

Hydraulisch ontwerp en beheer afvalwatertransportsystemen

CAPWAT Handboek

Michiel Tukker
Kees Kooij
Ivo Pothof

1001809-005

Deltares

Dit handboek is opgesteld door M. Tukker, C. Kooij en I. Pothof (allen Deltares). De auteurs werden bijgestaan door een redactie bestaande uit:

F. Clemens	TU Delft
R. v.d. Anker	Waterschap Rivierenland
J. Driessen	Grontmij
M. Geise	Xylem (voorheen ITT Water & Wastewater)
J. Kranendonk	Gemeentewerken Rotterdam
C. Lubbers	Royal Haskoning
P. v. Rosmalen	Hoogheemraadschap Delfland
F. v. Zijl	Waterschap Brabantse Delta

Het handboek is een eindproduct van het CAPWAT-II onderzoeksproject dat in de periode 2007-2010 werd uitgevoerd door Deltares en TU Delft/CiTG. Dit heeft geresulteerd in de uitgave van versie 1 in juni 2010. De ontvangen commentaren in de eerste 1.5 jaar na publicatie zijn verwerkt in voorliggende versie 2 van het Handboek, gepubliceerd in maart 2012.

De volgende organisaties participeerden in het onderzoek:

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

De inhoud van dit handboek mag uitsluitend verspreid worden met bronvermelding:
Tukker, M., Kooij, C., Pothof, I., Hydraulisch ontwerp en beheer afvalwatertransportsystemen, CAPWAT Handboek, 2^{de} ed., Deltares, Delft, Netherlands, april 2012

©2012 Deltares

Deltares
Rotterdamseweg 185
2629HD Delft
Postbus 177
2600 MH Delft
tel: +31 (0)88 335 8273
fax: +31 (0)88 335 8582
email: info@deltares.nl
www.deltares.nl

Inhoud

1	Voorwoord	1
1.1	Noodzaak handboek	1
1.2	Afbakening handboek	2
1.3	Auteurs en redactie	4
1.4	Leeswijzer	4
2	Ontwerpen van afvalwatertransport-systemen	5
3	Leidingontwerp	7
3.1	Randvoorwaarden	9
3.1.1	Debiet	9
3.1.2	Tracé keuze	9
3.2	Vaststellen van de leidingdimensies	9
3.2.1	Leidingprofiel	10
3.2.2	Diameter	12
3.2.3	Wandruwheid	14
3.2.4	Leidingmateriaal	15
3.3	Kruisingen	16
3.4	Voorzieningen ter voorkoming en verwijdering van gasbellen	19
3.4.1	Diameter plaatselijk verkleinen	19
3.4.2	Ontluchtingspunten	20
3.5	Vertakte systemen	21
4	Ontwerpen van het gemaal	23
4.1	Randvoorwaarden	25
4.1.1	Vereiste capaciteit	25
4.1.2	Opvoerhoogte	25
4.1.3	Bedrijfszekerheid	25
4.2	Pompopstelling	25
4.2.1	Natte of droge opstelling	25
4.2.2	Aantal pompen	26
4.2.3	Verticale of Horizontale opstelling	26
4.3	Appendages	27
4.3.1	Afsluiters	27
4.3.2	Terugslagklep	28
4.4	Bepalen van het werkgebied & pompkeuze	29
4.5	Ontvangstkelder	30
4.5.1	Berging van de ontvangstkelder	30
4.5.2	Voorkomen van luchtinslag	32
4.5.3	Sediment afvoer en aanstroming van de pomp	33
4.6	Ontwerp van be/ontluchtingsvoorzieningen	34
5	Dynamische effecten	37
5.1	Uitgangspunten	39
5.1.1	Toelaatbare maximale en minimale drukken	39
5.1.2	Hydraulisch model	40
5.2	Waterslaganalyse zonder voorziening	41

5.3	Inventarisatie oplossingen ter voorkoming van ontoelaatbare drukken	42
5.4	Dimensioneer waterslagvoorzieningen	44
5.5	Reguliere en incidentele bedrijfsvoering	45
6	Ontwerpaspecten capaciteitshandhaving	47
6.1	Prestatie-indicatoren	47
6.1.1	Draaiuren	48
6.1.2	Specifiek energieverbruik	49
6.1.3	Systeem- en pompkarakteristiek	51
6.1.4	Equivalenten wandruwheid	52
6.2	Meetlocaties voor druk en debiet	53
6.2.1	Debietmeting	54
6.2.2	Drukmeting	54
6.2.3	Pompdata	55
6.3	Voorzieningen voor capaciteitshandhaving	56
6.3.1	Afsluiters	56
6.3.2	Verhoogde stroomsnelheid	56
6.3.3	Pigging	56
6.3.4	Ontluchtingspunten	57
7	Review integraal systeemontwerp	59
7.1	Beheersen van lucht in persleidingen	59
7.2	Checklijsten	61
7.2.1	Ontwerp gemaal	61
7.2.2	Ontwerp persleiding	61
7.2.3	Waterslagtechnisch ontwerp	62
8	Oplevering van het systeem	63
8.1	Randvoorwaarden	63
8.2	Opstellen acceptatie testplan	65
8.2.1	Vorbereiding	65
8.2.2	Lek en gasvrij leidingsysteem	65
8.2.3	Capaciteit pomp	65
8.2.4	Terugslagklep	66
8.2.5	Capaciteit leiding	66
8.2.6	Regeling gemaal	66
8.2.7	Dynamische metingen	67
8.3	Toetsing nulmeting	67
9	Handhaven van de hydraulische capaciteit	69
9.1	Meten in afvalwatertransportsystemen	69
9.1.1	Parameters en locaties	69
9.1.2	Instrumentatie	70
9.1.3	Meetstrategie	70
9.1.4	Uitvoeren van veldmetingen	71
9.2	Criteria voor capaciteitsverlies	72
9.3	Analyse van een Capaciteitsprobleem	73
9.3.1	Lokaliseren van het probleem	73
9.3.2	Analyse van het gemaal	74
9.3.3	Analyse van de persleiding	75
9.3.4	Nazorg van capaciteitsproblemen	77

10 Literatuurlijst

79

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 rioelstelsel (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-vraagstuk 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 ontwerpuitgangspunten 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 gemalen en persleidingen (Bron: Riool in Cijfers 2009-2010, Stichting RIONED)

Organisatie	Capaciteit eindgemalen [m ³ /h]	Persleidingen (excl. Drukriolering) [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.

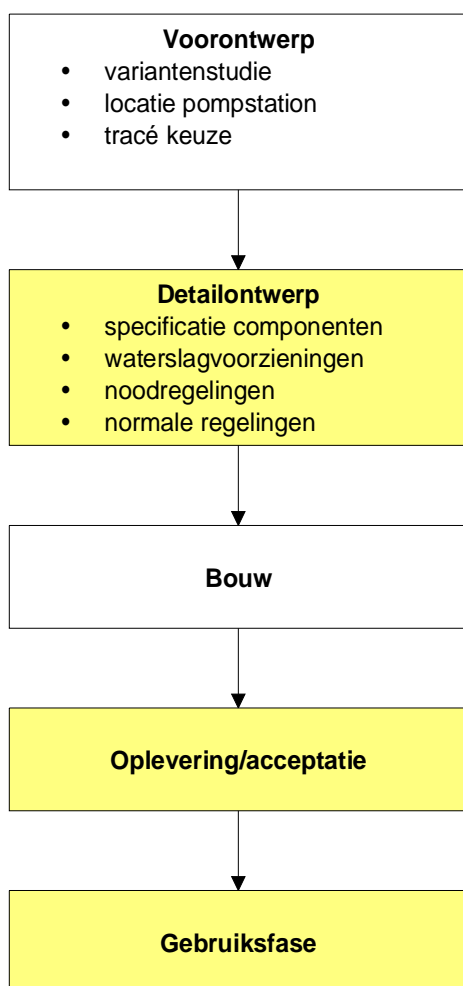
Daarnaast beschikken diverse organisaties over handboeken voor gemaalontwerp en beheer. Hierin worden veelal civieltechnische, werktuigbouwkundige en elektrotechnische zaken beschreven.

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 ontwerpfase 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 bouwfase 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 2^e 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 systeem aanpassing 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.

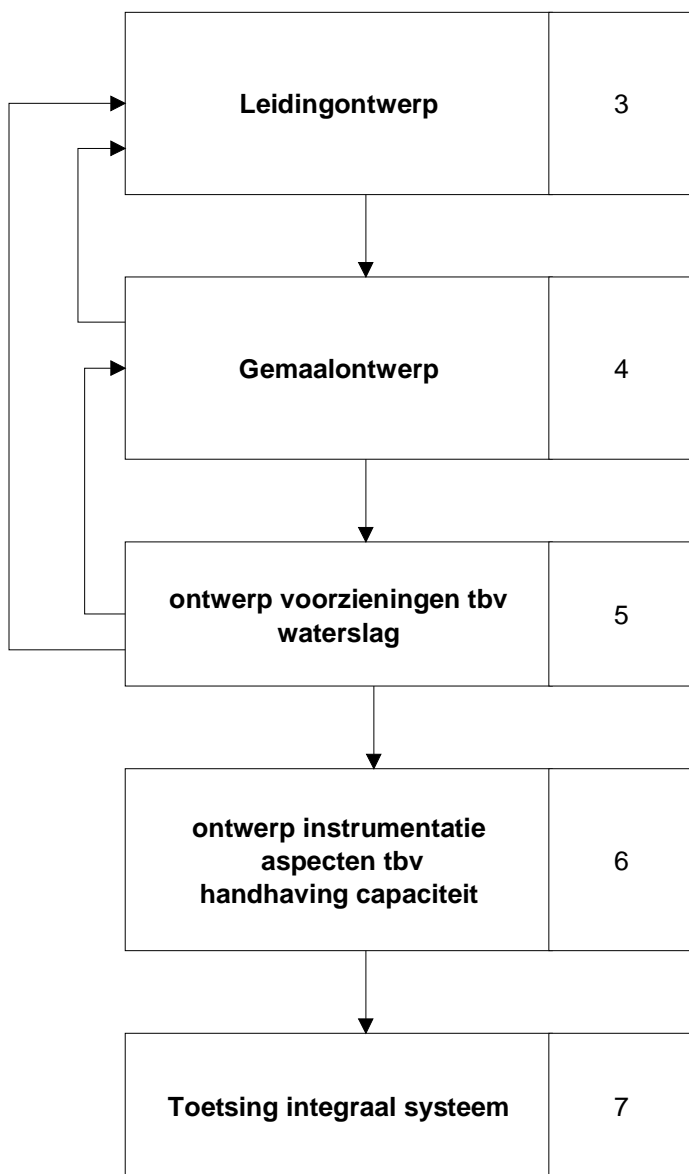
In veel gevallen zal niet aan alle hoofdfuncties volledig voldaan kunnen worden. In zulke gevallen zal een afweging gemaakt moeten worden en zullen prioriteiten gesteld moeten worden. Door de ontwerper een grondige theoretische kennis te geven kan de afweging gemaakt worden. Dit handboek bevat de noodzakelijk hydraulische kennis voor de ontwerp- en beheer afwegingen 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.

