

stowa

HYDRAULISCH ONTWERP EN BEHEER
AFVALWATERTRANSPORTSYSTEMEN

RAPPORT

2012

48

ISBN 978.90.5773.586.8



stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00 FAX 033 460 32 01
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer Postbus 2180 3800 CD Amersfoort	
PREPRESS/ DRUK	Van de Garde Jémé, Eindhoven	
STOWA	STOWA 2012-48	
ISBN	978.90.5773.586.8	
AUTEURS	Michiel Tukker Kees Kooij Ivo Pothof Francois Clemens	
REDACTIE	Rinie van den Anker John Driessen Michiel Geise Jan Kranendonk Christof Lubbers Piet van Rosmalen Frank van Zijl	Waterschap Rivierenland Grontmij ITT Water & Wastewater Gemeentewerken Rotterdam Royal Haskoning Hoogheemraadschap Delfland Waterschap Brabantse Delta

DE VOLGENDE ORGANISATIES PARTICIPEERDEN IN HET ONDERZOEK

Hoogheemraadschap Delfland	Waternet
Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	Gemeentewerken Rotterdam
Waterschap Brabantse Delta	Grontmij
Waterschap Hollandse Delta	Royal Haskoning
Waterschap Reest en Wieden	ITT Water&Wastewater
Waterschap Rivierenland	Aquafin
Waterschap Zuiderzeeland	STOWA
Wetterskip Fryslan	

COPYRIGHT De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

DISCLAIMER Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

HYDRAULISCH ONTWERP EN BEHEER AFVALWATER- TRANSPORTSYSTEMEN

INHOUD

1	VOORWOORD	1
2	ONTWERPEN VAN AFVALWATERTRANSPORT-SYSTEMEN	5
3	LEIDINGONTWERP	7
4	ONTWERPEN VAN HET GEMAAL	22
5	DYNAMISCHE EFFECTEN	35
6	ONTWERPASPECTEN CAPACITEITSHANDHAVING	45
7	REVIEW INTEGRAAL SYSTEEMONTWERP	56
8	OPLEVERING VAN HET SYSTEEM	60
9	HANDHAVEN VAN DE HYDRAULISCHE CAPACITEIT	66

10	LITERATUURLIJST	76
11	BIJLAGE	78
	A THEORETISCHE ACHTERGROND	
	1 VLOEISTOFEIGENSCHAPPEN	80
	2 BASISVERGELIJKINGEN	83
	3 TRANSPORTVERLIEZEN	85
	4 ONTVANGSTKELDERS EN INLAATWERKEN	92
	5 POMPEN IN LEIDINGSYSTEMEN	104
	6 AFSLUITERS EN TERUGSLAGKLEPPEN	111
	7 WATERSLAG IN LEIDINGSYSTEMEN	119
	8 GASBELLEN IN LEIDINGEN	127
	B BESCHRIJVING GASBEL DETECTIEMETHODEN	
	B.1 DEBIETVERLOOP TIJDENS POMPSTART	138
	B.2 DRUKVERANDERING NA AFTAPPEN	139
	B.3 DYNAMISCHE METING	140

1

VOORWOORD

1.1 NOODZAAK HANDBOEK

De samenstelling van dit handboek “Hydraulisch ontwerp en beheer afvalwaterpersleidingen” is voortgekomen uit het onderzoeksproject CAPWAT (capaciteitsverliezen in afvalwaterpersleidingen) waarin de mechanismen voor het ontstaan, stagneren en afvoeren van gasbellen in afvalwaterpersleidingen zijn onderzocht. Tijdens dit zes jaar durende onderzoeksprogramma is onderkend is dat er geen hydraulica handboek/richtlijn bestaat dat zich vooral richt op het gehele afvalwaterpersleidingsysteem, de daarin spelende processen en de interactie tussen persleiding en gemaal.

Bij het ontwerp van afvalwatertransportsystemen dient men rekening te houden met fysische processen en factoren die zich niet of nauwelijks voordoen bij schoon water transportsystemen (bijvoorbeeld koelwater, drinkwater). Bij afvalwater hebben we te maken met een discontinue aanvoer. Het type rioolstelsel (gemengd, gescheiden, verbeterd gescheiden) bepaalt de spreiding in aanvoerdebiet tijdens droogweer (DWA) en regenweer (RWA). De eigenschappen van het afvalwater zoals oppervlaktespanning en troebelheid variëren in de tijd en locatie als mede de vuilvracht (drijvende en niet-drijvende delen).

De ontwerper en beheerder zijn doorgaans gewend om te denken in stationaire processen. Een afvalwaterpersleiding gedraagt zich zeker onder DWA omstandigheden niet als een stationair proces. Om de ontwerp- en beheerlijnen te kunnen plaatsen dient men kennis te hebben van de dynamische (in de tijd variërende) processen die zich afspelen in een afvalwatertransportsysteem. Twee belangrijke processen waar de ontwerper/beheerder mee te maken heeft zijn het proces van gasbelvorming, -stagnatie en -transport en het waterslagfenomeen.

Een ander aspect is dat de afvalwatertransportsystemen complexer worden. Door de bouw van grotere RWZI's wordt het afvalwater over grotere afstanden getransporteerd en takken steeds meer (kleinere) leidingen in op de hoofdleiding. De werking van het gemaal wordt in grote mate gedomineerd door het gedrag van het totale systeem. Inzicht in deze werking is derhalve cruciaal voor een goed ontwerp en beheer.

Het handboek “Hydraulisch ontwerp en beheer van afvalwaterpersleidingen” wil een overzicht geven van alle aspecten en de onderlinge samenhang die van belang zijn voor het hydraulische ontwerp en beheer van een afvalwatertransportsysteem. Onder een afvalwatertransportsysteem verstaan we de persleiding dan wel persleidingstelsel inclusief het gemaal en de ontvangstkelder. Kernpunt bij het ontwerp is om een zelfstandig en veilig systeem te realiseren met de benodigde transportcapaciteit tegen minimale maatschappelijke kosten. Het beheer aspect richt zich voornamelijk op richtlijnen hoe de ontwerppunten m.b.t. capaciteit en benodigde energie te handhaven.

1.2 AFBAKENING HANDBOEK

Dit handboek beoogt een bundeling te zijn van alle hydraulische kennis die nodig is om een transportsysteem voor afvalwater te ontwerpen en operationeel te beheren. Het afvalwatertransportsysteem vormt de schakel tussen inzameling en zuivering van afvalwater. Het inzamelingssysteem omvat onder andere het vrij-verval-rioolstelsel vanaf de huisaansluiting via straat- en hoofdriolen tot aan de zuigkelders. Het transportsysteem, waarvoor dit handboek geschreven is, omvat de zuigkelder, de rioolgemalen en persleidingen.

De verantwoordelijke organisaties voor de afvalwatertransportsystemen zijn gemeenten en waterschappen, zoals blijkt uit Tabel 1.1.

TABEL 1.1: INFO GEMALLEN EN PERSLEIDINGEN (BRON: RIOOL IN CIJFERS 2009-2010, STICHTING RIONED)

Organisatie	Capaciteit eindgemalen [m ³ /h]	Persleidingen (excl. rukriolering) [km]
Gemeenten	960.000	5500
Waterschappen	1.067.000	7300

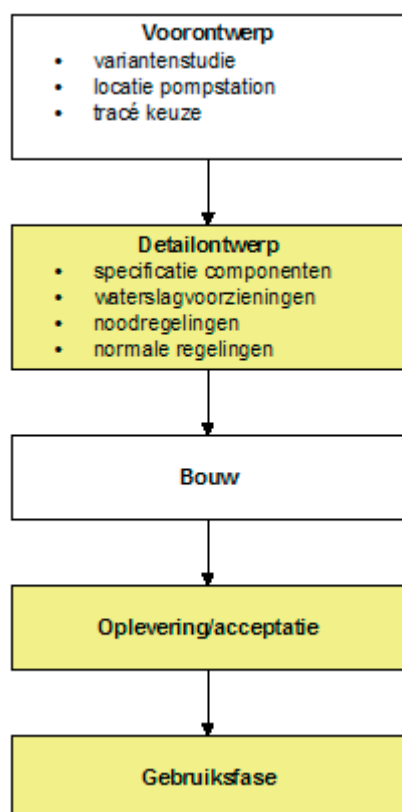
Het is een aanvulling op reeds bestaande algemeen toegankelijke informatie zoals de Leidraad Riolering. Dit handboek sluit aan op diverse modules van de Leidraad Riolering. Modules B2000, B2100 en B2200 zijn gericht op het hydraulische ontwerp van het vrij verval stelsel en leveren ontwerpdebieten voor rioolgemalen. Module C6000 Gemalenbeheer beperkt zich voornamelijk tot het gemaalontwerp en de organisatie van beheer en onderhoud. Het handboek is bovendien een aanvulling op bestaande normen; met name NEN-EN 752:2008 Buitenriolering over hoofdzakelijk vrij-verval riolering en NEN-EN 1671: Overdrukrioleringen buiten gebouwen over drukriolering. Dit handboek is volledig gericht op de hydraulische aspecten van het ontwerp en beheer van afvalwatertransportsystemen. Daarnaast beschikken diverse organisaties over handboeken voor gemaalontwerp en beheer. Hierin worden veelal civieltechnische, werktuigbouwkundige en elektrotechnische zaken beschreven. Dit handboek "Hydraulisch ontwerp en beheer van afvalwaterpersleidingen moet (voorlopig) niet gezien worden als een vervanger van dergelijke handboeken maar als aanvulling.

In de levenscyclus van een leidingsysteem worden de volgende fasen onderkend (zie ook NEN 3650 "Eisen voor buisleidingsystemen"):

- ontwerp
- aanleg en beproeving
- gebruiksfase (bedrijfsvoering)

Voorafgaande aan het ontwerp heeft de ontwikkelingsfase plaats, ook wel aangeduid als voorontwerp. Het voorontwerp wordt met name bepaald door de gebruikerseisen (functionele eisen) en planologische aspecten. De ontwerpfasen kan onderverdeeld worden in basisontwerp en detailontwerp. In het basisontwerp worden de definitieve uitgangspunten (het pakket van eisen) voor het ontwerp vastgelegd, in het detailontwerp worden de berekeningen, tekeningen en bestek opgesteld ten behoeve van de realisatie en de bedrijfsvoeringsfase. Het onderscheid tussen beide ontwerpfasen kent geen scherpe afbakening en wordt in dit handboek samengevat tot "ontwerp".

FIGUUR 1.1 DE FASEN VAN EEN AFVALWATERPERSLEIDING



Het stroomschema in figuur 1.1 beschrijft de reikwijdte en onderlinge samenhang van dit handboek. Uitgangspunt is dat het voorontwerp beschikbaar is, hoewel nog wel enkele aandachtspunten genoemd worden. De nadruk ligt in dit stroomschema daardoor op het ontwerp van het transportsysteem, gevolgd door een hoofdstuk over de oplevering van de installatie, waarin beschreven staat hoe getoetst kan worden of de gebouwde installatie aan de hydraulische ontwerpcriteria voldoet. De bouw van de installatie is een fase die zich bevindt tussen het ontwerp en de oplevering. In deze fase zijn geen specifieke hydraulische aandachtspunten en daarom is er geen apart hoofdstuk opgenomen over de bouwphase van het transportsysteem. Tijdens de gebruiksfase is dit handboek erop gericht om de beoogde capaciteit te handhaven tegen minimale maatschappelijke kosten.

1.3 AUTEURS EN REDACTIE

De eerste versie van het handboek is in 2010 opgesteld door ing. Michiel Tukker en ing. Kees Kooij en dr.ir. Ivo Pothof, van Deltares. De redactie bestond uit:

Francois Clemens	TU Delft
Rinie van den Anker	Waterschap Rivierenland
John Driessen	Grontmij
Michiel Geise	voorheen: ITT Water & Wastewater
Jan Kranendonk	Gemeentewerken Rotterdam
Christof Lubbers	Royal Haskoning
Piet van Rosmalen	Hoogheemraadschap Delfland
Frank van Zijl	Waterschap Brabantse Delta

In 2012 is een 2e versie uitgebracht waarin ervaringen en opmerkingen van de gebruikers verwerkt zijn.

1.4 LEESWIJZER

De samenhang tussen de verschillende leidingsysteem onderdelen en de onderlinge interactie zorgt er voor dat de lezer niet eenmalig sequentieel door dit handboek kan gaan maar regelmatig terug zal moeten vallen op eerder beschreven passages. De theoretische achtergronden zijn gebundeld in een aparte bijlage. In dit tekstboek ligt het accent op de beschrijving van de ontwerp- en beheerprocessen en de onderlinge samenhang.

Hoofdstuk 2 t/m 6 richt zich op het ontwerpproces wat in hoofdstuk 7 nogmaals getoetst wordt. Hoofdstuk 8 gaat over de oplevering en acceptatie fase. Handhaving van de hydraulische capaciteit wordt besproken in hoofdstuk 9.

2

ONTWERPEN VAN AFVALWATERTRANSPORT-SYSTEMEN

Het stroomschema van het ontwerpproces (Figuur 2.1) laat zien dat het ontwerp van een afvalwatertransportsysteem een iteratief proces is. Elke keuze heeft invloed op andere onderdelen, waardoor de reeds gemaakte keuzes misschien opnieuw gemaakt moeten worden.

Dit geldt niet alleen voor het ontwerpproces. Ook renovaties en aanpassingen kennen eenzelfde iteratief proces, omdat elke verandering aan het systeem verregaande invloed kan hebben op de andere onderdelen. Daarom moet een systeemaanpassing niet gezien worden als een apart proces, maar als een ontwerpproces met extra randvoorwaarden.

Indien het ontwerpproces betrekking heeft op een bestaand systeem is het wenselijk om de actuele toestand van het systeem in het ontwerpproces te betrekken en niet alleen uit te gaan van de uitgangspunten van het voormalige ontwerp.

Het ontwerpproces moet dus integraal opgepakt worden en niet opgedeeld worden in op zichzelf staande objecten.

In veel gevallen zal niet aan alle hoofdfuncties volledig voldaan kunnen worden. In zulke gevallen zal een afweging gemaakt moeten worden en zullen prioriteiten gesteld moeten worden. Door de ontwerper een grondige theoretische kennis te geven kan de afweging gemaakt worden. Dit handboek bevat de noodzakelijk hydraulische kennis voor de ontwerpen en beheerafwegingen met betrekking tot afvalwaterpersleidingen.

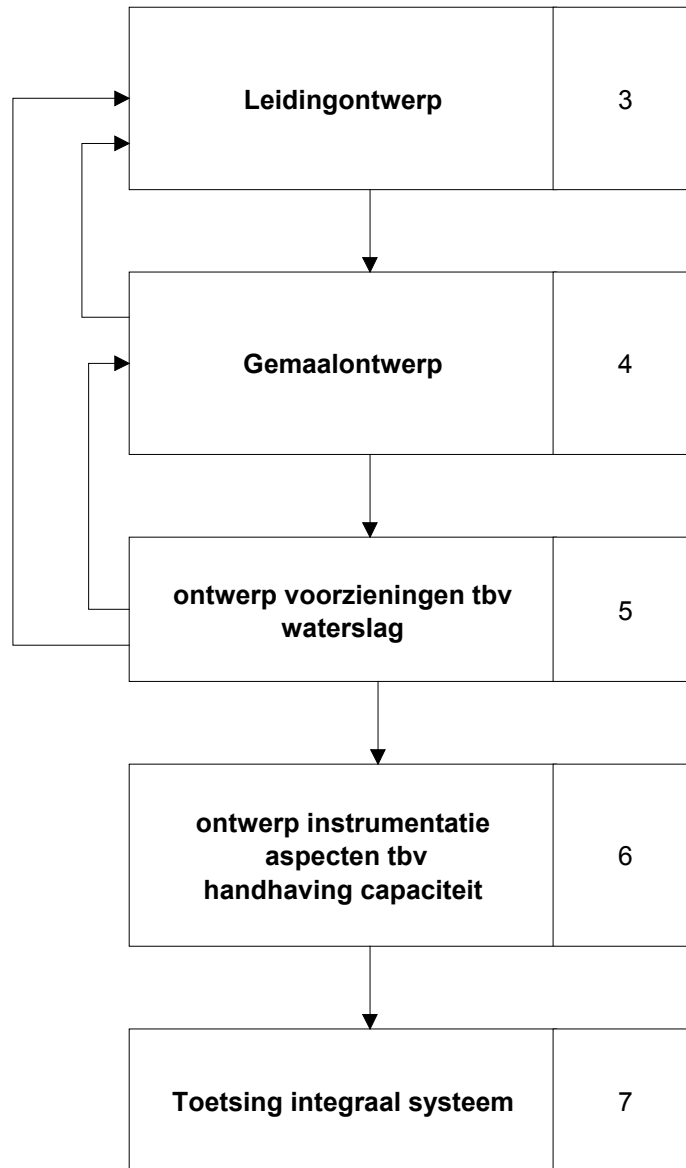
Het transportsysteem omvat het gehele systeem beginnend bij de ontvangstkelder (zuigkelder), vervolgens de pompinstallatie, de persleiding en het ontvangstpunt aan het eind. De ontvangstkelder en pompinstallatie vormen samen het gemaal of pompstation. In dit handboek worden beide onderdelen apart besproken. Daarnaast zijn er nog voorzieningen nodig om de integriteit van het systeem te waarborgen (waterslagvoorzieningen) en om beheeractiviteiten te kunnen uitvoeren.

Voordat met het ontwerp begonnen wordt zullen eerst de randvoorwaarden duidelijk moeten zijn. De primaire randvoorwaarde is de afvoercapaciteit onder DWA en RWA condities. Naast het transporteren van afvalwater dient het systeem ook aan de volgende eisen te worden getoetst

- Transporteren van gassen (ingeslagen lucht of (bio)chemisch gevormde gassen)
- Transporteren van vaste bestanddelen (sediment, drijfvuil)
- Betrouwbare en veilige werking, ook onder extreme situaties (waterslag)
- Onderhoudsarm

Hierbij dient gelet te worden op de energiezuinige en efficiënte werking van het systeem. Bovendien moet in het ontwerp rekening worden gehouden met de beheerfase zodat met minimale personele inzet het onderhoud aan het systeem efficiënt kan worden uitgevoerd, d.w.z. zonder vertragingen en extra kosten die kunnen worden voorkomen door een goed ontwerp.

FIGUUR 2.1 STROOMSCHEMA VAN HET DETAILONTWERP PROCES



Concreet kan dit samengevat worden tot de volgende randvoorwaarden:

- Er moet een capaciteit Q getransporteerd worden van locatie A naar locatie B.
- Juiste afweging tussen investeringskosten en operationele kosten (energie en onderhoud)

In de volgende hoofdstukken wordt van elk onderdeel van het afvalwatertransportsysteem de ontwerpaspecten nader uitgewerkt.

3

LEIDINGONTWERP

Er is sprake van een persleiding indien dit een geheel met vloeistof (op lokale gasbellen na) gevulde buis is die onder overdruk staat. De overdruk wordt in vlakke gebieden gerealiseerd door een pompinstallatie, maar een leiding die een hoog reservoir met een laag reservoir verbindt kan ook als persleiding beschouwd worden mits er geen vrije spiegelstroming optreedt. Dit is dus een door zwaartekracht aangedreven leiding.

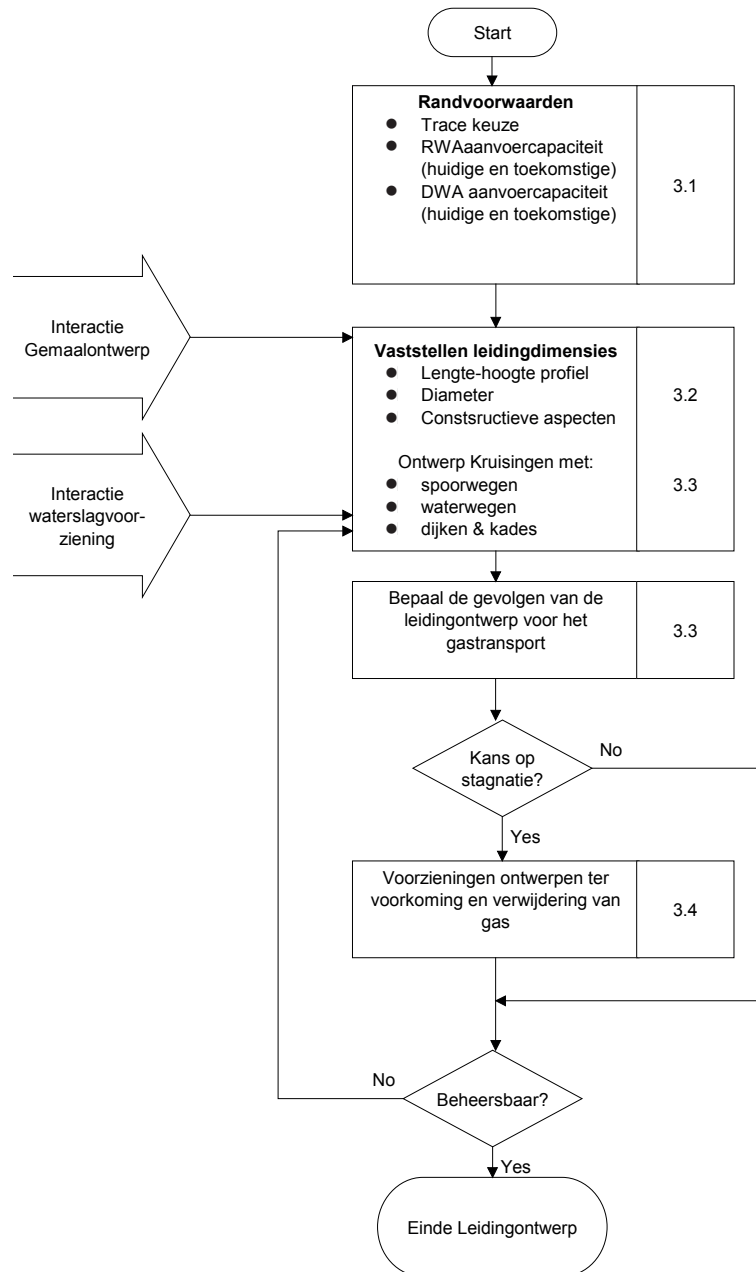
In zijn eenvoudigste vorm bestaat een persleiding uit een enkelvoudige leiding die een reservoir (zuigkelder) verbindt met een ander reservoir (put, ontvangtbouwwerk, etc.). Een persleiding kan ook inprikken in een andere persleiding. In dit hoofdstuk beperken we ons eerst tot de enkelvoudige leiding. De ontwerpaspecten voor een inprikker wijken hier in principe niet van af. De extra eisen kunnen vertaald worden in additionele randvoorwaarden voor het ontwerpproces.

De persleiding domineert het ontwerp- en beheerproces. De te overbruggen afstand voor het afvalwater is (veelal) een vaststaand feit. Daarnaast is de uitvoering van een kruising (Hieronder vallen alle kruisingen zoals: zinkers, horizontaal gestuurde boringen en dijk kruisingen) met andere objecten (wegen, spoorwegen, watergangen, dijken, etc.) een belangrijk element in het capaciteitsvraagstuk. Ontwerpkeuzes aangaande de persleiding beïnvloeden voornamelijk het ontwerp van het gemaal (pomp met overige appendages).

Het ontwerp van een persleiding wordt primair bepaald door economische aspecten, constructieve aspecten (materiaalkeuze, sterkte), en vloeistofmechanische aspecten. In dit handboek beperken we ons tot de vloeistofmechanische aspecten.

Figuur 3.1 toont de randvoorwaarden en ontwerpactiviteiten voor het ontwerpproces van de leiding(en).

FIGUUR 3.1 STROOMSCHEMA VOOR HET ONTWERPEN VAN PERSLEIDINGEN



3.1 RANDVOORWAARDEN

3.1.1 DEBIET

Het debiet is geen ontwerpkeuze maar ligt vast in de randvoorwaarden. Het leidingsysteem moet gedimensioneerd worden op het maximale ontwerpdebiet Q_{max} , veelal het maximaal te verwachten debiet onder RWA omstandigheden. Een groot deel van de tijd (ca. 80 %) hebben we te maken met droogweer aanvoer (DWA) en is er sprake van discontinu pompbedrijf. Afvalwatertransportsystemen zijn aanbod gestuurd. De spreiding tussen het DWA aanbod en het RWA aanbod en de opgestelde pompcapaciteit en type het sturing bepaalt hoe groot de spreiding is in de afvoer. Een gemaal met 1 aan/uit -pomp zal (de putstand

variaties buitenbeschouwing gelaten) ongeacht DWA of RWA aanbod altijd hetzelfde debiet verpompen. Alleen de duur waarmee dit debiet door de leiding stroomt, is afhankelijk van het aanbod.

3.1.2 TRACÉ KEUZE

De leidinglengte wordt bepaald door de beginlocatie en eindlocatie. Veelal zal men kiezen voor de kortst mogelijk afstand rekening houdend met de bestaande infrastructuur en bestemmingsplannen, waardoor de leidinglengte vast ligt.

Het kan nuttig zijn om ook in het voorontwerp een snelle toets te doen op mogelijke probleempunten veroorzaakt door het leidingprofiel. Uitgangspunt bij het ontwerp van een afvalwaterpersleiding is dat het afvalwater onder normale bedrijfscondities maar ook bij pompstilstand in een overdruksituatie is. Bij hoge punten in het tracé is het mogelijk dat er permanent onderdruk heerst waardoor ontgassing mogelijk is. Het vrijgekomen gas kan zorgen voor extra energieverliezen. Een andere bron van extra energieverliezen kunnen de neerwaarde hellende leidingdelen van zinkers en boringen zijn indien zich hier gasbellen verzamelen. Bij een tracékeuze wordt daarom aanbevolen het aantal zinkers en boringen te minimaliseren.

3.2 VASTSTELLEN VAN DE LEIDINGDIMENSIES

De leidingdimensies en het debiet bepalen het energieverlies onder bedrijfsomstandigheden. Er zijn diverse formules in omloop om dit wrijvingsverlies te berekenen (Darcy-Weisbach, Chezy, Manning). In Nederland is het gebruikelijk om voor geheel gevulde persleidingen Darcy Weisbach te hanteren. Deze formule luidt:

$$\Delta H = \frac{\lambda L v^2}{D 2g} \quad (3.1)$$

Waarin:

ΔH	=	Wrijvingsverlies	[m]
λ	=	Wrijvingscoëfficiënt	[-]
L	=	Leidinglengte	[m]
D	=	Diameter	[m]
v	=	Stroomsnelheid	[m/s]
g	=	Gravitatieversnelling	[m/s ²]

De wrijvingscoëfficiënt λ wordt onder ander bepaald door de wandruwheid van de leiding, uitgedrukt in k (mm), (zie bijlage A.4).

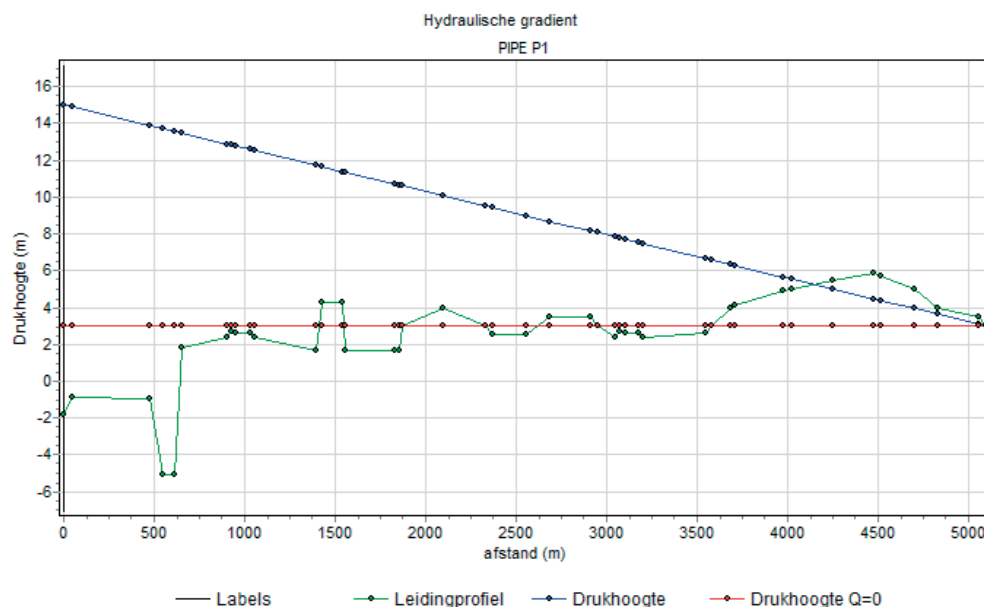
De leidinglengte is in verband met de planologische randvoorwaarden een weinig te beïnvloeden parameter. Des te meer bepaalt de ontwerper met de keuze van de diameter en daarmee de snelheid in de leiding het gedrag van het systeem. De keuze van het leidingmateriaal heeft voor de capaciteitsberekening nauwelijks invloed maar bepaalt wel in grote mate het dynamische gedrag van het systeem (waterslag).

3.2.1 LEIDINGPROFIEL

De hoogteligging van de persleiding wordt primair bepaald door het maaiveld ter plaatse. Om het grondverzet te beperken zal de leiding niet lager gelegd worden dan de ter plaatse geldende voorschriften (vorstvrij, grondeigenaar, veilige dekking voor graafschade, aanlegmethodiek, kruisende objecten etc.).

Uitgangspunt is tevens dat onder alle bedrijfsomstandigheden, dus ook bij pompstilstand, sprake is van overdruk in de leiding. Bij onderdruksituaties zoals weergegeven in Figuur 3.2 is er een risico dat gasbellen in het systeem kunnen ontstaan door enerzijds luchtintrede van buitenaf (lekkende verbindingen) en anderzijds ontgassing van het afvalwater (zie bijlage A.8.5). Primair moeten de leiding en verbindingen bestand zijn tegen alle belastingen; zowel uitwendige belastingen, zoals grond- en verkeersbelasting, alsook inwendige belastingen zoals stationaire en dynamische over- en onderdruk.

FIGUUR 3.2 HYDRAULISCHE GRADIËNT EN LEIDINGPROFIEL



Om de risico's van gasbelvorming tijdens onderdruk te voorkomen moet de leiding dieper gelegd worden of dient het lozingsniveau verhoogd te worden. In het eerste geval betekent dit extra kosten bij de aanleg en kan men te maken hebben met eisen van de vergunningverlener (bijv bij dijkkruisingen). In het laatste geval kan, indien de persleiding het afvalwater naar een zuivering pompt, overwogen worden om de persleiding direct op de hooggelegen inloop (verdeelwerk) van de zuivering uit te laten komen, waardoor punten in het leidingtracé met onderdruk voorkomen kunnen worden. De statische opvoerhoogte van de pomp wordt hierdoor wel groter, maar het influentgemeel op de zuivering wordt overbodig, waardoor het totale energieverbruik van het systeem niet toe zal nemen.

Indien de persleiding in een put uitkomt kan men overwegen een verhoogde overstortdrempel aan te brengen. Echter moet men zich wel realiseren dat hierbij twee nadelen een rol spelen. Het energieverbruik wordt structureel verhoogd en door het overstortende water ontstaat een stankprobleem door het vrijkomen van waterstofsulfide.

In heuvelachtig terrein kan het wenselijk zijn om een hoog punt in het tracé te voorkomen en de leiding dus om te leggen. In dit geval neemt de leidinglengte en daarmee het wrijvingsverlies toe.

Welke optie wenselijk is hangt af van de gevolgen van de verschillende opties. Mogelijke gevolgen zijn:

- Beperking keuze mogelijkheid voor pomp en aanschafkosten pomp(en)
- Verandering energieverbruik
- Aankosten leiding
- Verandering dalende leidingen met ander risico op gasophoppingen

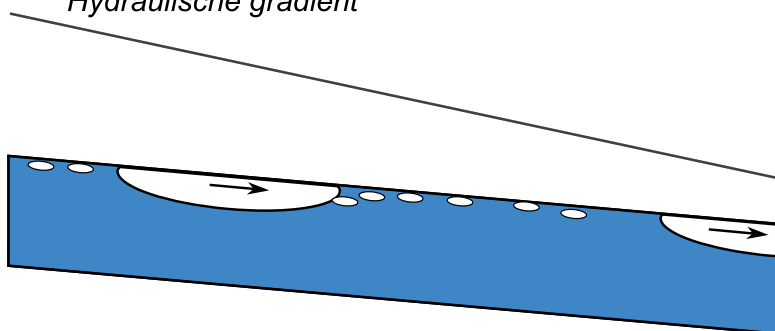
Neerwaarts hellende leidingdelen verdienen extra aandacht. In deze leidingdelen wordt gas minder snel afgevoerd dan in horizontale of stijgende leidingdelen.

Vooraf in zinkers en boringen die tot een significante diepte gaan, kan een gasbel tot aanzienlijke extra verliezen leiden; maximaal gelijk aan het hoogteverschil van de kruising (zie paragraaf 3.3).

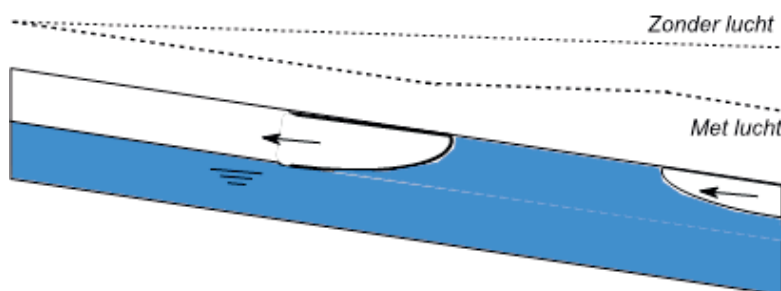
Echter ook leidingen die onder een flauwe neergaande hoek het maaiveld volgen kunnen al een bron voor gasbelstagnatie vormen. Stagnatie van gasbellen treedt op indien de leiding steiler ligt dan de hydraulische gradiënt. Uitgaande van een wrijvingsverlies tussen 1 en 5 m per 1000 m leiding betekent dit dat neergaande leidinghellingen met een hoek van slechts 0,1 tot 0,3 graden al problemen kunnen geven. Zolang de hydraulische gradiënt steiler loopt dan de helling van de leiding wordt de gasbel meegevoerd. De snelheid van de gasbel is hierbij lager dan de watersnelheid. De krachtenbalans op de gasbel zorgt ervoor dat de bel naar een punt gaat waar een lagere druk heerst. Als de hydraulische gradiënt flauwer loopt dan de leiding gradiënt is het gastransport afhankelijk van de stroomsnelheid in de leiding (zie bijlage A.8).

De transportcapaciteit van gas in dalende leidingen van zinkers en boringen is zeer klein. Het duurt uren om een gasbel via stroming af te breken. Het is dus mogelijk dat de leiding zich in de loop van de tijd over de gehele neergaande lengte kan vullen met gas. Figuur 3.3 en Figuur 3.4 tonen beide situaties.

FIGUUR 3.3 GEDRAG LUCHTBELLEN INDIEN HELLING FLAUWER DAN HYDRAULISCHE GRADIËNT
Hydraulische gradiënt



FIGUUR 3.4 GEDRAG LUCHTBEL INDIEN LEIDINGHELLING STEILER IS DAN DE HYDRAULISCHE GRADIËNT EN STROOMSNELHEID IN GEBIED
1 OF 2 (ZIE FIGUUR 3.8)
Hydraulische gradiënt



Als de luchtbel kan doorgroeien tot onderaan een dalende leiding, dan is er sprake van een extra energieverlies gelijk aan de totale hoogte van de dalende leiding minus het weerstandsverlies van de geheel gevulde leiding.

$$\Delta H_{gas,max} = L \sin \theta - \Delta H_{fric} \quad (3.2)$$

Waarin:

$\Delta H_{gas,max}$	=	Maximaal gasbel-energieverlies	[m]
L	=	Lengte van dalende leiding	[m]
θ	=	Hellingshoek van dalende leiding	[°]
ΔH_{fric}	=	Wrijvingsverlies over dalende leiding zonder gasbellen (volgens verg. (3.1))	[m]

De ontwerper dient zich ook te realiseren dat een leiding bij inbedrijfstelling goed ontluicht moet kunnen worden. Bijlage A.8 van de bijlage geeft hiervoor de theoretische relatie tussen de benodigde stroomsnelheid en hellingshoek.

Een ideaal profiel dat geen kans biedt op gasinsluitingen ligt vlak of met een stijgende helling. Indien een dalende leiding noodzakelijk is verdienen steile hellingshoeken de voorkeur (> 60°, waarbij 90° hellingen het grootste gastransport realiseren). Uit onderzoek blijkt dat gas sneller afgevoerd kan worden bij steile hellingshoeken (zie paragraaf 3.3).

3.2.2 DIAMETER

De binnendiameter is maatgevend voor het optredende energieverlies. Aangezien de lengte van de leiding en het maximale debiet veelal vaststaande gegevens zijn, blijft de binnendiameter als belangrijkste ontwerpparameter over.

De benodigde wanddikte en dus buitendiameter wordt bepaald door de sterkte-eis van de leiding.

Voordelen voor het kiezen van een kleinere diameter zijn:

- Goedkoper in aanschaf (minder materiaal)
- Goedkoper in aanleg (minder grondverzet)
- Kortere verblijftijden in de persleiding
- Verbeterde afvoer van gasbellen

De nadelen van een kleinere diameter zijn:

- Hoger energieverlies: Een 10 % kleinere diameter geeft een 60 % hoger verlies (de diameter komt tot de 5^e macht voor in de wrijvingsformule)
- Kortere gebruikswaarde; bij toekomstige verhoging van de capaciteit zal men eerder tot vervanging moeten overgaan vanwege optredende energieverliezen.

De eerste twee voordelen hebben invloed op de aanlegkosten van het systeem. Beide nadelen hebben consequenties voor de exploitatiekosten. Omdat in de praktijk de exploitatiekosten van een afvalwatertransport systeem bepalend zijn, is het zelden gunstig om voor een kleinere diameter te kiezen.

Een kleinere diameter heeft een gunstige invloed op de verblijftijd en het uittreden van waterstofsulfide (H₂S). De hogere energiekosten van een kleinere leiding diameter wegen meestal zwaarder dan de investering om maatregelen te treffen op het lozingspunt.

De maximale snelheid die in de Nederlandse afvalwaterpraktijk gehanteerd wordt ligt in de range van 1,0 tot 1,5 m/s (2,0 m/s in leidingen met $D > 1.5$ m) met opvoerhoogtes tot 50 meter. Bij grotere opvoerhoogtes lopen de energiekosten gedurende de levensduur meestal te ver op.

De minimale snelheid die in een leiding gerealiseerd dient te worden is afhankelijk van 2 aspecten:

- vervuiling/sedimentatie
- gasbelvorming

Sedimenttransport in leidingen is afhankelijk van de deeltjesgrootte van het sediment. Deze deeltjesgrootte is onvoorspelbaar in afvalwatersystemen, waardoor het niet mogelijk is om een wetenschappelijk onderbouwde minimumsnelheid te definiëren.

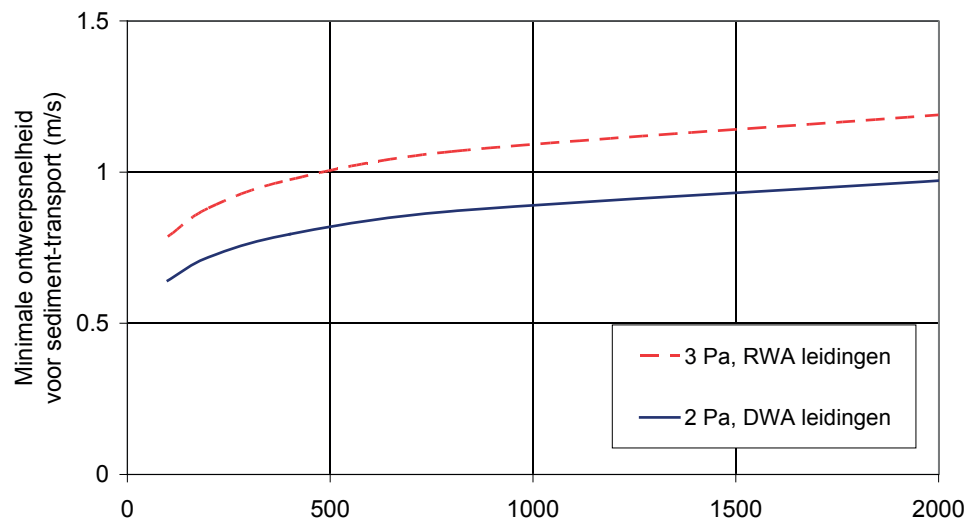
Uit experimenteel onderzoek (Fair 1968) blijkt dat bij een snelheid van 0,6 à 0,7 m/s een persleiding door intermitterende werking een zelfreinigend vermogen heeft. In de praktijk wordt vaak een ondergrens gebruikt van 0,5 m/s.

De Vlaamse code (KU Leuven, 2004) hanteert minimale schuifspanningen van 2 N/m^2 in DWA persleidingen van gescheiden stelsels en 3 N/m^2 in persleidingen met gemengde aanvoer of regenwater aanvoer. De verhoogde schuifspanning in persleidingen van gemengde stelsels en RWA leidingen is wenselijk in verband met transport van zanddeeltjes. Deze schuifspanningen dienen minimaal eenmaal per dag gehaald te worden en kunnen dus beschouwd worden als minimale ontwerpsnelheden voor droog-weer-situaties (Figuur 3.5) en Tabel 3.1.

TABEL 3.1: SAMENVATTING VAN MINIMALE AANBEVOLEN TRANSPORTSNELHEDEN IN AFVALWATERPERSLEIDINGEN

Situatie	Snelheid [m/s]	Opmerkingen
Minimale transportsnelheid	0.5	
Snelheid die minimaal 1 x per dag gehaald wordt tijdens droog-weer-situaties	0.64 - 0.97	Volgens curve DWA in Figuur 3.5
Snelheid die minimaal 1 x per dag gehaald wordt tijdens regen-weer-situaties in persleidingen van gemengde stelsels	0.8 - 1.2	Volgens curve RWA in Figuur 3.5

FIGUUR 3.5 AANBEVOLEN MINIMALE ONTWERPSNELHEID IN PERSLEIDINGEN TIJDENS DWA, GEBASEERD OP EEN WANDRUWHEID VAN 1 MM. BIJ LAGERE ONTWERPRUWHEIDEN WORDEN DE ONTWERPSNELHEDEN WAT GROTER OM DEZELFDE WANDSCHUIFSPANNING TE BEREIKEN



3.2.3 WANDRUWHEID

De equivalente wandruwheidswaarde k is in principe een eigenschap van het leidingmateriaal. De ruwheidsbijdrage van leidingglassen, -moffen of verbindingen wordt vaak ook in de equivalente ruwheid verdisconteerd, waardoor de ruwheidswaarde k meer een rekgrootheid is geworden. De literatuur geeft tabellen waarin per leidingmateriaal deze k -waarde is vermeld (zie bijlage A.3). Echter deze waarden gelden voor een schone buis.

Bij afvalwater ontstaat na enige tijd een slijmlaag op de buiswand waardoor het oorspronkelijke materiaal niet meer van invloed is. Deze slijmlagen zijn vrij dun (orde grootte 1 - 5 millimeter) en hebben maar weinig invloed op de binnendiameter van de buis. Deze slijmlaag kan zelfs een positief effect hebben indien de oorspronkelijke buiswand ruw is.

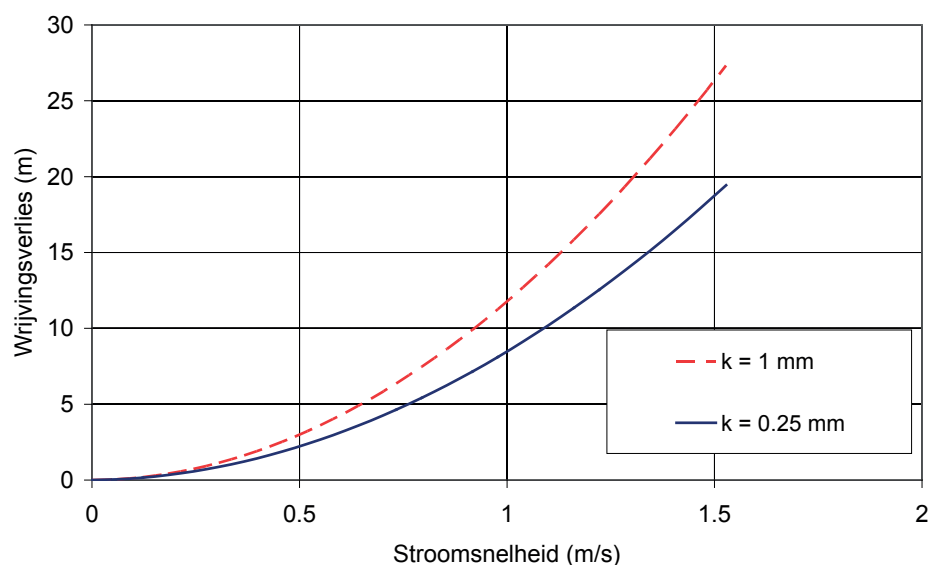
Ander processen die de wandruwheid beïnvloeden zijn sedimentatie en scaling. (zie verder beheeraspecten en theorie)

De mate van ruwheid is sterk afhankelijk van de kwaliteit van het afvalwater. Vandaar dat in de praktijk de k -waarde uit de tabel niet gebruikt worden.

Bij het ontwerp van afvalwater transportleidingen wordt over het algemeen een wandruwheid k gehanteerd van 0,25 - 1 mm.

Belangrijk is om het effect van deze variatie in k -waarde in beeld te brengen. Dit effect wordt het beste geïllustreerd indien de systeem- of leidingkarakteristiek wordt berekend.

FIGUUR 3.6 EFFECT VAN WANDRUWHEID OP DE SYSTEEMKARAKTERISTIEK VOOR LEIDING MET $D = 250$ MM EN LENGTE VAN 2 KM.



De invloed van de k -waarde neemt af naar mate de diameter toeneemt.

Uitgaande van het snelheidsbereik tussen 0,5 en 1,5 m/s en de beperkte opvoerhoogte van de pomp, ligt daarmee impliciet ook de maximale lengte van de persleiding vast.

3.2.4 LEIDINGMATERIAAL

Een ontwerper kan voor een leidingsysteem kiezen uit diverse materialen. Bij deze keuze laat hij zich in de regel leiden door aspecten als sterkte, kosten, levensduur en hanteerbaarheid bij aanleg. Duurzaamheid van het materiaal lijkt de komende tijd ook een van deze aspecten te gaan worden, hoewel er nog geen duidelijkheid is welke materialen als meer en minder duurzaam beschouwd mogen worden.

Hydraulische aspecten zijn praktisch nooit een reden om voor een bepaald materiaal te kiezen. De verschillende k-waarden van de nieuwe materialen lijken bij het gebruik door aangroei van de slijm laag geen verschil meer uit te maken. Daarnaast zijn voor alle toegepaste materialen sterkteklassen beschikbaar voor de normaal in Nederland voorkomende drukken. Hetzelfde geldt voor de kwaliteit van het afvalwater. Alle leidingmaterialen zijn bestand tegen het normaal in Nederland voorkomende afvalwater.

Uit de waterslaganalyse volgen de maximale onder- en overdrukken. Samen met de andere belastingen (grond-, verkeersbelasting etc.) zal uit de sterkteberekening blijken of de buis hier bestand tegen zal zijn; de Nederlandse standaard NEN 3650 beschrijft de sterkteberekeningen. Dunwandige buizen zijn gevoelig voor imploderen (plooiën of buckling) bij onderdrukken (zie ook bijlage A.7.4).

Tot begin jaren zeventig was asbestcement een populair materiaal, want goedkoop en licht dus makkelijk te hanteren bij aanleg. In de jaren zeventig en tachtig werd het gevaar van asbestcement onderkend en niet meer toegepast. Een belangrijk aandeel van de totale lengte afvalwaterpersleidingen in Nederland bestaat nog uit asbestcement buizen.

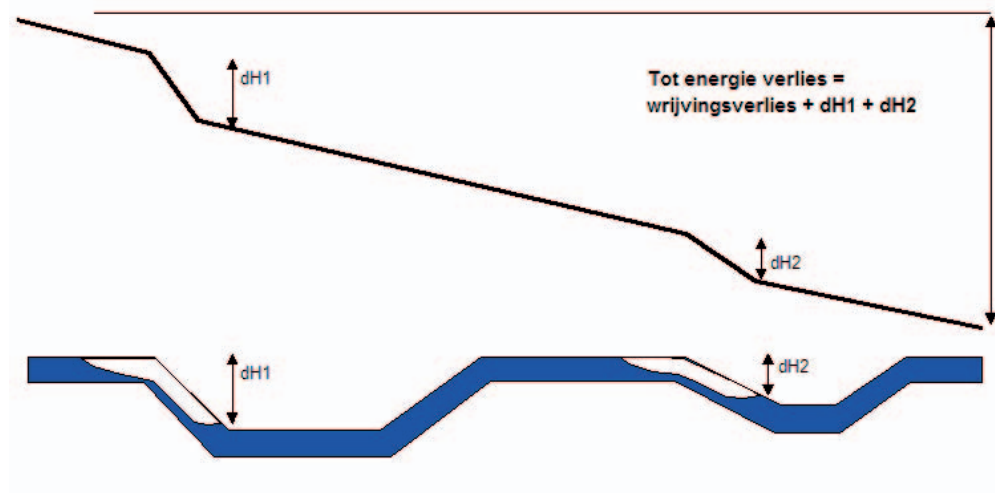
Dezelfde voordelen die golden voor AC, goedkoop en licht hanteerbaar, gelden nu voor het buismateriaal PVC. In normale veldstrekkingen is dit voor de meest toegepaste diameters, orde grootte 200 tot 400 mm, dan ook het meest gebruikte materiaal. De uit onderzoek recent gebleken lange levensduur is een bijkomend voordeel.

In horizontaal gestuurde boringen wordt meestal PE toegepast, hoewel ook boringen van gietijzer voorkomen. De overige buismaterialen, voorgespannen beton, gietijzer, GVK en staal worden voornamelijk toegepast bij relatief grote diameters en specifieke omstandigheden.

3.3 KRUISINGEN

Het gedrag van gasbellen in persleidingen is wispelturig en hangt sterk af van de hoek van de neergaande buis. Het CAPWAT onderzoek (2003-2010) heeft hier veel kennis over opgeleverd. Als gasbellen stagneren en ophopen in de leiding kan dat tot behoorlijke lokale energieverliezen leiden die nagenoeg gelijk zijn aan de hoogte van het gasvolume (zie Figuur 3.7).

FIGUUR 3.7 ENERGIEVERLIES DOOR GASBELLEN ZICHTBAAR IN DE HYDRAULISCHE VERHANGLIJN



Stagnatie treedt alleen op bij neergaande leidingdelen. Dit aspect speelt altijd indien een object (weg, vaarwater, spoorlijn, dijk) gekruist moet worden, maar kan zich ook voordoen in licht neerwaarts hellende leidingen indien de hellingshoek groter is dan de hydraulische gradiënt. Vanwege het complexe karakter is hieraan een aparte paragraaf gewijd (zie paragraaf 3.3).

Om in een dalende leiding onder hoek θ een gastransport op gang te brengen is een zekere minimale snelheid vereist. Is de snelheid kleiner dan deze minimumsnelheid, dan zal het gas zich in de leiding ophopen totdat de bel onderin de dalende leiding reikt. Er moet in dit geval rekening worden gehouden met het maximale extra energieverlies dat gelijk is aan het hoogteverschil over de dalende leiding.

De benodigde stroomsnelheid is echter ook sterk afhankelijk van de leidingdiameter. Daarom maken we gebruik van een dimensieloze stroomsnelheid, het stromingsgetal:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (3.3)$$

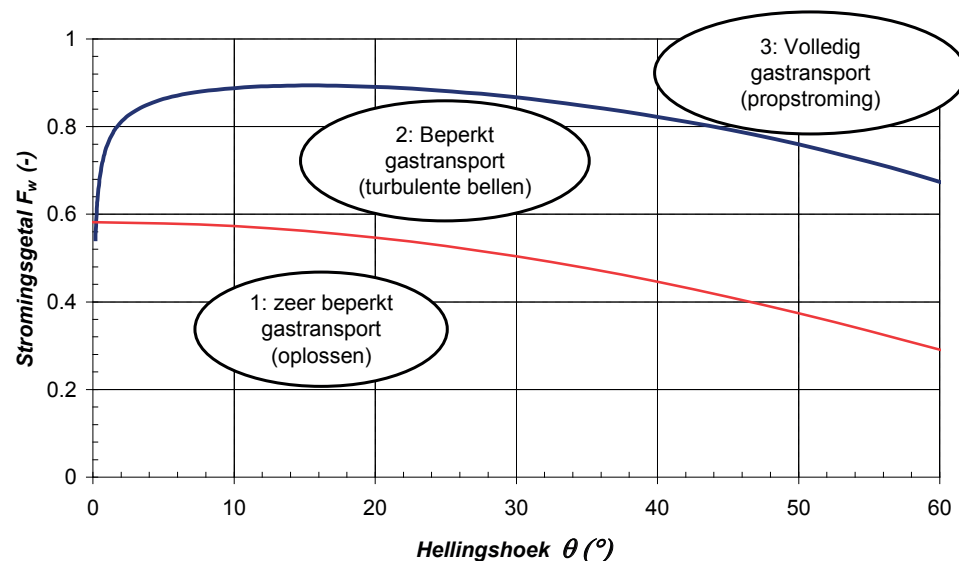
Waarin:

F	=	Stromingsgetal	[-]
v	=	Stroomsnelheid	[m/s]
g	=	Gravitatieversnelling	[m/s ²]
D	=	Diameter	[m]

Het stromingsgetal zorgt ervoor dat door zwaartekracht gedomineerde verschijnselen kunnen worden verschaald naar andere leidingdiameters; de vrije spiegel stroming onder een gasbel met een watersprong is hier een voorbeeld van. Het stromingsgetal houdt geen rekening met schaafeffecten ten gevolge van de waterkwaliteit, maar uit onderzoek blijkt dat deze schaafeffecten verwaarloosbaar zijn bij leidingdiameters groter dan 150 mm (Tukker 2007)

Figuur 3.8 laat het verband zien tussen de hellingshoek θ van de leiding en het benodigde stromingsgetal om gas af te voeren. Deze stromingsgetallen volgen uit een rekenmodel dat tijdens het CAPWAT onderzoek (2003-2010) is ontwikkeld (Pothof 2010).

FIGUUR 3.8 HET VEREISTE STROMINGSGETAL VOOR GASAFVOER; DZ IS HOOGTEVERSCHIL OVER DALENDE LEIDING



Figuur 3.8 is verdeeld in 3 gebieden. In gebied 1 vindt weinig tot geen gastransport plaats. De stroomsnelheid in de leiding is te laag om gasbelletjes te transporteren tot het laagste punt, er wordt voornamelijk gas afgevoerd door oplossing in de vloeistof wat resulteert in een lage gas afvoer. Dit heeft tot gevolg dat het volledige dalende leidingdeel gevuld kan worden met gas, wat een energieverlies geeft dat gelijk is aan het hoogteverschil over de dalende leiding.

Gebied 2 bevindt zich tussen de criteria voor gasbel transport en gasvolume transport. In dit gebied wordt het gasvolume opgebroken in meerdere aparte gasbellen die zich over de lengte van de dalende leiding verspreiden. Er worden kleine belletjes meegenomen door de vloeistofstroming en voorbij het laagste punt getransporteerd. Het energieverlies bij continue gasaanvoer wordt significant kleiner (de grootste reductie in energieverlies vindt plaats in dit gebied) naarmate het stromingsgetal toeneemt.

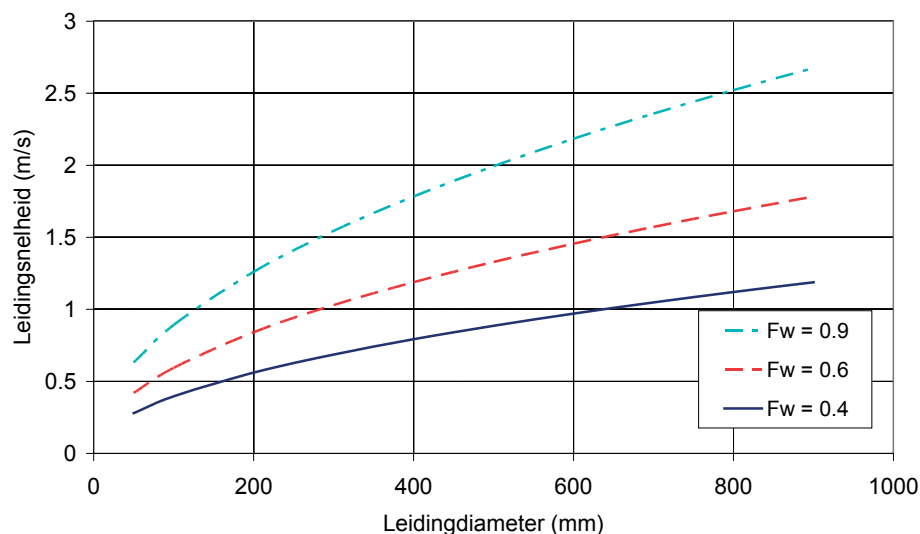
Gebied 3 is het gebied boven het criterium voor gasvolume transport. In dit gebied worden alle gasvolumes afgevoerd, onafhankelijk van de grootte. Het energieverlies dat wordt veroorzaakt door de gasvolumes is verwaarloosbaar (afhankelijk van de hoeveelheid aangevoerd gas).

