

## Luchtinslag door plonzende waterstralen

Experimenteel onderzoek naar luchtinslag bij vrij vallende waterstralen uit cirkelvormige kanalen en luchtbelinname door dompelpompen in rioolkelders

Ir. A. Smit (TU Delft, faculteit Civiele Techniek, sectie Vloeistofmechanica; thans Witteveen+Bos)

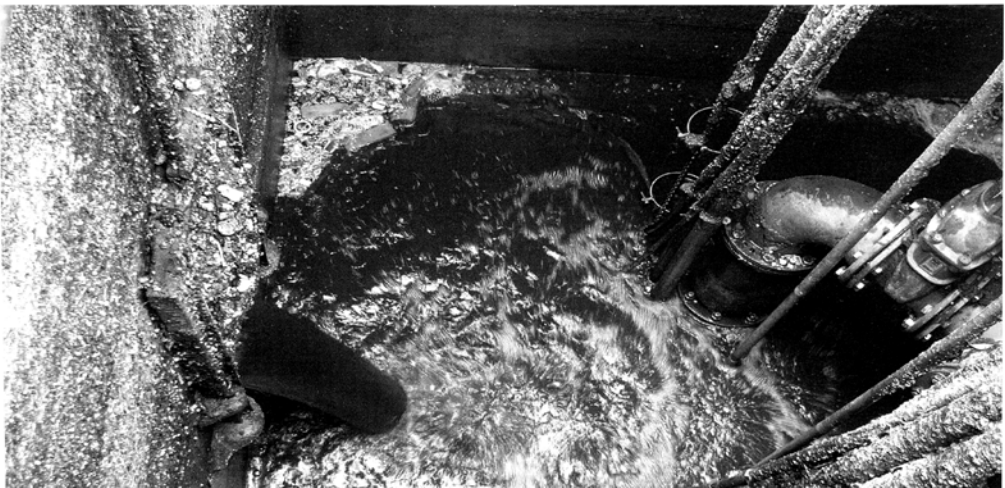
Ir. C.L. Lubbers (WL I Delft Hydraulics en TU Delft, faculteit Civiele Techniek, afdeling Watermanagement)

e-mail: a.smit@witteveenbos.nl  
christof.lubbers@wldelft.nl

**Trefwoorden:** experimenteel onderzoek, afvalwaterpompkelders, luchtinslag, waterstralen, cirkelvormige kanalen, luchtbellens, luchtbelpluimen, luchtbelopname, dompelpompen, afvalwaterpersleidingen  
*Wanneer afvalwater vanuit een rioolstelsel in een pompkelder komt, zal de vallende afvalwaterstraal ervoor zorgen dat lucht wordt ingeslagen in het reservoir. Wanneer deze luchtbellens door een pomp worden opgezogen, kunnen de luchtbellens door ophoping in de afvalwaterpersleiding voor veel extra weerstand zorgen. Een experimenteel onderzoek met een model op ware grootte heeft veel nieuwe inzichten opgeleverd in de volgende mechanismen: vallende stralen uit cirkelvormige kanalen, luchtinslag, vorming van de luchtbelpluimen en luchtopname door dompelpompen.en*

Veel afvalwaterpersleidingen halen hun ontwerp capaciteit niet door extra weerstanden in het leidingsysteem. Een uitgebreid onderzoek heeft aangetoond (Lubbers & Clemens, 2005, 2006) dat luchtzakken in het leidingsysteem een belangrijke oorzaak zijn voor de extra weerstanden. Luchtinname bij de pompinlaat is een belangrijke reden voor het ontstaan van luchtzakken in lei-

dingsystemen. Maar er is tot nu toe weinig bekend over luchtinslag door plonzende waterstralen uit cirkelvormige kanalen en luchtopname door dompelpompen dichtbij plonzende waterstralen. Vooral bij pompkelderafmetingen, die in de praktijk worden toegepaste voor rioolkelders. Zie figuur 1 voor een veelvoorkomende situatie in pompkelders. In dit artikel volgt een korte beschrijving van de



Figuur 1: Praktijkvoorbeeld van een plonzende waterstraal in een rioolkelder

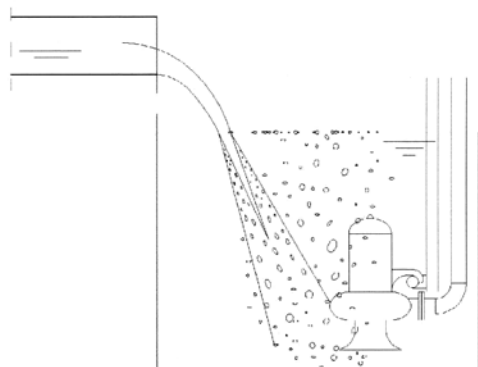
resultaten en kennis die zijn opgedaan bij het doen van experimenteel onderzoek in het kader van een afstudeeropdracht aan de TU Delft met een fysiek model, zie figuur 2. Het beschrijft onder meer de relatie tussen plonzende waterstralen en de mate van luchtinname bij de pompinlaat. Waar mogelijk volgt een theoretische onderbouwing. Het uitgevoerde onderzoek past in het CAPWAT onderzoek, dat door WL I Delft Hydraulics en de TU Delft wordt uitgevoerd. De experimenten zijn bij WL I Delft Hydraulics uitgevoerd.

Het doel van het onderzoek was het opdoen van kennis en inzicht in de optredende gebeurtenissen. De hoofdvragen daarbij waren:

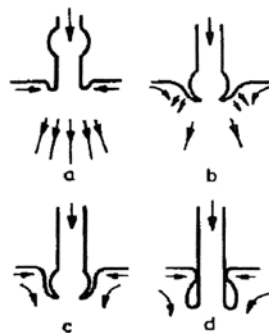
- hoe wordt lucht in een reservoir gebracht door een plonzende waterstraal?
- waar en hoeveel lucht kan in een zekere opstelling ergens verwacht worden?
- wat is het invloedsgebied van de pomp als het gaat om het opnemen van luchtbellen?
- wat is een robuuste oplossing om luchtbellen in de pomp te voorkomen?

## LITERAATUURSTUDIE

Birí (1993) geeft een review van de tot dan toe bekende onderzoeken naar plonzende waterstralen. Hierbij gaat het echter alleen om waterstralen uit spuitstukken. Birí beschrijft dat onregelmatigheden op het straaloppervlak zorgen voor de luchtinslag bij plonzende waterstralen. Deze onregelmatigheden sluiten lucht in op het moment dat de



**Figuur 2:** Een schematisch overzicht van het gebruikte onderzoeksmodel



**Figuur 3:** Luchtinslag mechanisme: (a) – (d) laten de verschillende fasen van een luchtinsluiting zien (Birí 1993)

straal door het reservoiroppervlak gaat en beide oppervlakken niet precies aansluiten. Zie figuur 3 voor een schematische voorstelling van het luchtinslagprincipe.

In tegenstelling tot Birí (1993) en anderen, beschrijft Zhu et al. (2000) dat de snelheid van de straal geen invloed heeft op de mate van luchtinslag en dat alleen de onregelmatigheden op het straaloppervlak daarvoor verantwoordelijk zijn. Zhu geeft aan dat eerdere conclusies van anderen genomen zijn bij experimenten met spuitstukken die niet zijn ontworpen om de turbulentie in de straal te minimaliseren.