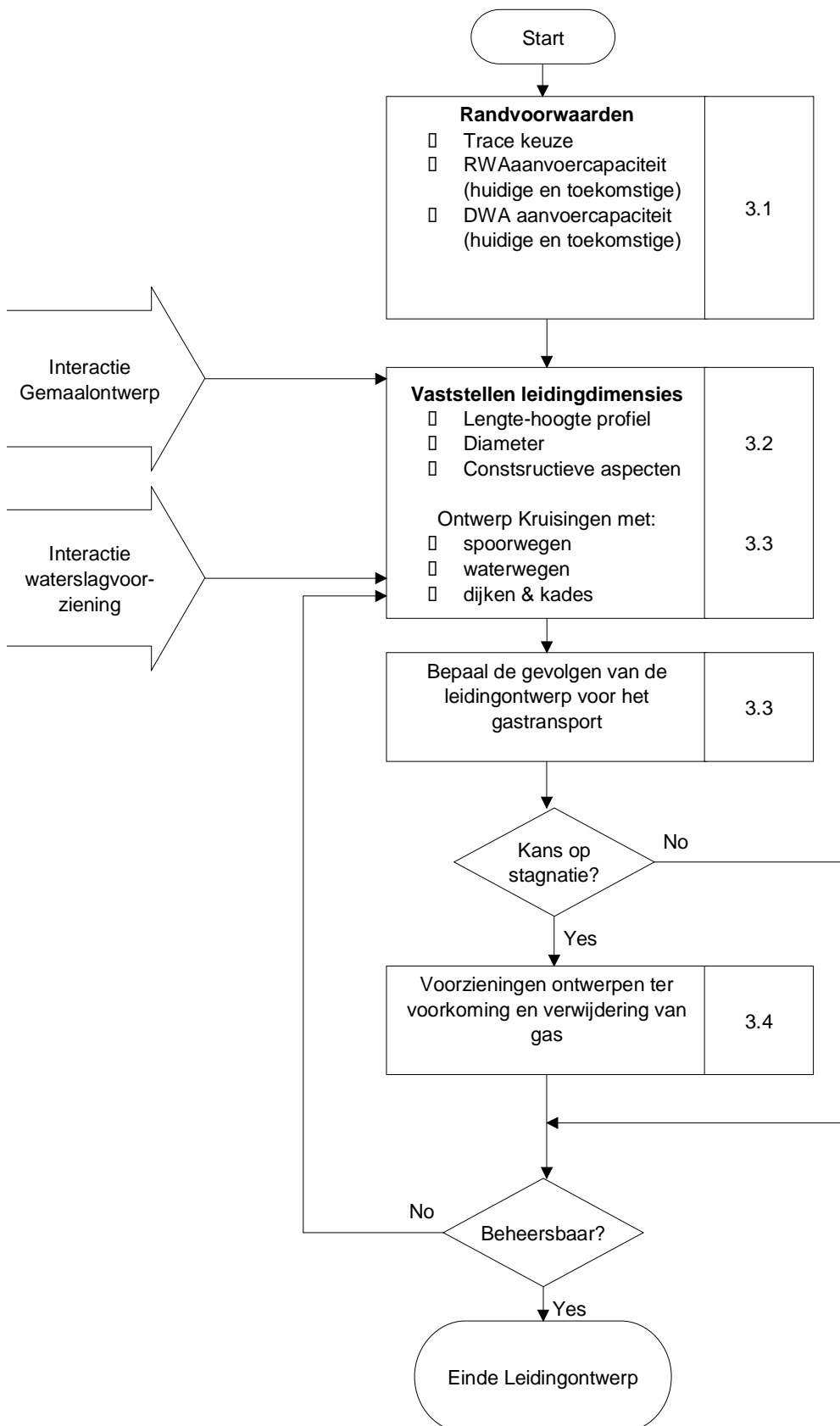
In zijn eenvoudigste vorm bestaat een persleiding uit een enkelvoudige leiding die een reservoir (zuigkelder) verbindt met een ander reservoir (put, ontvangtbouwwerk, etc.). Een persleiding kan ook inrikken in een andere persleiding. In dit hoofdstuk beperken we ons eerst tot de enkelvoudige leiding. De ontwerpaspecten voor een inrikker 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 ontwerpprocedures 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:

$$\Delta H = \frac{\lambda L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

Waarin:

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

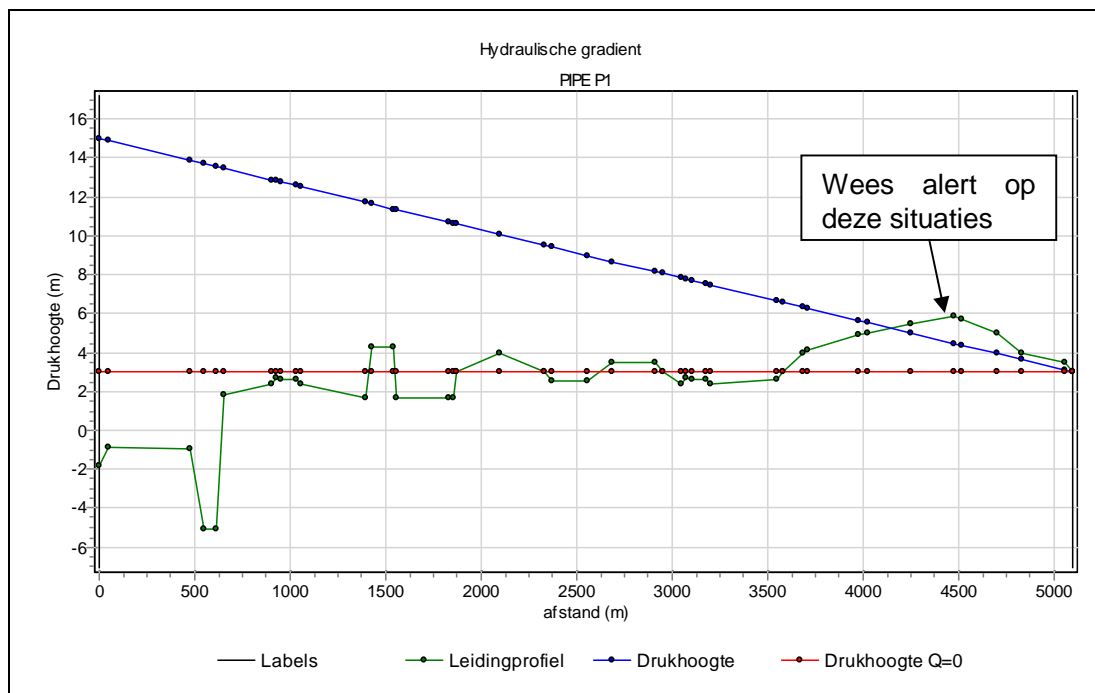
De wrijvingscoëfficiënt λ wordt onder ander bepaald door de wandruwheid van de leiding, uitgedrukt in k (mm). (zie bijlage A.4).

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 (lekke 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 dijk kruisingen). 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 influentgemaal 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:

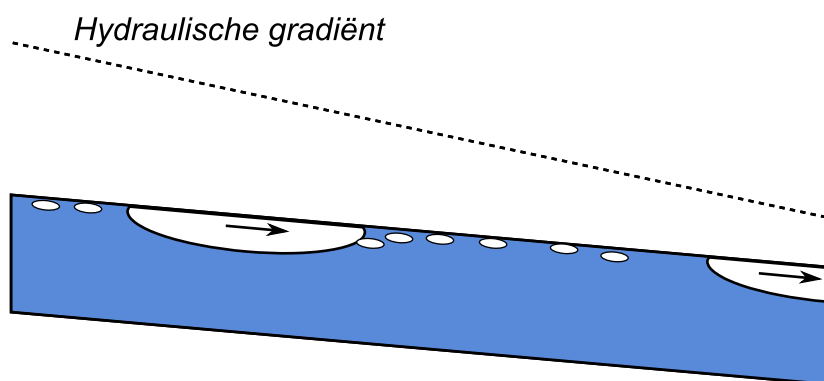
- Beperking keuze mogelijkheid voor pomp en aanschafkosten pomp(en)
- Verandering energieverbruik
- Aankosten leiding
- Verandering dalende leidingen met ander risico op gasophopingen

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

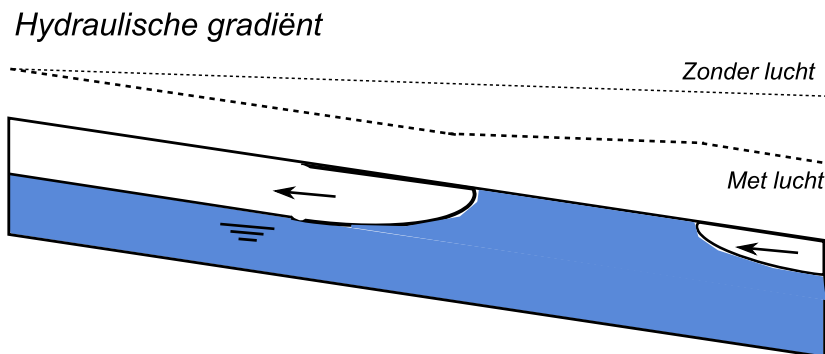
Vooraf in zinkers en boringen die tot een significante diepte gaan, kan een gasbel tot aanzienlijke extra verliezen leiden; maximaal gelijk aan het hoogteverschil van de kruising (zie paragraaf 3.3).

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 luchtballen indien helling flauwer dan 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)

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.

$$\Delta H_{gas,max} = L \sin \theta - \Delta H_{fric} \quad (2.2)$$

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. (2.1))	[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

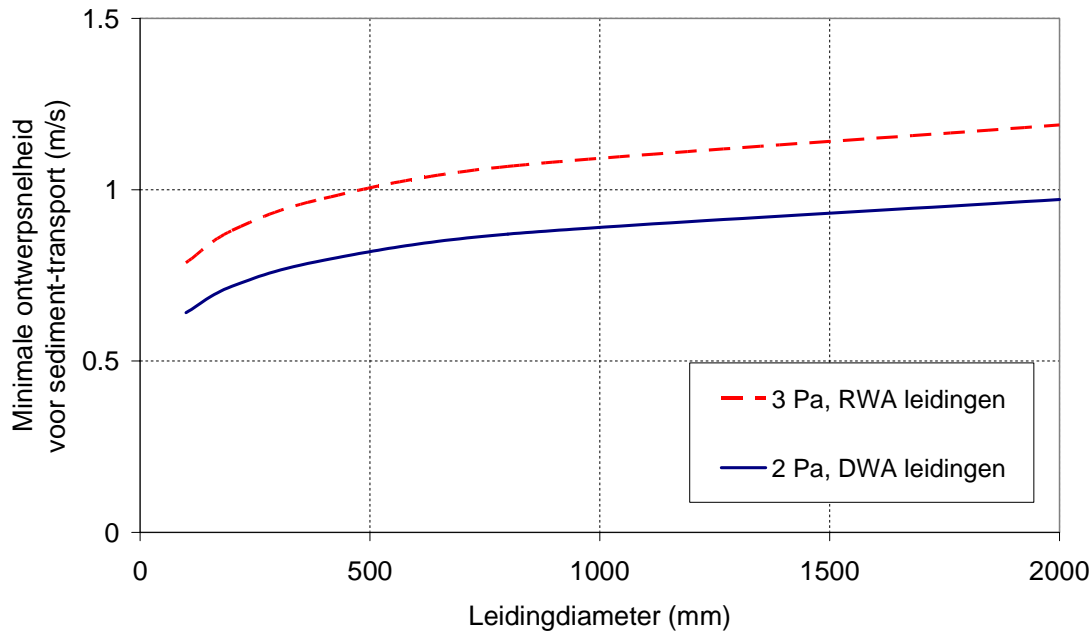
Sedimenttransport in leidingen is afhankelijk van de deeltjesgrootte van het sediment. Deze deeltjesgrootte is onvoorspelbaar in afvalwatersystemen, waardoor het niet mogelijk is om een wetenschappelijk onderbouwde minimumsnelheid te definiëren.

