



Algoritme berekent combinatie van waterslag, dampbellen en vloeistof-leiding-interactie

Tikken en kiezelsteentjes in trillende leidingen voorspelbaar

Waterslag en dampbellen. Sinds de grootschalige toepassing van ééngreepskranen in het huishouden kent vrijwel iedereen de verschijnselen. Met een snelle beweging omhoog of omlaag gaat de kraan plotseling volledig open of dicht. Het is wel handig en snel, maar de tik en een geluid als rolden er kiezelsteentjes elders in de leiding geven aan dat er ongezonde effecten optreden.

Ook de industrie en drinkwaterbedrijven kampen met drukvariaties in leidingen door het plotseling sluiten van kleppen en kranen of door uitvallende pompen. De gevolgen zijn leidingbreuk, beschadiging van pompen en kleppen en erosie in leidingen.

De bestaande programma's voor het ontwerpen van leidingnetten berekenen slechts waterslag in combinatie met of dampbellen of de interactie tussen de vloeistof en de leiding. Dat was op zich al moeilijk genoeg.

De nog moeilijker combinatie van damp bellen en vloeistof-leiding-interactie was nog nooit onderzocht. De exacte fysische processen in de leidingen waren dus maar ten dele bekend. Uit veiligheid zijn leidingen daarom vaak overgedimensioneerd. Al jaren werd vermoed dat de trillingen van vrijhangende leidingen grote invloed kunnen hebben op de drukvariaties. Promovendus Arris Tijsseling heeft dat bevestigd met een door hem ontwikkelde berekeningsmethode waarmee alle fysische effecten in leidingen in combinatie worden gesimuleerd. Het resultaat moet leiden tot veiliger leidingnetten en een besparing van grondstoffen en energie door efficiënter ontwerpen.



Met de introductie van de ééngreepskraan is een oud probleem uit de industrie thuis zichtbaar en hoorbaar geworden: waterslag en cavitatie.

Waterslag is de naam voor grote drukvariaties in een leidingsysteem ten gevolge van het openen of het sluiten van een kraan. Door de grootschalige introductie van ééngreepskranen in het huishouden zijn veel mensen geconfronteerd met een luide tik bij het snel sluiten van zo'n kraan. De conventionele draaikranen konden moeilijker realiseren wat de ééngreepskraan doet: namelijk in extreem korte tijd de stroom vloeistof tot stilstand brengen. Bij benzinepompen doet zich hetzelfde verschijnsel voor. Die ogenschijnlijke eenvoudige handeling heeft nogal complexe effecten tot gevolg. Op het moment dat de kraan dichtgaat, staat de vloeistof direct achter de kraan stil, maar de vloeistof die er achteraan komt 'weet nog van niets' en stroomt rustig door. Daarbij botst het op de reeds stilstaande vloeistof met als gevolg een plotselinge stijging van de druk op die plek die zich manifesteert als een duidelijk hoorbare tik. De drukstijging herhaalt zich eindeloos. Vloeistof is niet makkelijk op te delen in compartimenten, maar het effect is vergelijkbaar met dat van een lange trein die tegen een muur opbotst. De locomotief staat daarbij meteen stil, maar de eerste wagon rijdt nog een fractie van een seconde door. De druk van de eerste wagon op de locomotief stijgt enorm. Bij de tweede wagon herhaalt deze situatie zich: de druk op de eerste wagon stijgt eveneens. Bij iedere volgende wagon die door de voorwaartse beweging op z'n voorganger botst, verplaatst de druk in de rij wagons zich steeds verder naar achteren. Dit fenomeen heet een lopende drukgolf.

