

KWR | september 2015

Inzameling huishoudelijk afvalwater

Eindversie

Op weg naar een nieuw concept

Inzameling huishoudelijk afvalwater

Op weg naar een nieuw concept

KWR | September 2015

Opdrachtnummer

400537

Projectmanager

Ton van Leerdam

Opdrachtgever

TKI, Wavin, Waternet

Kwaliteitsborger(s)

Auteur(s)

Jan Vreeburg

Verzonden aan

Jaar van publicatie
2015

Meer informatie

T
E jan.vreeburg@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



KWR | September 2015 © KWR

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

Het inzamelingsstelsel van huishoudelijk afvalwater bestaat in Nederland voor het grootste gedeelte uit een gemengd stelsel, waarin zowel regenwater als huishoudelijk afvalwater wordt verzameld en getransporteerd naar de gemalen in de wijken. Voor dit systeem gelden traditioneel ontwerprichtlijnen die vooral gericht zijn op de kwantiteit van het regenwater en operationele aspecten als inspectie en schoonmaken. Dit leidt tot systemen met een relatief grote diameter (minimaal 250 mm) die vermaasd zijn aangelegd. Transitie naar gescheiden systemen komt er in de praktijk op neer dat er twee min of meer identieke systemen worden aangelegd, waarvan de één het regenwater en de ander het huishoudelijk afvalwater inzamelt en transporteert.

In dit rapport wordt een onderzoek beschreven naar de mogelijkheden om in de transitie of bij nieuwe aanleg een nieuwe benadering te volgen voor het ontwerpen van het inzamelingsstelsel voor huishoudelijk afvalwater. Doel is om een kleiner systeem te ontwikkelen dat minimaal dezelfde prestaties levert als het conventionele systeem, maar uiteindelijk een meer geconcentreerde en daardoor kleinere volumestroom afvalwater levert bij de wijkgemalen. Naast de voordelen van een geconcentreerde afvalstroom voor de mogelijkheden voor terugwinnen van grondstoffen en energie, zal het nieuwe systeem wellicht goedkoper zijn in aanleg en beheer.

Het drinkwaterverbruik is een logische voorspeller van de productie van huishoudelijk afvalwater. Een uitbreiding van het model voor drinkwaterverbruik SIMDEUM (Simulation of Demand, an End Use Model) met de module SIMSEM (SIMulation of SEwerage production Model) levert een realistisch lozingspatroon voor de individuele huishoudens op basis van 5 minuten periodes. Het patroon van afvalwaterproductie laat zien dat de maximale volumestroom voor 100 huizen met 260 i.e. in de orde van $6 \text{ m}^3/\text{uur}$ te zijn, terwijl het gemiddelde in de orde van $1\text{-}1,5 \text{ m}^3/\text{uur}$ is.

De hydraulische capaciteit van een leiding wordt vooral bepaald door het beschikbare verhang in de leiding. De capaciteit van een 100 mm leiding kan theoretisch worden berekend en bij een vullingsgraad van 70% varieert die van 5 tot $15 \text{ m}^3/\text{uur}$, waarbij het verhang varieert van 1:100 tot 1:1000. Deze waarden zijn ook in de proefinstallatie, ondanks moeilijkheden met instellingen en meetnauwkeurigheden, gevonden.

De basis voor het nieuwe systeem is een vertakt stelsel met diameters in de range van 100 tot 160 mm. Hydraulisch zou dat voldoende kunnen zijn, hetgeen bevestigd is in een verkennende berekening van een model van een bestaande wijk met 2500 inwoners (het westelijk gedeelte van de Danswijk in Almere). In de berekening zijn de hydraulische prestaties van het bestaande model, volledig uitgevoerd met leidingen met een diameter van 250 mm, vergeleken met een identiek model, maar waarbij de diameters zijn verkleind tot 100 mm en een klein gedeelte van 160 mm. De berekende snelheden en waterstanden in de leidingen van het model verschillen maximaal 20 respectievelijk 30%. De verblijftijd in het kleinere model is lager, vanwege het geringere bergend vermogen. Conclusie is dat het kleinere model minimaal net zo goed presteert als het originele model. Een voorzichtige schatting voor de aanlegkosten levert dat deze 20% lager kunnen zijn,

Operationele aspecten, met name de kans op verstopping, worden in het kleinere systeem als meer problematisch ervaren. *Uit een literatuuronderzoek blijkt dat er weinig beschreven is over het gedrag van sedimenten en materiaal in riolen; er is ook weinig bekend over verstoppingen die dat kan veroorzaken.(wordt nog nader uitgewerkt)*

In de tweede proevenreeks wordt met name gekeken naar de operationele aspecten.

Conclusies volgen nog.

aanbeveling is een pilotonderzoek met een tak van het kleinere systeem (tussen 20 en 100 woningen). Doel is om de afvoer te meten en de hydraulische belasting te verifiëren. Tweede doel is om de langere termijn ontwikkeling ten aanzien van vervuiling te meten. Dit kan door visueel waarnemen (putten, camera's), maar ook door gericht schoonmaken en opvangen van sediment

Inhoud

1	Inleiding	6	
1.1	Het belang van de huishoudelijke afvalwaterstroom		6
1.2	De kunstmatige stedelijke waterketen.		7
1.3	Resource recovery en het sluiten van de keten.		8
1.4	De keten en de sterkte van de schakels		9
1.5	De volgende stap: de onderzoekshypothese		11
1.6	Doel van de studie.		11
1.7	Aanpak onderzoek/rapport		11
2	Bestaande systemen en ontwerperegels	13	
2.1	Inleiding		13
2.2	Leidraad riolering		13
2.3	Functioneel ontwerp inzameling en transport afvalwater en verontreinigd hemelwater (Module B2100)		13
2.4	Operationele aspecten		16
2.5	Interviews stakeholders		17
2.6	Samenvatting huidige ontwerperegels		21
3	Beschouwing huidige dimensionering	23	
3.1	Ontwikkeling taak riolering		23
3.2	Dimensionering gescheiden riool		23
3.3	Schoonmaken en inspecteren		24
3.4	Praktische aspecten		24
3.5	Volksgezondheid		25
3.6	Functionaliteit van het riool		25
3.7	Ontwikkeling		25
4	Een nieuwe benadering voor riolering voor huishoudelijk afvalwater	26	
4.1	Inleiding en opzet onderzoek.		26
4.2	Rationale nieuwe benadering		26
4.3	Aandachtspunten		27
4.4	Een nieuw concept		27
4.5	Modellering hydraulische belasting		29
4.6	Vloeistofmechanica		32
4.7	Capaciteit leidingen		35
4.8	Capaciteit leidingstelsel.		41
4.9	Resultaten		42
4.10	Conclusies		47
4.11	Schuifspanning en bezinking		47
5	Literatuuronderzoek verstoppingen in leidingen	49	
5.1	Inleiding		49
6	Experimenteel onderzoek	50	
6.1	Inleiding		50
6.2	Hydraulisch onderzoek		50

6.3	Transportverschijnselen in het riool.	50
7	Toepassing kleinere leidingen in bestaand ontwerp	51
7.1	Inleiding	51
7.2	Uitgangspunten	51
7.3	Resultaten	53
7.4	Kosten?	59
8	Internationale ontwikkelingen en oplossingen	60
8.1	De remmende voorsprong	60
8.2	Low cost oplossingen	60
Bijlage I SIMSEM	62	
	Inleiding	62
	Invoergegevens SIMSEM	63
	Invoergegevens: temperatuur en volumestroom	63
	Invoergegevens: nutriënten	65
	Uitvoergegevens SIMSEM	69
	Aanpassingen voor SIMSEM	70
	Pre-processing	70
	Post-processing van de data	70
	Post-processing voor temperatuur	70
	Post-processing voor nutriënten	71
	Validatie SIMSEM	71
	Voorbeeld van toepassing SIMSEM	71
Bijlage II Proevenreeks transportverschijnselen.	73	
	Inleiding	73
	Opzet proeven	73
	Schets proefinstallatie	74
	Diameter en hydraulische capaciteit	75
	Verstopping	76
	Obstakels en objecten	77
	Krachtenspel rond grotere objecten	78
	Invloedsfactoren op de beweging van objecten	79
	'Belastend materiaal' c.q. objecten	79
	Proefschema	80
	Capaciteit	80
	Vervuiling, obstakels en objecten	81
Bijlage III Referenties	83	

1 Inleiding

1.1 Het belang van de huishoudelijke afvalwaterstroom

1.1.1 Bron van grondstoffen

Huishoudelijk afvalwater is de **grootste bron van nutriënten** in de stedelijke waterketen. Tevens is de **thermische en biologische energie inhoud** van het huishoudelijk afvalwater relatief groot. Terugwinnen van deze nutriënten en energie zal de duurzaamheid van de stedelijke waterketen sterk vergroten. Daarmee is de stroom van huishoudelijk afvalwater een belangrijke schakel in het verduurzamen van de stedelijke waterketen.

Om deze nutriënten en energie, thermisch en biologisch, efficiënt terug te kunnen winnen, is het van belang om de afvalwaterstroom zo geconcentreerd mogelijk te houden. Hoe sterker de verdunning van de stroom, hoe lastiger en duurder het terugwinnen wordt. Om een duurzame waterketen te kunnen realiseren is het dus van belang om de huishoudelijke afvalwaterstroom zo **geconcentreerd mogelijk** te houden.

In de huidige situatie vindt het huishoudelijk afvalwater zijn oorsprong nagenoeg exclusief in het verbruik van drinkwater. Afhankelijk van het eindgebruik van het drinkwater, wordt afvalwater geproduceerd. Zo zal bijvoorbeeld het wassen onder een lopende kraan of douche nagenoeg zonder vertraging tot een afvalstroom leiden die even groot is als de aanvoerstream. Het eindgebruik van (drink)water geeft goede voorspelling van zowel het volume als van de kwaliteit van het afvalwater.

1.1.2 Inzameling

Het gemiddelde drinkwaterverbruik in Nederland bedraagt 120 liter per persoon per dag. In theorie zou dus ook de huishoudelijke afvalwaterstroom ongeveer 120 lppd moeten bedragen of zelfs iets minder. Bij de rioolwaterzuivering is kan dat volume echter toe met een factor van 2,2 en dus resulteren in ruim 260 lppd (Voorhoeve and Kerk 2003). Dit betekent dat de stroom van het huishoudelijk afvalwater tijdens de reis van het huis naar de RWZI sterk verdund raakt. Een voor de hand liggende reden is hiervoor het gemengde rioleringsstelsel dat in grote delen van Nederland aanwezig is (Rioned 2014). Maar ook de onbekendheid met de werkelijke afvalstromen is hier debet aan (Voorhoeve and Kerk 2003).

In het beleid van veel gemeenten is, mede onder druk van een toenemende klimaatverandering met een daarmee gepaard gaande toenemende buienintensiteit, een nieuwe benadering voor het verwerken van hemelwater te zien. In plaats van het te bergen en af te voeren, wordt meer uitgekeken naar mogelijkheden van vasthouden en gebruiken. Daarnaast geldt ook voor de rioolinfrastructuur dat deze dient te worden onderhouden en op enig moment vervangen. Dit heeft de rioleringsinfrastructuur gemeen met de overige 'nuts-infrastructuren' als drinkwater, gas en elektriciteit. Voor de gemeenten geldt daarnaast nog het onderhoud van de algemene openbare ruimte.

De vervanging van infrastructuur na een aantal tientallen jaren is een goede gelegenheid om de vraag te stellen of de oorspronkelijke ontwerpdoelstellingen en doelen nog steeds van kracht zijn. Naast de oorspronkelijke doelstelling zijn echter in de loop der jaren ook nieuwe doelstellingen erbij gekomen. Met het in werking treden van de Wet Verontreiniging Oppervlaktewater is een belangrijke drijfveer gekomen om gescheiden stelsels aan te leggen en de

lozingen van ongezuiverd afvalwater op het oppervlakte water terug te dringen. Ook bij vervangingen wordt nadrukkelijk gekeken naar de mogelijkheden om de hemelwater afvoer los te koppelen van de vuil water afvoer, het zogenaamde ‘afkoppelen.’

1.2 De kunstmatige stedelijke waterketen.

In deze paragraaf wordt een definitie gegeven van de kunstmatige stedelijke waterketen, zoals die in dit rapport zal worden gehanteerd. Tevens worden de stakeholders in die keten benoemd.

1.2.1 Definitie kunstmatige stedelijke waterketen

Met het noemen van een kunstmatige stedelijke waterketen wordt de suggestie gewekt dat er een natuurlijke stedelijke waterketen bestaat. Voor dit onderzoek definiëren we de kunstmatige waterketen als drinkwater-huishoudelijk afvalwater-zuivering/terugwinning-hergebruik. De natuurlijke stedelijke keten wordt gevormd door het hemelwater en de afvoer c.q. het gebruik daarvan. Dit onderscheid wordt gemaakt om de stroom relatief schoon water niet te verwarren met de huishoudelijke afvalwaterstroom.

In deze studie wordt alleen gekeken naar de kunstmatige stedelijke afvalwaterketen, dus de vuil water stroom.

In de kunstmatige stedelijke waterketen speelt de consument een centrale rol: pas als hij/zij water gebruikt, gaat het systeem draaien. Het gedrag van de consument op het gebied van (drink)water is de bron voor de “productie” van huishoudelijk afvalwater. De relatie tussen het gebruiken van drinkwater en het produceren van afvalwater wordt in paragraaf 4.5 en toegepast in het model in hoofdstuk 7.

Het huishoudelijk afvalwater wordt in deze studie gedefinieerd als al het afvalwater dat wordt ‘geproduceerd’ in de bewoonde stedelijke omgeving. Dit betekent dat er ook afvalwater bij komt dat het resultaat is van allerlei toepassingen van drinkwater in die omgeving. Denk hierbij aan klein zakelijk verbruik van winkels, kantoren, scholen, tandartsen, kappers, etc. In principe blijft dit ook gerelateerd aan het gebruik van drinkwater.

Een uitzondering wordt voorlopig gemaakt voor grotere industrieterreinen waar velerlei toepassingen kunnen voorkomen, zeker als gekeken wordt vanuit een ‘wateroogpunt’. De mogelijkheid bestaat dat op een industrie terrein een bijzondere waterverbruiker aanwezig is, die dan ook als bijzonder benaderd dient te worden. Daar wordt in deze studie voornamelijk geen rekening mee gehouden, maar alleen met de ‘gewone’ stedelijke omgeving.

1.2.2 De consument

In deze studie wordt gekeken naar de gewone consument in de woonomgeving van de stad. Naast de gewone huishoudens wordt ook het klein zakelijk verbruik hiertoe gerekend.

Het gedrag van de consument (en de klein zakelijk verbruiker) op het gebied van het gebruik van drinkwater is in de afgelopen jaren goed beschreven. Het resultaat hiervan, vastgelegd in de tool SIMDEUM (referentie c.q. tekstblok) vormt een belangrijk kennisbron voor het begrijpen en modelleren van de huishoudelijke afvalwaterstroom (Blokker, Buchberger et al. 2008) (Blokker 2010).

1.2.3 Gemeente

De gemeente is verantwoordelijk voor de inzameling van het huishoudelijk afvalwater in de kunstmatige stedelijke waterketen. De gemeente is ook verantwoordelijk voor de inzameling en het verwerken van het hemelwater in de stedelijke omgeving. Van oudsher heeft dit in

veel gevallen geleid tot een gemengd stelsel: Bijna 70% van alle aansluitingen is op een gemengd stelsel (Rioned 2009), maar in veel plannen wordt gestreefd naar een volledig gescheiden stelsel of een verbeterd gescheiden stelsel.

Wettelijk ligt in Artikel 10.33 lid 1 van de Wet Milieubeheer de zorgplicht van de gemeente vast voor de doelmatige inzameling en het doelmatig transport van afvalwater dat vrijkomt bij de binnen haar grondgebied gelegen percelen. ("De gemeenteraad of burgemeester en wethouders dragen zorg voor de inzameling en het transport van stedelijk afvalwater dat vrijkomt bij de binnen het grondgebied van de gemeente gelegen percelen, door middel van een openbaar vuilwaterriool naar een inrichting als bedoeld in artikel 3.4 van de Waterwet.")

Overigens wordt in deze wetsteksten ook aangemoedigd om een beleid te formuleren en uit te voeren gericht op het beperken van het ontstaan van afvalwater. De formuleringen in de wet zijn overigens voornamelijk geformuleerd in termen van 'doelmatig' en 'kostenefficiënt'

Op grond van de Woningwet (en de daarop gebaseerde Bouwverordening) heeft elk perceel een voorziening voor de afvoer van afvalwater en fecaliën die is aan te sluiten op het openbaar riool. Hoewel er geen aansluitplicht meer is, moet de gemeente desgevraagd de voorziening wel leveren.

In geen van de wetsdocumenten wordt de relatie met de volksgezondheid direct gelegd, zoals dat wel in de Drinkwaterwet is gedaan, waar het begrip Volksgezondheid meerdere malen wordt genoemd. Voor zowel afvalwater als drinkwater zijn de definities van 'doelmatig' en 'kostenefficiënt' belangrijk. In toenemende mate wordt hierin ook de term 'laagste maatschappelijke kosten' gehanteerd.

De gemeente draagt, na de inzameling van beide stromen via vrij verval systemen, de verantwoordelijkheid voor het verwerken van beide waterstromen over aan het waterschap. In veel gevallen is dat letterlijk op de stadsgrens, maar er zijn toenemende initiatieven om het waterschap meer te betrekken bij de rioleringstaak.

1.2.4 Waterschappen

De taak van de waterschappen is gelegen in de zorg voor de waterkwaliteit. Dit betekent het bedrijven, onderhouden en vernieuwen van afvalwaterzuiveringsinstallaties, persleidingen en rioolgemalen.

1.3 Resource recovery en het sluiten van de keten.

Het terugwinnen van grondstoffen uit de kunstmatige stedelijke afvalwaterketen is een relatief nieuwe doelstelling binnen de stedelijke afvalwaterketen. De oorspronkelijke hoofddoelstellingen, het waarborgen van een veilige en hygiënische afvoer van afvalwater en het beschermen tegen wateroverlast, blijven onverkort bestaan.

De stakeholders in de kunstmatige stedelijke waterketen: consument/burger waterleidingbedrijf, gemeente en waterschappen zijn fysiek met elkaar verbonden. De samenwerking om de oorspronkelijke doelstellingen te bereiken is voor de hand liggend, waarbij de stakeholders een gezamenlijk belang hebben. Tevens wordt de samenwerking gestimuleerd doordat ontbreken van één van de schakels de effectiviteit van de gehele keten teniet zal doen. Met andere woorden: de keten bestaat alleen maar als alle schakels in orde zijn.

De samenwerking op het gebied van de nieuwe doelstelling, het terugwinnen van grondstoffen, is echter (nog) niet zo vanzelfsprekend. Het belang van het resultaat, de terug gewon-

nen grondstoffen, is niet zo groot dat het de samenwerking afdwingt, zoals dat bij de hygiëne en veiligheid wel het geval is. Op sommige gebieden zijn de belangen zelfs tegenstrijdig. Als voorbeeld om dit toe te lichten de stelselkeuze voor een gemengd of een gescheiden stelsel. Het voordeel van een gescheiden stelsel voor het terugwinnen van grondstoffen c.q. het behandelen van afvalwater is dat de te behandelen volumestroom kleiner is en dientengevolge de concentratie van organische stoffen groter dan bij gemengde stelsel. Dit voordeel wordt 'genoten' bij het waterschap. De kosten hiervoor liggen echter voor een groot deel bij de gemeente die een complexer en uitgebreider, lees duurder, systeem moet maken.

Om het sluiten van de keten mogelijk te maken en daarmee het terugwinnen van grondstoffen zo effectief mogelijk te laten zijn

1.4 De keten en de sterkte van de schakels

De discussie over het verduurzamen van de afvalwatercyclus en met name de doelstelling van terugwinnen van grondstoffen heeft vraagt om een nieuwe benadering van de afvalwaterketen. Het veilig en snel afvoeren van de afvalstoffen wordt gecombineerd met op terugwinning gerichte behandeling. Hiervoor is de concentratie van afvalstoffen van belang; hoe hoger deze is, hoe beter dit soort behandeling kan worden toegepast. Bovendien kan de hydraulische capaciteit van een behandeling kleiner zijn bij een kleinere vuil water stroom.

Iedere schakel in de keten, zoals gedefinieerd in paragraaf 1.2.1 heeft hier een bijdrage aan. Net zoals in de huidige 'end of pipe' benadering, kan de doelstelling van duurzaamheid alleen bereikt worden door een nauwe afstemming tussen de drie schakels van de afvalwaterketen

1.4.1 Van afvoer naar concentratie: Water out, shit in

Een hoge concentratie van afvalstoffen in het afvalwater kan bereikt worden door minder water of door meer afvalstoffen toe te voegen; ofwel in modern jargon "Water out, shit in". Voor iedere schakel is de bijdrage aan dit uitgangspunt verder te verbeteren, met behoud van of vergroting van het belang binnen de schakel.