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/m² in DWA persleidingen van gescheiden stelsels en 3 N/m² 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 ontwerpruwheden worden de ontwerpsnelheden wat groter om dezelfde wandschuifspanning te bereiken

3.2.3 Wandruwheid

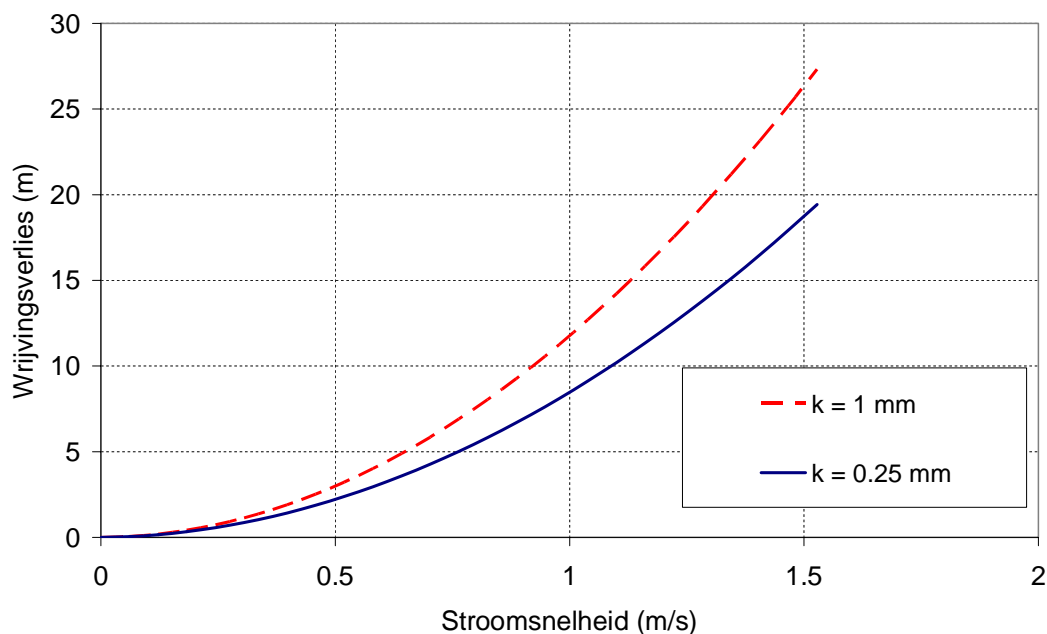
De equivalente wandruwheidswaarde k is in principe een eigenschap van het leidingmateriaal. De ruwheidsbijdrage van leidingglassen, -moffen of verbindingen wordt vaak ook in de equivalente ruwheid verdisconteerd, waardoor de ruwheidswaarde k meer een rekengrootheid is geworden. De literatuur geeft tabellen 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,

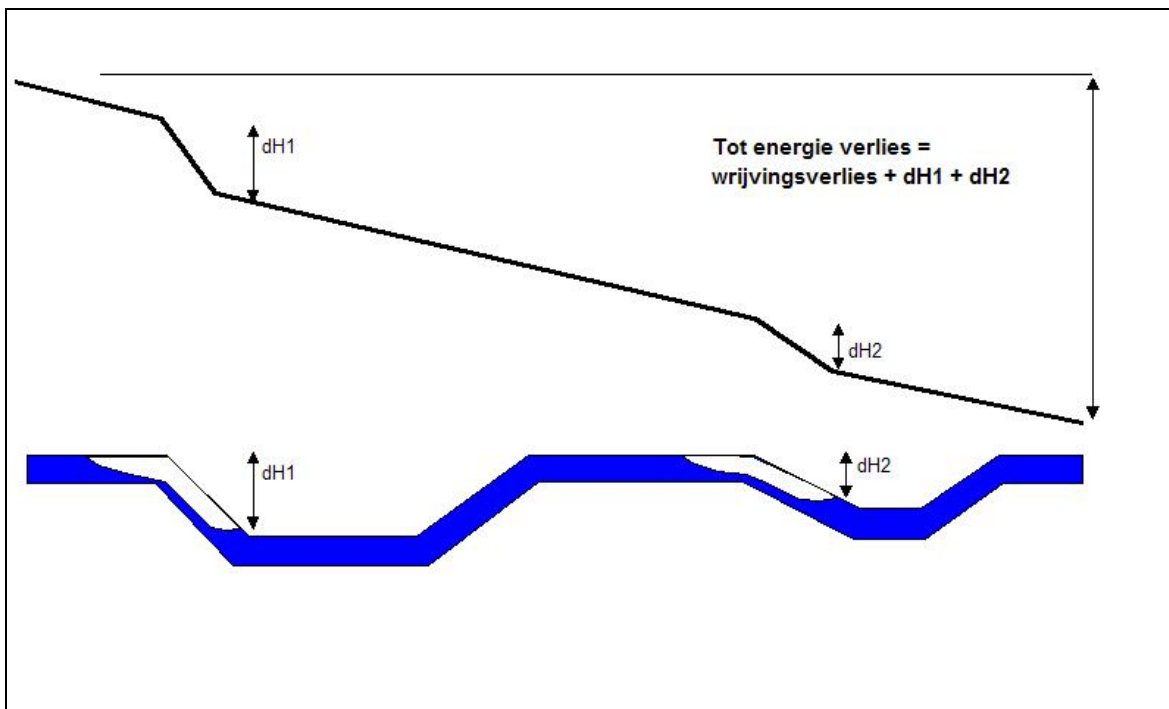
orde grootte 200 tot 400 mm, dan ook het meest gebruikte materiaal. De uit onderzoek recent gebleken lange levensduur is een bijkomend voordeel.

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).

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).



Figuur 3.7 Energieverlies door gasbellen zichtbaar in de hydraulische verhanglijn

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:

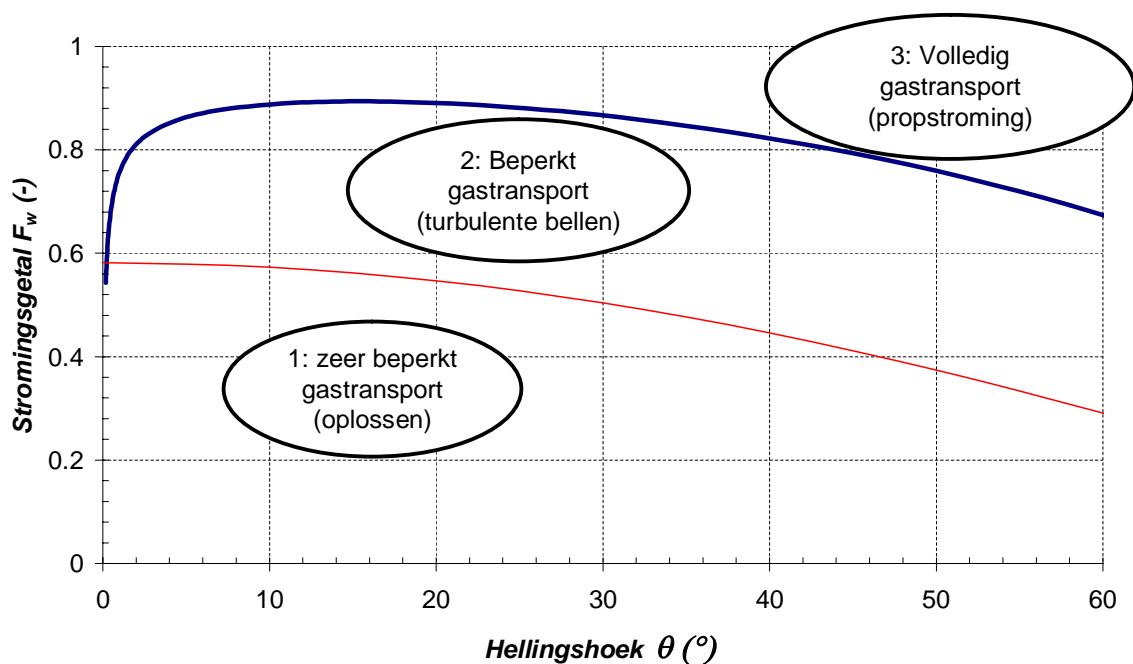
$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (2.3)$$

Waarin:

F	=	Stromingsgetal	[-]
v	=	Stroomsnelheid	[m/s]
g	=	Gravitatierversnelling	[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 gevolgen 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 vind 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.

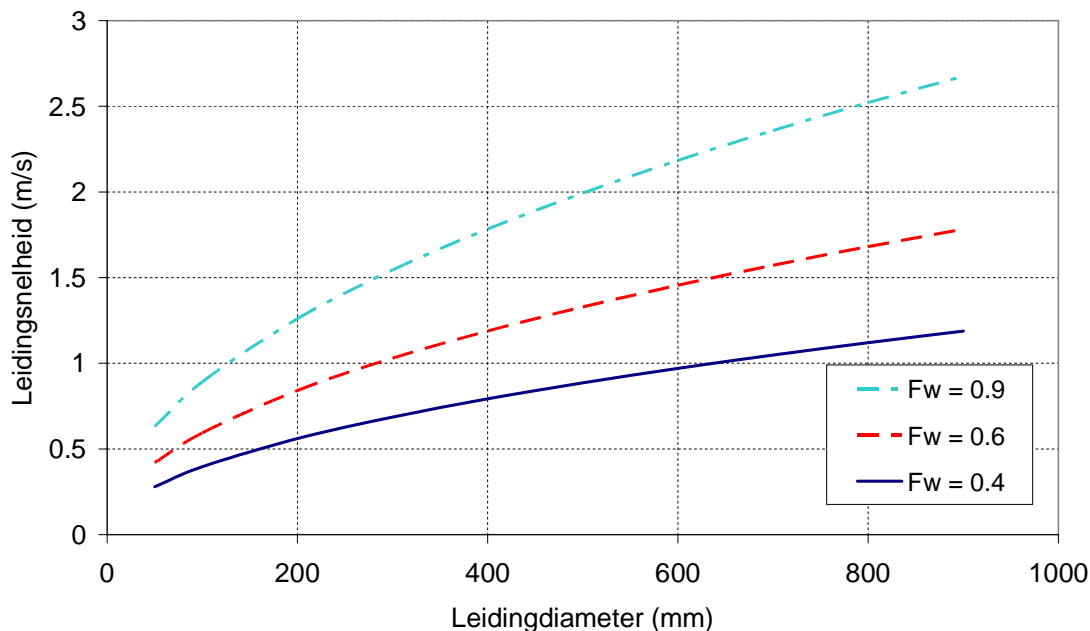
Gebied 2 bevindt zich tussen de criteria voor **gasbel** transport en **gasvolume** transport. In dit gebied wordt het gasvolume opgebroken in meerdere aparte gasbellen die zich over de lengte van de dalende leiding verspreiden. Er worden kleine belletjes meegenomen door de vloeistofstroming en voorbij 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 (2.4) geeft de maximale diameter als functie van het waterdebiet en een gewenst stromingsgetal.

$$D = \left(\frac{4Q}{\pi F_w \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2.4)$$

Waarin:

D	=	Leidingdiameter	[m]
Q	=	Waterdebiet bij RWA	[m ³ /s]
F_w	=	Gewenst stromingsgetal	[-]
g	=	Gravatieversnelling	[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 proppen 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

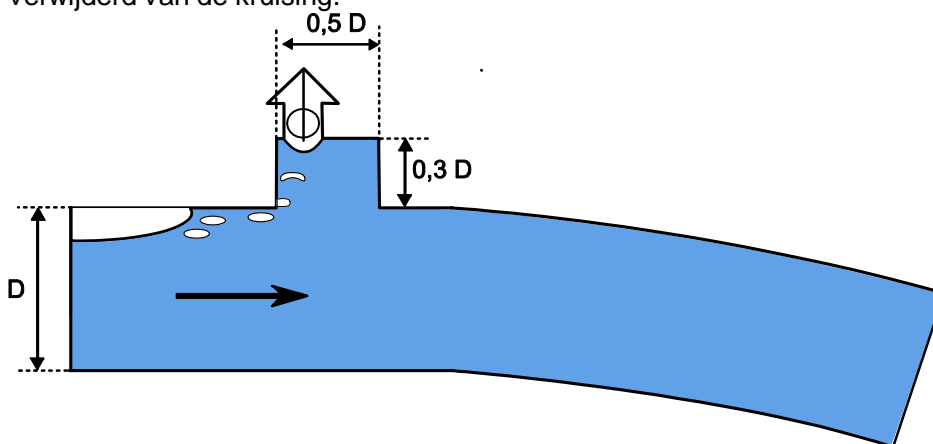
Als de diameter verkleinen geen goede oplossing biedt (teveel problemen voor reinigungsacties, te hoge wrijvingsverliezen) zal een ontluchtingspunt aangebracht moeten worden op de persleiding bovenstrooms van de kruising.

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 ontluchter niet open of dicht gaat of dat de verbindingsleiding, een mangat of T-stuk verstopt raakt. De meest gunstige aansluitconfiguratie van een ontluchter, die lucht afvangt en tegelijkertijd niet (snel) verstopt raakt met drijfvuil, is vooralsnog onvoldoende onderzocht. Daarom kan hierover nog geen eenduidige aanbeveling worden gegeven.

