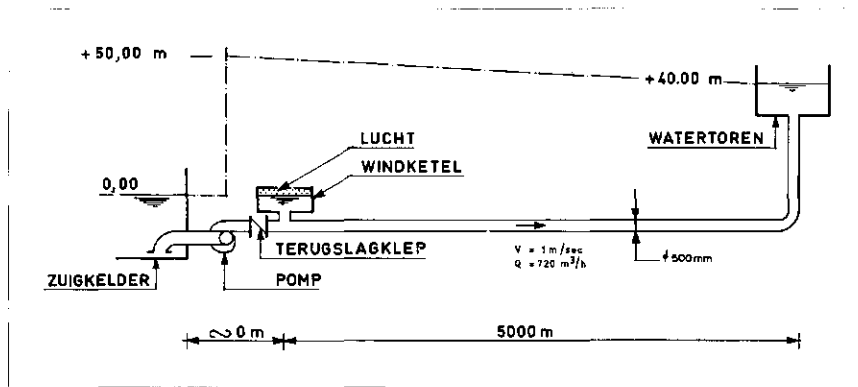
Uitgaande van een bepaalde bedrijfs-luchthoud, wordt in de berekening het grootste luchtvolume gevonden op het moment dat de lucht maximaal geëxpandeerd is. Dit wordt in afb. 3 de netto ketelinhoud genoemd. De totale ketelinhoud zal op praktische gronden wat groter zijn.

Als voorbeeld is in afb. 4 voor het geval van de windketel met een bedrijfs-luchtvolume van 1 m³, het verloop van de druk bij de ketel en van het luchtvolume na pompuitval uitgezet.

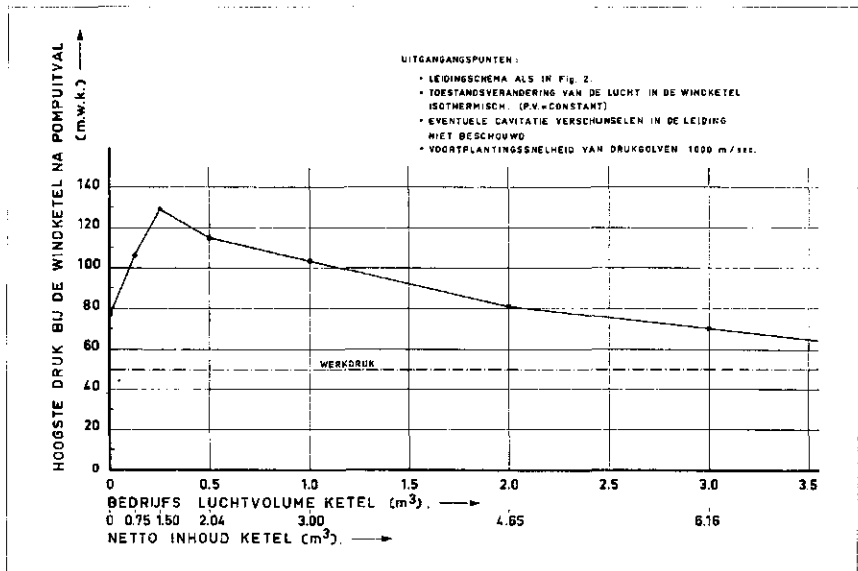
Zowel de buffertoren als de windketel kunnen op diverse manieren worden uitgevoerd (zie afb. 5). De windketel heeft als groot (architectonisch) voordeel dat de hoogte tot elke gewenste waarde gereduceerd kan worden, terwijl de buffertoren, waarin een vrije waterspiegel staat, altijd hoger moet zijn dan het hoogste drukniveau van de pompen.

Een bezwaar dat met de toepassing van buffertoren en windketels gepaard kan gaan, is het knallen van terugslagkleppen. De snelle omkering van de stroomrichting van de massa water tussen de pompen en de toren of ketel, stelt hoge eisen aan de sluitkarakteristiek van de keerkleppen achter de pompen. Behalve het kiezen van snelsluitende axiaalkleppen kan ook het verder benedenstrooms plaatsen van de buffertoren of het vergroten van het polaire traagheidsmoment van de pompen (GD²) oplossing brengen.