Bij de individuele huishoudens c.q. de consument ligt de start van de afvalwaterketen. Er is een nauwe relatie met het gebruik van drinkwater: hoe minder drinkwater gebruikt wordt, hoe minder er in het riool terecht komt. Veel is bereikt door de toepassing van moderne toiletten en betere c.q. zuiniger (af)wasmachines. Op andere vlakken is echter een toename van het waterverbruik te zien. Ondanks deze toenemende waterbeschaving (meer douchen) en een groeiende bevolking, is het huishoudelijk drinkwaterverbruik in absolute zin afgenomen. Het individuele dagelijkse gebruik is gedaald van 150 liter naar 120 liter, maar is slechts ten dele te verklaren uit economische motieven. De totale kosten die in een individueel huishouden worden besteed aan het de waterketen zijn aanzienlijk: keuken, badkamer en toilet vormen bij elkaar 10 tot 20% van de totale waarde van een huis met een gemiddelde levensduur van 10 tot 15 jaar. Dat komt al neer op €2000,= tot €3000,= per jaar aan afschrijving. De jaarlijkse gebruikskosten van (drink- en afval)water vormen in een gezin van gemiddelde grootte €400,= tot €500,=. Besparing van 20% op het drinkwaterverbruik, met daarmee eenzelfde besparing op de productie van afvalwater, levert een gemiddeld gezin jaarlijks €30,= tot €40,= op. Hieruit kan worden afgeleid dat investeringen die gedaan worden in waterbesparende apparatuur hebben maar gedeeltelijk een economische achtergrond kunnen hebben. Ze worden waarschijnlijk veel meer gedreven door (behoud van) comfort, energiebesparing maar ook trendgevoeligheid. Huishoudens zijn bereid tot investering als deze aspecten worden gediend.

De waterschappen behandelen het ingezamelde rioolwater en lozen het effluent. Veranderingen in de concentratie van afvalstoffen en het volume van de afvalwaterstroom hebben consequenties voor de manier van zuiveren en de hydraulische capaciteit van de installaties. Daarmee ook voor de efficiëntie van het terugwinnen en hergebruiken van grondstoffen.

In de kunstmatige stedelijke afvalwaterketen is het belang van de gemeente, als inzamelaar van het afvalwater, bij het in stand houden van de concentratie van afvalstoffen het minst geproforceerd. De huidige praktijk laat zien dat er (veel) extra water wordt toegevoegd. Niet alleen in de gecombineerde systemen, maar ook in de gescheiden systemen. Er zijn meerdere oorzaken te vinden die dit kunnen verklaren. De belangrijkste is wellicht juist het ontbreken van een belang voor de gemeente bij het handhaven of zelfs verhogen van de concentratie.

1.4.2 Een nieuwe benadering voor riolering

Uitgangspunt voor een nieuwe benadering voor riolering zal in eerste instantie gericht zijn op behoud van concentratie van afvalwater.

Daarnaast is een uitgangspunt dat een nieuw systeem moet kunnen bestaan naast of in combinatie met de bestaande systemen. Op die manier kan een transitie plaatsvinden die gelijke tred houdt met de verandering van de stedelijke omgeving.

De nieuwe benadering is gericht op het strikt afkoppelen van het vuile water en dat verzamelen in een kleiner en hydraulisch efficiënter systeem. Dit lijkt veel op de huidige benadering van het afkoppelen van regenwater, maar is toch anders. Bij het afkoppelen van regenwater blijft het oorspronkelijke gemengde systeem behouden en worden oplossingen gezocht om lokaal regenwater op te slaan of af te voeren. Bij het afkoppelen van vuil water, zal een nieuw systeem worden gelegd waar alleen vuilwater aansluitingen op kunnen worden gemaakt. Dit laat onverlet dat het afkoppelen van regenwater relevant blijft en zal resulteren in een geringere stroom af te voeren regenwater.

De basis voor het nieuwe systeem is dat er alleen huishoudelijk afvalwater in wordt verzameld en dat de omvang ervan wordt afgestemd op de dynamiek van het drinkwaterverbruik. De toepassing is dus voornamelijk in woonwijken en andere woongebieden. Belangrijk daarbij is om te realiseren dat de stroomsnelheid en de afvoercapaciteit van een leiding maar voor een klein gedeelte wordt bepaald door de diameter van de leiding. Intuïtief speelt de diameter echter een grotere rol en dat heeft ertoe geleid dat het huidige vuil water systeem overgedimensioneerd is.

Het drinkwater (in dit geval het voor-stadium van afvalwater) wordt in dergelijke woongebieden geleverd door leidingen met diameters van 40 tot 100 millimeter met een drukval van 1 tot 2 meter per 500 m (Blokker, Beverloo et al. 2011). Dat is een verhang van 1:500 tot 1:250. De Leidraad hanteert vergelijkbare verhangen voor het inzamelingstelsel voor vuil water, maar een diameter die 2,5 tot 7 maal zo groot is (minimaal 250 mm). In dit rapport zal een systeem worden ontworpen en getoetst dat geïnspireerd is op het kleinere drinkwatersysteem. Naast de hydraulische aspecten zal ook aandacht worden besteed aan de operationele aspecten. Een kleiner systeem zal minder 'vergevingsgezind' zijn voor extra belasting en wellicht ook gevoeliger voor verstopping. Hierdoor zal het wellicht meer operationele aandacht vergen, bovenop de nu al gebruikelijk onderhoudscyclus van schoonmaken en inspecteren.

1.5 De volgende stap: de onderzoekshypothese

Het realiseren van een nieuwe benadering van de afvalwaterketen vergt een integrale benadering, hier samengevat in 'Water out, shit in'. Iedere schakel kan hierbij een bijdrage leveren, doch de mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van het belang dat wordt ervaren. Voor de schakel 'individuele huishoudens' is het belang binnen de eigen schakel te vinden: kostenbesparing, maar ook comfort- of beleving-verhoging. Het belang van de derde schakel, de waterschappen, wordt min of meer "vanzelf" gediend en zal op termijn om nieuwe zuiveringstechnieken vragen en om systemen met een kleinere hydraulische capaciteit.

Het belang van de gemeente als eigenaar en exploitant van de riolering is moeilijker te duiden. Een nieuw concept voor vuil water riolering met kleinere en efficiëntere leidingen en een strikte afkoppeling van het afvalwater heeft waarschijnlijk een positieve kostenbalans. Er zijn echter veel vragen en onzekerheden.

Het onderzoek in dit rapport gaat uit van de veronderstelling dat als de huishoudelijke afvalwaterstroom beperkt wordt tot maximaal 120 lppd (iets minder dan het drinkwaterverbruik) of nog minder er dan een effectieve behandeling mogelijk is waarmee grondstoffen kunnen worden teruggewonnen. Toevoeging van extra organische belasting aan deze stroom zal de efficiency van de zuivering verder doe toenemen.

De onderzoekshypothese kan dan als volgt worden geformuleerd:

Een inzamelingssysteem (vrij verval riool) dat toegesneden is op het verzamelen en transporteren van alleen huishoudelijk afvalwater kan kleiner en goedkoper worden aangelegd dan het huidige gescheiden stelsel. Bovendien zal dit systeem beter functioneren en eenduidiger te onderhouden zijn.

1.6 Doel van de studie.

Het doel van deze studie is om de onderzoekshypothese te toetsen en aan te nemen of te verwerpen. Dat wordt gedaan door eerst het huidige inzamelingsleidingnet van het huishoudelijk afvalwater op gemeentelijk niveau, het zogenaamde vrij verval inzamelingsnetwerk, nader te beschouwen. Op basis van de beschouwing worden nadere onderzoeksvragen gesteld naar de hydraulische prestatie en de belangrijkste operationele aspecten zoals de transportcapaciteit voor objecten en de gevoeligheid voor verstoppingen.

Uiteindelijk doel is om de contouren van nieuwe ontwerpregels voor dit systeem op te stellen waarbij een hydraulische optimalisatie wordt gerealiseerd met behulp van gedetailleerde kennis van realistische belastingspatronen, de hydraulische consequenties daarvan en het transportgedrag van objecten en mogelijke mechanismen die tot verstopping zullen leiden.

1.7 Aanpak onderzoek/rapport

Het onderzoek wordt in verschillende stappen uitgevoerd. Allereerst wordt de huidige praktijk in beeld gebracht door literatuuronderzoek en analyse van handleidingen, gevolgd door interviews met een aantal stakeholders. In hoofdstuk 2 is dat beschreven.

In hoofdstuk 3 wordt dit nader beschouwd en in het perspectief van de historische ontwikkeling gezet. Deze elementen worden bij elkaar genomen in hoofdstuk 4. In paragraaf 4.4 wordt een nieuw concept beschreven dat verder wordt uitgewerkt in de paragrafen 4.5 tot en met 4.9.

In hoofdstuk 5 wordt een literatuur onderzoek beschreven naar de mechanismen achter en het optreden van verstoppingen in riolen. Het experimentele onderzoek naar de hydraulische

aspecten en de transportverschijnselen in rioolleidingen wordt in aparte rapporten beschreven, maar de samenvatting en de conclusies worden in hoofdstuk 6 bij elkaar gebracht. *(moet nog worden toegevoegd)*

Een model van een bestaand systeem wordt gebruikt om de hydraulische aspecten van de nieuwe benadering te testen. Dit is beschreven in hoofdstuk 7.

Afgesloten wordt in hoofdstuk 8 met eens samenvatting van een aantal internationale ontwikkelingen, een conclusie en een aanbeveling voor verdere ontwikkeling en onderzoek.

2 Bestaande systemen en ontwerp-regels

2.1 Inleiding

Om inzicht te krijgen in de huidige hydraulische ontwerpgrondslagen voor de droogweerafvoer riolering is gebruik gemaakt van interviews met betrokkenen bij ontwerp en beheer van rioelstelsels. Daarnaast is de Leidraad riolering bestudeerd, waarin nagenoeg alle Nederlandse kennis over veel aspecten van de riolering is vastgelegd. Tevens is literatuuronderzoek gedaan en is getracht om de achtergronden van de richtlijn te verifiëren. In dit hoofdstuk wordt deze kennis zo goed mogelijk samengevat op het gebied van de hydraulica.

Bij het daadwerkelijk realiseren van rioelstelsels spelen vele factoren een rol. Een belangrijk aspect dat in veel gesprekken terugkomt is de waarborg dat een rioel probleemloos functioneert, veelal geformuleerd in termen van voorkomen: er mag geen verstopping optreden, er mag geen breuk optreden, er mag geen stagnatie in de afvoer optreden, etc.

2.2 Leidraad riolering

De Leidraad riolering is opgezet in de jaren 80 om de vele verschillende aanpakken van de gemeenten op elkaar af te stemmen. Het doel van de Leidraad is om een algemeen geaccepteerde handreiking te geven. In de Leidraad staan de algemeen geaccepteerde uitgangspunten, methoden en technieken op het gebied van de gemeentelijke watertaken. De Leidraad is uitdrukkelijk bedoeld als handreiking en is dus niet normstellend. In de praktijk wordt wel vaak de Leidraad als uitgangspunt genomen voor ontwerpen van rioleringssystemen. In de loop van de tijd is dit document uitgegroeid tot meer dan 2000 pagina's. Hieruit blijkt de complexiteit van het gehele systeem en de verwevenheid ervan met vele maatschappelijke diensten.

Voor het bepalen van de algemene uitgangspunten voor de hydraulische grondslagen voor de DWA riolering is voor band B "Ontwerpgrondslagen" van belang. Daarin zijn de modelues B2100 "Functioneel ontwerp inzameling en transport afvalwater en verontreinigd hemelwater" en module B2600 "Be- en ontluchting van belang". Deze worden apart besproken.

2.3 Functioneel ontwerp inzameling en transport afvalwater en verontreinigd hemelwater (Module B2100)

De module B2100 van de Leidraad geeft de grondslagen voor het functioneel ontwerp van een systeem van inzameling en transport van afvalwater. In het kader van dit rapport wordt vooral gekeken naar de elementen die betrekking hebben op de inzameling en het transport van huishoudelijk afvalwater.

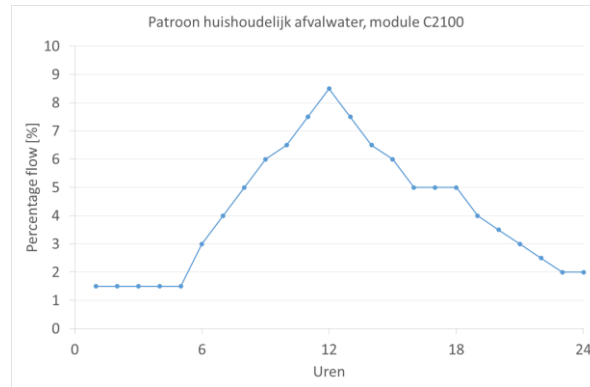
Er worden een aantal criteria gesteld voor het ontwerp van een DWA rioel:

- Hydraulische belasting
- Schuifspanning
- Bodemverhang en vullingsgraad
- Operationele aspecten

Deze aspecten zullen nader worden toegelicht.

2.3.1 Hydraulische belasting

Voor huishoudelijk afvalwater wordt een maatgevende flow van 10 tot 15 l/h per inwoner gegeven gedurende 10 tot 12 uur. In totaal geeft dat een afvoer van 100 tot 180 liter per persoon per dag. Er is voor een lozingspatroon in de tijd in module C2100 een procentuele verdeling gemaakt die is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 Patroon van lozing van afvalwater voor berekeningen volgens module C2100.

De maximale flow wordt hier op 8,5% van de totale flow gesteld hetgeen 8,5 tot 15,3 l/h/ie betekent. Impliciet wordt er hierbij van uitgegaan dat enige afvlakking optreedt over de tijd. Pieklasten op kortere tijdschaal zijn waarschijnlijk. Deze belasting wordt vooral gebruikt om een eerste inschatting te kunnen maken als er een nieuw riool wordt aangelegd.

In de Leidraad worden ook schattingen gegeven voor bedrijfsafvalwater met de kanttekening dat dat niet persé onder de gemeentelijke zorgplicht valt. Voor de beschouwing in dit rapport wordt dit verder niet meegenomen, omdat nadrukkelijk gekeken wordt naar riolering in gewone woonwijken en -omgevingen. Industrierterreinen vormen een aparte categorie die altijd maatwerk zullen vergen. Bedrijfsafvalwater van kleine bedrijven in woonwijken wordt in principe ook beschouwd als gewoon drinkwaterverbruik.

2.3.2 Schuifspanning

Een minimale schuifspanning is noodzakelijk om bezinking van materiaal te voorkomen. Deze wordt in de Leidraad gesteld op 1 tot 1,5 N/m², zodat fijn slib en fijn zandig materiaal door de stroming wordt meegevoerd. Bij schuifspanningen groter dan 2,5 N/m² wordt bezonken sediment weer opgewerveld (Ackres, Butler et al. 1996).

De minimale schuifspanning wordt soms gebruikt in plaats van een minimale snelheid. De schuifspanning in een leiding ter plaatse van de natte doorsnede wordt gegeven door de formule

$$\tau = \rho g R i \quad [1]$$

met τ : schuifspanning in N/m²
 ρ : Soortelijk gewicht vloeistof in kg/m³
 g : zwaartekracht versnelling in m/s²
 R : Natte perimeter in m
 i : hydraulische verhang in m/m

Verschillende onderzoekers hebben waarden voor de bed schuifspanning gesuggereerd die variëren tussen 1 en 4 N/m². Deze schuifspanning is noodzakelijk om de riolen zelfreinigend

te maken. De formule om de schuifspanning die opwerveling veroorzaakt wordt geschreven als (ASCE/WPCF, 1970)

$$\tau_m = \rho g K (s - 1) d \quad [2]$$

met	τ_m	: minimale schuifspanning voor opwerveling in N/m^2
	ρ	: Soortelijk gewicht vloeistof in kg/m^3
	g	: zwaartekracht versnelling in m/s^2
	K	: Constante = 0,8
	s	: Specifiek soortelijk gewicht (voor zand 2,6)
	d	: karakteristieke korrelgrootte sediment (m)

Voor zandkorrels met een diameter van 100 μm levert dit een schuifspanning op van 1,26 N/mm^2 en met een grootte van 1 mm een schuifspanning van 12,6 N/m^2 . Als echter de specifieke dichtheid van het sediment lager wordt, wordt ook het kritische schuifspanning lager. Theoretisch gaat die zelfs naar 0 als de specifieke dichtheid gelijk is aan 1. Voor organisch materiaal is de dichtheid slechts in geringe mate groter dan die van water.

De waarden die in de Leidraad worden genoemd als minimale schuifspanningen (1 N/m^2 om bezinking te voorkomen en 2,5 N/m^2 om bezonken sediment op te wervelen) lijken veel op de waarden die in de literatuur worden genoemd. Deze waarden gaan uit van zandig materiaal, zoals ook in de Leidraad wordt genoemd. De herkomst van het zandige materiaal is onduidelijk. Meest waarschijnlijk is dit van misaansluitingen afkomstig en spoelt het in als afstromend regenwater in het riool terecht komt. Ook kan zand inspoelen door lekkages van grondwater het riool in. In een systeem dat strikt huishoudelijk afvalwater inzamelt kan zand komen van spoelwater van groente, aardappelen etc komen of van spoelen van schoenen.

Overigens werd al in eerder onderzoek vastgesteld dat de schuifspanning voornamelijk bepaald wordt door het verhang in een leiding en minder door de diameter van de leiding (Luijtelaar and Koot 1982).

2.3.3 Bodemverhang en vullingsgraad

Het bodemverhang bepaalt in principe het afstroomregime van een leiding en de schuifspanning aan de bodem. Het bodemverhang is in principe de drijvende kracht achter de stroming in het riool. De relatie tussen schuifspanning en hydraulisch verhang wordt gegeven in vergelijking 1. Voor de bepaling van het bodemverhang wordt het hydraulisch verhang gelijk gesteld aan het bodemverhang.

In het begin van de streng wordt een verhang van 1:250 aangeraden. Bij maximale flow van 30 huizen met 3 bewoners per huis betekent dit een flow van 1350 l/h. De snelheid kan dan worden bepaald met formule 3:

$$v = \sqrt{\frac{2gRi}{\lambda}} \quad [3]$$

In riolen met een relatief grote DWA-stroom kan een flauwer verhang worden toegepast tot aan 1:1000. De vullingsgraad voor de ontwerpgrondslag is 50%, hetgeen ook een invloed heeft op de stroming in de leiding.

Overigens wordt het "relatief grote DWA-stroom" niet nader gekwantificeerd.

2.4 Operationele aspecten

In de leidraad worden een aantal pragmatische randvoorwaarden aangegeven die voor een belangrijke mate de dimensionering van de riolering bepalen. De belangrijkste is de minimale diameter van 250 mm wordt geadviseerd (zonder overigens aan te geven of dit de binnen- of de buitendiameter is). Deze minimale diameter wordt gehanteerd om reinigings- en inspectiemogelijkheden te hebben. In de module B2100 is een discrepantie te zien tussen de tekst van 3.2.2 en de samenvattende tabel in bijlage 1. In de samenvattende tabel wordt als minimale diameter voor een DWA riool ook 200 mm genoemd, terwijl in de tekst een minimale diameter van 250 mm staat aangegeven.

Deze minimale maat wordt ook bij gemengde en regenwaterriolen gehanteerd. Hierdoor is er in de beginstrengen van riolering geen verschil in dimensionering tussen de verschillende soorten riolen.

Voor wat betreft de snelheid in de leiding wordt een maximum geadviseerd van 1,5 m/s. Deze snelheden kunnen realistisch zijn bij zeer grote verhangen of hellende gebieden. De achtergrond van deze restrictie is niet helemaal duidelijk, mogelijk dat door de hoge snelheid een venturi-achtige zuiging kan ontstaan in de huisaansluiting. Bij het ontwerp van volledig gevulde leidingen onder druk wordt vaak een maximum van 1,5 m/s geadviseerd om het gevaar voor waterslag te reduceren. Voor een niet volledig gevulde leiding is dat niet relevant.

De maximale diepte van een riool (BOB: Binnen Onderkant Buis) wordt op 3 à 4 meter gesteld en de maximale lengte van een streng tussen twee putten op 100 meter. De strengen zijn rechte stukken leiding, in de putten worden bochten gemaakt in de lengte richting van het leidingprofiel.

2.4.1 Be- en ontluchting

Omdat een rioolstelsel gevuld is met water én lucht, moet er naast aandacht voor het vullen en leeglopen met water ook aandacht zijn voor de be- en ontluchting van het riool. Het beluchten van het riool vindt plaats als de berging in het riool afneemt: het watervolume moet vervangen worden door het lucht volume. Het ontlichten vindt plaats als de berging van water in het riool toeneemt: het luchtvolume wordt vervangen door het watervolume. Vooral in dit laatste geval is er gevaar voor stankoverlast; er komt immers lucht vrij die een tijdje heeft verbleven in het (stinkende) riool.

In Nederland worden de mogelijkheden voor het be- en ontlichten zoveel mogelijk op 'dak-niveau' uitgevoerd. Voor DWA riolen betekent dit dat in de binneninstallatie een zogenaamde ontspanningsleiding c.q. ontspanningsvoorziening wordt aangebracht. Meestal is dit een verlenging van de centrale standleiding in een huis met een doorvoering door het dak.

In andere Europese landen wordt de ont- en beluchting ook wel op straatniveau gedaan via kolken en putten. Dit kan sneller tot stankoverlast leiden, vooral in de gevallen van gemengde riolen bij het begin van regenbuien als er veel lucht uit de riolen moet worden verdreven.

In de Leidraad (paragraaf 2.4.2. van module B2600) wordt gesteld dat bij een goed ontworpen binneninstallatie de be- en ontluchting van een DWA-riool geen probleem oplevert omdat de stroom in het stelsel niet groot is en ook niet dramatisch wijzigt bij regenbuien. Hier moet wel de kanttekening worden gemaakt, dat de dimensionering van de DWA riolen over het algemeen vrij ruim is, zodat de vrije waterspiegel meestal een vrij geringe hoogte heeft.