Bij het ontwerp van een ontluchtingspunt moet goed gekeken worden naar de bereikbaarheid en omgevingsfactoren in verband met stankoverlast. In eerste instantie kan volstaan worden met een handmatige ontluchtingspunt 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 ontluchter niet noodzakelijk. Houd bij het ontwerp van de ontluchtingsput rekening met de benodigde inbouwmaten van op de markt zijnde ontluchtingsapparaten en stankfilters.

Bij het ontwerp van een ontluchtingspunt 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 ontluchtingspunt 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 ontluchtingspunt 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

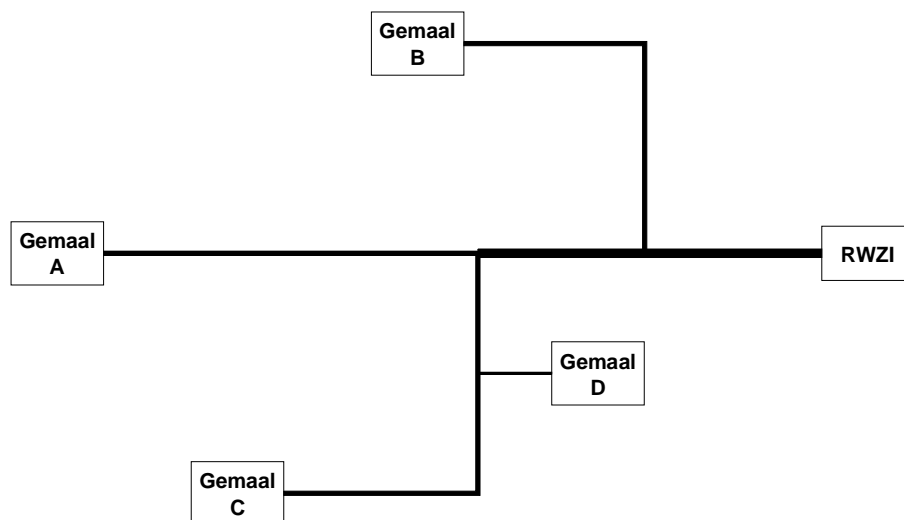
hoofdleiding. Uit onderzoek met schoon water blijkt dat de minimale breedte van de zijtak 0,5 D moet zijn (Wickenhäuser 2008). Bij deze grootte worden alle gasbellen die aan de bovenkant van de aanvoerende leiding langskomen afgevangen in het T stuk. De minimale hoogte van de zijtak moet 0,3 D zijn. 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.

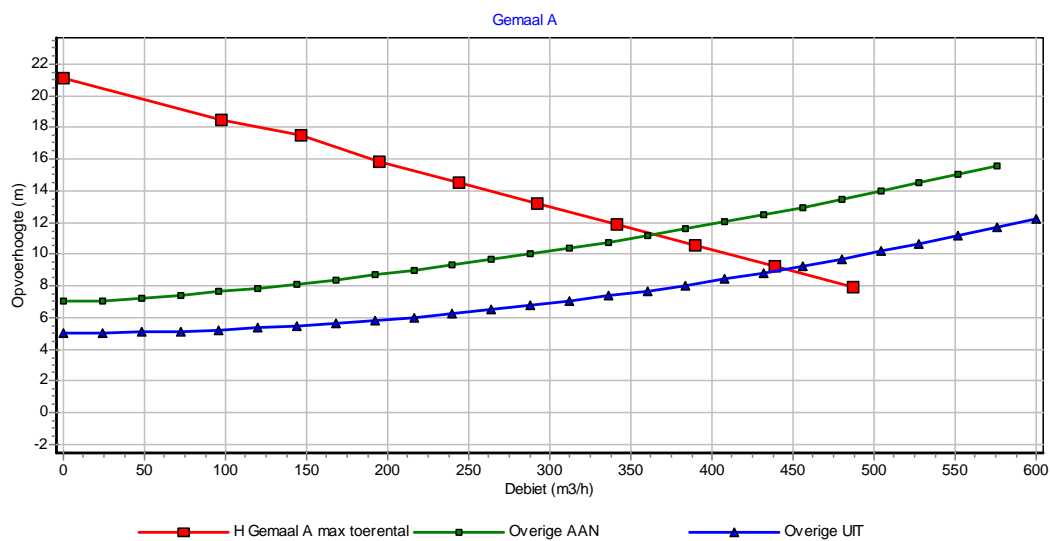
Dit betekent ook dat modificaties die worden gemaakt aan een gemaal, invloed hebben op alle andere gemalen in het systeem. Zo kan een capaciteitsuitbreiding van het ene gemaal een capaciteitsprobleem voor het andere gemaal opleveren door de verhoogde druk op de locatie waar de leidingen samenkomen.

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.



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.

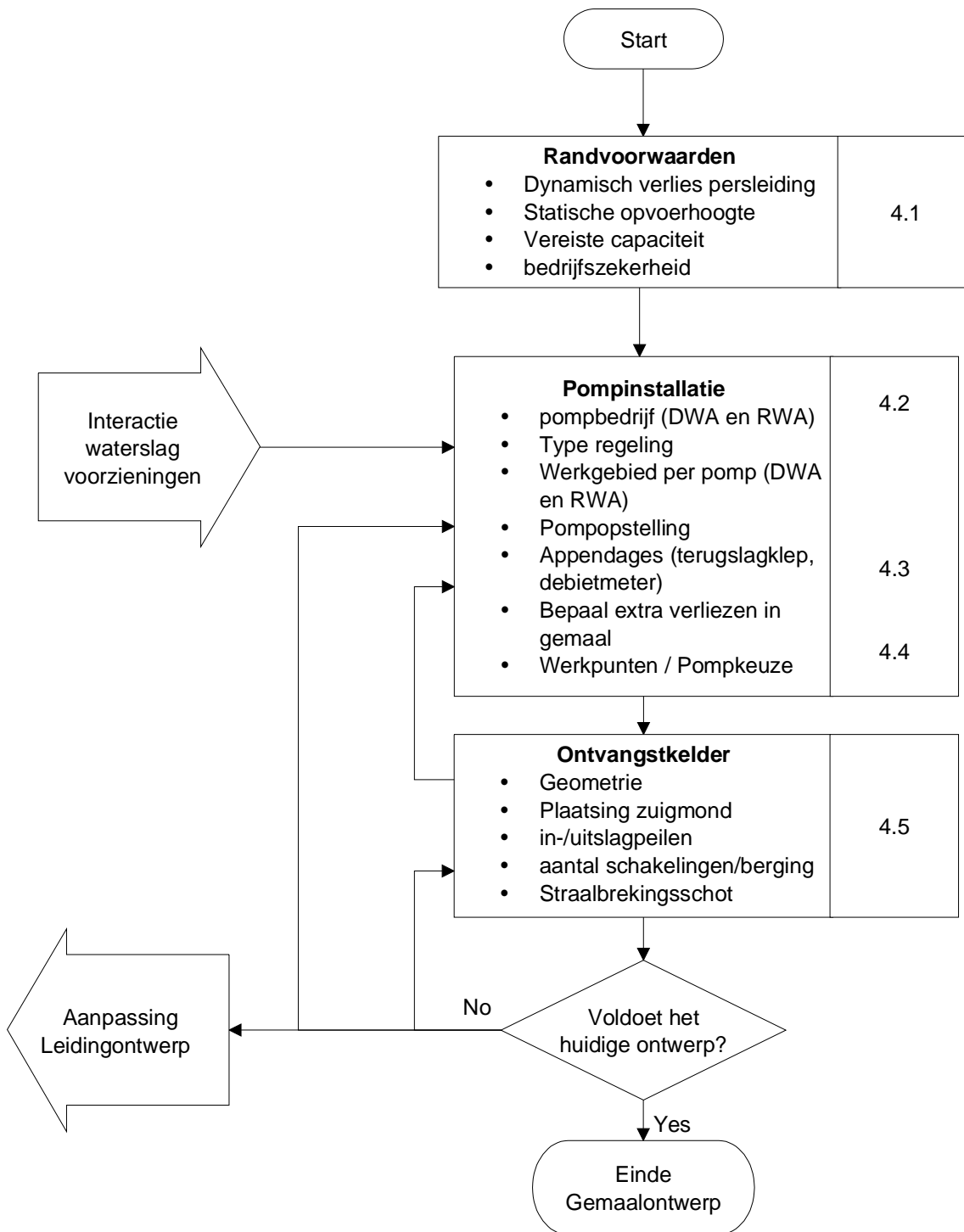
4 Ontwerpen van het gemaal

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 rioelstelsel. De ontvangstkelder kan bestaan uit een open kelder of verdiept aangelegde rioelstreng. De aanvoer varieert relatief traag.
Tussengemaal	De (veelal) kleine ontvangstkelder ontvangt afvalwater uit andere persleidingen en soms nog van een eigen rioelstelsel. 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

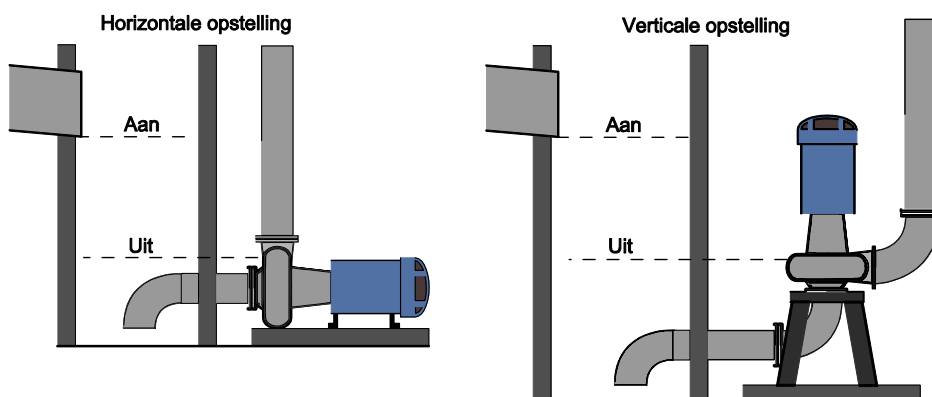
Het aantal pompen wordt bepaald door de spreiding tussen de vereiste RWA en DWA capaciteit. Veel rioolgemaal worden tegenwoordig uitgerust met twee pompen, waarvan één reservepomp, zodat het gemaal altijd kan overschakelen in geval van storing van één van de pompen.

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 motor 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 verticale 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.

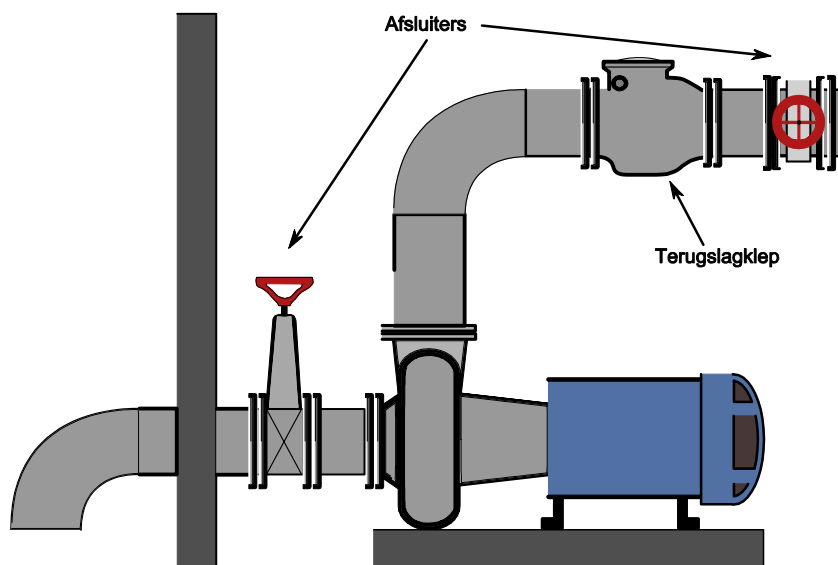
4.3 Appendages

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 Lokatie 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.