Bovenstaande relatie (Figuur 3.8) tussen hellingshoek en benodigd stromingsgetal is gevalideerd tijdens het CAPWAT onderzoek voor hoeken tussen 5° en 30° en geldig voor alle leidingdiameters en lengtes (Pothof 2010).

Voor hoeken groter dan 60° kan Figuur 3.8 niet gebruikt worden. Bij deze hellingshoeken spelen andere fysische processen een dominante rol. Uit het onderzoek (Lubbers 2007) blijkt dat het benodigde stromingsgetal voor gasvolume-transport in een verticale leiding (Hellingshoek is 90°) 0.4 bedraagt ($F_{90} = 0.4$) en dus beduidend kleiner is dan het benodigde stromingsgetal bij 60° (zie Figuur 3.8). Gasbellen worden dus het meest efficiënt neerwaarts getransporteerd in een verticale leiding.

De leidingsnelheid is hieronder weergegeven als functie van de diameter voor enkele typische stromingsgetallen ($F_w = 0.4$; $F_w = 0.6$ en $F_w = 0.9$).

FIGUUR 3.9 BENODIGDE LEIDINGSNELHEID OM EEN BEPAALD STROMINGSGETAL TE BEREIKEN ALS FUNCTIE VAN DE LEIDINGDIAMETER.



Een vergelijking van Figuur 3.9 en Figuur 3.5 laat zien dat de benodigde snelheden voor gas transport beduidend hoger liggen dan voor sedimenttransport, met name voor leidingen met een diameter groter dan 200 mm. De volgende sectie behandelt enkele oplossingsrichtingen om gasophopingen in persleidingen te beheersen.

3.4 VOORZIENINGEN TER VOORKOMING EN VERWIJDERING VAN GASBELLEN

De afvalwatertransportsystemen worden doorgaans ontworpen op een maximale stroomsnelheid van 1 à 1,5 m/s om het energieverbruik laag te houden. Het opgenomen vermogen is namelijk evenredig met de stroomsnelheid tot de derde macht ($P \propto v^3$). Ontwerpen op “volledig gastransport” (stromingsgetal minimaal 0,9) is vaak onverstandig vanuit energetisch oogpunt en bovendien onrealistisch voor leidingen met een grote diameter, omdat te hoge snelheden nodig zijn (Figuur 3.9). Voor deze situatie moeten dus andere maatregelen getroffen worden.

Belangrijkste motto m.b.t. luchtinsluitingen luidt “voorkomen is beter dan genezen”. De oorzaak van gasbelvorming wordt in de praktijk met name bepaald door luchtinname bij het gemaal. Zie hoofdstuk 4 om dit te voorkomen / beperken. Onderstaande oplossingen hebben betrekking op de persleiding.

3.4.1 DIAMETER PLAATSELIJK VERKLEINEN

Om het gastransport in de neergaande delen van de leiding te bevorderen kan de kruising met een kleinere diameter uitgevoerd worden. Hierdoor is de stroomsnelheid in het dalende leidingdeel hoger, wat een gunstig effect heeft op het gastransport.

Vergelijking (3.4) geeft de maximale diameter als functie van het waterdebiet en een gewenst stromingsgetal.

$$D = \left(\frac{4Q}{\pi F_w \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3.4)$$

Waarin:

D	=	Leidingdiameter	[m]
Q	=	Waterdebiet bij RWA	[m ³ /s]
F _w	=	Gewenst stromingsgetal	[-]
g	=	Gravitatieversnelling	[m/s ²]

De resulterende diameter is de maximale diameter voor de kruising waarbij het vereiste stromingsgetal nog gehaald wordt. Het vereiste minimale stromingsgetal wordt gegeven door het gasvolume transportcriterium (zie Figuur 3.8). Een voordeel van deze aanpak is de simpliciteit en betrouwbaarheid. Door het hoge stromingsgetal zal de gasbel nooit in de kruising blijven hangen.

Nadeel is wel dat de leidingdiameter een grote invloed ($\Delta H \propto \frac{1}{D^5}$) heeft op de opvoerhoogte van de pomp en dus ook op het gebruikte vermogen (zie bijlage A.5). Hierdoor kan het benodigde vermogen sterk toenemen. Omdat alleen de kruisingen met een kleinere diameter worden uitgevoerd zijn de extra wrijvingsverliezen doorgaans klein. In de ontwerpfase is het zeer belangrijk om de verhouding tussen de grotere wrijvingsverliezen en het risico op problematische gasbellen te overwegen. De kleinere leidingdiameter veroorzaakt een permanent aanwezig extra energieverlies, in tegenstelling tot de gasbel wat een risico op een (groter) extra energieverlies veroorzaakt. Indien in het (her)ontwerp van het gemaal voldoende aandacht besteedt wordt aan preventie van luchtinname (zie paragraaf 4.5.2), hoeft geen kleinere diameter in kruisingen te worden toegepast.

Ook kan een sterk wisselende leidingdiameter problemen veroorzaken met het stoppen

of “piggen” van de persleiding.. De toegestane diameterverkleining hangt sterk af van het type prop. Een zachte prop kan een diameterverkleining van 30% tot soms 50% aan, afhankelijk van het materiaal van de foam pig. Voor een harde prop kan gelden dat er geen diameterverkleining toegestaan is. Het risico op een vastgelopen prop in een boring moet ten allen tijde voorkomen worden. De keuze van leidingdiametervariëaties in relatie met proppen moet in het ontwerpproces voldoende aandacht krijgen.

3.4.2 ONTLUCHTINGSPUNTEN

Als de diameterverkleinen geen goede oplossing biedt (teveel problemen voor reinigungsacties, te hoge wrijvingsverliezen) zal een ontluuchtingspunt aangebracht moeten worden op de persleiding bovenstrooms van de kruising.

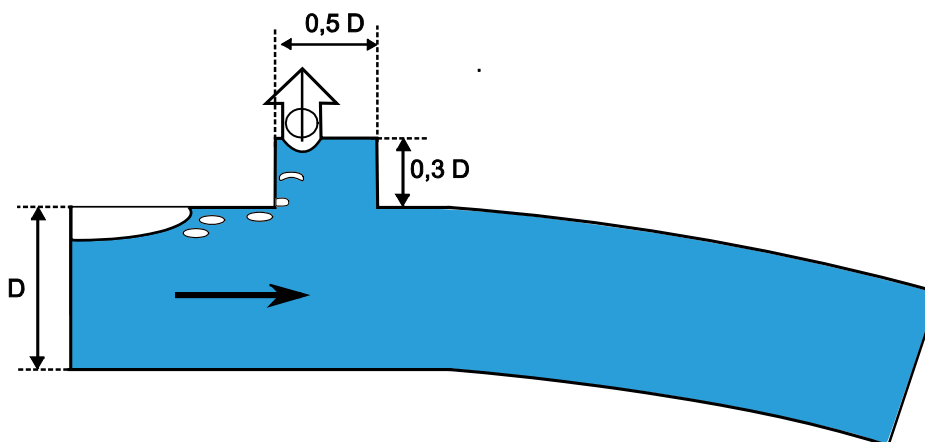
Ontluchters op de persleiding zijn een gevoelig onderwerp bij de beheerders van afvalwatertransportsystemen, omdat de betrouwbaarheid in de praktijk vaak te wensen overlaat ten gevolge van vet en drijfvuil. Deze vervuiling kan ervoor zorgen dat de ontluuchter niet open of dicht gaat of dat de verbindingsleiding, een mangat of T-stuk verstopt raakt. De meest gunstige aansluitconfiguratie van een ontluuchter, die lucht afvangt en tegelijkertijd niet (snel) verstopt raakt met drijfvuil, is voorsnog onvoldoende onderzocht. Daarom kan hierover nog geen eenduidige aanbeveling worden gegeven.

Bij het ontwerp van een ontluuchtingspunt moet goed gekeken worden naar de bereikbaarheid en omgevingsfactoren in verband met stankoverlast. In eerste instantie kan volstaan worden met een handmatige ontluuchtingspunt dat wellicht voor het vullen van het systeem al een vereiste is. Indien er geen sprake is van gasstagnatie (omdat er in het gemaal voldoende preventieve maatregelen zijn genomen) is een automatische ontluuchter niet noodzakelijk. Houd bij het ontwerp van de ontluuchtingsput rekening met de benodigde inbouwmaten van op de markt zijnde ontluuchtingsapparaten en stankfilters.

Bij het ontwerp van een ontluuchtingspunt moet gelet worden op de hydraulische gradiënt (zie paragraaf 3.2), omdat er overdruk in de leiding nodig is om het gas uit te drijven.

De plaatsing van een ontluuchtingspunt kan veel invloed hebben op de effectiviteit. Door de intermitterende werking van afvalwatersystemen worden ontluchters meestal op het hoogste punt in de leiding geplaatst. Een overduidelijk hoog punt is niet altijd aanwezig, of te ver verwijderd van de kruising.

FIGUUR 3.10 DE ONTLUCHTER WORDT BOVENOP HET T-STUK GEMONTEERD



Een simpele oplossing voor afvalwater met beperkt drijfvuil is dan het plaatsen van een T-stuk met ontluchttingspunt vlak voor het dalende been van de kruising (zie Figuur 3.10). De minimale grootte van de zij-tak van het T-stuk wordt bepaald door de diameter van de hoofdleiding. Uit onderzoek met schoon water blijkt dat de minimale breedte van de zijtak $0,5 D$ moet zijn (Wickenhäuser 2008). Bij deze grootte worden alle gasbellen die aan de bovenkant van de aanvoerende leiding langskomen afgevangen in het T stuk. De minimale hoogte van de zijtak moet $0,3 D$ zijn. Als de zijtak lager is dan kunnen gasbellen weer uit de zijtak ontsnappen en meegenomen worden door de stroming (zie bijlage A.8).

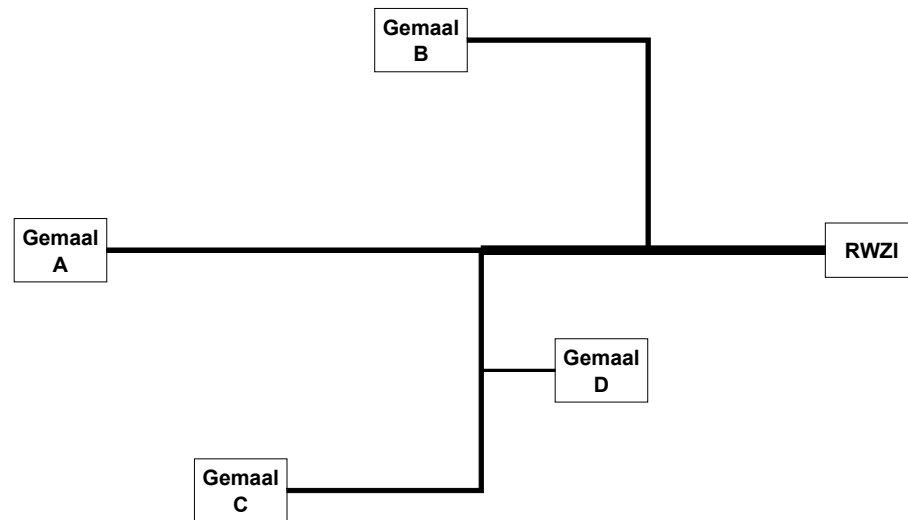
3.5 VERTAKTE SYSTEMEN

In de praktijk zijn vaak meerdere gemalen aangesloten op een hoofdleiding naar de RWZI. Dit heeft tot gevolg dat gemalen door elkaar beïnvloed worden. Hier moet rekening mee gehouden worden tijdens het ontwerp.

Dit betekent ook dat modificaties die worden gemaakt aan een gemaal, invloed hebben op alle andere gemalen in het systeem. Zo kan een capaciteitsuitbreiding van het ene gemaal een capaciteitsprobleem voor het andere gemaal opleveren door de verhoogde druk op de locatie waar de leidingen samenkomen.

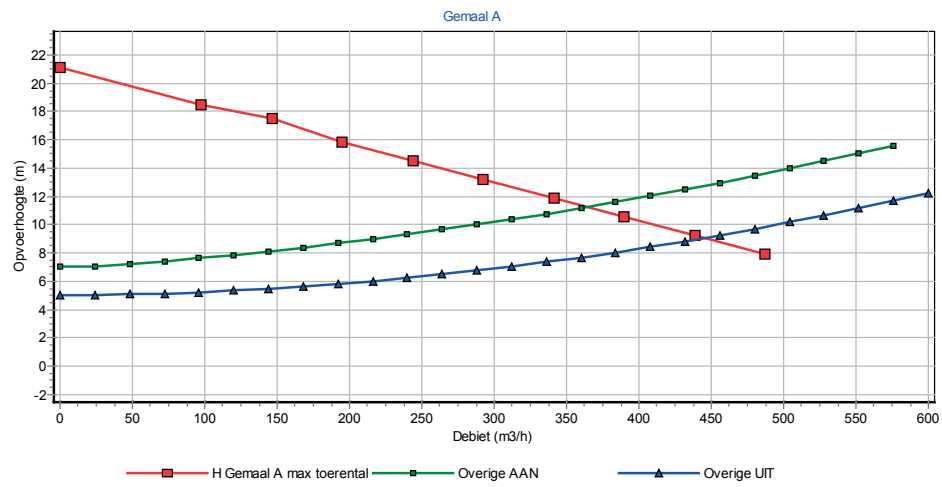
Het ontwerpproces bij een vertakt systeem is niet wezenlijk anders dan bij een enkelvoudig systeem.

FIGUUR 11 VOORBEELD VERTAKT AFVALWATERTRANSPORTSYSTEEM



Elk gemaal in het systeem ondervindt nu alleen verschillende opvoerhoogtes afhankelijk van het in werking zijn van de andere gemalen in het systeem. De verschillende werkpunten worden met behulp van een gecombineerde pomp/systeemkarakteristiek grafiek inzichtelijk gemaakt.

FIGUUR 12 POMPWERKPUNTEN ONDER INVLOED VAN GEMAALINZET



De ontwerper dient zich niet te beperken tot het nieuwe of te modificeren gemaal maar dient ook de werkpunten van de bestaande, ongewijzigde, gemalen te controleren.

4

ONTWERPEN VAN HET GEMAAL

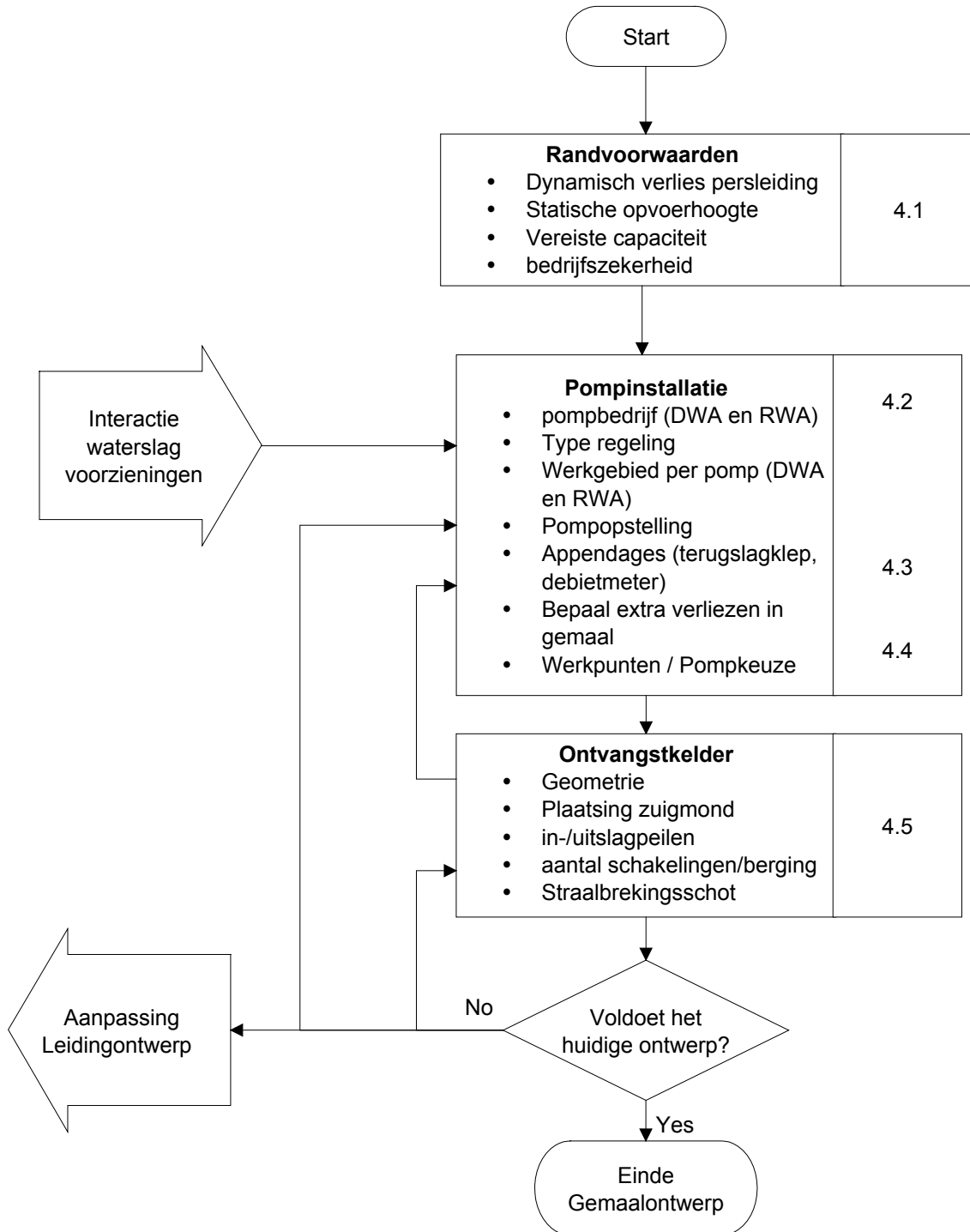
Het gemaal is de aandrijvende kracht van het afvalwatertransportsysteem. Het gemaal bestaat uit een pompinstallatie en een ontvangstkelder. De ontvangstkelder is in feite een onderdeel van het gemaal en kan niet los gezien worden van de te installeren pompinstallatie.

Er zijn verschillende typen gemalen te onderscheiden, elk met specifieke aandachtspunten:

Type	Omschrijving
Rioolgemaal	De ontvangstkelder is direct aangesloten op een rioolstelsel. De ontvangstkelder kan bestaan uit een open kelder of verdiept aangelegde rioolstreng. De aanvoer varieert relatief traag.
Tussengemaal	De (veelal) kleine ontvangstkelder ontvangt afvalwater uit andere persleidingen en soms nog van een eigen rioolstelsel. De regeling dient afgestemd te zijn op de grootte van de ontvangstkelder en minstens zo snel te zijn als de regelingen van de toeleverende gemalen.
Boostergemaal	Een boostergemaal heeft geen eigen kelder. De regeling van de toeleverende gemalen dient afgestemd te zijn op de regeling van het boostergemaal.

Figuur 4.1 toont de randvoorwaarden en ontwerpactiviteiten voor het ontwerpproces van het gemaal wat in dit hoofdstuk besproken wordt. De verschillende paragrafen geven de lezer een overzicht van de aspecten die een rol spelen bij het ontwerp.

FIGUUR 4.1 STROOMSCHEMA VOOR HET ONTWERP VAN HET GEMAAL



4.1 RANDVOORWAARDEN

4.1.1 VEREISTE CAPACITEIT

De capaciteit van de pompinstallatie is een harde eis. De vereiste capaciteit kan worden opgesplitst in RWA en DWA capaciteit. DWA capaciteit komt ongeveer 80% van de tijd voor. RWA capaciteit is incidenteel, maar wel bepalend voor het systeem.

4.1.2 OPVOERHOOGTE

De opvoerhoogte voor het gemaal bestaat uit twee componenten: De statische opvoerhoogte en de dynamische opvoerhoogte. Voor leidingen waar maar één gemaal op is aangesloten is de statische opvoerhoogte gelijk aan het hoogteverschil tussen het waterniveau in de pompkelder en het waterniveau op het eindpunt van de leiding (ontvangstkelder of afvalwaterzuivering). Bij een geheel gevulde leiding (dus geen gasbellen in het systeem) spelen locale verliezen geen rol en wordt de dynamische opvoerhoogte bepaald door het wrijvingsverlies in de persleiding. De bijdrage van bochten e.d. is zo klein in relatie tot de onzekerheid van de wandwrijving, dat het niet noodzakelijk is de locale verliezen in de persleiding mee te nemen. Locale verliezen door een opeenhoping van gas kan wel een grote bijdrage leveren. Hierover meer in paragraaf 3.3. In het gemaal zijn juist de locale verliezen (o.a. terugslagklep, afsluiters) maatgevend. De locale verliezen in het gemaal kunnen significant zijn door het aantal (scherpe) bochten en knikken, afsluiters en terugslagkleppen en de hoge stroomsnelheden. Voor complexe vertakte systemen is de opvoerhoogte ook afhankelijk van de andere gemalen in het systeem, waardoor er een wisselende opvoerhoogte en dus een wisselend werkpunt voor de pomp ontstaat. Hiermee moet rekening gehouden worden in het ontwerp van de pompinstallatie en pompselectie.

4.1.3 BEDRIJFSZEKERHEID

De bedrijfszekerheid van het gemaal is een eis die zeer lastig te kwantificeren is en wordt vooral bepaald door het kostenaspect. De kosten van beheer en onderhoud zijn veelal hoger dan de bouwkosten en worden grotendeels bepaald door het ontwerp. Hogere kosten tijdens de bouw van het systeem kunnen zichzelf op de langere termijn terugbetalen in lagere kosten voor het beheer en onderhoud.

Het percentage van de tijd dat pompen beschikbaar zijn om te pompen kan gebruikt worden als indicator voor de bedrijfszekerheid. Echter is dit erg afhankelijk van de omstandigheden (geografische ligging, waterkwaliteit, toeval) en is daarom ook niet direct bruikbaar om systemen onderling te vergelijken.

4.2 POMPOPSTELLING

4.2.1 NATTE OF DROGE OPSTELLING

Hydraulisch gezien is er geen verschil tussen een natte en droge pompopstelling (behalve de gevolgen voor het in- en uitslagpeil). De keuze tussen een natte of droge pompopstelling is vaak geen technische, maar een organisatorische beslissing.

In veel organisaties zijn vaste criteria voor deze beslissing. Een vaak gebruikt criterium is het gewicht van de pomp. De capaciteit van de pomp wordt ook wel genoemd als criterium, maar in de praktijk is dit hetzelfde als het gewicht van de pomp (grotere pompcapaciteit betekent een zwaardere pomp).

Een nat opgestelde pomp moet uit de pompkelder gehesen worden voor onderhoud en veel organisaties stellen daarom eisen aan het maximum gewicht van de nat opgestelde pomp. De eisen zijn vaak de beperkingen van de kraan of hijsinstallatie die de organisatie in het verleden heeft aangeschaft.

Over alle technische, historische en emotionele afwegingen kunnen de meningen sterk verschillen. Samenvattend kunnen de volgende overwegingen een rol spelen bij de afweging voor een natte of droge opstelling:

- Organisatie van het beheer;
- ARBO aspecten;
- Gewicht per pomp of capaciteit van het gemaal;
- Installatiekosten van het gemaal;
- Ondergronds bouwvolume.

4.2.2 AANTAL POMPEN

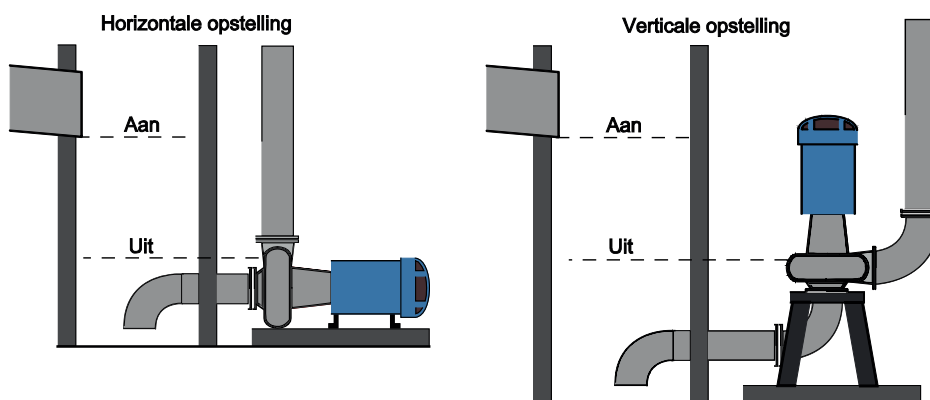
Het aantal pompen wordt bepaald door de spreiding tussen de vereiste RWA en DWA capaciteit. Veel rioolgemalen worden tegenwoordig uitgerust met twee pompen, waarvan één reservepomp, zodat het gemaal altijd kan overschakelen in geval van storing van één van de pompen. Omdat de pompen geselecteerd moeten worden op de RWA capaciteit, zal de pomp vaak moeten schakelen in DWA situaties (afhankelijk van het verschil tussen RWA en DWA). Door het gebruik van een toerenregeling kan de schakelfrequentie omlaag gebracht worden en kan een groter bereik in debieten door een enkele pomp worden afgedekt; het effect van een toerenregeling op het gedrag van de pomp wordt besproken in bijlage A.6.

4.2.3 VERTICALE OF HORIZONTALE OPSTELLING

Droge pompen kunnen zowel verticaal als horizontaal (hiermee wordt de oriëntatie van de motoras bedoeld) geplaatst worden, meestal om de benodigde ruimte voor de pomp beperkt te houden. Hier zijn wel hydraulische consequenties aan verbonden. De voorkeur voor verticale of horizontale opstelling van de pomp is afhankelijk van de keuze voor een natte of droge opstelling.

Droog opgestelde pompen met grote afmetingen worden soms verticaal opgesteld om de benodigde ruimte te beperken. In het verleden werden pompen ook wel verticaal opgesteld om de motor en het pomphuis gescheiden te houden.

FIGUUR 4.2 HET VERSCHIL TUSSEN EEN HORIZONTALE EN VERTIKALE POMPOPSTELLING



In de droge situatie heeft een horizontaal opgestelde pomp de voorkeur boven een verticaal opgestelde pomp om de volgende redenen:

- Eenvoudiger leidingwerk
- Lagere wrijvingsverliezen (Bij verticaal opgestelde pompen zijn twee extra 90° bochten nodig op plaatsen waar hoge stroomsnelheden gehaald worden)
- Uitslagpeil moet hoger liggen dan bij horizontaal opgestelde variant (of de kelder moet dieper zijn)

Nat opgestelde pompen worden eigenlijk altijd verticaal geplaatst, vanwege de bevestiging van de pomp aan de zogenaamde voetbocht. Ook zit met een verticale opstelling de inlaat van de pomp op het laagste punt, wat gunstig is voor het in- en uitslagpeil.

Vroeger werden nat opgestelde pompen ook wel horizontaal geplaatst zodat de motor langer gekoeld werd door het water. Dit is niet nodig bij moderne pompen/elektromotoren.

4.3 APPENDAGES

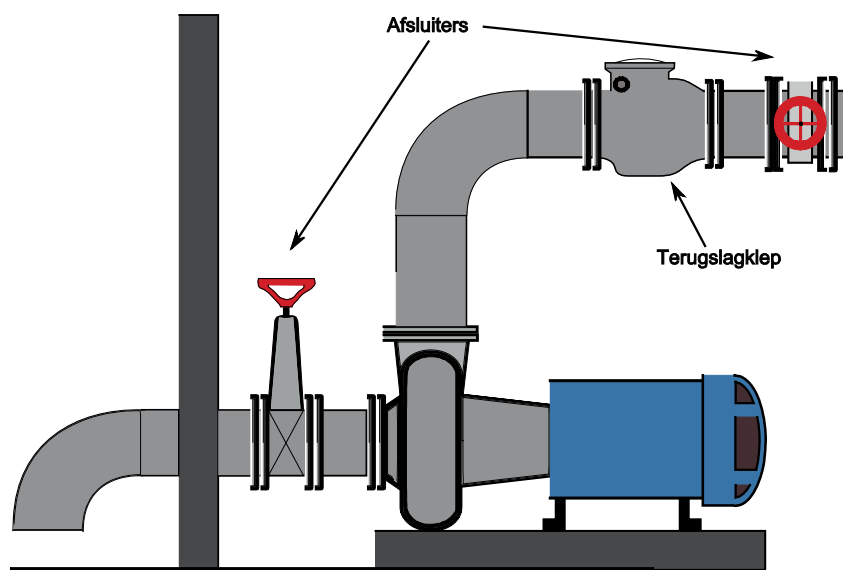
De dynamische verliezen in het gemaal variëren in de regel tussen 0.5 m en 2 m en worden primair bepaald door de snelheid in het leidingwerk. Een belangrijke factor in het dynamische verlies is de weerstand in de terugslagklep. Het is belangrijk dat deze zodanig gekozen wordt dat de klep geheel opent tijdens pompbedrijf.

4.3.1 AFSLUITERS

In het gemaal zijn diverse afsluiters nodig om onderhoud aan de pompinstallatie mogelijk te maken. In onderstaande figuur zijn deze aangegeven.

Om onderhoud aan de pomp mogelijk te maken heeft een droog opgestelde pomp minimaal twee afsluiters nodig; één aan de zuigzijde en één benedenstrooms van de terugslagklep. Voor een nat opgestelde pomp kan worden volstaan met één enkele afsluiter aan de perszijde van de pomp (zie Figuur 4.3).

FIGUUR 4.3 LOKCATIE VAN DE AFSLUITERS EN TERUGSLAGKLEP



Daarnaast dient een derde afsluiter aan het begin van de persleiding geplaatst te worden (dit geldt voor zowel een droog en nat gemaal). Dit maakt het mogelijk om het volledige pompstation af te sluiten van het systeem. Dit is nodig voor onderhoud aan het leidingwerk in het pompstation, capaciteitsmetingen of werkzaamheden aan het pompstation.

Omdat de afsluiter alleen wordt gebruikt om onderhoud mogelijk te maken dient deze in open toestand een volledig vrije doorlaat te hebben om vervuiling te voorkomen. Als de afsluiter vervuild raakt is het mogelijk dat deze niet meer volledig sluit. In de praktijk worden voornamelijk schuifafsluiters gebruikt.

4.3.2 TERUGSLAGKLEP

Een terugslagklep is een betrekkelijk simpel apparaat, bestaande uit een klephuis rond één of meerdere roterende of translerende afsluitorganen, welke tot doel heeft vloeistof slechts in een richting door te laten. De beweging van de afsluitorganen wordt primair gestuurd door de vloeistof. Bij een aantal typen wordt deze beweging bovendien beïnvloed door een dempingsmechanisme, wat de beweging van de afsluitorganen (in het algemeen alleen gedurende het laatste gedeelte van het sluittraject) vertraagt.

Het stationaire gedrag van terugslagkleppen wordt gekarakteriseerd met de stationaire karakteristiek, waarin het verband tussen het drukverschil over de klep en het debiet is gegeven.

Het drukniveauverschil over de klep wordt beschreven met:

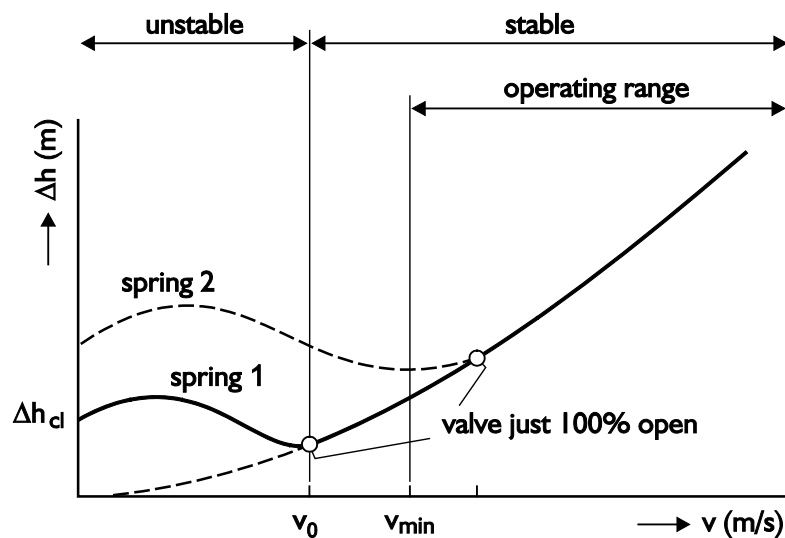
$$\Delta H = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (4.1)$$

Waarin:

ΔH	=	Druk niveau verschil	[m]
ξ	=	Weerstands- of verliescoëfficiënt	[-]
v	=	Stroomsnelheid	[m/s]
g	=	gravitatieversnelling	[m/s ²]

De dimensieloze weerstands of verliescoëfficiënt ξ is een functie van de kleppositie θ .

In de stationaire karakteristiek is het verband gegeven tussen druk(niveau)verschil en vloeistofsnelheid/debiet. In Figuur 4.4, waarin het drukniveau verschil is uitgezet als functie van de vloeistofsnelheid, zijn de karakteristieken weergegeven van een translierend (nozzle) type terugslagklep voor twee verschillende veren.



FIGUUR 4.4 STATIONAIRE KARAKTERISTIEK VAN EEN TERUGSLAGKLEP

Het drukverschil ΔH_{cl} is de waarde waarbij de klep juist begint te openen. De kritische snelheid v_0 is de vloeistof snelheid waarbij de klep juist volledig geopend is. De karakteristiek is parabolisch voor vloeistof snelheden groter dan de kritische snelheid, vanwege het feit dat ξ constant is voor een volledig geopende klep. Bij afnemend debiet begint de terugslagklep te sluiten vanaf het moment dat de kritische snelheid v_0 onderschreden wordt. Daarbij kan,

als gevolg van een toename van de weerstand, het druk(niveau)verschil over de klep wat toenemen.

Afhankelijk van het kleptype kan de stationaire karakteristiek beïnvloedt worden door veren (sterker, zwakker), gewichten en ballen (zwaarder, lichter) en de slag of maximale rotatiehoek van de bewegende delen.

Het dynamische gedrag van de terugslagklep wordt beschreven in paragraaf A.6.3.

Bij het ontwerp van de pompinstallatie moet er op gelet worden dat de oriëntatie en inbouwsituatie van de terugslagklep invloed heeft op de stationaire en dynamische karakteristieken van de klep.

Met oriëntatie wordt de stroomrichting van de klep bedoeld. Bij de terugslagklep in Figuur 4.3 is de oriëntatie van de stroomrichting horizontaal.

De fabrikant van de klep moet aangeven wat de goede inbouwsituatie is voor een bepaalde klep.

4.4 BEPALEN VAN HET WERKGEBIED & POMPKEUZE

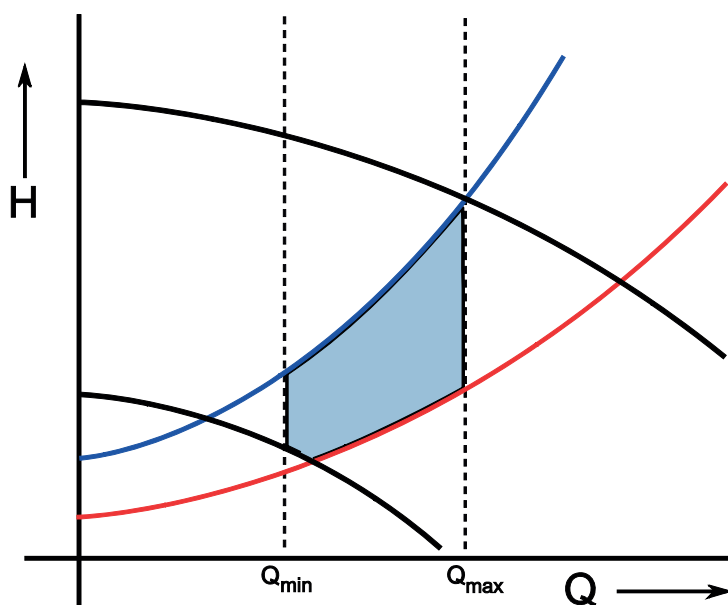
Nu de statische en dynamische opvoerhoogte van het systeem bekend zijn, kan het werkgebied van de pomp bepaald worden.

De vereiste opvoerhoogte H_v van de pompinstallatie is afhankelijk van de statische opvoerhoogte (het drukverschil tussen de ontvangstkelder en benedenstroomse uitstroomconstructie), de dynamische opvoerhoogte (het drukverlies dat wordt veroorzaakt door de persleiding) en de drukverliezen in de leidingen en appendages (afsluiters, terugslagkleppen) in het pompstation.

De wrijvingsverliezen in de appendages kunnen worden bepaald aan de hand van literatuur waarden (bochten, knikken, leidingwerk) of worden gegeven in de specificaties van de fabrikant (afsluiters, terugslagkleppen). De statische opvoerhoogte en dynamische opvoerhoogte zijn afhankelijk van het leidingontwerp. Echter kan de opvoerhoogte variabel zijn in situaties waar meer dan één gemaal is aangesloten op de persleiding (zie Figuur 4.5).

Door het combineren van de pompkarakteristiek en de systeemkarakteristiek en het minimale en maximale debiet aan te geven in de systeemkarakteristiek kan een duidelijk beeld verkregen worden van het werkgebied (zie Figuur 4.5)

FIGUUR 4.5 HET WERKGEBIED VAN EEN SYSTEEM MET WISSELENDE OPVOERHOOGTE EN WANDRUWHEDEN EN BIJBEHORENDE POMPROMMEN (TOERENGEREGELDE POMP)



De daadwerkelijke pompkeuze kan het beste overgelaten worden aan de pompfabrikanten. Met een duidelijk gedefinieerde systeemkarakteristiek en werkgebied moet de fabrikant in staat zijn om de juiste pomp voor het systeem te selecteren.

4.5 ONTVANGSTKELDER

Het hydraulische ontwerp voor pompkelders is uitgebreid beschreven in verschillende richtlijnen en handboeken (zie bijlagen voor meer informatie). Deze paragraaf geeft een korte omschrijving van de verschillende aspecten die komen kijken bij het hydraulische ontwerp van pompkelders en zal waar nodig verwijzen naar de literatuur.

Een goed ontworpen ontvangstkelder voldoet aan de volgende eisen (op volgorde van prioriteit):

1. De berging geeft een optimale schakelfrequentie voor de pompen en het leidingsysteem.
2. Er wordt geen lucht ingeslagen door de pomp
3. Sediment en drijfvuil wordt afgevoerd door de pomp
4. De aanstroming van de pomp is optimaal

Er zal nooit aan alle eisen voldaan worden, omdat de bovenstaande punten strijdig zijn. Dit zal verder besproken worden.

4.5.1 BERGING VAN DE ONTVANGSTKELDER

Uit kostenoverwegingen moet de ontvangstkelder en dus de berging niet groter worden gemaakt dan noodzakelijk. De berging is het volume van de kelder tussen inslag- en uitslagpeil van de pomp.

Het uitslagpeil wordt bepaald door de minimale onderdempeldiepte om luchtaanzuiging te voorkomen. Deze minimale diepte verschilt per pomp. Als vuistregel wordt vaak de bovenkant van het pomphuis (nat opgestelde pompen) of bovenkant aanzuigleiding (droog opgestelde pompen) gehanteerd. Een eis van de pompleverancier om het afslagpeil te verhogen in verband met de benodigde NPSH van de pomp mag nooit gevolgd worden; er zijn voldoende pompen op de markt met een voldoende lage NPSH.

Het inslagpeil wordt bepaald door de laagste aanvoerleiding in de kelder.

De minimale benodigde berging (opslagcapaciteit) V_{req} van de ontvangstkelder wordt bepaald door het aanvoerdebiet, pompdebiet en het maximum aantal pompstarts per uur (bron: Leidraad Riolering, Module C6000 Gemalenbeheer).

$$V_{req} > \frac{1}{n} \times \frac{Q_t (Q_p - Q_t)}{Q_p} \quad (4.2)$$

Waarin:

V_{req}	=	Minimale berging	[m3]
n	=	aantal pompstarts per uur	[h-1]
Q_t	=	Toevoerdebiet	[m3/h]
Q_p	=	Pompdebiet	[m3/h]

Het maximum aantal pompstarts treedt op indien $Q_p = 2 \cdot Q_t$. Het benodigde keldervolume bedraagt dan:

$$V_{req} > \frac{Q_p}{4n} \quad (4.3)$$

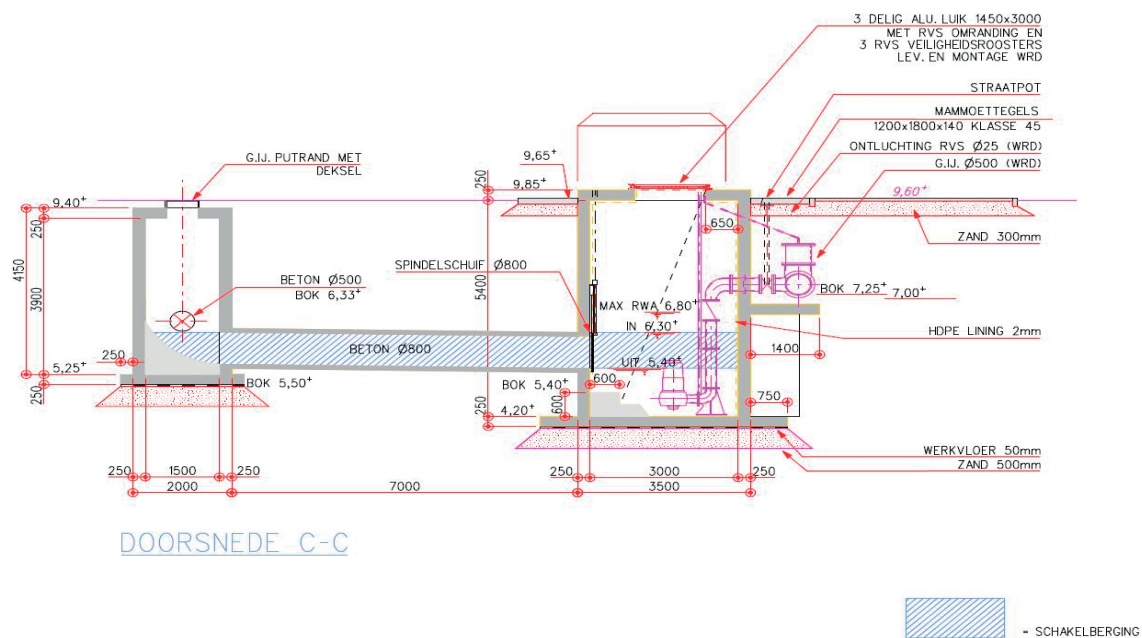
Uiteraard geldt dat de beschikbare berging groter moet zijn dan de minimaal benodigde berging (vergelijking).

Het maximum toelaatbaar aantal pompstarts per uur is voornamelijk afhankelijk van de schakelapparatuur. Moderne frequentieregelaars en softstarters die magneetschakelaars vervangen kunnen veel hogere schakelfrequenties aan. Tegenwoordig zijn schakelfrequenties van 10 tot 20 per uur technisch geen probleem. De toepassing van frequentieregelaars maakt het ook mogelijk het pompdebiet tijdens DWA te reduceren en daarmee de benodigde berging te beperken. Een hoge schakelfrequentie betekent wel energieverliezen omdat de persleiding steeds op gang gebracht moet worden. Bij gemalen met korte persleidingen, die alleen maar oppompen naar een volgend rioelstelsel of RWZI speelt dit geen rol maar zeker wel bij langere leidingen. De ontwerper zal hier de juiste balans in moeten vinden.

Om ruimte in de ontvangstkelder te besparen en een plonzende straal in de kelder te voorkomen kan een gedeelte van de schakelberging van het gemaal in de aanvoerende rioelbuis ontworpen worden. We spreken hier van een “verdiepte laatste streng”.

Bij een verdiepte laatste streng wordt na de laatste put van het aanvoerende rioelstelsel een leiding met veelal een grotere diameter, verdiept en onder een kleine helling gelegd van minimaal 1% (zie Figuur 4.6).

FIGUUR 4.6 EEN GEMAAL MET EEN GEDEELTE VAN DE SCHAKELBERGING IN DE VERDIEPTE LAATSTE STRENG
(BRON: WATERSCHAP REGGE & DINKEL, GEMAAL ENTER)



Deze verdiepte laatste streng wordt gebruikt als extra schakelberging, naast de berging in de ontvangstkelder. Hierdoor kan de kelder zelf kleiner gemaakt worden, wat gunstig is voor het sediment transport (minder vervuiling in dode hoeken van kelder).

Bij een verdiepte laatste streng wordt het inschakelpeil gelijk aan de binnen onderkant (BOK) van de laatste rioolbuis gekozen. Het uitschakelpeil wordt gelijk gekozen aan de BOK van de verdiepte laatste streng, waarmee een plonzende straal in de kelder uitgesloten is. Luchtbellen, die eventueel worden ingeslagen op de overgang van de rioolbuis naar de verdiepte streng, hebben in de verdiepte streng de tijd om naar boven afgevoerd te worden waardoor luchtintrede in de pomp voorkomen wordt.

Niet alle gemalen hebben een ontvangstkelder. In sommige gevallen kan het gunstig zijn om de pompinstallatie direct aan te sluiten op de aanvoerende leiding, zoals bij boostergemalen. Een pompinstallatie kan ook direct worden aangesloten op het rioelstelsel. Hiervoor is echter wel een toerengeregelde pomp en een enigszins constante aanvoer vereist. Het voordeel van deze methode is dat er geen kelder is waar luchtinslag en sedimentophoping kan plaatsvinden. Het aanvoerriool dat over het laatste deel naar de pompinstallatie dieper gelegd moet worden wordt feitelijk als schakelberging gebruikt. Dit concept is toegepast in Amsterdam (Waternet) en wordt DAAS genoemd (Directe Aansluiting op het AanvoerStelsel).

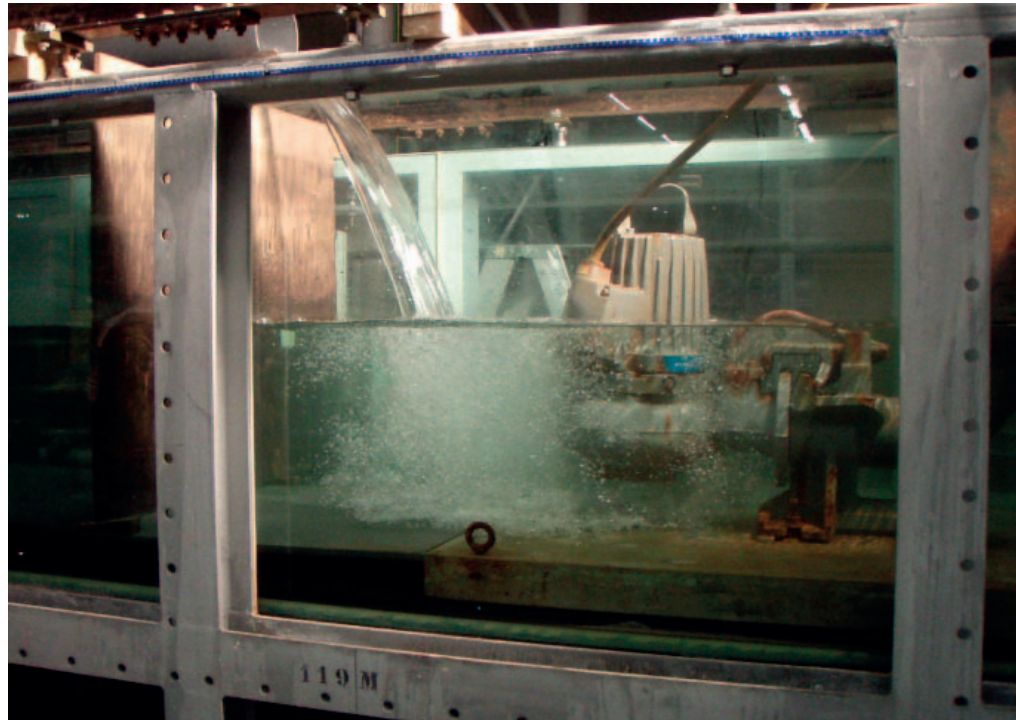
4.5.2 VOORKOMEN VAN LUCHTINSLAG

Over het algemeen bevindt het inslagpeil (en daarmee dus het hoogste waterniveau) zich onder de aanvoerleiding in de kelder. Dit betekent dat het water altijd een bepaalde afstand valt vanuit de aanvoerleiding. Door dit vallende water ontstaan kleine luchtbelletjes die, als de pomp aan staat, in de pomp gezogen worden (zie Figuur 4.7).

Onderzoek wijst uit dat de hoeveelheid gas dat op deze manier in het leidingsysteem terecht komt, aanzienlijk kan zijn (ongeveer even groot als wat er hydraulisch afgevoerd kan worden). Zowel Smit (2007) als Kranendonk (2007) hebben metingen verricht aan de

luchtinname, maar deze metingen zijn erg afhankelijk van de waterkwaliteit, pompdebiet, en kelder geometrie.

FIGUUR 4.7 LUCHTINSLAG IN EEN POMPKELDER (KRANENDONK (2007))



Door eenvoudige constructies kan de straal vanuit de aanvoerleiding gebroken worden, waardoor de bellenpluim onder water sterk gereduceerd wordt. In de literatuur (zie Kranendonk (2007)) worden verschillende constructies uitgebreid beschreven. De meest effectieve constructies zijn een verticale plaat, een T-stuk met valpijp of een rubberen flap; een nadere omschrijving staat in Bijlage A.4.3.

Een andere logische oplossing om luchtinslag te voorkomen lijkt om de afstand tussen de aanvoerleiding en pomp te vergroten, zodat de resulterende bellenpluim niet bij de pomp kan komen. Echter is deze oplossing strijdig met het andere doel; voorkomen van sedimentatie in de kelder.

4.5.3 SEDIMENT AFVOER EN AANSTROMING VAN DE POMP

De vast bestanddelen die in het rioolwater worden meegevoerd moeten zoveel mogelijk worden afgevoerd worden door de pompen. De vormgeving van de kelder en het uitslagpeil spelen daarin een belangrijke rol zoals onderzoek uitwijst. Czarnota (2004) laat zien dat een kleine diepe kelder schoner blijft dan een ondiepe brede kelder. Door het kelderoppervlak zo klein mogelijk te houden, bezinkt de meeste sedimentatie dicht bij de pomp en wordt daardoor afgevoerd als de pomp draait.

Ook zorgt een klein kelderoppervlak in combinatie met een zo laag mogelijk uitslagpeil in maximale afvoer van drijfvuil, omdat de stroomsnelheden in de kelder hoger zullen zijn en het wateroppervlak dus turbulenter is. Hierdoor wordt meer drijfvuil naar de pomp gezogen. Er zijn verschillende manieren om het kelderoppervlak klein te houden en toch een grote berging te creëren:

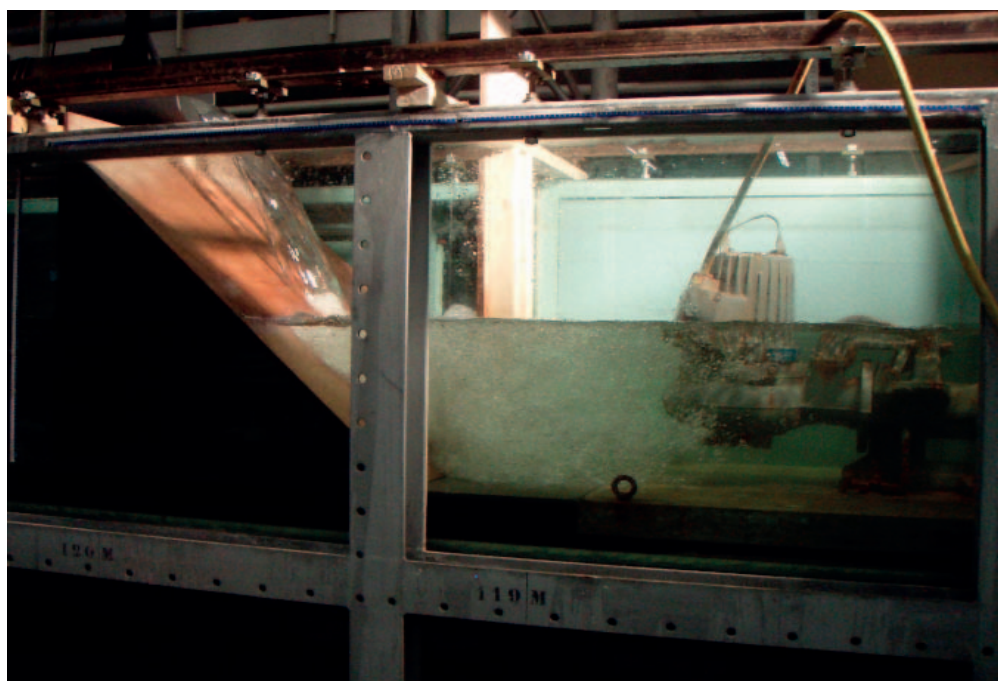
1. Diepe kelders met een klein vloeroppervlak
2. Schuine kelderwanden (taps toelopend)

Het genoemde onderzoek laat ook zien dat beperking van de ruimte tussen zuigmonden en wanden/vloer geen grote invloed heeft op het pompndement. De meeste pompfabrikanten geven richtlijnen voor optimale aanzuiging van de pompen. Voor bijzondere gevallen (abnormale keldervorm door beperkte bouwruimte, grote aantallen pompen, ongunstige aansluiting aanvoerriool) is het verstandig door een laboratorium een modeltest te laten doen. Bijlage A.4 geeft meer informatie over het hydraulische ontwerp van de ontvangstkelder.

In het verleden werden slingerboten gebruikt om het sediment naar de pomp te brengen. Slingerboten zorgen voor een hoge stroomsnelheid (gunstig voor sedimenttransport) met name in het laatste deel van de pompcyclus. Een slingerboot is gelegen juist boven het afslagniveau. Slingerboten werden toegepast in tijden dat de schakelfrequentie beperkt werd door de schakelapparatuur (magneetschakelaars) en aanloopstromen die voor hoge motortemperaturen zorgden. Pompkelders werden door de lage schakelfrequentie zo groot dat vervuiling onvermijdelijk was; een slingerboot reduceerde de vervuiling. Met de moderne elektronica is dit probleem opgelost en zijn slingerboten dus niet langer nodig.

Schuine wanden of vulstukken hebben als nadeel dat er meer lucht wordt ingeslagen in de pomp (zie Figuur 4.8); Kranendonk (2007) geeft hiervoor simpele en doeltreffende oplossingen.

FIGUUR 4.8 EEN VULSTUK VERGROOT DE LUCHTINSLAG DOOR DE POMP (KRANENDONK 2007)



4.6 ONTWERP VAN BE/ONTLUCHTINGSVOORZIENINGEN

Het leidingsysteem dient bij ingebruikname geheel ontlucht te zijn. Dit is realiseerbaar door voldoende snel en lang te stromen of door het leidingwerk langzaam te vullen.

Leidingen in het gemaal lopen meestal horizontaal of verticaal en hebben een kleinere diameter dan de persleiding (en dus hogere stroomsnelheden). Deze eigenschappen zorgen ervoor dat de gasbellen in deze leidingen vaak snel afgevoerd kunnen worden (zie paragraaf 3.3 voor minimale stroomsnelheden in neergaande leidingen).

Indien luchtinname bij de pomp niet voorkomen kan worden en het leidingtracé in combinatie met de ontwerpsnelheden een risico vormt voor luchtophopingen dient

overwogen te worden om een goede ontluuchtingsvoorziening op te nemen. Doorstroomde windketels (zie paragraaf A.7.5 in bijlage A, Theoretische achtergrond) kunnen hierbij een dubbelrol spelen als waterslagvoorziening en ontluuchtingsvoorziening.

Een ontluuchtingsvoorziening op de pompinstallatie is in de bedrijfssituatie niet noodzakelijk, indien het systeem correct ontworpen is. In een goed ontworpen systeem kan er geen problematische hoeveelheid lucht in de pomp of leiding terechtkomen. In de praktijk wordt als ontluuchtingsleiding vaak een enkele balkeerklep met drijvende bal toegepast. Dit impliceert vanzelf een beluchtingsleiding zodra (na pomputval tijdelijk) onderdruk optreedt. De ontwerper is zich hiervan wellicht niet bewust maar neemt deze voorziening op omdat dat ooit in een standaard ontwerp is opgenomen.

Voor het onderhoud aan de pompinstallatie is een handmatige ontluuchtingsvoorziening echter wel noodzakelijk, omdat het systeem opnieuw gevuld dient te worden nadat de onderhoudswerkzaamheden voltooid zijn.

Een beluchtingsvoorziening is niet alleen onnodig, het is zelfs onwenselijk. Gasbellen kunnen voor veel problemen zorgen als deze in de persleiding komen (zie paragraaf 3.2.1 en 3.3)

In het verleden werd een beluchtingsvoorziening gebruikt om een terugspoelende werking te krijgen, zodat het resterende vuil uit de pomp gespoeld wordt. Met moderne pompen is dit niet nodig, zelfs niet bij toerengeregelde pompen (mits het door de pompfabrikant opgegeven minimum toerental gehaald wordt).