In de huidige juridische kader (wet- en regelgeving, normen en voorschriften) is de be- en ontluchting van de regenwater afvoer geen concrete regels gegeven. Voor ontwerp en aanleg van de binnenriolering zijn er wél heldere regels, waarbij de be- en ontluchting van de buitenriolering goed is gewaarborgd. Overigens zijn de randvoorwaarden hiervoor dat de binnenriolering een maatgevende vullingsgraad hebben van 70%.

2.5 Interviews stakeholders

2.5.1 Inleiding

Om een goed beeld te krijgen van de huidige manier van ontwerpen en realiseren van rioleringsnetwerken is met een aantal praktijkdeskundigen gesproken. Hoewel niet uitputtend, is een goed beeld ontstaan van de werkwijze waarmee een DWA-riool (Droog Weer Afvoer) wordt ontworpen en uitgevoerd. Daarnaast is ook gekeken naar de binneninstallatie van rioelen. Vertegenwoordigers van de branchevereniging van installateurs (UNETO-VNI) zijn geïnterviewd en ook met een vertegenwoordiger van de branche zelf is gesproken.

In de volgende paragrafen is een korte weergave opgenomen van de verschillende gesprekken.

2.5.2 Aquario

Gesprek met Mattijs Windt en Theo Smit d.d. 13 maart 2014.

Aquario watermanagement BV (Aquario) is in 2001 opgericht door Wetterskip Fryslân en waterbedrijf Vitens om een nutsbedrijf voor het riolering beheer in Fryslân te ontwikkelen. Aquario heeft zich ontwikkeld tot een dienstverlenende, bedrijfsmatig georganiseerde uitvoeringsorganisatie in de afvalwaterketen. Het Aquario-concept heeft zich in de afgelopen jaren bewezen in de praktijk van het gemeentelijk rioleringsbeheer. Aquario wist de kosten van het operationele beheer voor gemeenten in 5 jaar tijd met 15% te verlagen en daarbij het functioneren van het bestaande rioolstelsel te verbeteren.

Op 13 maart heeft een interview plaatsgevonden met Mattijs Wendt en Theo Smit van Aquario waarbij de volgende onderwerpen aan de orde zijn geweest.

Ontwerp rioolstelsels

De dimensionering van gemengde stelsels c.q. het regenwatergedeelte van gemengde stelsels wordt voornamelijk gedimensioneerd op de afvoercapaciteit mbv bui08 of bui09 met hydraulische rekenprogramma's zoals SOBEK of INFOWORKS. Daarnaast moet er voldoende berging in het systeem zitten om 7 mm water op het aangesloten verhard oppervlak te kunnen bergen. Bij het vuil watergedeelte van gescheiden stelsels wordt de hydraulica nauwelijks in ogenschouw genomen hoewel dat wel van belang zou moeten zijn.

Er zijn weinig gekalibreerde modellen en metingen om ze te kalibreren worden maar weinig uitgevoerd.

De kennis benodigd voor het ontwerpen van rioolstelsels ligt voornamelijk bij de ir-bureaus, die gebundeld is in het Expert netwerk. De verplichte planvorming in de vorm van GRP's (Gemeentelijk Riolering Plan) vergroot de bundeling, omdat veel gemeenten hun GRP door deze bureaus laten opstellen. Hierdoor ontstaat een cirkel, waarbij de kennis in stand wordt gehouden bij de ir-bureaus en dat die niet aanwezig is bij de (kleinere) gemeenten.

Praktische en operationele aspecten

De dimensionering van de minimale diameter is 200 tot 250 mm en is voornamelijk bepaald door de wens om te inspecteren en schoon te maken.

In een vuil water riool dient een klein laagje water aanwezig te zijn om verdroging te voorkomen. Ook een te steil verhang zou om die reden in de aansluitleiding voorkomen moeten worden om droogvallen in de nacht te voorkomen. Door verdroging kan ophoping van sediment optreden, dat uiteindelijk voor verstopping kan zorgen. Er zijn geen meetgegevens bekend die laten zien of er daadwerkelijk geen droogval plaats vindt in netwerken met mogelijke gevolgen voor verstopping.

Storingen/verstoppingen in leidingen worden voornamelijk veroorzaakt door wortel ingroei. Daarnaast is vetophoping veel genoemd als fenomeen, maar er is geen duidelijke registratie of dit daadwerkelijk voor verstopping zorgt.

Storingen in het geval van 'water op straat' wordt slechts in 6% van de gevallen veroorzaakt door te krap ontwerp; 96% is te wijten aan verstopte kolken en kolkleidingen ten gevolge van slecht onderhoud en is dus heel plaatselijk (Veldhuis 2010).

In de Leidraad Riolering wordt aangegeven dat bochten niet in strengen worden toegelaten, omdat deze aanleiding zouden kunnen zijn voor verstopping. Gegevens over daadwerkelijke verstoppingen bij bochten zijn niet bekend. (hier zit ook een cirkelredenering in: omdat we geen bochten toepassen treden er geen verstoppingen omdat en daarom passen we geen bochten toe).

2.5.3 Waternet

Gesproken met Saskia Holthuijsen en Kees van der Drift op 19 mei en 12 juni

Waternet maakt de ontwerpen van de riolering in eigen beheer en ook het maken van een GRP wordt door Waternet zelf gedaan. De afhankelijkheid van ir-bureaus is daardoor minimaal. Binnen Waternet is veel ervaring opgebouwd, hetgeen ook is vastgelegd in een notitie "Handboek Stedelijk Afvalwater".

Ontwerp rioolstelsels.

Het ontwerp van een vuil water riool vindt in principe plaats volgens de Leidraad Riolering. Lokale aanpassingen daarop worden toegepast op basis van ervaring en inzicht van de ontwerper. Min of meer specifiek is een zogenaamde laagste leiding in het stelsel vlak voor het gemaal om schakelberging te creëren. Doel is dat het gemaal een 'overzichtelijk aantal malen' per uur aanslaat en 'pendelen' wordt voorkomen. De Leidraad Riolering dient als basis, verder ingevuld in de ontwerpspecificaties in Amsterdam. Er is relatief veel vrijheid om in specifieke gevallen naar inzicht te handelen.

Praktische en operationele aspecten

Een specifiek punt in het ontwerp van riolen in Amsterdam is het gebruik van zogenaamde "Spinnenkop", waarbij een huisaansluiting direct op een put wordt aangesloten. Dit heeft als voordeel dat de aansluiting eenvoudig kan worden schoongemaakt in geval van verstopping. Daarnaast geeft het schoonmaken van de strengen een minimale overlast voor de aansluitingen. De hoge druk die eventueel wordt toegepast in de strengen of de grote luchtverplaatsingen hebben door deze constructie geen effect op de aansluiting. Het betekent ook dat de

afstand tussen putten beperkt is tot 40 meter, zodat de huisaansluiting niet langer wordt dan 20 meter.

In een DWA riool wordt ook rekening gehouden met een zekere berging. Bij blokkade of breuk van een streng is er in het bovenstroomse gedeelte door de grotere leidingdiameter een zekere berging beschikbaar. Ook bij de uitval van een gemaal kan de leiding, naast de gemaalkelder, als berging fungeren. 1 meter leiding met een binnendiameter van 300 mm geeft 70 liter berging; een 100 mm leiding geeft 7,8 liter berging.

Vanwege de relatief slappe grond in Amsterdam wordt bij het ontwerp al rekening gehouden met een zeker zetting van het riool. In een wijk is een structuur van een onderheid hoofdriool waarop de niet onderheide inzamelingsriolen op lozen. Het onderheid riool vervoert het water naar het gemaal in de wijk. Bij aanleg wordt de BOB van het einde van het niet onderheide riool ongeveer 50 tot 75 cm boven het BOB van het hoofdriool gelegd, zodat gedurende de levensduur van het riool, 40 tot 50 jaar het riool met 1 tot 2 cm per jaar kan zetten.

2.5.4 Gemeente Alphen aan de Rijn

Gesproken met Ko van Graas op 20 mei 2014

Gemeente Alphen aan de Rijn is een 100.000+ gemeente na een aantal fusies. Dat betekent dat er nu een afstemming plaatsvindt tussen de verschillende oorspronkelijke gemeenten om het beleid verder aan te passen. In de kern Alphen zijn er drie gemalen van het Waterschap die het water afvoeren naar twee zuiveringslocaties. Deze gemalen vallen onder de verantwoordelijkheid van het waterschap. Binnen de gemeente zijn een aantal gemalen die door de gemeente worden geëxploiteerd.

Ontwerp rioolstelsels

Doelstellingen van het ontwerp zijn de Volksgezondheid en het voorkomen van wateroverlast. Alphen heeft een slappe ondergrond, waardoor verzakkingen frequent optreden. Dit geeft problemen met verbindingen en een relatief korte levensduur van de riolering. De leidingen komen in relatief korte tijd diep te liggen door ophogingen in het straatprofiel.

Er is een conceptlijst met ontwerpcriteria, die nauwgezet de Leidraad volgt. Een kleine afwijking is in de maximale strenglengte die op 75 meter wordt gesteld. Het materiaalgebruik voor de kleinere leidingen (<500 mm) zijn exclusief van PVC. Grotere diameters van beton. Minimale diameter is 250 mm i.v.m. inspectie en schoonmaken.

Pilot

Eventueel is er belangstelling om meer van het initiatief te horen, bijvoorbeeld door een toelichting in een technisch overleg. Bij voldoende enthousiasme is wellicht ook een pilot te overwegen.

2.5.5 Gemeente Soest

Gesproken met Frank Roskamp op 5 juni 2014.

De aanleiding om met Frank Roskamp van de gemeente Soest te spreken was het vermoeden dat in Soest kleinere diameters waren toegepast in rioolleidingen. Bij nadere analyse bleek dit niet tot nauwelijks het geval te zijn. Er zijn lokaal wel kleinere diameters toegepast (160 mm), maar dat bleek voornamelijk in korte strengen van regenwaterriolen te zijn. De achtergrond daarvan kan niet meer worden vastgesteld. Er is geen actief beleid meer om

kleinere diameters toe te passen. Het is ook bij Frank niet bekend of de leidingen planmatig zijn vervangen. Wel dat bij inspectie speciaal rekening moet worden gehouden met de kleinere diameters. Camera's zijn wel beschikbaar, maar omdat ze maar weinig nodig zijn, verdient het altijd speciale aandacht. Hier blijkt de cirkelredenering van de minimale diameter en het inspecteren weer te gelden.

Ontwerp rioolstelsels

Ook in Soest wordt de Leidraad gevolgd bij het ontwerp van rioolstelsels hetgeen resulteert in een minimale diameter van 250 mm. In een doorrekening van het regenwaterstelsel is een tijd geleden geconstateerd dat de berging in het regenwatersysteem te klein is. Daarom wordt voor regenwaterriolen een minimale diameter van 300 mm toegepast om meer berging te creëren.

Pilot mogelijkheden

Op de locatie van de voormalige vliegbasis Soesterberg is een bestemmingsplan voor de bouw van ongeveer 200 woningen. Gemeente Soest zal een pilot met een kleiner systeem toelaten als er voldoende positief oordeel is van de 'huisadviseur' (Grontmij) en Rioned.

2.5.6 Uneto-VNI

Gesproken met Erik van der Blom en Will Scheffer op 31 januari 2014

Een belangrijk punt dat wordt aangeroerd is de ontspanning van het riool (zie ook paragraaf 2.4.1). In Nederland gebeurt dat via de binneninstallatie en dat is een belangrijk punt voor de installatiebranche. In een toenemende trend om de afvoer van hemelwater te ontkoppelen, kan dit een probleem worden. De ontspanning van een gemengd riool is relatief eenvoudig geregeld door de aansluiting van een dakgoot. Hierdoor ontstaat een open verbinding met het riool op vrij hoog niveau, waardoor de totale ontspanning kan plaatsvinden. Als dit wordt losgekoppeld, dan moet de ontspanning van het DWA riool via de binneninstallatie gebeuren, die wellicht niet in orde is. Dit is een belangrijk aandachtspunt bij de ontkoppeling, omdat het aanpassen van de binneninstallatie voor een goede ontspanning vrij kostbaar kan zijn.

Binnen Uneto-VNI wordt de toepassing van het SIMDEUM model voor de belasting van de rioering als een belangrijke ontwikkeling gezien om meer inzicht te krijgen in het functioneren van het riool en de interactie met de binneninstallatie. In Europa vindt op verschillende plaatsen onderzoek plaats naar de stromingspatronen in de binneninstallatie.

Ook in de binneninstallatie is sprake van een zekere overdimensionering die vooral gebaseerd is op aannames en ervaring. In Nederland kan spanning gaan ontstaan tussen de bouwvoorschriften voor bijvoorbeeld de hoogte van de verdiepingsvloeren. Doordat deze beperkt is tot ongeveer 20 cm is er voor een afvoerbuis van 110 mm slechts een gering verhang mogelijk. De maat van 110 voor de afvoer van badkamers of toiletten is echter groter dan voorgeschreven wordt. Als de voorgeschreven maat van 90 mm wordt aangehouden kan ongeveer 20% meer verhang worden gebruikt.

Voor de ontwikkeling naar lagere spoelvolumes van toiletten is nauwelijks hydraulisch onderzoek gedaan, terwijl bijvoorbeeld de maat van 4 liter spoelvolume nu onderdeel uitmaakt van het zogenaamde BREEAM concept. Toepassen van het 4 liter reservoir levert 'eco-punten' op, zonder dat duidelijk is welke gevolgen dit heeft. Uneto-VNI maakt zich hier wel zorgen over en zou onderzoek hiernaar toejuichen.

2.5.7 Geberit

Gesproken met Jeroen Bosman op 24 februari 2014.

Geberit is een belangrijke ontwikkelaar en producent van rioleringsinstallaties en sanitaire installaties. Geberit heeft de beschikking over een testinstallatie waarin op velerlei manieren duidelijk kan worden gemaakt welke hydraulische verschijnselen zich voordoen in een leiding. Een aantal opmerkelijke zaken kunnen worden geobserveerd, vooral die welke betrekking hebben op moeilijkheden met de be- en ontluuchting van de leidingen en de gevolgen die dit heeft of het gedrag van de aangesloten toestellen.

Pilot

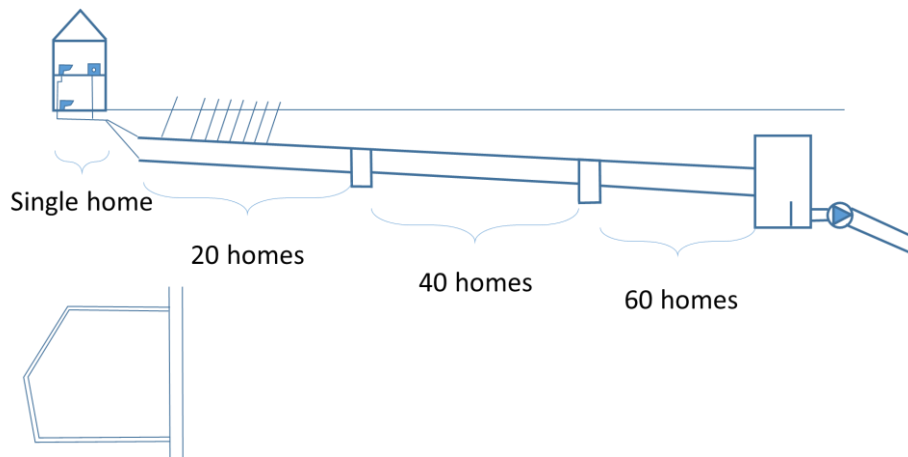
De testinstallatie van Geberit maakt hydraulische verschijnselen in het leidingnet zeer inzichtelijk. Deze testinstallatie kan goed gebruikt worden om de theoretische lozingspatronen van individuele aansluitingen, zoals die gemaakt kunnen worden met SIMDEUM, te verifiëren en eventueel te calibreren.

2.6 Samenvatting huidige ontwerpregels

Zoals uit alle interviews blijkt wordt de Leidraad Riolering door alle stakeholders gevolgd. Dit resulteert in de praktijk dat als minimale diameter voor het inzamelingsriool van een gescheiden stelsel 250-300 mm wordt aangehouden onder een verhang van 1:250 tot 1:500 à 1:1000. In de Leidraad worden vier criteria genoemd voor het dimensioneren van een rioolleiding: hydraulische belasting, schuifspanning, bodemverhang en vullingsgraad en operationele aspecten. Deze laatste, de operationele aspecten en dan met name de mogelijkheden om het riool te inspecteren met de beschikbare inspectiecamera's, wordt als meest dominante ontwerp criterium ervaren. De inspecties vinden plaats door daarin gespecialiseerde bedrijven die voorafgaand aan de inspectie het riool schoonmaken. De apparatuur die hiervoor gebruikt wordt, kan vanaf een diameter van 250 mm worden ingezet. Voor kleinere diameters zijn aparte camera's noodzakelijk die niet veel bedrijven bezitten.

Ook in binnen installaties worden over het algemeen grotere diameters toegepast dan volgens de voorschriften mogelijk zou zijn. Voor de binnen installatie hebben hydraulische verschijnselen, zoals het vollopen van de leiding en de daarmee gepaard gaande problemen met be- en ontluuchting, de meeste invloed op het functioneren van het riool.

In Figuur 2 is een schematische tekening van het huidige rioolstelsel weergegeven:



Figuur 2 Schematische tekening van huidig vrijverval stelsel. De belasting door de huisaansluitingen wordt door het eerste huis aangegeven; de verdere aansluitingen met alleen een lijntje. Per streng, c.q. verbindingsput, zijn als voorbeeld 20 huizen aangesloten. Het aantal aansluitingen wordt bepaald door de perceelbreedte en de maximale lengte van een streng. Alle leidingen hebben de standaard diameter van 250-300 mm. In het kleine pictogram linksonder wordt symbolisch ook de vermazing van het leidingnet aangegeven, waarbij de streng als een ring op het hoofdriool is aangesloten. Dit zorgt ervoor dat eventuele blokkades niet meteen voor een afsluiting zorgen

3 Beschouwing huidige dimensionering

3.1 Ontwikkeling taak riolering

Van oudsher is de inzameling en het transport van regen- en afvalwater een gemeentelijke taak en behoort tot de openbare nutsvoorzieningen. Deze nutsvoorzieningen, ook wel 'Urban services' genoemd, behelzen ook de drinkwatervoorziening, de energievoorziening en de inzameling van vast afval. Al deze diensten worden min of meer bindend aangeboden aan de bewoners van stedelijke gebieden en hebben een wettelijke verankering. De inzameling van vast afval en de inzameling van afvalwater (waaronder ook regenwater) is van oudsher onder de gemeentelijke verantwoordelijkheid gebleven en worden gefinancierd vanuit gemeentelijke heffingen en belastingen. Andere urbane services hebben in de loop van de tijd andere organisatie- en financieringsvormen gekregen. De infrastructuur die voor de verschillende services nodig is, is echter altijd onder de overheidsverantwoordelijkheid gebleven.

In Nederland, en in vele andere landen, zijn de belangrijkste drijfveren voor de inzameling van regen- en afvalwater een mix van 'droge voeten' en 'hygiëne' geweest. Voor deze mix is de meest eenvoudige oplossing een enkelvoudig systeem waarmee zowel het regen- als het afvalwater kan worden ingezameld en getransporteerd. Zeker als de lozing daarvan ongezuiverd kan plaatsvinden is dat een goede oplossing. Vanaf het begin van de openbare riolering is dit een valide oplossing geweest.

Pas vanaf het tijdstip dat directe lozing van de gemengde waterstroom op oppervlaktewater niet meer aanvaardbaar was en zuivering noodzakelijk was om de belasting van het oppervlakte water te verminderen, is de oplossing van een gescheiden stelsel meer gangbaar geworden. In de overgangsfase wordt het verbeterd gescheiden stelsel toegepast.

Vanwege ook de typisch Nederlandse situatie van vlakke gebieden met weinig verhang, is de functie van het regenwaterriool in eerste instantie het bergen van het water en pas in tweede instantie het transport naar en de lozing op het oppervlaktewater. De transport capaciteit van het riool wordt daardoor ook grotendeels bepaald door de capaciteit van de gemalen en pompen die het water transporteren nadat het in vrij verval riolen is verzameld. Vanwege deze eis voor berging is de diameter van het (regenwater) riool een belangrijke dimensioneringsgrondslag geweest.

Er is een trend gaande waarin het streven is om regenwater niet meer direct af te voeren naar het oppervlaktewater via het rioleringssysteem, maar om een zekere berging te creëren van waaruit vertraagd kan worden afgevoerd of worden geïnfiltreerd in de ondergrond. De situatie in Nederland kan worden gekenmerkt als de overgangsfase van een gemengd stelsel naar een gescheiden stelsel met als tussenstap het verbeterd gemengd stelsel. Gezien de levensduur van de riolering zelf, maar ook van de bebouwing die wordt bediend, is deze overgangsfase zeer lang. In bepaalde gebieden zal het ook min of meer onmogelijk zijn om het stelsel geheel te veranderen zonder rigoureuze ingrijpen in de bebouwing.

3.2 Dimensionering gescheiden riool

In de praktijk komt het erop neer dat er geen verschil is in dimensionering van een inzamelingsriool van een gescheiden of een gemengd stelsel. Beide kennen als minimale diameter

een maat van 250-300 mm en een verhang van 1:250 tot 1:1000. De schuifspanningsberekening die wordt aangeraden voor het gedeelte dat dichter bij het gemaal ligt, is vooral gericht op het verwijderen van zwaar sediment zoals zand.