Zoals aan gegeven in het voorbeeld gelden vrijwel alle gevonden relaties over plonzende waterstralen in de literatuur voor waterstralen uit spuitstukken. Daarom zijn de gevonden relaties alleen bruikbaar voor afmetingen die veel kleiner zijn dan de afmetingen van pompkelders die in de praktijk worden toegepast. Onder meer uit het CAPWAT-onderzoek is gebleken dat opschalen van twee fasen verschijnselen niet zonder meer mogelijk is. Een extra doel van het project was, om te kijken of de gevonden functies in de literatuur toepasbaar of aanpasbaar zijn voor plonzende waterstralen met veel grotere dimensies.

## MODELOPSTELLING

Pompkelders bestaan in de praktijk in veel verschillende vormen en afmetingen en ook het aantal pompen varieert per kelder. Om zo veel mogelijk

fundamentele resultaten te verkrijgen, wordt in het model een blokvormige reservoir toegepast met een enkele pomp. In figuur 4 staat een schematisch overzicht van modelopstelling.

De aanstroombuis in het model stelt het eindstuk voor van een kleine rioleringsstelsel dat uitmond in een rioelkelder. Tijdens DWA-condities is de buisopening altijd boven het waterniveau in rioelkelder. Hierdoor kan het rioelstelsel tijdens DWA-condities leeg lopen en is de berging tijdens RWA-condities volledig beschikbaar. Daarnaast stroomt het water in het rioel sneller wanneer het doorstroomprofiel klein is en kan het sediment in het stelsel wegspoelen. Er zal dus bij DWA-condities altijd een straal in de rioelkelder plonzen die zorgt voor luchtinslag.

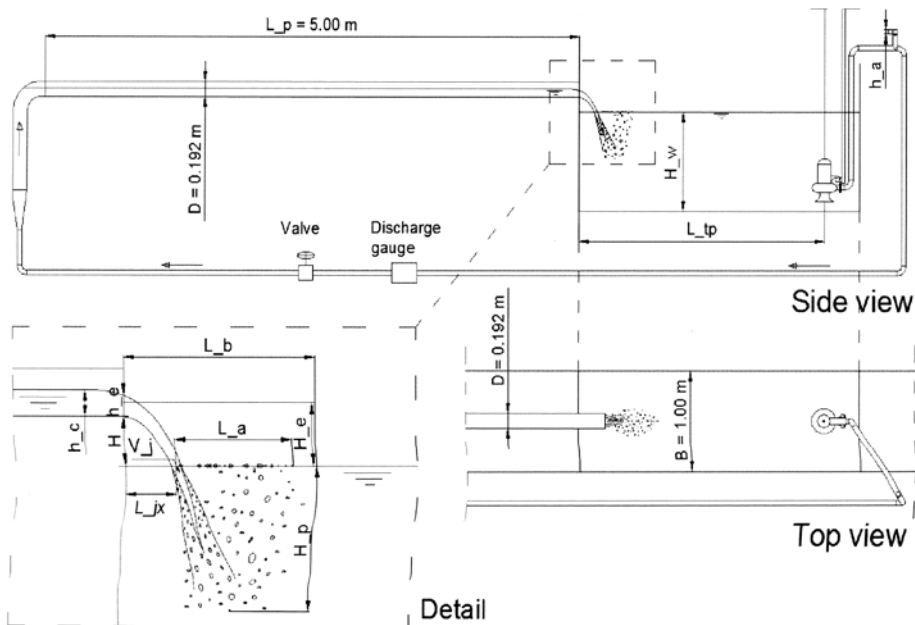
De aanstroombuis was boven het midden van de korte zijde van het reservoir opgesteld om een symmetrisch aanstroomprofiel te verkrijgen. Om schaafeffecten met luchtbellens te vermijden, zijn de afmetingen van het model gelijk aan de afmetin-

gen van een in de praktijk gebruikte kleine rioelkelder. De aanstroombuis was gemaakt van een 5,0 meter lange PVC buis met een doorsnede van  $\varnothing 200$  millimeter. De breedte en de hoogte van het reservoir waren beide 1,0 meter.

Omdat het reservoir een deel van een grote stroomgoot was, kon de lengte van het reservoir eenvoudig worden aangepast door middel van verplaatsbare wanden. De afstand tussen de buisopening en de pomp was instelbaar, net als de hoogte van de aanstroombuis. De dompelpomp had een capaciteit van 30 l/s bij een opvoerhoogte van 6,0 meter.

### Definities van de parameters in figuur 4:

- beluchtingslengte  $L_a$  (m)
- luchtbellengte  $L_b$  (m)
- valafstand  $L_{jx}$  (m)
- buis-pomp afstand  $L_{tp}$  (m)
- kritische diepte  $h_c$  (m)
- einddiepte  $h_e$  (m)
- valhoogte  $H$  (m)
- reële valhoogte  $H_e (= H + 2/3 * h_c)$  (m)



Figuur 4: Een uitgebreid overzicht van de gebruikte modelopstelling plus parameterdefinities

- penetratiediepte  $H_p$  (m)
- waterdiepte  $H_w$  (m)
- plonssnelheid  $V_j$  (m/s)

De afmetingen van de luchtbelpluim is op het oog bepaald en met een rolmaat gemeten. De lengtes zijn gebaseerd op een afstand die de verste of diepste luchtballen eens in de acht à tien seconden bereiken. De fout die hiermee gepaard gaat is afhankelijk van de grootte van de lengtevariatiës over tijd. De bij deze methode gemaakte fout, wordt geschat op ongeveer tien procent.

## KWALITATIEVE OBSERVATIES EN RESULTATEN

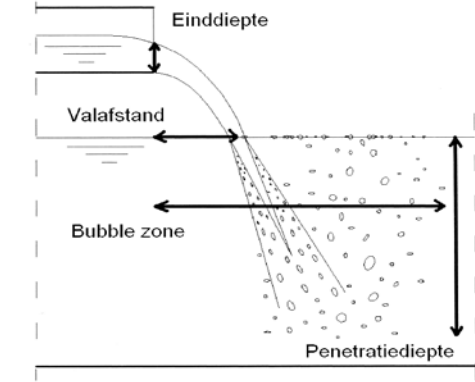
### Lengte van de aanstroombuis

Omdat de ruwheid van het oppervlak van de vallende straal van belang is bij luchtinslag, is de turbulentie in de straal ook van belang. Om de resultaten reproduceerbaar te maken, is het belangrijk dat de stroming in de aanstroombuis stationair is. Daarom moet de aanstroombuis lang genoeg zijn. In de literatuur wordt beschreven dat voor stralen uit spuitstukken een spuitlengte van vijftig maal de diameter nodig is om een stationaire aanstroming te verkrijgen. Wanneer de buislengte  $\hat{L}_T$  wordt gedeeld door de hydraulische diameter  $D_H$  in plaats van de buisdiameter  $D$  (wat redelijk is voor open stroomtoeten) is de dimensieloze buislengte  $\hat{L}_T = L_T/D_H \geq 50$  met een waterdebiet van

$Q_w \leq 2,4 \text{ l/s}$ . Voor grotere debieten was de aanstroombuis te kort om een stationaire uitstroming te verkrijgen. Bij debieten groter dan 7,5 l/s was de straal zichtbaar ruw, en heeft het effect de resultaten beïnvloed. Bij toekomstige experimenten wordt een aanstroombuis aangeraden van tenminste 35 maal tot 50 maal de hydraulische diameter bij de grootste te meten debiet.