Moskou

Onderzoek naar waterslag is al bijna honderd jaar oud. In 1897 begon de Moskouse ingenieur N.E. Joukowsky op verzoek van de Moskouse waterleidingmaatschappij metingen te verrichten aan drukvariaties in het leidingnet van die stad. Joukowsky onderkende het probleem als waterslag en formuleerde er in 1898 een wet voor. Hij



concludeerde dat de drukvariatie in een leiding is gerelateerd aan de stroomsnelheidsvariatie. Als bijvoorbeeld de snelheid in een stalen waterleiding tien centimeter per seconde is en de ééngreepskraan wordt plotseling gesloten, dan ontstaat er lokaal een drukverhoging van 1 bar. Joukowsky's formule:

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V$$

ΔP = drukvariatie, ρ = massa dichtheid van de vloeistof, c = snelheid van drukgolf, Δ = snelheidsvariatie

wordt nog dagelijks toegepast door ontwerpers en beheerders van leidingsystemen, zelfs in een limonadefabriek. Op een congres in Spanje ontmoette lijsseling een Braziliaan die berekeningen had uitgevoerd aan sinaasappelsap-slag.

Cavitatie

In de waterleiding thuis zal het plotseling sluiten van een ééngreepskraan een lopende drukgolf veroorzaken die op een gegeven moment op een hoofdleiding uitkomt. Op dat punt vindt een drukval plaats en stroomt het samengeperste water vanuit de zijtak in de hoofdleiding. De drukval verplaatst zich als een lopende golf in de richting van de kraan. Het is vergelijkbaar met de laatste wagon in het voorbeeld. Door de massa drukt die nog wel tegen z'n voorganger. Op dat moment is de hele trein als een veer samengedrukt. De laatste wagon veert als eerste terug, waarbij de druk op z'n voorganger verdwijnt. Die wagon veert vervolgens ook terug, waarbij de druk op diens voorganger verdwijnt, enz. Analoog aan de waterleiding treedt ook hier een lopende ontspanningsgolf op. Zodra de ontspanningsgolf de zojuist gesloten kraan heeft bereikt, zal het wegstromende water door onderdruk net achter de kraan losbreken, tenminste als de aanvankelijke druk in de waterleiding niet te hoog is. Het nog steeds wegstromende water, doet een grote dampbel (een holle ruimte met vloeistofdamp) groeien. Het fenomeen van deze grote dampbel wordt ook wel kolomscheiding genoemd. De ontspanningsgolf reflecteert als een onderdruk golf die vaak een spoor van kleine dampbelletjes (of cavitatie) achter zich aan sleurt. De imploderende dampbelletjes produceren een geluid dat doet denken aan kiezelsteentjes die door de leiding stromen.

De vierde golf in deze cyclus is opnieuw een ontspanningsgolf, want het neemt de onderdruk weg uit de leiding. De hierop volgende drukgolf is de eerste in een volgende cyclus, namelijk weer een overdruk golf. Maar, als de grote dampbel nog niet is geïmplodeerd, zal er door de daarin heersende onderdruk geen overdruk golf kunnen ontstaan. Op een bepaald moment zal ook de grote dampbel imploderen. De drukpiek die daardoor ontstaat, gaat ook gepaard met een duidelijke tik bij de kraan.

De drukklappen door cavitatie zijn soms nog groter dan die veroorzaakt door waterslag. De drukverschillen kunnen leiden tot leidingbreuk. Er zijn zelfs enkele gevallen bekend waarbij door onderdruk een ingegraven leiding over een lengte van enkele tientallen meters was ingeklapt. Cavitatie kan leiden tot het onttrekken van gassen aan water, waardoor luchtbellens ontstaan. Komt een te grote luchtbel bij een pomp, dan schiet het toerental kortstondig enorm omhoog met alle kwalijke mechanische gevolgen van dien. Dampbellen kunnen leiden tot erosie in leidingen.