In tabel B1.6 van de leidraad wordt aangegeven dat het aantal inwonerequivalenten (i.e.) minimaal 100 moet zijn om een voldoende efficiënte stroming te verkrijgen (met een schuifspanning groter dan 1.0 N/m^2 in een leiding met een diameter van 250 mm.) Dit betekent dat de leiding in het begin van de streng sowieso te groot zal zijn, zelfs bij een verhang van 1:100 (0,010). Bij een verhang van 1:200 (0,005) moeten al 300 i.e. zijn aangesloten om de gewenste schuifspanning te verkrijgen.

Hieruit volgt dat in een DWA riool, dat wordt gedimensioneerd op de minimale diameter van 250 mm., sediment zal ophopen volgens deze benadering. Dat geeft aan dat schoonmaken wellicht noodzakelijk is. Er zijn over het algemeen echter geen systematische gegevens bekend over de opbouw van sediment in de leidingen.

3.3 Schoonmaken en inspecteren

De mogelijkheid tot schoonmaken en inspecteren is de belangrijkste reden waarom een riool een minimale diameter van 250 mm moet hebben. In veel gemeenten wordt een schoonmaak en inspectiefrequentie aangehouden van eens per 7 tot 10 jaar. Ook in de Leidraad staat een inspectiefrequentie van rond de tien jaar. Het schoonmaken van het riool vindt plaats voorafgaand aan het inspecteren. Er worden over het algemeen geen gegevens bijgehouden over de effecten van het schoonmaken zelf of de hoeveelheid sediment die wordt verwijderd. Blokkades als gevolg van ophopingen van sediment zijn zeldzaam en worden niet systematisch geregistreerd.

Vetophoping wordt als een belangrijke oorzaak van verstopping c.q. ophoping genoemd. Bekend zijn vetkragen die in gemaalkeders worden aangetroffen en vrij snel kunnen aangroeien. Ook worden in riolen zelf ook vetophopingen aangetroffen die keihard kunnen zijn. Er is echter geen systematische kennis beschikbaar over hoe en onder welke omstandigheden vet in het riool wordt aangetroffen. Het gedrag van vet in de rioolflow is in detail niet bekend.

In de huidige praktijk schuilt het gevaar van een cirkelredenering: de diameter is 250 mm om schoonmaken en inspectie mogelijk te maken, maar door de grote diameter zal sediment ophopen en is schoonmaken noodzakelijk.

3.4 Praktische aspecten

Een andere reden om voor grote diameters te kiezen is de aanwezigheid c.q. het gevaar voor mogelijk rioolvreemd water. Dit is water dat in het DWA-riool terecht komt door bijvoorbeeld misaansluitingen of in-lekkend grondwater. Uit een inventarisatie van STOWA blijkt dat 25% rioolvreemd water ten opzichte van de DWA geen uitzonderlijke situatie is. Het sediment dat met dit water meekomt heeft vaak een zandig karakter. Het sediment dat typisch in huishoudelijk afvalwater is opgenomen, betreft voor het grootste gedeelte organisch materiaal waarvan de dichtheid dicht bij water ligt. Uit de beschouwing over de benodigde schuifspanning in een riool (zie paragraaf 2.3.2) blijkt dat het zandige sediment de maatgevende spanning bepaalt.

In drinkwater blijkt de kritische opwerfingssnelheid ongeveer $0,3 \text{ m/s}$ te zijn in een leiding met een diameter van 100 mm. De schuifspanning die daarmee gemoeid gaat is 1 N/m^2 . (zie pag 75 en gewone sheer stress formule). Het materiaal dat in een waterleiding wordt opgewerfeld heeft ook een dichtheid die dicht bij 1 ligt. De waarde van 1 N/m^2 lijkt dus een

goede aanname voor opwerveling voor sediment met een relatief geringe dichtheid. Tevens kan dus het snelheids criterium dat werkt bij waterleidingen wellicht worden gebruikt bij de dimensionering van rioolleidingen, mits alleen rekening wordt gehouden met relatief licht (organisch) sediment.

Uit de dominantie van het zandige materiaal in de bepaling van de minimale schuifspanning, blijkt dat het rioolvreemde water min of meer als een onvermijdbare complicatie wordt gezien.

3.5 Volksgezondheid

De oorspronkelijke en zeer belangrijke doelstelling van de riolering is gelegen in het verbeteren van de volksgezondheid. Tegelijkertijd met het uitbreiden van het drinkwaternet is ook het rioleringsnetwerk aangelegd en beide ontwikkelingen hebben een onschatbare bijdrage geleverd aan het bevorderen van de volksgezondheid. Toch lijkt dit aspect in de huidige beschouwing van de riolering minder expliciet naar voren te worden gebracht.

Vanuit het oogpunt van volksgezondheid is een strikt gescheiden rioleringsstelsel de beste optie. In combinatie met het principe dat in Nederland wordt gehanteerd ten aanzien van de ontspanning van het riool, namelijk via de binneninstallatie, zou in principe het huishoudelijk afvalwater in een gesloten systeem worden afgevoerd. De handhaving van het systeem is echter geen expliciete doelstelling van de beheerder van het riool. Als mede-argument voor de ruime dimensionering wordt regelmatig genoemd dat hierdoor ook de gevolgen van misaansluitingen kunnen worden opgevangen. Of in andere woorden: een misaansluiting of het verkeerd gebruik van het riool wordt niet direct geconstateerd omdat de redundantie in het systeem zo groot is dat de gevolgen niet direct opvallen. Een cirkelredenering is hier ook mogelijk.

3.6 Functionaliteit van het riool

De service die met het riool wordt geleverd kan worden gekarakteriseerd als een 'negatieve service'. Het falen of uitvallen van de service wordt opgemerkt, maar het functioneren van de service is zo vanzelfsprekend dat het niet meer wordt opgemerkt. Dit is tevens een achtergrond voor de perceptie van robuuste dimensionering van het riool en de zorg over het verstopten c.q. disfunctioneren. Een veel gehoord argument is dat het op deze manier goed werkt en dat er geen reden is om het anders te doen. "Ik word er niet zenuwachtig van als er teveel water door het DWA-riool gaat." Hiermee wordt ook duidelijk dat de verschillende stakeholders (huishoudens, gemeente en waterschappen) niet dezelfde belangen hebben bij de inzameling van rioolwater.

3.7 Ontwikkeling

De dimensionering van het DWA-riool wordt vooral gedomineerd door de mogelijkheid tot inspectie en schoonmaak en niet door de hydraulische randvoorwaarden (zie ook par 2.6). In historisch en functioneel perspectief is dit logisch, maar weerhoudt een verdere ontwikkeling van de inzamelingsfunctie van huishoudelijk afvalwater. Doorbreken van de status quo kan door aan te tonen dat het betrekken en optimaliseren van de overige ontwerpcriteria als schuifspanning, hydraulische belasting en bodemverhang leidt tot een riolering die functioneel net zo goed of beter is en tevens een stuk goedkoper.

4 Een nieuwe benadering voor riolering voor huishoudelijk afvalwater

4.1 Inleiding en opzet onderzoek.

Zoals in het vorige hoofdstuk is geconstateerd, is in de dimensionering van het vuil water riool het operationele aspect van inspectie en schoonmaken erg belangrijk. Daarnaast is traditie c.q. gewoonte bepalend, terwijl de hydraulische aspecten minder aandacht krijgen. In dit hoofdstuk wordt getracht de hydraulische aspecten nader te beschouwen en te bezien welk effect dat kan hebben op de dimensionering van de leidingen en op de operationele aspecten, met name op het gevaar voor verstopping. De verwachting is dat een dergelijk nieuw systeem kleiner kan zijn dan het traditionele systeem.

Het onderzoek zal zich in eerste instantie richten op de hydraulische aspecten van de riolering, zonder rekening te houden met de mogelijke belasting met stoffen of objecten. De focus van het onderzoek is gericht op de rioolleidingen 'in de straat'. Dit zijn de inzamelingsleidingen in de gewone woonwijken, waar de vuilwater belasting voornamelijk bestaat uit het huishoudelijk afvalwater. Aandacht is er vooral aan het goed inschatten van de hydraulische belasting die het huishoudelijk afvalwater oplevert. De kwantiteit en kwaliteit van deze stroom wordt nagenoeg geheel bepaald door het gebruik van drinkwater. Kennis over dit gebruik is een belangrijk onderdeel van het bepalen van de hydraulische belasting van het inzamelingsriool. In dit hoofdstuk (hoofdstuk 4) wordt dit beschreven.

Hoofdstuk 6 geeft een beschrijving van de experimentele verificatie c.q. demonstratie van de hydraulische aspecten. Daarnaast is in hoofdstuk 7 een berekening uitgevoerd waarin de hydraulische belasting, volgend uit het drinkwaterverbruik, ingevoerd in een bestaand model van een rioleringssysteem op wijkniveau. Deze berekening is ook herhaald met de dimensionering van de diameters volgens de nieuwe benadering. Er is geen verdere optimalisatie uitgevoerd; deze berekening wordt uitgevoerd om de hydraulische haalbaarheid van de nieuwe dimensionering te testen.

Naast de hydraulische prestatie is de capaciteit om materiaal te transporteren en het voorkomen van blokkades een prestatie criterium voor een goed werkende riolering. Dit aspect wordt eerst in een literatuurstudie nader beschouwd (hfd 5). Vervolgens is er een onderzoek uitgevoerd naar het transporteren van objecten in de eerder genoemde proefinstallatie (paragraaf 6.3).

4.2 Rationale nieuwe benadering

Zoals in hoofdstuk 1 is verwoord, zal het terugwinnen en hergebruiken van grondstoffen uit de afvalwaterketen een volwaardig ontwerpcriterium moeten worden voor het verzamelen en transporteren van afvalwater. Een lange termijn visie laat zien dat rond 2050 er een grote mate van scheiding zou moeten zijn gerealiseerd (80-100%) tussen hemelwater en vuilwatersysteem (Worst, Clemens et al. 2012). De meest gevolgde werkwijze om dit te bereiken is het afkoppelen van hemelwater van het systeem. Daardoor neemt de belasting van het huidige gemengde systeem af en zal voldaan kunnen worden aan richtlijnen voor overstortfrequenties zonder ingrijpende veranderingen aan het bestaande stelsel. Vervanging van riolen zal geen aanleiding zijn tot herdimensioneren, omdat de extra belasting door klimaatverandering gecompenseerd wordt door de afkoppelingsmaatregelen.

Een perspectief van het kleinere systeem kan bieden is dat niet het hemelwater, maar het afvalwater wordt afgekoppeld van het bestaande systeem. Het afvalwater wordt ondergebracht in het nieuwe en veel kleinere systeem. Het 'oude' systeem is dan een afvoersysteem waarin alleen het relatief schone hemelwater en eventueel grondwater kan worden getransporteerd. Overstortingen vanuit dit systeem hebben een veel kleinere impact op het ontvangende water dan de huidige vanuit het gemengde stelsel.

Vooraf in de centra van verstedelijkte gebieden zal het traditionele afkoppelen van hemelwater moeilijk zijn. Een kleiner systeem dat wellicht ook eenvoudiger in de bestaande (ondergrondse) infrastructuur is in te bedden, kan gefaseerd worden aangelegd en aangesloten. Een bijkomend voordeel is dat het bestaande gemengde systeem gebruikt kan blijven worden voor de opvang en afvoer van regenwater. Sleufloze renovatie van deze systemen is dan een goede optie omdat de dimensies van het hemelwaterriool niet behoeven te worden aangepast. De effecten van klimaatverandering kunnen worden opgevangen met behulp van de traditionele afkoppeling van hemelwater waardoor ook eerdere investeringen hierin blijven renderen.

4.3 Aandachtspunten

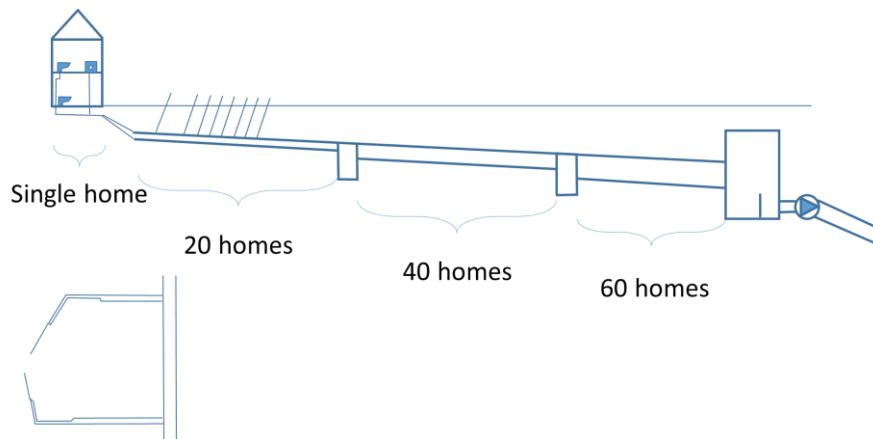
Een belangrijk aandachtspunt is dat het riool nu goed functioneert (Rioned 2014): "Never change a winning team". Voor de eigenaar/beheerder van het systeem, de gemeente geldt dat de primaire functie, het afvoeren van het huishoudelijk afvalwater naar de gemalen van het waterschap, goed wordt vervuld. Het gemiddelde faalpercentage is ongelooflijk laag en het aantal overstorten voldoet aan de daarvoor gestelde normen.

Het riool functioneert echter als een black box: "goed functioneren" is gebaseerd op het uitblijven van storingen. Een nieuw concept zal dus minimaal aan de verwachting van het uitblijven van storingen moeten voldoen.

Een belangrijke bedreiging voor het goed functioneren van het riool is verstopping. Daarom is de mogelijkheid tot inspectie en schoonmaken een cruciaal ontwerpgegeven. Andere ontwerpcriteria die meer focussen op het hydraulisch functioneren van het vuil water riool, zoals hydraulische belasting, schuifspanning, bodemverhang en vullingsgraad, komen hierdoor minder aan bod. Het gevolg is dat relatief grote riolen aangelegd worden die onderhouden worden door regelmatige inspectie en daaraan voorafgaand het schoonmaken. Het doel van de nieuwe benadering voor de riolering van huishoudelijk afvalwater, meer gericht op hydraulica dan op inspectie, is om ook op die kosten te besparen. Zowel op de aanleg (capex: investeringen, CAPital EXpenditures) als in het onderhoud (opex: onderhoudskosten: OPerational EXpenditures). Lopend onderzoek in het kader van het programma van 'Urban Drainage' van de TU Delft voorziet ook in onderzoeken naar de effectiviteit en noodzaak van het schoonmaken en inspecteren van riolen.

4.4 Een nieuw concept

Het nieuwe concept voor de riolen voor afvoer van het huishoudelijk afvalwater moet een leidingstelsel opleveren waarin met alle eerdergenoemde ontwerpcriteria rekening wordt gehouden. De hydraulische belasting in relatie tot de diameter zal hoger zijn dan in het huidige stelsel, hetgeen zal leiden tot een hogere vullingsgraad. Een principeplaatje van een 'nieuw' c.q. meer op de hydraulica toegesneden riool is weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3 'Nieuw' systeem voor inzameling van huishoudelijk afvalwater. De belasting door de huisaansluitingen wordt door het eerste huis aangegeven; de verdere aansluitingen met alleen een lijntje. Per streng, c.q. verbindingsput, zijn als voorbeeld 20 huizen aangesloten. Het aantal aansluitingen wordt bepaald door de perceelbreedte en de maximale lengte van een streng. De leidingen hebben een diameter en verhang variërend van 100 tot 160 mm. In het kleine pictogram linksonder wordt symbolisch ook de vertakking van het leidingnet aangegeven, waarbij iedere streng als een enkele leiding op het hoofdriool is aangesloten. Het hoofdriool is in een vermaasde structuur opgenomen.

Het nieuwe systeem is geïnspireerd op een gelijksoortige benadering van het drinkwaterleidingnet (Vreeburg, Blokker et al. 2009). De analogie is dat ook in het conventionele drinkwatersysteem de hydraulische aspecten een ondergeschikte rol waren gaan spelen in de loop van de decennia. Ook dit leidde tot een relatief overgedimensioneerd en vermaasd systeem dat ogenschijnlijk goed functioneerde. Een ander analoog aspect is dat er een extra criterium voor ontwerp moest worden toegevoegd, namelijk waterkwaliteit. Dit stelde expliciet eisen aan de hydraulica (snelheid en verblijftijd) en leidde uiteindelijk tot een nieuwe benadering.

Als de hydraulische randvoorwaarden dominantier worden in het ontwerp, zullen de leidingen kleiner zijn, waardoor in dezelfde ruimte grotere verhangen kunnen worden toegelaten die kunnen resulteren in hogere snelheden en kortere verblijftijden. Tevens zal de vullingsgraad van de leidingen hoger zijn en zal mogelijk de leiding geheel gevuld raken.

De ontwerpgrondslag voor de hydraulische belasting van het stelsel zal gebaseerd zijn op een model van de werkelijke belasting afgeleid van een model van de drinkwatervraag. In tijdstappen van vijf minuten kan de volumestroom rioolwater dan gemodelleerd worden.

Kritieke situaties ontstaan als de leidingen nagenoeg gevuld zullen zijn. De effecten daarvan zijn tweeledig. Ten eerste zal er stuwung ontstaan in de putten, waardoor het gevaar van overstrooming op straatniveau groter wordt. Omdat het uitsluitend rioolwater betreft is dit een zeer ongewenste situatie die direct opgelost dient te worden. De putten dienen daarnaast zodanig te zijn geconstrueerd dat instroming van regenwater niet mogelijk is. Door deze waterdichtheid en daardoor ook luchtdichtheid kan zich in de put druk opbouwen en kan de stuwung zich uitbreiden naar de aansluitleidingen.

Naast de stuwung kan in de huisaansluitingen een onderdruk ontstaan die nadelige gevolgen kan hebben in de binneninstallatie als het leegzuigen van sifons of borrelende geluiden in aansluitingen van apparaten. In theorie kan de negatieve druk tot 80-100 KPa oplopen.

In Nederland is de ontspanning van het riool via de huisaansluiting geregeld. In juridische termen is dit een grijs gebied, maar de werkroutine is erop gericht om voldoende ontspanning te leveren via de standpijp die door het dak gevoerd wordt.

Het testen van het nieuwe concept bestaat uit twee onderdelen: Allereerst een modelmatige benadering om op theoretische gronden de capaciteit van een nieuw systeem te bepalen gevolgd door een experimentele verificatie van de berekeningen. Voor de verificatiefase zal een proefleiding worden gebouwd waarin de hydraulische verschijnselen worden bestudeerd en bovendien nog een aantal additionele verschijnselen zoals het inbrengen objecten om de transportverschijnselen te bestuderen.

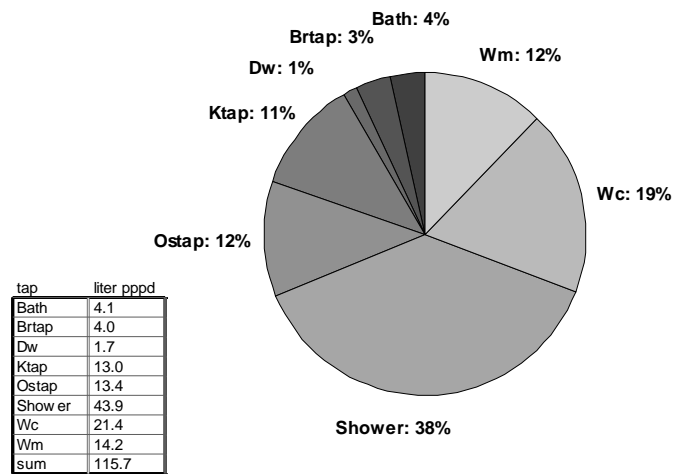
In de rest van dit hoofdstuk zal de modellering verder worden besproken, de experimentele verificatie wordt in een apart rapport beschreven.

4.5 Modelling hydraulische belasting

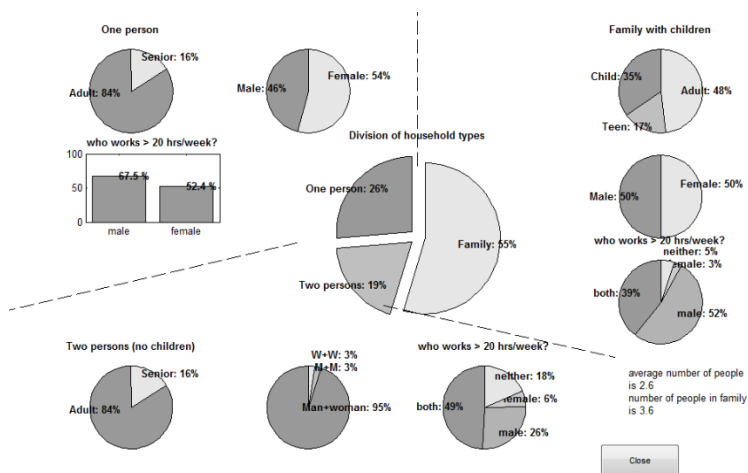
4.5.1 Uitgangspunten

Veel van het drinkwaterverbruik kan worden vertaald naar de productie van afvalwater. Door de toepassing van het drinkwater i.c. het eindverbruik te kennen, is het mogelijk om het drinkwatersignaal om te zetten in een afvalwatersignaal. Een volledige beschrijving van SimSem is gegeven in Bijlage I.