### Einddiepte

De waterdiepte op de rand van de aanstroombuis wordt de einddiepte genoemd, zie figuur 5. Aigner (1999) formuleerde een semi-theoretische formule voor de relatie tussen de einddiepte  $h_e$  en het debiet  $Q_w$  voor vrij vallende stralen uit cirkelvormige kanalen:



Figuur 5: Schema definitie parameters

$$\hat{Q}_w = 1,371 \hat{h}_e^{11/6} = 0,794 \hat{h}_e^{11/6}$$

Met de dimensieloze parameters:

$$\hat{Q}_w = \frac{Q_w}{\sqrt{g} D^{2,5}} \quad \text{en} \quad \hat{h} = \frac{h}{D}$$

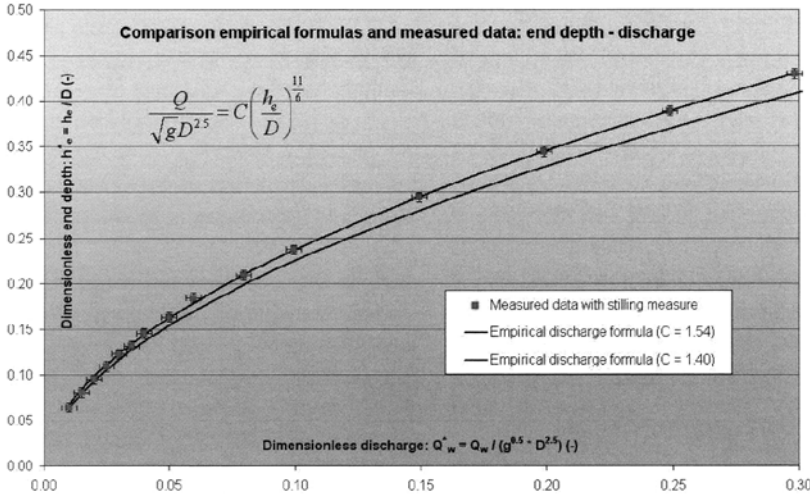
Hierbij is  $D$  de diameter van de aanstroombuis. De formule geeft een afwijking van vijf procent met empirische formules van andere auteurs. De formule is gecontroleerd met resultaten van het model, zie figuur 6.

De door Aigner (1999) gevonden relatie komt goed overeen met de gemeten resultaten. De metingen zijn gedaan met een extra maatregel om de uitstroom bij grotere debieten stabiel te maken. Er is een extra weerstand aan de bovenstroomse zijde van de aanstroombuis aangebracht in de vorm van een stuk textiel. Zo werd de relatief korte lengte van de aanstroombuis gedeeltelijk opgeheven.

De foutenbalkjes bij de gemeten data in figuur 6, waren bepaald aan de hand van de nauwkeurigheid van de instrumenten. De foutmarges in de x- en y-richting waren gelijk aan  $\Delta x = \pm 0,003 = 0,15 \text{ l/s}$  en  $\Delta y = \pm 0,001 = 0,0002 \text{ m}$ .

### Valafstand

Wanneer het waterdebiet  $Q_w$ , de einddiepte  $h_e$  en de valafstand  $L_{jx}$  bekend zijn, is het mogelijk om de curve van de vallende straal te berekenen. De hori-



**Figuur 6: Vergelijking empirische formules en gemeten data met foutenbalkjes**

zontale stroomsnelheid aan het einde van de buis is gelijk aan:

$$v_e = \frac{Q_w}{A_e}$$

De luchtweerstand wordt verwaarloosd, waardoor de valtijd te berekenen is door de valafstand te delen door de horizontale stroomsnelheid:

$$T_j = \frac{L_{jx}}{v_e}$$

Omdat het massacentrum van de straal boven de buisrand bij verschillende debieten niet even hoog zit, werd er een extra hoogte bij de valhoogte H opgeteld:

$$H_e = H + \frac{2}{3} h_e$$

Doordat de straal nabij de buisrand sterk kromt, is een extra verticale beginsnelheid van de straal boven de buisrand toegevoegd en berekend via:

$$H_e + w_e T_j - \frac{1}{2} g T_j^2 = 0$$

Elke valhoogte  $H_e$  heeft een verschillende valafstand  $L_{jx}$ , maar de verticale beginsnelheid blijft bij gelijke debieten hetzelfde. Het is dus mogelijk een gemiddelde verticale beginsnelheid uit te rekenen. De formule voor de curve wordt dan:

$$(x(t); y(t)) = \left( v_e t; H_e + w_e t - \frac{1}{2} g t^2 \right)$$

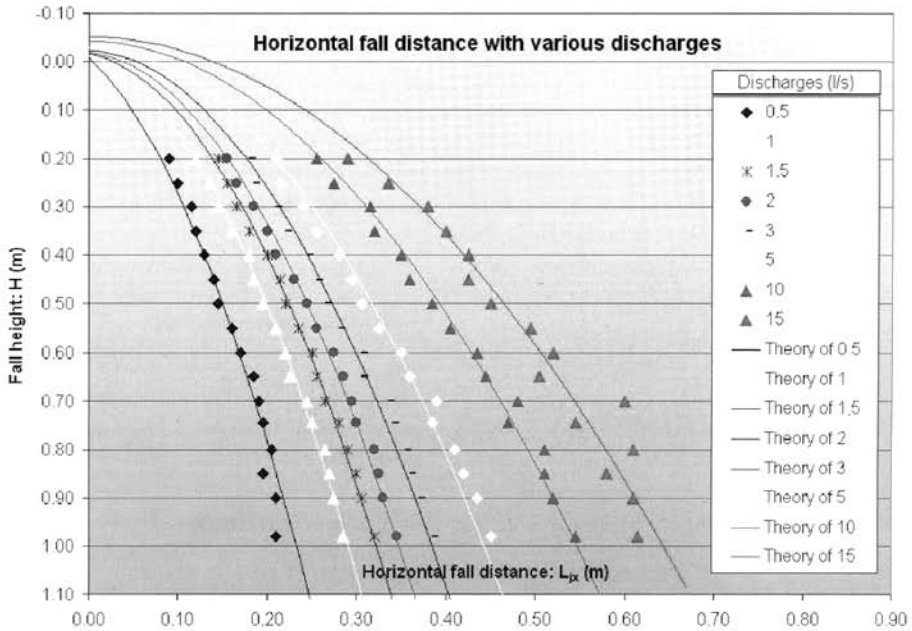
Volgens figuur 7 is de theoretische curve een goede benadering van de gemeten valcurve.

### Vorm van de straalddoorsnede

Al snel na de eerste metingen met plonzende waterstralen bleek dat de hoeveelheid luchtinslag afhankelijk is van de ruwheid van het oppervlak van de vallende straal en, meer verrassend, de vorm van de (horizontale) straalddoorsnede. Samen met het debiet zijn deze de belangrijkste parameters voor luchtinslag.