Een bijzonder probleem bij lange transportleidingen in Nederland is dat de statische opvoerhoogte meestal gering is in vergelijking tot de totale opvoerhoogte van de pompen. Het grootste gedeelte van de opvoerhoogte wordt gebruikt

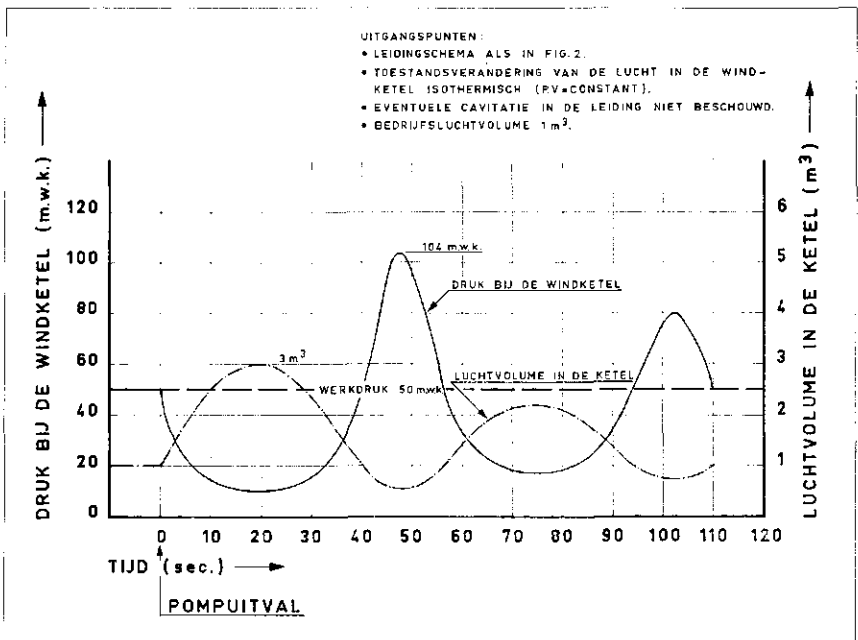


Afb. 2 - Schema persleiding met windketel.



Afb. 3 - Hoogste druk bij de windketel na pompuitval voor verschillende ketelinhouden.

Afb. 4 - Verloop van druk en luchtvolume na pompuitval voor een windketel met een bedrijfs-luchthoud van 1 m³.



voor het overwinnen van de leidingweerstand. Als direct gevolg hiervan is het meeste gevaar na pomputval gelegen in het optreden van onderdrukken, die aanleiding geven tot het vormen van vacuûmbellen over grote lengten van de leiding (afb. 6). Deze bellen zullen na enige tijd dichtlopen waarbij de mogelijkheid bestaat dat hierdoor gevaarlijke drukstoten ontstaan. Het berekenen van dit verschijnsel, dat een niet-stationaire tweefasestroming betreft, is voor zover mij bekend nog niet op betrouwbare wijze mogelijk. Het toepassen van buffertoren en windketels vindt dan ook vaak uitsluitend plaats om een niet-berekenbaar verschijnsel (vacuûmvorming) te vervangen door een verschijnsel dat wel nauwkeurig te berekenen is (slingerbuffertoren of windketel). Een ander geval van vacuûmvorming kan zich voordoen bij koelwaterleidingen voor elektrische centrales. Hierbij blijkt vaak dat de condensors het enige hoge punt in het leidingprofiel vormen. De vacuûmbel zal dan in dat punt ontstaan. De gevolgen kunnen dan met redelijke benadering berekend worden door ter plaatse een scheiding van de waterkolom te veronderstellen.