5

DYNAMISCHE EFFECTEN

Het leiding- en gemaalontwerp dient getoetst te worden aan de maximaal optredende drukken die in het systeem op kunnen treden tijdens niet-stationaire situaties. Hierbij onderscheiden we noodscenario's, reguliere en incidentele bedrijfsomstandigheden.

Bij manipulaties met pompen en afsluiters maar ook door het gedrag van terugslagkleppen en ontluichters kunnen hogere overdrukken optreden dan tijdens stationair bedrijf. Ook is het mogelijk dat er of dermate lage onderdrukken optreden dat er sprake is van cavitatie.

De waterslaganalyse wordt tegenwoordig altijd met behulp van een computerprogramma uitgevoerd. De Joukowsky vuistregel geeft een indicatie voor de primair optredende drukstoot maar is in de praktijk voor een afvalwaterpersleiding te beperkt.

Door waterslageffecten kan de druk in het leidingsysteem tijdelijk boven de toelaatbare maximum of minimum druk komen. Door een optredende onderdruk golf kan de druk tijdelijk zo laag worden dat de dampspanning bereikt wordt. Dit betekent dat de vloeistof lokaal overgaat van vloeistof naar gas (damp). Dit verschijnsel wordt cavitatie genoemd.

Om de extreme drukken te beperken kan het noodzakelijk blijken waterslagvoorzieningen in het systeem op te nemen. Het uitvoeren van een dergelijke studie wordt een waterslaganalyse genoemd. Een beter woord zou zijn "dynamische systeemanalyse" omdat een dergelijke analyse meer informatie oplevert dan alleen waterslag gerelateerde zaken.

Een essentieel onderdeel bij deze studie is een simulatiemodel. Met behulp van dit model worden vervolgens reguliere en incidentele bedrijfsomstandigheden nagebootst. Met de resultaten hiervan kan het ontwerp van het transportsysteem worden bijgesteld.

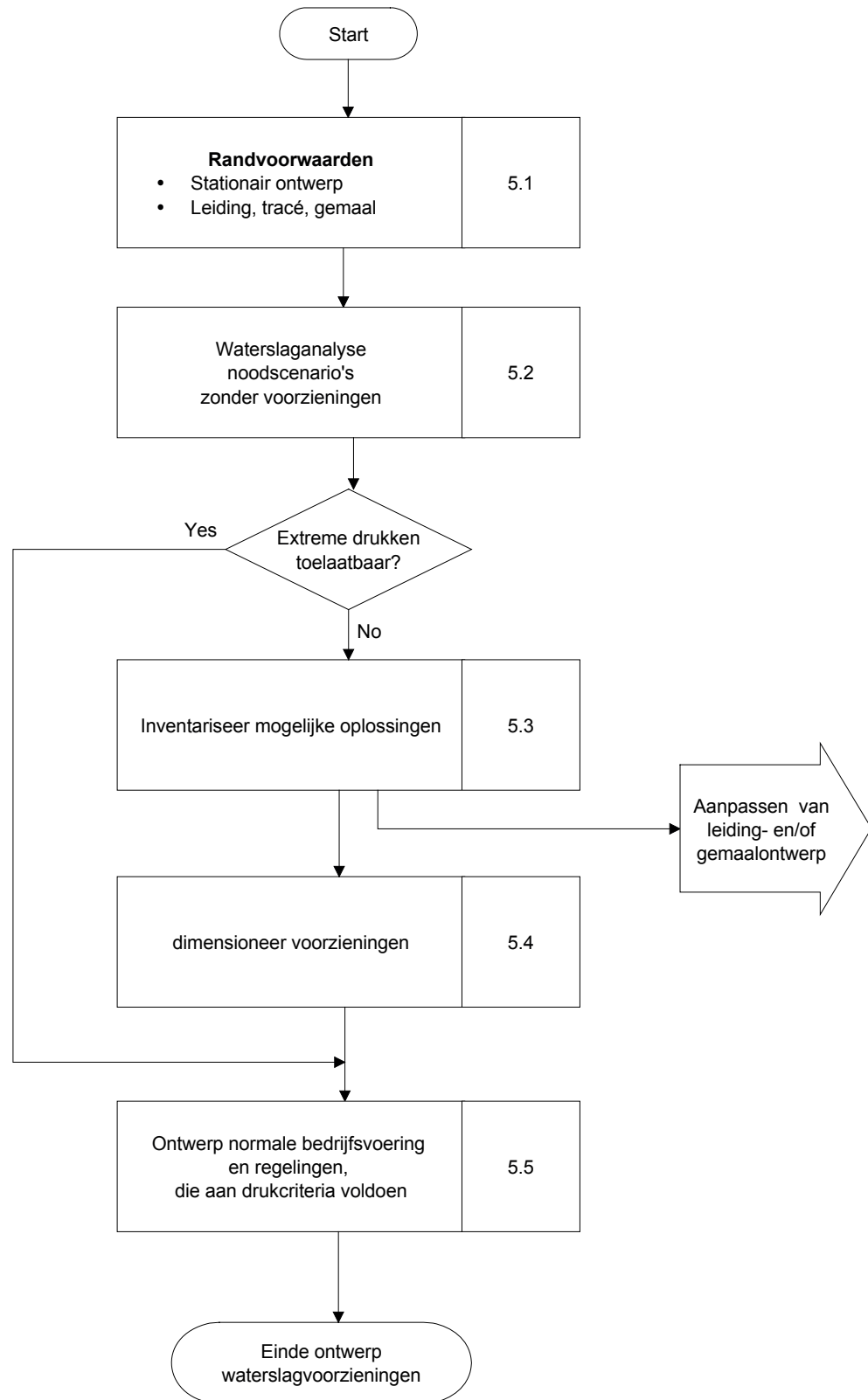
De grote meerwaarde van het uitvoeren van een dynamische analyse is dat indirect een integrale toetsing wordt gedaan van het ontwerp. Alle aspecten met betrekking tot gemaal en persleiding, maar ook (extreme) aanvoerpatronen en uitstroomcondities zijn opgenomen in het model.

Na analyse van de resultaten kan het mogelijk zijn dat het ontwerp of bepaalde onderdelen moet worden aangepast. De ontwerper stroomt met digitaal water door het nog te realiseren transportsysteem. De belangrijkste theoretische achtergronden voor dit hoofdstuk zijn uitgewerkt in appendix A.7, *Waterslag in Leidingsystemen*.

In dit hoofdstuk zullen ontwerpaspecten besproken worden die te maken hebben met het dynamisch gedrag van het afvalwater in de leiding: te weten waterslagvoorzieningen en regelingen. Het ontwerpproces voor de dynamische effecten is in een stroomschema samengevat (Figuur 5.1).

Benadrukt wordt dat bij capaciteitsuitbreiding of andere essentiële wijzigingen van het systeem de waterslaganalyse opnieuw moet worden uitgevoerd. Door een verhoging van de snelheid en mogelijke andere pompeigenschappen kan het dynamische gedrag van het systeem aanzienlijk veranderen.

FIGUUR 5.1 STROOMSCHEMA VOOR HET ONTWERP VAN WATERSLAGVOORZIENINGEN EN REGULINGEN



5.1 UITGANGSPUNTEN

De belangrijkste parameters voor de grootte van de dynamische drukken bij een manipulatie zijn:

- snelheidsverandering
- voortplantingssnelheid
- looptijd
- Joukowsky drukstoot
- hoogteligging

Deze parameters volgen direct uit het gemaal- en leidingontwerp. Het maximale debiet en de diameter van de leiding zijn bepalend voor de maximale snelheid. De maximale snelheidsverandering wordt bepaald door de manipulatie en eigenschap van de pomp of afsluiter. Bij pomputval is de toerentalafname van belang. Deze wordt bepaald door het polair massa-traagheidsmoment van pomp en motor. Bij het sluiten van een afsluiter is de sluittijd en de klepstand-afhankelijke weerstandskarakteristiek (klepkarakteristiek) van belang.

De lengte en het materiaal van de persleiding zijn maatgevend voor de voortplantingssnelheid, de looptijd en de Joukowsky drukstoot.

Een drukgolf reflecteert deels op een verandering van oppervlak en een verandering van voortplantingssnelheid. Diameterovergangen, aansluitingen van andere persleidingen (inprikkers) en gebruik van diverse leidingmaterialen moeten dus bekend zijn. Ook de vloeistofeigenschappen zijn bepalend voor de grootte van de voortplantingssnelheid. Hier speelt met name de hoeveelheid vrij gas in de vloeistof een grote rol. Vrij gas heeft een reducerende werking op de voortplantingssnelheid en daarmee op de optredende dynamische drukken. Aangezien de hoeveelheid vrij gas geen constante parameter is, wordt voor de waterslagstudie conservatieve uitgangspunten (gasvrije vloeistof) gebruikt. Hiernaast speelt de hoogteligging van de leiding een rol. De hoogste en laagste punten in het leidingtracé zijn veelal maatgevend voor de maximale en minimale drukken in het systeem.

5.1.1 TOELAATBARE MAXIMALE EN MINIMALE DRUKKEN

De toelaatbare over- en onderdruk volgen uit de gekozen drukklasse, de overige belastingfactoren (gronddruk, etc.) en specificaties van de fabrikant. Bij dunwandige kunststofbuizen is er gevaar voor plooiën (imploderen) bij grote onderdrukken. Let op dat de buisverbindingen geen afwijkende drukklasse hebben.

In normen voor leidingen geldt over het algemeen voor normale bedrijfsomstandigheden een maximale toelaatbare druk gelijk aan de drukklasse van de leiding. Tijdens noodsituaties mag de incidentele druk tijdelijk groter zijn dan de nominale druk. Tabel 5.1 geeft een overzicht van maximaal toelaatbare incidentele drukken in verschillende internationale normen.

TABEL 5.1 OVERZICHT VAN MAXIMAAL TOELAATBARE INCIDENTELE DRUKKEN (MAXIMUM ALLOWABLE INCIDENTAL PRESSURE, MAIP) IN INTERNATIONALE NORMEN

Code	Maximum incidental pressure factor [-]
DVGW W303:1994 (German guideline)	1.00
ASME B31.4 (1992), IS 328, BS 8010, ISO CD 16708:2000	1.10
NEN 3650-1:2003	1.15
BS 806	1.20
ANSI/AWWA C950-07, AWWA M45	1.40
Italian ministerial publication	1.25 - 1.50

Minimaal toelaatbare drukken worden nauwelijks besproken in bestaande normen. Indien de leidingsterkte vol vacuum toelaat, wordt tegenwoordig -1 barg als toelaatbare onderdruk gehanteerd, mits de implosie van de caviteit, waarbij een “scherpe” drukstoot ontstaat, toelaatbaar is. De toelaatbare cavitatie-implosie is gelijk aan de helft van de drukklasse. De redenering hierachter is als volgt: de modellering van cavitatie en berekening van implosiedrukken is bij gebruik van gevalideerde software voldoende betrouwbaar. Na de implosie blijft de implosiedruk gedurende ongeveer de looptijd aanwezig. In de sterkteleer wordt deze situatie aangeduid als een sprongbelasting. In de vereenvoudigde constructieve dynamica berekening kan de leiding met supports als een 1-massa-veersysteem beschouwd worden. De verhouding van de dynamische respons (t.w. spanning in buiswand) van het systeem met de statische respons wordt de dynamische belastingsfactor genoemd (Engels: Dynamic Load Factor, DLF). In het geval van een sprongbelasting op een 1-massa-veersysteem is de DLF gelijk aan 2. Daarom beveelt Deltares aan om een toelaatbare implosiedruk van 50% van de statische drukklasse te hanteren. Van deze aanbeveling kan afgeweken worden, indien een meer complete constructieve dynamische modellering wordt uitgevoerd, inclusief specifieke oplegcondities (grond, niet-lineaire supports), hogere eigenfrequenties en Fluid-Structure-Interaction (FSI).

In het verleden werd vaak een veilige onderdruk grens van -0,7 barg gehanteerd. Dit had verscheidene oorzaken. De pompen waren destijds niet uitgerust met een toerenregeling of soft-stop voorziening. Bij elke pompafslag trad dan een maximale onderdruk op. Men wilde ruim boven de cavitatiegrens van -1 barg blijven omdat de toenmalige rekenprogrammatuur geen gevalideerd cavitatiemodel bevatte. Tevens wilde men voorkomen dat bij een grote onderdruk ontgassing optrad. Om het systeem dus goed gedefinieerd te houden werd deze onderdruk grens gehanteerd.

Een andere randvoorwaarde voor de bestudering van dynamische effecten is dat men moet beschikken over een hydraulisch model. De volgende paragraaf vat de meerwaarde van een hydraulisch model samen.

5.1.2 HYDRAULISCH MODEL

Voor de bestudering van dynamische aspecten in het afvalwatertransportsysteem moet men beschikken over een daartoe geschikt softwareprogramma. In dit programma wordt het complete leidingsysteem ingevoerd. Dit houdt in dat met een bepaalde schematisatie techniek wordt aangegeven hoe alle leidingen, pompen, kleppen en overige componenten op elkaar zijn aangesloten. Vervolgens worden alle relevante eigenschappen van deze componenten ingevoerd waarna de berekening kan starten. Het ingevoerde leidingsysteem noemen we het hydraulische model.

Dit model kan ook heel goed gebruikt worden voor de ontwerpstappen die hiervoor zijn uitgevoerd. Het programma rekent dan de debieten en drukken uit op basis van opgelegde begincriteria. Het grote voordeel van het gebruik van een hydraulisch model in een vroeg ontwerp stadium is dat het model meegroeit met het ontwerpproces. Aan het einde van het ontwerpproces beschikt de ontwerper over een rekenmodel waarmee met weinig extra inspanning het systeemgedrag in de tijd kan worden bepaald.

Het nut, of beter gezegd noodzaak, van een hydraulisch model gaat zwaarder wegen naarmate het afvalwatertransportsysteem complexer wordt.

Indien cavitatie een rol speelt is het van belang dat de het rekenmodel de binnen-bovenkant (bbk) van de transportleiding hanteert als referentiehoogte. De dampspanning wordt immers als eerste bij bbk bereikt.

Het hydraulische model kan ook nog voorzien worden van alle meet- en regelobjecten waardoor ook het regelgedrag van het systeem beoordeeld kan worden.

Tenslotte is het hydraulische model een nuttig instrumentarium om in de beheerfase de toestand van het systeem te beoordelen. Hiertoe wordt bij oplevering van het systeem het model bij voorkeur gekalibreerd aan de as-built toestand. Tijdens de beheerfase moet nieuwe informatie toegevoegd worden aan het model. Het vergelijken van actuele meetdata met een gevalideerd hydraulisch model geeft de beheerder een betrouwbaar middel voor het uitvoeren van probleemanalyses.

5.2 WATERSLAGANALYSE ZONDER VOORZIENING

Een waterslaganalyse bestaat in het algemeen uit het uitvoeren van een aantal simulaties van noodscenario's en reguliere en incidentele omstandigheden, die kunnen leiden tot extreme drukken. Voor afvalwaterpersleidingen zijn de volgende noodscenario's gebruikelijk:

1. Totale pompuitval ten gevolge van stroomstoring
2. Blokkade van een pomp of enkele pompuitval
3. Onbedoelde sluiting van een afsluiter (indien aanwezig)

Pompuitval geeft primair de grootste onderdrukken in de transportleiding. Mocht deze onderdruk zo laag worden dat er cavitatie optreedt dan kan door het imploderen van deze caviteit een overdruk golf ontstaan die groter kan worden dan de stationaire druk.

Door pompuitval zal de terugslagklep op een zeker moment sluiten. Dit sluitgedrag wordt bepaald door de snelheid waarmee het debiet ter plaatse van de terugslagklep afneemt (de vertraging). Bij een grote vertraging is het mogelijk dat de terugslagklep nog niet gesloten is om het moment dat de stromingsrichting omdraait waardoor de terugslagklep geforceerd in retourstroming sluit. Dit sluitgedrag is wederom een waterslagverschijnsel dat lokaal gepaard kan gaan met grotere onder- en overdrukken dan die optreden in de transportleiding. Bij de waterslaganalyse dient dan ook het scenario vastgesteld te worden waarbij de grootste vertraging ter plaatse van een terugslagklep optreedt. Bij een gemaal, waarbij twee of meer pompen in bedrijf zijn, is dat uitval van één pomp. Voor meer informatie omtrent het dynamisch gedrag van terugslagkleppen, zie appendix A.6.3

Het snel sluiten van afsluiters kan aanleiding geven tot ontoelaatbare overdrukken. In een afvalwatertransportsysteem komen zelden regelkleppen voor die onderdeel zijn van het bedrijfsvoeringsproces. Voor open/dicht afsluiters geldt dat deze in principe alleen bij 'pomp-uit-bedrijf' situatie bediend mogen worden. Indien er situaties zijn dat er wel degelijk met een afsluiter gemanipuleerd kan worden onder stromingscondities dienen de gevolgen hiervan in kaart te worden gebracht.

De invoerparameters die gebruikt worden in de simulatie dienen zodanig gekozen te worden dat de extreme waarden bereikt worden. Dit wordt conservatieve modellering genoemd. Gebruikelijk is om met schoonwater parameters te rekenen. Hoewel afvalwater verre van schoon is geeft dit namelijk het meest conservatieve resultaat. Vrij gas (in de vorm van gasbellen) in afvalwater reduceert de voortplantingssnelheid en daarmee de grootte van de drukstoot.

Bij de beoordeling van de resultaten en de noodzaak tot een waterslagvoorziening dient de kans op de gebeurtenis en de eventuele gevolgen (dus risico) in overweging te worden genomen.

Een waterslaganalyse geeft naast de optredende drukken ook inzicht in het dynamisch functioneren van het gehele leidingsysteem. Twee voorbeelden worden met name genoemd.

1. Na pompuitval kan er soms nog geruime tijd nalevering plaatsvinden omdat de terugslagklep niet direct sluit. Door deze nalevering zal het niveau in de zuigkelder nog verder dalen en bestaat er kans op luchtaanzuiging.
2. Bij persleidingsystemen met inprikleidingen kan een onderdruk golf geïnitieerd door het ene gemaal een hevelwerking veroorzaken bij een ander niet in bedrijf zijnd gemaal waardoor ook hier weer kans is op het leegtrekken van een zuigkelder.

Het simulatiemodel is een vereenvoudiging van de praktijk. Er zijn altijd fysische processen die niet of vereenvoudigd in rekening worden gebracht. De keuze van conservatieve modelparameters kan per scenario verschillen. Het verdient aanbeveling om de invloed van onzekere modelparameters (bijvoorbeeld wandruwheid) op de berekeningsresultaten te analyseren.

In veel gevallen leiden de noodscenario's zonder voorzieningen tot ontoelaatbare dynamische drukken. In deze gevallen dienen de mogelijke oplossingen geïnventariseerd te worden. De oplossingen kunnen bestaan uit systeemaanpassingen – grotere diameter bijvoorbeeld –, waterslagvoorzieningen, noodregelingen of een combinatie van deze drie oplossingsrichtingen.

5.3 INVENTARISATIE OPLOSSINGEN TER VOORKOMING VAN ONTOELAATBARE DRUKKEN

Indien ontoelaatbare drukken optreden, heeft de ontwerper keuze uit vier oplossingsrichtingen om de gevolgen van waterslag te beperken:

1. Pas de diameter, het leidingtracé of -profiel aan.
2. Pas de voortplantingssnelheid aan
3. Pas de snelheidsverandering aan
4. Pas een waterslagvoorziening toe die de gevolgen beperkt

Optie 1 en 2 zijn meestal alleen mogelijk indien een vroeg traject een verkennende waterslagstudie is uitgevoerd en er nog speelruimte is in het leidingontwerptraject.

Optie 3 en 4 beïnvloeden het gemaalontwerp.

Ad 1)

Hoge punten in het leidingtracé zijn in het algemeen bepalend voor de locatie waar na pompuitval de laagste drukken optreden. Indien op deze locatie ontoelaatbare drukken optreden en het ontwerp nog vrijheid biedt om de ligging van de leiding te wijzigen kan gekeken worden naar alternatieve tracé's. Een andere mogelijkheid is om de leiding lokaal verdiept aan te leggen. Een kostentechnische afweging met overige in aanmerking komende maatregelen moet uitwijzen of dit een haalbare optie is.

Ad 2)

Om de voortplantingssnelheid en daarmee de dynamische drukgolf te verlagen moet een elastischer leidingmateriaal toegepast worden. Indien de ontwerper hierin nog ontwerprijheid heeft dient dit alternatief onderzocht te worden.

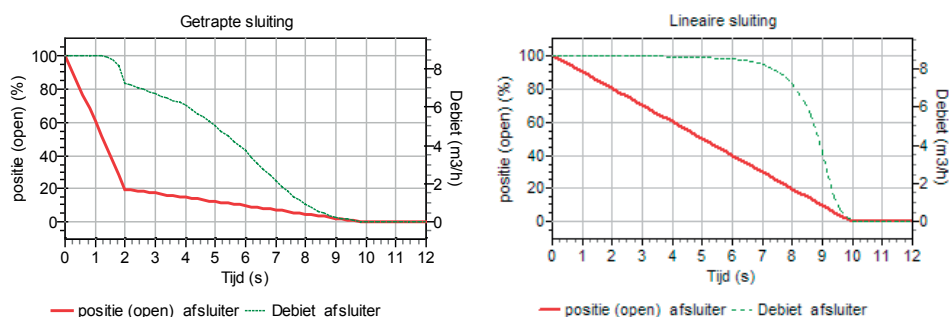
Ad 3)

Door de snelheidsverandering te vertragen worden de dynamische drukken verlaagd. Bij pompafschakeling kan een toerentalregeling of softstarters een oplossingsrichting zijn. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat deze elektrotechnische voorzieningen in geval van stroomstoring geen effect meer hebben.

Bij pompuitval wordt de stijtheid van de onderdruk golf bepaald door de grootte van het polairmassatraagheidsmoment (I_p) van de motor, pompas en -waaier. Door een andere keuze van pomp/motor kan dit polairmassatraagheidsmoment wellicht vergroot worden. Het toepassen van een vliegwiel is bij frequent startende en stoppende pompen geen reële optie.

In het geval de ontoelaatbare druk veroorzaakt wordt door een afsluitermanipulatie moet de sluittijd vergroot worden. Een andere mogelijkheid is om het sluittraject niet lineair te laten verlopen. De debietafname bij het constante sluitingstijd van een afsluiter verloopt namelijk niet lineair. Door het eerste traject sneller en het tweede traject langzamer te sluiten kan de maximale druk beperkt worden. Een andere oplossing is door gebruik te maken van een stappenmotor waardoor tussen 2 klepstanden enige wachttijd ontstaat.

Bij een afsluiter speelt ook de effectieve sluittijd een rol. Afhankelijk van de klepkarakteristiek zal het debiet in het begin van het sluitingstraject nauwelijks beïnvloed worden. Bij vlinderkleppen is bijvoorbeeld de laatste 30% pas sprake van een debietverandering.



FIGUUR 5.2 EFFECT SLUITGEDRAG AFSLUITER OP AFNAME DEBIET

Bij het ontluchten van een (deels) lege leiding moet men er voor waken dat de vulsnelheid te hoog wordt. Een karakteristiek voorbeeld waarbij de kans op te snel ontluchten reëel aanwezig is, is het uitdrijven van lucht met behulp van de opgestelde pomp op een te hoog toerental. Zodra de gasbel uitgedreven is, botst de in beweging gezette waterkolom water op een (nagenoeg) stilstaande waterkolom.

Het vullen van een systeem vereist dus een protocol waar van te voren over nagedacht is.

Ad 4)

Mochten bovengenoemde maatregelen niet mogelijk zijn, dan zal een waterslagvoorziening er voor moeten zorgen dat de gevolgen van de verstoring beperkt worden. Met behulp van waterslagsimulatieprogramma wordt eerst geïnventariseerd welke type voorziening in aanmerking komt. Vervolgens wordt de waterslagvoorziening nader gedimensioneerd. Het principe hierbij is dat de voorziening voldoende lang water na moet leveren om de ontoelaatbare druk te voorkomen.

5.4 DIMENSIONEER WATERSLAGVOORZIENINGEN

De volgende voorzieningen kunnen overwogen worden:

1. Windketel, meestal gecombineerd met een snelsluitende of gedempte terugslagklep
2. By-pass leiding
3. Be-ontluchter
4. Buffertoren

In appendix A.7 worden de aandachtspunten per voorziening verder uitgewerkt. Buffertorens worden zelden meer toegepast vanwege hun hoogte en stankproblematiek maar aangezien ze nog wel in gebruik zijn wordt deze voorziening volledigheidshalve wel genoemd in de appendix .

Bij de dimensionering van windketels kan gebruik gemaakt worden van de vuistregel voor het bepalen van het benodigde windketelvolumen. Voor afvalwaterpersleidingen in vlakke gebieden geeft formule een indicatie van het benodigde windketelvolumen.

$$V = c \cdot QL \quad (5.1)$$

waarin:

V	=	Benodigd windketelvolumen	[m ³]
c	=	constante, 0.01 à 0.02	[s/m]
Q	=	Maximaal debiet	[m ³ /s]
L	=	Lengte van afvalwaterpersleiding	[m]

Een windketel (en buffertoren) beïnvloedt de vertraging van de stroming ter plaatse van de terugslagklep in hoge mate. Om vast te stellen welk type terugslagklep nodig is, i.v.m. sluiting in retourstroming, is een detailmodel nodig van het leidingwerk tussen de zuigkelder en de windketels of buffertoren. Ten gevolge van reflecties of het sluiten van terugslagkleppen in retourstroming kan makkelijk cavitatie in de zuigleidingen of het pompstation optreden.

Tegenwoordig worden veel rioolgemalen uitgevoerd met frequentieomvormers waarmee het toerentalvariëties van de pomp door een regeling bepaald wordt. De regeling zorgt ervoor dat bij het afschakelen van een pomp het toerental langzaam naar nul daalt. Een andere elektrotechnische uitvoering is het gebruik van een softstarter in plaats van de ster-driehoek schakeling. Een softstarter is primair bedoeld om de aanloopstroom af te vlakken. De softstarter kan ook als "softstopper" toegepast worden.. Hiermee is de toerentaltoename en afname in de tijd in te stellen. Beide elektrotechnische voorzieningen zijn in feite waterslagvoorzieningen omdat de snelheidsvariëties en daarmee drukfluctuaties veel kleiner zijn vergeleken met aan/uit pompen waarbij de motor direct wordt uitgeschakeld.

5.5 REGULIERE EN INCIDENTELE BEDRIJFSVOERING

De volgende scenario's worden tot de normale bedrijfsvoering gerekend (zie hiervoor ook appendix C.2.2. van NEN 3650-1:2003):

1. pompstart met gevuld systeem
2. gecontroleerde pompstop
3. Afnametests; deze kunnen soms extremer zijn dan een noodscenario.
4. Vulprocedure of een pompstart in een deels gevuld systeem
5. Procedure om (een deel van) het leidingsysteem leeg te zetten ten behoeve van onderhoudswerkzaamheden
6. Gecontroleerde klepsluitingen
7. Systeem met meerdere gemalen: Stop van (vasttoerental) gemaal A en start van gemaal B
8. Andere manipulaties die tot vertraging of versnelling van de stroming leiden.
9. Schakelprocedures
10. Beïnvloeding van snelle regelingen (speelt alleen bij systemen waar geen open berging aanwezig, zoals boostersystemen)

De normale procedures mogen niet leiden tot het in werking treden van noodregelingen, anders moeten de noodregelingen aangepast worden. Tenslotte kan het nodig zijn om aandacht te besteden aan speciale omstandigheden, zoals:

1. Afwijkend gebruik van de persleiding
2. Pompstart met lucht- of gasinsluitingen; kan aanleiding geven tot extreme piekdrukken.
3. Foutieve schakelprocedures.

Het simuleren van reguliere bedrijfsvoeringsituaties geeft inzicht in het gedrag van het systeem. Afhankelijk van de complexiteit van het systeem kunnen meerdere simulaties nodig zijn. Drie voor de hand liggende situaties zijn:

- systeemwerking onder DWA
- systeemwerking onder RWA
- systeemtoestand zonder pompen in bedrijf (m.n. voor controle onderdrukken)

Bij de DWA situatie wordt primair gekeken naar het in- en uitbedrijf gaan van de pomp(en). Van belang hierbij is natuurlijk dat het model de realistische pompregeling ondersteunt.

Aspecten die geanalyseerd moeten worden, zijn:

- Hoe snel komt het debiet op gang
- Wat zijn de minimale en maximale optredende drukken
- Schakelcyclus van pompen
- Zorgen de ingestelde regelparameters voor een correct gedrag
- Niveaus in kelders, bassins, etc. (belangrijk bij nalevering door pompen)

Bij RWA situatie wordt de situatie nagebootst waarbij de aanvoer in de tijd, zo snel als de ontwerper nog realistisch acht, toeneemt van nul-aanvoer naar RWA. Aspecten die geanalyseerd moeten worden, zijn

- kan pompregeling de aanvoertoe name goed bijhouden
- Wat zijn de minimale en maximale optredende drukken
- Maximale niveaus in kelders, bassins e.d.

Indien in het afvalwatertransportsysteem gebruik gemaakt wordt van automatisch bediende afsluiters is dit ook een te analyseren situatie. Met name als de afsluiter de functie heeft overgenomen van de terugslagklep is dit noodzakelijk.

Door het uitvoeren van reguliere bedrijfsvoeringssituaties krijgt men voortijdig inzicht in het dynamische gedrag van het systeem. Deze informatie kan bij de inbedrijfstelling van nut zijn. Door bijvoorbeeld het gesimuleerde verloop van debiet en druk in het gemaal te vergelijken met de werkelijkheid kan men beoordelen of het systeem goed ontlucht is.

Bij persleidingsystemen met inprikgemalen dient men vooral ook naar de andere gemalen te kijken vanwege de wederzijdse beïnvloeding. Door reflecterende drukgolven kan een ander niet-draaiend gemaal zoveel na gaan leveren waardoor hier luchtintrede mogelijk is.

Bij gemalen die niet uitgevoerd zijn met een frequentieomvormer of softstarter treden de grootste dynamische drukken ook op bij reguliere bedrijfsvoering. Voor dergelijke gemalen is de inhoud van paragraaf 5.2 des te meer belangrijker omdat het waterslagverschijnsel zich dan bij elke pompafschakeling manifesteert.

De ontwerper van complexe persstelsels moet vaak advocaat van de duivel spelen om de scenario's te definiëren die nog een redelijke kans van voorkomen hebben en tot maatgevende extreme drukken kunnen leiden.

6

ONTWERPASPECTEN

CAPACITEITSHANDHAVING

In het ontwerptraject moet aandacht besteedt worden aan voorzieningen die nodig zijn om te beoordelen of het systeem de vereiste capaciteit haalt waarvoor het ontworpen is. Enerzijds zijn deze voorzieningen nodig bij de oplevering en acceptatie van het systeem, anderzijds gedurende de gebruiksfase om periodiek vast te stellen wat de capaciteit is van het systeem. Tevens moeten er voorzieningen zijn om bij vermindering van capaciteit deze weer op het oude niveau terug te brengen. Om de capaciteit van het systeem te kenmerken wordt het begrip prestatie-indicator geïntroduceerd (PI). Om deze PI te bepalen en te bewaken zijn meetwaarden nodig. Als laatste worden de voorzieningen genoemd waarmee ontstane extra energieverliezen in de persleiding verminderd kunnen worden.

6.1 PRESTATIE-INDICATOREN

Een afvalwaterpersleidingsysteem wordt ontworpen om een bepaald debiet te transporteren met een bepaalde energie. In de loop van de tijd kan de werking van het systeem hiervan gaan afwijken. In een ideale situatie weet de beheerder deze afwijking tijdig op te merken en maatregelen te nemen. Echter de praktijk is anders. Het goed functioneren wordt veelal afgemeten aan de capaciteit of nog eenvoudiger “ik houd mijn put wel droog”.

Gemalen uitgerust met een debietregeling zullen dit debiet altijd kunnen halen zolang het maximale pomptoerental niet overschreden wordt. Dat dit gepaard gaat met extra vermogen wordt genegeerd. Kortom: simpel kijken naar debiet of putstand is niet voldoende.

Vandaar de introductie van de algemenere benaming “prestatienorm” of “prestatie indicator” (PI). Om handhaving van deze prestatie-indicator te toetsen moet allereerst bekend zijn wat het systeem behoort te doen.

De Prestatie Indicator (PI) is een verhouding van twee kentallen $K_{\text{referentie}}$ en K_{actueel} . Het kental is gebaseerd op in de tijd verzamelde meetdata, waarmee de prestatie van een specifiek persleidingsysteem weergegeven wordt. Elke kental heeft een referentiewaarde, bepaald in het ontwerp of bij ingebruikstelling en een actuele waarde. De prestatie indicator is een verhouding tussen de actuele waarde en de referentiewaarde. De verhouding wordt zodanig berekend dat verminderd functioneren tot een $PI < 100\%$ leidt. Een kental moet in de tijd gemiddeld kunnen worden. Alleen op deze manier kunnen verschillende systemen met dezelfde kentalverhouding (PI) onderling vergeleken worden. De gekozen PI's kunnen altijd over verschillende systemen heen (gewogen) gemiddeld worden, zodat een PI per regio/gemeente/waterschap/beheerder verkregen wordt¹.

Elk systeem kan één of meerdere kentallen hebben om de doelen te karakteriseren.

¹ Indien binnen een waterschap overeenstemming bestaat over de referentiewaarden, dan kunnen afdelingen/regiobeheerders beloond worden voor verbetering van een PI ter stimulering van de betrokkenheid bij het functioneren van de transportsystemen.

Voorbeelden van kentallen zijn:

- draaiuren per periode (dag, week, maand, jaar)
- draaiuren per m³ per periode
- benodigd toerental voor ontwerpdebiet (voor toerengerelde gemalen)
- specifiek energieverbruik (kWh/m³, gemiddeld over een dag/week/maand/jaar),
- transportcapaciteit,
- Pomprenement
- Weerstandsfactor van transportleiding of systeemkarakteristiek
- Equivalente wandruwheid
- Pompkarakteristiek (i.e. werkpunt t.b.v. herkenning van slijtage van waaier)

Bij nieuwe systemen is de referentiewaarde $K_{\text{referentie}}$ eenvoudig vast te stellen tijdens de acceptatietest. Deze zou normaliter overeen moeten komen met de ontwerpcondities. Van bestaande systemen dient zonodig een nieuwe nul-meting uitgevoerd te worden. Van belang is dat de toestand van het systeem eenduidig is vastgelegd.

Tevens dienen de ontwerpuitgangspunten bijgesteld te worden aan deze nul-meting zodat in bij nieuwe projecten de ontwerper uit kan gaan van realistische ontwerpuitgangspunten. Concreet betekent dit dat de systeemkarakteristiek onder bekende condities van een normaal functionerend systeem bekend moeten zijn. Samen met de gegevens van de geïnstalleerde pomp is met behulp van registraties na te gaan of het systeem in de tijd gaat afwijken van zijn uitgangs-referentiewaarde. Deze toestandsbewaking leent zich prima om op te nemen in een monitoringssysteem waarbij de beheerder alleen geïnformeerd wordt indien de afwijking te groot wordt. Maar ook periodieke handmatige verwerking en beoordeling is bruikbaar.

De $K_{\text{referentie}}$ is een eigenschap van één bepaald leidingsysteem en kan niet zonder meer vergeleken worden met andere leidingsystemen. De PI is echter een dimensieloze (procentuele) waarde van de actuele kentalwaarde en de referentiewaarde. Zodra deze afwijkt van 100% betekent dit dat er iets aan het systeem veranderd is. Het onderling vergelijken van PI's met een ander systeem is hierdoor mogelijk.

De oorzaak van het capaciteitsverlies kan in de pompinstallatie zitten of in de persleiding of in beide. De hierna beschreven kentallen identificeren het gehele systeem en geven niet direct aan waar de oorzaak van het verlies zit. Hiervoor dient nog andere meetdata (afhankelijk van methode) betrokken te worden zoals pomptoerental of persdruk.

De gebruiker moet zich bewust zijn van de beperkingen van het gebruikte kental. Niet alle kentallen kunnen voor elk doeleinde gebruikt worden. Hieronder volgen enkele uitwerkingen van toe te passen kentallen en PI's. Momenteel wordt een uitgebreider document opgesteld in samenwerking met Stowa ten behoeve van de praktische implementatie van prestatie-indicatoren in SCADA systemen.

6.1.1 DRAAIUREN

Voor kleine gemalen (zonder toerengerelde pompen) kunnen de draaiuren van de pomp per periode (bijv. maand) gebruikt worden als eenvoudige te bepalen kental.

Het voordeel van dit kental is dat de draaiuren van de pomp over het algemeen bijgehouden worden voor onderhoudsdoeleinden. Verdere instrumentatie is daarom niet nodig (in de praktijk is andere instrumentatie vaak niet aanwezig). In het ontwerptraject kan op basis van de te verwachten aanvoer en de geïnstalleerde pompcapaciteit een schatting van het aantal draaiuren bepaald worden. Dit type kental is geschikt voor eenvoudige drukrioleringsystemen

maar niet geschikt voor gemalen aangesloten op een gemengd rioolsysteem. Dan moet namelijk voor de interpretatie van het kental de neerslaghoeveelheid bekend zijn. Nadeel van de draaiuren is dat de draaiuren van de pomp geen enkele indicatie geven waar de oorzaak van het probleem ligt. De toename van het aantal draaiuren kan ook aan de aanvoerkant liggen. Deze indicator kan dus alleen gebruikt worden om vast te stellen dat er een probleem is, niet om het probleem te analyseren.

6.1.2 SPECIFIEK ENERGIEVERBRUIK

Onder het specifiek energieverbruik verstaan we de hoeveelheid energie benodigd om 1 m³ water te transporteren.

Hetzelfde kengetal is op verschillende manieren te bepalen.

$$K = \frac{E \text{ [kWh]}}{V \text{ [m}^3\text{]}} \quad (6.1)$$

Delen we beide termen door 1 uur dan krijgen we een identiek kengetal maar nu uitgedrukt in vermogen P en debiet Q:

$$K = \frac{P \text{ [kW]}}{Q \text{ [m}^3 \text{ / h]}} \quad (6.2)$$

Uitwerking van het vermogen, laat zien dat dit kengetal hoofdzakelijk door de opvoerhoogte bepaald wordt:

$$P_{elek} = \frac{P_{hydr}}{\eta_{pomp} \times \eta_{elek}} = \frac{\rho g Q \Delta H}{\eta_{pomp} \times \eta_{elek}} \quad (6.3)$$

Waarin:

P_{elek}	=	Elektrisch vermogen	[W]
P_{hydr}	=	Hydraulisch vermogen	[W]
η_{pomp}	=	Rendement van de pomp	[-]
η_{motor}	=	Rendement van de motor	[-]
ρ	=	Dichtheid	[kg/m ³]
g	=	Gravitatieversnelling	[m/s ²]
Q	=	Debiet	[m ³ /s]
ΔH	=	Opvoerhoogte pomp	[m]

Het elektrische vermogen is direct te berekenen uit het stroomverbruik en het voltage. Vaak wordt alleen het stroomverbruik van de pomp geregistreerd, omdat de spanning als constant wordt beschouwd.

$$P_{elek} = U \cdot I \quad (6.4)$$

Waarin:

U	=	Spanning	[V]
I	=	Stroom	[A]

Het energieverbruik van het rioolgemaal wordt automatisch bijgehouden door de energieleverancier waardoor vergelijking (6.4) in de praktijk eenvoudiger toe te passen is.

Echter deze registratie behelst het totale energieverbruik van het rioolgemaal, dus inclusief verlichting en koeling. Voor correct gebruik van vergelijking (6.4) zou dus een correctie toegepast moeten worden.

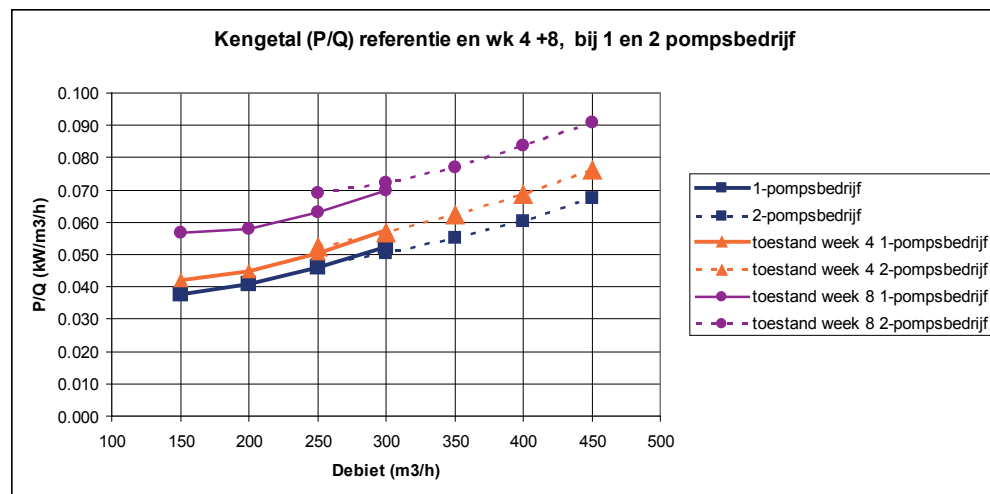
Betrekken we het kengetal uitsluitend op het hydraulisch vermogen dat blijkt uitsluitend de pompopvoerhoogte van belang te zijn voor het specifieke energieverbruik:

$$K = \frac{P_{hydr}}{Q} = \frac{\rho g Q \Delta H}{Q} = \rho g \Delta H \quad (6.5)$$

$$PI = \frac{K_{referentie}}{K_{actueel}} = \frac{\left(\frac{P}{Q}\right)_{referentie}}{\left(\frac{P}{Q}\right)_{actueel}} = \frac{\Delta H_{referentie}}{\Delta H_{actueel}} \quad (6.6)$$

Bij samengestelde persleidingstelsels kan de afleveringsdruk behoorlijk variëren door al dan niet in werking zijn van andere gemalen. Om de juiste PI waarde te kunnen bepalen, moet bij de actuele toestand de referentiewaarde bekend zijn. De actuele toestand van het systeem moet dus ook geregistreerd worden. Onderstaand grafiek geeft een voorbeeld van de actuele Q/P verhouding aan voor verschillende debieten en pompbedrijf op drie momenten in de tijd (week 0, 4 en 8).

FIGUUR 6.1 VOORBEELD VAN EEN KENTAL, GEBASEERD OP DEBIET EN VERMOGEN



Bij een veelvoorkomende toestand van het systeem kan de PI ook in de tijd uitgezet worden om snel te beoordelen of de prestatie terugloopt naar een kritische waarde waarbij ingrijpen wenselijk of noodzakelijk wordt.

Dit kengetal kan op verschillende tijdschalen geëvalueerd worden.

Korte tijdschaal (orde minuten)

Dit kengetal is niet constant, maar afhankelijk van het debiet, statische opvoerhoogte en het aantal in bedrijf zijnde pompen. Bij het bepalen van de juiste PI-waarde moet derhalve de juiste referentiewaarde gehanteerd worden die hoort bij dezelfde actuele toestand om de momentane PI te bepalen.

Lange tijdschaal (weken – maanden)

Voor de ontwikkeling van het specifieke vermogen op langere termijn moet een referentiewaarde uit historische data gebruikt worden. Met zo'n vaste referentiewaarde wordt zichtbaar of de gemiddelde opvoerhoogte in tijd verandert. Een aanpassing in de regeling (bijv. gemalen zo min mogelijk gelijktijdig laten draaien) kan dan tot uitdrukking komen in een lagere gemiddelde opvoerhoogte, waardoor de PI stijgt.

6.1.3 SYSTEEM- EN POMPCHARAKTERISTIEK

Een PI voor een enkelvoudige persleiding kan ook uitgedrukt worden als een verhouding van leidingverliezen. Het leidingverlies in de referentiesituatie ΔH_{ref} kan gemodelleerd worden met vergelijking (6.7), waarin het energieverlies wordt berekend uit het verschil tussen de persdrukhoogte in het rioolgemaal H_{pg} en het vaste of gemeten perspeil H_p .

$$\Delta H_{ref} = H_{pg} - H_p = C_1 Q^2 + C_2 Q \quad (6.7)$$

Bij elk gemeten debiet en persdruk van het rioolgemaal wordt de PI als volgt berekend:

$$PI_{\Delta H_{leiding}} = \frac{\Delta H_{ref}(Q, H_p)}{H_{pg,act} - H_p} \quad (6.8)$$

De meting van persdruk en zuigpeil kunnen tenslotte ook nog gebruikt worden om de pompopvoerhoogte te bepalen en te vergelijken met de pompkromme. De actuele pompopvoerhoogte wordt afgeleid via vergelijking

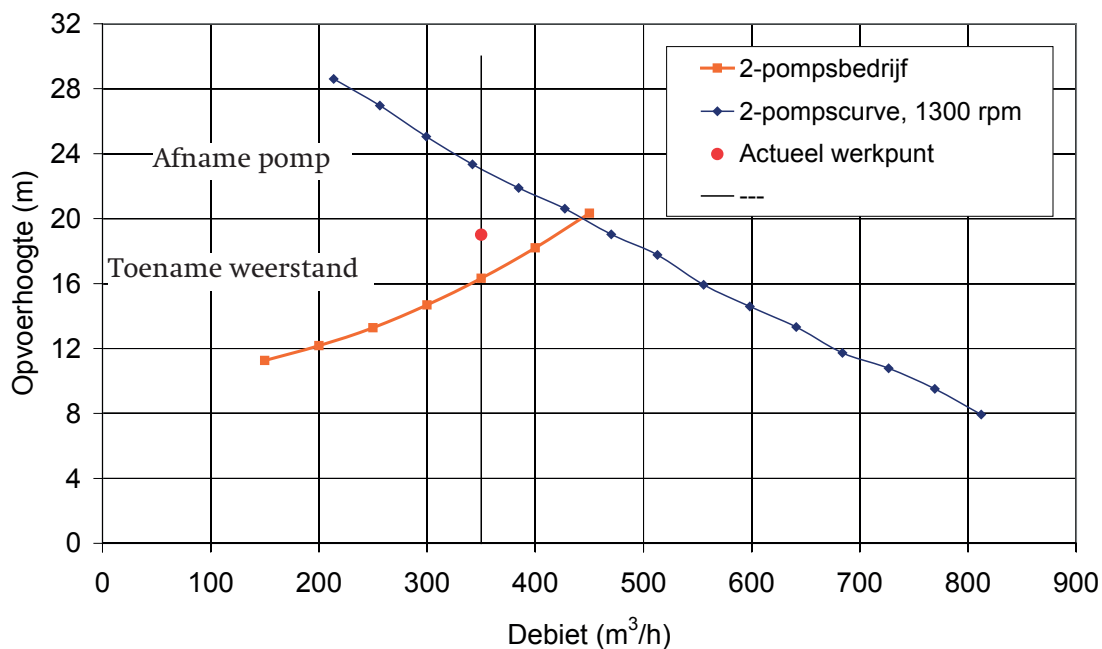
$$\Delta H_{pomp,act} = H_{pg} - H_z + C_g Q^2 \quad (6.9)$$

waarin C_g de lokale verliezen in het rioolgemaal representeert. Hiermee wordt een PI voor het rioolgemaal als volgt berekend:

$$PI_{\Delta H_{pomp}} = \frac{\Delta H_{pomp,act}}{\Delta H_{pomp,ref}(n, Q)} \quad (6.10)$$

Deze twee prestatie indicatoren kunnen grafisch weergegeven worden in een Q-H diagram. In het voorbeeld in Figuur 6.2 zou het theoretische werkpunt bij 20 m opvoerhoogte en 440 m³/h liggen. Het verschil tussen het gemeten actuele werkpunt (rode bol in Figuur 6.2) en de systeemkarakteristiek betekent dat er extra weerstand in de leiding zit. Een verschil tussen de pompcurve en de het gemeten werkpunt toont aan dat de pomp minder efficiënt draait (door bijvoorbeeld schade aan de waaier of een matige aanstroming).

FIGUUR 6.2 WERKPUNT, POMPROMME EN SYSTEEMKARAKTERISTIEK IN Q-H DIAGRAM



Een voordeel van de laatste twee prestatie-indicatoren is de directe relatie met de energie-efficiency, omdat het energieverbruik evenredig oploopt met de pompvoerhoogte.

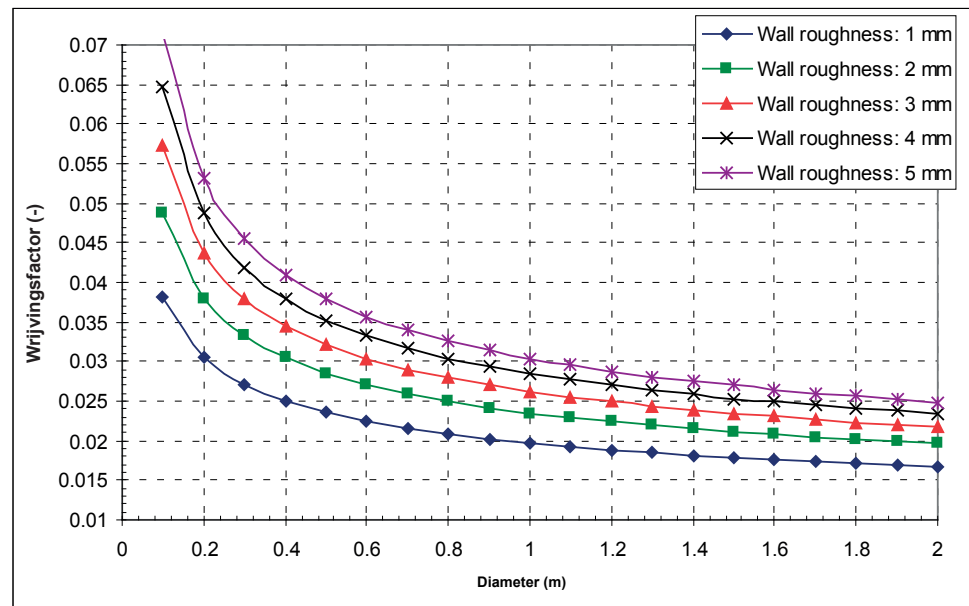
6.1.4 EQUIVALENTE WANDRUWHEID

De equivalente wandruwheid lijkt een eenvoudige en gemakkelijk te hanteren kental omdat iedereen zich er iets bij voor kan stellen. Echter het is een rekengrootheid afhankelijk van de wrijvingsfactor λ , diameter en het Reynoldsgetal; zie bijlage A.4.

Het probleem met de wandruwheid is dat grote leidingen bevoordeeld worden: Figuur 6.3 laat het verband tussen de Darcy-Weisbach wrijvingsfactor en de leidingdiameter zien (bij een stroomsnelheid van 0,5 m/s).

Voorbeeld: Een wandruwheid van 5 mm in een Ø1500 mm leiding geeft een gelijke weerstandscoefficiënt λ als een wandruwheid van 1 mm in een Ø300 mm leiding.

FIGUUR 6.3 WRIJVINGSFACTOR ALS FUNCTIE VAN DE LEIDINGDIAMETER VOOR VERSCHILLENDE WANDRUWHEDEN



De wandruwheid alleen zegt dus niets over de toestand van een leiding als de diameter niet bekend is. In de praktijk kunnen er kleine variaties in de diameter zijn door aangroei, scaling en slijmlagen op de leidingwand.

Dit kental kan dus niet worden verschaald naar andere leidingdiameters. Echter, de wandruwheid kan wel worden vergeleken met leidingen met zelfde diameter maar andere leidinglengtes. De wandruwheid is ook niet gevoelig voor de statische opvoerhoogte.

Het grote verschil met het kental zoals beschreven in paragraaf 6.1.2 is dat het “k-waarde kental” alleen iets zegt over de toestand van de persleiding en niets over het totale systeem inclusief gemaal.

Voorbeeld PI bepaling op basis van de k-waarde:

referentie k-waarde = 0,25 mm

Actuele k-waarde = 0,31 mm

$$PI = \frac{0,25}{0,31} * 100\% = 81\%$$

6.2 MEETLOCATIES VOOR DRUK EN DEBIET

De oorzaak van een capaciteitsverlies kan zitten in het gemaal en/of de persleiding. Met behulp van de juiste metingen kan bepaald worden waar de oorzaak gezocht moet worden. Het is daarom belangrijk om in het ontwerptraject alle relevante meetpunten op te nemen. De energieverliezen kunnen worden geïdentificeerd door het bepalen van drukverschillen en debieten. Om de oorzaak van een capaciteitsreductie of verhoogd energieverbruik te kunnen achterhalen, moet onderscheid gemaakt kunnen worden tussen prestatie-indicatoren voor het gemaal en voor de persleiding. Een drukopnemer aan de perszijde van het gemaal is essentieel om dit onderscheid te kunnen maken. Een dergelijke persdrukopnemer wordt traditioneel niet geïnstalleerd, maar levert wel een schat aan extra informatie op over het hydraulisch functioneren van het transportsysteem.

De benodigde meetwaarden ten behoeve van de bedrijfsvoering laten we hier buiten beschouwing. In de praktijk zullen enkele meetwaarden (bijvoorbeeld debiet en zuigpeil) voor beide toepassingen gebruikt worden.

Veel fabrikanten van meetinstrumentatie stellen eisen aan het inbouwen van de instrumenten. Het niet volgen van deze eisen kan de nauwkeurigheid van een instrument sterk beïnvloeden. Het kan zijn dat men om dergelijke praktische redenen moet afwijken van de, fysisch gezien, ideale meetlocaties, een rekenmodel kan ook hier helpen om een verstandige ‘tweede keuze’ te doen. In nieuwbouw situaties wordt aangeraden om rekening te houden met de mogelijkheden om te gaan meten, zowel t.b.v. de reguliere bedrijfsvoering, maar ook voor bv. het periodiek testen op de aanwezigheid van gasinsluitingen.

6.2.1 DEBIETMETING

Een nauwkeurige debietmeting kan alleen verkregen worden met behulp van een debietmeter. Elektromagnetische (EMF) debietmeters zijn de meest toegepast omdat dit type geen extra weerstand en geen bewegende delen heeft (en dus betrouwbaar is).

De nauwkeurigheid van de debietmeter wordt gespecificeerd door de fabrikant. Hierbij moet erop gelet worden dat de debietmeters vaak gekalibreerd worden met schoon water, waardoor de nauwkeurigheid van de meting in afvalwater lager kan uitvallen.

De nauwkeurigheid wordt ook beïnvloed door de inbouwlocatie. Er moet voldoende rechte aanstroming aan voor- en achterzijde van debietmeter beschikbaar zijn. Deze inbouwmaten liggen vast in normen en worden door de fabrikant gespecificeerd. Internationale standaarden als ISO-5167:2003 geven waarden op van 10D aan rechte lengte voor en 2D aan rechte lengte achter de debietmeter om invloeden van de stroming uit te sluiten. In praktijksituaties is dit niet haalbaar. In overleg met de fabrikant kunnen andere inbouw lengtes gehanteerd worden.

Bij ontbreken van een debietmeter (bij oude gemalen nog het geval) moet het debiet bepaald worden door gedurende een bepaalde tijd een schijf water uit de zuigkelder weg te pompen. Hierbij dient de aanvoer in de kelder afgesloten te worden of dient informatie over de vultijd van de kelder gebruikt te worden om de aanvoer te schatten. Deze metingen zijn onnauwkeurig omdat vaak niet voldoende lang gepompt kan worden om een stabiel debiet in de leiding te krijgen. Windketels en buffertorens moeten bij een dergelijk actie afgesloten zijn omdat men anders (deels) het vullen van de ketel/toren meet en niet de capaciteit van de leiding.

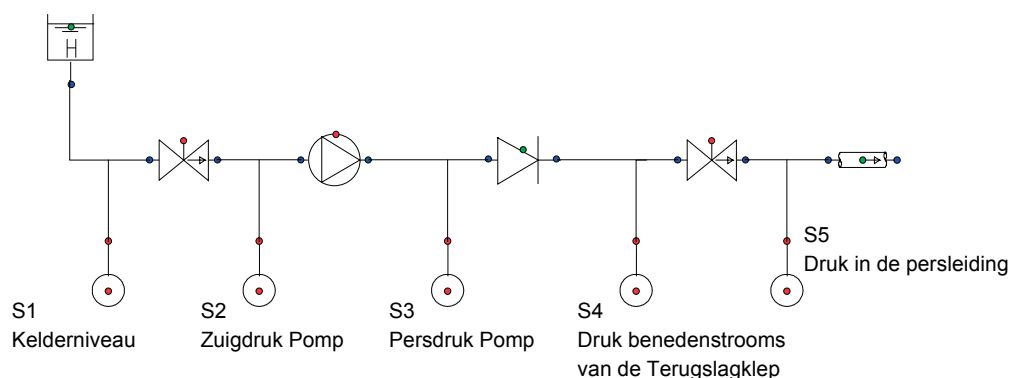
6.2.2 DRUKMETING

Om het energieverlies van een object te bepalen moet bovenstrooms en benedenstrooms van dit object een drukregistratie plaatsvinden (zie Figuur 6.4). Het verdient daarom aanbeveling om minimaal tussen de pomp en de terugslagklep of aan het begin van de persleiding een aansluitpunt voor een druksensor of manometer op de leiding op te nemen (S3, S4 of S5 in Figuur 6.4).