Uitzetten en krimpen

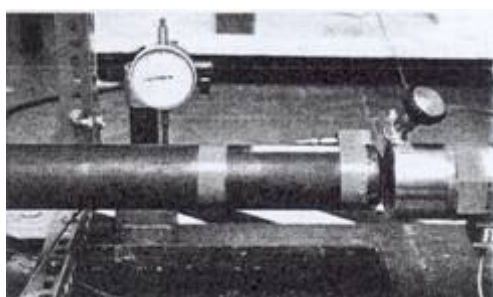
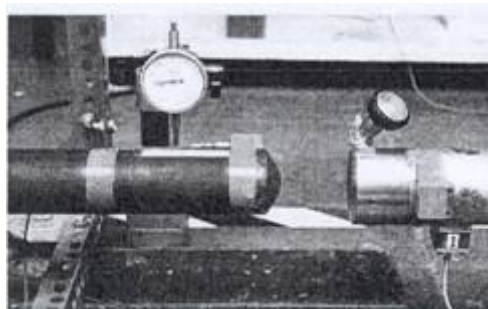
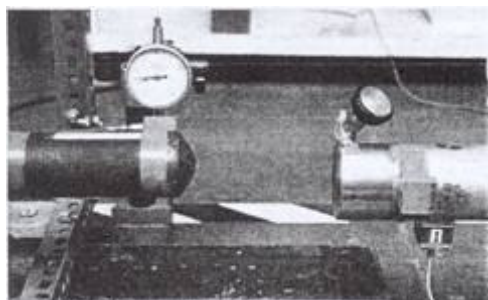
Vloeistof-leiding-interactie (VLI) bestaat uit drie mechanismen: de wrijving tussen de vloeistof en de leiding; de invloed van de trilling van een leidingbocht (of het einde van een buis of buisdeel bij gesloten klep) op de vloeistof; en de uitzetting van de buisdiameter door vloeistofdruk en het resulterende krimpen in de lengte, en andersom. De wrijving is de minst belangrijke component. De trillingen van de uiteinden van de buis zorgen voor extra drukgolven in de vloeistof. Het uitzetten van de buis heeft hetzelfde effect, doch in mindere mate.

In waterleidingnetten worden vaak windketels, bufferschachten of veiligheidskleppen ingebouwd om de tijdelijke overdruk op te vangen, of luchtinlaatkleppen om onderdruk en dus cavitatie te voorkomen. Deze methoden zijn echter niet geschikt voor de



chemische of nucleaire industrie, waar producten niet aan de open lucht mogen worden blootgesteld.

VLI treedt op bij plotselinge drukvariatie als gevolg van het uitvallen van een pomp of een plotselinge klepsluiting; het leidingsysteem wordt geëxciteerd. Alleen bij leidingen die stevig vastzitten of zijn ingegraven treedt nauwelijks VLI op. Omdat vrijwel alle leidingen een bepaalde mate van speling moeten hebben, bijvoorbeeld om uitzetting door temperatuurverschillen op te vangen, is kennis van VLI onmisbaar voor het doelmatig en veilig ontwerpen van leidingsystemen.



De staaf is zodanig gecentraliseerd dat de buis tot op de tiende millimeter nauwkeurig wordt geraakt. In een fractie van een seconde is de meting achter de rug.

Raketten

Tot in de jaren zeventig worden de verschillende invloeden die de vloeistof op een leiding kan hebben (en andersom), niet erg serieus genomen. Het brandstofsysteem voor raketten leverde in de jaren zestig de eerste wetenschappelijke publicaties op naar vloeistof-leiding-interactie. Pas met de grootschalige invoering van kerncentrales verschenen eind jaren zeventig enkele tientallen publicaties over deze materie. De vraag naar meer onderzoek drong zich steeds sterker op. Vanuit het oogpunt van veiligheid wilde men de ontwerpen van leidingsystemen kunnen doorrekenen en 'post-accident'-analyses uitvoeren. Ook voor het bepalen van de resonantiefrequenties van een bepaald leidingsysteem en het onderdrukken van trillingen is grondige kennis van de interactie nodig. Dit fenomeen kon alleen goed in kaart worden gebracht met behulp van snelle en zware computers.

Combinatie

Wetenschappers van de TU Delft en het Waterloopkundig Laboratorium in Delft hebben van 1965 tot 1975 computermodellen ontwikkeld voor de combinatie van waterslag en cavitatie. Door moderne apparatuur konden ze veel nauwkeuriger waarnemingen en berekeningen doen en die sneller verwerken dan hun vakbroeders in de twintig jaar daarvoor. De Delftenaren vervulden op mondiale schaal een voortrekkersrol op dit gebied. De Amerikaanse prof. D.C. Wiggert en de Duitse dr. W. Bürmann begonnen zo'n vijftien jaar geleden doelgericht aan waterslag en VLI te meten en modelleren. Vooral de door Wiggert ontwikkelde algoritmen voor VLI waren zeer efficiënt.