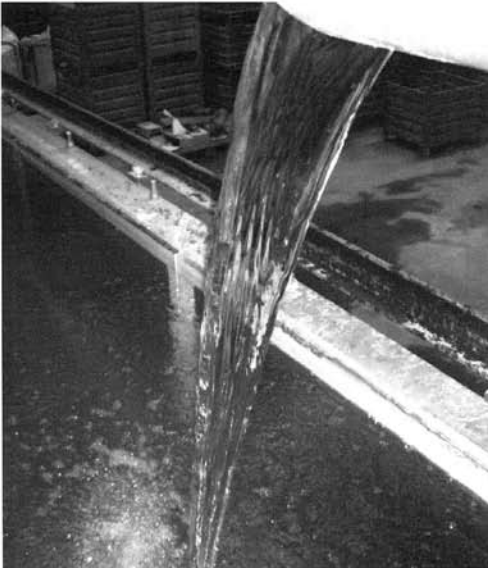
De vorm van de straalddoorsnede is van belang, omdat lucht alleen in het reservoir gebracht wordt wanneer een luchtpakketje nabij het plonspunt (snijpunt tussen waterstraal en het wateroppervlak van het reservoir) wordt ingesloten door water. Wanneer de omtrek lengte van het plonspunt toeneemt, kan meer lucht worden ingesloten. Dus een brede straal slaat meer lucht in dan een massief ronde straal met hetzelfde debiet, valhoogte etc.

Een vrij vallende straal uit een ronde buis heeft een specifieke vorm. Deze vorm wordt mede bepaald door de mate van vulling van de buis. De horizontale doorsneden van de straal is bij lage valhoogten meestal U-vormig. Deze vorm wordt naarmate de



**Figuur 7: Horizontale valafstand en de bijbehorende theoretische valcurven van de stralassen**

valhoogte groter wordt geleidelijk cirkelvormiger, totdat de straal instabiel wordt en uit elkaar valt. Zie figuur 8 voor een foto van een vallende straal.



**Figuur 8: Veranderende straal-doorsnede tijdens de val**

In figuur 9 is een schematische ontwikkeling te zien van de horizontale straalddoorsnede tijdens de val.

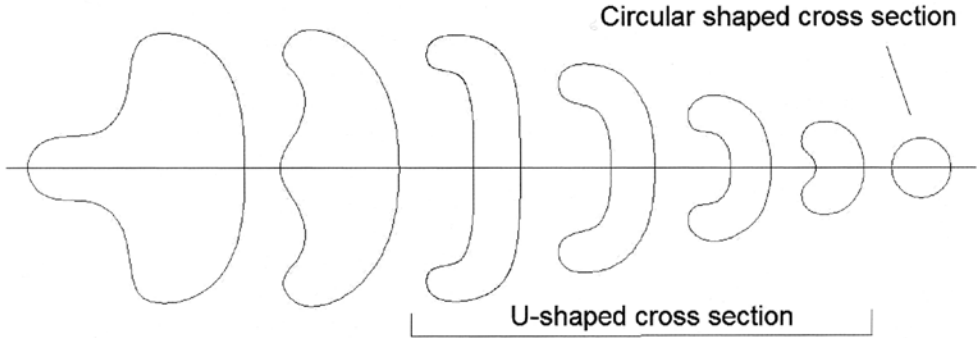
De verschillende valhoogten en debieten waarop de doorsnede van de straal cirkelvormig wordt zijn gemeten. Dit wordt de cirkelvormige valhoogte  $H_{cir}$  genoemd. Zie figuur 10 voor de gemeten resultaten.

Ondanks de relatief grote foutenmarges is een lineaire relatie goed mogelijk tussen het debiet en de cirkelvormige valhoogte. De dimensieloze formule voor de gefitte lijn is:

$$\hat{H}_{cir} = 102,0 \hat{Q}_w, \quad (H_{cir} = 0,39 Q_w)$$

Vanaf nu worden in grafieken rode cirkeltjes gebruikt die deze relatie weergegeven. Zo is te zien wanneer een straal een cirkelvormig plonspunt heeft en wat voor invloed het heeft op de resultaten.

De formule is opgesteld in een dimensieloze vorm, omdat deze relatie waarschijnlijk ook geldig is voor aanstroombuizen met andere diameters. Wanneer



**Figuur 9: Ontwikkeling van de horizontale straaldoorsnede tijdens de val**

bijvoorbeeld een aanstroombuis met een kleinere doorsnede maar met dezelfde vullingspercentage wordt gebruikt, is ook een kortere valhoogte nodig om de doorsnede van de straal cirkelvormig te laten worden. Er zijn echter geen experimenten met andere aanstroombuisdiameters uitgevoerd om deze dimensieloze relatie te controleren.

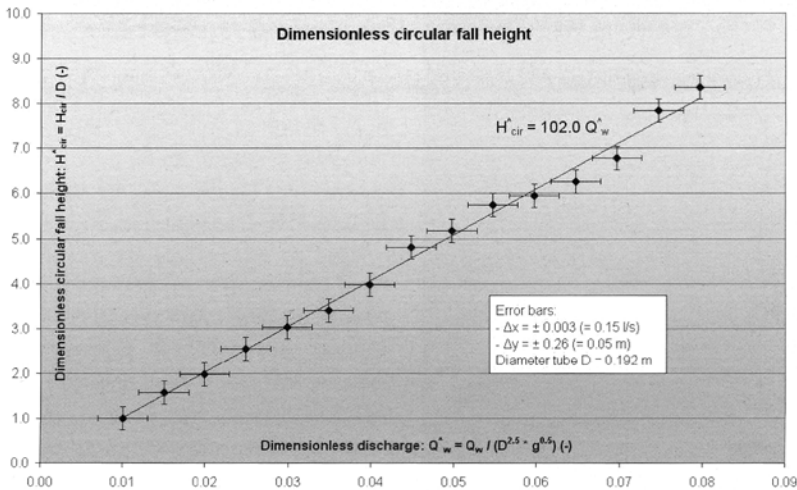
luchtbellen in staat om de straal eerder of later te verlaten. Wanneer de onderwaterstraal tegen een obstakel botst, zal de straal (gedeeltelijk) uit elkaar vallen en kunnen de luchtbellen de straal eenvoudiger verlaten. Wanneer de luchtbellen de stroming hebben verlaten, zullen de luchtbellen opstijgen en uit het reservoir treden. Zie figuur 11 voor een impressie van een luchtbellenpluim.

### Luchttransport in het reservoir

Wanneer er luchtbellen zijn gevormd, zal de onderwaterstraal de luchtbellen dieper het reservoir in brengen. Afhankelijk van de afmetingen van de luchtbellen en de hoek van de straal, zijn de

### Luchtbelgroottes en oppervlaktetension

De grootte van de luchtbellen in een luchtbellenpluim zijn relatief constant. Dit komt omdat de grootte van de luchtbellen afhankelijk is van de



**Figuur 10: Dimensieloze valhoogte wanneer de straaldoorsnede cirkelvormig is**

oppervlaktespanning van het water en de intensiteit van de locale schuifspanningen in het reservoir. Hoe groter de oppervlaktespanning, hoe beter de luchtbellen in staat zijn om de optredende schuifspanningen te weerstaan. Wanneer een luchtbel te groot is voor de optredende schuifspanningen, zal de luchtbel opbreken in kleinere luchtbellen.