Tevens dient het zuigpeil in de kelder (S1 in Figuur 6.4) geregistreerd te worden. Deze drukregistratie wordt doorgaans al gebruikt voor het in- en uitschakelen van de pompen. De noodzaak tot registratie van het afleverdrukniveau (druk aan einde van het systeem) is afhankelijk van de uitstroomconstructie. Veelal is dit een overstort-achtige constructie waardoor het niveau aan het einde van het systeem bekend is.

Bij droog opgestelde pompen kan ook aan de zuigzijde een drukmeetpunt worden opgenomen (S2). Hiermee kan direct beoordeeld worden of het capaciteitsprobleem veroorzaakt wordt door een verstopte zuigmond of niet-correct functionerende pomp.

FIGUUR 6.4 LOKATIES VOOR DRUKMETING



De beste locatie voor drukopnemers is op de hartlijn (zijkant) van de leiding. Op deze locatie is er minder kans op verstopping door sediment en drijfvuil. Ook voor een correcte drukmeting geven internationale standaarden als ISO-5167:2003 waarden voor de benodigde rechte lengte: 2D voor en 2D na het meetpunt.

Door beperkte inbouw lengte in het gemeaal wordt hier in de praktijk vaak niet aan voldaan. Let hierbij op de interpretatie van de meetwaarde. Vooral locaties direct achter terugslagkleppen zorgen voor een te lage drukregistratie doordat de meting plaats vindt in de vena-contracta van de klep.

Van elk drukmeetpunt moet de hoogteligging nauwkeurig worden bepaald en vastgelegd. Deze hoogteligging is noodzakelijk voor een correcte analyse van de meting.

Bij het bepalen van het energieverlies op basis van drukverschilmetingen moet men bij afwijkende diameters rekening houden met verschil in snelheidshoogte (zie bijlage A.3)

Om de prestatie van de persleiding vast te stellen is minimaal de druk aan begin en einde van de persleiding nodig. Wenselijk is om bij persleidingen die vanwege hun geometrie, bedrijfsvoering en afvalwaterkwaliteit gevoelig zijn voor extra energieverliezen in het ontwerp al enkele extra aansluitpunten mee te nemen in het tracé. Deze meetpunten

kunnen in de gebruiksfase incidenteel gebruikt indien extra informatie gewenst is. Neem bij een ontluichtingspunt ook direct een aansluitpunt voor een drukmeting mee.

Inprikleidingen die niet in bedrijf zijn, kunnen gebruikt worden om de druk ter plaatse van het inprikpunt te bepalen. Hiertoe moet aan het begin van de persleiding (dus achter de terugslagklep) van de inprikkende leiding een meetpunt zitten.

6.2.3 POMPDATA

Om de prestatie van een toerengeregelde pomp te kunnen beoordelen moet naast het debiet en de opvoerhoogte het toerental en opgenomen vermogen bekend zijn waarbij de meting heeft plaatsgevonden.

6.3 VOORZIENINGEN VOOR CAPACITEITSHANDHAVING

De oorzaak van capaciteitsverlies kan zijn door vervuiling / verstopping van appendages in het gemaal of door vervuiling en/of stagnerende gasbellen in de persleiding.

6.3.1 AFSLUITERS

Om capaciteitsproblemen in het gemaal op te lossen moet de pomp en/of de terugslagklep geïnspecteerd/gedemonteerd kunnen worden. Hiertoe moet dit leidingdeel m.b.v. blokafsluiters afgesloten kunnen worden van zuigkelder en persleiding. Om een volledige ongestoorde doorstroom opening te hebben worden schuif of plaatafsluiters geadviseerd.

6.3.2 VERHOOGDE STROOMSNELHEID

Om met behulp van stroming een gasbel te verwijderen moet voldoende lang en moet voldoende snelheid gestroomd worden. De vereiste stroomsnelheid is afhankelijk van de hellingshoek en diameter van de neergaande leidingdelen (zie paragraaf 3.3 en bijlage A.8). Er moet voldoende pompvermogen beschikbaar zijn om deze snelheid te realiseren.

De afbraak van de gasbel kost al gauw meerdere uren. De benodigde afbraaktijd is te bepalen aan de hand van figuren in de bijlage (Bijlage A.8) Gedurende deze tijd moet er voldoende watervoorraad gegarandeerd zijn. Dit kan gedaan worden door:

- Voldoende buffer in de ontvangstkelder
- Bovenstrooms rioolstelsel als buffer gebruiken
- Aanvoer uit nabij gelegen oppervlaktewater

Is dit niet te realiseren dan is verwijdering met stroming niet mogelijk en zijn de mogelijkheden beperkt tot proppen en ontluichten.

6.3.3 PIGGING

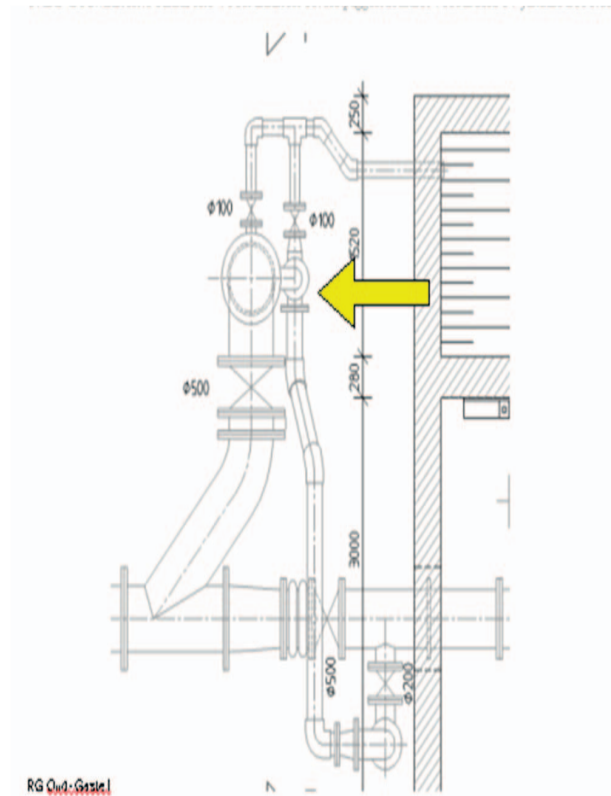
Hiertoe moet aan het begin van de persleiding een voorziening worden opgenomen om de pig in te brengen. Het eenvoudigste is een Y-stuk met schuifafsluiter en blindflens. De Y-aansluiting aan het begin van de persleiding kan ook dienen voor aansluiting van een tijdelijke pompinstallatie indient het gemaal door omstandigheden (verbouwing, calamiteit) enige tijd niet in bedrijf kan zijn.

De lanceerinstallatie moet voorzien zijn van een aansluiting om de druk achter de pig op te voeren (door gebruik van de pomp of tijdelijke installatie).

Het aanbrengen van een vertreksignalering is aan te bevelen. Dit kan ook gedaan worden door middel van debiet en druk registratie.

De reistijd van de pig is afhankelijk van de stroomsnelheid (gecorrigeerd voor de extra weerstand van de pig). Gedurende deze tijd moet er voldoende watervoorraad gegarandeerd zijn.

FIGUUR 6.5 BOVENAANZICHT VAN EEN LANCEERINSTALLATIE VOOR PIGGING



Het piggen van een leiding stelt eisen aan de diameterovergangen van de leiding afhankelijk van het type pig dat gebruikt wordt. Het type pig is weer afhankelijk van de aard van de verontreiniging. Bij gasverwijdering en reiniging van niet-industrieel gebruikte leidingen kan doorgaans volstaan worden met een zachte overmaatse pig (diameter van de pig is dan iets groter dan de diameter van de leiding). Dit type pig kan dusdanig vervormen dat diameterverkleiningen tot $0,7D$ en bochten met een bochtradius groter dan $1,5D$ geen gevaar opleveren voor vastlopen (de diameter D is de kleinste leidingdiameter die voorkomt in de persleiding).

Bij industrieel afvalwater kunnen chemische en biologische processen zorgen voor een harde afzetting op de wand (scaling) die alleen met een harde pig te verwijderen is. Voor dit type pig mag er geen diameterovergang in het traject voorkomen.

Als belemmerende objecten zoals vlinderkleppen in het leidingsysteem zijn opgenomen is pigging niet mogelijk zonder het systeem aan te passen.

Bij vrije uitstroming in een ontvangstkelder hoeft er geen aparte ontvangstinstallatie worden opgenomen. Wel moet er een mogelijkheid zijn om de pig uit de ontvangstkelder te hijsen.

6.3.4 ONTLUCHTINGSPUNTEN

Voor locaties in de persleiding waar stagnatie van gasbellen voor kan komen, wordt verwezen naar paragraaf 3.2.1. Indien het hoogteverschil der mate groot wordt dat een significant energieverlies op kan treden (maximaal energieverlies is de te overbruggen hoogte) moet een ontluuchtingsvoorziening worden opgenomen. Voor een goede ontluuchtingsvoorziening moet een opstaand leidingdeel gemonteerd worden conform beschreven in paragraaf 3.4.2.

Voor ontluuchtingspunten in het gemaal wordt verwezen naar paragraaf 4.6. Voor het incidenteel ontluuchten (bijvoorbeeld na onderhoudswerkzaamheden) van de pomp en/of persleiding wordt geadviseerd voor handmatige ontluuchters te kiezen.

7

REVIEW INTEGRAAL SYSTEEMONTWERP

In de inleiding van hoofdstuk twee is benadrukt dat het ontwerpproces een iteratief proces is. Het ontwerpproces kan niet opgeknipt worden in een aantal deelontwerpen die zelfstandig uitgevoerd worden. Telkens weer moet men zich afvragen wat de consequenties zijn van bepaalde keuzes voor de rest van het systeem.

In de voorliggende hoofdstukken zijn deze onderlinge verbanden gelegd waarbij het zwaartepunt lag op het transport van gas. Een aantal ontwerp- en beheermaatregelen om lucht in persleidingen te beheersen of te voorkomen staat opgesomd in paragraaf 7.1.

Ten behoeve van een optimale afstemming tussen de verschillende ontwerpstappen is het verstandig om aan het eind van het ontwerptraject het gehele systeemontwerp met enkele mensen uit verschillende kennisdisciplines te controleren en te toetsen of het tot stand gekomen ontwerp voor de verschillende aspecten voldoet.

Vooraf bij aanpassingen aan bestaande systemen kan men nog wel eens voorbijgaan aan het effect van de aanpassing op het functioneren van de rest van de het systeem.

De “review integraal systeemontwerp” is niet meer dan een checklist met per object een aantal aandachtspunten. De tabellen in paragraaf 7.2 geven eerste aanzet voor de review van het systeemontwerp.

7.1 BEHEERSEN VAN LUCHT IN PERSLEIDINGEN

TABEL 7.1: OVERZICHT VAN MOGELIJKE MAATREGELEN OM LUCHTPROBLEMEN TE BEHEERSEN

Fase, Substelsysteem	Maatregel	Opmerkingen
Ontwerp, Gemaal	Installeer een vertical spatscherm, een belucht T-stuk of een rubber flap om het instromende afvalwater in de kelder te geleiden	Deze maatregel wordt sterk aanbevolen en is zeer effectief indien de vallende straal vlakbij de zuigmond in de kelder plonst.
	Installeer een prop-installatie, bestaande uit een Y-stuk of een by-pass met isolatiekleppen.	Een prop-actie kan ook gebruikt worden bij initiële vulling van de leiding
	Sluit ontluichtingsleidingen in het gemaal.	In veel gemalen bestaan deze ontluichtingsleidingen uit kleine balkeerkleppen, die onbedoeld lucht inlaten bij onderdruk.
	Installeer instrumenten voor het monitoren van de energie-efficiency van het gemaal en de persleiding.	Debiet, zuigpeil, persdruk, pomptoerental en opgenomen vermogen worden aanbevolen om real-time prestatie-indicatoren te berekenen voor het gemaal en de persleiding.
Ontwerp, Leiding	Beperk het aantal zinkers	Een gestuurde boring is maximaal ongeveer 1 km lang, waarmee soms meerdere zinkers gecombineerd kunnen worden.
	Beperk de diepte van een zinker	De haalbaarheid hangt af van de geotechnische situatie en opbouw van de ondergrond.
	Verklein de diameter van de zinker om de lokale stroomsnelheid (en het stromingsgetal) te vergroten	Permanent extra energieverlies. Het proppen met flexibele proppen moet nog steeds mogelijk zijn; de diameter kan hiertoe met 30% tot soms 50% verkleind worden.
	Verklein alleen de binnendiameter van het dalende been van een zinker.	Dit is mogelijk door een kleinere SDR te kiezen of door de boring uit te voeren tegen de stroomrichting in, zodat de grotere diameter als eerste door het boorgat getrokken wordt.
	Installeer handmatige of automatische be-ontluchters bovenstrooms van zinkers	Onderhoud is vereist
	Vervang een gestuurde boring door een traditionele zinker.	
Operationele maatregelen, Gemaal	Verhoog het uitslagpeil	Met een waterslagberekening wordt het benodigde peil berekend, waarbij de peildaling na pompstop niet tot luchtinname leidt.
	Verbeter de stopprocedure met een soft-stop.	Dit beperkt de minimale drukken tijdens normale bedrijfsvoering. Een waterslagberekening is nodig om een acceptabele stopprocedure te ontwerpen.
	Installeer een retourleiding in het gemaal van de pompszijde naar de kelder. Deze leiding staat open en wordt kort na pompstart gesloten, zodat eventuele lucht teruggevoerd kan worden naar de kelder.	Het leidingdeel tussen pomp en terugslagklep staat normaal op onderdruk tijdens stilstand, zodat lucht en gasen uit oplossing kunnen komen.

7.2 CHECKLIJSTEN

7.2.1 ONTWERP GEMAAL

TABEL 7.2 ONTWERPASPECTEN EN MOGELIJKE MAATREGELN VOOR GEMAAL

Ontwerpaspect Gemaal	Mogelijke Maatregelen
Is er kans op luchtinslag bij de pomp door vallend instromend water?	Ja: Schot plaatsen
	Nee: OK
Is uitslagpeil voldoende hoog dat er voldoende water nageleverd kan worden zonder gevaar voor luchtaanzuiging	Ja: OK
	Nee: Peil verhogen
Ligt uitslagpeil onder b.o.k. riool zodat instromend water de drijfslag kan breken	Ja: OK
	Nee: Peil verlagen
Is het mogelijk de kelder te reinigen met (bijvoorbeeld) een zuigwagen	Ja: OK
	Nee: Ontwerp aanpassen
Is schakelberging voldoende groot	Ja: OK
	Nee: Peilen aanpassen of kelder groter maken
Zijn pompontluchtingen bij normaal bedrijf gesloten	Ja: OK
	Nee: Het risico is ongewenste luchtinname bij onderdruk. Ontluchtingen sluiten
Is leidingweerstand in gemaal correct meegenomen (stand terugslagklep hoeft niet geheel open te zijn)	Ja: OK
	Nee: extra dynamisch verlies meenemen in ontwerp

7.2.2 ONTWERP PERSLEIDING

TABEL 7.3 ONTWERPASPECTEN EN MOGELIJKE MAATREGELN VOOR PERSLEIDINGEN

Ontwerpaspect persleidingen	Mogelijke Maatregelen
Is persleiding geheel in overdruk indien alle gemalen in het systeem uitgeschakeld zijn?	Ja: OK
	Nee: Mogelijke gevolgen van luchtinsluiting inventariseren. Maatregelen nemen indien de risico's onaanvaardbaar zijn
Zijn er locaties in tracé waar luchtophopping kan leiden tot grote extra verliezen	Ja: Beheersbaarheid toetsen, evt. maatregelen nemen
	Nee: OK
Zijn er voorzieningen getroffen om lucht op bepaalde locaties te verwijderen	Ja: OK
	Nee: Beheersbaarheid toetsen, evt. maatregelen nemen
Kan er voldoende lang gestroomd worden om stagnerende gasbellen af te breken	Ja: OK
	Nee: Ontwerp herzien
Is de kortste pompcyclustijd voldoende lang om een bel in een neergaande leiding op transport te krijgen	Ja: OK
	Nee: pompcyclus verlengen
Kan de leiding leeglopen (m.n. voor cementgebonden materialen)	Ja: Uitstroomvoorziening ontwerpen
	Nee: OK
Kan er hevelwerking optreden	Ja: Bedrijfsvoering controleren
	Nee: OK

7.2.3 WATERSLAGTECHNISCH ONTWERP

TABEL 7.4 ONTWERPASPECTEN EN MOGELIJKE MAATREGELEN VOOR WATERSLAGVOORZIENINGEN

Ontwerpaspect Waterslagvoorzieningen	Mogelijke Maatregelen
Zijn de procedures voor het starten en stoppen van het systeem gevalideerd?	Ja: OK Nee: Procedures controleren
Kan de installatie met de hand bediend worden tijdens bijzondere bedrijfssituaties met uingeschakelde FO?	Ja: OK Nee: Bedrijfsvoering/ontwerp herzien
Is het gedrag van de terugslagklep getoetst indien een windketel noodzakelijk is	Ja: OK Nee: controleren / ontwerp herzien
Is bij het weghalen van een windketel gerealiseerd dat de ontluchtingsvoorziening er ook niet meer is.	Ja: OK Nee: Ontwerp herzien

8

OPLEVERING VAN HET SYSTEEM

Bij de oplevering van het project is het van belang te toetsen of het nieuwe of gemodificeerde systeem doet wat het zou moeten doen volgens de ontwerpeisen. De acceptatietesten zijn eigenlijk de 'nulmeting' voor later. Deze metingen worden uitgevoerd om de begintoestand (dit wordt ook wel "as-built" genoemd) van het systeem vast te stellen. De nulmeting is belangrijk om later optredende afwijkingen te detecteren. Concreet betekent dit dat de overeengekomen prestatie-indicator bepaald moet worden.

Figuur 8.1 geeft het te doorlopen proces weer.

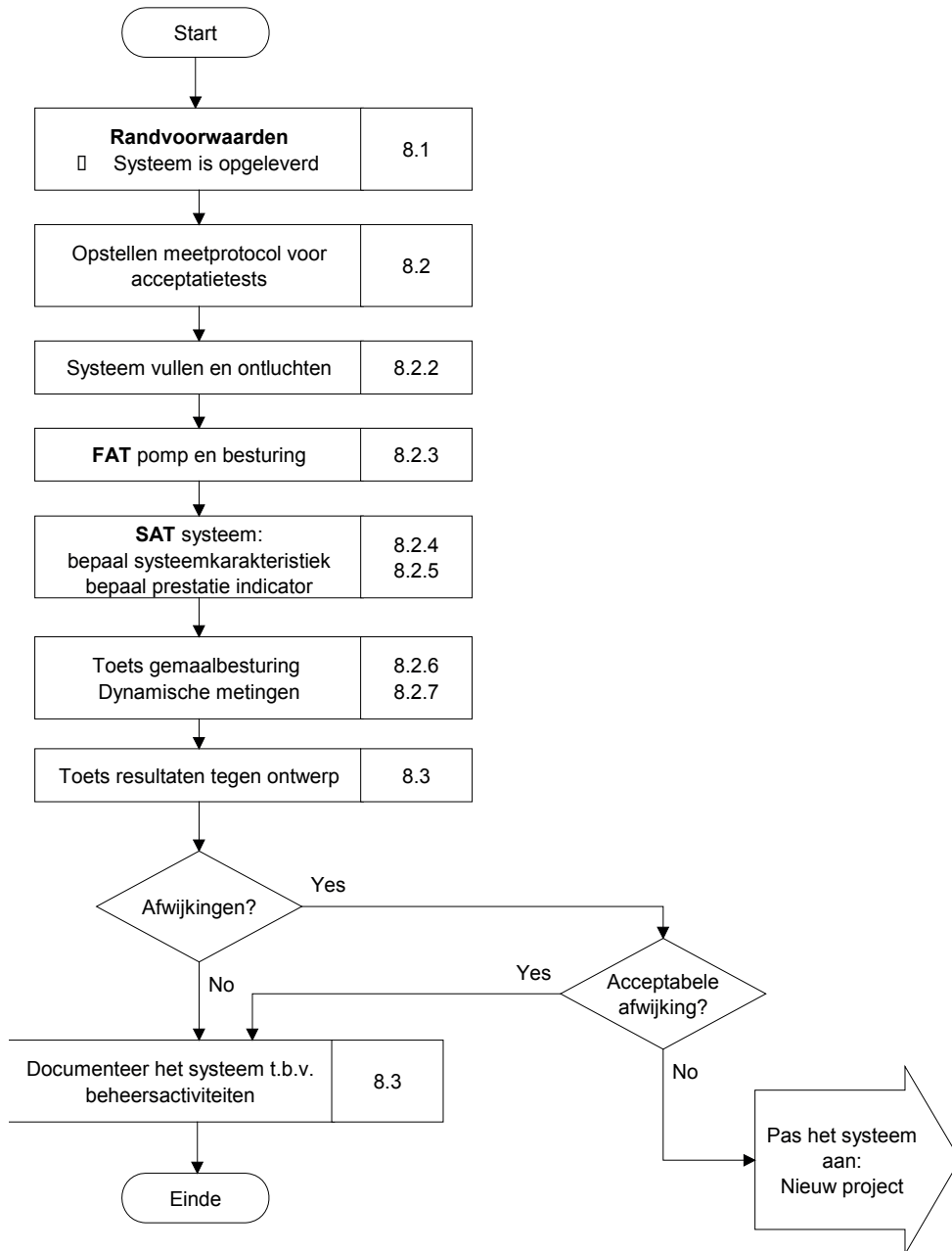
8.1 RANDVOORWAARDEN

In het traject tussen ontwerp en oplevering kunnen wijzigingen in het systeem zijn opgetreden die invloed hebben op de hydraulische capaciteit. Van belang is dat alle ontwerpdocumenten bijgewerkt zijn (as-built documentatie) en dat de consequenties van de wijzigingen getoetst zijn.

Ook uitgangspunten in DWA en RWA debieten kunnen in de tijd tussen het opstellen van de ontwerpcriteria en de oplevering gewijzigd zijn.

Vastgesteld dient te zijn welke type prestatie indicator gebruikt gaat worden voor de systeembeoordeling.

FIGUUR 8.1 STROOMSCHEMA VAN DE PROCEDURES VOOR OPLEVERING VAN HET SYSTEEM



8.2 OPSTELLEN ACCEPTATIE TESTPLAN

Het uitgevoerde project kan slechts betrekking hebben op een deel van het gehele systeem, bijvoorbeeld de renovatie van een gemaal. Bij de acceptatietest is het juist van belang het gehele systeem te betrekken, dus gemaal en leiding.

In het acceptatie testplan wordt vastgelegd welke onderdelen van het systeem en onder welke omstandigheden beproefd worden. Het acceptatieplan bevat minimaal de volgende onderdelen

- Beschikbaarheid water
- Lek en gasvrij leidingsysteem
- Capaciteit pomp
- Capaciteit leiding
- Dynamische metingen

Bij het beproeven dient er enkele minuten sprake te zijn van een min of stationaire toestand. Dit betekent dat er weinig druk- en debietfluctuaties zijn en de tijdregistraties een vlakke lijn laten zien.

Tijdens de metingen moet er uiteraard ook op gelet worden of het systeem niet alleen hydraulisch correct werkt, maar ook dat trillingen en geluidsniveaus binnen de gestelde criteria blijft.

8.2.1 VOORBEREIDING

Van belang is dat het wel getoetst wordt aan ontwerpcriteria, dus RWA condities.

Dit betekent dat er voldoende water tot de beschikking moet zijn om een aantal relevante metingen te doen. Hiervoor moet de berging van het rioolstelsel gebruikt worden of moet de mogelijk tot inlaten van oppervlaktewater mogelijk zijn. Bij berging in het stelsel dient de rioolbeheerder de randvoorwaarden hiervoor aan te leveren:

- Hoeveel volume is beschikbaar in het stelsel.
- Moeten ondergemalen bestuurd worden.
- Criteria voor afgelasting van de beproeving

8.2.2 LEK EN GASVRIJ LEIDINGSYSTEEM

Het leidingsysteem dient afgeperst en lekvrij te zijn te zijn opgeleverd. De aannemer dient met registraties aan te tonen dat bij de afpersing de drukafname binnen bepaalde criteria blijft. Het leidingsysteem dient goed ontluicht te zijn.

Het vaststellen of de het systeem gasvrij is kan met behulp van een eenvoudige proef vastgesteld worden waarbij gebruik wordt gemaakt van de druk afhankelijke bergingscapaciteit van de leiding en de compressie van de vloeistof (gebaseerd op de waterslagtheorie). Deze proef is beschreven in bijlage B.3.

8.2.3 CAPACITEIT POMP

De capaciteit van de geleverde pomp is door de fabrikant vastgelegd in de "Factory Acceptance Test" (FAT). Eén of meerder werkpunten zijn aangegeven in de pompkarakteristiek. Bij standaard pompen kan deze test ontbreken. Deze pompkarakteristiek dient beschikbaar te zijn.

Elke pomp in het gemaal dient afzonderlijk beproefd te worden. Ook moet erop gelet worden dat de omstandigheden waarbij de pomp getest wordt vergelijkbaar is met de omstandigheden in het gemaal. Hierbij moet vooral aandacht besteedt worden aan de aanstroming en de zuig- en persdruk (het werkpunt).

Om de capaciteit van de pomp vast te stellen moeten onderstaande signalen vastgelegd worden:

- Zuigpeil of zuigdruk
- Persdruk direct achter pomp
- Debiet
- Toerental
- Elektrisch vermogen

De metingen worden uitgevoerd bij het nominaal (maximum) toerental voor tenminste 2 debieten, te weten het debiet bij het maximum rendementspunt en bij $Q=0$. Dit laatste meetpunt wordt verkregen door een (schuif)afsluiter aan de perszijde dicht te draaien.

Bij een toerengeregelde pomp wordt de werkpunten bepaald bij het toerental waarop de minimum capaciteit geleverd wordt. Ondergrens van het toerental bereik is veelal 50 à 60 % van het nominale toerental.

8.2.4 TERUGSLAGKLEP

Het is wenselijk om gelijktijdig met de pompbeproeving de toestand van de terugslagklep vast te leggen om tijdens de gebruiksfase vervuiling te kunnen registreren.

De minimaal te registreren signalen zijn:

- druk bovenstrooms
- druk benedenstrooms
- debiet
- openingshoek (alleen mogelijk bij roterende types)

Bij terugslagkleppen uitgerust met contragewichten of veren dienen deze instellingen vastgelegd te worden.

8.2.5 CAPACITEIT LEIDING

De capaciteit van de leiding wordt gerepresenteerd door de systeemkarakteristiek. Om deze karakteristiek vast te leggen moeten minimaal onderstaande signalen vastgelegd worden:

- Zuigpeil
- Afleveringspeil of -druk
- Debiet
- Persdruk begin persleiding

Extra drukmetingen tussen begin en einde leiding zijn wenselijk (zie ook paragraaf 6.2.2)

Bij samengestelde leidingen fluctueert de afleveringsdruk onder invloed van andere gemalen. Bij de capaciteitsmeting dienen deze gemalen uit bedrijf te zijn. De persdruk aan het begin van deze aansluitende leidingen kan gebruikt worden als extra drukregistratie voor de locatie van de samenkomst.

8.2.6 REGELING GEMAAL

Het beproeven van de pomp zal veelal op handbediening gaan. Bij gemalen waarbij meerdere pompen operationeel zijn is het wenselijk ook de regeling te beoordelen. Door fouten in het pompbesturingsprogramma of instellingen kan de operationele werking afwijken van de handsturing.

Om het complete regelregime te testen dient veel aandacht besteed te worden aan de watertoevoer. Deze moet voldoende lang beschikbaar zijn en moet variabel zijn.

Een efficiënt alternatief is om de gemaalbesturing te koppelen aan simulatiesoftware. Door met "digitaal water" te testen kan de gemaalbesturing op een reproduceerbare wijze beproefd worden.

8.2.7 DYNAMISCHE METINGEN

De dynamische metingen zijn nodig om:

- de werking van aanwezige waterslagvoorzieningen te toetsen
- dynamische karakteristiek (fingerprint) te bepalen van het systeem.

De dynamische beproeving wordt geïnitieerd door het abrupt uitzetten van de motor (onderbreken stroomvoorziening). Voor de fingerprint bepaling is tevens pompstartregistratie gewenst.

Dynamische registraties kunnen niet via handmatige aflezingen vastgelegd worden maar dienen hiervoor dataloggers gebruikt te worden waarbij tijd en meetsignaal opgeslagen worden.

Waterslagvoorziening

De werking van een aanwezige waterslagvoorziening dient beoordeeld te worden dan wel het effect van de voorziening op het systeem. De beoordeling van de voorziening zelf is in feite alleen maar mogelijk bij toepassing van windketels. Hiertoe dient voorafgaande aan de dynamische beproeving vastgesteld te worden:

- waterniveau in windketel (vullingsgraad)
- begindruk persleiding
- debiet

Van de volgende signalen moeten een tijdregistratie worden gedaan:

- Niveau in windketel

Om het effect van de voorziening te beoordelen moet de druk ergens in het systeem beoordeeld worden. Bij ontbreken hiervan kan deze meting dienen ter toetsing van de acceptatie drukken in het systeem. De gewenste locatie volgt uit de waterslagstudie.

Deze drukmeting dient direct op de betreffende persleiding plaats te vinden en kan er geen gebruik gemaakt worden van het meetpunt aan het begin van een inprikkende leiding dit in verband met de looptijd van drukgolven door het systeem.

Fingerprint

Het dynamische drukverloop tijdens het starten en stoppen van de pomp is een eigenschap van het systeem. Als er iets in het systeem veranderd zal dit dynamische drukverloop ook anders worden. Vandaar dat het wenselijk is bij de acceptatie test dit drukverloop vast te leggen. De fingerprint gaat vooral veranderen bij aanwezigheid van gasbellen in het systeem. De fingerprint heeft geen betekenis indien er waterslagvoorzieningen op het systeem zijn aangesloten. Deze voorzieningen beïnvloeden namelijk het systeemgedrag waardoor er geen betekenis aan het signaal toegekend kan worden.

De fingerprint wordt vastgelegd voor:

- Pompstart
- Pompstop

Voor details wordt verwezen naar bijlage B.

8.3 TOETSING NULMETING

De hiervoor beschreven metingen vormen de nulmeting van het systeem. Het is wenselijk elke meting 2-maal uit te voeren om de reproduceerbaarheid te toetsen.

De hieruit voortkomende prestatie-indicatoren moeten getoetst worden tegen het ontwerp.

Vergelijk de waargenomen capaciteit van het gemaal en de leiding met de ontwerpuitgangspunten. Bij grote afwijkingen dient de meting herhaald te worden waarbij extra aandacht besteedt moet worden aan de juiste uitgangspunten:

- Werkt de instrumentatie correct
- Is het systeem goed ontlucht
- Staan alle afsluiters geheel open
- staan op het systeem inprikkende gemalen uit

Als de meetresultaten reproduceerbaar zijn, worden de resultaten goed vastgelegd. Noteer daartoe in de pompkarakteristiek de waargenomen werkpunten en leg de berekening van de prestatie-indicatoren stap voor stap vast.

Afwijkingen ten opzichte van het ontwerp worden gedocumenteerd. Bij acceptatie van het systeem accepteert de eigenaar/beheerder deze nul-meting als uitgangspunt voor verdere capaciteitsvraagstukken.

Bij het niet accepteren zal dit in eerste instantie leiden tot een probleem analyse met extra metingen om de oorzaak te achterhalen. Indien dit traject niet leidt tot verbetering en acceptatie van een minder functionerend systeem niet aan de orde is, volgt een nieuw ontwerp- en bouwtraject.

9

HANDHAVEN VAN DE HYDRAULISCHE CAPACITEIT

Bestaande richtlijnen (o.a. Leidraad Riolering Module C6000 Gemalen beheer) besteden veel aandacht aan beheer en onderhoud. In deze sectie willen we ons dan ook richten tot die zaken die tot dusver onderbelicht zijn. We beperken ons ook nu weer tot de hydraulische aspecten van het afvalwatertransport-systeem. Primair doel van beheer is het handhaven van de ontwerpcapaciteit tegen minimale kosten.

Het functioneren van een persleidingsysteem kan niet beoordeeld worden door alleen naar de losse objecten te kijken. Om oorzaak en gevolg vast te stellen is kennis van het gehele systeem noodzakelijk. Dit kan met zich meebrengen dat meerdere disciplines/afdelingen betrokken moeten worden bij dit proces

9.1 METEN IN AFVALWATERTRANSPORTSYSTEMEN

Het meten aan (afvalwaterpersleiding)systemen is een van de activiteiten waar elke beheerder vroeger of later mee in aanraking komt. Hetzij bij de oplevering, hetzij in de normale bedrijfsvoering, hetzij als er “problemen” met een systeem zijn. Zowel continue monitoring als incidentele veldmetingen worden in deze paragraaf behandeld, omdat meeste aspecten in beide gevallen van belang zijn.

In alle gevallen is het noodzakelijk om een op de situatie toegesneden meetplan op te stellen. Hierna zal in kort bestek en in algemene termen iets worden gezegd over de inhoud en opzet van een meetplan.

Metten heeft als doel het vergaren van gegevens aan de hand waarvan informatie kan worden verkregen over het functioneren van een systeem, in ons geval een afvalwaterpersleidingsysteem. Een eerste belangrijke, en helaas vaak overgeslagen stap, is het zo exact mogelijk formuleren welke informatie noodzakelijk is om de vraag die aanleiding is voor het starten van een meetproject te beantwoorden. De meetvraag dient gesteld te worden op een manier die het kwantificeren van de effectiviteit van een meetopzet toelaat. Als voorbeeld kan dienen: *“Het kunnen detecteren van een trend in de hydraulische weerstand van minimaal 1 mwk in een tijdsperiode van 6 maanden”*. Aan de hand van statistische technieken kan exact worden nagegaan hoe goed een bepaalde meetopzet voldoet aan deze doelstelling. (zie Schilperoort (1986)).

9.1.1 PARAMETERS EN LOCATIES

Het vertalen van deze informatiebehoefte naar de eisen die aan de te verzamelen gegevens worden gesteld is een volgende stap. Deze eisen worden gesteld in termen van:

- de te meten parameters
- de meetfrequentie
- de meetnauwkeurigheid
- de meetlocaties
- het meetbereik per parameter, per locatie
- de meetduur (afhankelijk van het meetdoel kan dit variëren tussen “levenslang” en enkele uren)

Gegeven de geometrie en de structuur van het systeem waaraan gemeten moet gaan worden dienen de meetlocaties te worden vastgesteld. Met behulp van een rekenmodel kan worden nagegaan welke plaatsen in aanmerking komen op basis van het (verwachte) systeemgedrag. In bestaande situaties is van belang dat wordt nagegaan of de gekozen meetlocaties:

- toegankelijk/veilig zijn om te werken,
- voldoen aan de inbouwisen van de instrumentatie,
- beschikken over de noodzakelijke voorzieningen (denk bv. aan de aanwezigheid van elektrische stroom of datacommunicatiemogelijkheden).

Indien de meetlocaties niet voldoen aan bovenstaande eisen moet de beheerder een keuze maken: Moet de huidige meetlocatie geschikt gemaakt moeten worden of kan een alternatieve meetlocatie gekozen worden.

9.1.2 INSTRUMENTATIE

Het kiezen van de parameters is meestal zeer eenduidig en volgen direct uit de specifieke vraagstelling en de (bekende) systeem fysica. Dat is echter niet zo voor de meetfrequentie en de meetnauwkeurigheid. Beide parameters moeten in samenhang bepaald worden en hangen vooral af van de variabiliteit van het te meten proces.

De meetfrequentie moet hoog genoeg zijn om de snelste processen goed weer te geven. Als vuistregel voor de meetnauwkeurigheid geldt dat de meetfout orden van grootte kleiner moet zijn dan de variabiliteit van het gemeten signaal op de tijdschaal van de gekozen meetfrequentie. Meetfrequentie en meetnauwkeurigheid hangen dus sterk samen. Een uitgebreide behandeling van de relatie tussen meetnauwkeurigheid en meetfrequentie in relatie tot tijd- en ruimteschalen van processen wordt gegeven door Schilperoort (1986).

Als men bij het ontwerp van de meetopzet geen betrouwbare informatie heeft t.a.v. de karakteristieke tijden van de processen, dan is het verstandig om te beginnen met een zo hoog mogelijke meetfrequentie, aan de hand van de aldus verzamelde gegevens kan worden nagegaan of het geoorloofd is de meetfrequentie te verlagen.

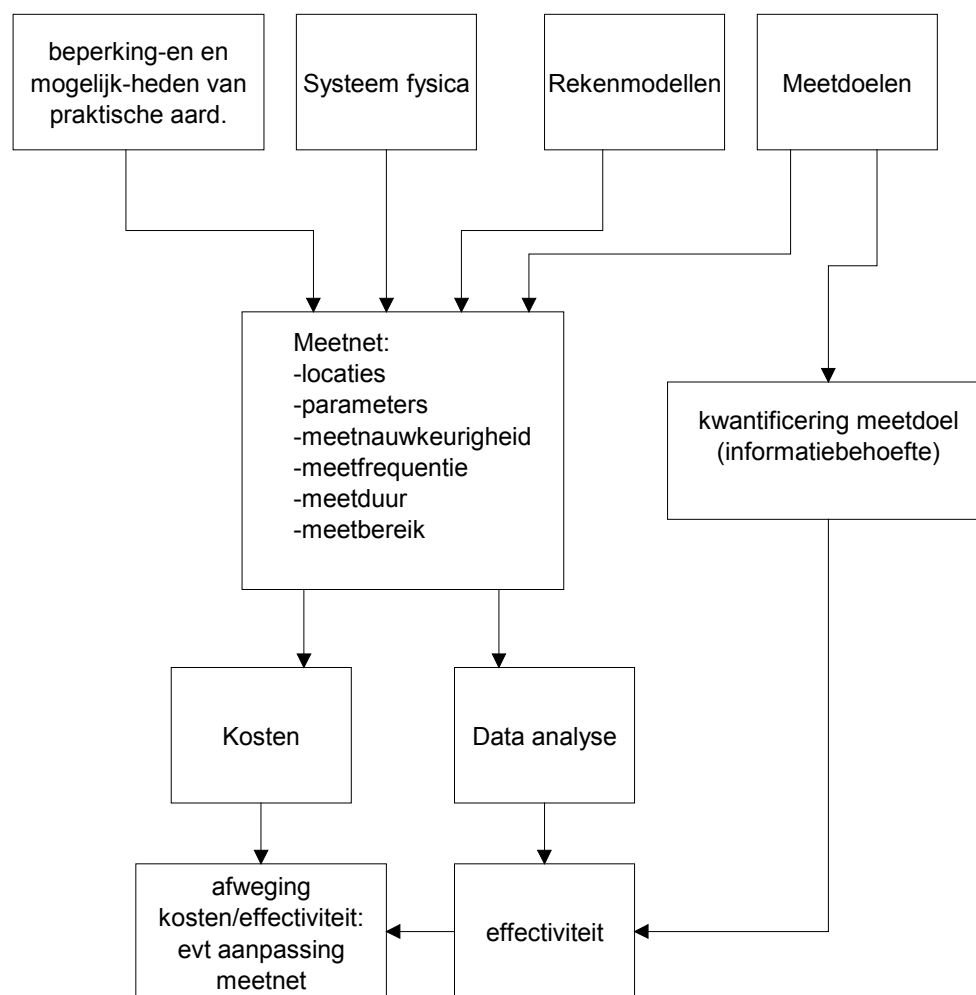
Het bepalen van de meetduur is van belang omdat hiermee in belangrijke mate wordt bepaald of er al dan niet moet worden geïnvesteerd in structurele maatregelen (aanleg infrastructuur, opzetten van een organisatie).

9.1.3 MEETSTRATEGIE

Op grond van de nu bekende eisen aan frequentie, nauwkeurigheid, locaties, parameters en meetduur kan vervolgens een keuze worden gemaakt voor de te gebruiken sensoren, de wijze van aanleg en de manier van data-acquisitie (bv. handmatig uitlezen bij eendaagse metingen, voor langdurige meettrajecten draadloze data-acquisitie met online validatie) en het vaststellen of er nog aanpassingen noodzakelijk zijn in het systeem om het meten mogelijk te maken. Tenslotte kan op basis van dit ontwerp een raming van inzet van middelen en personeel (aanleg, beheer, data-analyse en rapportage) worden opgesteld.

In Figuur 9.1 is de samenhang tussen de hiervoor besproken onderwerpen zichtbaar gemaakt. Overigens wordt nog opgemerkt dat de effectiviteit behalve van een goede opzet van het meetnet ook afhangt van de kwaliteit van de data, zo kunnen missende data of problemen met tijdsynchronisatie van verschillende meetpunten een enorm negatief effect hebben op de effectiviteit van een meetnet. Het plegen van goed onderhoud het regelmatig uitvoeren van een data-analyse zijn effectief bij het tijdig opsporen van kwalitatief slechte data.

FIGUUR 9.1 SAMENHANG VAN HET MONITORING PROGRAMMA



9.1.4 UITVOEREN VAN VELDMETINGEN

Veldmetingen zijn tijdrovend. Het uitvoeren van veldmetingen mag dan ook niet onderschat worden. Een gedegen procedurele voorbereiding met een draaiboek waarbij meerdere partijen betrokken zijn (ook uit andere organisaties, bijvoorbeeld: beheerders, gemeenten, externe bedrijven en particulieren) kost veel tijd.

Onderwerpen voor een draaiboek zijn:

- ARBO-technische aspecten
- Beschikbaarheid van voldoende berging in het bovenstroomse systeem
- Criteria voor het annuleren van de veldmeting (neerslag)
- Aanwezigheid van de juiste kennis en vaardigheden om de bedrijfsvoering van het systeem geschikt te maken voor de veldmeting
- Inlichten (en toestemming krijgen) van de verantwoordelijke organisaties

Na de procedurele voorbereiding kan men starten met de technische voorbereiding. Ook hierbij zijn mensen uit verschillende kennisdisciplines betrokken.

De technische voorbereiding bestaat uit:

- Keuze van locatie instrumenten
- Hoogteligging drukopnemers
- Beschikbaarheid van hulpfaciliteiten (stroom, water, datacommunicatie)
- Keuze en montage van instrumentatie
- Instellen van het relevante meetbereik van instrumentatie
- Calibratie van instrumenten
- Tijdsynchronisatie van de data-acquisitie apparatuur
- Beschikbaarheid van voldoende berging in het bovenstroomse systeem
- Afhankelijkheid van specifieke weersomstandigheden.

Bijvoorbeeld: Bij de keuze en installatie van meetinstrumentatie spelen de volgende kennis disciplines een grote rol: Hydraulica (fysische grootheden, meetbereik en meetfrequenties), elektrotechniek (selectie van de juiste sensor, data acquisitie) en de gemaalbeheerder (inbouwen van de instrumentatie).

De procedurele en technische voorbereiding resulteren in een goed gedefinieerd meetplan. Dit plan bevat alle kennis en details die nodig zijn om de veldmeting succesvol uit te voeren. Toch moet tijdens het uitvoeren van de veldmeting aandacht besteed worden aan de volgende aspecten:

- Dynamische experimenten kunnen schade veroorzaken aan het systeem. Kennis van het dynamische systeemgedrag is vereist voordat een dynamische veldmeting uitgevoerd kan worden. Het verdient sterke aanbeveling om elke dynamische veldmeting van tevoren te simuleren om een scherp beeld te krijgen van de verwachte meetresultaten. Bovendien geven de simulaties inzicht in de meetfrequentie, het meetbereik en de optredende extreme drukken elders in het systeem.
- Het werken met afvalwater (bijvoorbeeld: besmettingsrisico's en giftig H₂S gas)
- Voor metingen wordt doorgaans de gemaalbesturing aangepast of uitgezet (handmatige besturing).

9.2 CRITERIA VOOR CAPACITEITSVERLIES

In de praktijk wordt verschillend omgegaan met het begrip “goed werkend systeem” (zie paragraaf 6.1). De beheerder krijgt van uit zijn organisatie veelal niet de juiste criteria mee

om objectief te beoordelen of het afvalwatertransportsysteem nog goed functioneert. “Goed functioneren” wordt nog vaak gerelateerd aan het aantal storingen of het aantal “hoog water” of “overstort” meldingen en niet direct aan extra energieverliezen.

Om het systeem objectief te beoordelen is de prestatie-indicator (zie paragraaf 6.1) geïntroduceerd. Door trending van deze PI kan een verandering van het systeem snel worden opgemerkt en kan tijdig ingegrepen worden. Primair wordt hierdoor het capaciteitsverlies beperkt waardoor het aantal overstorten en storingen voorkomen kan worden.

Per systeem dient vastgesteld te worden wat de toelaatbare afwijking is van de PI om tot actie over te gaan. Hierbij worden 3 fasen onderscheiden:

Fase	Betekenis
Groen	Systeem werkt naar behoren; capaciteit ligt in buurt van nul-meting
Oranje	Capaciteit van het systeem neemt af; extra energieverlies; geen actie zal op termijn leiden tot extra overstorten;
Rood	Capaciteit van het systeem ontoereikend, veel energieverlies, direct gevaar voor overstort

De overgangscriteria tussen de drie fasen moeten door de beheerorganisatie vastgesteld worden. Enerzijds hangt dit af van de keuze van de gehanteerde PI, anderzijds van de impact van het capaciteitsprobleem op de omgeving.

Mocht de PI niet automatisch bepaald worden dan dient deze periodiek bepaald en gerapporteerd te worden. De frequentie is afhankelijk van de risico's voor het gemaal. Gasproblemen vereisen een hogere frequentie dan bijvoorbeeld scaling (weken in plaats van maanden). De frequentie kan op basis van ervaring naar boven of beneden aangepast worden.

Zodra de fase oranje of rood bereikt wordt, moet de oorzaak van het capaciteitsverlies vastgesteld worden via een analyse van de beschikbare meetdata. Soms zullen aanvullende metingen nodig zijn om een eenduidige oorzaak van het capaciteitsverlies aan te kunnen wijzen.

9.3 ANALYSE VAN EEN CAPACITEITSPROBLEEM

Als er eenmaal geconstateerd is dat er een capaciteitsprobleem is, moet via een analyse de oorzaak bepaald worden. De complexiteit van deze analyse is afhankelijk van de complexiteit van het systeem. Toch kan voor veel systemen een algemeen stappenplan gevolgd worden om de oorzaak van capaciteitsproblemen te achterhalen.

Voor het elimineren van oorzaken moet men eerst de makkelijkste en snelste stappen nemen. Dit kan per systeem verschillen.

Bij systemen die al jaren in gebruik zijn, is historische kennis en informatie een belangrijke bron. Raadpleeg deze altijd als eerste.

9.3.1 LOKALISEREN VAN HET PROBLEEM

Figuur 9.2 geeft het proces voor de initiële analyse van een capaciteitsprobleem. De eerste stap voor het identificeren van het probleem is een inventarisatie van de aanwezige meetdata en historische gegevens. Het is namelijk belangrijk om te weten of het capaciteitsprobleem plotseling ontstaan is, of dat het energieverlies over langere periode is uitgegroeid tot een capaciteitsprobleem.

Met name bij een plotselinge verandering van de systeemcapaciteit moet men nagaan of er iets gewijzigd is aan het systeem. Denk hierbij bijvoorbeeld aan:

- Vervuiling in de pompwaaier
- Erosie van de pompwaaier
- Instellingen van de regeling
- Stand van afsluiters
- Statische opvoerhoogte
- Wijzigingen elders in het systeem
- Tijdelijke werkzaamheden
- Industriële lozingen via het riool

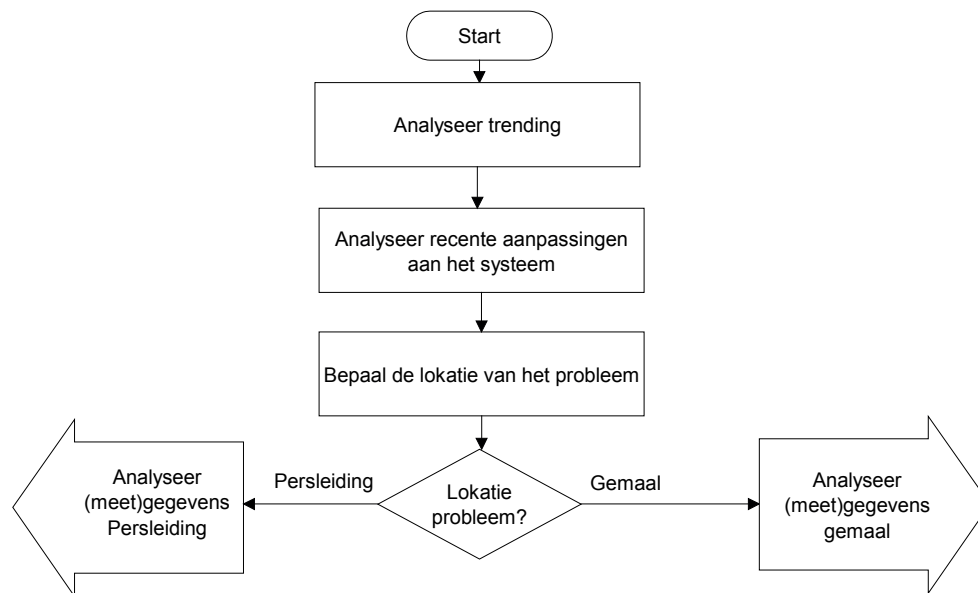
Controle van het gemaallogboek kan al een indicatie geven voor het probleem.

Bij een niet plotselinge verandering van het systeemgedrag is het ook raadzaam de onderhoudslogboeken en rapportages uit de voorliggende periode van alle gemalen deel uitmakend van het systeem, er op na te slaan.

Vergeet hierbij vooral niet de gemalen die eigendom zijn van derden. Industriële inprickers verdienen hierbij zeker extra aandacht.

Een ander aspect wat kan leiden tot een vermeend capaciteitsprobleem is een toename in de aanvoer. Controleer derhalve bij de rioolbeheerder of er wijzigingen hebben plaatsgevonden in het aanvoerend systeem.

FIGUUR 9.2 STROOMSCHEMA VOOR DE ANALYSE VAN EEN CAPACITEITSPROBLEEM



Door middel van de juiste meetdata kan bepaald worden of de oorzaak van het capaciteitsprobleem in het gemaal of in de persleiding gezocht moet worden. Paragraaf 6.2 geeft meer informatie met betrekking tot de te meten grootheden en locaties.

Om te bepalen of het capaciteitsprobleem zich voordoet in het gemaal of in de persleiding, moet minimaal de druk en debiet aan het begin van de persleiding en de druk aan het einde van de persleiding gemeten worden. Vervolgens wordt de weerstandskarakteristiek van de leiding hieruit berekend en deze kan vergeleken worden met het ontwerp of nul-meting. Indien de weerstandskarakteristiek niet significant afwijkt van deze referentie, zal de

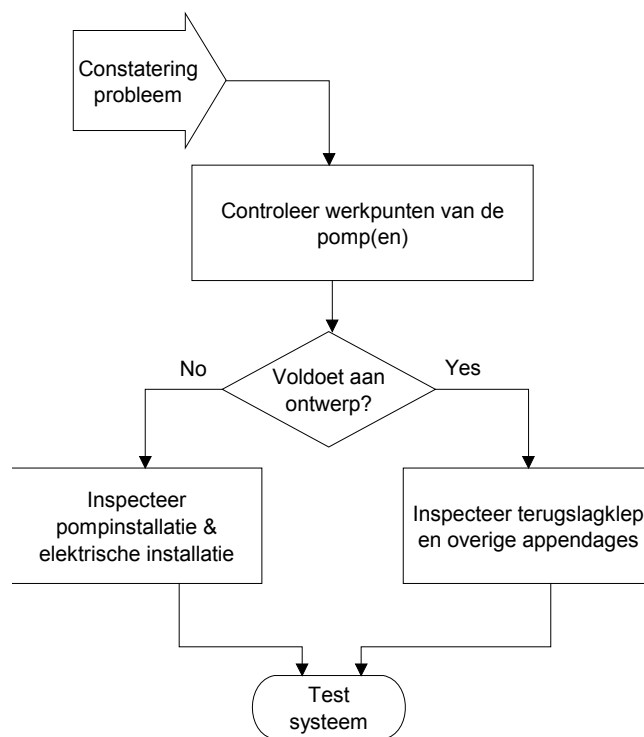
oorzaak van het capaciteitsprobleem in het gemaal gezocht moeten worden.

In sterk vertakte transportsystemen kan het voorkomen dat de capaciteit van de persleiding niet eenvoudig vast te stellen is, omdat er geen stationaire situatie is door het in- en uitschakelen van andere gemalen. In dit geval is het verstandig eerst het gemaal te analyseren voordat veel werk verricht wordt aan de leidinganalyse.

9.3.2 ANALYSE VAN HET GEMAAL

Indien de eerste analyse uitwijst dat de oorzaak van het probleem zich in het gemaal bevindt moeten er een verdere analyse uitgevoerd worden (Figuur 9.3). Door actuele meetdata te vergelijken met data van acceptatietesten (zie hoofdstuk 8) of gegevens van de fabrikanten kan veel informatie verkregen worden.

FIGUUR 9.3 STROOMSCHEMA VOOR DE ANALYSE VAN CAPACITEITSPROBLEMEN IN HET GEMAAL



Allereerst moeten de pompen gecontroleerd worden. Door de meetgegevens van de pomp (debiet, opvoerhoogte, toerental en opgenomen vermogen) te controleren aan de hand van de gegevens van een acceptatietest kan vastgesteld worden of de pomp nog aan de specificaties voldoet. Als dit niet het geval is dient de pompwaaier geïnspecteerd te worden op vervuiling en/of slijtage.

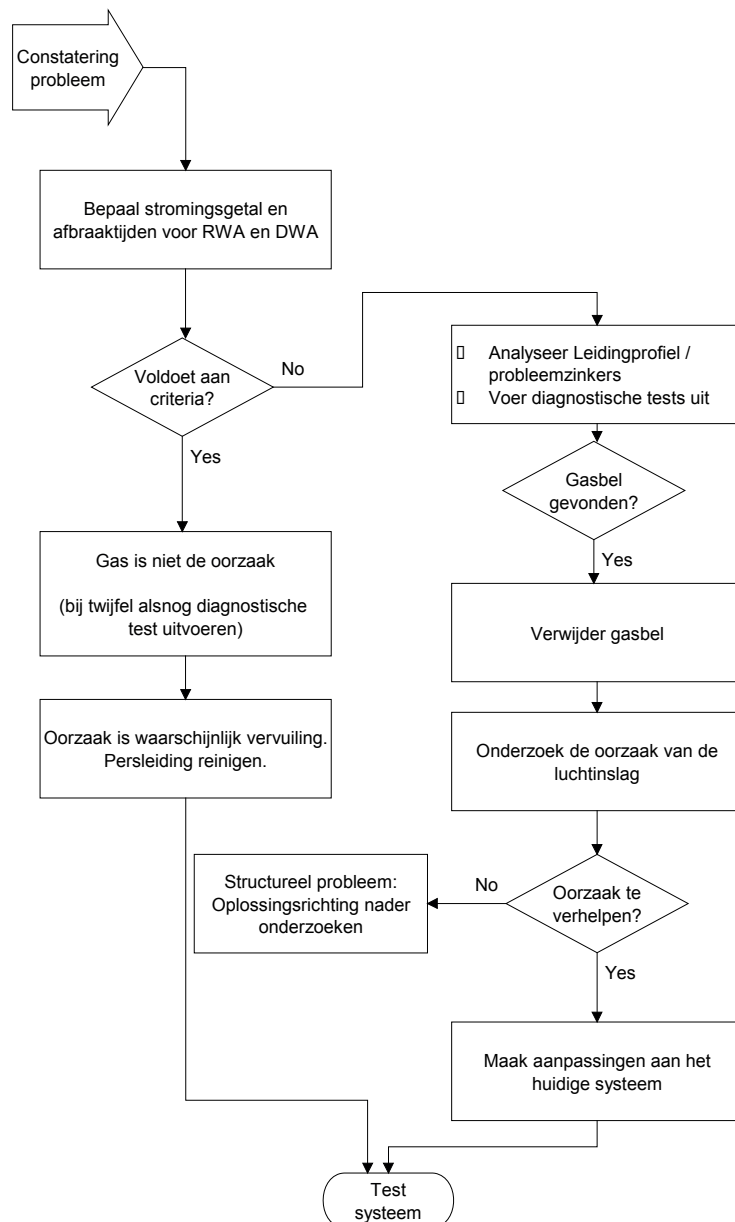
Als de analyse van de pomgegevens uitwijst dat deze aan zijn specificaties voldoet, ligt de oorzaak vaak bij de terugslagklep of de overige appendages van het gemaal. Vaak betekent dit dat een volledige inspectie van het gemaal nodig is.

9.3.3 ANALYSE VAN DE PERSLEIDING

Als de systeemkarakteristiek wel significant afwijkt, is de oorzaak nog niet eenduidig aan te wijzen. Controleer eerst de opvoerhoogte. Met name bij samengestelde persleidingsystemen kan de persdruk bij het gemaal veranderd zijn door een verandering aan een ander gemaal. De volgende stap is een analyse van het dynamische verlies. De verhoogde leidingweerstand kan twee oorzaken hebben: Vervuiling van de persleiding of problematische gasvolumes bij neergaande leidingdelen. In de praktijk wordt geschat dat 80% van de capaciteitsproblemen direct of indirect wordt veroorzaakt door gasophopingen.