Het Waterloopkundig Laboratorium (WL) heeft de afgelopen jaren een computerprogramma ontwikkeld voor het berekenen van waterslag en VLI. Het was gebaseerd op het werk van Wiggert en getest aan de hand van metingen aan een grootschalige proefopstelling.

Op dit punt stapte promovendus ir. Arris Tijsseling in het onderzoek. In het kader van zijn vervangende dienstplicht kwam de kersvers afgestuurde wiskundige bij het WL



terecht. Hij was aan de TU afgestudeerd bij de faculteit Technische Wiskunde op het gebruik van de rand-elementenmethode in de breukmechanica. Zijn werk bij het WL betrof de numerieke modellering van vloeistof-leiding-interactie in volledig met vloeistof gevulde buizen. Het door WL ontwikkelde computerprogramma FLUSTRIN voorzag nog niet in de ontbrekende combinatie VLI en cavitatie. Ze verwachtten dat uitwerken, implementeren en verifiëren veel tijd en geld zou gaan kosten. Daarom namen ze contact op met de TU Delft, of die een promovendus op het onderzoek kon zetten, het WL zou wel mee betalen. De samenwerking verliep vlot. Het leek voor de hand te liggen dat Tijsseling de kandidaat zou worden; hij had al anderhalf jaar aan de problematiek gewerkt.

Tijsseling begon met een uitgebreid literatuuronderzoek. Toen hij zijn bij het WL ontwikkelde VLI-model in combinatie met cavitatie wilde verifiëren, moest hij uitwijken naar Dundee in Schotland. Via via wist hij dat prof. Alan E. Vardy en dr. David Fan van de faculteit. Civiele Techniek van de University of Dundee een opstelling hadden gebouwd, die uitermate geschikt was voor dat karwei. Een eigen opstelling bouwen was veel te duur, dus met geld van het WL en de TU Delft heeft hij in september 1989 en in april en mei 1990 met de opstelling gemeten.

Stormram

De opstelling in Dundee werkt als volgt: een horizontale stalen buis wordt gevuld met leidingwater onder druk en aan weerskanten afgesloten. In en op de buiswand zijn drukopnemers en rekstrookjes aangebracht. Op de buis zijn reflectoren gemonteerd voor laser-doppler-snelheidsmetingen.

De buis van 4,5 meter, met een buitendiameter van 6 cm en een wanddikte van 4 mm, is opgehangen aan twee staalkabels. In het verlengde van de buis is een stalen staaf van 80 kg opgehangen, die als een stormram op het uiteinde van de buis moet botsen om de benodigde spannings- en drukgolven in de buis op te wekken.