Voor een eerste gedachtebepaling zijn een aantal drinkwaterpatronen gegenereerd met behulp van het model SIMDEUM. Hierbij is aangenomen dat ieder huis 2,6 inwoners heeft met een zeker verbruik en statische en demografische verdeling (zie Figuur 4 en Figuur 5). Het afvalwaterpatroon van de aansluiting is gelijk aan het drinkwaterpatroon. Er is geen rekening gehouden met de 'vervorming' van dit patroon, bijvoorbeeld de versnelling bij een toiletspoeling of de vertraging zoals die optreedt bij een wasmachine of een gecombineerd effect van het gebruik van een bad. Voor de gehanteerde tijdschaal van 5 minuten is dit ook niet echt van invloed. Dit betekent bijvoorbeeld dat een toiletspoeling als een constante stroom over drie minuten wordt gemodelleerd. In werkelijkheid zal de toiletspoeling echter in kortere tijd in het binnen riool komen, maar de uiteindelijke uitstroom via de huisaansluiting is weer over een langere tijd. Een bad vullen neemt een aantal minuten, terwijl het legen sneller gaat en op een later tijdstip. Met 5 minuten interval, zal er echter geen "groot" verschil zijn, zie Figuur 6 met tabel (de tabel wordt nog origineel opgebouwd). Het enige subtype dat langer dan 5 minuten duurt is de douche, maar die geeft nagenoeg een onvertraagd patroon omdat het waterverbruik direct tot een afvalwaterstroom leidt. Voor meerdere huizen wordt dit minder belangrijk want andere factoren zoals vertraging tussen het afvoer punt naar het riool stelsel zal ook een invloed hebben.



Figuur 4 Waterverbruik in proefgebied



Figuur 5 Demografische verdeling over proefgebied

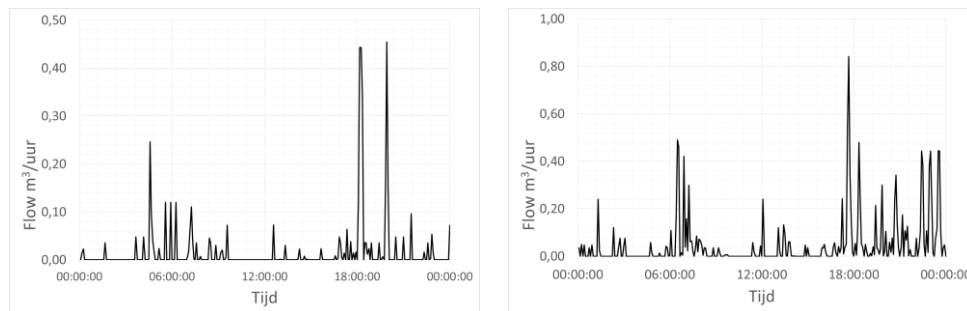
Table 2 Duration and intensity of water discharge for several types and sub types of end uses in the Netherlands, average (μ) and probability distribution function (pdf) (NEN3215, 2011; De Paepe et al., 2003; Persson, 2007).

End-use type / subtype		Duration		Intensity (L/s)	
		μ	pdf	μ	pdf
Bath tub	120 litres	2 min	N.A. (fixed)	1.0	N.A. (fixed)
Bathroom tap	Washing and shaving	40 s	Log-normal	0.042	Uniform
	Brushing teeth	15 s			
Dish washer	Brand and type	Specific dishwashing pattern (3 cycles of water discharged, total 19 seconds, 0.75 L/sec = 14 L)			
Kitchen tap	Consumption	16 s	Log-normal	0.083	Uniform
	Doing dishes	6 s		1.000	
	Washing hands	15 s		0.083	
	Other	37 s		0.083	
Outside tap	Garden	N.A. Water is not discharged to sewer			
	Other				
Shower	Normal	8.5 min	χ^2	0.142	N.A. (fixed)
	Water saving type			0.123	
Washing machine	Brand and type	Specific washing pattern (3 cycles of water discharged, total 67 seconds, 0.75 L/sec = 50 L)			
WC	6-litre cistern	3 s	N.A. (fixed)	2	N.A. (fixed)
	9-litre cistern	9 s			

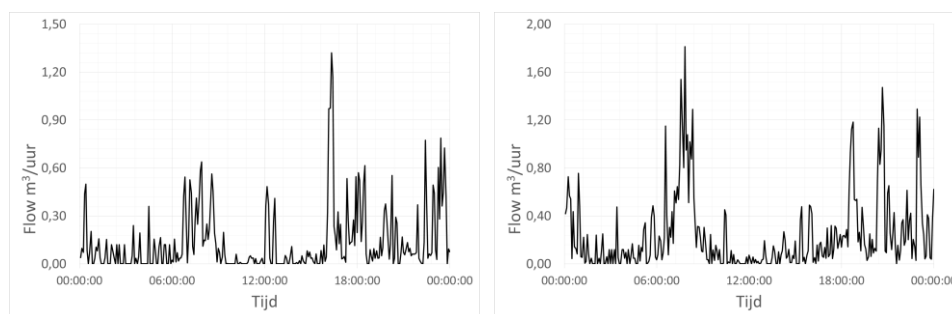
Figuur 6 Tabel met typische verbruiksduren van waterverbruik

4.5.2 Resultaten

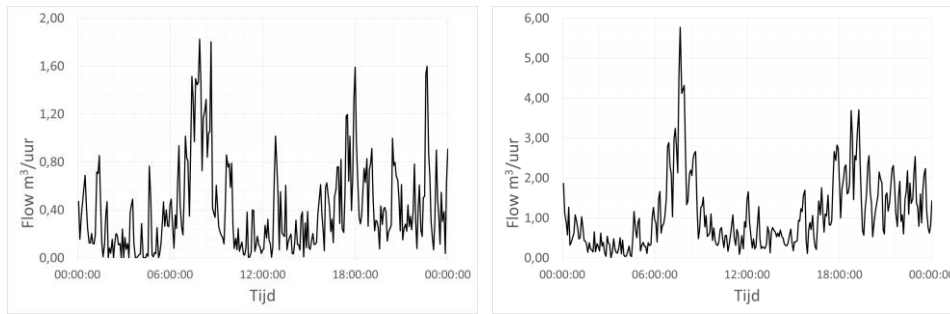
Op basis van de uitgangspunten genoemd in de vorige paragraaf zijn een aantal drinkwaterpatronen gemaakt voor verschillende hoeveelheden aansluitingen. De grafische representatie van die patronen in Figuur 7, Figuur 8 en Figuur 9.



Figuur 7 Afvoer patroon van een eengezinswoning (links) en van vijf eengezinswoningen (rechts)



Figuur 8 "Afvalwaterproductie" van 10 huizen (links) en 20 huizen (rechts)



Figuur 9 Afvoerpatroon van 40 huizen (links) en 100 huizen (rechts)

Al de patronen laten zien dat er een zekere piekbelasting is die veel groter is dan de gemiddelde of modale belasting. Bijvoorbeeld de piek bij 100 huizen (dus in totaal 260 mensen) ligt rond de 6 m³/uur, maar gedurende een korte tijd (5 minuten). Ook is te zien dat de totale piekbelasting sterk wordt afgevlakt; de maximale piek bij een enkele aansluiting is 470 l/uur, terwijl de piek bij 100 woningen 5760 l/uur is. Dit onderschrijft de aanname dat het piekverbruik ongeveer toeneemt met de wortel uit het aantal aansluitingen. In Tabel 1 zijn de minimum, maximum en gemiddelde van de afvalwater volumestromen gegeven.

Tabel 1 Minimum, maximum en gemiddelde volumestroom bij clusters van huizen met gemiddeld 2,6 i.e

		aantal aansluitingen à 2,6 i.e					
		1	5	10	20	40	100
max	[m ³ /u]	0,45	0,84	1,32	1,81	1,83	5,77
min	[m ³ /u]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
gemiddelde	[m ³ /u]	0,02	0,05	0,13	0,24	0,41	1,08

4.6 Vloeistofmechanica

Om de vloeistofstroom te beschrijven wordt een model gemaakt van een prismatische leiding die onder een zeker verhang ligt en waar een zekere volumestroom aan wordt toegevoegd. De continuïteitsvergelijking respectievelijk bewegingsvergelijking die de vloeistofbeweging in open waterlopen beschrijven zien er als volgt uit:

$$\frac{\delta Q}{\delta x} = -B(h) \frac{\delta h}{\delta t} \quad [4]$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\delta Q}{\delta x} - i_B + \frac{\delta h}{\delta x} + \frac{|Q|Q}{C^2 A^2 R} = 0 \quad [5]$$

Met

Q	:	Volumestroom [m ³ /s]
B(h)	:	Breedte van het wateroppervlak [m]
h	:	Waterdiepte [m]
g	:	Zwaartekrachtversnelling [m/s ²]
A	:	Nat oppervlak [m ²]
i _B	:	Bodemverhang [-]
C	:	Chézy coëfficiënt [s ² /m]

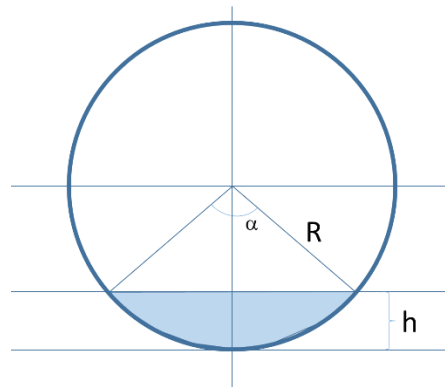
In de stationaire situatie, of als de randvoorwaarden relatief langzaam veranderen, kunnen de tijds- en plaats afhankelijke termen van de bewegingsvergelijking (vergelijking 5)4 5 gelijk aan nul worden gesteld. Dan blijft over dat het verhang gelijk is aan de wrijving in de leiding en dat de waterspiegel evenwijdig aan het bodemverhang loopt. Deze vergelijkingen blijven geldig zolang er in de leiding nog een vrije waterspiegel is. Hieruit volgt dan eenvoudig de wet van Chézy:

$$v = C\sqrt{R * i_B} \quad [6]$$

Met

R	:	Hydraulische straal [m]
C	:	Chézy Coëfficiënt [$s \cdot m^{-1/2}$]
i_B	:	Bodemverhang [-]

De hydraulische straal is de verhouding tussen het doorstroomde natte oppervlakte en de natte omtrek van het profiel. Dat is het gedeelte van de wand dat contact maakt met het water. Voor een cirkelvormig profiel wordt het natte oppervlakte bepaald door het cirkelsegment dat doorstroomd wordt en bepaald door de waterhoogte in de leiding. Deze bepaald tevens de natte perimeter.



Figuur 10 Geometrische gegevens van een cirkelvormige doorsnede

De hoek α wordt als volgt bepaald:

$$\alpha = 2 * \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) \quad [7]$$

Met:

α	:	middelpuntshoek [rad]
h	:	Waterdiepte [m]
R	:	Straal van de cirkel [m]

Het natte oppervlakte A wordt vervolgens bepaald met

$$A = \frac{1}{2}R^2(\alpha - \sin \alpha) \quad [8]$$

Met:

A	:	Oppervlakte cirkelsegment [m^2]
R	:	Straal van de cirkel [m]
α	:	middelpuntshoek [rad]

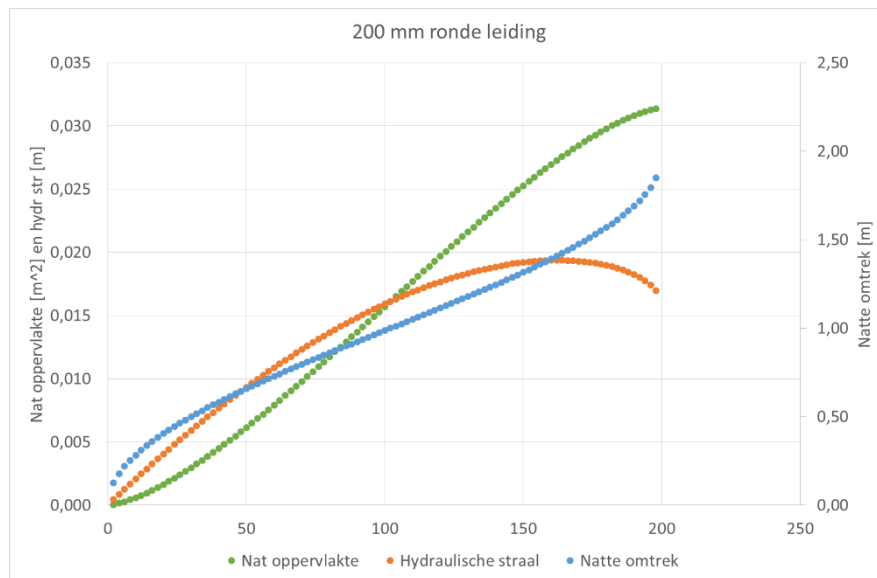
Tenslotte kan de natte perimeter bepaald worden met de middelpuntshoek en de straal van de cirkel:

$$P = R * \alpha \quad [9]$$

Met:

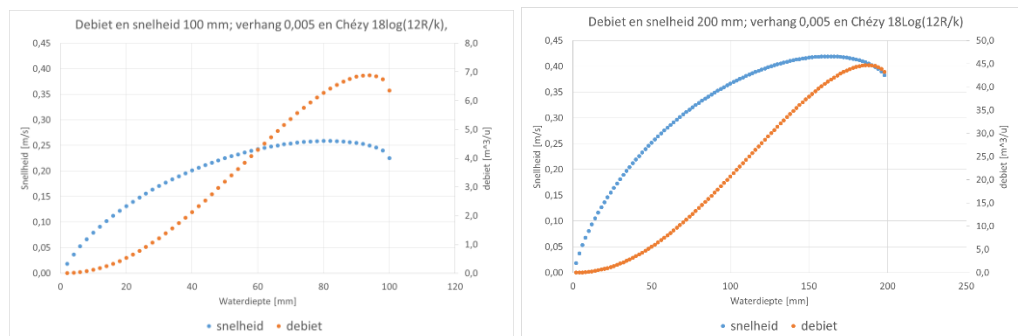
- P : Booglengte, natte perimeter [m]
 R : Straal van de cirkel [m]
 α : middelpuntshoek [rad]

Voor een 200 mm leiding zijn deze drie parameters weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11 Hydraulische karakteristieken 200 mm leiding.

Uit de formule van Chézy blijkt al dat de snelheid in de leiding voornamelijk wordt bepaald door de hellingshoek. Om dit te illustreren zijn in Figuur 12 de snelheden die optreden bij een verhang van 1:200 (0,005) en een Chézy coëfficiënt van $100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/2}$ weergegeven.



Figuur 12 Debiet en snelheid bij verhang van 1:200 en Chézy coëfficiënt van $100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/2}$ voor een 100 en een 200 mm leiding.

Bij een vullingsgraad van 70% (waterdiepte 70 mm) en een verhang van 1:200 (0,005) is de capaciteit van de 100 mm leiding ongeveer $5,4 \text{ m}^3/\text{u}$. De snelheid bedraagt dan $0,25 \text{ m/s}$. Bij

hetzelfde debiet ($5,4 \text{ m}^3/\text{u}$) in de 200 mm leiding is de snelheid hetzelfde ($0,25 \text{ m/s}$), terwijl de waterdiepte 49 mm bedraagt. De maximale volumestroom van 100 huishoudens (260 inwoners) bedraagt kortstondig $5,8 \text{ m}^3/\text{uur}$.

Uit dit voorbeeld blijkt dat de snelheid in de leiding nagenoeg volledig wordt bepaald door de hellingshoek en niet door de diameter. Dit is ook logisch gezien de eerder genoemde formule van Chézy (Vergelijking 6) en dat de invloed van de hydraulische straal R relatief gering is.

4.7 Capaciteit leidingen

Met behulp van de in de vorige paragraaf gepresenteerde formules kan per leiding de capaciteit worden bepaald bij een bepaald verhang. In de onderstaande tabellen is dit gedaan voor een reeks van volumestromen en een Chézy coëfficiënt die wordt berekend met de volgende formule:

$$C = 12 \log\left(12 \frac{R}{k}\right)$$

Waarin:

C	:	Coëfficiënt van Chézy [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]
R	:	Natte perimeter [m]
k	:	Wandruwheid [m]

Tabel 2 Snelheid en waterhoogte in een 100 mm leiding bij verschillende debieten en leidinghellingen (verhang); de grijze vlakken geven een niet realistische waarde

verhang		Diameter 100 mm							
		1:100		1:250		k-waarde 1mm 1:500		1:1000	
debiet		v	h	v	h	v	h	v	h
[m ³ /u]	[l/min]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]
1,2	20,0	0,37	17,0	0,27	21,5	0,21	25,5	0,16	30,5
2,4	40,0	0,45	24,0	0,32	30,5	0,25	37,0	0,19	45,0
3,6	60,0	0,50	29,5	0,36	38,0	0,28	46,5	0,21	57,5
4,2	70,0	0,52	32,0	0,37	41,5	0,29	51,0	0,22	64,0
5,4	90,0	0,56	37,0	0,40	48,0	0,30	60,0	0,23	78,0
6,0	100,0	0,57	39,0	0,41	51,5	0,31	64,5	0,20	100,0
6,6	110,0	0,59	41,5	0,42	54,5	0,32	69,0		
7,8	130,0	0,62	45,5	0,43	60,5	0,32	79,5		
8,4	140,0	0,63	47,5	0,44	64,0	0,29	100,0		
9,6	160,0	0,65	51,5	0,45	70,5				
10,2	170,0	0,66	53,5	0,45	74,0				
10,8	180,0	0,66	55,5	0,45	78,0				
11,4	190,0	0,67	57,5	0,46	82,5				
12,0	200,0	0,68	59,5	0,40	100,0				
12,6	210,0	0,69	61,5						
13,8	230,0	0,70	65,5						
14,4	240,0	0,70	67,5						
15,6	260,0	0,71	72,0						
16,2	270,0	0,72	74,5						
16,8	280,0	0,72	77,0						
17,4	290,0	0,72	79,5						
18,0	300,0	0,72	82,5						
18,6	310,0	0,72	86,0						
19,2	320,0	0,64	100,0						

Uit Tabel 2 blijkt dat als het vullingspercentage van 70% als maximum wordt beschouwd dat bij een verhang van 1:100 de maximale capaciteit rond 15 m³/uur kan bedragen. Als het verhang terugloopt naar 1:1000, loopt de capaciteit terug naar ongeveer 5 m³/uur. Dit is de exponentiële terugloop die volgens de formule van Chézy is te verwachten.

Tabel 3 Snelheid en waterhoogte in een 160 mm leiding bij verschillende debieten en en leidinghellingen (verhang)

verhang debiet [m ³ /u]	Diame- ter		160 mm		k- waarde		1 mm	
	1:100		1:250		1:500		1:1000	
	v	h	v	h	v	h	v	h
	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]
1,0	0,33	13,5	0,24	17,0	0,19	20,0	0,15	23,5
3,0	0,45	23,0	0,33	29,0	0,26	35,0	0,20	41,5
5,0	0,53	30,0	0,38	38,0	0,29	45,5	0,23	54,5
7,0	0,58	35,5	0,41	45,0	0,32	54,5	0,25	66,0
9,0	0,62	40,5	0,44	51,5	0,34	62,5	0,26	76,0
11,0	0,65	45,0	0,47	57,5	0,36	70,0	0,28	86,0
13,0	0,68	49,0	0,49	63,0	0,37	77,0	0,29	96,0
15,0	0,71	53,0	0,50	68,5	0,39	84,0	0,29	106,0
17,0	0,73	57,0	0,52	73,5	0,40	91,0	0,30	116,5
19,0	0,75	60,5	0,53	78,5	0,41	98,0	0,30	129,5
21,0	0,77	64,0	0,55	83,5	0,42	105,0	0,27	160,0
23,0	0,79	67,5	0,56	88,5	0,42	112,5		
25,0	0,81	70,5	0,57	93,5	0,43	120,5		
27,0	0,82	74,0	0,58	98,5	0,43	130,0		
29,0	0,84	77,0	0,58	103,5	0,42	144,0		
31,0	0,85	80,0	0,59	108,5	0,38	160,0		
33,0	0,86	83,5	0,60	114,0				
35,0	0,87	86,5	0,60	119,5				
37,0	0,89	89,5	0,60	126,0				
39,0	0,89	92,5	0,60	133,0				
41,0	0,90	95,5	0,60	143,5				
43,0	0,91	99,0	0,54	160,0				
45,0	0,92	102,0						
47,0	0,93	105,0						
49,0	0,94	108,5						
51,0	0,94	112,0						

Uit Tabel 3 blijkt dat als het vullingspercentage van 70% als maximum wordt beschouwd dat bij een verhang van 1:100 de maximale capaciteit ongeveer 51 m³/uur kan bedragen. Als het verhang terugloopt naar 1:1000, loopt de capaciteit terug naar ongeveer 16 m³/uur.