Door verdere analyse kan de oorzaak van het capaciteitsverlies achterhaald worden (zie Figuur 9.4). Beschouw hierbij weer eerst de makkelijkste en snelste eliminatie stap. Een industriële lozer kan bijvoorbeeld verantwoordelijk zijn voor sterke vervuiling (scaling) van de leiding.

FIGUUR 9.4 STROOMSCHEMA VOOR DE CAPACITEITSANALYSE VAN DE PERSLEIDING



Aan de hand van het leidingprofiel kunnen de mogelijke locaties (neergaande leidingdelen) voor gasophopingen bepaald worden. Ook moet er gekeken worden naar locaties waar onderdruk kan ontstaan, omdat er ontgassing kan optreden bij lage drukken.

Voor elk van deze locaties moet vervolgens met behulp van paragraaf 3.3 het heersende stromingsgetal bepaald worden. Het stromingsgetal geeft een directe indicatie van de kans op gasproblemen voor een bepaalde hellingshoek.

Als de stromingsgetallen laag genoeg zijn om gasbellen op te laten hopen in de hoge punten van de leiding dient er een detectiemeting uitgevoerd te worden om de aanwezigheid, locatie en de grootte van de gasvolumes vast te stellen (Zie bijlage B). Deze meting kan uiteraard ook worden uitgevoerd ter bevestiging als de analyse uitwijst dat gasbellen zich niet kunnen ophopen in de leiding.

Er zijn drie opties om de gasvolumes uit de leiding te verwijderen:

1. ontluchten
2. stroming
3. piggen

Welke optie als eerste toegepast wordt is afhankelijk van de mogelijkheden die in het ontwerptraject zijn voorzien. Ook spelen bedrijfseconomische aspecten (tijd en geld) gemeoid met de operatie, een grote rol in de keuze en/of volgorde van de opties.

De eerste optie, de leiding ontluchten, is het eenvoudigst uit te voeren maar is uiteraard afhankelijk van de aanwezigheid van ontluchtingspunten op de leiding, toegankelijkheid van deze ontluchtingspunten en beschikbaarheid van personeel.

De gasvolumes kunnen ook door middel van stroming (optie 2) verwijderd worden. Hiervoor moet gedurende een bepaalde periode met een zo hoog mogelijk stromingsgetal gestroomd worden om de bellen uit de leiding te verwijderen. Om de bellen effectief te verwijderen wordt bij voorkeur gestroomd met minimaal een stromingsgetal $F > 0,9$ (NB: dit is afhankelijk van de hellingshoek van de leiding, zie paragraaf 3.3; het criterium voor gasvolume-transport).

Indien dit stromingsgetal niet gehaald wordt, zal de tijd die nodig is om de gasbel af te voeren drastisch toenemen (orde grootte; uren). Ook moet hierbij aandacht besteed worden aan het leidingprofiel, omdat de gasbellen van zinker naar zinker getransporteerd worden. Bij elke neergaande leiding bestaat het risico dat een nieuw gasvolume zich ophoopt.

Na het spoelen van de leiding dient een capaciteitsmeting uitgevoerd te worden om te bevestigen dat al het gas uit de leiding is verdwenen.

Een derde optie is de leiding piggen. Piggen met de juiste pig biedt garantie dat de leiding ook direct gas-vrij is. Een tweede voordeel is dat er een kleinere waterbuffer nodig is als bij het doorspoelen van de leiding. Ook bij het piggen geldt dat de effectiviteit van de schoonmaakactie gecontroleerd kan worden door gebruik van de detectiemethode.

Naast het verwijderen van het gasvolume uit de leiding moet er gekeken worden naar de oorzaak van het gasvolume. Door te voorkomen dat gas in de persleiding komt, kunnen veel kosten (zowel van het extra energieverlies als van de schoonmaak-acties) bespaard worden. De oorzaak van luchtinslag moet vaak gezocht worden in het gemaal.

Veel voorkomende oorzaken zijn: ontwerpfouten in be- en ontluchters voor de pompinstallatie (zie paragraaf 4.6), Luchtinslag in de ontvangstkelder (zie paragraaf 4.5.2) en kleine lekkages waar lucht in de leiding kan komen bij onderdruk. Deze kleine ontwerpfouten kunnen meestal met simpele aanpassingen opgelost worden.

Indien de oorzaak van de luchtinslag niet in het gemaal gevonden kan worden, zal het gehele systeem nauwkeurig geanalyseerd moeten worden.

9.3.4 NAZORG VAN CAPACITEITSPROBLEMEN

Als de locatie van de capaciteitsproblemen bekend is en een oplossing is gekozen en uitgevoerd, wordt bij voorkeur een nieuwe capaciteitsmeting uitgevoerd of een Prestatie-Indicator frequent geanalyseerd om de effectiviteit te toetsen.

Het is noodzakelijk om zowel het voorafgaande analyse traject als de oplossing en de effectiviteit hiervan vast te leggen, zodat bij toekomstige capaciteitsproblemen hiervan gebruik gemaakt kan worden. Ook dient de rapportage van het probleem en de oplossing hiervan als instructie voor toekomstige medewerkers binnen de organisatie.

Indien het capaciteitsverlies veroorzaakt wordt door te optimistisch ingeschatte randvoorwaarden tijdens het ontwerp, zullen de overgangscriteria tussen de drie fasen (zie paragraaf 9.2) of het ontwerp aangepast moeten worden. Ook dienen de uitgangspunten voor het ontwerp aangepast te worden, zodat dit probleem wordt voorkomen in toekomstige ontwerpen.

Het is wenselijk om na een korte periode (afhankelijk van de oorzaak van het capaciteitsprobleem) een tweede controle meting te doen. Een andere mogelijkheid is om gedurende deze periode de Prestatie indicator frequent te analyseren. Dit geeft de beheerder zicht op de snelheid waarmee de hydraulische capaciteit afneemt en dus op de benodigde frequentie van schoonmaken. Ook dient het als een bevestiging van zowel de effectiviteit van de oplossing als de analyse van het capaciteitsprobleem.

Hoe lang de periode tussen de twee controle metingen moet zijn is afhankelijk van de oorzaak van het capaciteitsprobleem. Voor gasproblemen is dit veel korter (orde grootte: meerdere weken) als voor vervuiling (orde grootte: enkele weken tot maanden). Het primaire doel van de tweede controle is om te kijken of de analyse van het probleem correct is.

Indien er bijvoorbeeld een capaciteitsprobleem verkeerd is geanalyseerd en vervuiling van de persleiding als oorzaak wordt aangewezen, wordt dit opgelost door middel van Pigging. Bij deze actie zijn ook alle gasvolumes uit de leiding verwijderd. Echter, omdat niet de oorzaak van de opgehoopde gasvolumes is verholpen, zal er een nieuw gasvolume ontstaan en dus binnen enkele dagen of weken opnieuw een capaciteitsprobleem optreden. Door de tweede meting (of een nieuwe signalering met behulp van de prestatie indicator) wordt het nieuwe capaciteitsprobleem op tijd vastgesteld en kan er geconcludeerd worden dat naast vervuiling ook gas de oorzaak was.

10

LITERATUURLIJST

- ANSI (1998) American national standard for pump intake design. ANSI-HI-9.8-1998
- Colebrook, C.F. White, C.M. (1937) The reduction of the carrying capacity of pipes with age. Journal of the institute of civil engineers
- Czarnota Z., Geise, M. (2004) Optimale vorm van de vuilwaterkelder van een rioolgemaal. Rioleringswetenschap 14: 79-86
- Deltares (1990 - 2011) Cursus Dynamisch Gedrag (Waterslag), Cursusreeks Hydrodynamica van Leidingssystemen, Delft, Deltares.
- Deltares (1990 - 2011) Cursus Pompen, Cursusreeks Hydrodynamica van Leidingssystemen, Delft, Deltares.
- Deltares (1990 - 2011) Cursus Kleppen, Cursusreeks Hydrodynamica van Leidingssystemen, Delft, Deltares.
- Fair G.M (1968). - Water purification and waste water treatment and disposal New York : Wiley, 1968
- Hager, W.H. (1999) Cavity outflow from a nearly horizontal pipe. International Journal of Multiphase Flow 25:349-364
- Kranendonk, M. (2007). Luchtinslag preventie. Technische Natuurkunde. Rijswijk, TH Rijswijk. Afstudeerverslag
- Kranendonk, M. (2007). Preventie van luchtinslag door rioolgemalen. Delft, WL | Delft Hydraulics. Meetrapport
- KU Leuven, Laboratorium Hydraulica (2004), Toelichting bij de Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringsystemen, KU Leuven.
- Lubbers, C. L. (2007). On gas pockets in wastewater pressure mains and their effect on hydraulic performance. Civil engineering and Geosciences. Delft, Delft University of Technology. PhD, 2007.
- NEN (1997), NEN-EN 1671:1997, Pressure sewerage systems outside buildings (Overdrukrioleringen buiten gebouwen).
- NEN (2008), NEN-EN 752:2008, Buitenriolering.

NEN (2011), NEN-EN 3650-1:2011, Eisen voor buisleidingsystemen – Deel 1: Algemeen.

Pothof, I.W.M. (2011), Co-current air-water flow in downward sloping pipes; transport of capacity reducing gas pocket in wastewater mains, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.

Pothof, I., Clemens, F. (2010), On elongated air pockets in downward sloping and inclined pipes, *J. Hydr. Research* 48(4), pp. 499 – 503. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2010.491651>

Pothof, I.W.M., Clemens, F.H.L.R. (2011), Experimental study of air-water flow in downward sloping pipes, *Int. J. Multiphase Flow* 37, 278 – 292. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.10.006>

Pothof, I.W.M., Kooij, C., Clemens, F.H.L.R. (2011a), Seven years of research in the joint industry project CAPWAT, Proceedings 12th Int. Conf. Urban Drainage (ICUD), 11 – 16 September 2011, Porto Alegre, pp. 1 – 9 (on CD-ROM)

Pothof, I.W.M., Tukker, M., Kooij, C., Clemens, F.H.L.R. (2011b), Guidelines on capacity reducing gas pockets in wastewater mains, Proceedings Computing and Control for the Water Industry 2011 (CCWI), 5 – 7 September 2011, Exeter, pp. 1 – 6 (on CD-ROM)

Prosser, M.J. (1977) The hydraulic design of pump sumps and intakes. Cranfield, Bedford. BHRA, 1977

Rajaratnam, N. and Muralidhar, D. (1964) End depth for circular channels. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 90.

Schilperoort, T. (1986) General considerations on hydrological networks. Design Aspects of Hydrological Networks. TNO Committee on Hydrological Research Publ. 35: 5-13.

Smit, A. (2006) Air entrainment with plunging jets. Civil engineering and Geosciences. Delft, Delft University of Technology. Master thesis.

Tukker, M. J. (2007). Energieverlies in dalende leidingen ten gevolge van gasbellen (head loss in downward pipes caused by gas pockets). Delft, Deltares | Delft Hydraulics, 2007

Wickenhäuser, M. (2008) Zweiphasenströmung in Entlüftungssystemen von Drukstollen. Mitteilungen 205, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), H-E Minor, Hrsg. ETH Zürich.

Wijdieks, J. (1978) Waterslagverschijnselen in Vloeistoftransportleidingen. Symposium 'Waterslag in PVC Leidingen'. Waterloopkundig Laboratorium, Delft

11

BIJLAGE

Lijst van Symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
a	-	Regressie constante
A	m^2	Doorsnede
b	m	Breedte
c_s	m^3/m^3	Verzadigingsconcentratie
d	m	Beldiameter
D	m	Diameter
e	m	Wanddikte
E	N/m^2	Elasticiteitsmodulus
g	m/s^2	Gravitatieversnelling
h	m	Drukhoogte
H	m	Energiehoogte
ΔH_{dyn}	m	Dynamisch energieverlies
ΔH_{gas}	m	Energieverlies door gasvolume
$\Delta H'$	-	Dimensieloos energieverlies
L	m	Lengte dalend been
L_k	m	Karakteristieke lengte
Δp	Pa	Drukverschil
P	Pa	Druk
P_v	Pa	Partitiele druk
Q_G	m^3/s	Gasdebiet
Q_t	m^3/s	Vloeistofdebiet
r	m	Straal
t	s	Tijd
T	$^{\circ}C$	Temperatuur
v	m/s	Stroomsnelheid
y_{min}	m	Kritische diepte
α	$^{\circ}$	Hellingshoek
λ	-	Darcy-Weisbach frictie-coëfficiënt
ρ_G	kg/m^3	Dichtheid van gas
ρ_L	kg/m^3	Dichtheid van vloeistof
σ	N/m	Oppervlaktespanning
σ	N/m^2	Tangentiële wandspanning
$\zeta_{i,loc}$	-	Energieverlies coëfficiënten voor lokale verliezen

A

THEORETISCHE ACHTERGROND

Voor de berekening van vloeistofbewegingen in gesloten leidingen is het van belang dat men bekend is met bepaalde vloeistofeigenschappen, basisvergelijkingen en optredende energieverliezen. Dit hoofdstuk probeert alle relevante theoretische kennis op een korte manier inzichtelijk te maken voor de gebruiker. Doordat de diepgang van dit hoofdstuk beperkt is, kan het voorkomen dat extra uitleg gewenst is. Om deze reden is aan het einde van elke paragraaf een literatuurlijst opgenomen.

A.1 VLOEISTOFEIGENSCHAPPEN

De vloeistofeigenschappen van water zijn weergegeven in Tabel A.1.

TABEL A.1 EIGENSCHAPPEN VAN WATER

Eigenschap	Waarde
Dichtheid	998 kg/m ³
Dynamische viscositeit	1,0 Pa s
Kinematische viscositeit	1,0 x 10 ⁻⁶ M ² /s
Compressibiliteitsmodulus	2,1 x 10 ⁹ N/m ²
Dampspanning (bij 20 °C)	0,017 bara
Oppervlaktespanning (schoon water)	0,072 N/m

A.1.1 DICHTHEID

De dichtheid (ρ) van een vloeistof wordt gedefinieerd als de massa per eenheid van volume [kg/m³]. De dichtheid is afhankelijk van de temperatuur en druk, maar onafhankelijk van de zwaartekracht versnelling (g , [m/s²]).

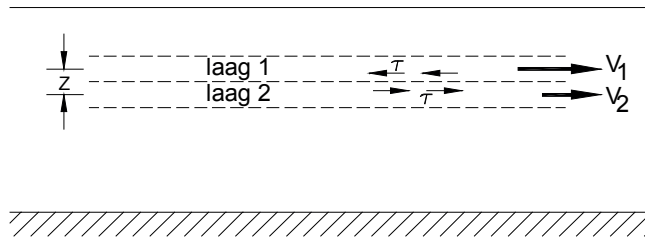
A.1.2 VISCOSITEIT

De dynamische viscositeit η van een vloeistof is een maat voor de schuifspanning τ die over elkaar schuivende vloeistoflagen in een gelaagde of laminaire stroming op elkaar uitoefenen [kg/ms²] of [N/m²]. Voor een Newtonse vloeistof kan de schuifspanning worden weergegeven door:

$$\tau = \eta \cdot \frac{v_1 - v_2}{z} \quad (\text{A.1})$$

De schuifspanning is evenredig met de gemiddelde snelheid en de viscositeit van de vloeistof (Figuur A.1). De dynamische viscositeit is afhankelijk van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur des te kleiner η en dus des te kleiner de schuifspanningen.

FIGUUR A.1 WEERSTAND TUSSEN VLOEISTOFLAGEN

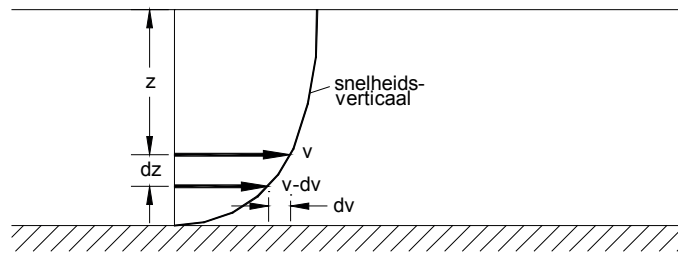


Indien twee lagen in een vloeistof op een oneindig klein afstandje dz van elkaar liggen en het snelheidsverschil tussen deze twee lagen is dv , kan de schuifspanning worden weergegeven door:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz} \quad (\text{A.2})$$

Waarin dv de snelheidsverandering, dz de diepteverandering en dv/dz de snelheidsgradiënt voorstelt

FIGUUR A.2 SNELHEIDSGRADIËNT



In plaats van de dynamische viscositeit η wordt in de vloeistofmechanica ook veel de kinematische viscositeit ν gebruikt [m^2/s]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{A.3})$$

A.1.3 COMPRESSIBILITEITSMODULUS

De samendrukbaarheid van de vloeistof wordt bepaald door de compressiemodulus K .

$$dP = -K \frac{dV}{V} \quad (\text{A.4})$$

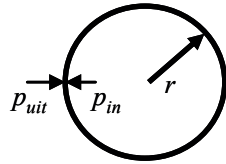
Vergelijking geeft het verband tussen drukstijging en volume verandering.

A.1.4 OPPERVLAKTESPANNING

Oppervlaktespanning (σ [N/m]) is gedefinieerd als een drukkracht die werkt op een grensvlak tussen een gas en een vloeistof. Deze drukkracht is in evenwicht met de weerstand van het grensvlak tegen vervorming (Figuur A.3). De relatie tussen het drukverschil en de oppervlaktespanning is weergegeven in vergelijking . Deze spanning wordt met name bepaald door de eigenschappen van de twee fasen, eventuele verontreinigingen, de temperatuur en de snelheid waarmee het grensvlak gevormd wordt.

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad (\text{A.5})$$

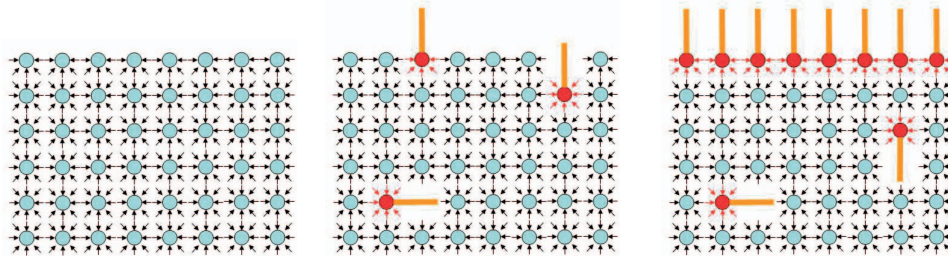
FIGUUR A.3 DRUKKRACHTEN OP EEN WATERDRUPPEL.



In water worden de H_2O -moleculen bij elkaar gehouden door de sterke waterstofbruggen. In de bulk zullen die krachten in alle richtingen even sterk zijn en elkaar opheffen. Bij het grensvlak is deze interactie veel zwakker door de afwezigheid van aangrenzende moleculen. De moleculen aan het oppervlak bevatten hierdoor een hogere energie.

Vetten en zepen hebben een hydrofiel deel dan makkelijk oplost in water en een hydrofoob deel dat slecht oplost in water. Het hydrofobe deel wil uit de watermatrix en de verontreiniging zal met een bepaalde snelheid (moleculaire diffusie) naar het grensvlak verplaatsen. Op het grensvlak zullen de krachten tussen de watermoleculen verder worden verzwakt met een verlaging van de oppervlaktespanning tot gevolg. Met een toenemende concentratie aan verontreinigingen zal de oppervlaktespanning verder afnemen totdat het hele grensvlak gevuld is. Dan wordt de laagste oppervlaktespanning gemeten.

FIGUUR A.4 VERONTREINIGINGEN MET EEN HYDROFOOB DEEL VERPLAATSEN NAAR HET GRENsvLAK (BOVEN).



Bij meting van de statische oppervlaktespanning wordt er een grensvlak gemaakt en gewacht tot de verontreinigingen zich hebben verplaatst naar het grensvlak.

Bij de dynamische meting wordt met verschillende snelheden een gasbelletje gevormd aan een capillair in de vloeistof. Bij een gasbelletje dat snel gemaakt wordt zullen de verontreinigingen in de vloeistof nog niet de mogelijkheid hebben gekregen om bij het gevormde grensvlak te komen. De gemeten oppervlaktespanning zal dan vrijwel gelijk zijn aan die van de zuivere vloeistof. De moleculaire diffusie van de verontreiniging bepaalt de snelheid waarmee het effect heeft op de oppervlaktespanning. Schoonmaakmiddelen zoals zepen zijn gemaakt om snel hun werk te doen en bestaan uit relatief kleine bewegelijke moleculen die al in minder dan een seconde effect hebben op de oppervlaktespanning. Vetten en eiwitten zijn meestal grotere loggere moleculen waarbij het effect pas na 5 à 10 seconde merkbaar is.

A.1.5 DAMSPANNING

De dampspanning (p_v) is de waarde van de absolute druk, waarbij de vloeistof verdampt [N/m^2] of [bara]. De dampspanning stijgt met toenemende temperatuur. De dampspanning van water bij 100 °C bedraagt 1,03 bara; de dampspanning bij 10 °C bedraagt slechts 0,012 bara. Verdamping die ontstaat door verhoging van temperatuur bij een constante druk noemt men koken. Als de verdamping ontstaat door verlaging van druk bij een constante temperatuur spreekt men van cavitatie. Als de absolute druk in een drinkwaterleiding met water van 10 °C tot 0,012 bara (bijna vacuüm) is gedaald treedt cavitatie op.

A.2 BASISVERGELIJKINGEN

A.2.1 GETAL VAN REYNOLDS

Reynolds toonde aan dat er twee stromingstypen bestaan: laminaire of gelaagde stromingen en turbulente stromingen. Het stromingstype is afhankelijk van de stroomsnelheid v en de kinematische viscositeit ν [m²/s]. Hoe groter de stroomsnelheid v [m/s] en hoe minder viskeus de vloeistof, des te turbulenter is de stroming. Reynolds heeft het verband tussen deze twee grootheden weergegeven in het dimensieloze getal van Reynolds Re [-]:

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (\text{A.6})$$

waarin L [m] de karakteristieke lengte met betrekking tot de geometrie van de beschouwde leiding is.

Zolang de snelheid gering is, is er sprake van gelaagde of laminaire stroming. De kinematische viscositeit van de vloeistof zorgt er voor dat verstoringen van het stroombeeld worden gladgestreken. De eerste wervels in het laminaire stroombeeld ontstaan daar waar

de snelheidsgradiënt $\frac{dv}{dz}$ groot is en de stabiliserende werking van de wand niet overheerst, op zekere afstand van de wand. De wervels zullen het hele stroombeeld gaan vullen, uitgezonderd de laminaire grenslaag aan de wand. De stroming is dan turbulent geworden.

Voor volledige gevulde ronde buizen wordt veelal de diameter D [m] als karakteristieke lengte gebruikt en voor open goten, kanalen en rivieren de hydraulische straal R [m]. Deze laatste is gelijk aan de doorstroomd oppervlak A [m²] gedeeld door de natte omtrek O [m] (contactlengte met bodem en wand):

$$R = \frac{A}{O} \quad (\text{A.7})$$

Voor zowel een volledig gevulde als een half gevulde buis geldt dat $R = \frac{1}{4}D$. Hieruit volgt het Reynolds getal voor een (deels) gevulde buis:

$$Re = \frac{4 \cdot v \cdot R}{\nu} \quad (\text{A.8})$$

Nikuradse toonde aan dat bij Reynolds getallen groter dan 2320 het overgangsgedrag van laminaire naar turbulente stroming begint. Een stroming waarvoor $Re < 2320$ is altijd laminair. Een stroming met $2320 < Re < 4000$ kan zowel laminair als turbulent zijn, afhankelijk van de voor-geschiedenis van de stroming. Indien $Re > 4000$ is de stroming altijd turbulent.

A.2.2 WET VAN BERNOULLI

De wet van Bernoulli volgt uit de wet van behoud van (mechanische) energie:

$$E_{tot} = E_{pot} + E_{kin} = mgh + \frac{1}{2}mv^2 = const. \quad (\text{A.9})$$

Deling door mg geeft:

$$E = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{A.10})$$

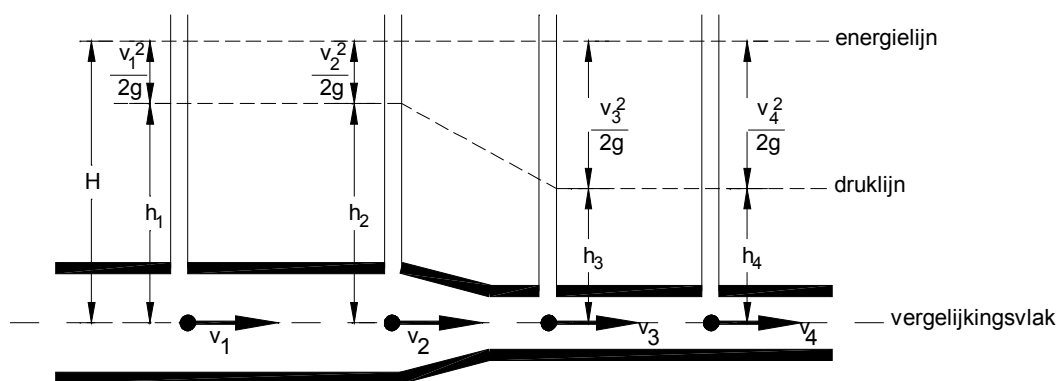
Waarin:

E	energiehoogte of energieniveau van de vloeistof (constant)	[m]
$h_i = \frac{p_i}{\rho g}$	drukhoogte (waterkolom in een stijgbuis geplaatst in dat punt)	[m]
z	plaatshoogte (afstand van beschouwde punt tot het vergelijkingsvlak)	[m]
h + z	piëzometrisch niveau ten opzichte van het gekozen vergelijkingsvlak	[m]
$\frac{v^2}{2g}$	snelheidshoogte	[m]

Dit is de wet van Bernoulli. In woorden: in een ideale vloeistof is de som van de piëzometrische hoogte en de snelheidshoogte langs een stroomlijn gelijk aan de energie-hoogte.

De lijn die alle energieniveaus van een bepaalde stroomlijn met elkaar verbindt noemt men de energielijn. De lijn getrokken door de piëzometrische niveaus is de druklijn.

FIGUUR A.5 ENERGIEHOOGTE EN DRUKHOOGTE



De wet van Bernoulli is alleen geldig als:

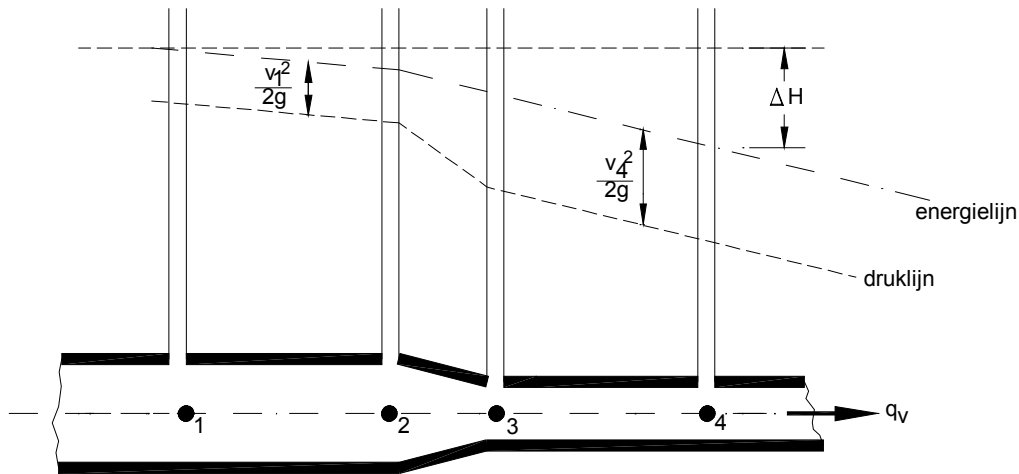
- alle beschouwde punten op één stroomlijn liggen,
- er tussen de punten geen energie wordt toegevoegd of onttrokken aan de stroming en
- de snelheid in een gegeven punt constant is (stationaire stroming).

Als er toch energie toevoer of onttrekking plaats vindt, bijvoorbeeld door wrijving, gaat vergelijking (A. 10) over in:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \Delta H_{1,2} \quad (\text{A.11})$$

waarin ΔH [m] het energiehoogteverschil is.

FIGUUR A.6 ENERGIE- EN DRUKHOOGTE LIJN MET WRIJVING



A.3 TRANSPORTVERLIEZEN

Het transporteren van een willekeurige vloeistof door een leiding kost energie. Deze energieverliezen kunnen beschreven worden door de volgende vergelijking:

$$\Delta H = \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{A.12})$$

Waarin: ξ [-] een nader te bepalen verliescoëfficiënt is, afhankelijk van de oorzaak van het verlies. Bovenstaande vergelijking stelt in feite dat alle verliezen evenredig zijn met de snelheidshoogte $\frac{v^2}{2g}$ van de vloeistof. Hiernaast kan er nog onderscheid gemaakt worden tussen vertragingverliezen en wrijvingsverliezen.

A.3.1 WRIJVINGSVERLIEZEN

Wrijving wordt veroorzaakt door de weerstand (de “schuifspanning” langs de buiswand) die de stromende vloeistof ondervindt. Dit komt tot uiting in een drukverschil over de leiding. Het drukverschil (ofwel drukhoogteverschil, uitgedrukt in meter) ΔH wordt gegeven door de wet van Darcy-Weisbach:

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{A.13})$$

Of uitgedrukt in debiet:

$$\Delta H = \frac{\lambda L}{D} \frac{\left(\frac{4Q}{\pi D^2}\right)^2}{2g} = \frac{8\lambda L}{\pi^2 g D^5} Q^2 \quad (\text{A.14})$$

De Wrijvingscoëfficiënt λ is afhankelijk van de vloeistofeigenschappen en de buiseigenschappen. De grootste invloed op deze coëfficiënt komt van de equivalente wandruwheid k .

De Equivalente wandruwheid is oorspronkelijk geïntroduceerd door Nikuradse (Nikuradse, (1933)). Nikuradse heeft metingen verricht aan leidingen beplakt met zandkorrels van dezelfde grootte (gelijkverdeeld over de binnenkant van de leiding). Zowel de leidingdiameter als de diameter van de zandkorrels is gevarieerd.

Vervolgens zijn er experimenten gedaan door Colebrook en White (Colebrook (1937)). Zij gebruikten commercieel beschikbare buizen waarbij de ruwheid niet gelijkmatig verdeeld

is over de buiswand. Colebrook en White gaven de volgende vergelijking voor het verband tussen de Darcy wrijvingsfactor en de wandruwheid:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot D} \right) \quad (\text{A.15})$$

Waarin Re het Reynolds getal voorstelt.

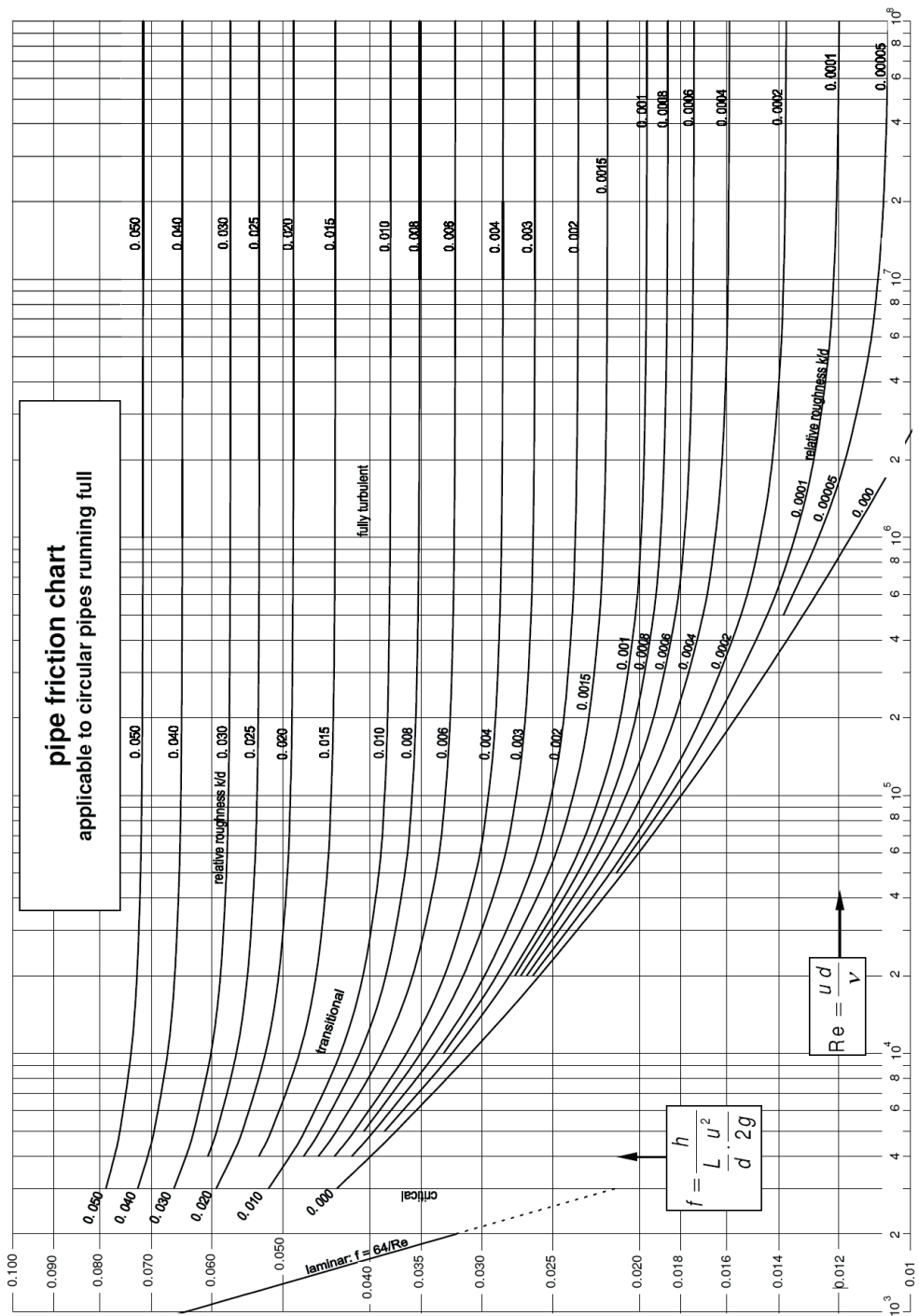
Bij het ontwerp van afvalwater transportleidingen wordt over het algemeen een wandruwheid k gehanteerd van 0,5 – 1 mm. Andere waarden voor k vind u in tabel A. 1

Vergelijking (A. 15) is een impliciete vergelijking: de wrijvingscoëfficiënt λ staat zowel links als rechts van het = teken. Een dergelijke formule is op te lossen met de computer. Zonder deze hulpmiddelen is het Moody diagram een handig gereedschap. Voor het complete stromingsgebied van laminair tot turbulent is de wrijvingscoëfficiënt λ af te lezen. Na berekening van het Reynolds getal en de vaststelling van de relatieve wandruwheid $\frac{k}{D}$ kan λ afgelezen worden.

TABEL A.1 WANDRUWHEID VOOR VERSCHILLENDE MATERIALEN

Materiaal	k-waarde in mm
Kunststof buis van kleine diameter geasfalteerde asbest-cement buis centrifugaal geasfalteerde gecentrifugeerde gietijzeren en naadloos stalen buis	0,01
kunststof bekleding geasfalteerde getrokken stalen buis gladde asbest-cement buis	0,02
nieuwe naadloos stalen buis spanbetonbuis volgens Freyssinet geasfalteerde gecentrifugeerde gietijzeren en gelaste stalen buis P.V.C. buis van grote diameter	0,05
asbest-cement buis gescheurde cement hoofdleidingen volgens D.V.G.W. nieuwe verzinkt stalen buis geasfalteerde gietijzeren buis	0,1
licht geroest naadloos stalen buis nieuwe gelaste stalen buis gresbuis nieuwe gecentrifugeerde gietijzeren buis spanbeton gladde rioolleiding, recht en zonder aansluitingen	0,2
matig geroeste naadloos stalen buis gecentrifugeerde cement bekleding gladde rioolleiding met aansluitingen distributieleidingen volgens D.V.G.W. gecentrifugeerde betonbuis nieuwe gietijzeren buis gladde beton matig geroeste gelaste stalen buis	0,5
betonbuis gladde draineerleiding beton rechte rioolleiding zonder aansluiting nieuwe geklonken stalen leiding sterk geroeste naadloos stalen buis gietijzeren buis met lichte pokvorming	1
rioolleiding met aansluitingen sterk geroeste gelaste stalen buis poreuze betonnen draineerleiding nieuwe geklonken stalen leiding met overlap ruwe beton	2
sterk geroeste geklonken stalen leiding gietijzeren buis met sterke pokvorming sterk geroeste geklonken stalen leiding met overlap gietijzeren buis met zeer sterke pokvorming	5

FIGUUR A.7 MOODY DIAGRAM



A.3.2 VERTRAGINGSVERLIEZEN

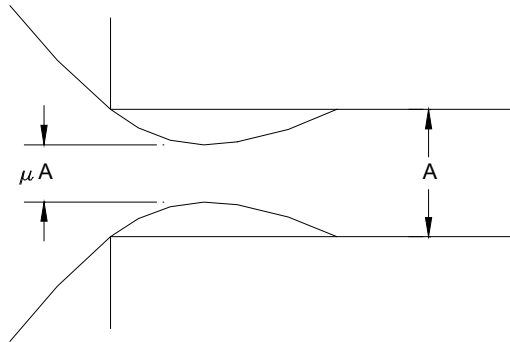
Vertragsingsverliezen zijn het gevolg zijn van het feit dat bij vermindering van de stroomsnelheid de kinematische energie niet volledig kan worden omgezet in potentiële energie. Een deel van de kinematische energie is namelijk nodig voor de aandrijving van wervels en neren die zijn ontstaan doordat de stroomlijnen de wand niet meer kunnen volgen.

Zoals al gesteld kunnen vertragsingsverliezen worden berekend met vergelijking (A. 12) Afhankelijk van de oorzaak van de vertraging is de coëfficiënt ξ vast te stellen die hoort bij de hieronder beschreven karakteristieke verliessituaties in een leidingsysteem.

Intreeverliezen

Bij binnenstromen van een vloeistof treedt contractie (μ) op welke een verlies teweeg brengt. Deze contractie (insnoering van de vloeistofstraal) is een stromingsweerstand.

FIGUUR A.8 CONTRACTIE



De contractiecoëfficiënt μ wordt bepaald door de afronding van de instroomopening en heeft de volgende relatie met ξ_i :

$$\mu = \frac{1}{1 + \sqrt{\xi_i}} \rightarrow \xi_i = \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right)^2 \quad (\text{A.16})$$

TABEL A.2 COEFFICIENT ξ VOOR VERSCHILLENDE CONSTRUCTIES

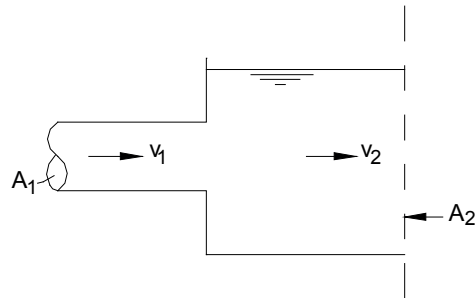
Type instroming	Schets van de constructie	ξ_i	m
scherpe hoeken		0.4 ... 0.5	0.58...0.61
naar binnen uitstekend		0.8 ... 1.0	0.5...0.53
afgeschuinde hoeken		0.2 ... 0.3	0.65...0.69
afrondingen met kleine straal		0.1	0.75
afrondingen met grote straal		0	1
scherp en met hoek a		$0.5 + 0.32 \cos a + 0.2 \cos 2a$	

Uittreeverliezen

Bij een ongehinderde uitstroming van een vloeistof gaat de uiteindelijk gehele snelheidshoogte verloren, omdat de snelheid een bepaalde tijd na uitstroming nul wordt. Door geleidelijke of getrapte verwijding kan het uittreeverlies gereduceerd worden. De grootte van de uittreeverliescoëfficiënt ξ_u wordt bepaald door de verhouding van de oppervlakte van de stroombuis A_1 [m²] en de oppervlakte van het profiel na uitstroming A_2 [m²]:

$$\xi_u = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \tag{A.17}$$

FIGUUR A.9 OPPERVLAKTE VERHOUDING



Bochtverliezen

Volgens Hütte is de coëfficiënt voor bochtverliezen een functie van de waarde van de bochtstraal gedeeld door de buisdiameter. ξ is hierbij onafhankelijk van de lengte van het bochtstuk, zolang de bochtstraal r constant blijft. Voor een cirkelvormige leiding geldt:

$$\xi = 0,13 + 0,16 \left(\frac{D}{r}\right)^{3,5} \tag{A.18}$$

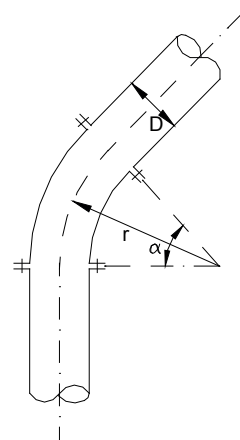
Voorleidingen met een rechthoekig doorsnede geldt:

$$\xi = 0,124 + 0,274 \left(\frac{D}{r}\right)^{3,5} \tag{A.19}$$

TABEL A.3 COËFFICIËNT X VOOR BOCHTVERLIEZEN VOOR EEN CIRKELVORMIGE LEIDING

$\frac{r}{D}$	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9
x	1,94	0,29	0,17	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

FIGUUR A.10 DEFINITIE VAN DE BOCHTSTRAAL r , BUISDIAMETER D EN HOEK α



Volgens Idelchik is de coëfficiënt voor bochtverliezen een functie van de bochthoek, de waarde van de bochtstraal gedeeld door de buisdiameter en mogelijk het Reynolds getal.

Voor bochtverliezen in een cirkelvormige leiding met $\frac{r}{D} < 3$ geldt dat $\xi = A \cdot B$, met:

α	≤ 70	90	≥ 100
A	$0,9 \sin(\alpha)$	1	$0,7 + 0,35 (\alpha/90)$
$\frac{r}{D}$	0,5 - 1,0		$> 1,0$
B	$0,21 \cdot \left(\frac{r}{D}\right)^{-2,5}$		$0,21 \cdot \left(\frac{r}{D}\right)^{-0,5}$

Voor bochtverliezen in een cirkelvormige leiding met $\frac{r}{D} \geq 3$ geldt:

$$\xi = 0,0175 \cdot A \cdot \alpha \cdot \frac{r}{D} \tag{A.20}$$

	$50 < \text{Re} \cdot \sqrt{\frac{D}{2r}} < 600$	$600 < \text{Re} \cdot \sqrt{\frac{D}{2r}} < 1400$	$1400 < \text{Re} \cdot \sqrt{\frac{D}{2r}} < 5000$
A	$\frac{20}{\text{Re}^{0,65}} \left(\frac{D}{2r}\right)^{0,175}$	$\frac{10,4}{\text{Re}^{0,55}} \left(\frac{D}{2r}\right)^{0,255}$	$\frac{5}{\text{Re}^{0,45}} \left(\frac{D}{2r}\right)^{0,275}$

Knikverliezen

Volgens Hütte is de coëfficiënt voor knikverliezen afhankelijk van de knikhoeck. Voor een leiding met een diameter van 30 mm geldt:

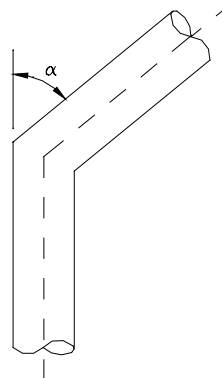
$$\xi = \sin(0,5 \cdot \alpha)^2 + 2 \cdot \sin(0,5 \cdot \alpha)^4 \tag{A.21}$$

Als de diameter kleiner is, wordt ξ groter.

TABEL A.4 COËFFICIËNTEN X VOOR KNIKVERLIEZEN VOOR EEN LEIDING MET DIAMETER = 30 MM

α	5°	10°	15°	20°	30°	40°	45°	60°	80°	90°	100°	120°	140°	160°
ξ_k	0,00	0,01	0,02	0,03	0,08	0,14	0,19	0,38	0,75	1,00	1,28	1,88	2,44	2,85

FIGUUR A.11 DEFINITIE VAN DE KNIKHOEK



Verliezen ten gevolge van vernauwing en verwijding van de buis

De verliezen ten gevolge van vernauwing en verwijding van buisleiding zijn afhankelijk van de oppervlakte doorstroombrofielen.

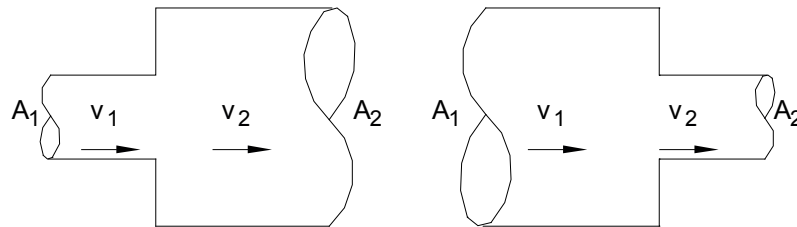
Voor een abrupte verwijding geldt:

$$\xi_{v_2} = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \quad (\text{A.22})$$

$$\xi_{v_1} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \quad (\text{A.23})$$

Het uittreeverlies is $\Delta H_v = \xi_{v_1} \cdot \frac{v_1^2}{2g}$ of $\Delta H_v = \xi_{v_2} \cdot \frac{v_2^2}{2g}$.

FIGUUR A.12 OPPERVLAKTE DOORSTROOMPROFIELEN



Een abrupte vernauwing is vergelijkbaar met een intreeverlies. Het verlies wordt dus vooral bepaald door de geometrie van de vernauwing, die tot een bepaalde contractie μ leidt.

$$\xi_2 = \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right)^2 \quad (\text{A.24})$$

A.4 ONTVANGSTKELDERS EN INLAATWERKEN

A.4.1 VUISTREGELS VOOR ONTVANGSTKELDERONTWERP

Voor de opstelling van pompen in zuigkelders zijn vele standaard oplossingen beschikbaar, als bijvoorbeeld samengevat door bijv. Prosser in "The hydraulic design of pump sumps and intakes en de Hydraulic Institute Standards for centrifugal and rotary pumps".

De eisen waaraan een pompkelder moet voldoen zijn:

- Symmetrische keldervorm.
- Geen dode hoeken.
- Juiste opstelling van de zuigmond ten opzichte van bodem en wanden.

De volgende vuistregels voor afmetingen van pompcompartimenten en de locatie van de pomp zelf gelden voor verticale pompcompartimenten die geplaatst zijn in pompcompartimenten. Deze zijn gebaseerd op de ANSI standaard. De maten worden dimensieloos gemaakt door ze uit te drukken in veelvoud van de zuigmonddiameter.

A.4.1.1 BODEMSPELING

De aanbevolen bodemspeling van de pomp is 0.3 tot 0.5 maal de zuigmonddiameter. Een grotere speling kan resulteren in instabiele stroming naar de waaier. Een kleinere speling leidt tot grotere snelheden onder de zuigmond. Dit kan leiden tot loslating van de stroming van de zuigmond hetgeen resulteert in een niet-uniform snelheidsprofiel bij de intree van de waaier.

A.4.1.2 AFSTAND TOT DE ACHTERWAND

De aanbevolen afstand van de as van de pomp tot de achterwand is 0.75 maal de zuigmond-diameter. Op basis van praktijkervaring wordt door Deltares vaak gewerkt met een afstand tussen de 0.75 en 1 maal de zuigmonddiameter. Een grotere afstand geeft aanleiding tot stilstaand water achter de pomp. Stilstaand water is instabiel en kan leiden tot vortex- en tornadovorming. Een kleinere afstand kan leiden tot slechte voeding van de waaier aan de achtermuurzijde. Dit kan leiden tot een niet-uniform snelheidsprofiel bij de intree van de waaier.

A.4.1.3 BREEDTE VAN HET POMPCOMPARTIMENT

De geometrie en afmetingen van de pompcompartimenten moeten een stabiele en uniforme voeding vanuit alle richtingen van de zuigmond van de pomp geven. De breedte van het pompcompartiment heeft een grote invloed op het zuiggedrag van de pomp. De aanbevolen breedte van het pompcompartiment is 2 maal de zuigmonddiameter van de pomp. Een kleinere breedte geeft grotere stroomsnelheden richting de pomp, hetgeen kan leiden tot grotere prerotatie en vortex vorming. De obstructie van het pomphuis wordt relatief groter zodat het water moeilijker om de pomp kan stromen om goed van de achterkant te kunnen voeden.

A.4.1.4 LENGTE VAN HET POMPCOMPARTIMENT

De aanstroming van de pomp moet recht van voren zijn en niet onder een hoek. Een bepaalde rechte lengte voor de pomp moet deze aanstroming garanderen. In het algemeen wordt een lengte van 5 maal de zuigmonddiameter (of meer) bovenstrooms van de pompen aangehouden. Wanneer het gaat om een pompkelder met meer pompen zijn vaak een distributiekamer en filtercompartimenten aanwezig. Wanneer een filtercompartiment gesloten is, stroomt het water uit de ander filtercompartimenten onder een hoek naar pompcompartimenten. Dit kan aanleiding geven tot sterke prerotatie. In zo'n geval wordt een lengte van 6 maal de zuigmonddiameter gekozen om de scheve aanstroming te corrigeren.

A.4.1.5 SCHEVE WANDEN (ZIJWANDEN / VLOER)

Indien scheve wanden aanwezig zijn in de pompkelder (bijvoorbeeld een oplopende keldervloer), dan dient de hoek ten opzichte van de horizontaal of vertikaal minder dan tien graden te zijn. Bij grotere hoeken is het risico groot op loslating, wervelvorming en instabiliteiten in de aanstroming.

A.4.1.6 ONDERDOMPELDIEPTE

Indien een pomp direct op een zuigkelder is aangesloten, moet de zuigmond van de pomp voldoende diep onder de waterspiegel worden opgesteld om luchtaanzuiging te voorkomen.

De benodigde onderdempeldiepte die nodig is om luchtaanzuiging te vermijden is een functie van het Froudegetal, gebaseerd op de snelheid en diameter van de zuigmond. Dit Froudegetal is als volgt gedefinieerd:

$$Fr_D = \frac{V_D}{\sqrt{gD}} \quad (\text{A.25})$$

Fr_D	=	Froude gebaseerd op de zuigmond van de pomp	[-]
V_p	=	snelheid bij het begin van de zuigmond	[m/s]
G	=	zwaartekrachtsversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]
D	=	zuigmonddiameter	[m]

In de literatuur zijn correlaties bekend voor het bepalen van de benodigde onderdompeldiepte. Een van deze correlaties komt uit de ANSI/HI 9.8 1998 standaard voor schaalmodellering van pompkelders. Deze standaard is wereldwijd geaccepteerd voor het testen van pompkelders in een schaalmodel. Deze correlatie is gebaseerd op een breed pakket aan experimentele pompkelderdata en luidt:

$$S_{ANSI} / D = 1 + 2.3Fr_D \quad (A.26)$$

Bovenstaande correlatie is een richtlijn, wat wil zeggen dat er een zekere spreiding bestaat. Dit is afhankelijk van het pompkelderontwerp en specifieke aanstroming. Soms wordt daarom een zekere bandbreedte aangegeven rondom de ANSI onderdompeldiepte. Deltares hanteert een bandbreedte op basis van opgedane kennis en ervaring uit pompkelderprojecten, aangeduid met Supper en Slower:

$$S_{lower} / D = 1 + 2Fr_D \quad (A.27)$$

$$S_{upper} / D = 1.5 + 2.5Fr_D \quad (A.28)$$

Als we aannemen dat het debiet gelijk blijft, zien we dat de kritische onderdompeldiepte groter wordt wanneer voor een kleinere zuigmonddiameter gekozen wordt. Tabel A.2 laat een getallenvoorbeeld zien van de benodigde onderdompeldiepte van de zuigmond van 2 pompen met verschillende zuigmonddiameter. Tabel A.2 laat zien dat de inlaatsnelheid ten opzichte van de zuigmonddiameter van pomp 1 relatief groter is dan voor pomp 2. Dit resulteert in een groter Froudegetal voor pomp 1. Het gevolg is een hogere kritische onderdompeldiepte voor pomp 1 met een kleinere zuigmonddiameter.

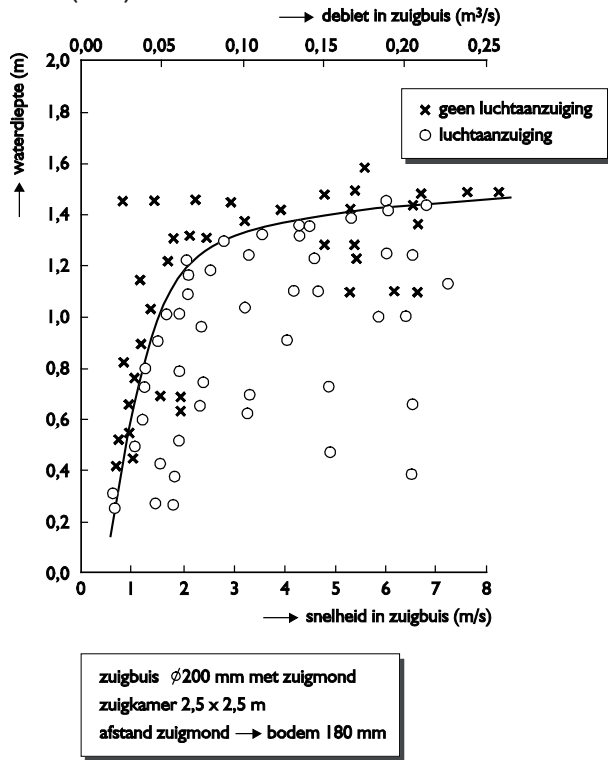
TABEL A.2 BENODIGDE ONDERDOMPELDIEPTEAANSTROMING VAN DE POMPEN IN POMPKELDERS

Pomp	Debiet [m ³ /h]	zuigmond		Onderdompeldiepte		
		Diameter [m]	Snelheid [m/s]	S_{lower} [m]	S_{ANSI} [m]	S_{upper} [m]
1	15.530	1.300	3.25	3.64	4.03	4.44
2	15.530	1.600	2.14	3.36	3.68	4.64

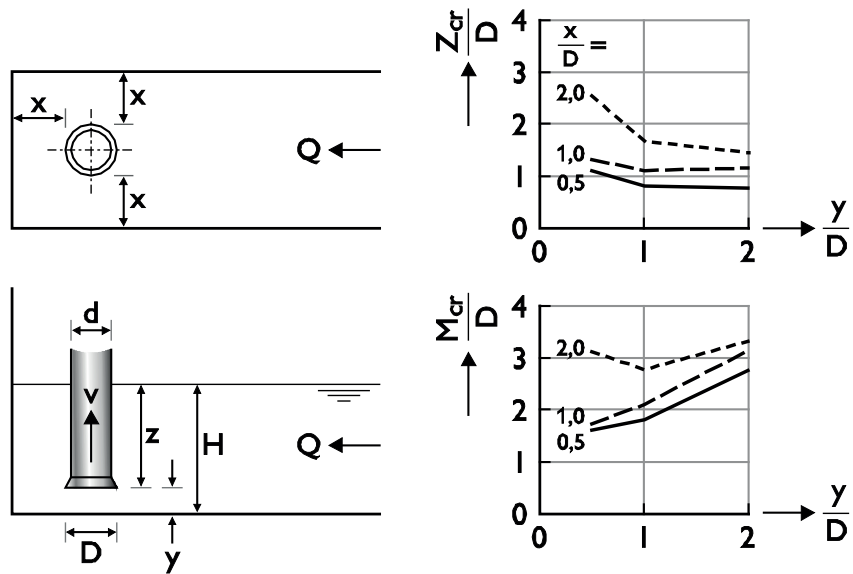
Ter illustratie: Figuur A.13 laat het verband zien (bepaald uit experimenten) tussen wel en geen luchtaanzuiging voor een bepaalde pomp en pompcompartiment (zuigkamer) als functie van stroomsnelheid in de zuigbuis en waterdiepte. Hieruit blijkt dat de benodigde onderdompeldiepte toeneemt bij hogere zuigsnelheden.

Figuur A.13 geeft onderzoeksresultaten weer van de invloed verhouding van pompcompartimentafmetingen op luchtaanzuiging. Voor een breedte van 2D en een bodemspeling van 0.5 D (is X/D = 0.5 en Y/D = 0.5 in Figuur A.14) is de benodigde onderdompeldiepte het laagst.