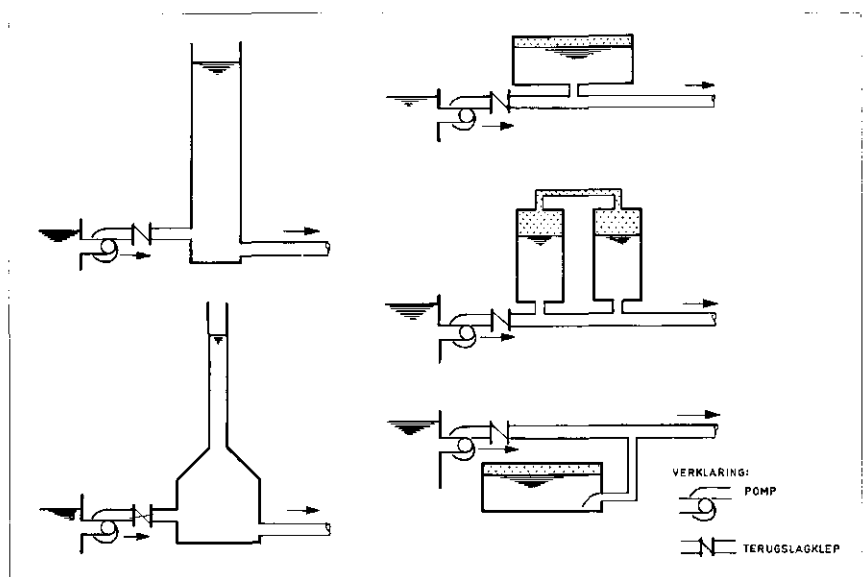
Distributie netten

Ook in distributienetten kunnen waterslagverschijnselen optreden. Dit kan zijn oorzaak vinden in het geweld of ongewild schakelen van pompen en de verkeerde werking van terugslagkleppen wat betreft de voedingszijde van het net. Aan de verbruikerskant kunnen de oorzaken zijn het te snel sluiten van afsluiters of het slecht functioneren van keerkleppen. De zo veroorzaakte drukstoten worden in sommige gevallen versterkt door de aanwezigheid van luchtbellens in de leiding. Deze luchtbellens hebben dan het effect van een te kleine windketel zoals beschreven in het voorgaande.

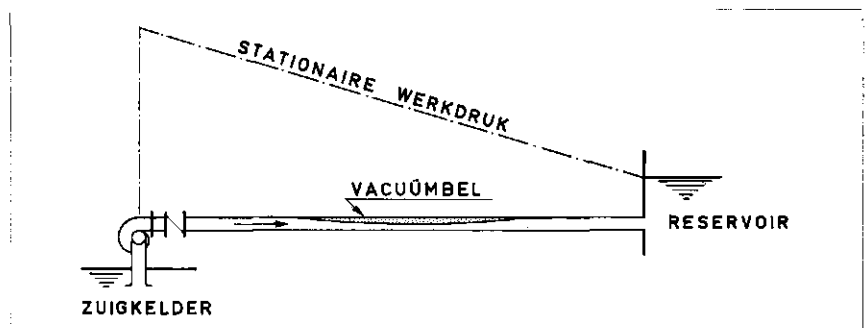
De ondervonden bezwaren kunnen variëren van geluidshinder en slechte werking van registratie- en telemetrieapparatuur, tot breuken door materiaalvermoeidheid.

Het berekenen van waterslagverschijnselen in vertakte en vermaasde leidingnetten is een taak die alleen met de computer te volbrengen is. Maar ook dan zal het praktisch nooit mogelijk zijn om het gehele netwerk tot in de kleinste vertakkingen in de berekening te betrekken. Vrijwel altijd zal een schematisering gemaakt moeten worden waarin alleen de belangrijkste leidingen opgenomen worden. De overige leidingen worden dan geschematiseerd tot aftappunten. Voorts zullen bij de berekeningen een aantal bedrijfssituaties beschouwd moeten worden, waarbij bv. het aantal pompen gevarieerd wordt en bepaalde leidingen afgesloten kunnen zijn.