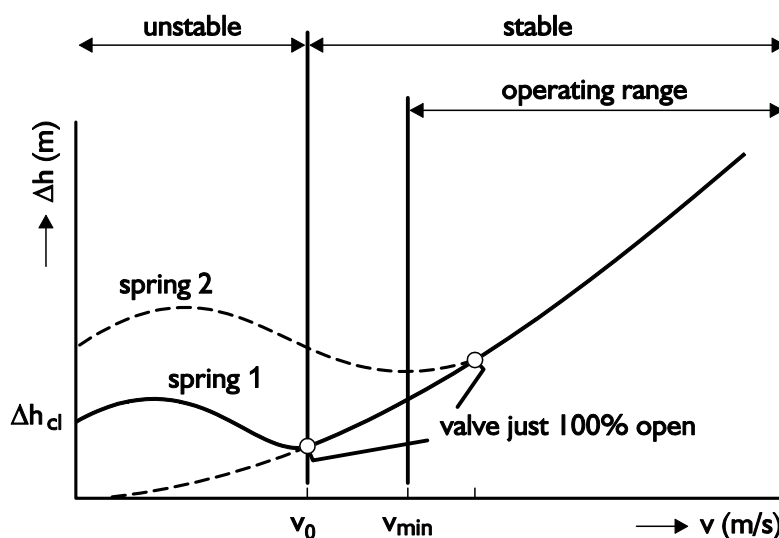
Het drukniveauverschil over de klep wordt beschreven met:

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

Waarin:

ΔH	=	Druk niveau verschil	[m]
ξ	=	Weerstand- 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_o 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_o 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.

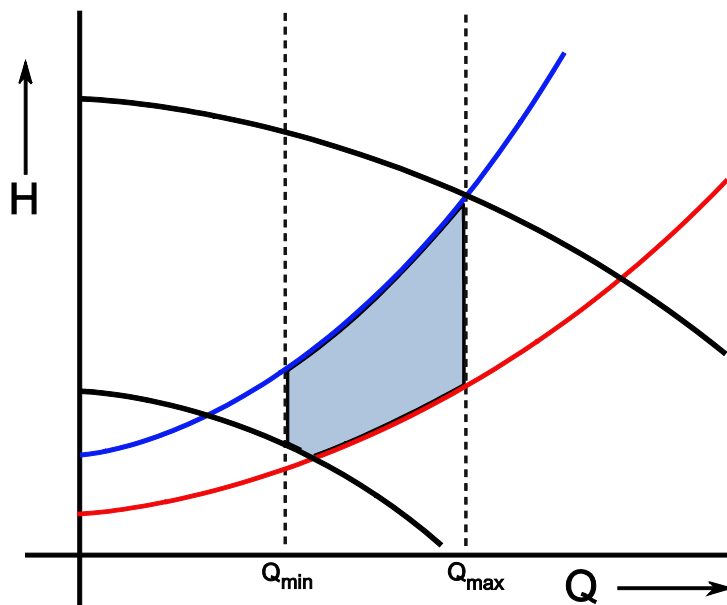
4.4 Bepalen van het werkgebied & pompkeuze

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

De vereiste opvoerhoogte H 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 éénemaal 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 werkg gebied van een systeem met wisselende opvoerhoogte en wandruwheden en bijbehorende pompkrommen (toerengeregelde pomp)

De daadwerkelijke pompkeuze kan het beste overgelaten worden aan de pompfabrikanten. Met een duidelijk gedefinieerde systeemkarakteristiek en werkg gebied 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 onderdompeldiepte 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).

$$V_{req} > \frac{1}{n} \times \frac{Q_t (Q_p - Q_t)}{Q_p} \quad (3.2)$$

Waarin:

V_{req}	=	Minimale berging	$[m^3]$
n	=	aantal pompstarts per uur	$[h^{-1}]$
Q_t	=	Toevoerdebiet	$[m^3/h]$
Q_p	=	Pompdebiet	$[m^3/h]$

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

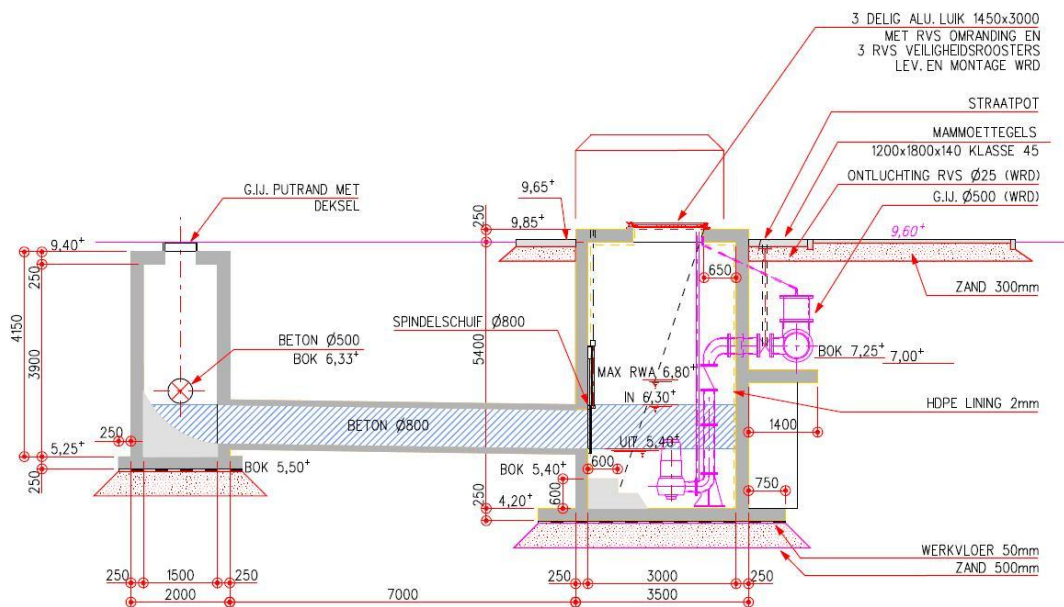
$$V_{req} > \frac{Q_p}{4n} \quad (3.3)$$

Uiteraard geldt dat de beschikbare berging groter moet zijn dan de minimaal benodigde berging (vergelijking (3.2)).

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 rioolstelsel 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 rioolbuis ontworpen worden. We spreken hier van een "verdiepte laatste streng".

Bij een verdiepte laatste streng wordt na de laatste put van het aanvoerende rioolstelsel een leiding met veelal een grotere diameter, verdiept en onder een kleine helling gelegd van minimaal 1% (zie Figuur 4.1).



Figuur 4.1 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.

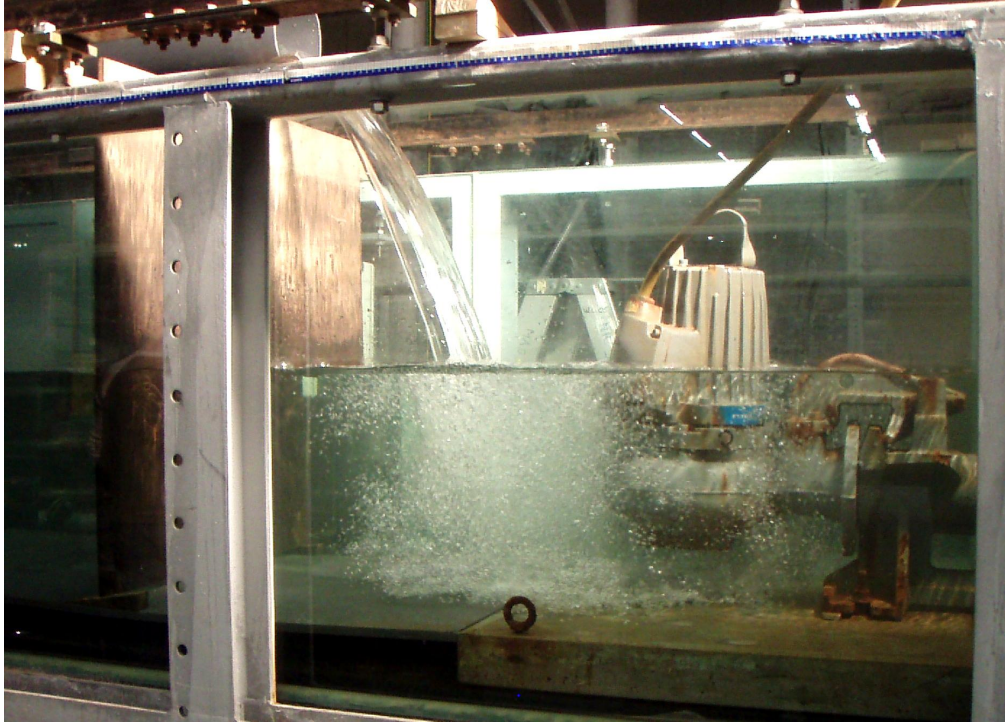
Niet alle gemalen hebben een ontvangstkelder. In sommige gevallen kan het gunstig zijn om de pompinstallatie direct aan te sluiten op de aanvoerende leiding, zoals bij boostergemalen. Een pompinstallatie kan ook direct worden aangesloten op het rioolstelsel. Hiervoor is echter wel een toerengeregelde 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 4.6).

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 4.6 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 toelopen)

Het genoemde onderzoek laat ook zien dat beperking van de ruimte tussen zuigmonden en wanden/vloer geen grote invloed heeft op het pompendement. 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 slingergoten gebruikt om het sediment naar de pomp te brengen. Slingergoten zorgen voor een hoge stroomsnelheid (gunstig voor sedimenttransport) met name in het laatste deel van de pompcyclus. Een slingergoot is gelegen juist boven het afslagniveau. Slingergoten 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 slingergoot reduceerde de vervuiling. Met de moderne elektronica is dit probleem opgelost en zijn slingergoten dus niet langer nodig. Schuine wanden of vulstukken hebben als nadeel dat er meer lucht wordt ingeslagen in de pomp (zie Figuur 4.7); Kranendonk (2007) geeft hiervoor simpele en doeltreffende oplossingen.



Figuur 4.7 Een vulstuk vergroot de luchtinslag door de pomp (Kranendonk 2007)

4.6 Ontwerp van be/ontluchttingsvoorzieningen

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 ontluchttingsvoorziening 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.