Tabel 4 Snelheid en waterhoogte in een 200 mm leiding bij verschillende debieten en leidinghellingen (verhang)

verhang	Diame- ter		200 mm		k- waarde		1 mm	
	1:100		1:250		1:500		1:1000	
debiet [m ³ /u]	v [m/s]	h [mm]	v [m/s]	h [mm]	v [m/s]	h [mm]	v [m/s]	h [mm]
1,0	0,32	12,5	0,23	16,0	0,18	19,0	0,14	22,5
4,0	0,48	25,0	0,35	31,5	0,27	37,5	0,21	44,5
7,0	0,56	33,0	0,40	41,5	0,31	50,0	0,24	60,0
10,0	0,62	39,5	0,45	50,0	0,35	60,0	0,27	72,5
13,0	0,67	45,5	0,48	57,5	0,37	69,5	0,29	84,0
16,0	0,71	50,5	0,51	64,5	0,39	78,0	0,30	95,0
19,0	0,74	55,0	0,53	70,5	0,41	85,5	0,31	105,5
22,0	0,77	59,5	0,55	76,5	0,42	93,5	0,32	115,5
25,0	0,80	64,0	0,57	82,5	0,44	101,0	0,33	126,0
28,0	0,82	68,0	0,58	88,0	0,45	108,0	0,34	137,0
31,0	0,84	72,0	0,60	93,0	0,46	115,5	0,34	148,5
34,0	0,86	75,5	0,61	98,5	0,47	122,5	0,35	162,0
37,0	0,88	79,0	0,62	103,5	0,47	130,0	0,31	200,0
40,0	0,90	83,0	0,63	109,0	0,48	138,0		
43,0	0,92	86,5	0,64	114,0	0,48	146,0		
46,0	0,93	89,5	0,65	119,0	0,49	155,0		
49,0	0,94	93,0	0,66	124,5	0,49	165,5		
52,0	0,96	96,5	0,67	129,5	0,43	200,0		
55,0	0,97	100,0	0,68	135,0				
58,0	0,98	103,0	0,68	140,5				
61,0	1,00	106,5	0,69	146,5				
64,0	1,00	109,5	0,69	152,5				
67,0	1,02	113,0	0,69	159,5				
70,0	1,02	116,0	0,69	167,5				
73,0	1,03	119,5	0,61	200,0				
76,0	1,04	122,5						
79,0	1,05	126,0						
82,0	1,06	129,5						
85,0	1,06	132,5						
88,0	1,07	136,0						
91,0	1,08	139,5						
94,0	1,08	143,5						
97,0	1,09	147,0						
100,0	1,09	151,0						

Tabel 4 laat zien dat alleen bij een verhang van 1:1000 de capaciteit van de 200 mm leiding rond de 30 m³/uur ligt bij een vullingsgraad van 70% (140 mm). De maximale capaciteit bij een verhang van 1:100 ligt rond de 95 m³/u.

Tabel 5 tot en met Tabel 8 laten de gegevens op een andere manier gepresenteerd zien, namelijk per verhang van 1:100, 250, 500 en 1000. Hierin is te zien dat de snelheid in de leiding nauwelijks wordt beïnvloed door de diameter. De waterdiepte varieert wel.

In een eerder artikel (Luijtelaar and Koot 1982) is de relatie tussen de wandschuifspanning en de variabelen verhang en diameter van gedeeltelijk gevulde rioolleidingen beschreven. De wandschuifspanning is van belang voor het transporteren van kleine sedimenten in een leiding. Hierin wordt geconcludeerd dat de kleinere verhangen de invloed van de diameter op de wandschuifspanning gering is en dat bij grotere verhangen de keuze voor een grotere diameter de schuifspanning aanzienlijk kan doen afnemen. De onderzochte diameterreeks in deze studie was 200-2000 mm. De conclusies zijn echter ook geldig voor de kleinere diameters die in de Tabel 5 tot en met Tabel 8 worden beschouwd.

Tabel 5 Capaciteit leidingen gerangschikt naar verhang 1:100

Verhang Debiet [m ³ /u]	Verhang 100		10 /1000		200	
	Diam v [m/s]	h [mm]	Diam v [m/s]	h [mm]	Diam v [m/s]	h [mm]
1,2	0,37	17,00	0,33	13,50	0,32	12,50
1,8	0,41	20,50	0,45	23,00	0,48	25,00
2,4	0,45	24,00	0,53	30,00	0,56	33,00
3,0	0,48	27,00	0,58	35,50	0,62	39,50
3,6	0,50	29,50	0,62	40,50	0,67	45,50
4,2	0,52	32,00	0,65	45,00	0,71	50,50
4,8	0,54	34,50	0,68	49,00	0,74	55,00
5,4	0,56	37,00	0,71	53,00	0,77	59,50
6,0	0,57	39,00	0,73	57,00	0,80	64,00
6,6	0,59	41,50	0,75	60,50	0,82	68,00
7,2	0,60	43,50	0,77	64,00	0,84	72,00
7,8	0,62	45,50	0,79	67,50	0,86	75,50
8,4	0,63	47,50	0,81	70,50	0,88	79,00

Tabel 6 Capaciteit leidingen gerangschikt naar verhang 1:250

Verhang	Verhang		4 /1000		Diam 200	
	Diam	100	Diam	160	Diam	200
Debiet	v	h	v	h	v	h
[m ³ /u]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]
1,2	0,27	21,50	0,24	17,00	0,23	16,00
1,8	0,30	26,00	0,33	29,00	0,35	31,50
2,4	0,32	30,50	0,38	38,00	0,40	41,50
3,0	0,34	34,50	0,41	45,00	0,45	50,00
3,6	0,36	38,00	0,44	51,50	0,48	57,50
4,2	0,37	41,50	0,47	57,50	0,51	64,50
4,8	0,39	45,00	0,49	63,00	0,53	70,50
5,4	0,40	48,00	0,50	68,50	0,55	76,50
6,0	0,41	51,50	0,52	73,50	0,57	82,50
6,6	0,42	54,50	0,53	78,50	0,58	88,00
7,2	0,43	57,50	0,55	83,50	0,60	93,00
7,8	0,43	60,50	0,56	88,50	0,61	98,50
8,4	0,44	64,00	0,57	93,50	0,62	103,50

Tabel 7 Capaciteit leidingen gerangschikt naar verhang 1:500

Verhang	Verhang		2 /1000		Diam 200	
	Diam	100	Diam	160	Diam	200
Debiet	v	h	v	h	v	h
[m ³ /u]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]
1,2	0,21	25,50	0,19	20,00	0,18	19,00
1,8	0,23	31,50	0,26	35,00	0,27	37,50
2,4	0,25	37,00	0,29	45,50	0,31	50,00
3,0	0,27	42,00	0,32	54,50	0,35	60,00
3,6	0,28	46,50	0,34	62,50	0,37	69,50
4,2	0,29	51,00	0,36	70,00	0,39	78,00
4,8	0,30	55,50	0,37	77,00	0,41	85,50
5,4	0,30	60,00	0,39	84,00	0,42	93,50
6,0	0,31	64,50	0,40	91,00	0,44	101,00
6,6	0,32	69,00	0,41	98,00	0,45	108,00
7,2	0,32	74,00	0,42	105,00	0,46	115,50
7,8	0,32	79,50	0,42	112,50	0,47	122,50
8,4	0,29	100,00	0,43	120,50	0,47	130,00

Tabel 8 Capaciteit leidingen gerangschikt naar verhang 1:1000

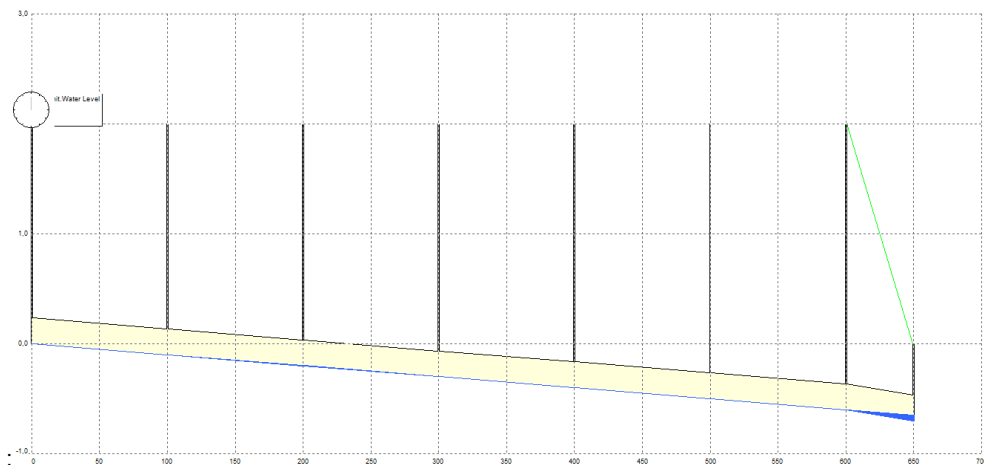
Verhang	Verhang		1 /1000		Diam 200	
	Diam	100	Diam	160	Diam	200
Debiet	v	h	v	h	v	h
[m ³ /u]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]
1,2	0,16	30,50	0,15	23,50	0,14	22,50
1,8	0,18	38,00	0,20	41,50	0,21	44,50
2,4	0,19	45,00	0,23	54,50	0,24	60,00
3,0	0,20	51,50	0,25	66,00	0,27	72,50
3,6	0,21	57,50	0,26	76,00	0,29	84,00
4,2	0,22	64,00	0,28	86,00	0,30	95,00
4,8	0,22	70,50	0,29	96,00	0,31	105,50
5,4	0,23	78,00	0,29	106,00	0,32	115,50
6,0	0,20	100,00	0,30	116,50	0,33	126,00
6,6			0,30	129,50	0,34	137,00
7,2			0,27	160,00	0,34	148,50
7,8					0,35	162,00
8,4					0,31	200,00

4.8 Capaciteit leidingstelsel.

Om de hydraulische capaciteit van een leiding onder vrij verval te bepalen is een eenvoudig model gemaakt van een fictieve rioolstreng. De streng bestaat uit 6 knopen met elk een hydraulische belasting van 100 i.e. ongeveer gelijk aan 40 huizen. De knopen liggen op 100 m van elkaar. Bij een dubbelzijdig bebouwde straat geeft dat een perceelbreedte van 5 meter. Er worden 9 verschillende berekeningen gedaan waarbij gevarieerd wordt in buis diameter; 250, 160 en 100 mm, en in verhang; 1:250, 1:500 en 1:1000. De lozing op de knopen zijn berekende drinkwaterverbruikspatronen vastgesteld met SIMDEUM (zie paragraaf 4.5).

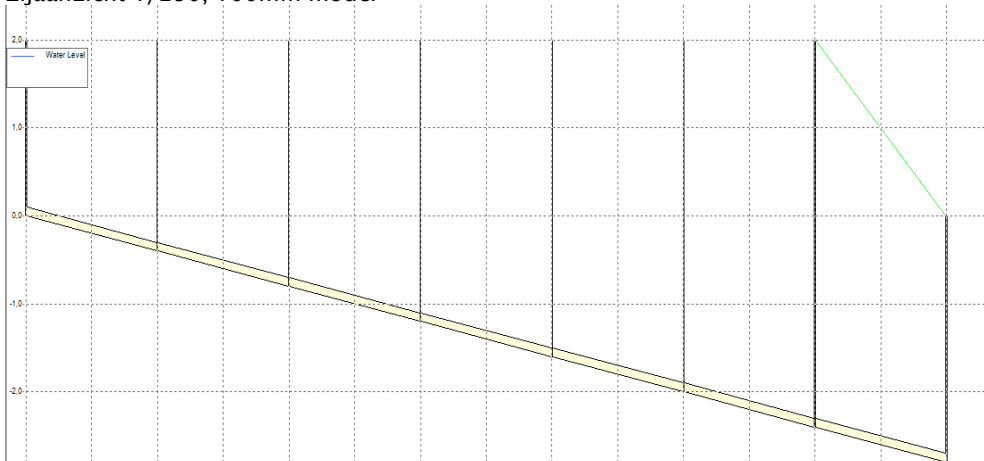
Benedenstrooms is de randvoorwaarde met een vast waterniveau. Tussen de randvoorwaarde en de laatste knoop met DWA is nog een mangat zonder afvoer geplaatst. In onderstaande Figuur 13 is een zijaanzicht gegeven van één van de variaties (250 mm en verhang van 1:1000). Dit is een weergave van de huidige werkwijzen, zij het met een gering verhang; Figuur 14 geeft een andere variatie, met een kleinere diameter en een iets groter verhang.

De bodem van de putten is gelijk aan de Binnen Onderkant Buis van de aansluitende leidingen. Dit betekent dat het waterniveau in de putten gelijk is aan het waterniveau in de leidingen.



Figuur 13 Zijaanzicht model 250 mm leiding en verhang 1:1000

Zijaanzicht 1/250, 100mm model



Figuur 14 Zijaanzicht model met verhang 1:250 en diameter 100 mm.

4.9 Resultaten

4.9.1 Algemeen

De resultaten van de berekeningen worden gepresenteerd in tabellen in de volgende paragrafen. De criteria die van belang zijn, zijn de stroomsnelheden om een indruk te krijgen van de mogelijke schuifspanningen en de waterdiepte om te bezien of de leiding vol komt te staan wat tot drukopbouw kan leiden.

De referentiesituatie is het model met het verhang van 1:500.

4.9.2 Stroomsnelheden

In Tabel 9 zijn de berekende stroomsnelheden weergegeven. De gemiddelde snelheden worden weergegeven naast de maximale snelheden.

Tabel 9 Berekende stroomsnelheden bij ver verschillende variaties in modellen

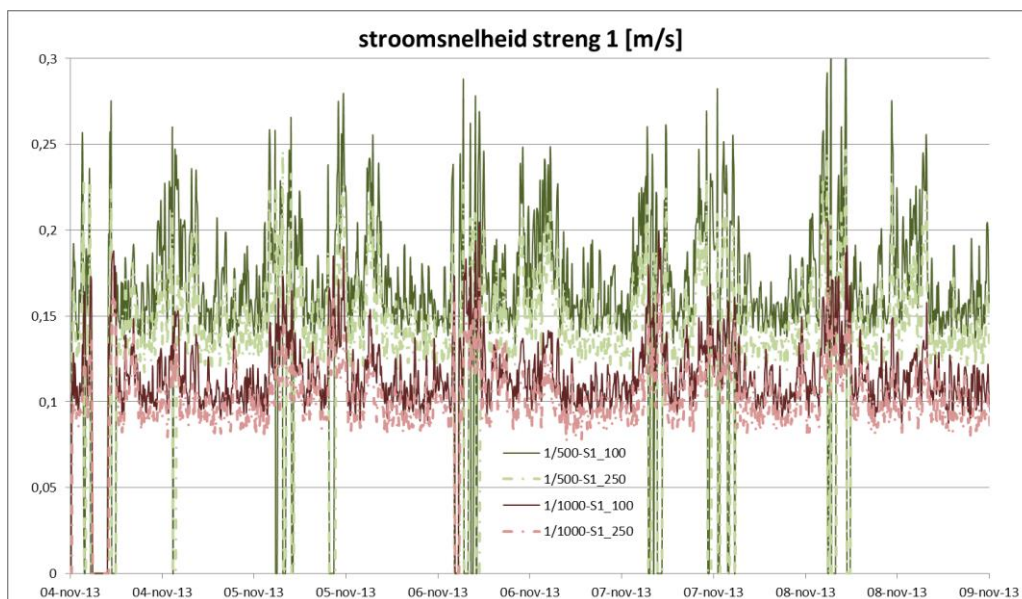
GEMIDDELDE	1op250				1op500				1op1000			-	
	streng	250	160	100 verschil 100-250	250	160	100 verschil	250	160	100 verschil	mm		
1	0,20	0,21	0,24	21%	0,14	0,15	0,16	18%	0,10	0,11	0,11	14%	m/s
2	0,20	0,22	0,24	16%	0,15	0,16	0,17	14%	0,11	0,12	0,12	12%	m/s
3	0,21	0,22	0,24	15%	0,15	0,16	0,17	13%	0,12	0,12	0,13	9%	m/s
4	0,22	0,23	0,25	14%	0,16	0,18	0,18	11%	0,13	0,14	0,14	8%	m/s
5	0,23	0,24	0,26	13%	0,17	0,19	0,19	11%	0,14	0,14	0,15	7%	m/s
Gemiddelde	0,21	0,23	0,24	16%	0,15	0,17	0,18	13%	0,12	0,13	0,13	10%	m/s
Vershil verhang	36%	35%	39%						-24%	-25%	-26%		tov 1/500

MAXIMA	1op250				1op500				1op1000			-	
	streng	250	160	100 verschil 100-250	250	160	100 verschil	250	160	100 verschil	mm		
1	0,37	0,39	0,43	18%	0,25	0,29	0,32	28%	0,17	0,19	0,21	20%	m/s
2	0,34	0,37	0,42	24%	0,23	0,25	0,26	14%	0,18	0,18	0,18	2%	m/s
3	0,34	0,36	0,40	19%	0,24	0,25	0,29	19%	0,18	0,19	0,19	6%	m/s
4	0,33	0,36	0,36	8%	0,26	0,27	0,30	14%	0,20	0,20	0,18	-7%	m/s
5	0,35	0,37	0,39	12%	0,27	0,30	0,31	14%	0,22	0,22	0,20	-8%	m/s
Gemiddelde	0,35	0,37	0,40	16%	0,25	0,27	0,29	18%	0,19	0,19	0,19	3%	m/s
Vershil verhang	38%	37%	37%						-24%	-28%	-34%		tov 1/500

Uit de gemiddelde en maximale stromingsnelheden blijkt dat vooral bovenstrooms in het systeem de stroomsnelheden toenemen bij een toenemend verhang. De invloed van de diameter blijkt minder groot te zijn. Bij verkleinen van het verhang nemen de snelheden relatief meer af dan ze toenemen door het verkleinen van de leiding.

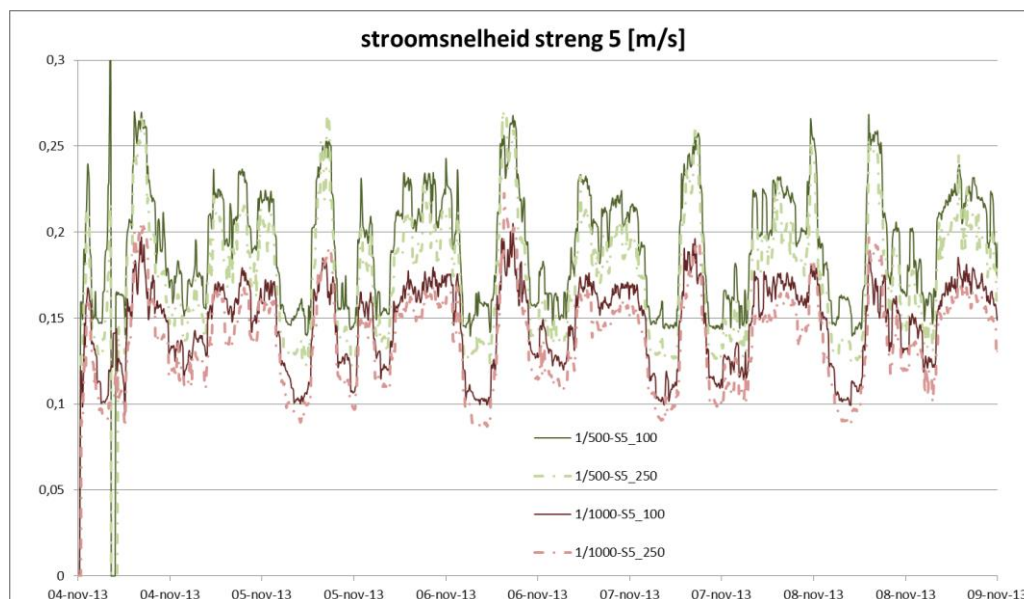
De stroomsnelheden in de boven- en benedenstroomse streng zijn weergegeven in Figuur 15 respectievelijk Figuur 16. De stroomsnelheden voor het steilste verhang zijn niet weergegeven omdat anders de figuren niet goed leesbaar meer zijn. Het patroon is echter hetzelfde, maar op een hoger niveau, zoals uit de tabel valt te zien. Hieruit blijkt dat de maximale stroomsnelheden in verschillende situaties niet heel veel van elkaar verschillen. Dat geeft aan dat ondanks dat er minder water door de eerste streng stroomt, er wel regelmatig een hoge snelheid optreedt waarmee sediment eventueel kan worden opgewerveld en weggespoeld.

Uit de figuur blijkt ook dat het verhang de snelheid in de leiding bepaald en niet zozeer de diameter van de leiding. Het verschil in snelheid is significant tussen 1:500 en 1:1000.



Figuur 15 stroomsnelheden in streng 1, de meest bovenstroomse leiding.

In streng 5 blijken de stroomsnelheden minder afwisselend te zijn en ook niet meer tot een stilstand komen. De maximale snelheid ligt ook hier rond de 0,25 m/s voor het verhang van 1:500.



Figuur 16 Stroomsnelheden in streng 5, de meest benedenstroomse streng.

4.9.3 Waterdiepte

Tabel 10 geeft de berekende waterdiepten in verschillende berekeningen. Ook hier is de referentie naar de situatie met het verhang van 1:500 met de gemiddelde en maximale diepten. De waterdiepten zijn weergegeven in de knopen, hetgeen verklaart dat deze groter kunnen worden dan de buisdiameter. Dit betekent dat de waterhoogte in de put hoger wordt dan de buisdiameter en de achter- en voorliggende buis volledig gevuld is.