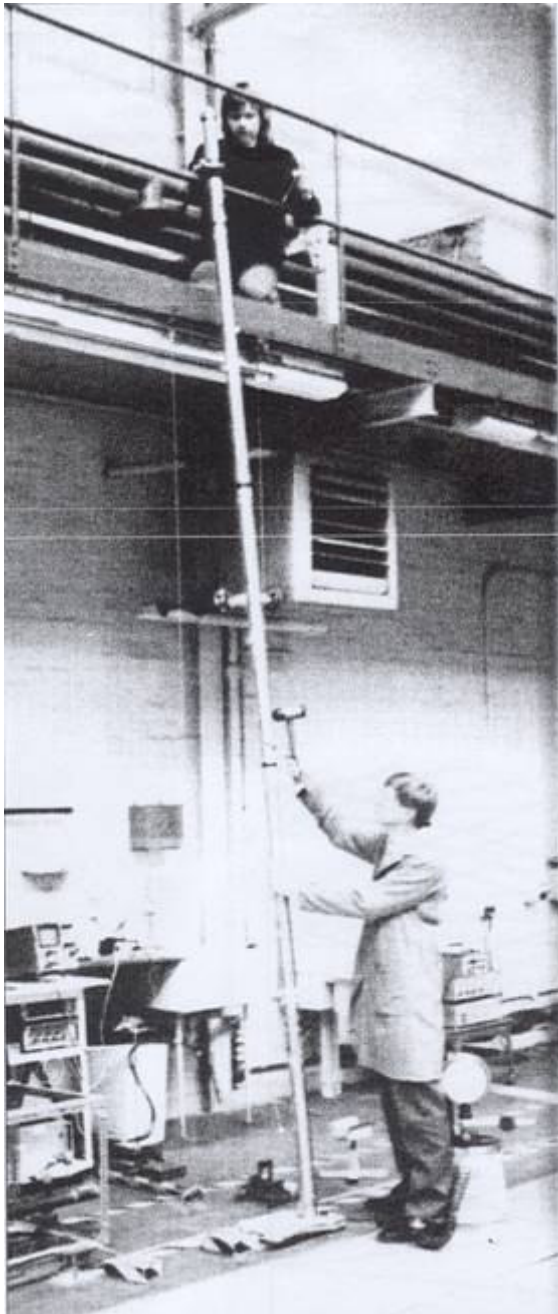
Het principe van het systeem is zeer eenvoudig, maar er is drie jaar aan gewerkt voor de opstelling naar tevredenheid werkte. Ondanks de eenvoud van de opstelling, kost het kalibreren alleen al bijna een dag.

Impact

Nog voor Tijsseling een keer met z'n ogen kan knippen, is de meting al verricht.

De botsing tussen de staaf en de buis (opname 1) veroorzaakt een drukgolf (L1) die naar het andere uiteinde van de buis beweegt met de geluidssnelheid van een vloeistof in een buis: 1350 meter per seconde. Niet alleen de vloeistof komt in beweging, maar ook in de buiswand plant zich een longitudinale spanningsgolf voort in de richting van het vrije uiteinde. De spanningsgolf (S) heeft echter een veel hogere snelheid dan de drukgolf in de vloeistof: 4600 meter per seconde. Het gaat gepaard met het krimpen van de buis in de lengte en een uitzetting van enkele micrometers in de diameter en daarom een drukdaling in de vloeistof. Druk golf L 1 in de vloeistof daarentegen doet het begin van de buis uitzetten. Het uiteinde van de buis 'weet' nog van niets.

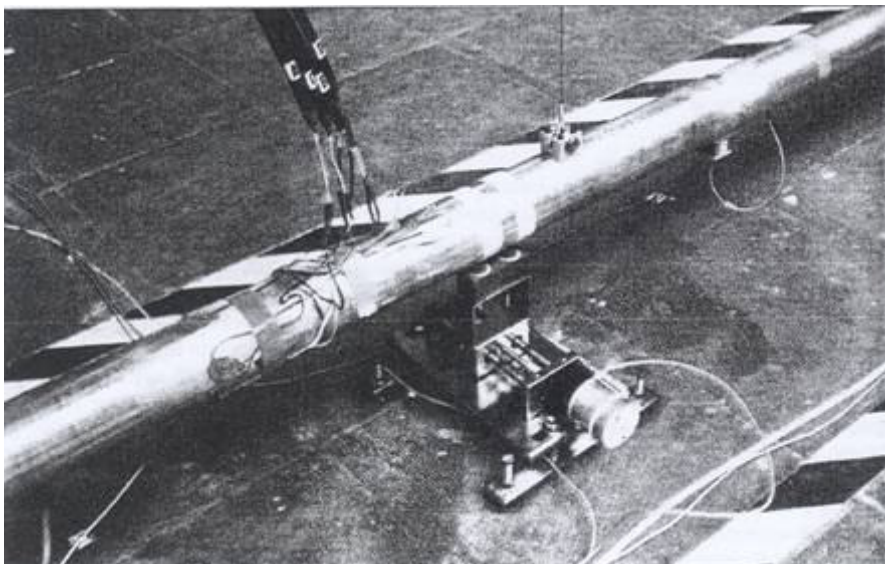
Terwijl de ontspanningsgolf (S2) van de buiswand in de richting van de staaf beweegt (opname 2), is de veel langzamere drukgolf (L 1) nog onderweg. De impact' doet de buis naar rechts bewegen. Het gesloten uiteinde van de buis beweegt zich van de vloeistof af. De tragere vloeistof kan die beweging niet bijhouden en er ontstaat een onderdruk golf (L2). De begindruk in de buis is laag en er ontstaat een dampbel; als gevolg daarvan krimpt het uiteinde van de buis in diameter. Omdat de ontspanningsgolf (S2) in opname 3 inmiddels is gereflecteerd als spanningsgolf (S3) krijgt de buis een extra versnelling en komt los van de staaf. Druk golf L 1 is nog steeds onderweg. Onderdruk golf L2 (in tegengestelde richting) is ook nog onderweg. De schok van de achterkant van de buis op de vloeistof ten gevolge van de extra versnelling zorgt er voor dat er een nieuwe overdruk golf (L3) ontstaat.