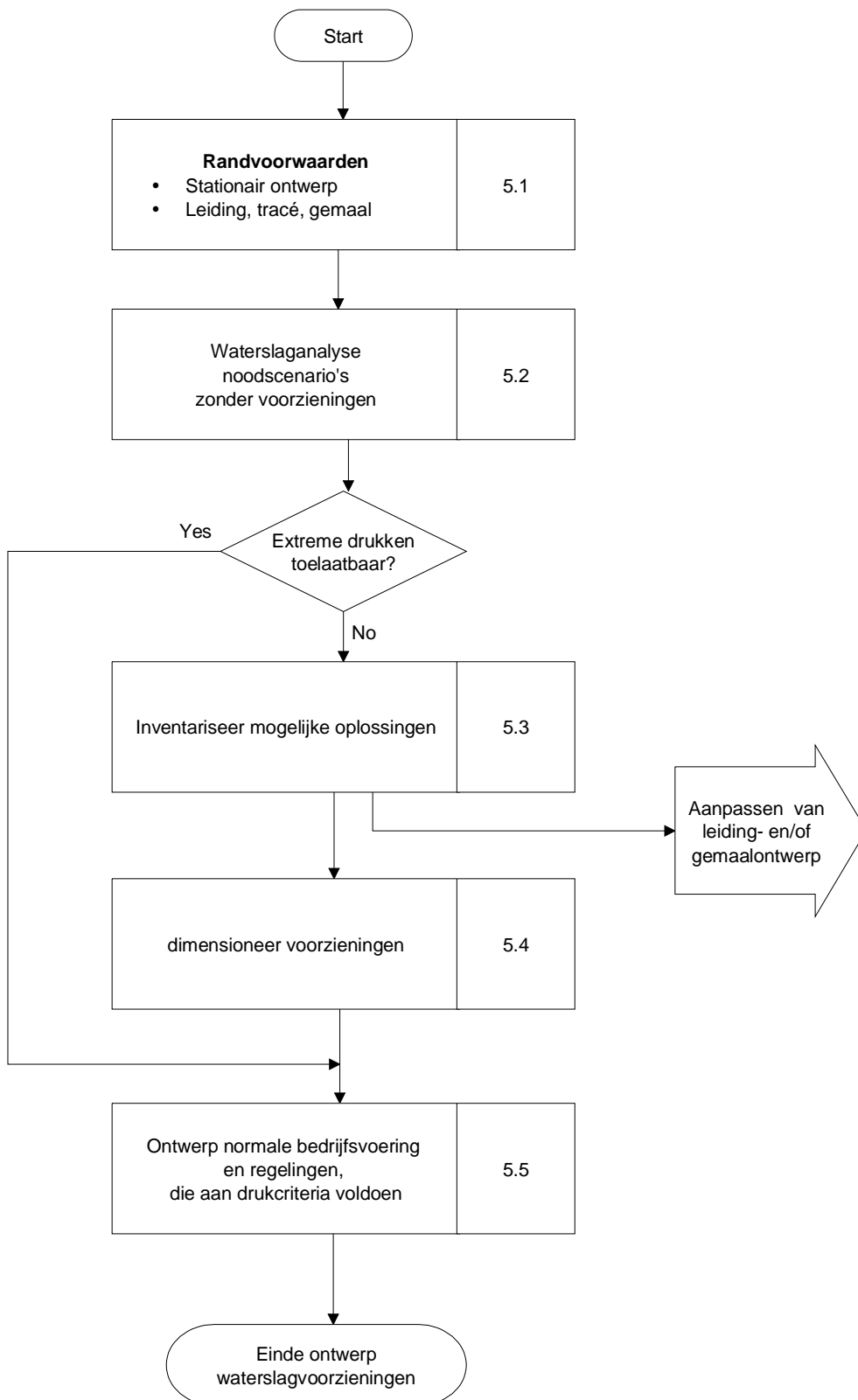
Een essentieel onderdeel bij deze studie is een simulatiemodel. Met behulp van dit model worden vervolgens reguliere en incidentele bedrijfsomstandigheden nagebootst. Met de resultaten hiervan kan het ontwerp van het transportsysteem worden bijgesteld.

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 regelingen

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 massastraagheidsmoment 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 (inprickers) 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 ontwerpstadium 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 pompuitsluiting 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 persleidingssystemen 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 ontwerp vrijheid heeft dient dit alternatief onderzocht te worden.

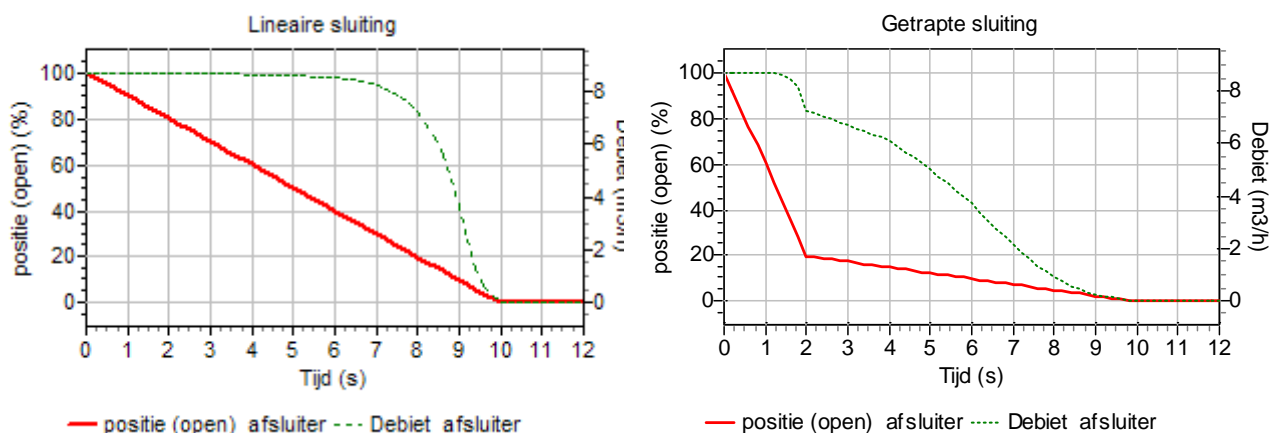
Ad 3)

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 ontluichten 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 ontluichten 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 geïventariseerd 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 (4.1) een indicatie van het benodigde windketelvolumen.

$$V = c \cdot QL \quad (4.1)$$

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 snelheidsvariaties 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 aanvoertoename 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 inprijkemalen 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 pomptoeental 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. Voorbeelden van kentallen zijn:

- draaiuren per periode (dag, week, maand, jaar)
- draaiuren per m^3 per periode
- benodigd toerental voor ontwerpdebiet (voor toerengerelde gemalen)
- specifiek energieverbruik (kWh/m^3 , gemiddeld over een dag/week/maand/jaar),
- transportcapaciteit,
- Pompwendement
- Weerstandsfactor van transportleiding of systeemkarakteristiek

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.

- 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 toerengeregelde 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.

$$K = \frac{E \text{ [kWh]}}{V \text{ [m}^3\text{]}} \quad (5.1)$$

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

$$K = \frac{P \text{ [kW]}}{Q \text{ [m}^3\text{/h]}} \quad (5.2)$$

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

$$P_{elek} = \frac{P_{hydr}}{\eta_{pomp} \times \eta_{elek}} = \frac{\rho g Q \Delta H}{\eta_{pomp} \times \eta_{elek}} \quad (5.3)$$

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	=	Gravatieversnelling	[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.

$$P_{elek} = U \cdot I \quad (5.4)$$

Waarin:

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

Het energieverbruik van het rioalgemaal wordt automatisch bijgehouden door de energieleverancier waardoor vergelijking (5.4) in de praktijk eenvoudiger toe te passen is.

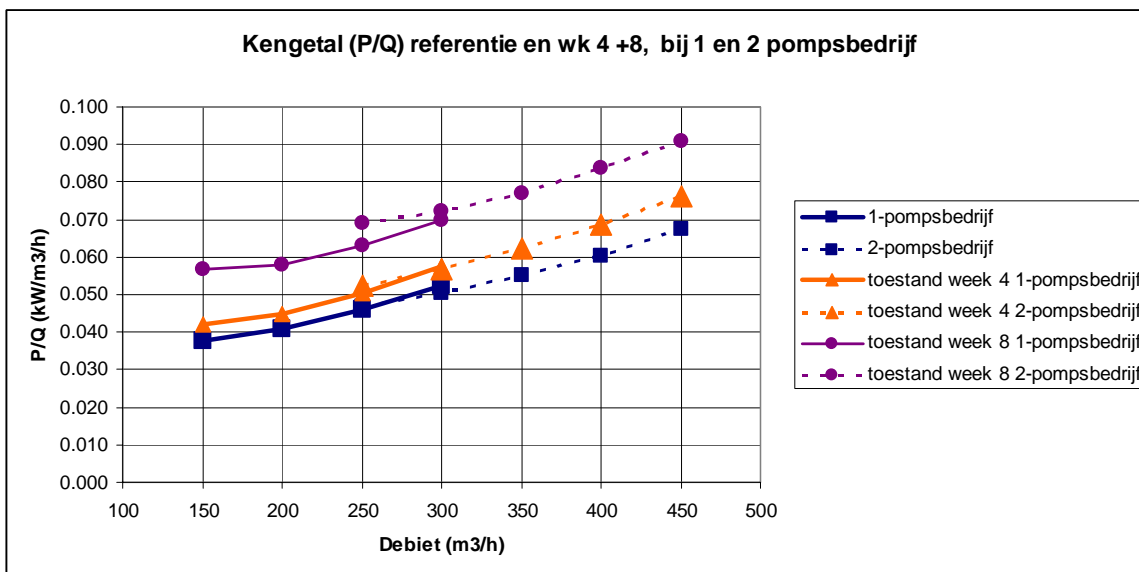
Echter deze registratie behelst het totale energieverbruik van het rioalgemaal, dus inclusief verlichting en koeling. Voor correct gebruik van vergelijking (5.4) zou dus een correctie toegepast moeten worden.

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

$$K = \frac{P_{hydr}}{Q} = \frac{\rho g Q \Delta H}{Q} = \rho g \Delta H \quad (5.5)$$

$$PI = \frac{K_{referentie}}{K_{actueel}} = \frac{\left(\frac{P}{Q}\right)_{referentie}}{\left(\frac{P}{Q}\right)_{actueel}} = \frac{\Delta H_{referentie}}{\Delta H_{actueel}} \quad (5.6)$$

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 pompkarakteristiek

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 (5.7), waarin het energieverlies wordt berekend uit het verschil tussen de persdrukhoogte in het rioolgemaal H_{pg} en het vaste of gemeten perspeil H_p .

$$\Delta H_{ref} = H_{pg} - H_p = C_1 Q^2 + C_2 Q \quad (5.7)$$

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

$$PI_{\Delta H_{leiding}} = \frac{\Delta H_{ref}(Q, H_p)}{H_{pg,act} - H_p} \quad (5.8)$$

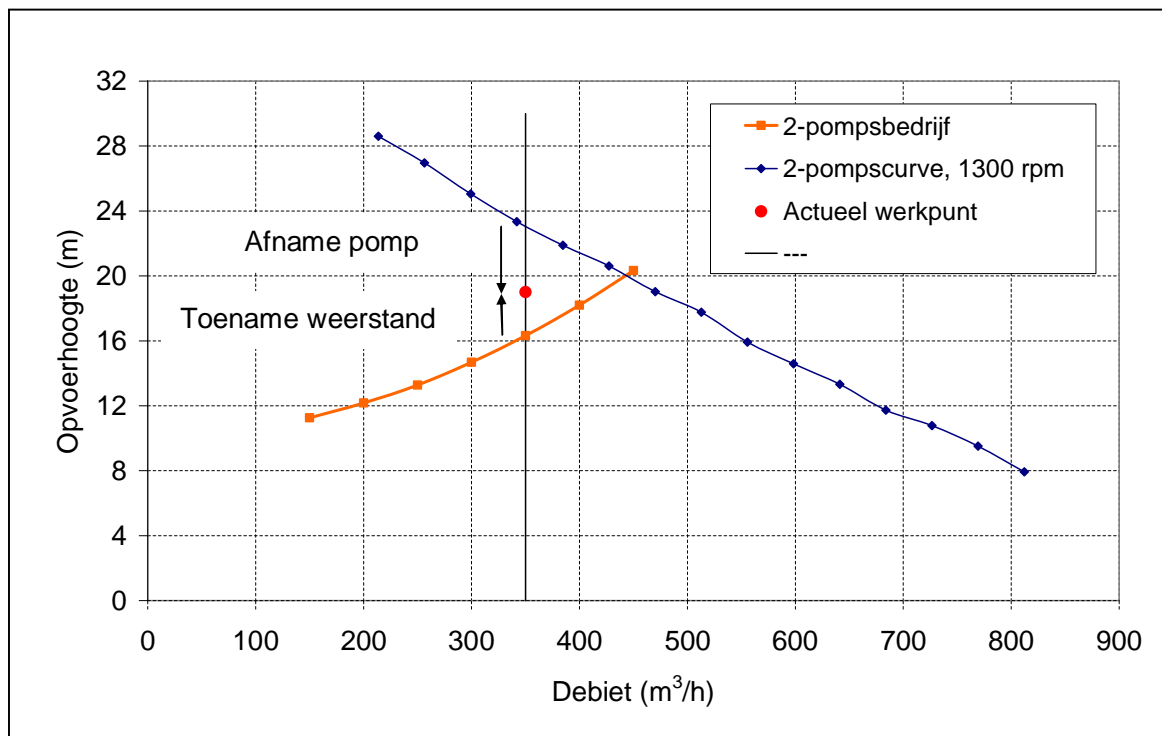
De meting van persdruk en zuigpeil kunnen tenslotte ook nog gebruikt worden om de pompopvoerhoogte te bepalen en te vergelijken met de pompkromme. De actuele pompopvoerhoogte wordt afgeleid via vergelijking

$$\Delta H_{pomp,act} = H_{pg} - H_z + C_g Q^2 \quad (5.9)$$

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

$$PI_{\Delta H_{pomp}} = \frac{\Delta H_{pomp,act}}{\Delta H_{pomp,ref}(n, Q)} \quad (5.10)$$