De door het grote aantal mogelijke varianten al vrij kostbare berekeningen bezitten bovendien nog een grote mate van



Afb. 5 - Verschillende uitvoeringsmogelijkheden van buffertoren en windketels.



Afb. 6 - Vacuûmbel in een lange persleiding na pomputval.

onbetrouwbaarheid door de gemaakte schematiseringen. Ook blijkt uit berekeningen vaak dat netwerken drukgolven op een „sponsachtige” manier absorberen. De grote verscheidenheid aan leidinglengten, de vele aftappunten en de weerstand, hebben een verbrokkelende en dempende werking op de drukgolven.

Daarom zou ook een meer praktische benadering van het probleem overwogen kunnen worden. Wat betreft waterslagverschijnselen die veroorzaakt worden aan de verbruikerskant kunnen goede voorschriften voor de inspectieafdeling die de toelaatbare sluittijden vaststelt en de keuze van keerkleppen bepaalt, de moeilijkheden oplossen. Aan het begin van het net bij het pompstation kan bij de bouw rekening gehouden worden met een later aan te brengen waterslagvoorziening, zonder dat die voorziening inderdaad direct toegepast wordt. Bij de eerste ingebruikname, welke meestal bij kleine capaciteit zal plaatsvinden, worden de door het pompstation veroorzaakte drukstoten gemeten. Dit wordt steeds herhaald als een uitbreiding van het net plaats vindt. Indien op een gegeven moment de drukken ontoelaatbare waarden dreigen te overschrijden kan de juiste waterslagvoorziening alsnog gekozen worden. Op dat moment zal ook

een betere berekening mogelijk zijn, omdat bepaalde schematiseringen in de praktijk getoetst kunnen worden.

De sluittijd van afsluiters

Iets nader zal worden ingegaan op het in de praktijk veel voorkomende probleem van de sluittijd die moet worden aangehouden bij afsluiters, om ontoelaatbare drukverhogingen te vermijden. Voor het eenvoudige geval van een enkelvoudige leiding met aan het einde een afsluiter, zijn grafieken bekend waaruit direct de drukverhoging kan worden afgelezen bij een bepaalde sluittijd [6]. Ter beperking van de overdruk wordt voor eenparig sluitende afsluiters in lange leidingen wel de volgende vuistregel gebruikt: totale sluittijd in seconden = 0,06 leidinglengte in meters.

Deze regel is gebaseerd op 2 veronderstellingen, te weten:

- 1^o) de invloed van een afsluiter op de stroming in een langere leiding is pas merkbaar over de laatste 30 % à 10 % van zijn sluitweg.
- 2^o) deze 30 % à 10 % van de sluittijd moet zo lang zijn dat er voldoende reflecties van drukgolven tegen het leidingeinde in kunnen plaats vinden.

Hieruit blijkt dat de totale sluitijd aanzienlijk bekort kan worden door de eerste $\pm 70\%$ van de sluitweg snel te doorlopen en het resterende gedeelte overeenkomstig bovenstaande formule langzaam uit te voeren.

Bij distributienetten doet zich het probleem voor dat de betreffende leiding meestal een zijleiding van een hoofdleiding is.

Indien de diameter van de zijleiding veel kleiner is (bv. factor 5) dan die van de hoofdleiding, dan kan voor de leidinglengte in de genoemde vuistregel de lengte van de zijleiding genomen worden. Is er echter geen groot verschil in diameter dan zal ook een gedeelte van de hoofdleiding bij de leidinglengte betrokken moeten worden. Hiervoor kunnen moeilijk vaste regels gegeven worden.

Dat de sluitijd bij kleinere diameter vaak relatief korter gekozen wordt vindt zijn oorzaak in het feit, dat deze leidingen meer reserve tegen overbelasting bezitten dan leidingen met een grote diameter.