Maar dezelfde turbulente bewegingen zorgen ook voor botsingen tussen luchtbellen, waardoor ze kunnen samensmelten tot een luchtbel. Deze twee effecten zorgen ervoor dat de luchtbellen in een luchtbellenpluim ongeveer dezelfde grootte hebben. Dit is ook waargenomen. De relatie tussen deze twee effecten zijn gecombineerd in het getal van Weber:

Het gebruikte water had een relatief hoge oppervlaktespanning in vergelijking met leidingwater:  $\sigma_m = 0,0765 \text{ N/m}$  respectievelijk  $\sigma_t = 0,0746 \text{ N/m}$  bij gebruik van de dichtheid  $\rho_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$ .

$$We = \frac{V^2}{\sigma / \rho L}$$

De hoge oppervlaktespanning in het water is waarschijnlijk het gevolg van de mineralen die aanwezig waren in de waterkelder van het laboratorium. Daarom kan worden aangenomen dat de luchtbellen

in het gebruikte model groter zijn dan bij gebruik van leidingwater.

Rioolwater heeft door vervuiling met zeep, een lagere oppervlaktespanning dan het gebruikte water. Daardoor zullen luchtbellen in rioolwater kleiner zijn dan de luchtbellen in het gebruikte model en zijn de stijgsnelheden kleiner en de verblijftijden groter. Dit vergroot de kans op luchtbelinname door de pomp, met alle gevolgen van dien. De resultaten bij het gebruikte model zijn dus te positief voor reële situaties en kunnen daarom niet zomaar gebruikt worden als ontwerpregels.

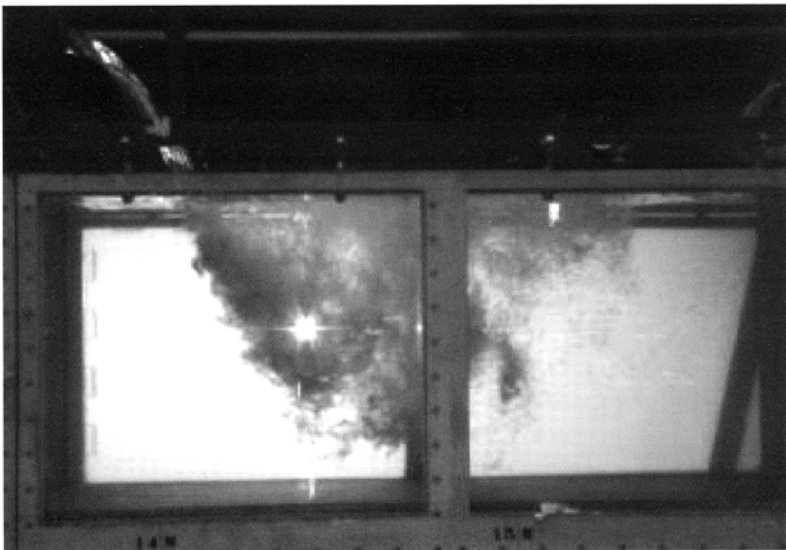
## Beluchtingslengte

De beluchtingslengte bleek onafhankelijk te zijn van de valhoogte van de plonzende straal en wordt voornamelijk beïnvloed door het waterdebiet. De empirische formule voor de maximale beluchtingslengte met een overschreidingsfrequentie van eens in de acht à tien seconden is:

$$L_{a,\max} = 0,5Q_w^{0,5}$$

De dimensies van de constante 0,5 is  $\sqrt{\frac{s}{m}}$ .

De beluchtingslengte  $L_a$  is gelijk aan de luchtbel-lengte  $L_b$  minus de valafstand  $L_{jx}$ , zie figuur 5.



Figuur 11: Impressie van een luchtbellenpluim (de reservoir diepte is 1,0 m)



Er zijn enkele beluchtingslengte experimenten gedaan met gelijke valhoogten en verschillende waterdiepten. Hierbij is een onduidelijk effect waargenomen op de beluchtingslengte. De lengte nam bij lage waterdiepten af met nul tot veertig procent bij waterdebieten tussen 3,0 en 10,0 l/s.

## Luchtbel penetratiediepte

Wanneer een luchtbel relatief groot is, zal die sneller uit de neergaande stroming 'loskomen' dan een kleine luchtbel. Daarom heeft een grotere luchtbel een kleinere penetratiediepte. Zoals boven is beschreven, bepaalt vooral de oppervlaktespanning van het water de grootte van de luchtbellen.

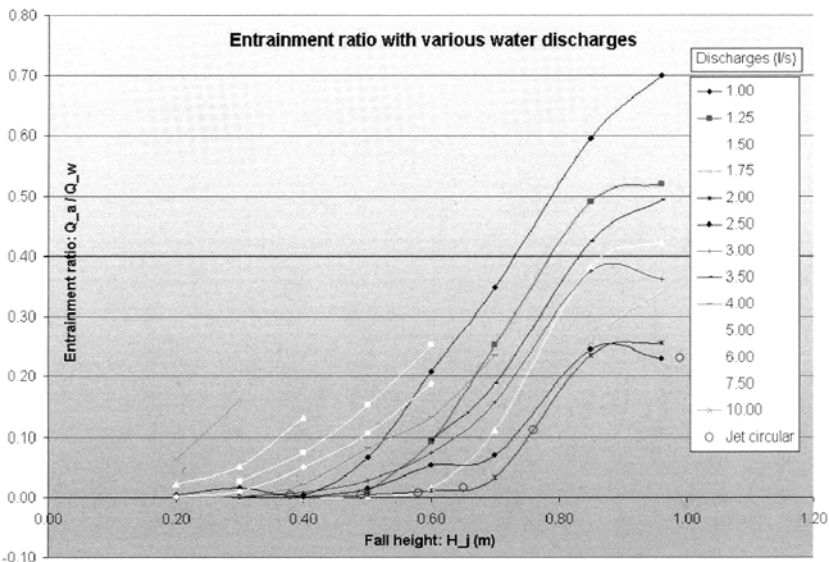
Een andere parameter die de penetratiediepte beïnvloedt, is de hoek van de straal. Bij een schuine straal zijn de opwaartse krachten op de lucht-bellen niet precies tegengesteld aan de neergaande stroming. Daardoor kunnen de luchtbellen eenvoudiger zijdelings (opwaarts) wegstromen en is de penetratiediepte minder groot. Dit effect wordt significant bij een hoek van  $\alpha_j \leq 70^\circ$ .