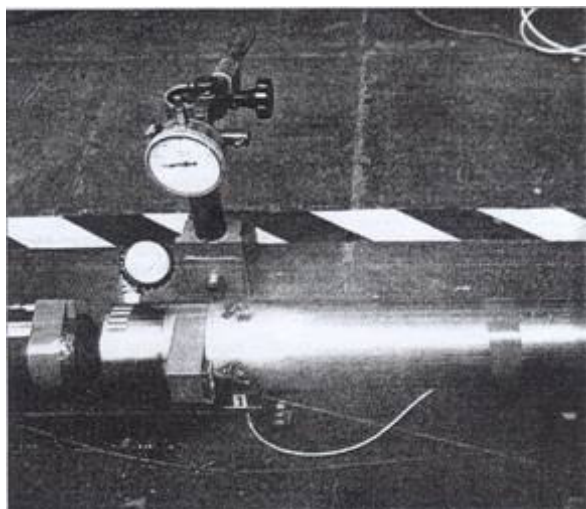
(links)
Proefopstelling op DundeeUniversity wordt met hamerslagen ontluicht.



(boven)
Het instellen en kalibreren van het systeem kost ongeveer een dag. De theodoliet op de achtergrond wordt gebruikt om de staaf en buis exact in één lijn te krijgen. In de buis zijn vijf drukopnemers gemonteerd. Op vier plaatsen zijn vier groepen van drie rekstrookjes gelijmd.



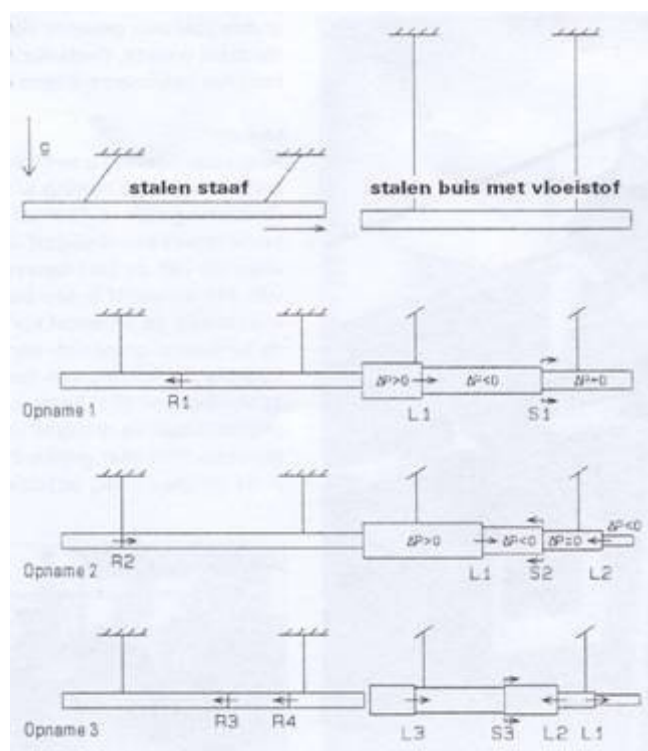
(links)
Met laserdoppler-afstandbepaling wordt de beweging van de buis gemeten.