Deze twee performance 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, pompkromme en systeemkarakteristiek in Q-H diagram

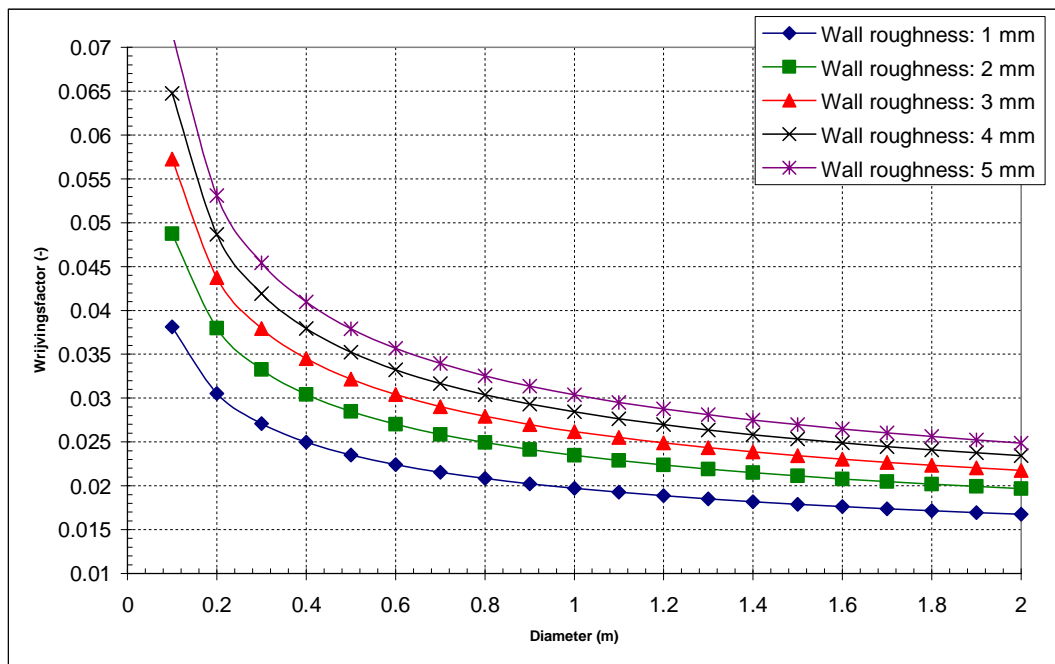
Een voordeel van de laatste twee prestatie-indicatoren is de directe relatie met de energie-efficiency, omdat het energieverbruik evenredig oploopt met de pompopvoerhoogte.

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 $\varnothing 1500$ mm leiding geeft een gelijke weerstandscoefficiënt λ als een wandruwheid van 1 mm in een $\varnothing 300$ 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.

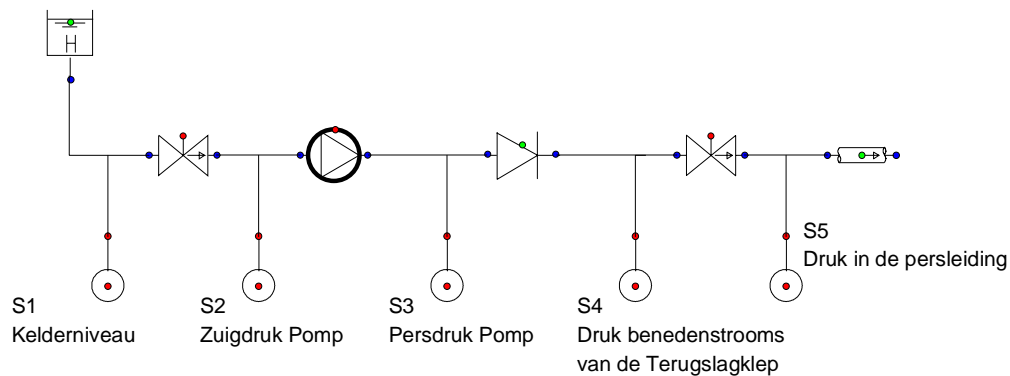
Bij ontbreken van een debietmeter (bij oude gemalen nog het geval) moet het debiet bepaald worden door gedurende een bepaalde tijd een schijf water uit de zuigkelder weg te pompen. Hierbij dient de aanvoer in de kelder afgesloten te worden of dient informatie over de vultijd van de kelder gebruikt te 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 gemaal 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 ontluchtingspunt ook direct een aansluitpunt voor een drukmeting mee.

Inprikleidingen die niet in bedrijf zijn, kunnen gebruikt worden om de druk ter plaatse van het inprikkpunt 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 ontlichten.

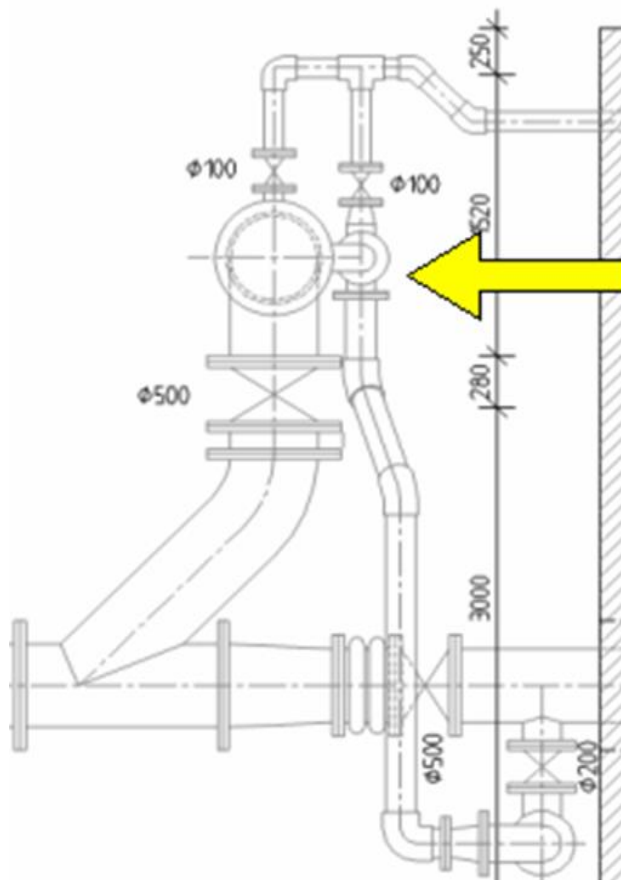
6.3.3 Pigging

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 indien 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 ontluchtingsvoorziening worden opgenomen. Voor een goede ontluchtingsvoorziening moet een opstaand leidingdeel gemonteerd worden conform beschreven in paragraaf 3.4.2.

Voor ontluchtingspunten in het gemaal wordt verwezen naar paragraaf 4.6. Voor het incidenteel ontlichten (bijvoorbeeld na onderhoudswerkzaamheden) van de pomp en/of persleiding wordt geadviseerd voor handmatige ontluchters 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 bypass met isolatiekleppen.	Een prop-actie kan ook gebruikt worden bij initiële vulling van de leiding
	Sluit ontluchttingsleidingen in het gemaal.	In veel gemalen bestaan deze ontluchttingsleidingen uit kleine balkeerleppen, 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 pompperszijde 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 gassen uit oplossing kunnen komen.

7.2 Checklijsten

7.2.1 Ontwerp gemaal

Tabel 7.2 Ontwerpaspecten en mogelijke maatregelen 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 maatregelen 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

Ontwerpaspect persleidingen	Mogelijke Maatregelen
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 uigeschakelde 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.

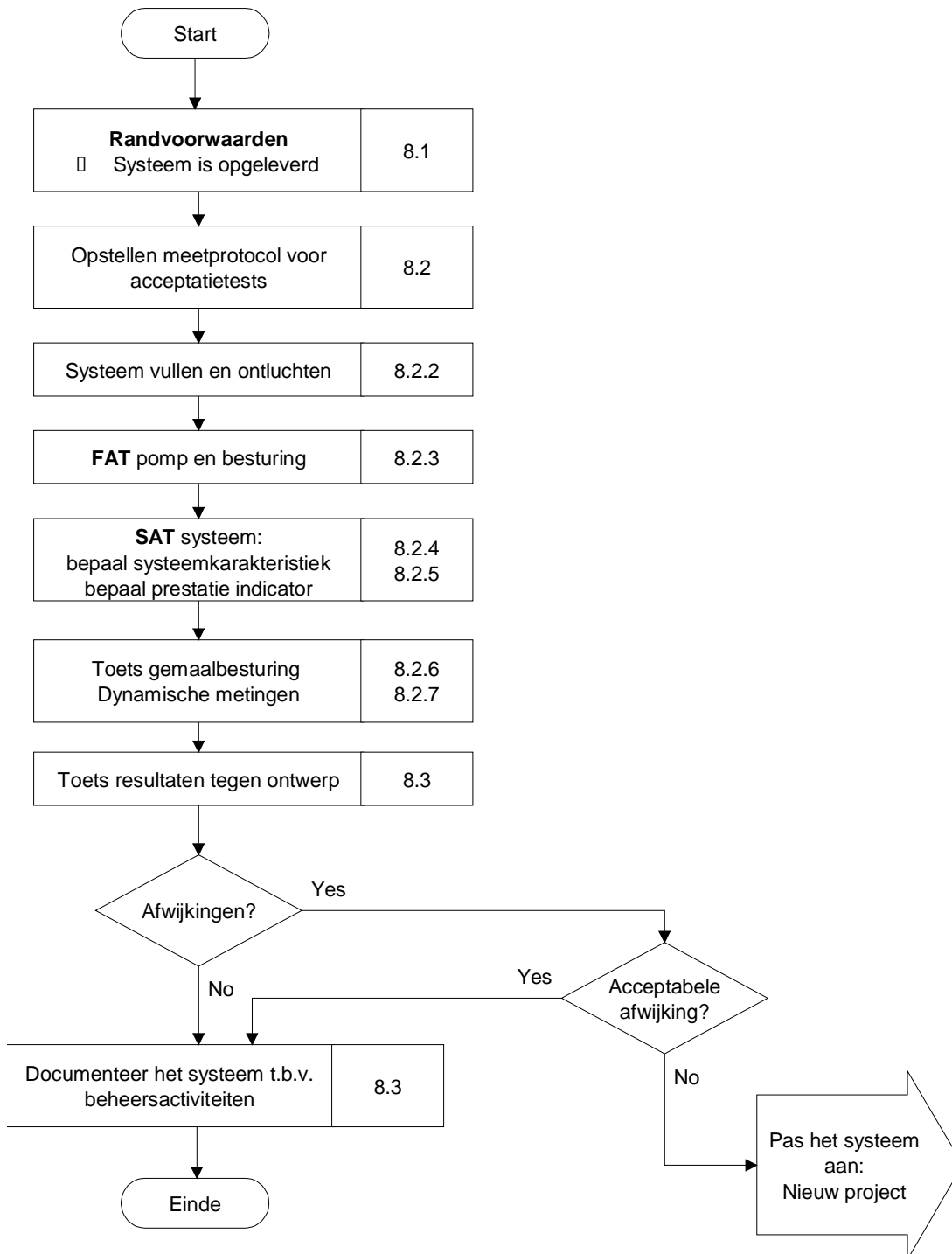
Figuur 8.1 geeft het te doorlopen proces weer.

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 ontlucht 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 acceptabele 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 Riolerings 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.

Meten 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 tijdspanne 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 inbouw-eisen 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).