Een derde parameter die de penetratiediepte beïnvloedt, is de dichtheid van de luchtbelpluim. Hoe lager de dichtheid van de luchtbelpluim is, hoe groter de lokale opwaartse stroming in het

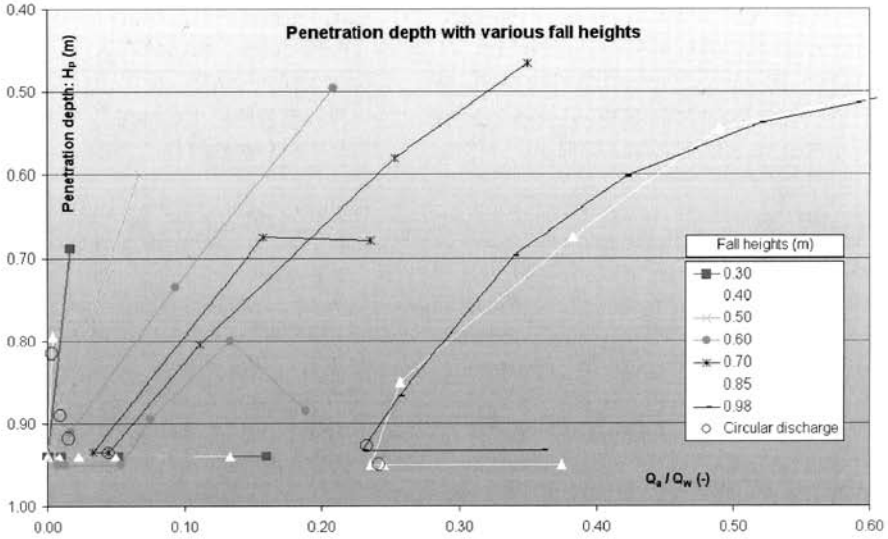
reservoir. Dit betekent dat bij een dichtere lucht-bellenpluim de lucht-bellen sneller opwaarts stromen. De stijgsnelheid van de lucht-bellen in het model zijn ongeveer 0,15 tot 0,20 m/s, maar deze zijn niet exact nagemeten.

Een luchtbelpluim onder een bijna verticale straal ( $\alpha_j = 75-90^\circ$ ), kan zo dicht zijn dat de opwaartse kracht groot genoeg is om de neerwaartse stroming te blokkeren. Dan is de penetratiediepte erg klein ten opzichte van het neergaande moment van de straal. Echter wanneer de straal schuiner is ( $\alpha_j \leq 75^\circ$ ), zal het resulterende horizontale moment van de straal ervoor zorgen dat de lucht-bellen korter onder het plonspunt blijven hangen.

Deze effecten zijn de redenen waarom de relatie tussen de penetratiediepte en de valhoogte niet positief is, juist het tegenovergestelde bleek vaker het geval. De lucht-/waterinslag-ratio  $Q_a/Q_w$  (lucht-/waterdebiet) bepaalt grotendeels de penetratiediepte. Hoe hoger de valhoogte, hoe groter de inslagratio en hoe kleiner de de penetratiediepte. Zie de resultaten in figuren 12 en 13. De horizontale gedeelten in de figuren stellen de bodem van het reservoir voor ( $H_w = 0,94$  m).



Figuur 12: Positieve relatie tussen de valhoogte  $H_j$  en de inslag ratio  $\frac{Q_a}{Q_w}$



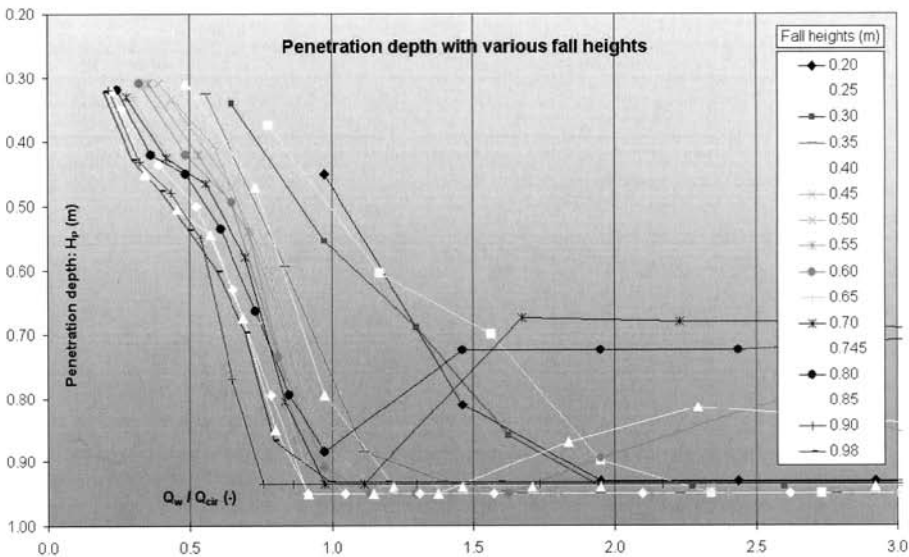
**Figuur 13: Negatieve relatie tussen penetratiediepte  $H_p$  and inslag ratio  $\frac{Q_a}{Q_w}$**

In figuur 14 is te zien dat de penetratiediepte snel toeneemt naarmate het plonspunt cirkelvormiger is. Het waterdebiet  $Q_w$  is gedeeld door het debiet dat bij die specifieke valhoogte een cirkelvormig plonspunt heeft (cirkelvormig debiet  $Q_{cir}$ ).

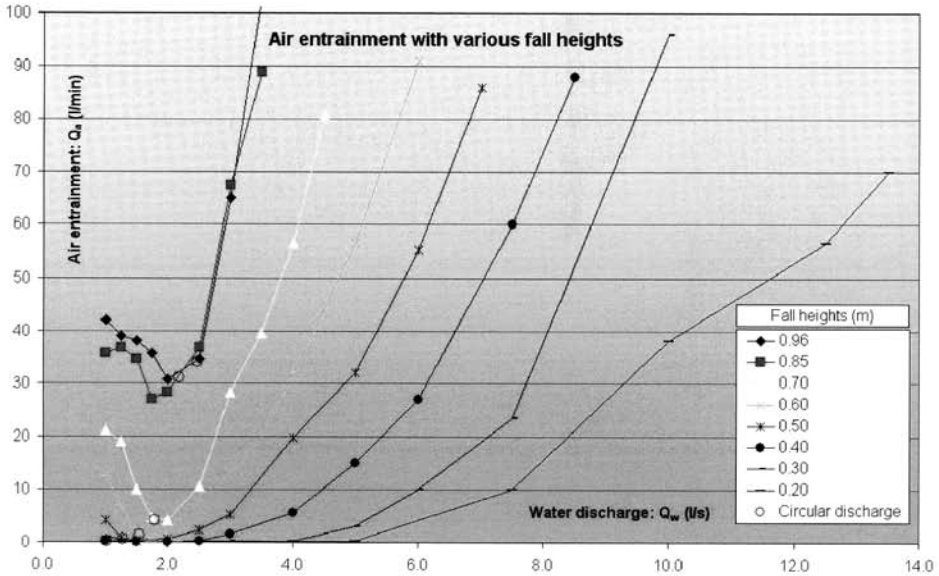
### Luchtinslagdebiet

De resultaten van de metingen van het luchtinslagdebiet zijn weergegeven in figuur 14.