Metingen

Het is goed mogelijk en soms zelfs betrekkelijk eenvoudig, om drukstoten die bij waterslag optreden te meten. Er dient onderscheid gemaakt te worden tussen langzame en snelle verschijnselen. In de eerste groep vallen bv. de slingeringen van buffertoren en windketels, het langzaam dichtdraaien van afsluiters en in sommige gevallen ook het uitvallen van pompen die direct aan een lange transportleiding zijn gekoppeld zonder waterslagvoorziening. In deze gevallen kan het drukverloop vaak goed worden afgelezen op Bourdon manometers die op geschikte plaatsen zijn aangesloten. Eventueel kan het verloop met een eenvoudige filmcamera worden vastgelegd. Uit het verloop van de druk kan tevens een indruk worden verkregen over de betrouwbaarheid van de meting: indien de wijzer van de manometer trilt of schokt zijn snelle drukstoten aanwezig en zal de meting niet juist zijn. Toepassing van U-buis manometers moet afgeraden worden in verband met hun lange slingtijden. Wel kunnen deze U-buizen gebruikt worden voor het ijken van de Bourdon

manometers bij stationaire drukken. Tijdens het meten van waterslag verschijnselen dienen ze dan afgesloten te worden.

Op de beschreven manier is het vaak mogelijk om goedkoop en snel een (soms heel goede) indruk te krijgen van de optredende drukschommelingen.

Onder de snelle verschijnselen vallen bv. het dichtslaan van keerkleppen, het dichtlopen van vacuümbellen, enz. Bij deze gevallen is gebruik van duurdere meetinstrumenten nodig. De druk wordt gemeten met behulp van in de leidingwand gemonteerde drukdozen en geregistreerd op bv. UV-recorders of oscillografen. Ook zal dan vaak tegelijk de beweging van de terugslagklep en het toerentalverloop van de pomp electrisch of electronisch gemeten worden. Eventueel kan zelfs met gespecialiseerde apparatuur het verloop van de stroomsnelheid in de leiding gemeten worden.

Voor het goed uitvoeren van de metingen is inzicht in het waterslagprobleem vereist. Voor ieder soort drukstoten moet de geschikte meetapparatuur gebruikt worden, en er moet op de juiste plaatsen gemeten worden, nl. daar waar extreme drukken optreden.

Samenvatting

Het voorgaande wordt als volgt samengevat:

- Door toenemende afmetingen van transportleidingen en leidingnetten dient meer aandacht gegeven te worden aan het waterslag probleem.
- In de praktijk komen als beveiliging tegen waterslag in lange transportleidingen voornamelijk de buffertoren en de windketel in aanmerking.
- Een verkeerd gedimensioneerde waterslagvoorziening kan hogere drukken ten gevolge hebben dan wanneer geheel geen voorziening getroffen is.
- In distributienetten kan het eenvoudiger zijn om metingen uit te voeren in plaats van berekeningen te maken.
- Onder bepaalde omstandigheden kunnen waterslagverschijnselen met eenvoudige instrumenten (Bourdon manometers) gemeten worden.

Literatuur

1. Joukowsky, N., „*Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungen*”, Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St. Pétersbourg, 1900, Bd IX, no. 5.
2. Bergeron, L., „*Water-hammer in hydraulics and wave surges in electricity*”, John Wiley, and sons, Inc., New York, 1961.
3. Manuel, A. R., „*Waterslag in drukleidingen*”, Land en water, jan./febr. 1968, pp. 36-43.
4. Manuel, A. R., Vreugdenhil, C. B. en Wijdieks, J., „*Waterslag*”, De Ingenieur, 80, nr. 30, 26 juli 1968, pp. 093-0100.
5. Streeter, V. L., and Wylie, E. B., „*Hydraulic transients*”, New York, Mc Graw-Hill, '67.
6. Stephenson, D., „*Water-hammer charts including fluid friction*”, Proc. A.S.C.E., 92, 1966, no. HY5, Sept., pp. 71-94.