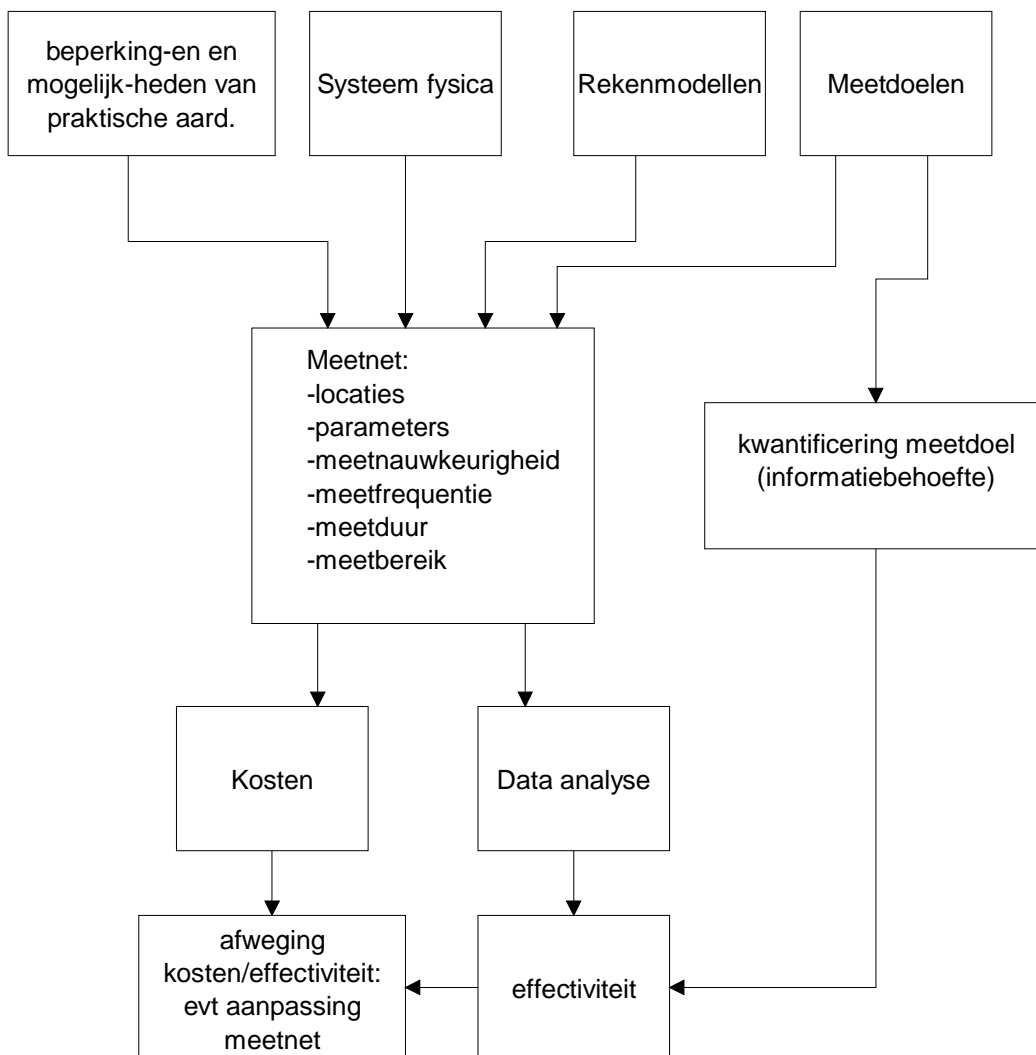
Als men bij het ontwerp van de meetopzet geen betrouwbare informatie heeft t.a.v. de karakteristieke tijden van de processen, dan is het verstandig om te beginnen met een zo hoog mogelijke meetfrequentie, aan de hand van de aldus verzamelde gegevens kan worden nagegaan of het geoorloofd is de meetfrequentie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

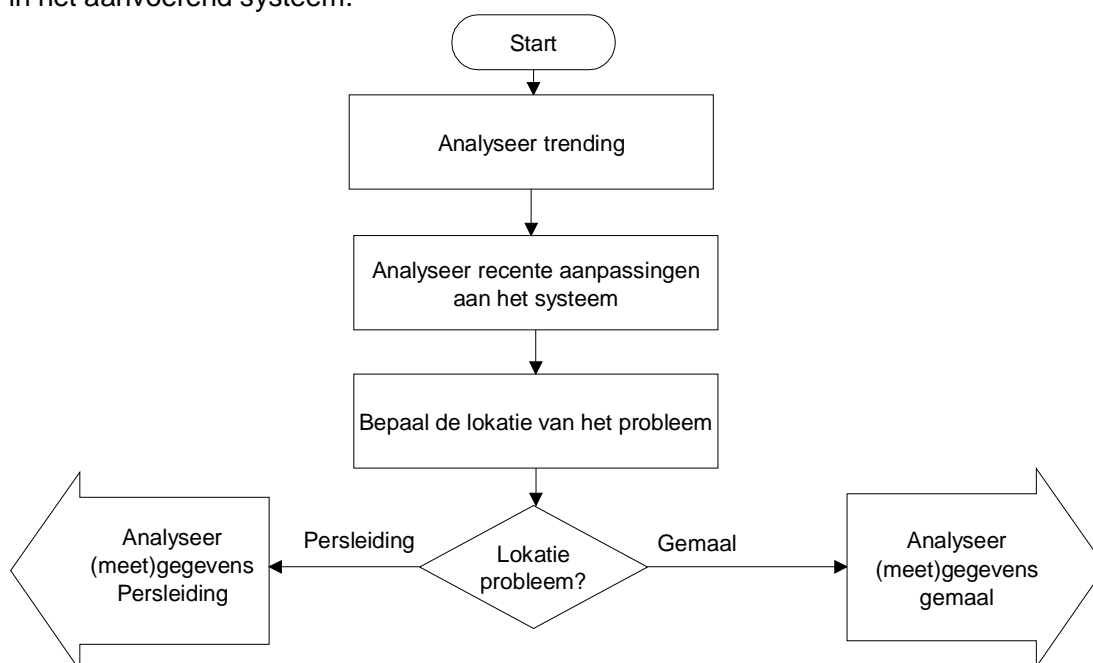
- Vervuiling in de pompwaaier
- Erosie van de pompwaaier
- Instellingen van de regeling
- Stand van afsluiters
- Statische opvoerhoogte
- Wijzigingen elders in het systeem
- Tijdelijke werkzaamheden
- Industriële lozingen via het riool

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.

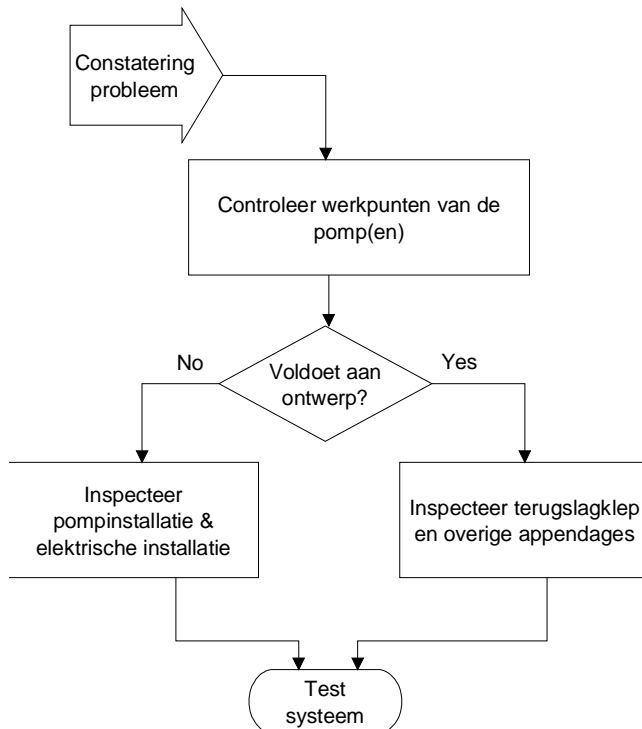
Om te bepalen of het capaciteitsprobleem zich voordoet in het gemaal of in de persleiding, moet minimaal de druk en debiet aan het begin van de persleiding en de druk aan het einde van de persleiding gemeten worden. Vervolgens wordt de weerstandskarakteristiek van de leiding hieruit berekend en deze 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 0) of gegevens van de fabrikanten kan veel informatie verkregen worden.



Figuur 9.3 Stroomschema voor de analyse van capaciteitsproblemen in het gemaal

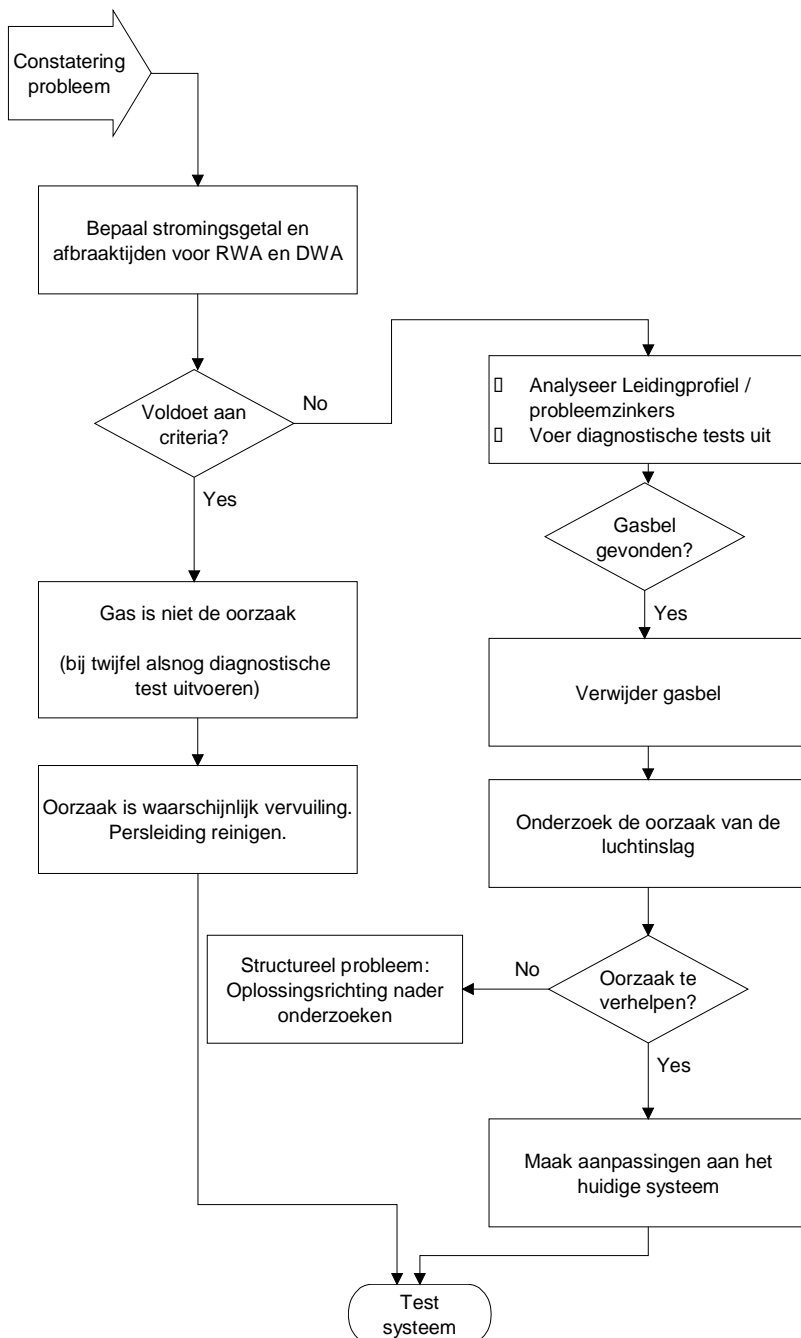
Allereerst moeten de pompen gecontroleerd worden. Door de meetgegevens van de pomp (debiet, opvoerhoogte, toerental en opgenomen vermogen) te controleren aan de hand van de gegevens van een acceptatietest kan vastgesteld worden of de pomp nog aan de specificaties voldoet. Als dit niet het geval is dient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

Als de analyse van de pompgegevens 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) gemeind 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 bied 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 opgehoopte 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 Leidingsystemen, Delft, Deltares.

Deltares (1990 - 2011) Cursus Pompen, Cursusreeks Hydrodynamica van Leidingsystemen, Delft, Deltares.

Deltares (1990 - 2011) Cursus Kleppen, Cursusreeks Hydrodynamica van Leidingsystemen, 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 luchtiname 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