Uit figuur 15 kan geconcludeerd worden dat zowel de valhoogte als het waterdebiet een positieve relatie hebben met betrekking tot de hoeveelheid



**Figuur 14: Relatie tussen penetratiediepte  $H_p$  en  $\frac{Q_w}{Q_{cir}}$**



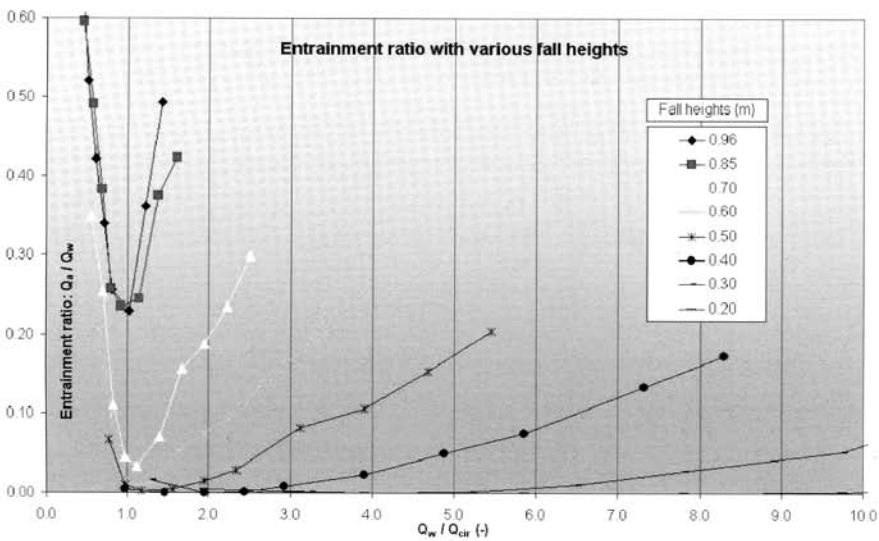
**Figuur 15:** Luchtinslagdebiet bij verschillende valhoogtes

luchtinslag. Alleen een kleiner wordende plons-  
puntonttrek kan deze effecten tegenwerken.  
Hiermee is aangetoond dat de vorm van het plons-  
punt een sterke invloed heeft op de hoeveelheid  
luchtinslag. In figuur 16 is dit effect nog duidelijker  
zichtbaar. Het waterdebiet  $Q_w$  waarbij de inslag-

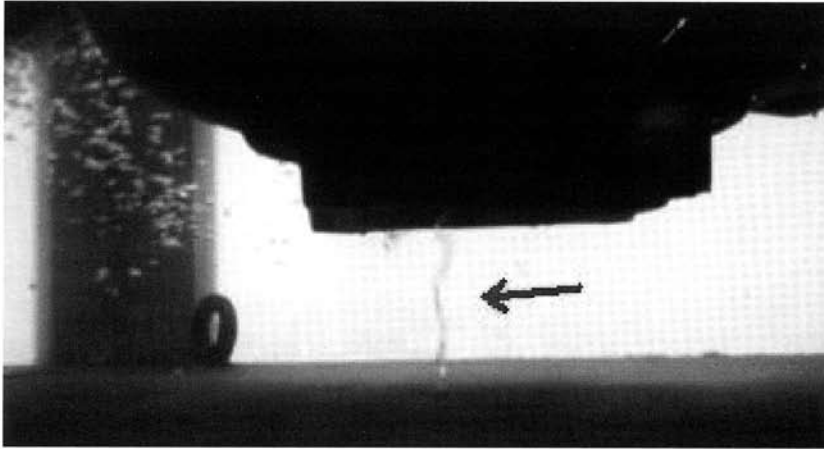
ratio  $Q_a/Q_w$  minimaal is, is gelijk aan het cirkelvormig  
debiet  $Q_{cir}$ .

### Luchtinname door de pomp

Luchtballen worden alleen door de pomp opgeno-  
men wanneer ze in de directe nabijheid zijn van de



**Figuur 16:** Relatie tussen inslag-ratio  $\frac{Q_a}{Q_w}$  en ratio  $\frac{Q_w}{Q_{cir}}$



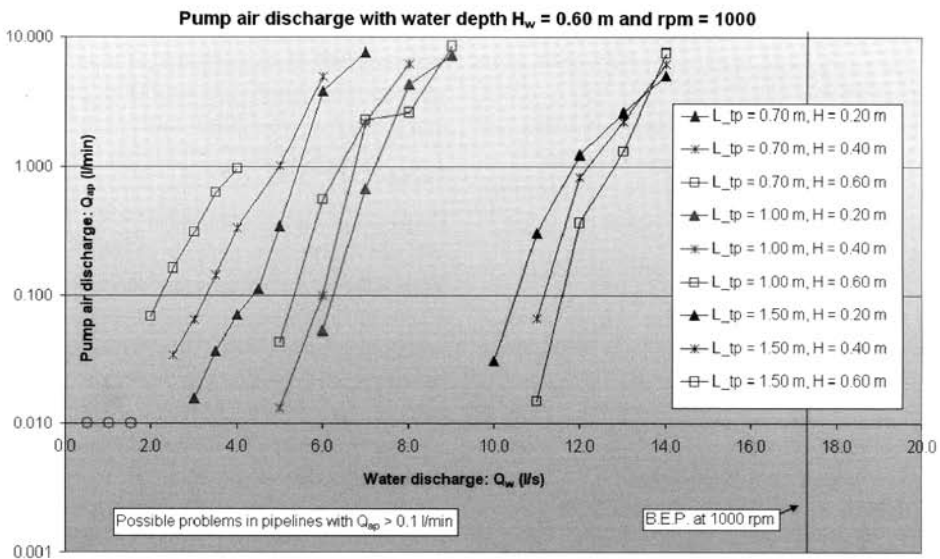
**Figuur 17: Prerotatie wervel nabij de pompinlaat**

pompinlaat. Het invloedsbereik van de pomp is voor een debiet van 15,0 l/s niet meer dan 2 maal de straal van de pompinlaat ( $2 \cdot \varnothing 100\text{mm}$ ).

Een onverwachte gebeurtenis was het effect dat de prerotatie heeft op de luchtinname door de pomp. Een prerotatie is een circulatie in het reservoir voor de pompinlaat. Het is het gevolg van een niet in het Best Efficiency Point (B.E.P.) werkende pomp. In dit punt 'schept' de pompwaaier net zoveel

debiet op als het werkelijk optredende debiet. Het B.E.P. is afhankelijk van de geometrie en de draaifrequentie van de pompwaaier. De prerotatie houdt de luchtbelllen weg van de inlaat en zorgt ervoor dat er minder lucht door de pomp wordt ingenomen.

Dit effect is alleen marginaal bij waaiersnelheden meer dan twee maal het B.E.P.. Daardoor is het geen effectieve en economische manier om te voorkomen dat luchtbelllen worden ingenomen



**Figuur 18: Pompluchtdebiet bij een waterdiepte  $H_w = 0,60\text{ m}$  en een pomptoerental = 1.000 rpm**

door de pomp. In figuur 17 is een prerotatie wer-  
vel te zien.

In figuur 18 is het pompluchtdebiet  $Q_{ap}$  te zien bij  
verschillende waterdieptes  $H_w$ , buis-pomp-afstan-  
den  $L_{tp}$ , valhoogten  $H$  en bij een waterdiepte  $H_w =$   
0,60 m en een pomptoerental = 1.000 rpm.

De krommen in figuur 18 zijn behoorlijk steil.  
Omdat de verticale as logaritmisch is, zijn de  
bovenste gedeelten van de krommen nog steiler.  
Dit geeft aan dat de luchtbellens relatief dicht bij  
elkaar blijven en dat de overgang van water met of  
zonder luchtbellens relatief abrupt is.

In de praktijk kunnen zich problemen voordoen bij  
 $Q_{ap} \leq 0,1$  l/min.