FIGUUR A.13 RESULTATEN VAN EEN METING TER BEPALING VAN HET VERBAND TUSSEN DE BENODIGDE WATERDIEPTE EN HET AFZUIG(POMP) DEBIET



FIGUUR A.14 BENODIGDE WATERDEKKING RESPECTIEVELIJK TOTALE WATERDIEPTE TER VOORKOMING VAN LUCHTAANZUIGING IN EEN RECHT AANSTROOMKANAAL ALS FUNCTIE VAN DE PLAATS EN GROOTTE VAN DE ZUIGMOND



modelgegevens:

$d = 100 \text{ mm}$	$Q = 14 \text{ l/s}$	$\frac{v}{\sqrt{gd}} = 1,8$
$D = 160 \text{ mm}$	$v = 1,8 \text{ m/s}$	

De kritische waterdekking waaronder luchtaanzuiging optreedt blijkt ook afhankelijk te zijn van de aanstroming. Figuur A.15 laat experimentele resultaten zien die uitwijzen dat de benodigde onderdempeldiepte drastisch toeneemt wanneer de aanstroming asymmetrischer wordt (b/B kleiner wordt). In aansluiting hierop laat Figuur A.16 zien dat ook de positie van de zuigmond invloed heeft op de kritische waterdekking. In het ontwerp van het beproefde pompcompartiment blijkt dat de positie van de zuigmond vlak langs de wanden van het compartiment het meest voordelig is (meest uniforme aanstroming). De meest nadelige lokatie is het centrum van het pompcompartiment, omdat de stroming om dit centrum heen draait. Uit deze experimentele resultaten blijkt dat gestreefd moet worden naar een zo uniform mogelijk aanstroming van de pomp.

A.4.1.7 SAMENVATTING VAN DE VUISTREGELS

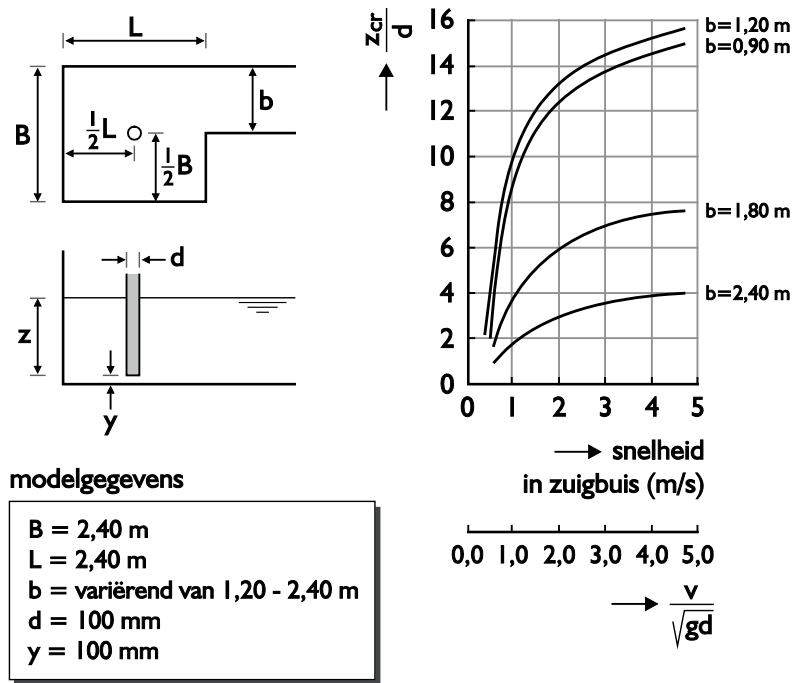
In onderstaande tabel staat een samenvatting van de hierboven genoemde vuistregels voor het ontwerp van het pompcompartiment.

	Aanbevolen dimensie uitgedrukt in zuigmonddiameter (D)
Bodemspeling	0.3 - 0.5 D
Afstand pompas tot de achterwand	0.75 - 1.0 D
Breedte pompcompartiment	2.0 D
Lengte pompcompartiment	> 5D
Scheve wanden	< 10°
Onderdempeldiepte	$D(1+2.3Fr)$

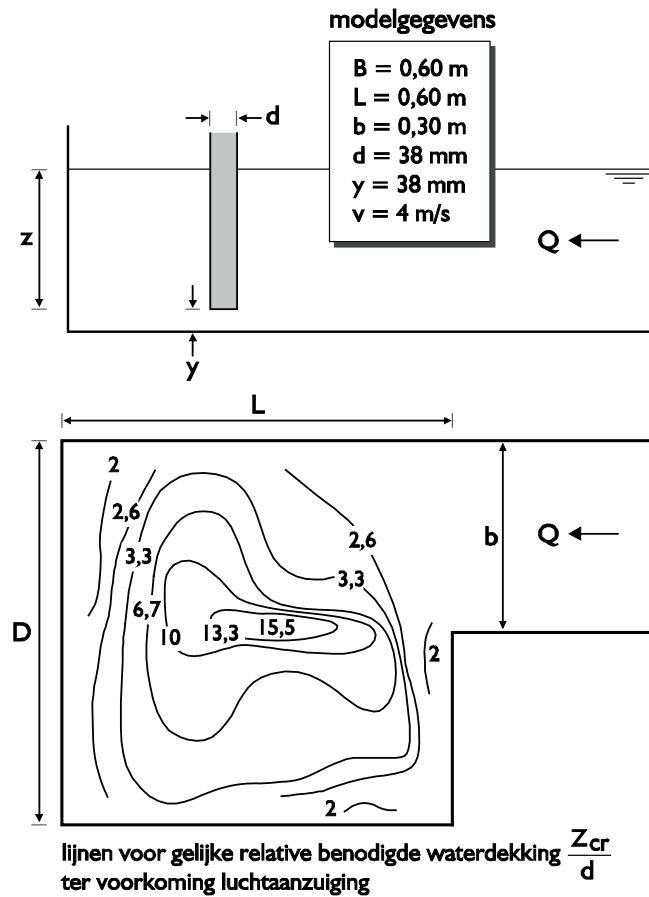
Voorbeelden van pompopstellingen zijn gegeven in Figuur A.17 en Figuur A.18. De afmetingen van de kelder zijn uitgedrukt in de diameter van de zuigmond. Dergelijke opstellingen werken naar tevredenheid indien de snelheidsverdeling op een afstand van 3 D bovenstrooms van de pompen gelijkmatig is en de gemiddelde snelheid niet meer dan 0,3 m/s bedraagt. Bij meerdere pompen wordt een juiste opstelling moeilijker (Figuur A.18).

Vaak zal vanwege ruimtegebrek, gewenste beperking van de civieltechnische constructie, gewenste vergroting van capaciteiten niet aan de ideale aanstroming voldaan kunnen worden. Door middel van aanstroombeterende maatregelen is dan vaak alsnog een goede aanstroming te realiseren. Deze moeten dan evenwel meestal gecontroleerd worden met behulp van modelonderzoek.

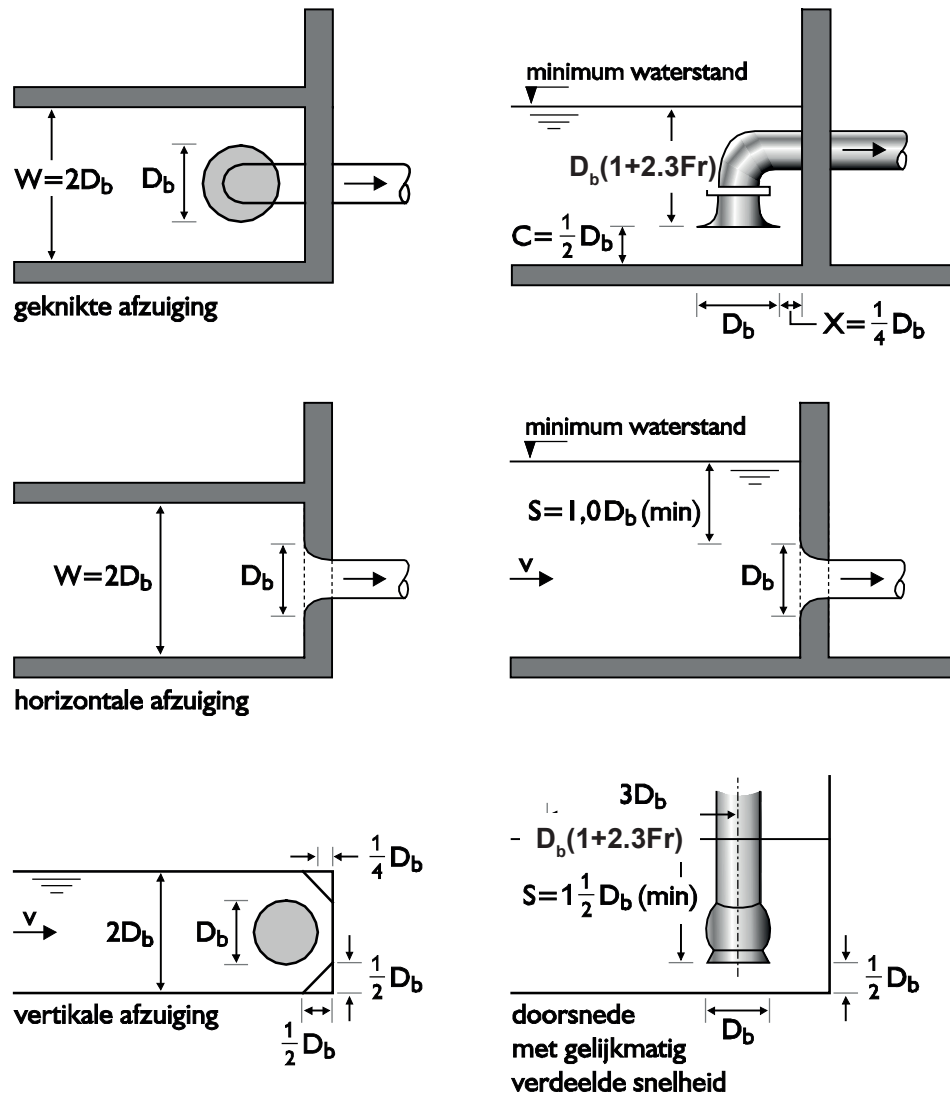
FIGUUR A.15 INVLOED VAN VORMGEVING ZUIGKAMER EN TOESTROOMKANAAL OP KRITIEKE ONDERDOMPELDIEPTE (= BENODIGDE WATERDEKKING TER VOORKOMING VAN LUCHTAANZUIGING)



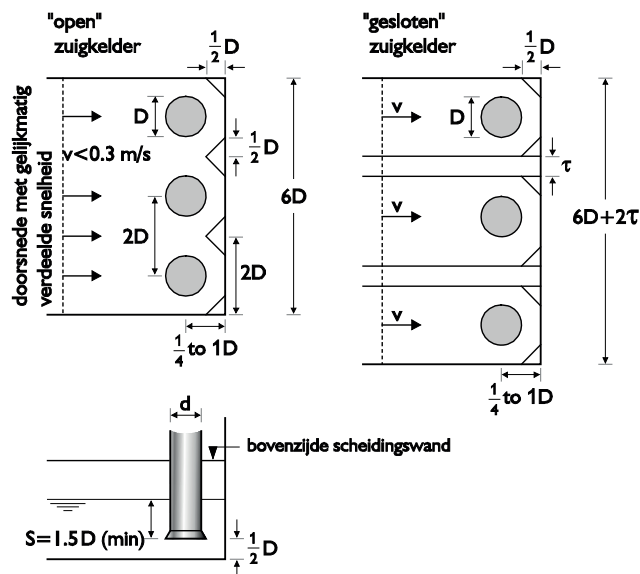
FIGUUR A.16 INVLOED SITUERING VAN DE ZUIGBUIS IN DE ZUIGKAMER



FIGUUR A.17 OPSTELLING VAN EEN POMP IN EEN ZUIGKELDER



FIGUUR A.18 OPSTELLING MEERDERE POMPEN IN EEN ZUIGKELDER



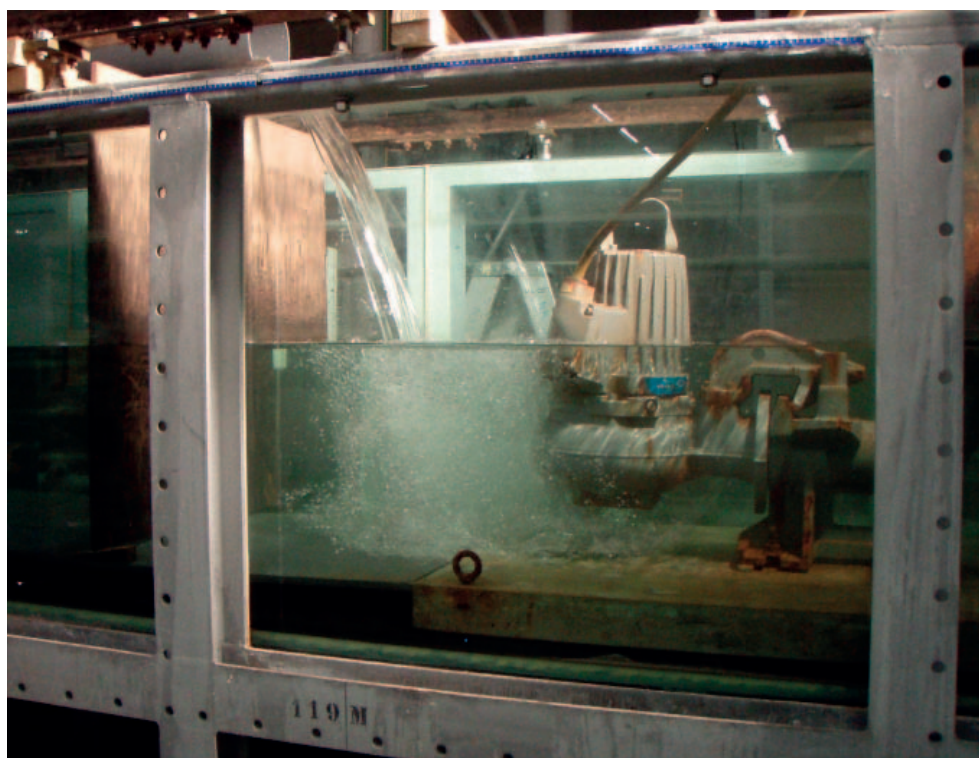
A.4.2 LUCHTINSLAG IN POMPKELDERS

Naast het gedrag van gasbellen in dalende leidingdelen is in het CAPWAT onderzoek (2003-2009) ook onderzocht hoe het gas in de leiding kan komen. De meest waarschijnlijke oorzaak is luchtinslag in de pompkelder (zie Figuur A.19)

Het onderzoek van Smit (2007) gaf veel kennis over het fenomeen zelf. Het daaropvolgende onderzoek (Kranendonk (2007a) en Kranendonk (2007b)) bestudeert verschillende constructies om luchtinslag te beperken of tegen te gaan. Deze paragraaf vat eerst de resultaten van Smit (2007) samen (om de lezer bekend te maken met het fenomeen) en presenteert vervolgens een aantal constructies om luchtinslag te beperken.

Luchtinslag in pompkelders wordt veroorzaakt door een waterstroom die van enige hoogte op de vrije waterspiegel van de pompkelder valt. Het vallende water (de waterjet) slaat lucht in bij de vrije waterspiegel en sleurt deze lucht vervolgens mee tot een bepaalde waterdiepte

FIGUUR A.19 FOTO VAN DE PROEFOPSTELLING VAN KRANENDONK (2007). DE LUCHTBELLEN WORDEN DE POMP INGEZOGEN.



Voor het ontwerp van pompkelders zijn de volgende parameters van belang:

- De horizontale afstand tot het einde van de bellenpluim
- De maximale diepte tot waar de bellenpluim reikt.

Beide parameters zijn afhankelijk van het waterdebiet en de geometrie van de pompkelder.

De verticale afstand is afhankelijk van de stroomsnelheid van het water aan het einde van het binnenkomende riool, v_e . Deze stroomsnelheid wordt bepaald door het debiet en het doorstroomde oppervlak:

$$v_e = \frac{Q_w}{A_e} \quad (\text{A.29})$$

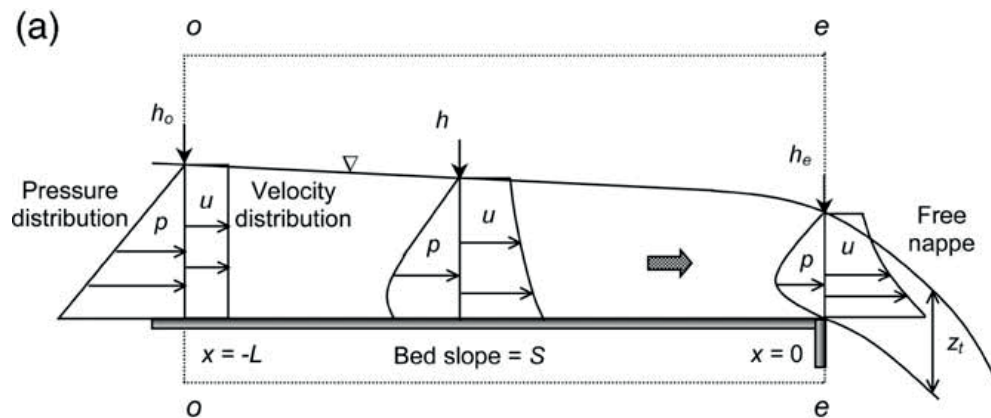
Zowel de stroomsnelheid v_e als het doorstroomde oppervlak A_e zijn onbekenden.

Smit heeft ook de waterdiepte bij het uitstroompunt (de einddiepte, h_e) gemeten. De resultaten correleren erg goed met de resultaten van Rajaratnam & Muralidkar (1964). Rajaratnam & Muralidkar stelde de volgende vergelijking op:

$$\frac{Q_w}{\sqrt{g}D^{2.5}} = 1,54 \left(\frac{h_e}{D} \right)^{\frac{11}{6}} \quad (\text{A.30})$$

Nu de einddiepte h_e bekend is, is ook het doorstroomde oppervlak A_e bekend en kan de eindsnelheid v_e dus berekend worden.

FIGUUR A.20 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN VRIJE UITSTROOM EN DE HYDRAULISCHE PARAMETERS)



Het traject van de vallende waterstraal wordt beschreven door de volgende vergelijkingen:

$$(x(t); y(t)) = (v_e t; H_e + w_e t - \frac{1}{2} g t^2) \quad (\text{A.31})$$

Waarin:

$$H_e = H + \frac{2}{3} h_e \quad (\text{A.32})$$

Ofwel, het massamiddelpunt van de stroming wordt opgeteld bij de uitstroomhoogte H. De verticale stroomsnelheid van het water speelt een rol in de bepaling van het traject, omdat de stroming bij het uitstroompunt gekromd is. Echter is deze verticale stroomsnelheid onbekend. Door de verticale stroomsnelheid te verwaarlozen krijgen we een conservatieve schatting van de horizontale val-afstand van de waterstraal:

$$L_{jx} = v_e \sqrt{\frac{2H_e}{g}} \quad (\text{A.33})$$

De lengte van de bellenpluim is ook gemeten (zie Smit (2007)).

$$L_a = \sqrt{2,5 \cdot 10^{-4} \cdot Q_w} \quad (\text{A.34})$$

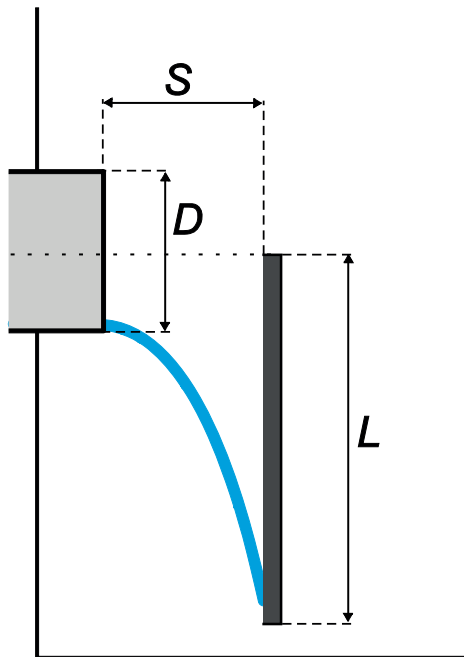
De werkelijke luchtinname door de pomp is erg lastig te bepalen. Zowel Smit (2007) als Kranendonk (2007) hebben metingen verricht aan de luchtinname, maar deze metingen zijn erg afhankelijk van de waterkwaliteit, pompdebiet en keldergerometrie.

A.4.3 MAATREGELEN TEGEN LUCHTINSLAG

Luchtinslag in pompkelders is eenvoudig te voorkomen. Tijdens het CAPWAT II onderzoek (2006-2009) is er gekeken naar verschillende maatregelen om de luchtinname door de pomp te minimaliseren (Kranendonk (2007)). Verschillende constructies zijn bekeken, maar in deze paragraaf worden 2 oplossingen besproken: het deflectieschot en de valpijp.

Het deflectieschot is een schot die voor het uitstroompunt geplaatst wordt.

FIGUUR A.21 AFMETINGEN DEFLECTIE SCHOT



De bovenkant van het schot zit halverwege de binnenkomende leiding, zodat eventuele verstoppingen verholpen kunnen worden.

Het deflectieschot kan doorlopen tot de bodem van de ontvangstkelder, maar dit is niet altijd noodzakelijk. De minimale lengte van het deflectieschot is afhankelijk van de stroomsnelheid en de plaatsing van het schot:

$$L = \frac{1}{2}D + \frac{1}{2}g \left(\frac{S}{v_e} \right)^2 \quad (\text{A.35})$$

De uitstroomsnelheid v_e moet worden gebaseerd op het DWA debiet (in m^3/s) en kan benaderd worden met:

$$v_e \approx \left(\frac{Q_{dwa} g}{0.25\pi D} \right)^{1/3} = 2.32 \left(\frac{Q_{dwa}}{D} \right)^{1/3} \quad (\text{A.36})$$

waarbij de uitstroombreedte gelijk is aan:

$$y_e \approx \left(\frac{Q_{dwa}}{0.25\pi D \sqrt{g}} \right)^{2/3} = 0.55 \left(\frac{Q_{dwa}}{D} \right)^{2/3} \quad (\text{A.37})$$

De afstand tussen de buis en het schot, S , dient minimaal de gelijk te zijn aan de diameter van de buis, om opstuwning te voorkomen. De breedte van het schot moet ook groter of gelijk zijn aan de diameter van de buis.

In de praktijk zal het makkelijker zijn om het deflectieschot tot aan de bodem van de ontvangstkelder te bouwen. Het schot steunt dan op de bodem, waardoor alleen de horizontaal gerichte krachten moeten worden afgevangen.

De horizontaal gerichte kracht, veroorzaakt door de waterjet uit het binnenkomende riool wordt gegeven door:

$$\sum F = \rho_l \cdot Q_w \cdot v_e \quad (\text{A.38})$$

Voor het debiet Q_w moet het grootst mogelijke debiet (RWA) gebruikt worden.

FIGUUR A.22 FOTO VAN PROEFOPSTELLING MET DEFLECTIESCHOT: 1D BREED, 1D VANAF UITSTROOMPUNT (KRANENDONK (2007))

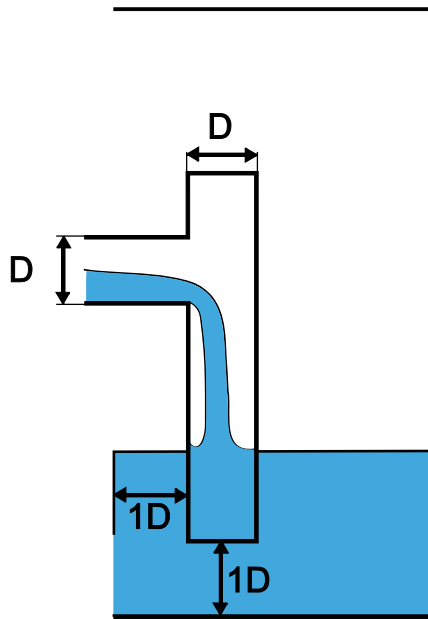


Figuur A.22 laat de werking van het deflectieschot zien. De waterjet wordt afgebogen en de luchtballen stijgen naar het wateroppervlak voordat ze bij de pomp komen.

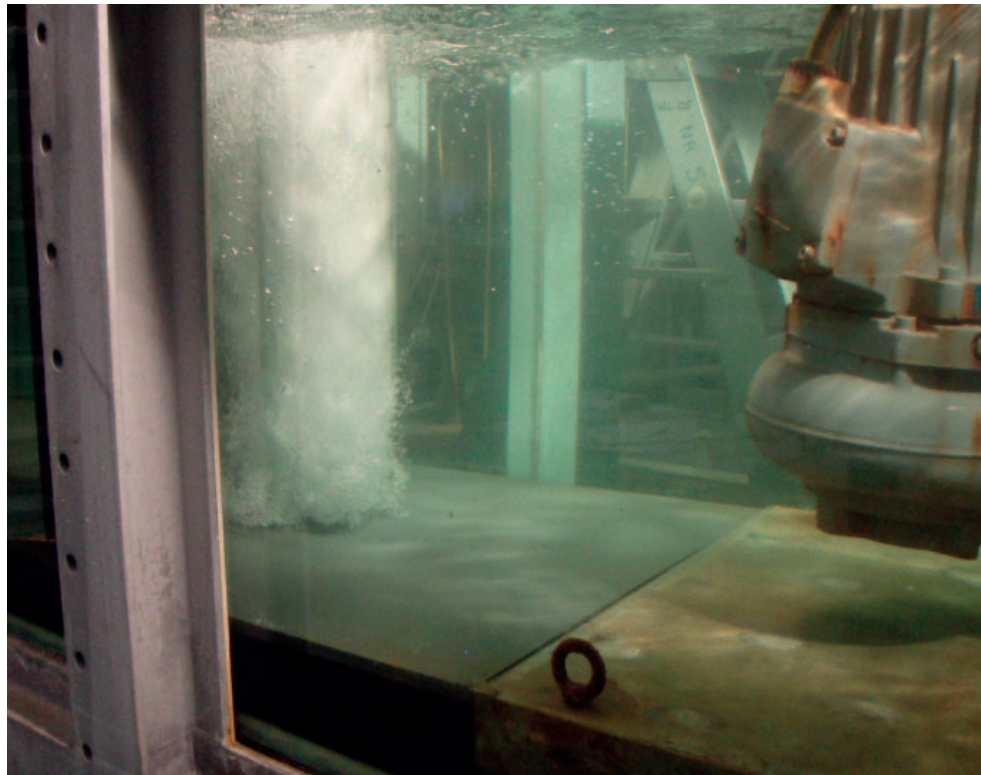
De valpijp is een buis die haaks op het binnenkomende riool wordt bevestigd met behulp van een T-stuk. De diameter van de valpijp moet gelijk zijn aan de diameter van de inkomende leiding. De afstand tussen de bodem van de kelder en de valpijp dient minimaal 1D te zijn (zie Figuur A.23).

Door het T stuk wordt de buis aan de bovenkant belucht en kan het water aan de onderkant uit de leiding stromen. De luchtballen hebben bij het verlaten van de valpijp geen snelheid in het horizontale vlak, waardoor ze langs de buitenkant van de valpijp weer omhoog drijven (zie Figuur A.24).

FIGUUR A.23 AFMETINGEN VALPIJP



FIGUUR A.24 VALPIJP IN DE PROEFOPSTELLING (KRANENDONK (2007))



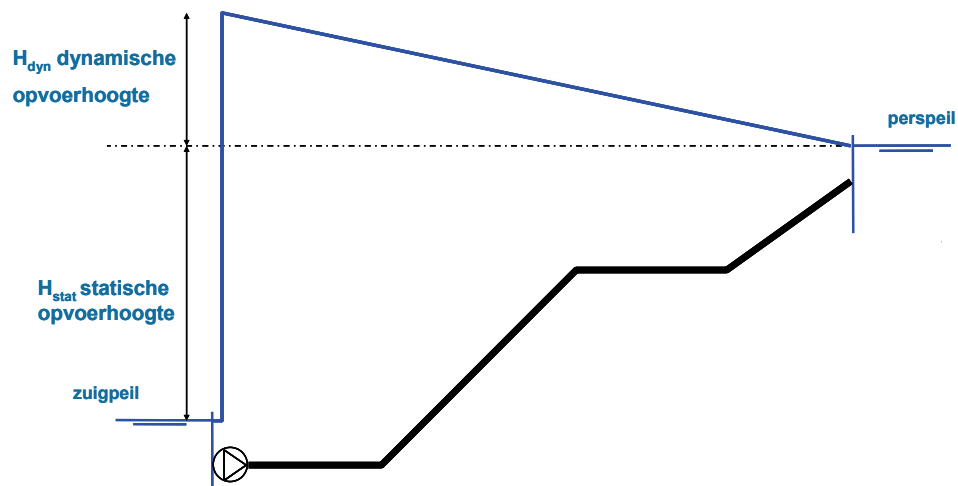
Een andere in de praktijk toegepaste oplossing is om de uitstroomopening af te dekken met een rubberen flap. Voordeel hiervan is dat een obstakel uit het riool makkelijk verwijderd kan worden.

A.5 POMPEN IN LEIDINGSYSTEMEN

A.5.1 SYSTEEMKARAKTERISTIEK EN WERKPUNT

Een bepaald systeem bestaat slechts uit een pomp en een leiding. De pomp transporteert vloeistof naar een hoger gelegen punt. De pomp moet naast de statische opvoerhoogte H_p ook de weerstand die de stroming ondervindt leveren Δh_d , de dynamische opvoerhoogte. De statische opvoerhoogte is het verschil tussen het perspeil en het zuigpeil. Het perspeil is de drukhoogte aan de perszijde van de pomp zonder debiet door de pomp. Het zuigpeil is de drukhoogte aan de zuigzijde van de pomp zonder debiet door de pomp. De dynamische opvoerhoogte is afhankelijk van het debiet.

FIGUUR A.25 DEFINITIE VAN ZUIGPEIL, PERSPEIL, STATISCHE OPVOERHOOGTE EN DYNAMISCHE OPVOERHOOGTE

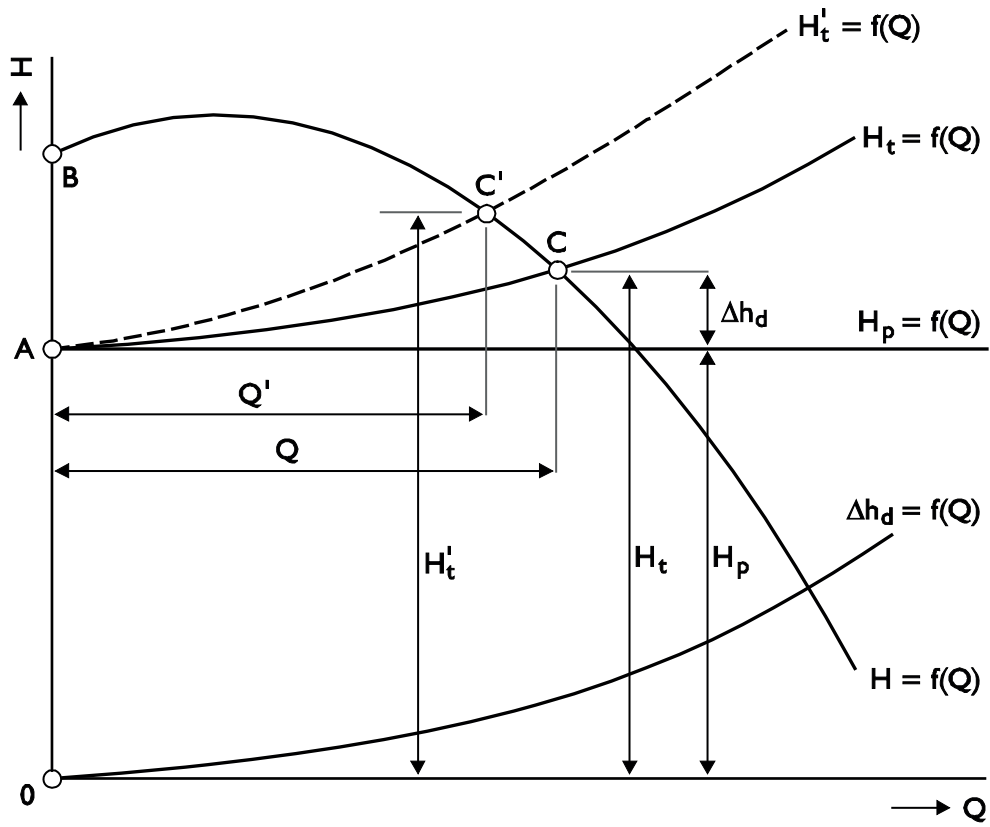


In Figuur A.26 de pompkromme $H=f(Q)$ met meerdere systeemkarakteristieken van de leiding getekend

De totale opvoerhoogte die de pomp moet overwinnen is $H_t = H_p + \Delta h_d$. Het werkpunt van de pomp wordt bepaald door het snijpunt van beide kromme, punt C. De opvoerhoogte die de pomp kan leveren bij dat debiet komt overeen met de totale opvoerhoogte die nodig is om dat debiet door het systeem te transporteren.

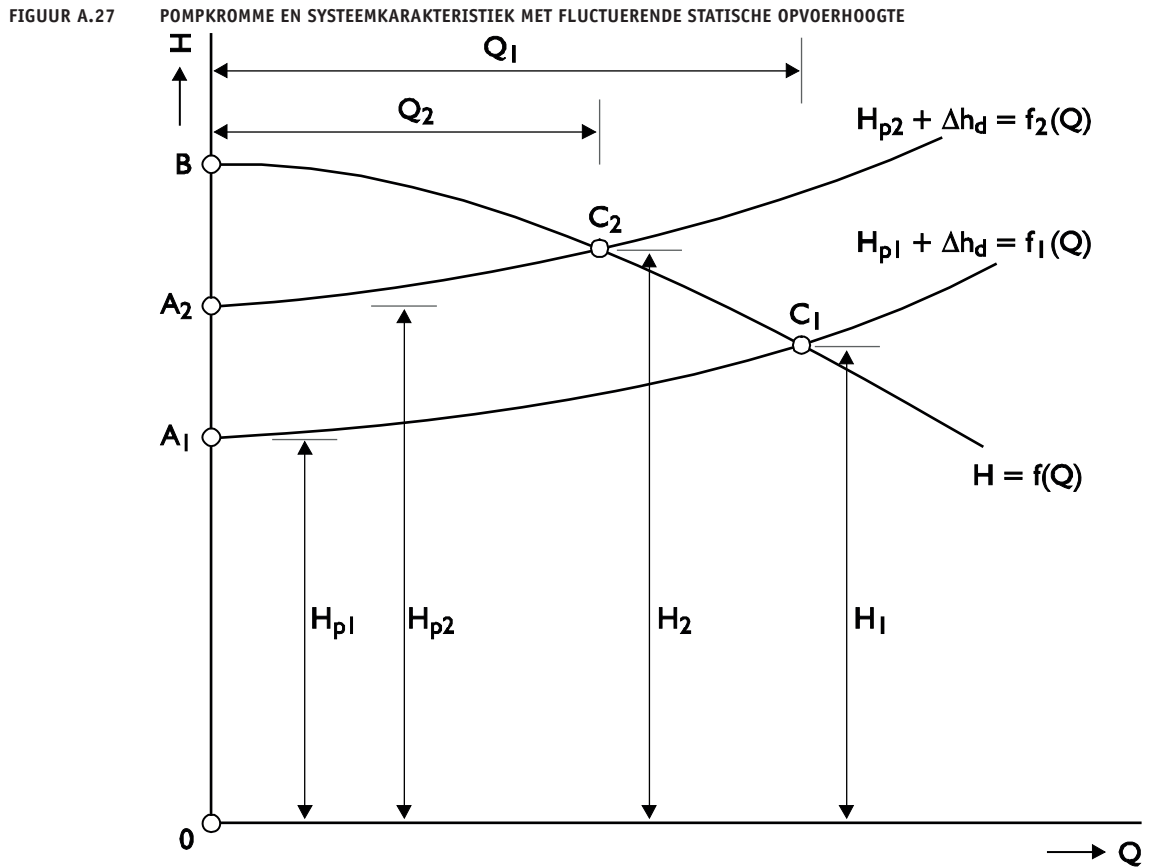
Wanneer bijvoorbeeld door vervuiling de weerstand toeneemt ($H'_t = f(Q)$), snijdt het de pompkromme op punt C' . De geleverde opvoerhoogte stijgt naar H'_t , het geleverde debiet daalt naar Q' .

FIGUUR A.26 POMPROMME EN SYSTEEMKARAKTERISTIEK VAN EEN LEIDINGSYSTEEM



A.5.2 VERANDERING VAN WERKPUNT DOOR FLUCTUATIE IN DE STATISCHE OPVOERHOOGTE

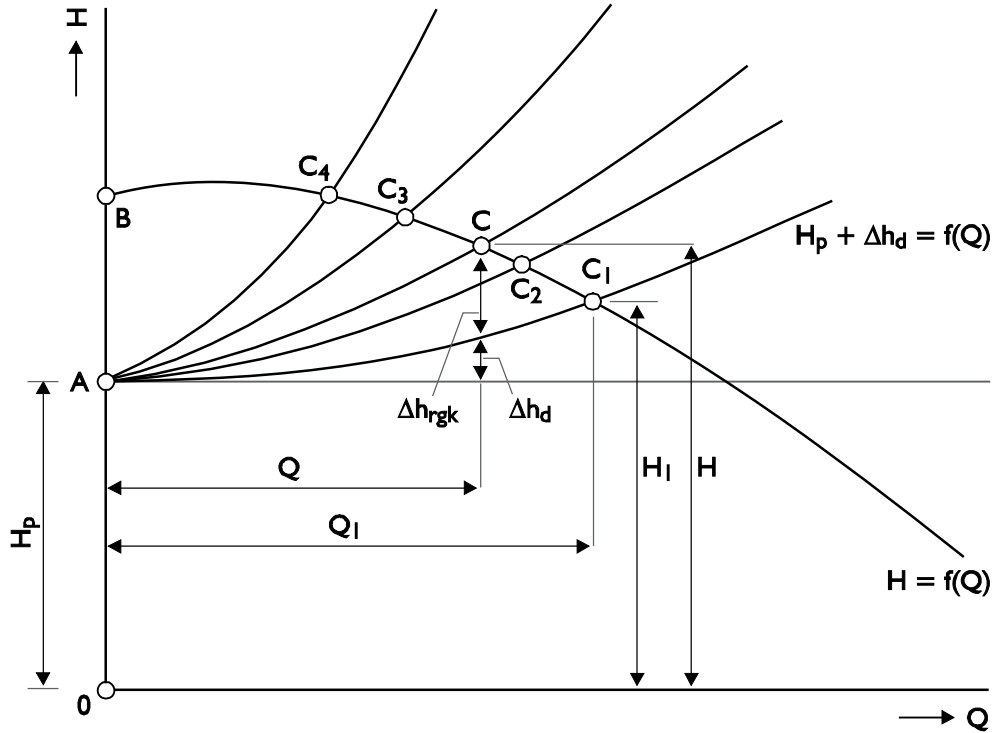
Het kan in de praktijk gebeuren dat de statische opvoerhoogte van het systeem wijzigt, bijvoorbeeld doordat een tank gevuld wordt terwijl de lucht erboven samengedrukt wordt. De dynamische opvoerhoogte wijzigt daardoor niet. Figuur A.27 laat zien hoe de systeemkarakteristiek wijzigt. De totale opvoerhoogte gaat van H_1 naar H_2 en het debiet verkleint van Q_1 naar Q_2 . Het lijnstuk C_1 - C_2 stelt het werkgebied van de pomp voor.



A.5.3 VERANDERING VAN WERKPUNT DOOR FLUCTUERENDE TRANSPORTVERLIEZEN

Figuur A.28 laat zien wat er met de systeemkromme gebeurt als de wandruwheid toeneemt.

FIGUUR A.28 POMPROMME EN SYSTEEMKARAKTERISTIEK IN EEN LEIDINGSYSTEEM MET VARIËRENDE TRANSPORTVERLIEZEN



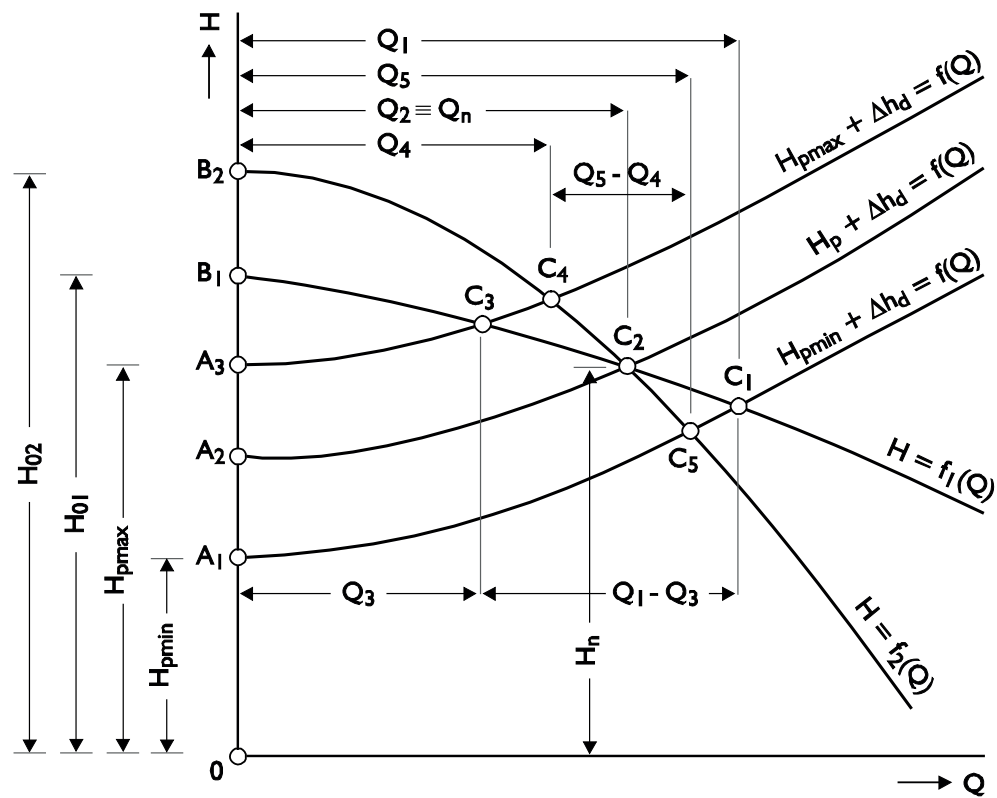
A.5.4 VERGELIJKEN VAN VERSCHILLENDE POMPEN

Het type pomp bepaalt in grote mate het gedrag van het totale systeem in termen van werkpunt wanneer de systeemkarakteristiek wijzigt. Figuur A.29 laat een steile en een vlakke pompkarakteristiek zien. De statische opvoerhoogte varieert tussen H_p min en H_p max. Voor de pomp met een steile pompkromme levert dit een werkgebied op van C_4 tot C_5 met een debiet tussen Q_5 en Q_4 . Voor de pomp met een vlakke pompkromme levert dit een werkgebied op van C_1 tot C_3 met een debiet tussen Q_1 en Q_3 .

Pompen met een vlakke karakteristiek leveren bij relatief kleine veranderingen in de totale opvoerhoogte grote veranderingen in debiet op. Dit kan heel nuttig zijn wanneer voor een systeem een grote verschil in debiet opgelegd moet kunnen worden.

Pompen met een steile karakteristiek zorgen ervoor dat kleine verandering in debiet bij relatief grote variatie in opvoerhoogte. Dit kan nuttig zijn wanneer een grote variatie in debiet ongewenst is.

FIGUUR A.29 VERGELIJKEN VAN VERSCHILLENDE POMPKROMMES

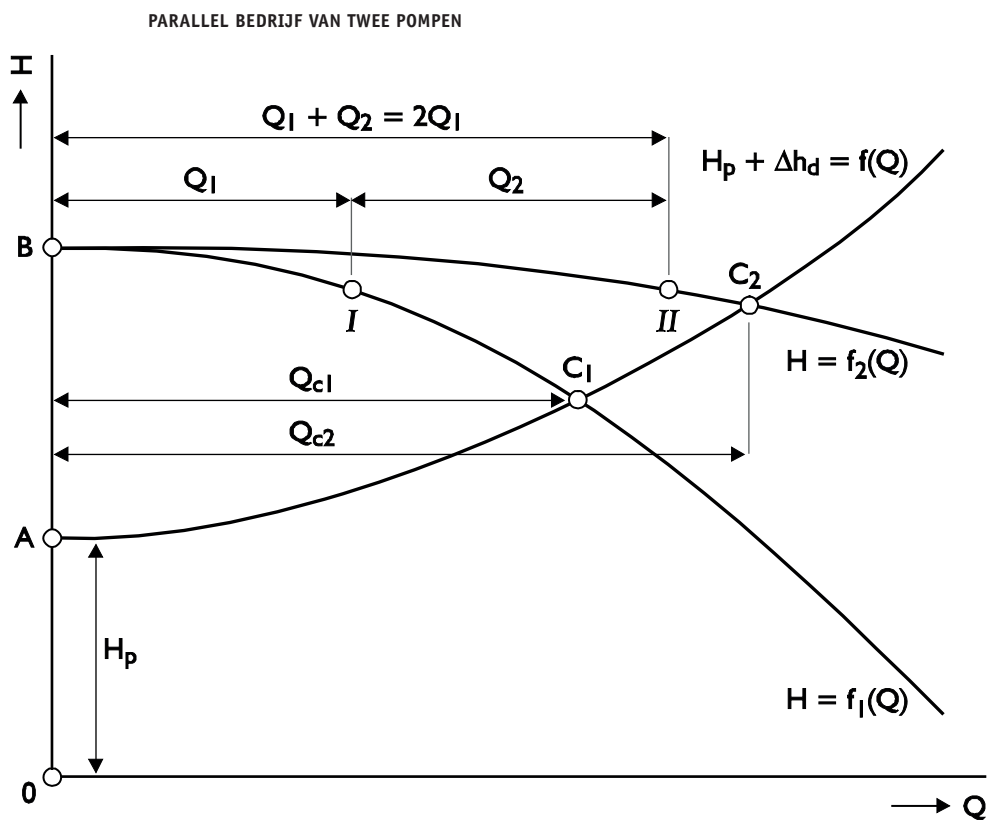


A.5.5 PARALLEL EN SERIEEL BEDRIJF VAN POMPEN

Parallele en seriële schakeling van pompen wordt toegepast wanneer één pomp alleen het gevraagde debiet, respectievelijk de gevraagde opvoerhoogte niet haalt.

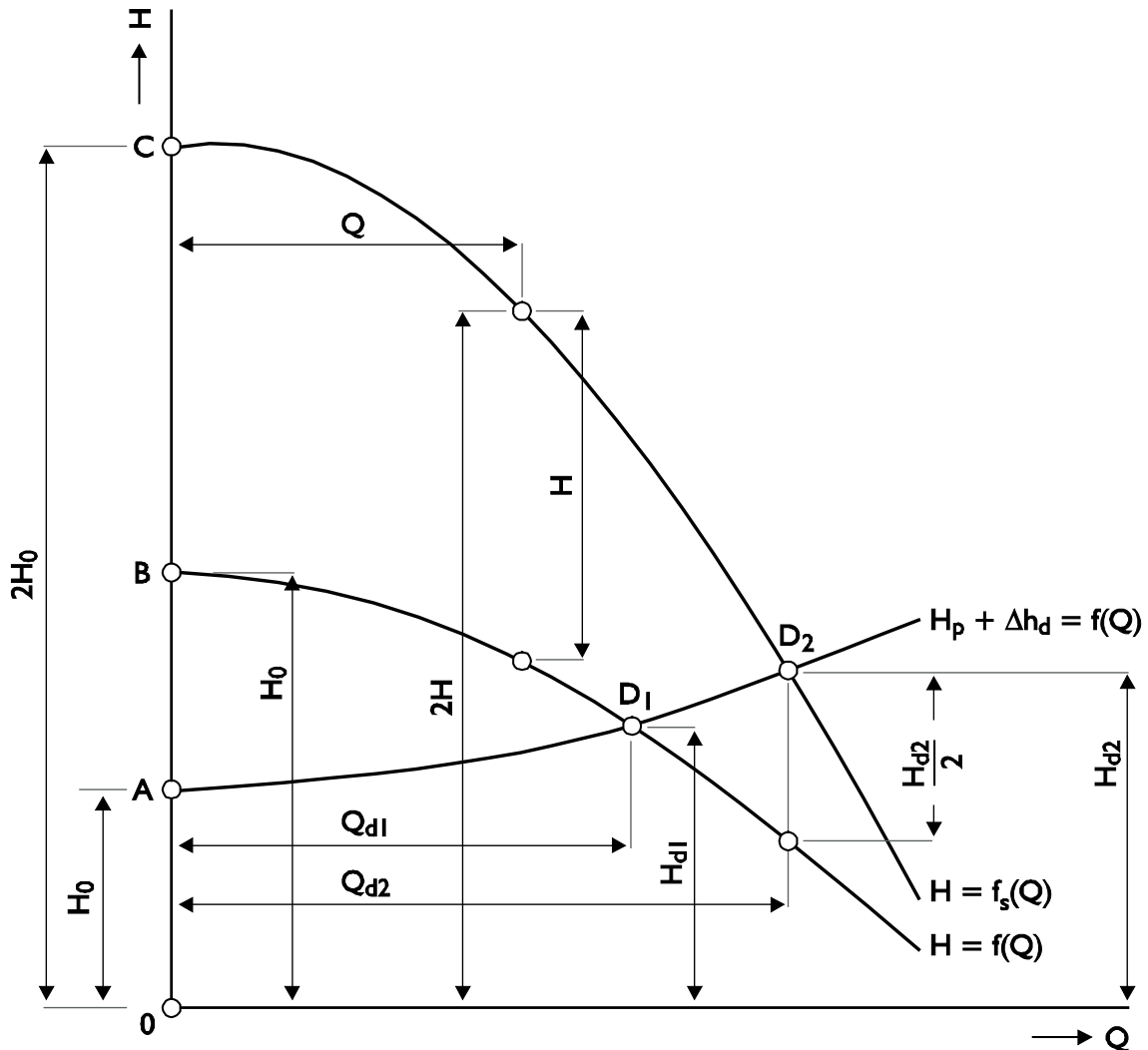
Twee identieke pompen die parallel geschakeld zijn, leveren een totale pompkarakteristiek waarvan de totale opvoerhoogte gelijk is aan de individuele pomp maar het debiet twee keer zo groot is. Figuur A.30 laat de QH kromme $H = f_1(Q)$ zien van de individuele pomp en de gecombineerde Q-H kromme $H = f_2(Q)$ van de twee parallel geschakelde pompen. Het werkpunt van het systeem is het snijpunt C_2 van de gecombineerde QH kromme en de systeemkarakteristiek. Belangrijk is te weten dat twee pompen die parallel werken altijd minder debiet leveren dan twee maal het debiet van één pomp aan hetzelfde systeem. Dit volgt uit Figuur A.30 waar te zien is dat $Q_{c2} < 2 \cdot Q_{c1}$. Dit komt omdat de hydraulische weerstand toeneemt met het kwadraat van het debiet.

FIGUUR A.30



Twee identieke pompen die in serie geschakeld zijn, leveren een totale pompkarakteristiek waarvan de totale opvoerhoogte twee keer zo groot is als de individuele pomp maar het debiet even groot is. Wanneer twee pompen in serie geschakeld zijn leveren de pompen per definitie hetzelfde debiet. De totale opvoerhoogte is twee keer zo groot als de individuele opvoerhoogte van de pomp (bij gelijke pompen) (zie Figuur A.31).

FIGUUR A.31 SERIEEL BEDRIJF VAN POMPEN



A.5.6 VERANDERING VAN POMPTOERENTAL

Wanneer de pompkarakteristieken van een pomp bij een bepaald toerental bekend is, kan men via de affiniteitsregels bepalen hoe deze veranderen wanneer het toerental gewijzigd wordt. De hydraulische karakteristieken van 2 gelijkvormige pompen draaiend met verschillende toerentalen, kunnen derhalve van elkaar afgeleid worden met behulp van affiniteitsregels. Dit kan worden toegepast op pompen van gelijk ontwerp en vormgeving en kan worden gebruikt om de karakteristieken van de pomp te bepalen voor een ander toerental.

Onder verwaarlozing van de viscositeitseffecten luiden de affiniteitsregels voor het pompdebiet, opvoerhoogte en hydraulisch vermogen:

$$\frac{Q_b}{Q_a} = \frac{n_b}{n_a} \quad (\text{A.39})$$

$$\frac{H_b}{H_a} = \left(\frac{n_b}{n_a} \right)^2 \quad (\text{A.40})$$

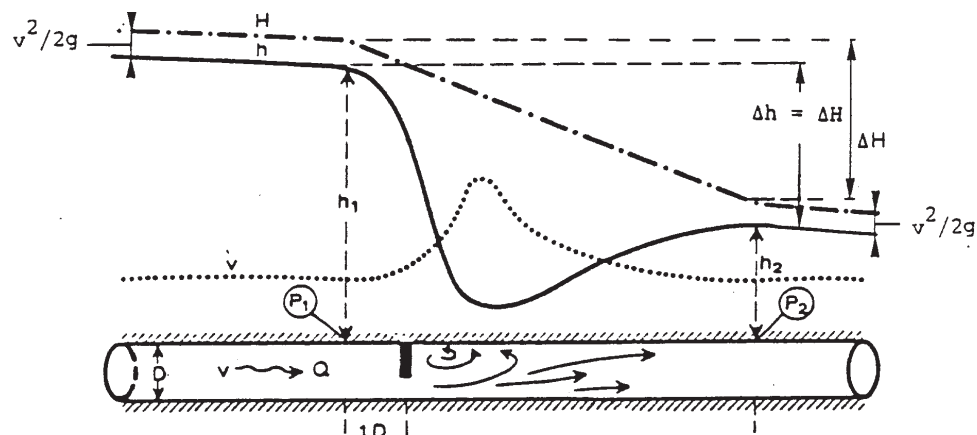
$$\frac{P_b}{P_a} = \left(\frac{n_b}{n_a} \right)^3 \quad (\text{A.41})$$

A.6 AFSLUITERS EN TERUGSLAGKLEPPEN

A.6.1 AFSLUITERS

Het principe van de debietbeïnvloeding door de klep is gebaseerd op een verandering van het doorstroomprofiel in het klephuis door het aanbrengen van een obstakel (restrictie). De grootte van de restrictie is daarbij een functie van de klepstand. Beschouwing van zo'n restrictie in een leiding (Figuur A.32) geeft inzicht in de samenhang van de verschillende hydraulische parameters.

FIGUUR A.32 DRUK- EN SNELHEIDSVERLOOP BIJ REGELKLEP



Over de restrictie zal door het insnoeren van de stroomlijnen in de vloeistof een drukdaling optreden. In de doorsnede waar de insnoering het sterkst is (vena contracta) bereikt de druk een minimum waarde. Stroomafwaarts in de leiding treedt weer een gedeeltelijk drukherstel op. De uiteindelijke drukval Δp over de klep kan worden uitgedrukt in de dichtheid van de vloeistof ρ , de leidingdoorlaat A , het leidingdebiet Q en een dimensieloze verliescoëfficiënt ξ , die afhankelijk is van de geometrie van de restrictie en in mindere mate van de viscositeit en het getal van Reynolds.

A.6.2 KLEPKARAKTERISTIEKEN

De afvoercharacteristiek geeft het verband tussen het debiet Q door de klep en het drukverschil Δp over de klep als functie van de klepstand. Dit verband wordt uitgedrukt in een afvoercoëfficiënt K_v of C_v , dan wel een verliescoëfficiënt ξ .

De coëfficiënten zijn afgeleid uit de algemene vergelijking voor een Newtonse turbulente stroming door een restrictie in een leiding onder cavitatie-vrije omstandigheden:

$$\Delta h = \xi \frac{v^2}{2g} \rightarrow \Delta p = \rho g \Delta h = \frac{1}{2} \xi \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho \xi \frac{Q^2}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2} \quad (\text{A.42})$$

Waarin:

Q	=	debiet	[m ³ /s]
ξ	=	verliescoëfficiënt	[-]
D	=	klepdiameter	[m]
ρ	=	dichtheid vloeistof	[kg/m ³]
Δp	=	drukverschil	[N/m ²]

Of anders geschreven, met A_v de afvoercoëfficiënt [m²]:

$$Q = \sqrt{\frac{2(\pi/4 \cdot D^2)^2}{\rho \xi}} \sqrt{\Delta p} = \frac{1}{\sqrt{\xi}} \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = A_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (\text{A.43})$$

Hierin is A_v als een klepconstante te beschouwen. In het algemeen zal bij turbulente stroming door een klep een dergelijke relatie gelden. Iedere geometrische configuratie, dus ieder kleptype en iedere klepstand, geeft een andere A_v waarde.

In de praktijk worden de volgende genormeerde, hiervan afgeleide, afvoercoëfficiënten gebruikt K_v . De afvoercoëfficiënt K_v is gedefinieerd voor water met een dichtheid van 1000 kg/m³ tussen de 5 en 30°C. In woorden: de afvoercoëfficiënt K_v geeft het waterdebiet in m³ dat in een uur door de klep stroomt bij een drukverschil van 1 bar.

$$Q = K_v \sqrt{\Delta p} \quad (\text{A.44})$$

Q	=	debiet	[m ³ /s]
Δp	=	netto drukverschil over de klep	[-]
K_v	=	afvoercoëfficiënt	[m]
			$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \sqrt{\text{bar}} \right]$

Tussen ξ en K_v bestaat het volgende verband:

$$\xi = 1,6 \cdot 10^9 \frac{1}{K_v^2} \cdot D^4 \quad (\text{A.45})$$

Naast de K_v wordt als afvoercoëfficiënt C_v gedefinieerd voor Amerikaanse eenheden. De afvoercoëfficiënt C_v wordt voornamelijk gebruikt in de Engelstalige wereld (Engeland, Noord-Amerika, enz), en in de olie- en gasindustrie (wereldwijd). De metrische coëfficiënt K_v worden veelal gebruikt in de landen die het SI-stelsel hanteren. De verdere beschouwingen in deze syllabus beperken zich tot de K_v .

$$Q = C_v \sqrt{\Delta p} \quad ; \quad K_v = 0.865 \cdot C_v \quad (\text{A.46})$$

Q	=	debiet	[US gallons/min]
Δp	=	netto drukverschil over de klep	[psi]
C_v	=	afvoercoëfficiënt	[USGP $\sqrt{\text{psi}}$]

De coëfficiënten zijn gedefinieerd voor nominale diameter van klep en de boven- en benedenstroomse leiding, ongeacht de werkelijke interne diameter van de klep. Dat betekent dat voor een DN200 vlinderklep de nominale diameter 200 mm is (DN = Diametre Nominal). De K_v of C_v coëfficiënten van een DN200 klep kunnen onderling vergeleken worden ongeacht het kleptype of de effectieve doorlaat van de klep. Voor afwijkende aansluitende leidingdiameters worden correctiefactoren toegepast. De wijze van vaststellen van de afvoercharacteristieken is vastgelegd in normen.