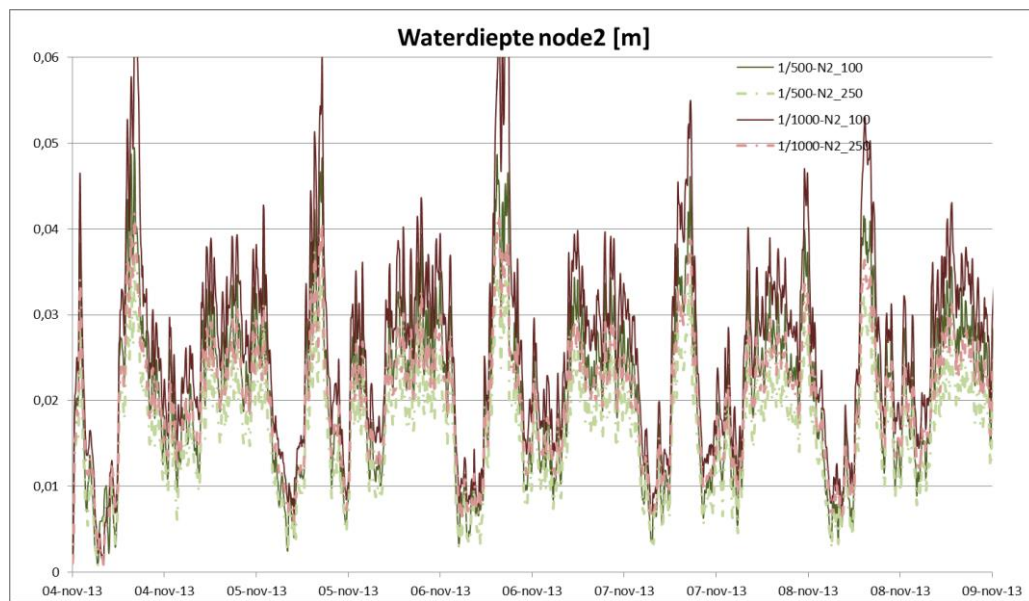
Tabel 10 Berekende waterdiepten bij vier verschillende variaties in modellen

GEMIDDELDE node	1op250				1op500				1op1000			-	
	250	160	100 verschil 100-250		250	160	100 verschil		250	160	100 verschil		mm
1	0,008	0,009	0,010	19%	0,010	0,011	0,012	23%	0,013	0,014	0,016	27%	m
2	0,014	0,015	0,017	25%	0,016	0,019	0,021	27%	0,020	0,023	0,026	31%	m
3	0,017	0,019	0,021	27%	0,020	0,023	0,026	29%	0,024	0,028	0,033	38%	m
4	0,020	0,022	0,026	29%	0,024	0,027	0,031	32%	0,028	0,032	0,041	44%	m
5	0,022	0,025	0,029	30%	0,026	0,030	0,035	34%	0,031	0,036	0,047	49%	m
6	0,025	0,028	0,032	31%	0,029	0,033	0,040	37%	0,034	0,040	0,051	48%	m
Gemiddelde	0,017	0,020	0,022	27%	0,021	0,024	0,027	30%	0,025	0,029	0,036	40%	m
Vershil verhang	-16%	-18%	-18%						20%	21%	30%		tov 1/500
MAXIMA node	1op250				1op500				1op1000			-	
	250	160	100 verschil 100-250		250	160	100 verschil		250	160	100 verschil		mm
1	0,024	0,028	0,031	29%	0,028	0,032	0,038	35%	0,034	0,037	0,052	51%	m
2	0,030	0,034	0,040	33%	0,036	0,040	0,049	36%	0,042	0,049	0,088	110%	m
3	0,037	0,042	0,049	35%	0,042	0,049	0,062	49%	0,052	0,060	0,170	229%	m
4	0,039	0,046	0,056	42%	0,048	0,057	0,073	53%	0,057	0,068	0,230	304%	m
5	0,045	0,053	0,068	50%	0,052	0,064	0,089	70%	0,061	0,076	0,256	322%	m
6	0,049	0,057	0,073	49%	0,057	0,069	0,121	114%	0,067	0,080	0,222	230%	m
Gemiddelde	0,037	0,043	0,053	40%	0,044	0,052	0,072	59%	0,052	0,062	0,170	208%	m
Vershil verhang	-15%	-16%	-27%						19%	19%	135%		tov 1/500

De waterdiepte in de verschillende knopen neemt bij kleinere buis en kleiner verhang toe. Bovenstrooms gemiddeld met 20-30% en benedenstrooms met 40-50%. De maxima nemen

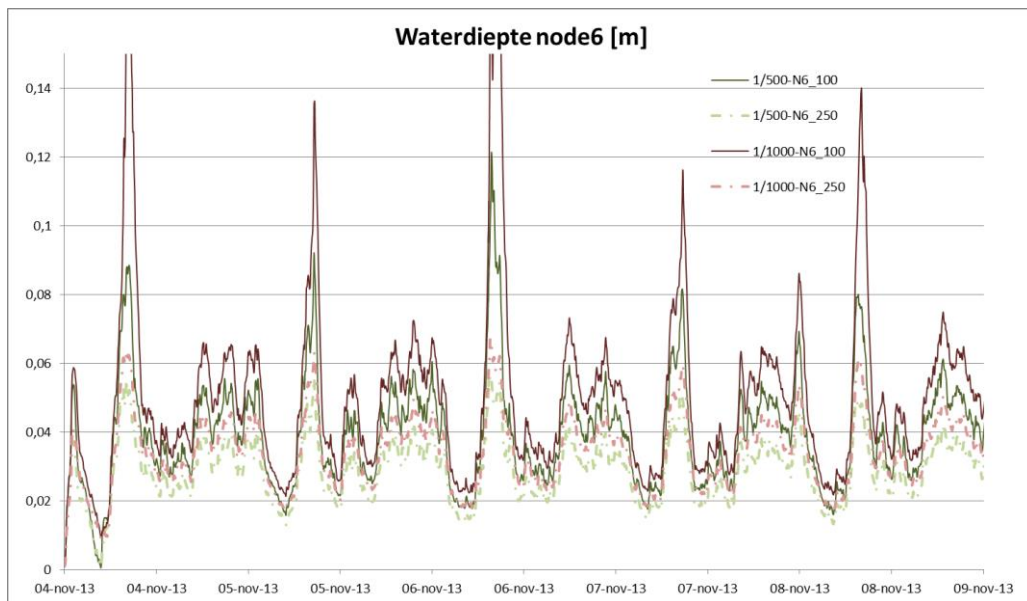
nog verder toe. In het geval van kleiner verhang en kleine buis meer dan 150% over alle knopen. De benedenstroomse knoop (6) zelfs meer dan 300%. In de gemiddelde situatie raakt in geen van de gevallen de leiding volledig gevuld. In de maximale situatie komt bij het verhang van 1:500 de laatste knoop (6) hoger dan de buisdiameter. Bij het verhang van 1:1000 is dit het geval over bijna de gehele leiding.

In Figuur 17 en Figuur 18 zijn de waterdiepte in de eerste en laatste knoop weergegeven voor de twee verhangsituaties 1:500 en 1:1000 voor de 250 en 100 mm situatie. In de bovenstroomse knoop is de waterdiepte nooit boven de diameter van de leiding. Gemiddeld blijft de waterdiepte ook beneden 50% van de buisdiameter, hetgeen betekent dat de vullingsgraad ook niet boven de 50% komt.



Figuur 17 Waterdiepte in de eerste bovenstroomse knoop

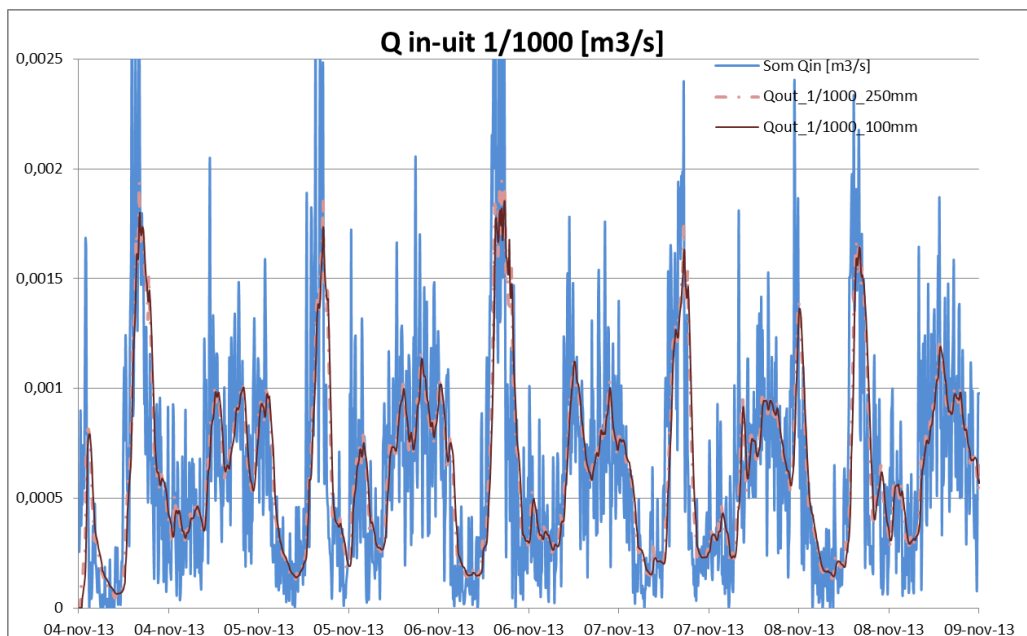
In het geval van het flauwere verhang, blijkt de leiding wel vol te kunnen lopen. Het water staat echter gedurende een relatief korte periode in de knoop hoger. Dit heeft wel gevolgen voor de ontspanning van de put. Het betreft de pieksituaties tijdens de ochtend en avond piek in het drinkwaterverbruik.



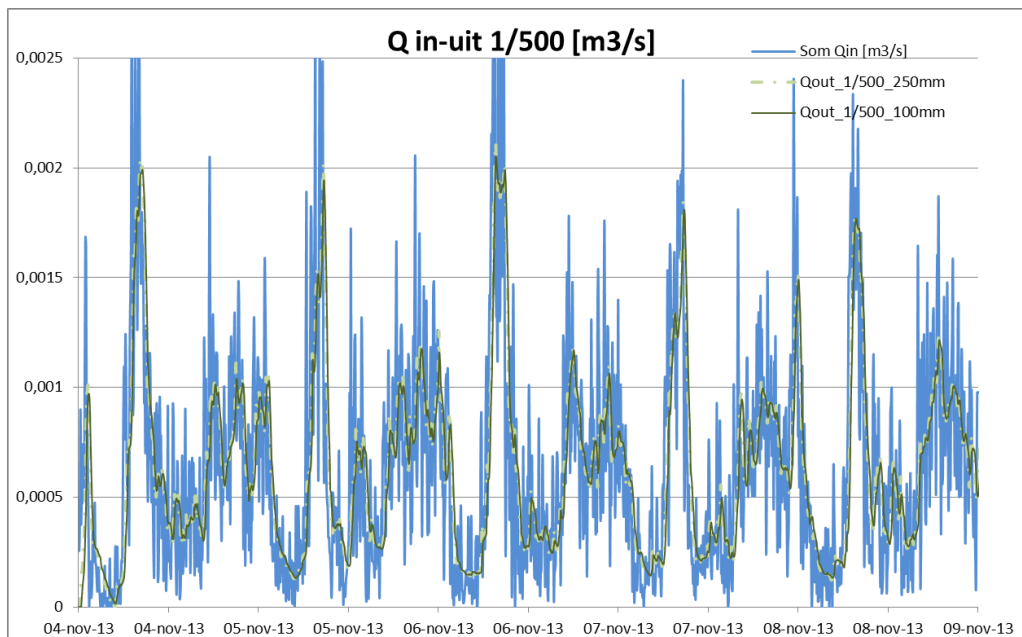
Figuur 18 Waterdiepte bij de laatste benedenstroomse knoop

4.9.4 Afvoer en berging

In het systeem kan met een grotere diameter een zekere berging optreden, waardoor pieken vertraagd kunnen worden in het systeem. In Figuur 19 en Figuur 20 zijn de ingaande stromen en de uitgaande stroom met elkaar vergeleken. Daaruit lijkt dat er wel een zekere mate van berging optreedt, maar dat die niet heel erg verschillend is voor de beide situaties.



Figuur 19 Som van de ingaande lozingen en de afvoer bij de benedenstroomse randvoorwaarde bij verhang 1:1000



Figuur 20 Som van de ingaande lozingen en de afvoer bij de benedenstroomse randvoorwaarde bij verhang 1:1500

4.10 Conclusies

De capaciteit van de afvoerende leidingen wordt voornamelijk bepaald door het verhang en daarmee met de snelheid van het water. De diameter is van minder belang: als voorbeeld de toename van diameter bij een verhang van 1:250 met 250% (van 100 naar 250 mm) heeft een verlaging van de waterstand met 30% tot gevolg (van 32 naar 25 mm) en een afname van de snelheid met 13% (van 0,26 naar 0,23 m/s). Bij het steiler worden van het verhang neemt de snelheid toe en de waterdiepte af.

Bij een verhang van 1:250 is een leiding met een binnendiameter van 100 voldoende om het afvalwater van 240 aansluitingen (600 i.e.) af te voeren bij de gegenereerde patronen. De vullingsgraad is dan maximaal 73% in de laatste streng. Bij een verhang van 1:500 zal in de laatste streng bij deze diameter enige tijd stuwning in de laatste put ontstaan en een volledig gevulde buis. Bij een verhang van 1:1000 treedt vanaf een belasting tussen 80 en 120 aansluitingen volledige vulling bij maximale belasting. Gemiddeld blijft de 100 mm leiding bij een verhang van 1:1000 beneden de 55% vulling.

4.11 Schuifspanning en bezinking

Uit de berekeningen en modellering blijkt dat de stroomsnelheid in een leiding voornamelijk wordt bepaald door het verhang in de leiding. De diameter heeft er slechts een geringe invloed op. De vullingsgraad wordt voornamelijk bepaald door het totale aanbod van water. De schuifspanning is nagenoeg recht evenredig met de snelheid van het water. De vergelijkingen 1 op pagina 14 en vergelijking 6 op pagina 33 laten dat zien. Vervuiling van het riool treedt op door bezinking en ophoping van het materiaal dat getransporteerd wordt met het water. In het huishoudelijke afvalwater is dit voornamelijk organisch van aard met een soortelijke massa die slechts in geringe mate verschilt van water. Het meer zandige materiaal is ook in huishoudelijk afvalwater aanwezig, maar slechts in geringe mate. Zandig materiaal in de huidige riolen is vooral afkomstig van straatvuil dat abusievelijk in het DWA riool terecht is gekomen.

Bezinking van materiaal in een riool dat uiteindelijk zelfs tot verstopping kan leiden is een complex proces. De belangrijkste bepalende factoren zijn de aard en samenstelling van het sediment dat vervoerd wordt in combinatie met de hydraulische schuifspanning. Deze laatste wordt door dezelfde parameters bepaald als de snelheid (zie vergelijking 1 op pagina 14), namelijk de natte straal R en het hydraulisch verhang i . In de riolen is het hydraulische verhang i gelijk aan het bodemverhang. De snelheid is dus bepalend voor de mate van opwerveling van bezonken deeltjes.

Overigens kan het hydraulisch verhang in de riolen ook iets groter zijn dan het bodemverhang, hetgeen een gunstig effect heeft op de opwerveling van bezonken materiaal. Wanneer er een puls aan water in de leiding wordt gebracht is het waterniveau ter plaatse van de puls tijdelijk wat hoger en zal dus een wat groter verhang aanwezig zijn. Lokaal kunnen dus (iets) hogere schuifspanningen ontstaan gedurende een korte tijd. Overigens is dit fenomeen meer geprononceerd in kleinere leidingen omdat het bergend vermogen van een kleinere leiding geringer is dan een grotere leiding. M.a.w. in een grotere leiding vlakkt een puls eerder uit.

De totale afvoercapaciteit van een leiding wordt bepaald door de diameter van de leiding in combinatie met het verhang waaronder de leiding wordt gelegd. Voor een 100 mm leiding varieert de capaciteit van 8 à 9 m³/u tot minder dan 2 m³/u vanaf een verhang van 1:100 tot 1:1000. Voor de traditionele 250 mm leiding (niet in tabel opgenomen) varieert de capaciteit van 28 m³/u m bij 1:1000 tot 114 m³/u bij 1:100.

De gebruikelijke praktijk, zoals vastgelegd in de Leidraad, is om de leidingen in het begin van een streng wat steiler te leggen en naar het einde toe wat minder steil. Dat resulteert in een snelheidsverdeling die aan het begin wat hoger is als aan het einde van de leiding. Aan het einde van de leiding is meer materiaal aanwezig dat tot bezinking kan komen, terwijl hier de snelheden lager zijn. Het zou te overwegen zijn om dit regime om te keren en aan het begin van de streng wat minder steile leiding toe te laten. Hier kan dan welliswaar bezinking optreden, maar de totale hoeveelheid materiaal dat kan bezinken is minder. Bovendien is de pulswerking in het begin van de streng wat groter omdat hier de onregelmatigheid van lozing wat minder in de tijd wordt afgevlakt.

5 Literatuuronderzoek verstoppingen in leidingen

5.1 Inleiding

Dit literatuuronderzoek wordt gepresenteerd tijdens de stuurgroepvergadering van 16 september, daarna hier gerapporteerd.

6 Experimenteel onderzoek

6.1 Inleiding

Doel van het experimenteel onderzoek was tweeledig. Ten eerste een demonstratie van de hydraulische capaciteit van een leiding met een diameter van 100 mm. Tevens werd gekeken naar de effecten van verschillende typen van huisaansluitingen.

Ten tweede wordt gekeken naar de hydraulische effecten en het transport van objecten in de proefinstallatie. Ook dit wordt in een 100 mm leiding gedaan.

De eerste fase van het experimentele onderzoek is uitgevoerd in de periode van 8 en 9 oktober 2014 bij Wavin Technology and Innovation in Dedemsvaart.

Het experimenteel onderzoek heeft plaatsgevonden in twee fasen. De eerste fase was exploratief ten aanzien van de vormgeving van de testinstallatie en het weergeven en het testen van de hydraulische capaciteit. Daarnaast is een eerste verkenning gedaan over de mogelijkheden om de leiding te verstoppen.

De tweede fase is uitgevoerd in de periode oktober 2015 en was gericht op het bevestigen van de hydraulische capaciteitstest en het bepalen van de mechanismen van transport van objecten in de stroming.

Beide testen zijn apart gerapporteerd (Vreeburg 2015; Vreeburg 2015). Hier worden alleen de conclusies weergegeven.

6.2 Hydraulisch onderzoek

Beschreven in rapport

6.3 Transportverschijnselen in het riool.

Opzet beschreven in Bijlage II. De resultaten zullen in een apart rapport worden beschreven en de conclusies in dit rapport herhaald.

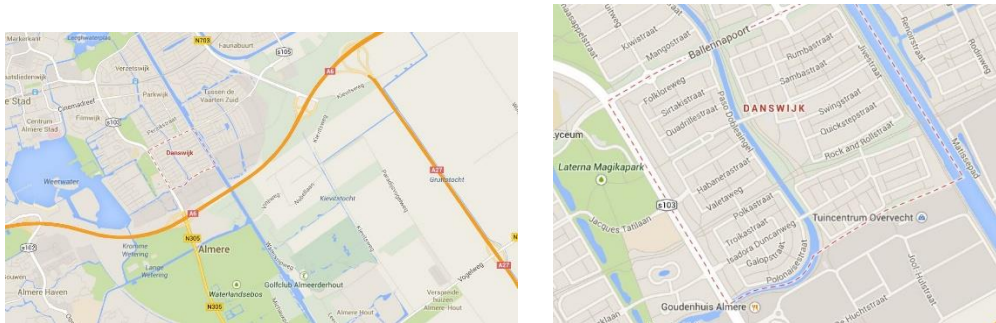
7 Toepassing kleinere leidingen in bestaand ontwerp

7.1 Inleiding

Naast de theoretische en experimentele benadering van de dimensionering van een vuil water riool, is het vooral interessant om te bezien welke consequenties een kleinere diameter voor het riool zal hebben op een werkelijk stelsel. In dit hoofdstuk wordt een bestaand model van een vuil water riool stelsel globaal opnieuw gedimensioneerd. Het is daarmee geen 'nieuw ontworpen riool stelsel', maar een indicatie van wat de nieuwe benadering zou kunnen betekenen voor een dergelijk stelsel. Het ontwerp is vooral bedoeld om een discussie op gang te krijgen over de mogelijke knelpunten die kunnen optreden en om te bezien welke mogelijk voordelen zijn te bereiken.

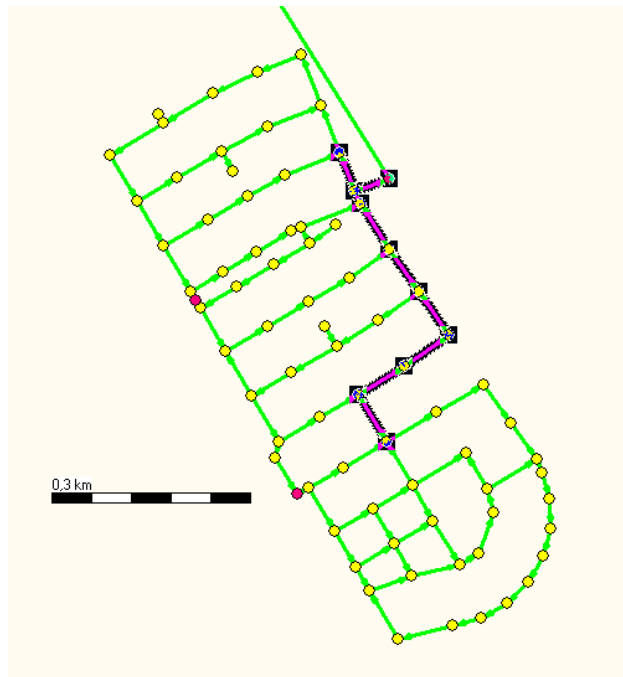
7.2 Uitgangspunten

Het beschouwde gebied betreft een gedeelte van een woonwijk, de Danswijk in Almere. De wijk bestaat voor wat het riool betreft uit twee delen gescheiden door een waterloop, zoals in Figuur 21 is te zien.