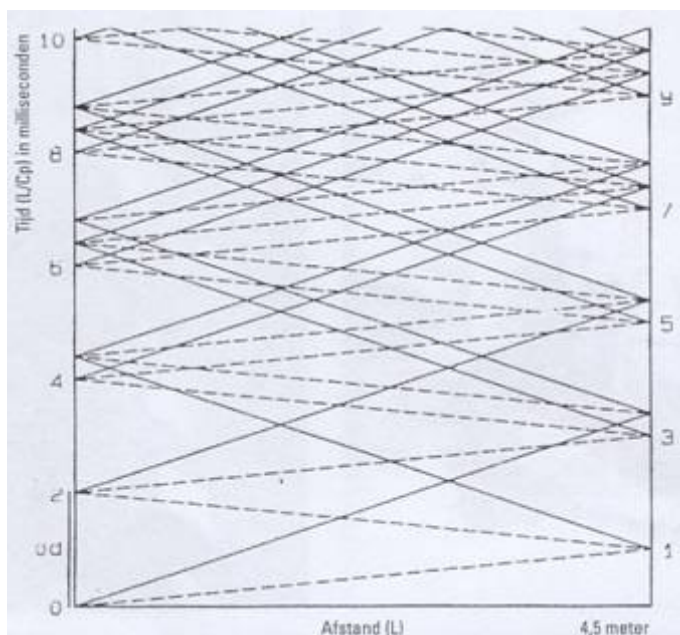
Met op afstandbediende magneten kan de buis vanachter de theodoliet in positie worden gebracht.

Er zullen steeds meer golven door buis en vloeistof gaan lopen. De drie opnamen geven in ieder geval duidelijk de complexiteit aan van de combinatie van VLI en cavitatie. De meetgegevens verkregen met drukopnemers, rekstrookjes en de laserdopplersnelheidsmeter werden vergeleken met de voorspellingen van Tijsseling's computerprogramma. De resultaten voor de proeven met de rechte buis waren boven verwachting.

Bochten in leidingen zorgen voor extra gecompliceerde vloeistof-leiding-interacties, mede veroorzaakt door de nu optredende dwarsgolven. Daarom deed de promovendus ook een test met een L-stuk. Bij proeven met een lage begindruk ontstaan er meer dampbellen en werd de afwijking tussen theorie en experiment groter. Tijsseling is inmiddels als wetenschappelijk medewerker in dienst getreden van Dundee University, waar hij zijn experimenten en berekeningen zal voortzetten. Een proef met een T-stuk staat al op zijn agenda.



Schematische weergave van de golfvoortplantingen in de proefopstelling.



Golffronten in de proefopstelling. Elke aankomende golf resulteert in twee gereflecteerde golven, als gevolg van vloeistof-leiding-interactie. Het beeld wordt steeds gecompliceerder.

*Druk golf in vloeistof _____
Spanningsgolffront in buis -----*



De drukvariaties in de vloeistof in de buis tengevolge van de imploderende dampbelletjes zijn soms zo hoog dat de drukopnemers het begeven.

Aardbevingen

Tijsseling verwacht dat behalve de chemische industrie ook de Japanners en Amerikanen de uitkomsten van dit onderzoek zullen verwelkomen. De chemische industrie moet koste wat het kost vermijden dat een leiding met gevaarlijke chemische producten lek raakt. De nucleaire industrie in aardbevingsgevoelige-gebieden kan het zich uiteraard ook niet veroorloven om een lekkage in het koelsysteem te krijgen. Bij aardbevingen komen van buitenaf trillingen in het leidingsysteem. Met name Japanse nucleaire instellingen kunnen met dit fenomeen te maken krijgen, evenals de Amerikanen in California. Tijsselings model maakt ook een economischer ontwerp mogelijk van leidingsystemen. Als uit berekeningen blijkt dat de drukken en spanningen in een leidingsysteem vrij laag blijven, dan zou de wanddikte lager kunnen zijn. Dat levert een besparing op van grondstoffen en energie in het productieproces.

Onbekendheid met de waterslag heeft vaak geleid tot overdimensionering.

Philip Broos