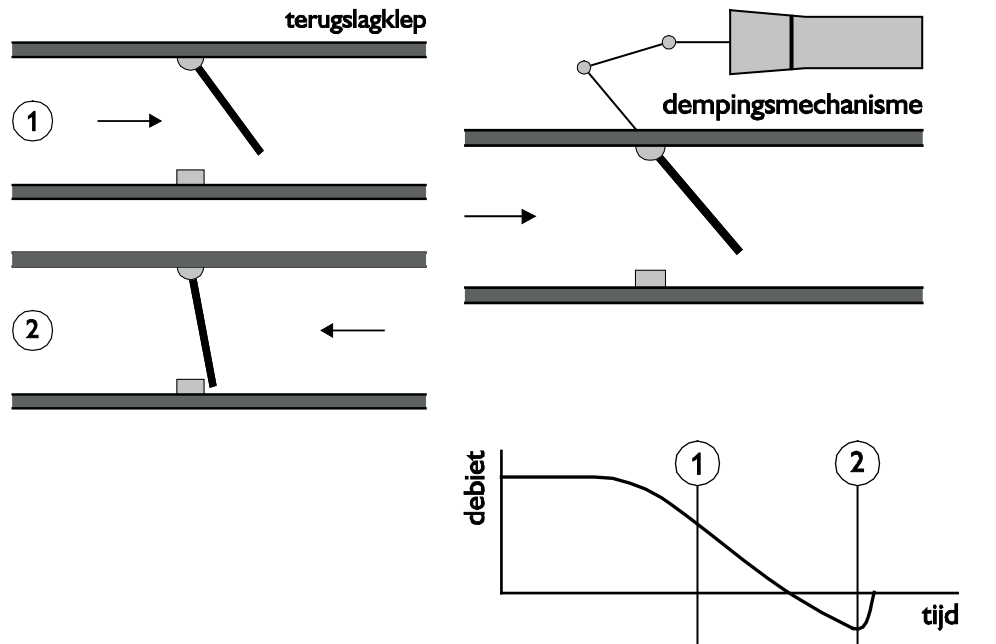
De afvoercoëfficiënten (K_v , C_v) en verliescoëfficiënt (ξ) zijn een functie van de klepopening. De afvoercoëfficiënt K_v voor volledig geopende klep geeft een kentel voor de klep en vormt een goede basis voor vergelijking van verschillende kleptypen en voor een eerste keuze van toe te passen kleptype en klepdiameter bij leidingontwerp uit oogpunt van gewenste debieten. De dimensieloze verliescoëfficiënt ξ is vooral handig bij het doorrekenen van leidingssystemen op hydraulische verliezen van alle soorten stroomverstoringen zoals bochten, diameterovergangen, T-stukken, kleppen, terugslagkleppen, enz.

A.6.3 TERUGSLAGKLEPPEN

Een terugslagklep is een betrekkelijk simpel apparaat, bestaande uit een klephuis rond één of meerdere roterende of translaterende afsluitorganen, welke tot doel heeft vloeistof slechts in een richting door te laten (Figuur A.33). De beweging van de afsluitorganen wordt primair gestuurd door de vloeistof. Bij een aantal typen wordt deze beweging bovendien beïnvloed door een dempingsmechanisme, wat de beweging van de afsluitorganen (in het algemeen alleen gedurende het laatste gedeelte van het sluittraject) vertraagt.

FIGUUR A.33

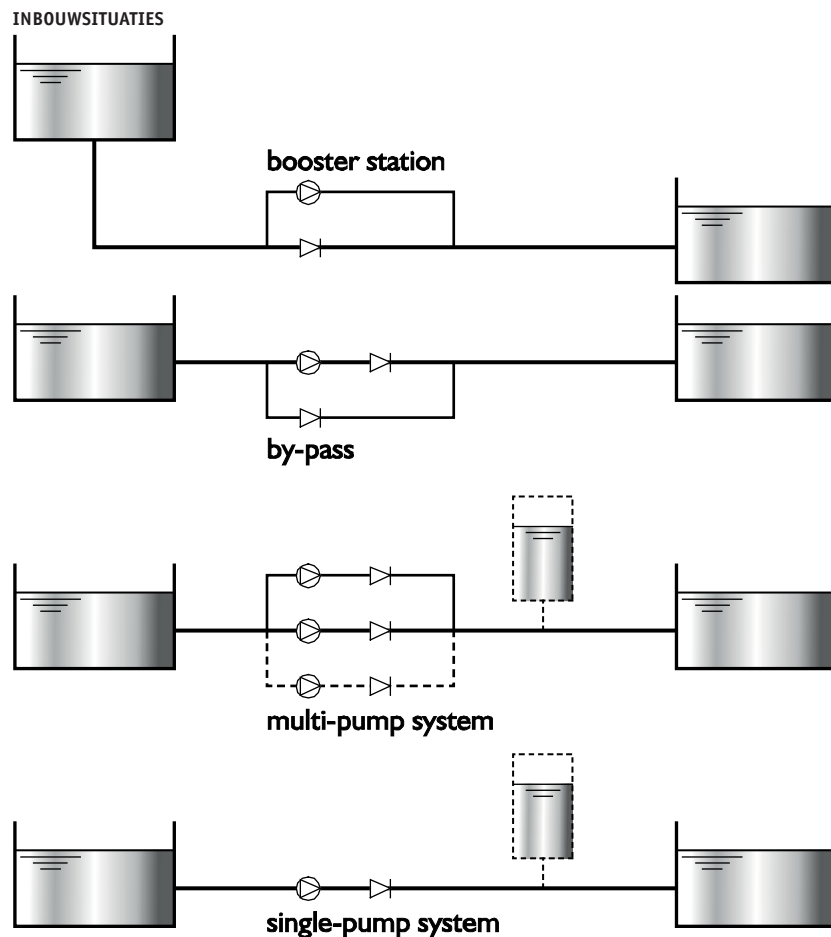
SLUITGEDRAG TERUGSLAGKLEPPEN



Een ideale terugslagklep zal in een vertragende stroming sluiten op het moment dat het debiet juist nul geworden is. Echter, in de praktijk zal een terugslagklep, als gevolg van traagheids- en wrijvingseffecten, sluiten in een meer of minder ontwikkeld retourdebiet. De reductie van dit retourdebiet tot nul (klep dicht) gaat gepaard met waterslagverschijnselen. Dit leidt aan de (aanvankelijk) benedenstroomse zijde tot een drukopbouw en aan de (aanvankelijk) bovenstroomse zijde tot een drukafbouw.

De grootte van deze drukveranderingen hangt af van de maximale retoursnelheid v_r , de tijdsduur waarin v_r tot nul afneemt en het al dan niet optreden van reflecties van drukgolven gedurende de sluiting. Door deze drukveranderingen ontstaan krachten op het leidingsysteem en de verankering.

FIGUUR A.34



Veel voorkomende toepassingen van terugslagkleppen zijn (Figuur A.34):

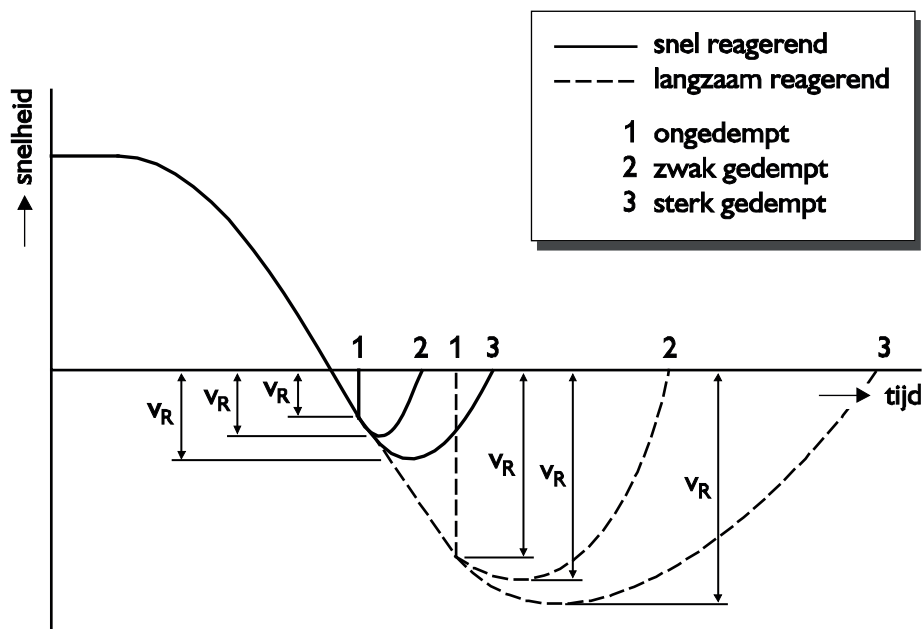
- Bescherming van pomp en aandrijving tegen (te grote) retourstroming dan wel “achteruitdraaien” (anti-rotatie) in geval van pomputval.
- Vermijden van retourstroming door niet in gebruik zijnde parallelle pompen in pompstation.
- In een by-pass configuratie wordt de terugslagklep gebruikt als waterslagvoorziening om het ontstaan van cavitatie in de hoofdleiding te onderdrukken.
- Vermijden van retourstroming in de hoofdleiding bij een in bedrijf zijnde boosterstation.
- Afdichting van een leiding in geval van leidingbreuk om het ontsnappen van vloeistof te vermijden (bijv. in koelwatercircuits van kerncentrales).

Terugslagkleppen worden in twee categorieën onderverdeeld:

- Ongedempte terugslagkleppen: De reductie van de maximale retoursnelheid naar nul vindt vrijwel momentaan plaats (Δt_r is orde 10^{-3} sec). De sluitbeweging en de drukveranderingen worden niet beïnvloed door reflecties van drukgolven.
- Gedempte terugslagkleppen: De reductie van de maximale retoursnelheid naar nul vindt snel plaats voor zwak gedempte kleppen (Δt_r is orde 10^{-3} to 10^{-1} sec) en langzaam voor sterk gedempte kleppen (Δt_r is orde 1 sec). De sluitbeweging en de drukveranderingen kunnen beïnvloed worden door reflecties van drukgolven.

Wanneer de reductietijd Δt_r meer dan 2 sec bedraagt is er nauwelijks meer sprake van een terugslagklep en wordt gesproken van een regelklep of gestuurde klep.

FIGUUR A.35 TERUGSLAGKLEPPEN ONDERSCHIEDEN NAAR HUN WERKING



Het dynamische gedrag van zowel ongedempte als gedempte terugslagkleppen kunnen gekarakteriseerd worden met:

- Snel reagerende kleppen: De maximale retoursnelheid v_R is relatief klein.
- Langzaam reagerende kleppen: De maximale retoursnelheid v_R is relatief groot.

A.6.4 KARAKTERISEREN VAN TERUGSLAGKLEPPEN

Het stationaire gedrag van terugslagkleppen wordt gekarakteriseerd met de stationaire karakteristiek, waarin het verband tussen het drukverschil over de klep en het debiet is gegeven.

Het drukniveauverschil over de klep wordt beschreven met vergelijking (A.12), hier herhaald:

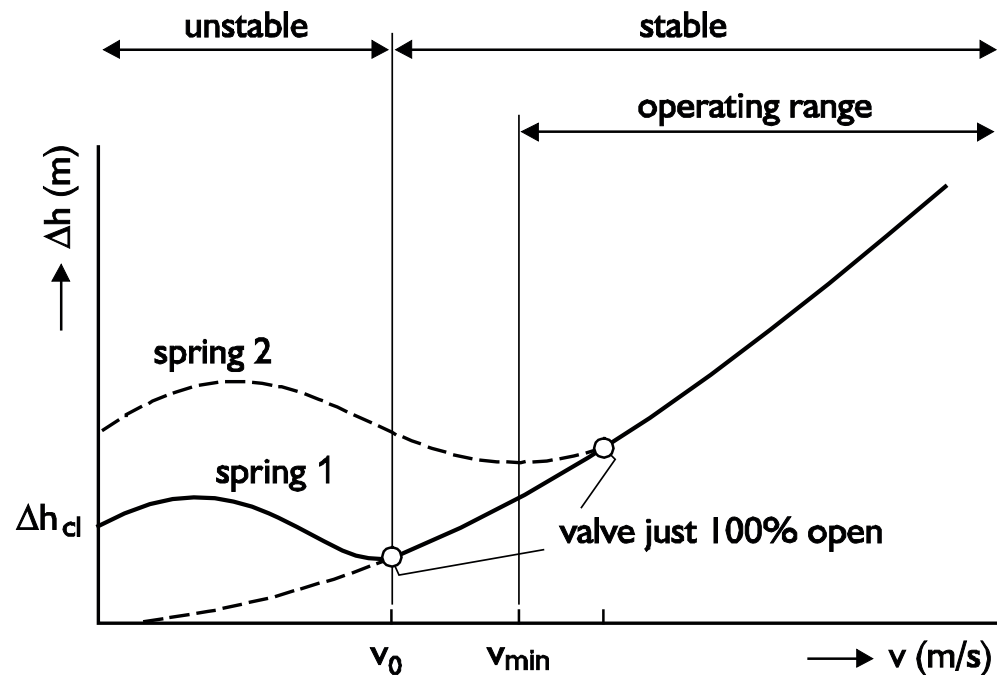
$$\Delta H = \xi \frac{v^2}{2g}$$

De dimensieloze weerstands of verliescoëfficiënt ξ is een functie van de kleppositie θ . Voor turbulente stationaire stromingen met hoge getallen van Reynolds (vergelijking (A. 6)) min of meer constant.

In de stationaire karakteristiek is het verband gegeven tussen druk(niveau)verschil en vloeistofsnelheid/debiet. In Figuur A.36, waarin het drukk niveau-verschil is uitgezet als functie van de vloeistofsnelheid, zijn de karakteristieken weergegeven van een translenderend (nozzle) type terugslagklep voor twee verschillende veren. Het drukverschil Δh_{cl} is de waarde waarbij de klep juist begint te openen. De kritische snelheid v_0 is de vloeistof-snelheid waarbij de klep juist volledig geopend is. De karakteristiek is parabolisch voor vloeistof-snelheden groter dan de kritische snelheid, vanwege het feit dat ξ constant is voor een volledig geopende klep. Bij afnemend debiet begint de terugslagklep te sluiten vanaf het moment dat de kritische snelheid v_0 onderschreden wordt. Daarbij kan, als gevolg van een toename van de weerstand, het druk(niveau)verschil over de klep wat toenemen.

Afhankelijk van het kleptype kan de stationaire karakteristiek beïnvloedt worden door veren (sterker, zwakker), gewichten en ballen (zwaarder, lichter) en de slag of maximale rotatiehoek van de bewegende delen.

FIGUUR A.36 STATIONAIRE KARAKTERISTIEK

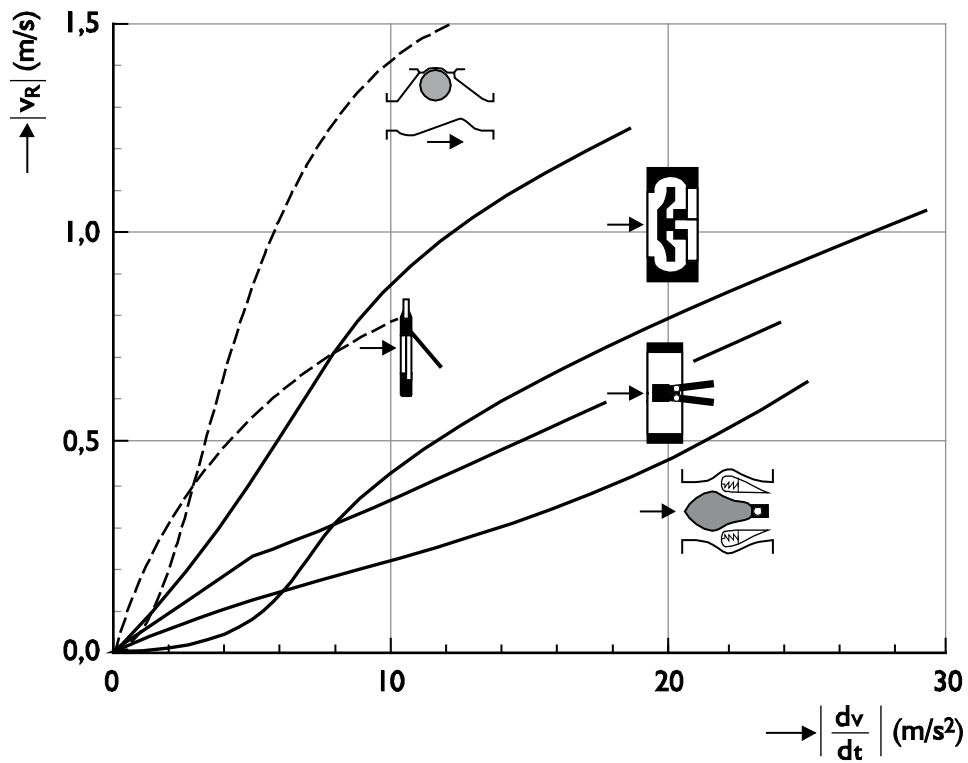


Het sluitgedrag van ongedempte terugslagkleppen wordt beschreven in de zogenaamde "dynamische" karakteristiek:

$$v_R = f\left(\frac{dv}{dt}\right) \quad (\text{A.47})$$

Op de horizontale as is een karakteristieke vloeistofvertraging uitgezet. Op de verticale as is de maximale retoursnelheid uitgezet welke doorgaans optreedt direct voordat de bewegende delen op de zitting terecht komen.

FIGUUR A.37 DYNAMISCHE KARAKTERISTIEKEN VAN DN200 TERUGSLAGKLEPPEN VOOR HORIZONTALE INBOUW



Een ideale terugslagklep zal sluiten op het moment dat het debiet juist nul geworden is, zonder dat de sluiting extra drukvariaties tot gevolg heeft en zonder dat hameren optreedt. Dit gedrag zal onafhankelijk van de vloeistofvertraging moeten zijn. De dynamische karakteristiek van een ideale terugslagklep valt daarom samen met de horizontale as.

Afhankelijk van het kleptype wordt de dynamische karakteristiek beïnvloed door de diameter van de klep, veren (sterker, zwakker), gewichten en ballen (zwaarder, lichter) en de slag of maximale openingshoek van de bewegende delen.

De dynamische karakteristiek kan ook worden gebruikt in een dimensieloze vorm:

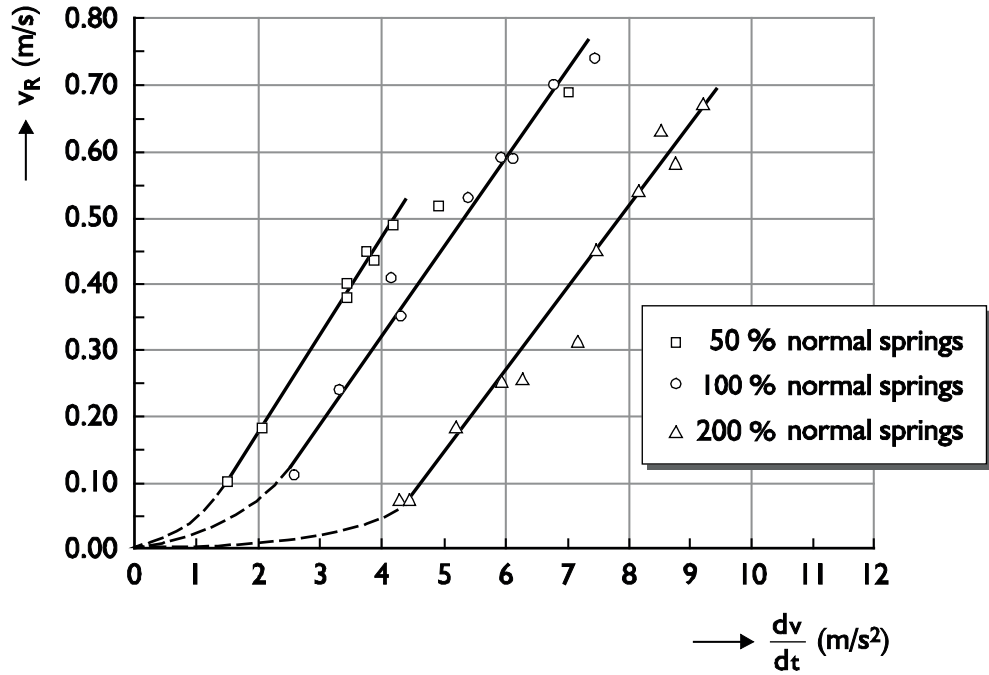
$$\frac{v_R}{v_o} = f\left(\frac{D}{v_o^2} \frac{dv}{dt}\right) \tag{A.48}$$

v_R	=	maximale retoursnelheid	[m/s]
v_o	=	kritische snelheid	[m/s]
D	=	inwendige diameter	[m]
$\frac{dv}{dt}$	=	karakteristieke vloeistofvertraging	[m/s ²]

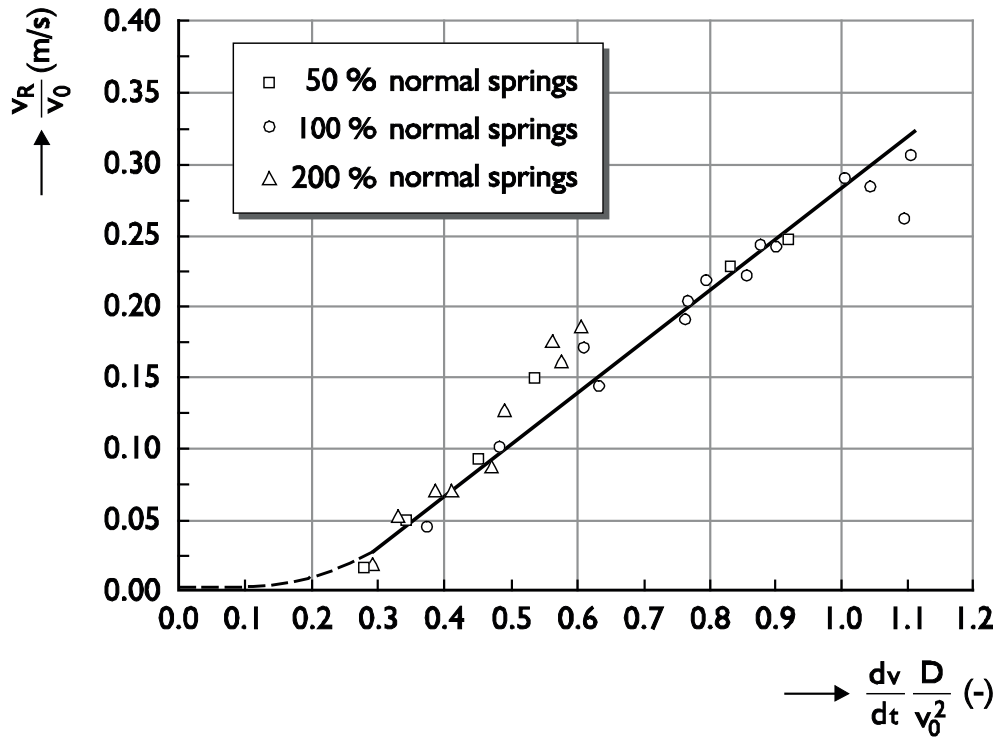
Afhankelijk van het kleptype kan de dimensieloze dynamische karakteristiek beïnvloed worden door gewichten en ballen (zwaarder, lichter) en de slag of maximale rotatiehoek van de bewegende delen, maar niet door de klepdiameter en parameters die (uitsluitend) gerepresenteerd worden door de kritische snelheid (zoals veren).

In Figuur A.38 zijn gemeten dynamische karakteristieken weergegeven van een translenderend (nozzle) type 800 mm terugslagklep voor drie verschillende veren. Dezelfde meetgegevens zijn in Figuur A.39 in dimensieloze vorm gepresenteerd.

FIGUUR A.38 DYNAMISCHE KARAKTERISTIEK VAN EEN DN800 TRANSLERENDE (NOZZLE-TYPE) TERUGSLAGKLEP VOOR DRIE VERSCHILLENDE VEREN



FIGUUR A.39 DIMENSIELOZE DYNAMISCHE KARAKTERISTIEK VAN EEN DN800 TRANSLERENDE (NOZZLE-TYPE) TERUGSLAGKLEP VOOR DRIE VERSCHILLENDE VEREN



A.7 WATERSLAG IN LEIDINGSYSTEMEN

Waterslag is een fysisch fenomeen dat zich voor kan doen bij geheel met vloeistof gevulde leidingen. Veranderingen in het debiet leiden altijd tot drukveranderingen, die zich als een onder- of overdruk golf door de leiding voortplanten. Deze drukgolven worden waterslag genoemd. Beide type drukgolven kunnen ervoor zorgen dat de sterkte van de leiding in het geding komt. Onderdruk golven kunnen tevens cavitatie tot gevolg hebben, als de druk in de vloeistof tot de dampspanning daalt.

Het verschijnsel waterslag kan het beste worden gedefinieerd als: het gelijktijdige optreden van druk- en snelheidsveranderingen in gesloten leidingen.

Snelheidsveranderingen kunnen worden veroorzaakt door het openen/sluiten van afsluiters en het starten/stoppen van pompen. Maar ook door het ontluichten van een leiding kan waterslag ontstaan.

Waterslag kan optreden in elk soort leidingsysteem en transportvloeistof: lange en korte systemen met grote en kleine diameters in enkelvoudige en vertakte netwerken voor het transport van bijvoorbeeld olie, rioolwater, drinkwater, koelwater, baggerspecie, etc.

A.7.1 VOORTPLANTINGSSNELHEID

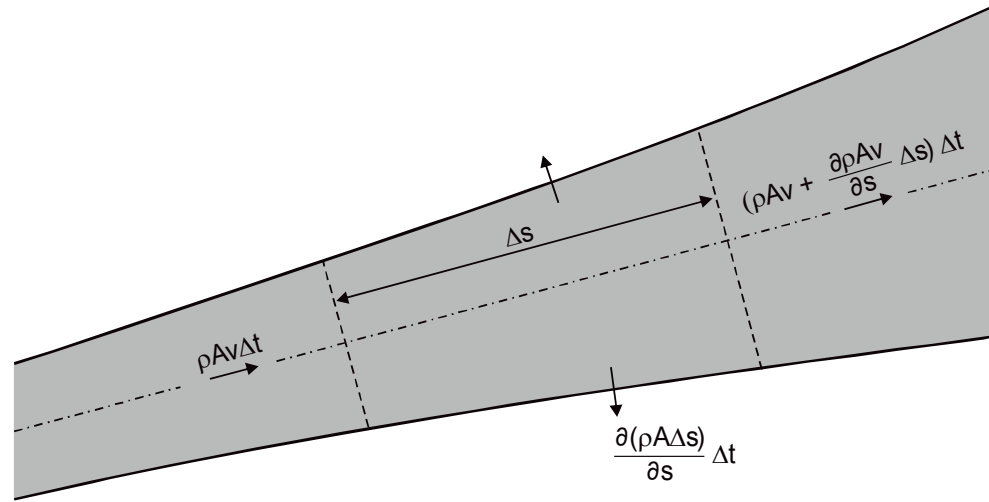
De golfsnelheid kan worden afgeleid uit de continuïteitsvergelijking en representeert alle elastische berging in de leiding; compressibiliteit van de vloeistof, radiale en axiale expansie van de leiding:

$$\frac{1}{c^2} = \rho \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dp} + \frac{1}{\Delta s} \frac{d\Delta s}{dp} \right) = \rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} \right) \quad (\text{A.49})$$

Waarin:

c	=	Voortplantingssnelheid	[m ³ /s]
ρ	=	Dichtheid	[kg/m ³]
K	=	Compressiemodulus	[N/m ²]
A	=	Oppervlak dwarsdoorsnede leiding	[m ²]
p	=	Druk	[Pa]
Δs	=	Leidingelement	[m]
D	=	Leidingdiameter	[m]
e	=	Wanddikte	[m]
E	=	Elasticiteitsmodulus (Young's modulus)	[N/m ²]

FIGUUR A.40 MASSABALANS VOOR EEN LEIDINGELEMENT S



De elastische eigenschappen van een leiding kunnen ook worden samengevat in de waterslagberging λ_0 [m²]:

$$\lambda_0 = \frac{\Delta V}{\Delta H} = \frac{g \cdot V}{c^2} \quad (\text{A.50})$$

Waarin:

ΔV	=	Volume verandering	[m ³]
ΔH	=	Verandering in drukhoogte	[m]
g	=	Gravatieversnelling	[m/s ²]
V	=	Leidingvolume	[m ³]
c	=	Voortplantingssnelheid drukgolven	[m/s]

Bovenstaande vergelijking geldt alleen als er geen lucht in de leiding aanwezig is. Indien er wel gasbellen in de leiding zitten, moet er een term worden toegevoegd aan vergelijking (A.49). De waterslagberging in de leiding verandert, omdat de gasbel comprimeert en expandeert onder invloed van de druk volgens de ideale gaswet:

$$p \cdot V^k = C \quad (\text{A.51})$$

Waarin:

$$k = \text{polytropische constante} \quad [-]$$

Ofwel;

$$A_{gas} = \frac{\Delta V}{\Delta H} = \frac{\rho \cdot g \cdot V_i}{k \cdot p_i} \quad (\text{A.52})$$

De totale waterslagberging in het systeem met gasbellen is de som van vergelijkingen (A.50) en (A. 52). Hier kan een gemiddelde golfsnelheid uit afgeleid worden:

$$\lambda_0 + A_{gas} = \frac{\Delta V}{\Delta H} \equiv \frac{g \cdot V}{c^2} + \frac{\rho \cdot g \cdot V_i}{k \cdot p_i}$$

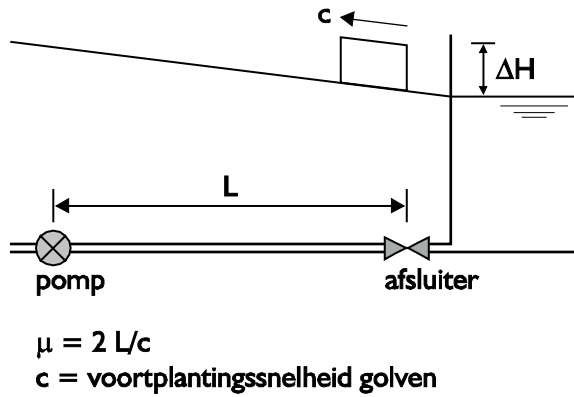
$$\frac{1}{c_{gas}^2} = \frac{1}{c_0^2} + \frac{\rho \cdot V_i}{k \cdot p_i \cdot V} \quad (\text{A.53})$$

A.7.2 LOOPTIJD

De looptijd van de drukgolven μ [s] is de tijd die het kost voor een drukgolf om vanaf de veroorzaker van de drukgolf (sluitende klep) door de gehele (hoofd)leiding van het systeem te lopen en weer terug te keren. Deze looptijd wordt bepaald door de voortplantingssnelheid c [m/s] en de lengte van de karakteristieke lengte van het leidingsysteem L [m] volgens de formule (zie ook Figuur A.41):

$$\mu = \frac{2L}{c} \tag{A.54}$$

FIGUUR A.41 BEGRIP LOOPTIJD



We spreken van snelle verschijnselen als de verstoring zich binnen de looptijd van de drukgolf voordoet en van langzame verschijnselen als de verstoring 5 à 10 keer langzamer is dan de looptijd.

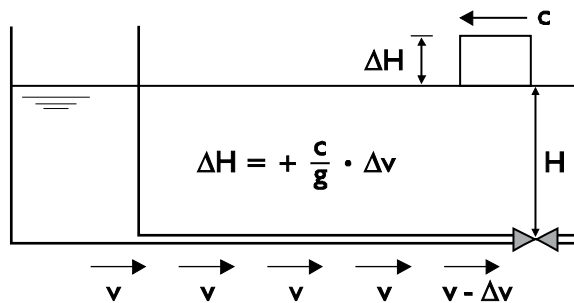
A.7.3 WET VAN JOUKOWSKY

Hoe groter en sneller de snelheidsveranderingen zijn, des te groter de drukveranderingen zullen zijn. “Snel” betekent hier in relatie tot de looptijd van drukgolven μ . De wet van Joukowsky geeft het verband tussen de grootte van de snelheidsverandering (Δv [m/s]) en grootte van de verandering in drukhoogte (ΔH [m]):

$$\Delta H = \pm \frac{c}{g} \Delta v \tag{A.55}$$

Figuur A.42 licht deze formule toe.

FIGUUR A.42 WET VAN JOUKOWSKY



Voor stalen en betonnen leidingen ($c \approx 1000$ m/s) gevuld met water geldt: $\Delta H \approx 100 \Delta v$. Dit betekent dat bij een relatief kleine snelheidsverandering van 0.1 m/s er een drukhoogteverandering van 10 m waterkolom (~1 bar) zal optreden.

Dit verband is slechts geldig indien de snelheidsverandering binnen de looptijd optreedt en het wrijvingsverlies klein is ten opzichte van de druk in de leiding. Dit is in de praktijk zeker niet altijd het geval. Verder is de toepasbaarheid van deze vuistregel beperkt bij vertakte systemen en diameterovergangen door lokale reflecties.

Waterslagverschijnselen zijn exact te berekenen met behulp van de bewegingsvergelijking, de wet van behoud van massa en de bijbehorende randvoorwaarden (leidinggegevens, pompgegevens, peilen in reservoirs enz.)

A.7.4 TOELAATBARE DRUK IN KUNSTSTOF LEIDINGEN

De maximaal toelaatbare over- en onderdruk in een leiding is afhankelijk van de materiaalsoort. In deze paragraaf beperken we ons tot de meest gebruikte soorten: PVC (Polyvinylchloride) en HDPE (hogedichtheid polyetheen).

De maximaal toelaatbare overdruk P_{max} voor een leiding wordt gegeven door de vergelijking van Barlow (Wijdiëks 1978):

$$P_{max} = \frac{2\sigma}{\frac{D_e}{e} - 2} \quad (\text{A.56})$$

Waarin D_e de uitwendige diameter is en σ de toelaatbare tangentiële wandspanning. De maximaal toelaatbare tangentiële wandspanning is afhankelijk van het leidingmateriaal.

De maximale toelaatbare onderdruk P_{min} (formeel netto externe druk, in barg) voor een leiding wordt gegeven door de volgende vergelijking:

$$P_{min} = -2E \left(\frac{e}{D_i} \right)^3 \quad (\text{A.57})$$

Waarin D_i de inwendige leidingdiameter is en E de elasticiteitsmodulus van het materiaal. Overschrijden van deze maximaal toelaatbare onderdruk resulteert in het vervormen van de leiding.

TABEL A.5 MATERIAAL EIGENSCHAPPEN VAN KUNSTSTOF LEIDINGEN

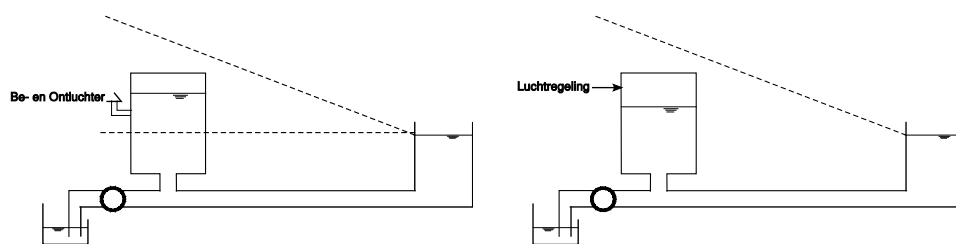
Materiaal	Elasticiteitsmodulus (10^9 N/m ²)	Max. Tangentiële wandspanning (10^6 N/m ²)
PVC	3,0	12,5
HDPE (verschillende soorten)	1,0	5,0 – 8,0

A.7.5 WINDKETEL ALS WATERSLAGVOORZIENING

De windketel is een drukvat gedeeltelijk gevuld met gas en met water. Het gasvolume is in feite een gespannen veer die het water na pompuitval de leiding induwt. De windketel neemt als het ware de functie van de pomp over waardoor de debietafname minder snel verloopt. De grootte van het gasvolume bepaalt het gedrag en moet daarom in stand worden gehouden. Om het gasvolume te garanderen kan de windketel als beluchte ketel uitgevoerd worden of als onbeluchte ketel voorzien van compressor.

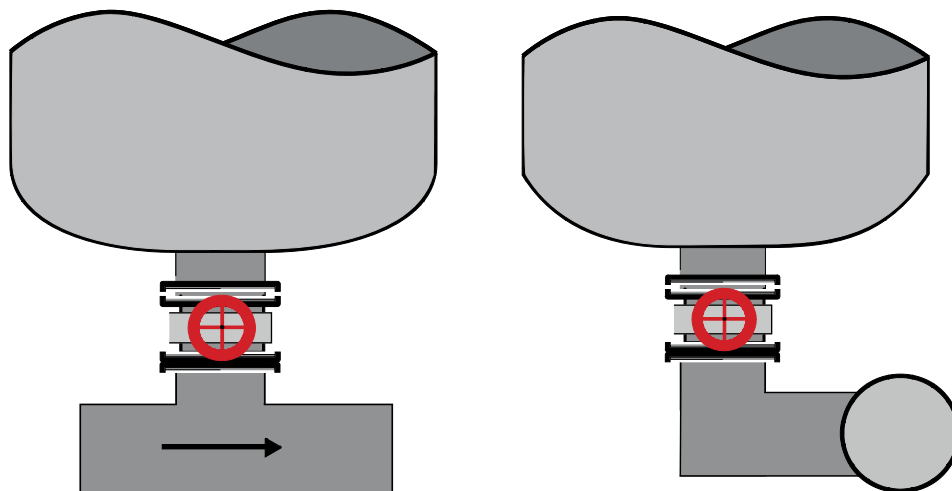
In het eerste geval moet de be/ontluchtingsklep boven het afleveringsdrukkniveau zitten zodat de ketel bij pompstilstand altijd belucht. Bij elke pompcyclus wordt het gasvolume nu ververs. Bij een onbeluchte ketel dient een compressor de grootte van het gasvolume te bewaken.

FIGUUR A.43 BELUCHTE EN ONBELUCHTE VERTICALE WINDKETEL



Daarnaast kan gekozen worden voor een horizontaal of verticaal geplaatste windketel. Dit heeft primair uitvoeringstechnische redenen (locatie, beschikbare hoogte etc). Het verschil in hydrodynamisch gedrag wordt met behulp van computersimulaties in beeld gebracht.

FIGUUR A.44 STANDAARD UITVOERINGEN VAN EEN VERTICAAL OPGESTELDE WINDKETEL

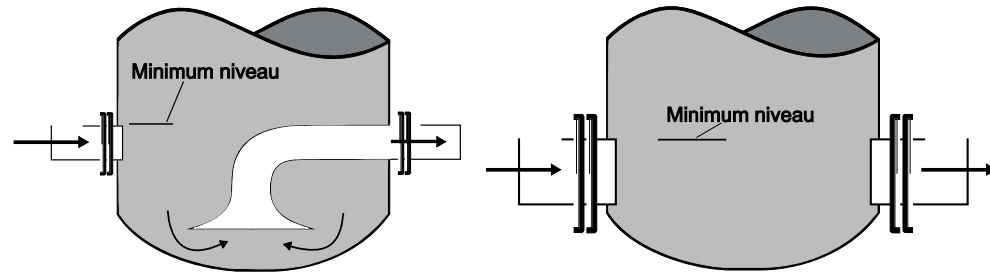


De effectiefste werking van de ketel wordt verkregen als deze direct in de transportleiding is opgenomen en dus continue doorstroomd wordt. Voordeel hierbij is dat de ketel direct kan naleveren. Tevens is het een ideale ontluchtingsvoorziening voor lucht dat door de pomp is ingenomen. Het nadeel van een doorstroomde windketel is dat zich vuil op de bodem kan verzamelen en dat de windketel niet eenvoudig voor onderhoud uit bedrijf is te nemen.

Een betere oplossing is om de ketel boven de leiding te plaatsen en met een T-aansluiting (diameter bij voorkeur gelijk aan hoofdleiding) te verbinden.

Door ruimtegebrek kan het nodig zijn de ketel naast de transportleiding op te stellen en met behulp van een nazuigleiding aan de persleiding te verbinden. Deze nazuigleiding moet zo kort mogelijk zijn en met een diameter bij voorkeur gelijk aan de diameter van de transportleiding. Naarmate de nazuigleiding langer wordt en de weerstand tussen ketel en transportleiding groter neemt de effectiviteit af.

FIGUUR A.45 DIVERSE UITVOERINGSVORMEN VAN EEN WINDKETEL



Het werkingsprincipe voor de windketel ter beveiliging van een leiding tegen te lage onderdrukken ten gevolge van pompuitval is als volgt: De windketel is geplaatst nabij het gemaal. Na pompuitval neemt het pompdebiet zeer snel af naar nul. De windketel gaat direct naleveren. De druk in de ketel is in het begin gelijk aan de persdruk van de pomp. Door de nalevering zakt het peil in de ketel en daarmee de druk in de windketel en wordt het gasvolume groter.

De windketel moet zodanig gedimensioneerd zijn er geen gas in de transportleiding kan komen.

Het gedrag van het gasvolume wordt bepaald door de vergelijking:

$$P \times V^k = C \quad (\text{A.58})$$

Waarin:

P	=	Absolute druk in het gas	[N/m ²]
V	=	Volume van het gas	[m ³]
k	=	Laplace coëfficiënt	[-]
c	=	Constante	[-]

De Laplace coëfficiënt is een eigenschap van het gas en bepaald het expansiegedrag van de gasbel: $k=1$ bij isotherm gedrag, $k=1,4$ bij adiabatisch gedrag. Bij isotherme expansie vindt er warmte uitwisseling plaats naar de omgeving zodat de temperatuur van het gas niet toeneemt. Bij adiabatiese expansie van de gasbel vindt er geen warmte uitwisseling plaats en kan de temperatuur van de gasbel toenemen. In de praktijk verlopen toestandsveranderingen noch volkomen adiabatisch, noch volkomen isotherm, maar liggen de toestandsveranderingen tussen de twee in. Dit noemt men dan polytrope toestandsveranderingen.

De beluchte windketel gaat beluchten indien de druk in de gasbel lager wordt dan de atmosferische druk. De windketel gedraagt zich hierna als buffertoren

Het expansiegedrag heeft effect op de resultaten. Bij isotherm gedrag wordt het laagste niveau in de windketel bereikt, bij adiabatisch gedrag worden de laagste drukken in de leiding bereikt. Voor de dimensionering worden derhalve beide situaties doorgerekend waarmee dus een conservatieve uitkomst verkregen wordt.

Het plaatsen van een windketel heeft gevolgen voor het dynamische gedrag van de terugslagklep. Omdat bij pompuitval de druk achter de klep door de windketel wordt “vastgehouden” neemt de vertraging van de waterkolom tussen zuigkelder en windketel fors toe. Dit betekent dat een snelsluitende ongedempte terugslagklep of gedempte terugslagklep moet worden toegepast.

De dimensionering van een windketel vergt in het algemeen meerdere berekeningen om dat er diverse combinaties zijn om het gehele dynamisch gedrag af te dekken. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de rekegevallen bij pompuitval voor het aantonen en dimensioneren van windketel.

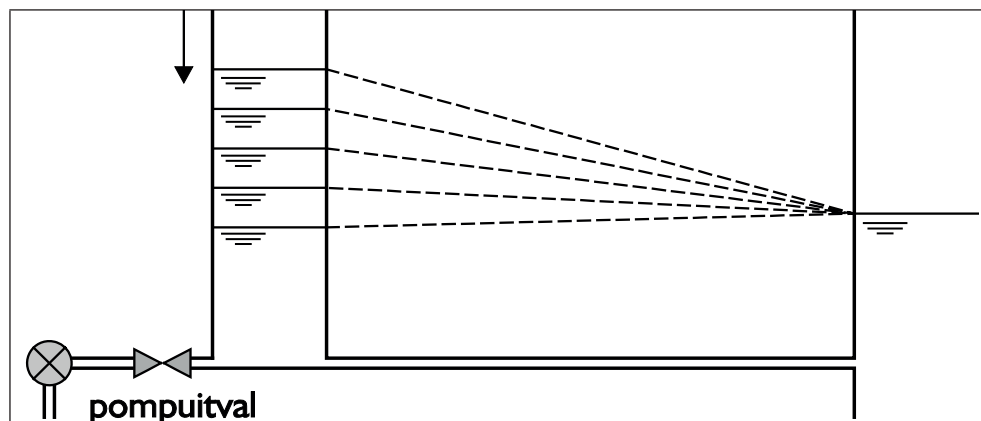
leidingweerstand	zuig- en perspeil	gedrag windketel	Uitkomst
hoog	laag	geen	min.druk in leiding
hoog	hoog	geen	max druk in leiding
laag	laag	isotherm	min. niveau in ketel
hoog	laag	adiabatisch	min druk in leiding

Bij het dimensioneren van een windketel dient de tijdsduur van de simulatie voldoende lang te zijn. Na nalevering zal de kolom water weer terugslingeren waardoor de ketel weer gevuld wordt. De snelheid waarmee dit gebeurt hangt af van de einddruk in het systeem. Dit kan bij samengestelde systemen dus ook de pompdruk van een inrikker zijn. Het gasvolume moet deze terugslinging opvangen waarbij de druk weer behoorlijk kan oplopen. De simulatieduur moet dus de complete leveringscyclus van de windketel afdekken met een minimum en maximum peil in de windketel.

A.7.6 BUFFERTOREN ALS WATERSLAGVOORZIENING

Een buffertoren is niet meer dan een open vat van voldoende oppervlak die snelle debietfluctuaties in de leiding vertraagt. Bij pompuitval suppleert de bovenstrooms geplaatste buffertoren water aan de leiding en zakt het niveau geleidelijk. Bij sluiten van een afsluiter neemt de benedenstrooms geplaatste buffertoren water op, en stijgt het niveau in de toren.

FIGUUR A 46 EFFECT VAN BUFFERTOREN TIJDENS POMPUITVAL



In eerste instantie blijft door de debietovername door de buffertoren het leidingdebiet onveranderd waarna door daling of stijging van het torenniveau de snelheid in de leiding tot geleidelijk tot nul afneemt.

Een simpele watertoren kent maar een kleine in- en uitstroom weerstand en wordt in het algemeen zo gedimensioneerd dat deze niet leegloopt bij maximaal benodigd debiet en niet overstort indien benedenstrooms een kleiner debiet wordt afgenomen. In sommige gevallen wordt echter een overstortbak aangebracht zodat overstorten wel mogelijk wordt.

Groot **voordeel** van de buffertoren is zijn eenvoud. Door het ontbreken van mechanische elementen is het een absoluut betrouwbaar middel. Het niveau in de toren stelt zich vanzelf in op de ter plaatse heersende druk. De buffertoren behoeft geen toezicht en heeft weinig onderhoud nodig. **Nadelen** van de buffertoren dat toepassing beperkt is omdat de hoogte van de toren tenminste gelijk moet zijn aan de $Q=0$ opvoerhoogte van de pomp. Ook plakken er esthetische bezwaren aan een dergelijk (hoog) bouwwerk. Bij afvalwaterleidingen kan het gebruik van een buffertoren tot stankoverlast leiden. En bij toekomstige capaciteitsuitbreiding van het leidingsysteem kan de capaciteit van de toren niet eenvoudig vergroot worden.

A.7.7 BYPASS ALS WATERSLAGVOORZIENING

Een nazuigleiding of by-pass kan toegepast worden om onderdrukken bij pomputval te beperken. Om de nazuigleiding snel te laten naleveren dient een 'reservoir' op voldoende hoog niveau beschikbaar te zijn.

Een nazuigleiding met dezelfde zuigkelder als de pomp heeft als **nadeel** dat deze pas na gaat leveren nadat de druk benedenstrooms van de pomp beneden zuigniveau gekomen is. Ook is toepassing van een nazuigleiding beperkt tot kleine leidinglengten. **Voordeel** is dat de terugslagklep achter de pomp geen bijzondere eisen stelt

A.7.8 BELUCHTER ALS WATERSLAGVOORZIENING

Om na pomputval ontoelaatbare onderdrukken in het leidingsysteem te beperken kunnen beluchters worden toegepast. Zodra de druk ter plekke van de beluchter onder de atmosferische druk komt, gaat de beluchter open en wordt lucht binnengelaten. Hierdoor zal de druk ter plekke niet ver meer kunnen dalen.

Nadat de beluchter inwerking is getreden is het wel van belang dat de ingelaten lucht weer uit het systeem verwijderd kan worden. Hiertoe zijn beluchters veelal ook voorzien van een ontluchttingsmogelijkheid. De luchtinlaatcapaciteit is meestal vele malen groter dan de luchtuitlaatcapaciteit. Dit is gedaan om het ontluchttingsproces langzaam te laten verlopen om een hoge drukstoot bij einde ontluchttingsproces te voorkomen.

Het toepassen van beluchters als waterslagvoorziening staat haaks op het ontwerpadvies om geen lucht in het systeem binnen te laten. Het toepassen van beluchters in situaties waarbij onderdruk optreedt tijdens reguliers bedrijfsvoering moet daarom afgeraden worden. Dus als bescherming voor de leiding in incidentele gevallen is het een optie.

Enige kanttekeningen hierbij zijn:

- De ingelaten lucht kan voorbij een laag punt getransporteerd zijn waardoor de ingelaten lucht niet meer op dezelfde locatie uit kan treden. Een extra ontluchttingspunt kan dus noodzakelijk zijn, anders leidt dit direct tot een extra energieverlies.
- Het systeem dient ter plekke van de be/ontluchter bij pompstilstand onder overdruk te staan om het ontluchttingsproces mogelijk te maken
- De be/ontluchter constructie moet goed gedimensioneerd zijn
- Een be/ontluchter die slechts incidenteel in werking treedt is gevoelig voor vervuiling. Dit is sterk afhankelijk van de uitvoering van het apparaat. Door drijfvet en vet kan het mechanisme vast komt te zitten en functioneert het apparaat niet meer naar behoren. Robuuste apparaten en/of regulier onderhoud is dus een vereiste.
- het ontluchten geeft stankoverlast.

A.8 GASBELLEN IN LEIDINGEN

Om in een dalende leiding onder hoek θ een gastransport op gang te brengen is een zekere minimale snelheid vereist. Is de snelheid kleiner dan deze minimumsnelheid, dan zal de lucht zich in de leiding ophopen totdat de bel onderin de dalende leiding reikt. Er moet in dit geval rekening worden gehouden met het maximale extra energieverlies dat gelijk is aan het hoogteverschil over de dalende leiding.

De benodigde stroomsnelheid is echter ook sterk afhankelijk van de leidingdiameter. Daarom maken we gebruik van een dimensieloze stroomsnelheid, het stromingsgetal:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (\text{A.59})$$

Het stromingsgetal zorgt ervoor dat door zwaartekracht gedomineerde verschijnselen kunnen worden verschaald naar andere leidingdiameters; de vrije-spiegel stroming onder een gasbel met een watersprong is hier een voorbeeld van. Het stromingsgetal houdt geen rekening met schaaffecten ten gevolgen van de waterkwaliteit, maar uit onderzoek blijkt dat deze schaaffecten verwaarloosbaar zijn bij leidingdiameters groter dan 150 mm (zie Tukker (2007)). Praktische aanbevelingen met betrekking tot lucht in afvalwaterpersleidingen, die voortgekomen zijn uit het CAPWAT onderzoek, zijn samengevat in diverse publicaties (Pothof *et al.* 2011a, Pothof *et al.* 2011b).

A.8.1 TRANSPORTMECHANISMEN

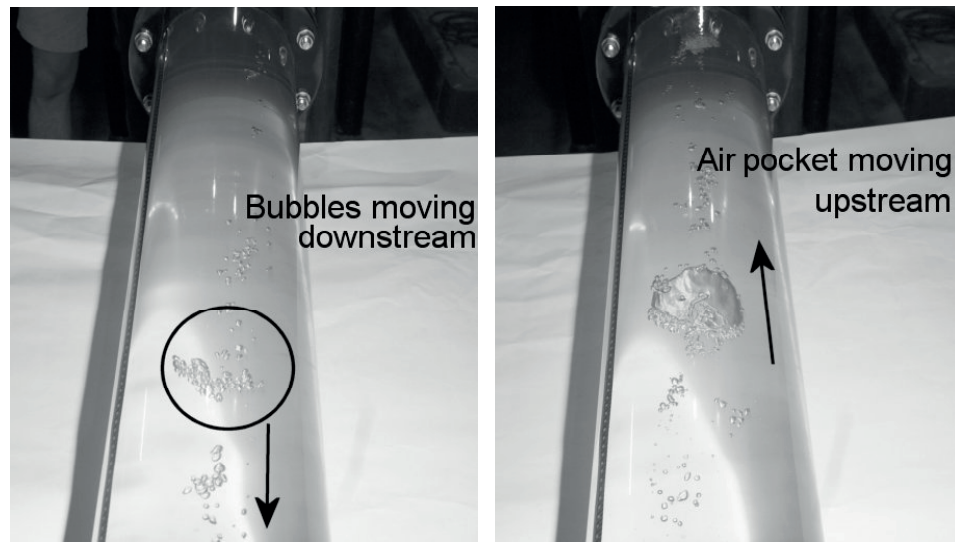
De elementaire krachten voor het luchtbeltransport in water bij neergaande leidingdelen zijn goed bekend. Dit zijn:

- Opwaartse kracht
- Weerstand
- Evenwicht tussen oppervlaktespanningen (water/luchtbel/wand)

Veel onderzoekers hebben zich echter beperkt tot bestudering van details. In het CAPWAT project is op grotere schaal naar het fenomeen gekeken. Lubbers (2007) heeft voor het eerst onderzoek gedaan naar de invloed van de leidingdiameter en de lengte van het dalende been op het luchttransport door stromend water. Hiertoe zijn diverse testcircuits, grotendeels in perspex, gebouwd variërend in diameter van \varnothing 80 mm tot \varnothing 500 mm en met hellingshoeken variërend van 5 tot 90 graden. Bovenstreams van de knik wordt gecontroleerd lucht geïnjecteerd. Vervolgens is geobserveerd hoe de ingebrachte kleine luchtbellen zich gedragen onder diverse snelheden. Aan de hand van illustraties en foto's wordt dit proces hier nader beschreven.

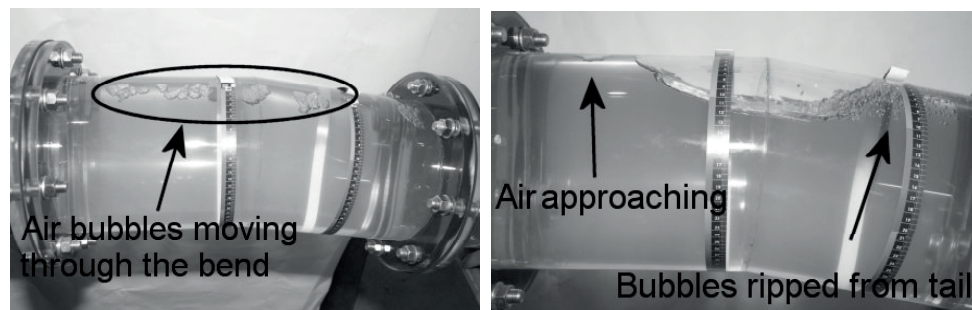
Kleine luchtbellens worden vanuit de locatie voor injectie van lucht losgelaten. Deze luchtbellens worden door het water vervoerd naar de bocht. Als de watersnelheid groot genoeg is, passeren de luchtbellens de bocht ongehinderd en stromen door de hellende sectie naar het dieper gelegen horizontale deel en kunnen vervolgens makkelijk hun weg vervolgen door het benedenstroomse opgaande leidingdeel van de zinker. De snelheid van de luchtbellens in het neergaande deel is lager dan de watersnelheid. Bij een kritische watersnelheid en een hellingshoek van 10° bedraagt de belsnelheid ongeveer 30% van de watersnelheid tot 60% van de watersnelheid voor kleine belletjes. In horizontale leidingen bedraagt de belsnelheid ongeveer 60% van de watersnelheid.

FIGUUR A.47 LINKS: KLEINE BELLEN BEWEGEN STROOMAFWAARTS. RECHTS: GROTERE GASVOLUMES BEWEGEN TEGEN DE STROMING IN.