Voor kleinere waterdiepten dan  $H_w = 0,60$  m ver-  
andert het pompluchtdebiet niet veel. Bij grotere  
waterdiepten komt er echter geleidelijk minder  
lucht in de pomp omdat minder luchtbellens de  
bodem bereiken en er dus minder luchtbellens door  
de pomp opgenomen kunnen worden. De pomp-  
opening zit immers dicht bij de bodem van het  
reservoir.

De waarden van de pompluchtdebieten zijn aan de  
conservatieve kant wanneer we kijken naar de  
optredende prerotatie. Wanneer de pompwaaier in  
het B.E.P. draait, zullen de resultaten van het  
pompluchtdebiet groter zijn, vooral bij debieten  
ver van het B.E.P. ■

## Conclusies

Dit experimentele onderzoek is behoorlijk specifiek  
geworden en is niet of nauwelijks behandeld in de  
literatuur. Daardoor is het onderzoek voornamelijk  
een eerste beschrijving van de optredende gebeur-  
tenissen.

In de literatuur wordt beschreven dat de onregel-  
matigheden op de straaloppervlak de belangrijkste  
oorzaak zijn voor luchtinslag met plonzende water-  
stralen. Deze onregelmatigheden sluiten lucht in  
op de plek waar de oppervlakken van de straal en  
het oppervlaktewater samen komen.

In dit onderzoek kwam naar voren dat de omtrek  
van het snijpunt tussen de waterstraal en het  
wateroppervlak in het reservoir (plonspunt)  
belangrijk is voor de hoeveelheid lucht die wordt

ingeslagen. Bij vrij vallende waterstralen uit ronde  
kanalen is de vorm van het plonspunt eerst U-  
vormig en zal naarmate de val groter is meer en meer  
cirkelvormig worden. Daardoor neemt de omtrek-  
lengte van het plonspunt af bij toenemende val-  
hoogte en ook het ingeslagen luchtdebiet. Maar bij  
toenemende valhoogte nemen ook de onregelma-  
tigheden op het straaloppervlak toe, wat het inslag-  
debiet laat toenemen.

De gevonden dimensieloze empirische formule  
voor de cirkelvormige valhoogte is:

$$\frac{H_{cir}}{D} = 102,0 \frac{Q_w}{\sqrt{gD^{2,5}}}$$

De verwachting was dat de penetratiediepte van  
de luchtbellenspluim toe zou nemen bij toenemende  
valhoogten. Maar het tegenovergestelde bleek  
vaker het geval te zijn. De lucht-/waterinslag ver-  
houding bleek net als het waterdebiet zelf erg  
belangrijk voor de penetratiediepte. Hoe groter de  
verhouding lucht-/waterdebiet hoe kleiner de  
penetratie. Dat komt omdat de ingeslagen lucht-  
bellens de onderwaterstraal dissiperen en de straal  
zijn moment verliest. Ter illustratie: de straal landt  
op een kussen van luchtbellens.

De beluchtingslengte bleek onafhankelijk van de  
valhoogte van de plonzende straal. De belucht-  
tingslengte wordt voornamelijk bepaald door het  
waterdebiet. De gevonden empirische relatie voor  
de maximale beluchtingslengte met een over-  
schrijdingsfrequentie van eens in de 8 á 10 secon-  
den is:

$$L_{\alpha,max} = 0,5Q_w^{0,5} \cdot \sqrt{\frac{s}{m}}$$

De dimensie van de constante 0,5 is:

Bij experimenten met pompluchtinname is het vol-  
gende waargenomen: luchtbellens worden alleen  
ingenomen wanneer deze zich in de directe nabij-  
heid van de pompinlaat bevinden. Het invloedsg-  
ebied van de pomp is voor debieten  $Q_w \leq 15,0$  l/s  
niet meer dan twee maal de straal van de pompin-  
laat ( $2 * \varnothing 100$ mm).

Het effect van de prerotatie is bij pompluchtmetin-  
gen is niet verwaarloosbaar. Een prerotatie is een  
circulatie voor de pompinlaat dat het gevolg is van

wanneer een pomp niet op zijn in zijn Best Efficiency Point werkt. De prerotatie zorgt ervoor dat de luchtbellens bij de pompinlaat worden weggehouden. Dit effect is slechts marginaal bij waai-frequenties meer dan twee maal het B.E.P. en is daarom geen effectieve en economische methode om te voorkomen dat lucht in de pomp terecht komt.

Een aantal van de meestal empirische formules in de literatuur is vergeleken met de resultaten, opgedaan bij de experimenten. Bijna alle formules die in de literatuur beschreven zijn gelden (alleen) voor spuitstralen. De enige formule uit de literatuur die geldig is voor de gedane experimenten, is de dimensieloze afvoerformule van Aigner (1999):

$$\frac{Q_w}{\sqrt{g}D^{2,5}} = 1,54 \left( \frac{h_e}{D} \right)^{\frac{11}{6}}$$

Alle andere formules bleken niet bruikbaar of aangepast te kunnen worden voor dit specifieke model.

De gemeten resultaten zijn verkregen met een specifieke opstelling. Andere vergelijkbare opstellingen kunnen andere resultaten geven. De metingen zijn gevoelig voor kleine veranderingen in het turbulentieniveau in de aanstroombuis of de oppervlaktespanning van het water. Daarom zijn de verkregen resultaten alleen nuttig ter indicatie van de in werkelijkheid optredende grootheden.

Een robuuste en effectieve manier om te voorkomen dat luchtbellens onderin een rioolkelder en nabij de pompinlaat komen, is door de onderwaterstraal tegen een horizontaal object te laten botsen. De straal zal dan horizontaal afbuigen, waardoor luchtbellens niet dieper het reservoir ingebracht kunnen worden en eenvoudig opwaarts de stroming en het reservoir kunnen verlaten. Omdat het waterniveau in rioolkelders kan variëren, zal het horizontale object onder het laagste waterniveau moeten worden aangebracht. ■

## Referenties

Aigner, D., Cherubim, C., Overflow in a cylindrical pipe bend. VII-th Conference Problems of Hydro Engineering . Wroclaw-Szklarska Poreba, Poland, 1999, p.136-141.

Biń, A.K., 'Gas entrainment by plunging liquid jets'. Chemical Engineering Science, 48, No.21 (1993), p.3585-3630.

Lubbers, C.L en Clemens, F.H.L.R., 'Air and gas pockets in sewerage pressure mains', IWA journal Water Science and Technology, volume 52, issue 3, p37-44, ISSN Print: 0273-1223 (2005).

Lubbers, C.L en Clemens, F.H.L.R., 'Breakdown of air pockets in downwardly inclined sewerage pressure mains', IWA journal Water Science and Technology, volume 54, issue 11-12, p.233-240, ISSN Print: 0273-1223, (2006).

Smit, A., Air entrainment with plunging jets, Experimental study about air entrainment with free overfall jets from circular channels and air bubble intake with submersible pumps in sewer sumps. MSc thesis at Delft University of Technology. WLIDelft Hydraulics (H4230.40), (2007).

Zhu, Y., Oz, H.N. en Prosperetti, A., 'On the mechanism of air entrainment by liquid jets at a free surface'. Journal of Fluid Mechanics, 404 (2000), p.151-177.