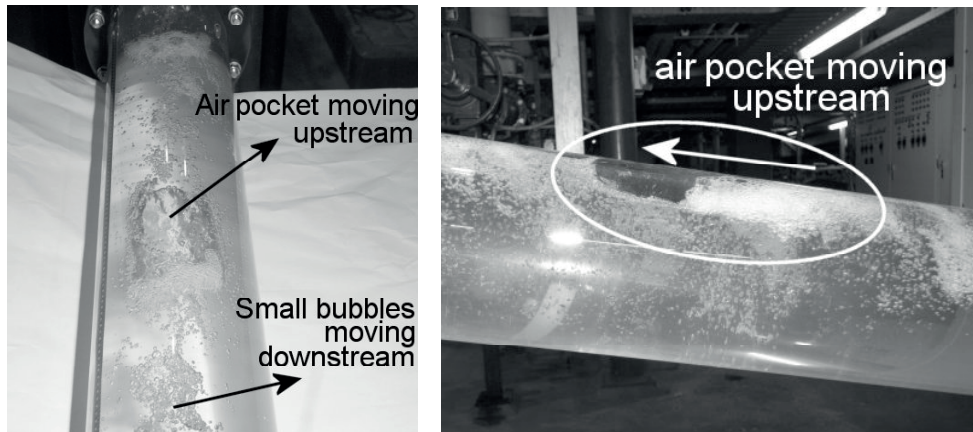
Als de stroomsnelheid wordt verlaagd ontstaat een situatie in het hellende deel waarin de luchtbellens kunnen ophopen tot grotere luchtvolumes die, vanwege de toegenomen verhouding tussen de opwaartse kracht en de weerstand, als ze groot genoeg zijn stroomopwaarts bewegen. Dit luchtvolume beweegt stroomopwaarts naar de bocht en vormt een 'buffer'. De vanuit het horizontaal deel aangevoerde kleine luchtbellens kunnen niet meer ongehinderd de bocht nemen maar lopen vast in de buffer. Stagnatie van luchtbeltransport is nu een feit en de luchtbel in de bocht zal gaan groeien.

FIGUUR A.48 DE FOTO LINKS LAAT VERSCHILLENDE GASBELLEN ZIEN DIE DOOR DE BOCHT MET DE STROMING WORDEN MEEGEVOERD. DE BELLEN SMELTEN NIET SAMEN EN DE STROMING OEFENT VOLDOENDE KRACHT UIT OP DE BELLEN OM DEZE DOOR DE NEERGAANDE LEIDING TE TRANSPORTEREN. DE FOTO RECHTS LAAT EEN GASVOLUME ZIEN DAT STILSTAAT IN HET HOGE PUNT. DE STROOMSNELHEID KAN ONVOLDOENDE KRACHT UITOEFENEN OP HET GASVOLUME OM DEZE IN EEN KEER TE VERWIJDEREN. HET GASVOLUME FUNGEERT ALS EEN BUFFER TEGEN TRANSPORT VAN GAS NAAR HET BENEDENSTROOMSE GEDEELTE.



Door turbulentie aan de “staart” van de buffer worden kleine bellen afgeschud en op transport gezet. De mate van turbulentie wordt bepaald door de grote van de bel en de snelheid ter plaatse. De op transport gezette luchtbellen kunnen weer samenklonteren tot een grote bel en indien de opwaartse kracht het wint van de stromingskrachten op de bel, weer tegen te stroming is teruggaan naar de bocht. Dit leidt tot een chaotisch proces waarin een stroom grote luchtvolumes/proppen stroomopwaarts (tegen de waterstroming in) bewegen terwijl een tweede stroom kleinere bellen stroomafwaarts wordt getransporteerd).

FIGUUR A.49 DUAL MODE STROMING; GROTE LUCHTPROPPEN BEWEGEN TEGEN DE STROMING IN TERWIJL KLEINE GASBELLEN DOOR DE STROMING WORDEN MEEGEVOERD.



Het netto transport kan daardoor gering zijn waardoor de luchtbel in de bocht blijft groeien.

A.8.2 SNELHEIDSCRITERIUM

Bij een lage watersnelheid zal de luchtbel in het horizontale deel blijven en ontstaat een stromingsregime vergelijkbaar vrije uitstroming in open-kanaal stroming. De laagdikte y_c bij de bocht kan niet kleiner worden dan die behorende bij kritische uitstroming met Froude getal gelijk 1, dus $\frac{v}{\sqrt{g A_{w,c}/b_{s,c}}} \approx \frac{v}{\sqrt{g y_c}} = 1$, waarin $A_{w,c}$ de natte doorsnede en $b_{s,c}$ de

breedte aan de waterspiegel bij de kritische waterdiepte.

De luchtbel kan bovenstrooms niet eindeloos doorgroeien. Het verloop van de waterspiegel wordt bepaald door wrijving en versnelling van het water onder de luchtbel. De maximale bellengte in het bovenstroomse horizontale deel kan geschat worden uit de hydraulische gradient in de geheel gevulde leiding (geldig voor stromingsgetallen kleiner dan 0,58).

$$L_{\max,hor} \leq \frac{D - y_c}{\sin \alpha + HGL} \quad (A.60)$$

Waarin α de hellingshoek van de bovenstroomse leiding is ($\alpha > 0$ is een omhooglopende leiding).

Voor hogere stromingsgetallen ($F > 0,58$) is de bellengte significant kleiner (tot een maximale lengte van 7 D (zie hager (1999))

Bij toename van de snelheid wordt de luchtbel gedwongen om in het neergaande been te gaan. Hierdoor neemt de hoogte van het gasvolume in het hellende deel toe en daarmee dus het extra energieverlies.

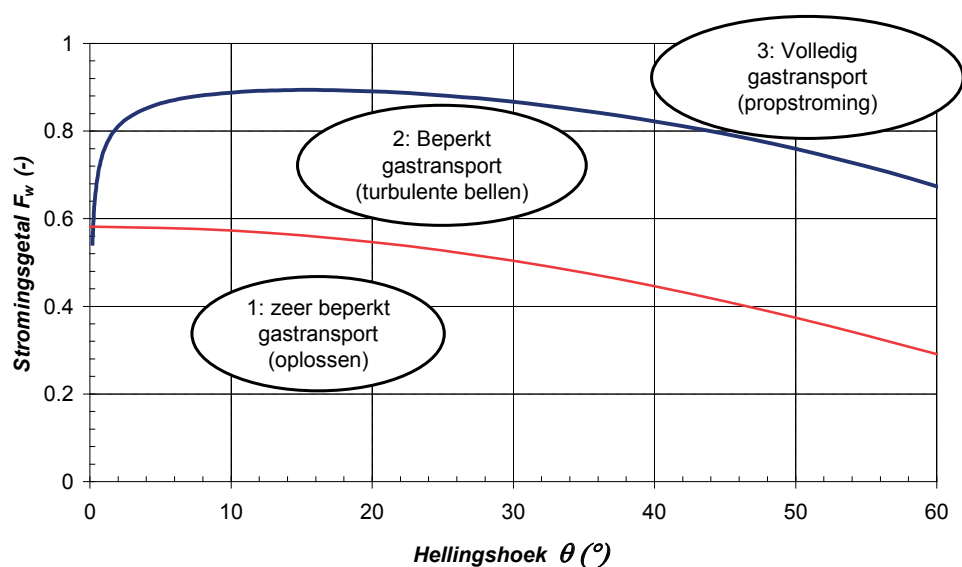
De stroming in het hellende deel is superkritisch. Aan de “staart” van het gasvolume ontstaat een turbulente watersprong waarbij grote hoeveelheden luchtbelletjes worden ingeslagen en verder worden afgevoerd. Afhankelijk van de stroomsnelheid kunnen drie verschillende stroombeelden optreden (zie (Pothof, Clemens 2011) en Figuur A.50).

1. **Tegengesteld gastransport, één gasbel (Blow-back flow-regime)¹:** De luchtbelllen klonteren snel samen aan de bovenkant van de leiding en de resulterende gasvolumes stromen terug omhoog in het grote luchtvolume. Er bevindt zich precies één lang gasvolume met watersprong in de dalende leiding.
2. **Tegengesteld gastransport, meerdere gasbellen (Transitional flow regime):** De lucht klontert samen, maar wordt niet meer volledig in grote gasvolumes langs de bovenkant van de leiding teruggevoerd in het gasvolume. In plaats hiervan bouwt een volgend gasvolume op, die in de dalende leiding blijft hangen en tot een volgende watersprong leidt. Dit proces kan zich herhalen tot maximaal 7 luchtbelllen in 40 m.
3. **Prop-stromingsregime (Plug flow regime)²:** Er bevindt zich geen watersprong meer in de dalende leiding, maar alle aangevoerde lucht wordt direct afgevoerd als kleine belllen, die langs de binnenbovenkant van de leiding worden meegevoerd. Als de snelheid nog verder wordt opgevoerd, dan worden steeds meer belllen als gesuspendeerde belllen meegevoerd; dit flow regime wordt dispersed bubble flow genoemd, maar dit flow regime zal nauwelijks kunnen optreden in afvalwaterpersleidingen vanwege de grote stroomsnelheid die noodzakelijk is.

Bij voldoende luchtaanvoer kan de bel in principe het gehele hellende deel vullen en is dus het totale energieverlies gelijk aan de diepte van de zinker.

Bij verhoging van het waterdebiet en daarmee de snelheid neemt het luchtbeltransport door het hellende deel toe en naarmate dit meer is dan de aanvoer betekend dit een reductie van de grote luchtbel.

FIGUUR A.50 VEREISTE STROMINGSGETALLEN VOOR GASAFVOER



- 1 De genoemde grenswaarde geldt voor leidingdiameters groter dan 200 mm. Voor kleinere diameters gelden iets lagere grenswaarden
- 2 De overgang naar full gas flow transport hangt af van de aangevoerde hoeveelheid gas. De dimensieloze gasdebieten bedroegen $F_g = 0,3 - 0,0045$.

A.8.3 REKENMODEL GASTRANSPORT

Het hier beschreven rekenmodel is gebaseerd op het proefschrift van Pothof (2011). De vrijespiegelstroming op de normaaldiepte in de hellende leiding speelt een belangrijke rol in de opbouw van het model. De dimensieloze uitdrukking voor de vrijespiegelstroming op normaaldiepte in een ronde buis luidt

$$F_w^2 = \frac{v_{s,w}^2}{gD} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \frac{D_h}{D} \left(\frac{A_{w,n}}{A_D} \right)^2 \quad (\text{A.61})$$

waarin $A_{w,n}$ en D_h de natte doorsnede en hydraulische diameter van de waterfilm op normaaldiepte— i.e. wrijving in evenwicht met zwaartekracht. De wrijvingsfactor λ wordt hierin berekend met White-Colebrook, maar een andere wrijvingsformule kan uiteraard ook toegepast worden. De meetdata in uit het lab laat zien dat een lengte van 9D nodig is om de normaaldiepte te bereiken. In de praktijk is elke luchtophoping langer dan 9D. Daarom kan de lengte-verandering van de luchtbellen gebaseerd worden op de aanname dat de waterfilm steeds de normaaldiepte heeft. Hiermee wordt het volgende verband gevonden tussen de luchtdebieten en de lengteverandering van de luchtbellen:

$$Q_{g,in} - Q_{g,t} = (A_D - A_{w,n}) \frac{dL_g}{dt} \quad (\text{A.62})$$

waarin $Q_{g,in}$ en $Q_{g,t}$ het instromende en getransporteerde (uitstromende) luchtdebiet onderaan de neerwaartse leiding. Vergelijking (A.62) kan ook als basis gebruikt worden om de tijdsduur te berekenen om een gasbel van bepaalde lengte af te breken. Hiertoe moet vergelijking (A.62) in de tijd geïntegreerd worden:

$$\int Q_t - Q_{in} = (A_D - A_n) \cdot L_g \quad (\text{A.63})$$

De kortste afbraaktijd wordt gevonden als aangenomen mag worden dat het inkomende luchtdebiet $Q_{g,in} = 0$ l/min. (A.62) Vergelijking wordt dimensieloos gemaakt.

$$F_{g,in} - F_g = \frac{(1 - A_{w,n}/A_D) dL_g}{\sqrt{gD}} \quad (\text{A.64})$$

De rest van deze sectie bestaat uit de modellering van het lucht-stromingsgetal F_g . Het model wordt in eerste instantie gevalideerd met meetdata bij $E_o > 5000$ (i.e. data van Hoek van Holland van het lab voor $D > 200$ mm)) en hellingshoeken $\theta \leq 30^\circ$. Eerst zal het luchttransport in het prop stromingsregime en willekeurige hellingshoeken gemodelleerd worden. Daarna wordt de invloed van de luchtophoping verdisconteerd.

Luchttransport in het prop-stromingsregime

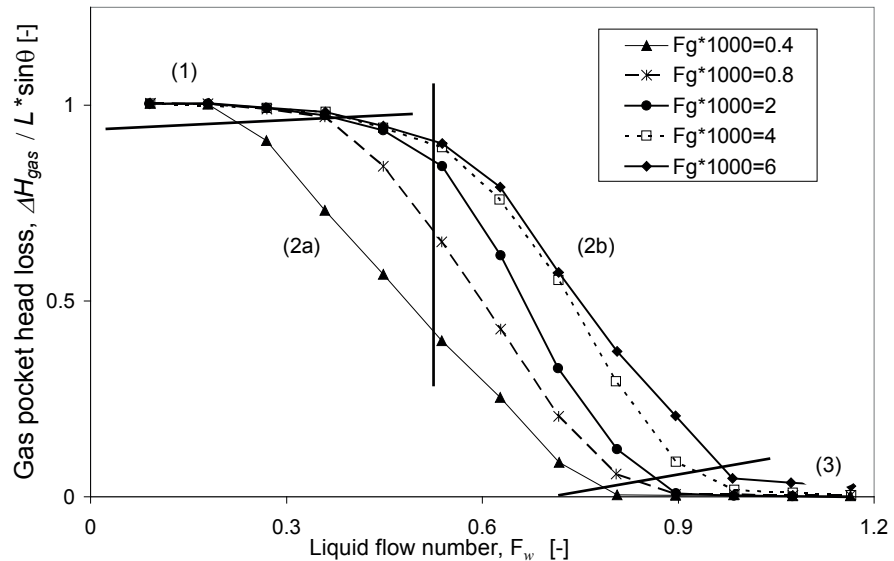
Pothof (2010) heeft recentelijk een krachtenbalans opgesteld, die voorspelt wanneer een lange gasbel in een neerwaartse leiding blijft hangen onder invloed van de sleepkracht en opwaartse kracht, ervan uitgaande dat $E_o > 5000$.

$$F^2(\theta) = \frac{\sin \theta}{\lambda} \frac{D_h}{D} \left(\frac{A_n}{A_D} \right)^2 + \frac{A_D \cos \theta}{A_b} \frac{1}{\theta} \left[\frac{2}{3} \sqrt{\frac{2y_n}{R} - \left(\frac{y_n}{R} \right)^2} \left(\frac{y_n}{R} - 3 \right) \left(\frac{y_n}{R} - \frac{1}{2} \right) + \arcsin \left(1 - \frac{y_n}{R} \right) + \frac{1}{2} \right] \quad (\text{A.65})$$

Als het water-stromingsgetal deze waarde overschrijdt, dan zal een enkele lange luchtbel neerwaarts getransporteerd worden met een snelheid die met een drift flux model bepaald kan worden. Vergelijking (A.65) markeert dus de overgang naar propstroming, afgezien van een factor die afhangt van het luchtdebiet. Het nut van vergelijking (A.65) in het blow-back stromingsregime wordt geïllustreerd aan de hand van Figuur A.51. Als het water-

stromingsgetal nogmaals geschaald wordt met het kritieke stromingsgetal voor individueel luchtbeltransport volgens vergelijking (A.65), dan vallen de meeste resultaten in Figuur A.51 op één lijn. Alleen de meetdata bij de kleinste luchtdebieten ($F_g \cdot 1000 = 0.4$) wijken duidelijk af van de lijn, wat wordt toegeschreven aan de invloed van het oplossen van lucht. Er kan geconcludeerd worden dat de invloed van de hellingshoek gemodelleerd kan worden met vergelijking (A.65).

FIGUUR A.51: DIMENSIELOOS LUCHTBEL-ENERGIEVERLIES IN HOEK VAN HOLLAND



De metingen laten zien dat het luchttransport in het prop-stromingsregime exponentieel toeneemt als functie van het water-stromingsgetal. De exponentiële trend wordt het best beschreven als functie van het herschaalde water-stromingsgetal $F_w/F(\theta)$ met ($R^2 = 0.93$)

$$F_g = 1,87 \cdot 10^{-7} \cdot e^{9 \cdot F_w / F(\theta)} \quad (A.66)$$

Vergelijking (A.66) kan geïnverteerd worden om een uitdrukking te krijgen voor het kritieke stromingsgetal voor luchtbel-transport als functie van het luchtdebiet, diameter en hellingshoek.

$$F_c = F(\theta) \ln \left[\left(\frac{F_g \cdot 10^7}{1.87} \right)^{1/9} \right] \quad (A.67)$$

Vergelijking (A.67) is geldig voor water-lucht-stroming in leidingen met $D > 190$ mm (or $Eo > 5000$). Vergelijking (A.67) geeft een completere beschrijving dan bestaande uitdrukkingen voor de kritieke snelheid, omdat de invloed van het luchtdebiet ook meegenomen is.

Luchttransportmodel in het blow-back stromingsregime

Als een luchtophoping aanwezig is in een neergaande leiding, dan kan het energieverlies in de evenwichtssituatie nauwkeurig beschreven worden met een cumulatieve beta-verdelingsfunctie $B(x, \alpha, \beta)$, waarin x het herschaalde stromingsgetal en α en β functies van de leidinglengte.

$$1 - R = B(x, \alpha, \beta) = \frac{\int_0^x t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt}{\int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt} \quad (A.68)$$

waarin

$$R = \Delta H_{gas} / (L \sin \theta)$$

$$x = F_w / F(\theta)$$

$$\alpha = 9.67 \cdot 10^{-2} (L/D - 10.3)^{0.783}, \quad 20 \leq L/D \leq 210$$

$$\beta = 9.39 \cdot 10^{-3} L/D + 0.439$$

Het model in vergelijking suggereert dat de inverse beta-functie in vergelijking (A.68) ingebouwd kan worden om het effect van de luchtophoping te modelleren

$$F_g = 1,87 \cdot 10^{-7} \cdot e^{9 \cdot F_w / (B^{-1}(1-R, \alpha, \beta) \cdot F(\theta))} \quad (\text{A.69})$$

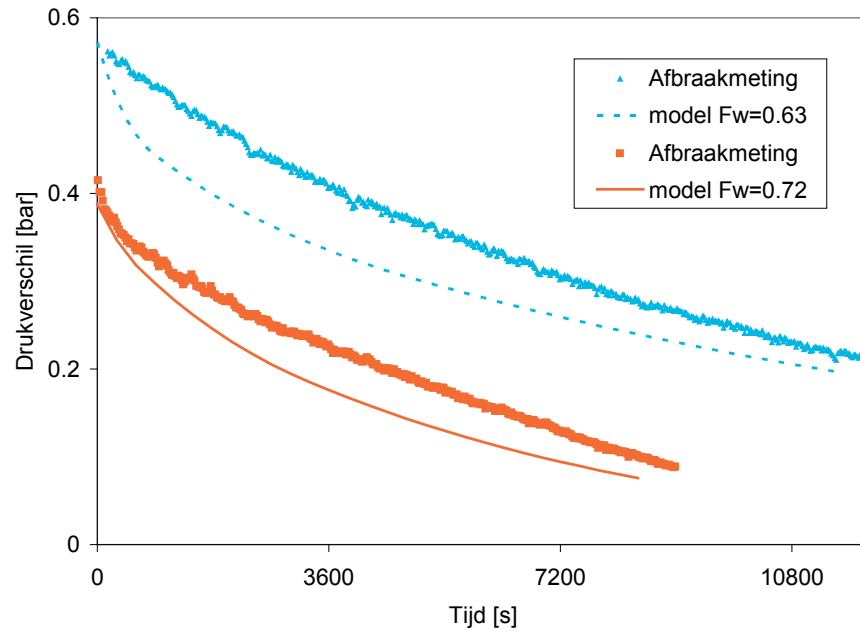
Vergelijking (A.69) voorspelt het dimensieloze gasdebiet als functie van de relevante parameters:

Deze modelberekeningen zijn gecalibreerd op de volgende omstandigheden:

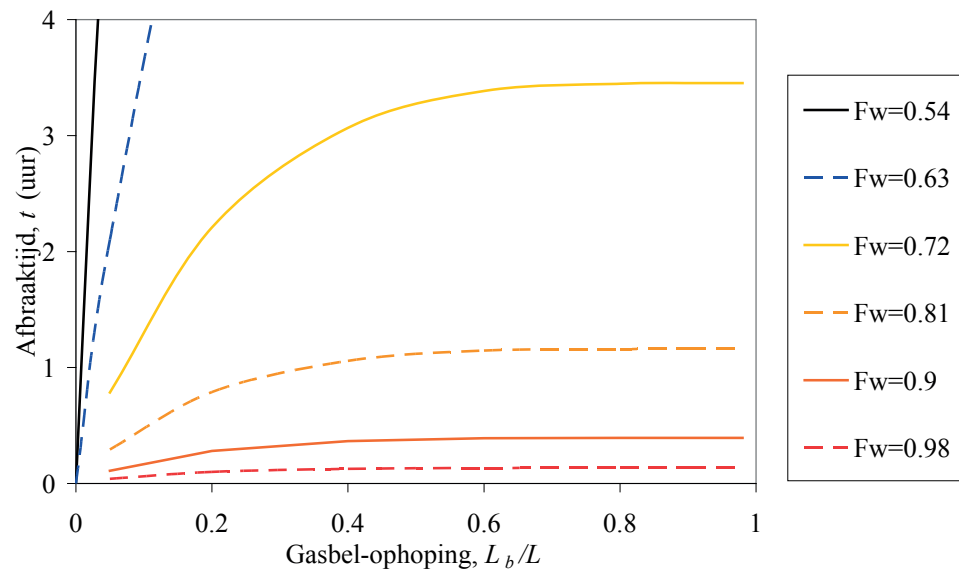
- leidinglengtes $L/D > 30$, die het meest relevant zijn in de praktijk. Bij kortere leidinglengtes is de aanname dat de waterfilm direct de normaal diepte bereikt een te grote vereenvoudiging. De maximale experimentele leidinglengte bedroeg $L = 209 \cdot D$. Het theoretische criterium voor gasbeltransport suggereert dat het luchttransport voor langere dalende leidingen niet verder zal afnemen. De modelparameters α en β kunnen gebaseerd worden op een maximale $L/D = 210$; dus $L/D = \min(L/D, 210)$
- Leidingdiameter $D > 190$ mm. Voor kleinere leidingdiameters is het werkelijke dimensieloze luchtdebiet groter en geeft het huidige model een conservatieve benadering.
- Als het berekende luchtdebiet kleiner wordt dan $F_g = 0.0005$ dan levert het oplossen van lucht in het water een niet-verwaarloosbare bijdrage. Deze invloed is niet in dit model verdisconteerd, waardoor het werkelijke luchtdebiet wat groter zal uitvallen.
- De meeste metingen zijn uitgevoerd bij een druk van ongeveer 1.6 bar(abs) onderaan de dalende leiding. Als de systeemdruk beduidend hoger ligt, zal het oplossen van lucht een steeds belangrijker rol gaan spelen. Enkele metingen bij drukken tot 2.5 bar(abs) tonen dit effect aan. Deze invloed is nog niet in het huidige model meegenomen.
- De watertemperatuur varieerde tijdens de metingen tussen 15 en 25 C. Bij beduidend lagere temperatuur van het afvalwater zal het luchtdebiet verder afnemen.

Ondanks bovengenoemde beperkingen geeft dit rekenmodel een betrouwbare indicatie van het luchttransport in dalende leidingen. Door vergelijking (A.69) te substitueren in vergelijking (A.64) kan de afbraaksnelheid van een luchtbel berekend worden. Integratie levert vervolgens de benodigde afbraaktijd om een luchtbel van bepaalde lengte te verkleinen tot een acceptabele lengte. Uit de afbraaktijd en het waterdebiet wordt het benodigde watervolume berekend voor het afbreken van een luchtbel. Figuur A 52 laat zien dat het rekenmodel een goede indicatie geeft van het afbraakproces.

FIGUUR A. 52: VERGELIJKING TUSSEN BEREKENDE EN GEMETEN AFBRAAK. DE AFBRAAKMETINGEN ZIJN UITGEVOERD BIJ 11°C, WAT WAARSCHIJNLIJK HET GROTE VERSCHIL IN AFBRAAKSNELHEID AAN HET BEGIN VAN DE METINGEN VERKLAART. DESALNIET-TEMIN GEEFT HET REKENMODEL EEN GOEDE INDICATIE VAN HET AFBRAAKPROCES.



FIGUUR A. 53: AFBRAAKTIJD ALS FUNCTIE VAN DE RELatieve BELLENGTE PER 40 M BIJ D = 192MM EN Q = 10 - 20°



Uit het rekenmodel blijkt dat het luchtdebiet voor langere dalende leidingen ($L/D > 200$) uitsluitend afhangt van de relatieve bellegte L_b / L . Bovendien is het luchtdebiet voor dalende hoeken tussen 5° en 20° vrijwel constant. Daarom kan de afbraaktijd voor een bepaalde dalende leidingenlengte uitgedrukt worden als functie van de gasbelophoping. Figuur A. 53 geeft bij verschillende waterdebieten de afbraaktijd per 40 m dalende lengte voor een leidingdiameter van 192 mm. Deze afbraaktijd kan verschaald worden naar grotere leidingdiameters en langere dalende leidingen. De afbraaktijd loopt lineair op in de leidinglengte: een 5 keer zo lange dalende leiding heeft een 5 keer grotere afbraak-tijd.

De afbraaktijd neemt af bij een grotere leidingdiameter met de wortel van de diameter verhouding; een 4 keer zo grote leidingdiameter ($D=768\text{mm}$) leidt tot een halvering van de afbraaktijd per 40 m leidinglengte en gelijkblijvend stromingsgetal. Met deze correctiefactoren voor leidingdiameter en leidinglengte kan Figuur A. 53 gebruikt worden voor een indicatie van de verwachte afbraaktijd en het daarvoor benodigde watervolume.

A.8.4 AFVANGEN VAN GAS

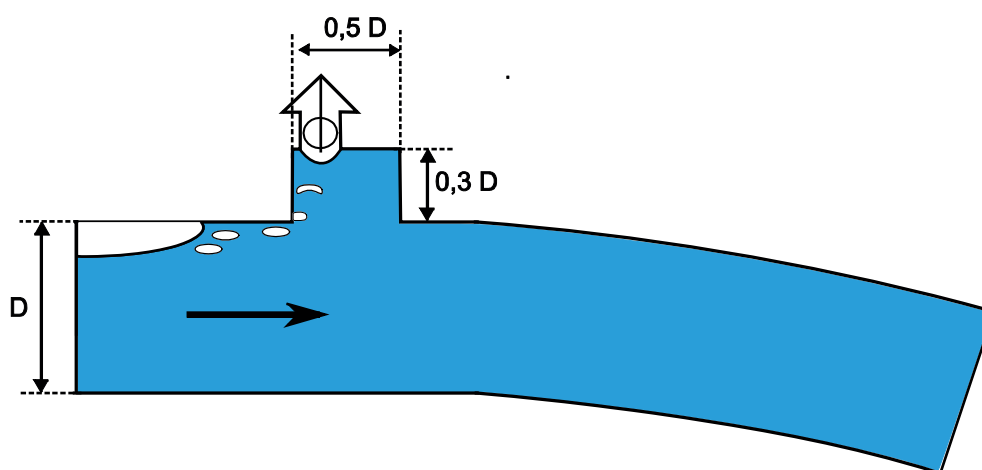
Een T-stuk kan gebruikt worden om gasbellen af te vangen. Het betreft hier alleen de gasbellen die aan de bovenkant van de leiding meegevoerd worden door de stroming. Gasbellen die door een turbulente stroming in het midden of onderkant van de leiding meegevoerd worden kunnen niet met conventionele ontlueters afgevangen worden.

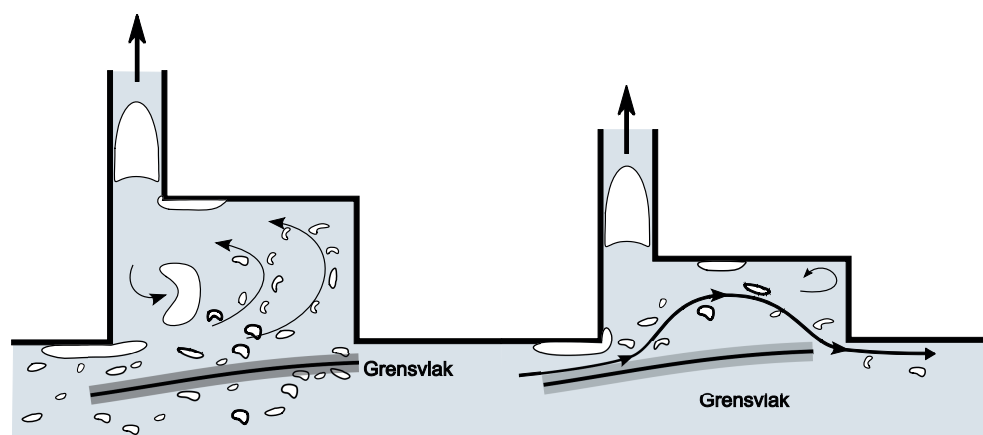
Uit onderzoek van Wickenhäuser (2008) met schoon water ten behoeve van toepassingen in waterkrachtcentrales volgt dat de minimale afmetingen van een T-stuk als volgt zijn (Figuur A. 54):

Breedte: $0,5 D$
 Hoogte: $0,3 D$

Wickenhäuser gebruikte een 500 mm leiding, met rechthoekige opbouw om het gas af te vangen. Door de rechthoekige vorm is er aan beide zijden meer oppervlak beschikbaar om het gas af te vangen. Bovenstaande getallen zijn al gecorrigeerd voor dit verschil. Het onderzoek van Wickenhäuser werd uitgevoerd in een leiding met een diameter van 500 mm, en met een stromingsgetal $F < 0,62$. Dit staat gelijk aan een stroomsnelheid van bijna 1,4 m/s.

FIGUUR A. 54: LEIDING MET T-STUK EN ONTLUCHTER



FIGUUR A.55 LINKS: STROMINGSPATROON IN EEN T-STUK MET $H > 0,3 D$ RECHTS: STROMINGSPATROON IN EEN T-STUK MET $H < 0,3 D$ 

Figuur A.55 (links) laat het stromingspatroon zien in een T-stuk met $H > 0,3 D$. Er ontstaat een grensvlak. Gasbelletjes die zich onder het grensvlak bevinden zullen niet in het T-stuk terecht komen en verder doorgevoerd worden in de leiding.

Gasbellen die wel boven het grensvlak zitten, zullen door de circulatie in het T-stuk de zij-tak ingevoerd worden. Hier circuleren de bellen totdat ze bij de ontlufter komen.

Om maximaal gebruik te maken van deze circulatie, moet de ontlufter zo ver mogelijk aan de bovenstroomse zijde van de zij-tak gemonteerd worden. Wordt dit niet gedaan, dan kan dit significante gevolgen hebben voor de ontluftingscapaciteit.

Figuur A.55 (rechts) laat het stromingspatroon zien in een T-stuk met $H < 0,3 D$. Hier ontstaat ook een circulatie van gasbellen, maar veel zwakker als in de vorige situatie. Een significant gedeelte van de gasbellen worden de zij-tak weer uitgevoerd en verder getransporteerd in de persleiding.

A.8.5 VRIJKOMEN VAN GAS DOOR ONDERDRUK

Als er onderdruk in de leiding heerst, kan opgelost gas vrijkomen uit het water aangezien de verzadigingsconcentratie c_s (in $\text{m}^3 \text{ gas} / \text{m}^3 \text{ water}$) afhankelijk is van de absolute druk in de leiding volgens de Wet van Henry. Als aangenomen wordt dat het water verzadigd is met een gas-component bij atmosferische druk, dan wordt bij maximale ontgassing van het water bij lokale druk $P < P_{atm}$ voor het ontgassingsdebiet Q_g :

$$Q_g = \left(\frac{P_{atm}}{P} - 1 \right) \cdot c_s \cdot Q_w \quad (\text{A.70})$$

Bovenstaande vergelijking geeft het volumetrische gasdebiet bij de heersende druk P in de leiding.

Het ruwe afvalwater zal bij benadering alleen met stikstof verzadigd zijn bij atmosferische druk. Als wordt aangenomen dat het afvalwater verzadigd is met stikstof (zie Tabel A.6) en dat alle stikstof vrijkomt in de leiding kan het volume van het vrijgekomen gas berekend worden.

De Zuurstofconcentratie is per definitie sterk onderverzadigd. Alle andere gassen, zoals kooldioxide (CO_2), methaan (CH_4) en waterstofsulfide (H_2S), worden geproduceerd via biochemische processen die relatief traag verlopen. CO_2 en H_2S zijn zeer goed oplosbaar in water en zullen dus nauwelijks aanwezig zijn in gasbellen. Huishoudelijk afvalwater bevat onvoldoende sulfaten ($\sim 100 \text{ mg/l}$) om het afvalwater te verzadigen met H_2S bij atmosferische druk. Methaan is veel minder goed oplosbaar en kan wel vrijkomen in gasbellen, maar praktijk-ervaring laat zien dat de biochemische productie praktisch nooit de hoofdoorzaak is van capaciteitsreducerende gasbellen. Alleen in situaties met specifieke lozingen kan de bio-chemische productie gasophoppingen veroorzaken.

TABEL A.6 VERZADIGINGSCONCENTRATIES CS VOOR STIKSTOF (N_2) BIJ ATMOSFERISCHE DRUK

Temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)	Verzadigingsconcentratie (10^{-2} kg/m^3)	Verzadigingsconcentratie ($10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^3$)
0	2,94	2,35
10	2,33	1,86
20	1,93	1,54

B

BESCHRIJVING GASBEL DETECTIEMETHODEN

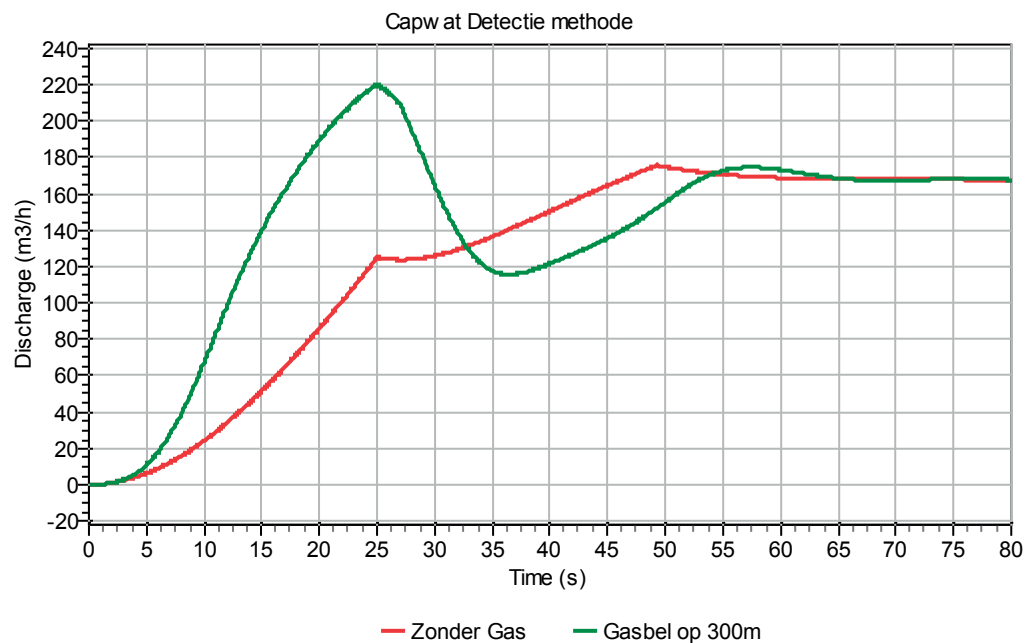
Deze appendix is gebaseerd op detectiemethoden, beschreven in de proefschriften van Lubbers (2007) en Pothof (2011). Indien in het leidingsysteem een of meerdere gasbellen zitten veranderen het stationaire en dynamische karakter van het systeem. Door bepaalde signalen in de tijd te analyseren kan vastgesteld worden of er een gasbel in het systeem zit. Hiervoor zijn drie methoden beschikbaar.

1. Verandering debietpatroon tijdens opstarten pomp
2. Drukverandering bij aftappen van een bepaald volume
3. Verandering van looptijden drukgolven

B.1 DEBIETVERLOOP TIJDENS POMPSTART

De debietregistratie van een opstartende pomp kan gebruikt worden als simpele diagnostische toets om gasbellen in de leiding te detecteren. Deze simpele diagnostische toets is vooral bruikbaar omdat de debietregistratie over het algemeen voor elk gemaal beschikbaar is. Het geeft echter geen informatie over de grootte of de locatie van de gasbel.

FIGUUR B.1 DEBIETPATTERN BIJ HET OPSTARTEN VAN DE POMP



Deze methode werkt doordat de gasbel de leiding in twee delen opsplijst. Hierdoor moet de pomp niet de vloeistofkolom met de lengte van de gehele leiding op gang brengen, maar alleen het deel tot aan de gasbel. Dit betekent dat de massastraagheid van de vloeistofkolom kleiner is, waardoor deze een grotere versnelling ondergaat (Figuur B.1).

Deze methode geeft overigens geen duidelijke uitslag als de gasbel in het systeem erg klein is, of als de gasbel zich aan het einde van de leiding bevindt.

Ook is deze methode deels afhankelijk van de nauwkeurigheid en responsiviteit (snelheid) van de debietmeter. Dit kan een probleem vormen in de praktijk omdat daar meestal elektromagnetische debietmeters gebruikt worden die wel nauwkeurig zijn, maar met een lage responsiviteit.

B.2 DRUKVERANDERING NA AFTAPPEN

Een tweede manier om gasbellen te detecteren is door de verandering in druk te registreren tijdens het aftappen van een bepaald volume. Deze methode is gebaseerd op de samendrukbaarheid van de vloeistof, de aanwezige gasbellen en de stijfheid van het leidingmateriaal.

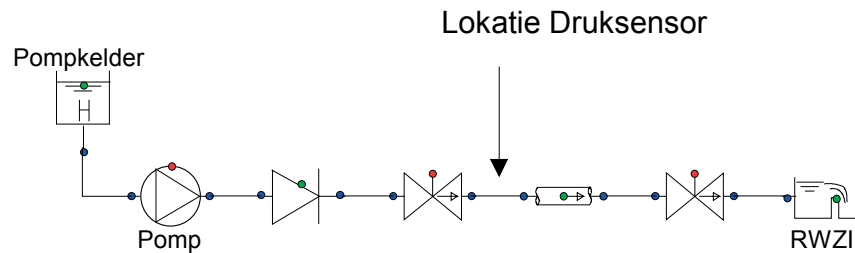
De samendrukbaarheid van de vloeistof en stijfheid van de leiding worden beschreven door de waterslagberging λ (Bijlage A.8):

$$\lambda_0 = \frac{\Delta V}{\Delta H} = \frac{g \cdot V}{c^2} \quad (\text{B.1})$$

Deze meetmethode wordt hieronder uitgewerkt.

De meting zelf wordt gedaan in een geïsoleerd systeem. Figuur B.2 laat een simpel voorbeeld zien. Door de twee kleppen te sluiten wordt de leiding geïsoleerd van de omgeving. Via een kraan kan nu een bepaald volume afgetapt worden uit het systeem, waardoor de druk in de leiding zal dalen.

FIGUUR B.2 DE PERSLEIDING KAN GEÏSOLEERD WORDEN VAN HET SYSTEEM DOOR DE TWEE AFSLUITERS DICHT TE ZETTEN.



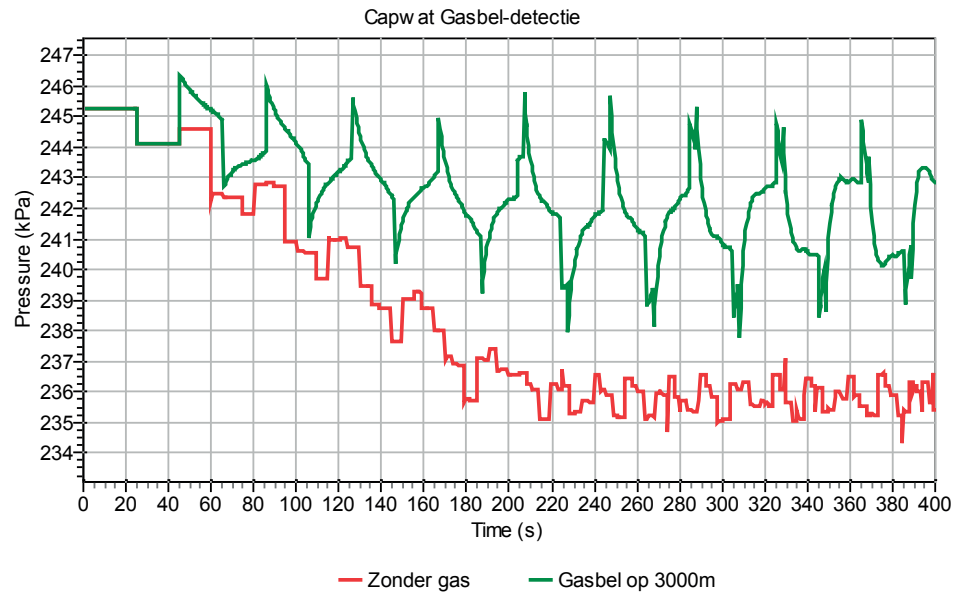
Als het afgetapte volume en de drukkaling bekend zijn, kan het gasvolume in de leiding worden bepaald. Omschrijven van vergelijking (B.1) geeft voor het gasvolume V_i :

$$V_i = \frac{p_i}{\rho g} \left(\frac{\Delta V}{\Delta H} - \frac{gV}{c_0^2} \right) \quad (\text{B.2})$$

De initiële gasdruk p_i in vergelijking (B.2) is een absolute druk in SI eenheden, Pa.a. Deze druk kan verkregen worden door de atmosferische druk op te tellen bij de gemeten druk op $t=0s$.

In Figuur B.3 staan de druksignalen benedenstrooms van de klep (zie Figuur B.2). Door de expanderende gasbel is de drukkaling in de tijdreeks met gasbel lager dan in de tijdreeks zonder gasbel.

FIGUUR B.3 DRUK-SIGNALLEN VAN SYSTEEM ZONDER EN MET GASBEL



Door een gemiddelde waarde te nemen voor de tijdreeks (nadat de het volume is afgetapt), kan de exacte drukdaling bepaald worden. In Figuur B.3 is te zien dat voor $t > 240$ s de druk is gestabiliseerd (waterslag golven uitgezonderd).

B.3 DYNAMISCHE METING

Een derde betrouwbare methode om gasbellen te detecteren in het systeem maakt gebruik van de reflecties van drukgolven. Door een drukgolf in het systeem te introduceren (door bijvoorbeeld een klep te sluiten) en de druk te registreren kan een “*fingerprint*” van het systeem verkregen worden. Deze “*fingerprint*” wordt vervolgens vergeleken met een nulmeting (uitgevoerd bij oplevering van het systeem) of met een simulatie (d.m.v. waterslag-software). De golfsnelheid van het systeem bepaalt de hoeveelheid waterslagberging. Indien er gasbellen in het systeem aanwezig zijn is er meer waterslagberging dan normaal, wat resulteert in een hogere golfsnelheid (zie Bijlage A.8):

$$\frac{1}{c_{gas}^2} = \frac{1}{c_0^2} + \frac{\rho \cdot V_i}{k \cdot p_i \cdot V} \quad (B.3)$$

Waarin:

c_{gas}	=	Golfsnelheid met gasbellen in het systeem	[m/s]
c_0	=	Golfsnelheid zonder gasbellen	[m/s]
ρ		Dichtheid van de vloeistof	[kg/m ³]
V_i		Initieel volume van de gasbel	[m ³]
k		Polytropische constante	[-]
p_i	=	Initiële absolute gasdruk	[Pa.a]
V	=	Totaal leidingvolume	[m ³]

Elk systeem heeft zijn eigen basisfrequentie. Deze basisfrequentie wordt bepaald door de golfsnelheid c en de karakteristieken van de bovenstroomse en benedenstroomse randvoorwaarden van het systeem:

Voor verschillende randvoorwaarden:

$$f = \frac{c}{4L} \quad (\text{B.4})$$

Voor dezelfde randvoorwaarden:

$$f = \frac{c}{2L} \quad (\text{B.5})$$

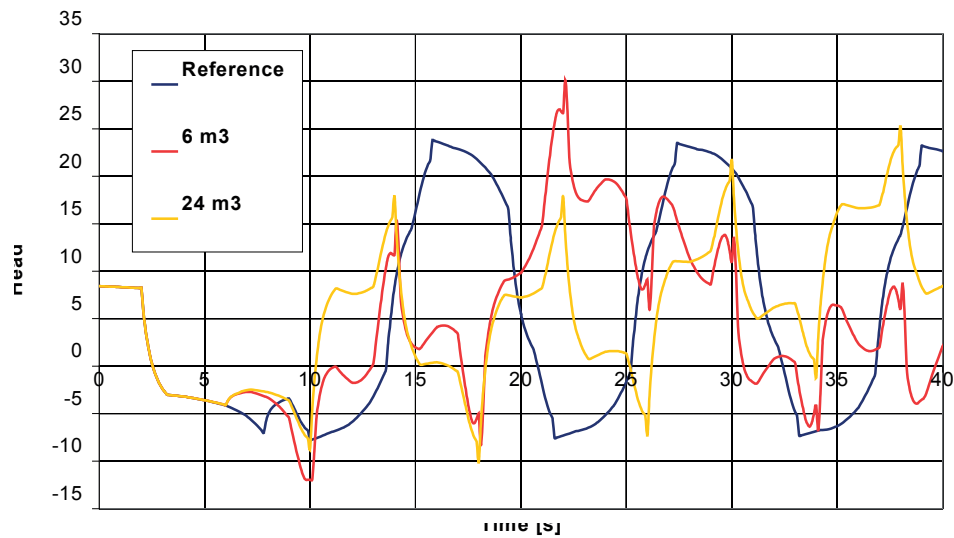
Waarin:

f	=	Frequentie	[Hz]
c_0	=	Golfsnelheid zonder gasbellen	[m/s]
L	=	Lengte van de leiding	[m]

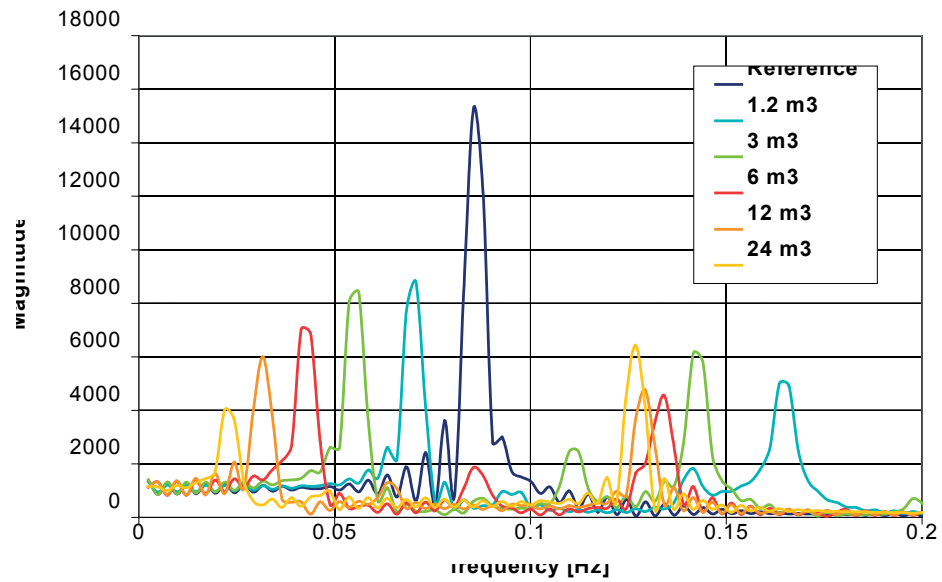
In afvalwatersystemen wordt deze meting meestal uitgevoerd door middel van het sluiten van een afsluiter net benedenstrooms van het gemaal. Deze systemen komen vaak uit in een andere ontvangstkelder, wat betekent dat de randvoorwaarden verschillen van elkaar. In dit geval moet dus vergelijking (B.4) gebruikt worden

Voor hogere golfsnelheden ontstaan dus ook hogere frequenties in het systeem. Deze frequenties kunnen zichtbaar gemaakt worden door middel van een *Fourier-transformatie*. Figuur B.4 en Figuur B.5 laten de tijdreeksen en fourierreeksen zien van een numeriek model. De referentie (blauwe lijn) is gemaakt zonder gas in het systeem.

FIGUUR B.4 TIJDREEKS VAN MEERDERE METINGEN MET EN ZONDER GAS IN HET SYSTEEM (NUMERIEK VOORBEELD)



FIGUUR B.5 FOURIER REEKS VAN DE METINGEN VOOR VERSCHILLENDE GROOTTES VAN HET GAS VOLUME



Figuur B.5 laat de Fourier getransformeerde signalen zien. De 'reference' lijn laat duidelijk de basisfrequentie van 0,08 Hz zien (wat overeen komt met een looptijd van 12,5 s). De verschillende lijnen stellen verschillende gasvolumes voor. De frequentieverschuiving is duidelijk zichtbaar.

Het gasvolume kan worden afgeleid uit de verschuiving van de basisfrequentie van het systeem. Net als de basisfrequentie is dit afhankelijk van de randvoorwaarden van het systeem:

Verschillende randvoorwaarden:

$$V_i = \frac{k \cdot p_i \cdot V}{16L^2 \cdot \rho} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} \right) \tag{B.6}$$

Dezelfde randvoorwaarden:

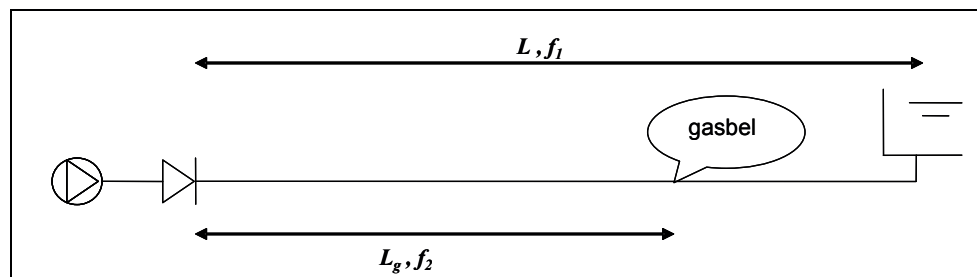
$$V_i = \frac{k \cdot p_i \cdot V}{4L^2 \cdot \rho} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} \right) \tag{B.7}$$

Waarin:

f_0	=	Basisfrequentie zonder gasbel	[Hz]
f_1	=	Basisfrequentie met gasbel	[Hz]

Figuur B.5 Laat nog een tweede frequentie piek f_2 zien (goed zichtbaar voor $V_{gas}=24 \text{ m}^3$, bij $f_2=0,13 \text{ Hz}$). Met deze tweede frequentie kan de locatie van de gasbel bepaald worden bepaald.

FIGUUR B.6 BEPALEN VAN DE LOCATIE VAN DE GASBEL



Met behulp van vergelijking en kan de locatie van de eerste gasbel bepaald worden.

De detectiemethode wordt samengevat in de volgende stappen:

1. Bouw een hydraulisch simulatiemodel van het afvalwatertransportsysteem. Het model dient voldoende informatie te bevatten om dynamische berekeningen ("waterslageberekeningen") uit te kunnen voeren. Indien mogelijk wordt dit model gevalideerd tegen meetdata van het systeem zonder luchtbellens, zodat vastgesteld kan worden dat het referentiesignaal goed gesimuleerd wordt. Deze validatie zou bij oplevering uitgevoerd kunnen worden.
2. Alle eventuele waterslagvoorzieningen dienen in het model uitgeschakeld te worden. Tijdens de detectiemetingen dienen deze voorzieningen in het veld ook uitgeschakeld te worden.
3. Bepaal welk dynamisch scenario zonder deze voorzieningen uitgevoerd kan worden zonder schade aan het systeem toe te brengen. Dit betekent dat een maximum debiet bepaald moet worden met bijbehorende kleppositie of pomptoerental. De dynamica wordt bij voorkeur geïnitieerd door sluiting van een (isolatie) klep, direct gevolgd door pomp stop, omdat dan een goed reproduceerbare stabiele drukoscillatie ontstaat in de persleiding. Cavitatie en lokale ontgassing mogen tijdens dit scenario niet optreden, omdat cavitatie en ontgassingsbellens vergelijkbare reflecties veroorzaken als luchtbellens. De minimale druk in het systeem moet hiertoe groter blijven dan -5 m onderdruk, omdat bij ongeveer deze druk ontgassing gaat optreden¹⁾. De dynamische druk aan het begin van de persleiding tijdens dit scenario is het referentiesignaal. Bij ingebruikname van een nieuwe leiding zou het referentiedruksignaal ook gemeten kunnen worden, nadat het systeem zorgvuldig gevuld en ontlucht is; deze meting fungeert dan als een fingerprint van het systeem.
4. Installeer een drukopnemer aan het begin van de persleiding op een toegankelijke plaats. Een voor de hand liggende lokatie is in het gemaal, benedenstrooms van de terugslagkleppen en de te sluiten (isolatie)klep.
5. Start het dynamische scenario in het echte systeem en meet de dynamische druk. De sampletijdstap moet minimaal 10 keer kleiner zijn dan de periode van een druksignaal met een eventuele luchtbel in de eerste zinker. Stel de eerste zinker bevindt zich op Z m van het gemaal en de voortplantingssnelheid bedraagt c m/s. Dan is de periode $4Z/c$. De sampletijd T_s moet dan kleiner zijn dan $T_s < 0.4Z/c$. Oftewel, de meetfrequentie $f_m > 2.5c/Z$.
6. Er kan een trend in het meetsignaal zitten; zie bijvoorbeeld Figuur B.7. Verwijder deze trend. Hierdoor worden lage frequentiepieken in de Fouriertransformatie veel beter zichtbaar. De trend kan meestal voldoende nauwkeurig benaderd worden met een polynoom (2^{de} of 3^{de} graads) of een exponentiële functie.
7. Verleng de tijdreeks tot de eerstvolgende macht van 2. De tijdreeks moet aangevuld worden met 0-en; de trend was immers al verwijderd. Er zijn meerdere redenen om de tijdreeks aan te vullen met ogenschijnlijk triviale waarden: 1. De schatting van de optredende frequenties wordt nauwkeuriger, omdat de frequentieresolutie gelijk is aan $1 / T_{hor}$ met T_{hor} de lengte van de tijdreeks in s. 2. Met een macht van 2 als het aantal waarnemingen in de tijdreeks kan de meest efficiënte implementatie van de Fast-Fourier_Transformatie (FFT) gebruikt worden. 3. Sommige tools, zoals Excel, eisen dat de lengte van de reeks een macht van 2 moet zijn.

1) Het transiënte scenario is een balans tussen twee criteria. Enerzijds moet de drukgolf zo groot mogelijk zijn om maximale informatie te verkrijgen, anderzijds mag de drukgolf niet zo groot zijn dat cavitatie, ontgassing of schade aan de leiding ontstaat.

8. Bereken de FFT van het gemeten druksignaal en van het (berekende of gemeten) referentiedruksignaal. Het FFT algoritme is beschikbaar in elke toolbox voor tijdreeksanalyses, zoals bijvoorbeeld de Data analysis Add-in in Microsoft Excel. De FFT is een reeks van complexe getallen met resolutie Df . De zogenaamde absolute waarde van de complexe FFT-waarden worden verder gebruikt. Als (x_j, iy_j) een complex getal is in de FFT, dan is $(x_j^2 + y_j^2)^{1/2}$ de absolute waarde van (x_j, iy_j) . Ook deze functie is standaard beschikbaar in Excel, Matlab of andere tijdreeksanalyse-pakketten.
9. Zet de absolute waarden van beide FFT-reeksen in een grafiek en bepaal de grootste amplitude in beide reeksen. Bepaald bovendien de op-één-na-grootste amplitude in de gemeten reeks. De frequentie met de grootste amplitude in de referentie FFT is f_0 , de frequenties bij de grootste en op-één-na-grootste amplitude zijn f_1 en f_2 .
10. Vul de gevonden frequentie f_2 in vergelijking (B.4) in om de schatting van de afstand tot de eerste luchtophopping te vinden.
11. Bepaal uit het rekenmodel de verwachte einddruk p_f op deze lokatie uit de referentie-simulatie.
12. Gebruik vervolgens vergelijking (B.6) om een schatting te krijgen van het totale luchtvolume in de persleiding.

Twee parameters in vergelijking (B.6) zijn nog niet besproken: het karakteristieke volume V en de karakteristieke leidinglengte L . Bij een enkelvoudige leiding zijn deze parameters gewoon het totale volume en de totale leidinglengte. Bij een vertakt systeem wordt een redelijke schatting verkregen indien de lengte en het volume van de hoofdleiding gebruikt worden.

FIGUUR B.7 VOORBEELDEN VAN DYNAMISCHE DRUKMETINGEN MET EN ZONDER TREND