Figuur 21 Danswijk in Almere; rechts een uitvergroting van de wijk die in het zuiden van Almere ligt, tegen de A6 aan.

Het leidingmodel van het riolsysteem in de wijk is weergegeven in Figuur 22.



Figuur 22 Leidingmodel riolering stelsel van het westelijk gedeelte van de Danswijk. De gele punten zijn de putten en de groene lijnen de leidingen. Het paars gemarkeerde gebied is de hydraulische lijn die als belangrijkste afvoerleiding naar het reservoir leidt. Het reservoir is modelmatig gelegen aan de groene leiding die de figuur verlaat.

Het model van het betreffende gebied is beschikbaar gesteld door de gemeente Almere. Er zijn in totaal 2250 inwoner equivalenten (i.e.) aangesloten, hetgeen betekent dat er gemiddeld ongeveer 34 i.e. zijn aangesloten op iedere put. Alle leidingen in het model zijn 250 mm., conform de uitgangspunten van de Leidraad. De modelleringstijdstap is 5 min, de output is ook met dat interval. Voor elke knoop zijn aparte input patronen gemaakt met Simdeum ook tijdstappen van 5 min; zie ook paragraaf 4.5. De model run is 5 week dagen. De Simdeum patronen zijn ook op basis van waterverbruik gedurende weekdagen vastgesteld. De totale afvoer van het systeem is rond de 250 m³ per dag. De uitkomsten van de berekeningen worden alleen voor de laatste twee dagen gepresenteerd om eventuele beginanomalieën (het 'vollopen' van het systeem) niet mee te nemen in de analyse.

Er zijn 2 verschillende varianten doorgerekend:

1. "250-250" In dit model zijn alle riolen 250mm, de situatie zoals ook is aangelegd.
2. "160-100" In dit model zijn de hoofdriolen, dat zijn de paarse leidingen van Figuur 22, 160mm en de overige 100mm.

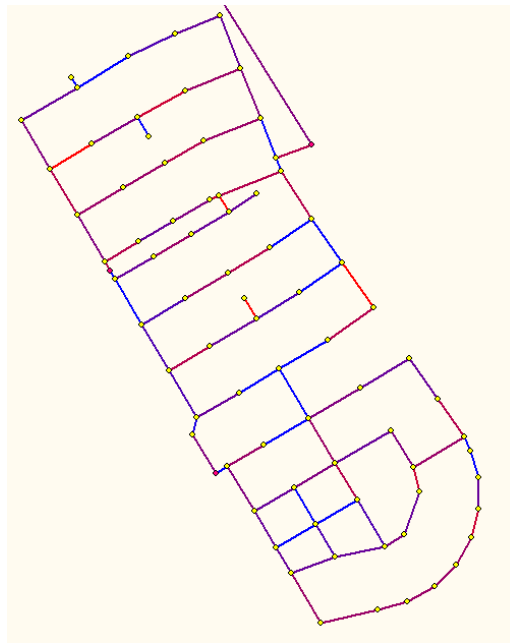
Het gemiddelde verhang van de leidingen bij de verschillende varianten is in Tabel 11 weergegeven. In Figuur 23 is het verhang per leiding grafisch weergegeven.

De verhangen zijn berekend uit de BOB (Binnen Onderkant Buis) die zijn gemeten door de gemeente. Het maaiveld bevindt zich gemiddeld op -3,6 m tov NAP. De 'hoogste' put ligt op -5,4 m tov NAP en de 'diepste' put ligt op -6,1 m tov NAP. Het absolute hoogteverschil over dit stelsel is dus 70 cm en de dekking is minimaal 2 meter. De inwendige (hydraulisch relevante) diameter van de leidingen is 250, 160 respectievelijk 100 mm. Dit zijn geen standaard handelsmaten in PVC leidingen. In werkelijkheid zullen de 250 en 160 mm kleiner zijn, vanwege de wanddikte die hier twee maal van moet worden afgetrokken. Voor de 100 mm geldt

dat deze in werkelijkheid iets groter zal zijn: de handelsmaat is 110 en de wanddikte is kleiner dan 5 mm.

Tabel 11 Gemiddelde verhang in de leidingen van het doorgerekende stelsel. Tevens lengte van de leidingen verdeeld over de diameters.

	250-250		160-100	
	lengte [m]	gemiddelde verhang [-]	lengte [m]	gemiddelde verhang [-]
250mm	4945	0,00065	0	nvt
160mm	0	nvt	518	0,00077
100mm	0	nvt	4427	0,00064



Figuur 23 Verhang van de leidingen in de westelijke Danswijk; blauw = geen verhang, Rood = groot verhang (min = 0; max = 0,0031)

De berekeningen zijn uitgevoerd met het programma SOBEK van Deltares.

7.3 Resultaten

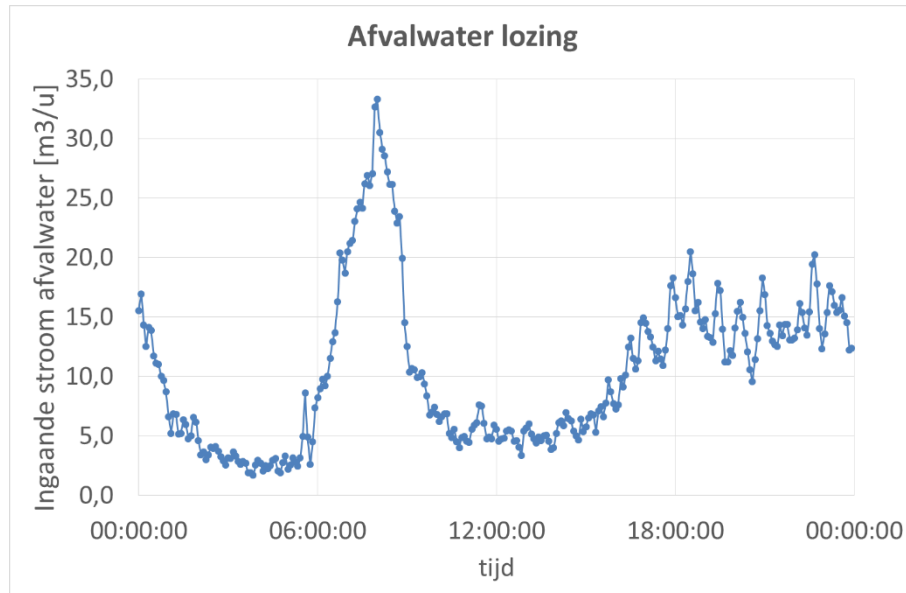
7.3.1 Algemeen

Tijdens het maken van de berekeningen bleek er op een aantal plaatsen fouten te zitten in de schematisatie van het leidingstelsel. Op twee punten leidt dat tot het min of meer permanent volstaan van de putten. Dit heeft te maken met een fout in de schematisatie die in de verdere berekeningen niet wordt meegenomen. Er is niet gezocht naar correctie van de fout, omdat de berekening in eerste instantie indicatief is.

In de presentatie van de resultaten wordt onderscheid gemaakt tussen 'Hoofdriolen' en 'verzamelleidingen'. De hoofdriolen bevinden zich in het traject dat in paarse leidingen is weergegeven in Figuur 22. In model "160-100" is de diameter van deze leidingen 160 mm. De verzamelleidingen zijn de overige leidingen, die in het tweede model zijn teruggebracht tot 100 mm.

De resultaten voor de verschillende parameters worden gegeven in gemiddelde waarden over de laatste twee dagen van de analyse. Niet van iedere leiding afzonderlijk kunnen presentaties gemaakt worden.

De input in het model is weergegeven in Figuur 24.



Figuur 24 De totale afvalwater lozing op het stelsel. Dit is de gesommeerde input op alle knopen (putten) van het stelsel. Hieruit blijkt bijvoorbeeld dat de maximale afvoer rond de 35 m³/uur is en de minimale afvoer rond de 2,5-3 m³/uur.

De afvoer van het riool is over de seizoenen min of meer constant. Het drinkwaterverbruik varieert wel over de seizoenen, maar veel van het seizoensafhankelijke drinkwaterverbruik zal niet in de riolering belanden, zoals bijvoorbeeld het tuinsproeien.

7.3.2 Stroomsnelheid

In Tabel 12 zijn de resultaten van de berekening van de stroomsnelheden weergegeven.

Tabel 12 Resultaten berekeningen van de stroomsnelheden. In de kolom 'Afwijking' wordt aangegeven hoeveel de waarde van alternatief 2 (160-100) afwijkt ten opzichte van alternatief 1 (250-250)

Gemiddelde stroomsnelheid		250-250	160-100		Afwijking
alle leidingen	gemiddelde	0,075	0,087	m/s	17%
	standaard deviatie	0,065	0,069	m/s	6%
hoofdriolen	gemiddelde	0,206	0,219	m/s	6%
gedurende piek afvoer	gemiddelde van alle leidingen	0,097	0,112	m/s	16%
gedurende dal afvoer	gemiddelde van alle leidingen	0,050	0,061	m/s	21%
Maximale stroomsnelheid		250-250	160-100		Afwijking
alle leidingen	gemiddelde van max /per leiding	0,137	0,162	m/s	18%
hoofdriolen	gemiddelde van max /per leiding	0,495	0,536	m/s	8%
gedurende piek afvoer	gemiddelde van max /per leiding	0,449	0,480	m/s	7%
gedurende dal afvoer	gemiddelde van max /per leiding	0,226	0,246	m/s	9%

Voor de stroomsnelheden geldt dat de toename van de snelheden in het tweede alternatief niet heel groot is. De grootste afwijkingen vinden plaats bij de pieken en de dal afvoeren,

hetgeen logisch is, omdat hier de invloed van de hydraulische straat (de natte omtrek ten opzichte van de natte doorsnede) het grootste is. In de maximale stroomsnelheden wordt het absolute maximum van al de leidingen weergegeven. Voor het 160 mm systeem is dat 0,54 m/s.

De geringe verschillen in snelheden laten ook zien dat deze in feite voornamelijk afhankelijk zijn van het verhang en niet van de diameter. De diameter van de 100 mm leidingen wordt een factor 2,5 kleiner en de diameter van de 160 mm een factor 1,5. De snelheid neemt met in de extreme gevallen een factor 0,2 toe. Dit is in overeenstemming met vergelijking 6 omdat het materiaal (en dus de k-waarde en daarmee de Chézy factor) nagenoeg gelijk is.

7.3.3 Waterdiepte

De resultaten van de berekeningen van de gemiddelde waterdiepte zijn weergegeven in Tabel 13. Hieruit blijkt dat geen van de leidingen volledig vol komt te staan als gevolg van de afvoer van het water. Ook blijkt dat de waterdiepte tussen de twee alternatieven niet heel veel toeneemt. Vooral voor de verzamelriolen is dat opmerkelijk. Het blijkt echter dat als de waterdiepte niet al te hoog is, het bergend vermogen van het doorstroomde profiel niet zo heel groot is. (zie ook vergelijking 8)

Tabel 13 Gemiddelde waterdiepten; de kolom 'Afwijking' geeft het verschil aan van de uitkomst van alternatief 2 (160-100) ten opzichte van alternatief 1 (250-250)

Gemiddelde waterdiepte		250-250	160-100		afwijking
verzamel riolen	gemiddelde van putten vzml	4,3	4,9	cm	12%
hoofdriolen	gemiddelde van putten hfdrl	6,5	7,3	cm	13%
gedurende piek afvoer	gemiddelde van alle putten	5,5	6,8	cm	22%
gedurende dal afvoer	gemiddelde van alle putten	3,3	3,6	cm	8%

Het is natuurlijk interessanter om te bezien of bij maximale afvoer de leidingen wel volledig vol komen te staan. Hier geldt echter de invloed van de twee putten die niet goed zijn geschematiseerd. De waterdiepte wordt berekend in de putten, waarbij de bodem gelijk is aan de BOB van de aansluitende leiding. In deze putten is de bodem dieper dan de BOB met een hoge waterstand (47 cm) als gevolg. Deze waterstand verandert ook nauwelijks als gevolg van andere diameters van de aansluitende leidingen.

De resultaten van de berekening t.a.v. de maximale waterdiepten is weergegeven in Tabel 14.

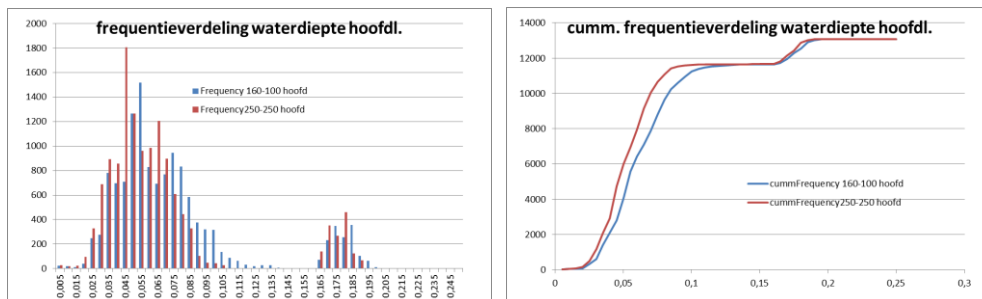
Tabel 14 maximale waterdiepte. In de eerste regel is de 'diepe put' meegenomen; in de overige regels niet meer.

Maximale waterdiepte		250-250	160-100		afwijking
alle putten	max van putten vzml (1)	47,3	47,9	cm	1%
	max van putten vzml (2)	17,2	22,9	cm	33%
	gemiddelde van max vzml(2)	5,2	6,9	cm	31%
hoofdriolen	max van putten hoofdriool	19,1	19,9	cm	4%
	gemiddelde van max hfdrl	9,4	11,5	cm	22%

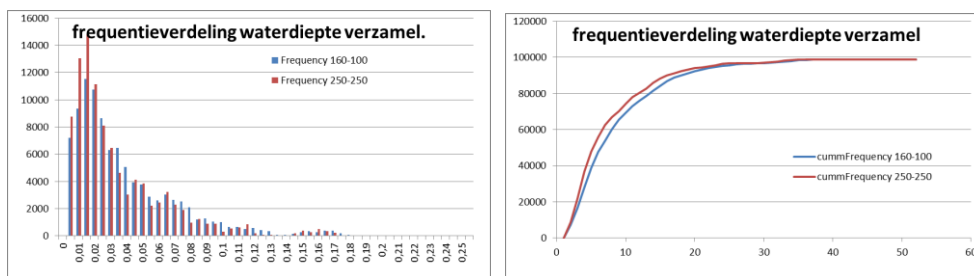
In het 250-250 systeem lopen de buizen dus niet vol (alleen bij de 2 eerder genoemde putten). In het 160-100 systeem loopt één hoofdriool en verschillende verzamelriolen wel vol; naast de 2 eerder genoemde betreft dat 14 leidingen. Deze 14 leidingen zijn nader onderzocht, waaruit bleek dat;

- 3 leidingen lozen op de streng van het hoofdriool dat ook onder water staat en waar de eerder genoemde ontwerp/schematisatie fout zit; De leiding tussen die twee putten liggen dieper dan de omliggende leidingen;
- 6 aaneengesloten leidingen die onder water lopen. Ook hier zitten enkele aparte leidingen hoogten in die anders ontworpen kunnen worden. Mogelijk kan het nodig zijn om de meest benedenstroomse streng van deze serie, die loost op het hoofdriool, ook in 160mm uit te voeren. Hierdoor wordt het hoofdriool dus iets langer.
- 5 individuele leidingen die om verschillende redenen incidenteel vollopen. Veelal bij putten waar meer dan 2 strengen op lozen waarbij één of meer strengen meer dan 20 cm boven de putbodem in de put lozen.

Voor de optredende waterdiepten in hoofdriolen en verzamelleidingen zijn frequentieverdelingen gemaakt en weergegeven in Figuur 25 en Figuur 26. Ook hier zijn de twee eerder genoemde putten met aansluitende strengen met ontwerp/schematisatie fout uitgelaten. Het "plukje" waterstanden rond de 16 cm treedt op in twee putten waarvan de bodem relatief diep ligt en de afvoerende leiding te hoog is aangesloten. Doordat het hoofdriool niet zo heel lang is, zijn deze twee significant aanwezig in de uitkomst.



Figuur 25 (Cumulatieve) Frequentieverdeling van waterdiepten die voorkomen in de 160 mm hoofdriolen



Figuur 26 (Cumulatieve) frequentieverdeling van waterdiepten die voorkomen in de 100 mm verzamelriolen.

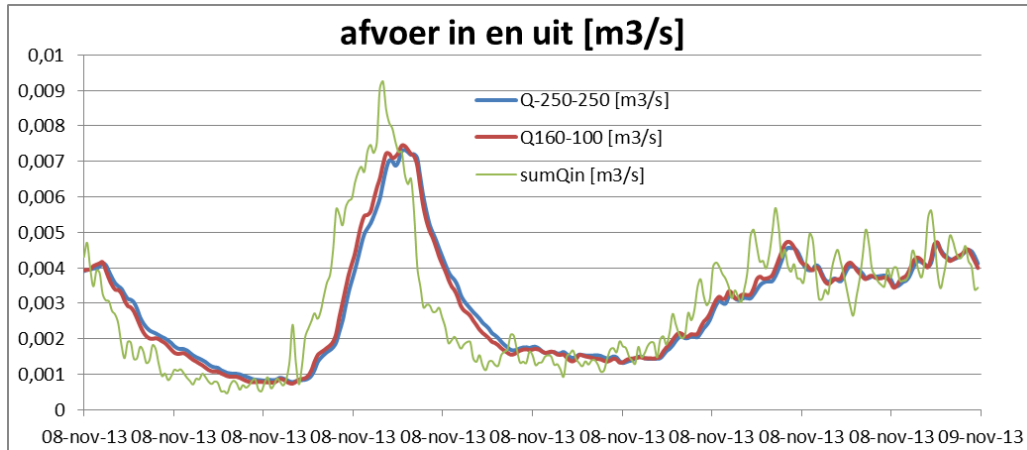
In de verzamelriolen van 100 mm treedt op een aantal momenten een volledige vulling. Deze punten kunnen waarschijnlijk goed worden opgelost als de details beter worden bekeken voor wat betreft de schematisatie dan wel een aanpassing van het ontwerp van het hoofdriool (wat verlengen).

Wat verder opvalt is dat de frequentieverdelingen van de beide alternatieven vrij dicht bij elkaar liggen. Dat onderschrijft wederom dat het verhang in de leidingen bepaalt welke snelheid en dus waterhoogte wordt bereikt. De invloed van de diameter hierop is gering.

In Figuur 26 zijn voor het alternatief 160-100 de frequentieverdelingen van de waterdiepten in de leidingen weergegeven. De waarden die hier boven de 0,1 liggen, bevinden zich allemaal in de 160 mm hoofdriolen.

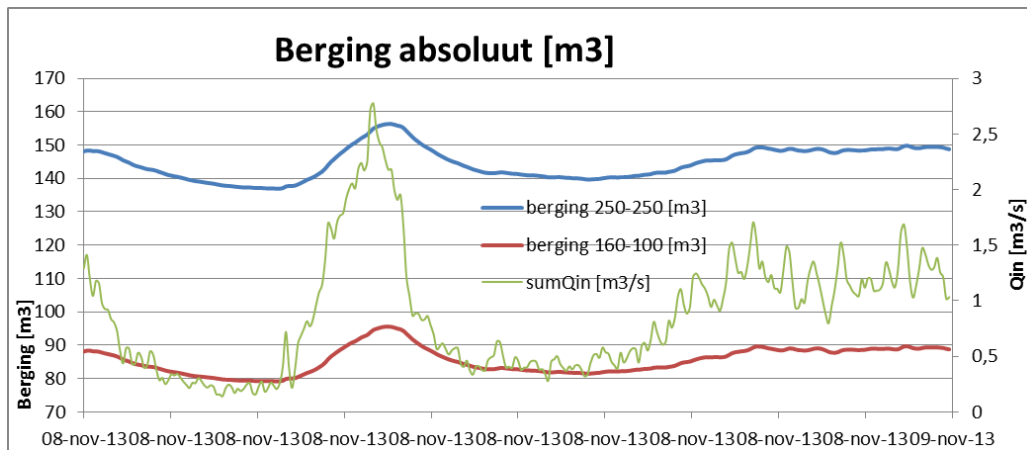
7.3.4 Berging en afvoer

De berging in het systeem is het gecumuleerde verschil tussen de aan- en de afvoer in het systeem. In Figuur 27 zijn de aan en afvoer van de beide berekeningen weergegeven.



Figuur 27 Aanvoer in het systeem en afvoer van het 250-250 respectievelijk 160-100 systeem.

Uit deze figuur blijkt dat de dynamische berging in de beide systemen niet veel verschilt. De afvoer is in beide systemen onder dezelfde hydraulische belasting nagenoeg identiek. Het programma SOBEK berekent ook de hoeveelheid water die zich in het systeem bevindt. Dat zou je de statische berging kunnen noemen. Voor het 250-250 systeem is deze berging ongeveer 150 m^3 terwijl die voor het 160-100 systeem ongeveer 90 m^3 bedraagt. Dat is weergegeven in Figuur 28.



Figuur 28 Statische c.q. absolute berging tijdens de berekeningen.

Ook uit deze figuur blijkt dat de systemen nagenoeg op dezelfde manier reageren. Het verschil van 60 m^3 betekent ongeveer 30% minder berging in het 160-100 systeem. Dit heeft een effect op de verblijftijd van het water in het systeem dat met ongeveer diezelfde hoeveelheid zal afnemen.

7.3.5 Discussie

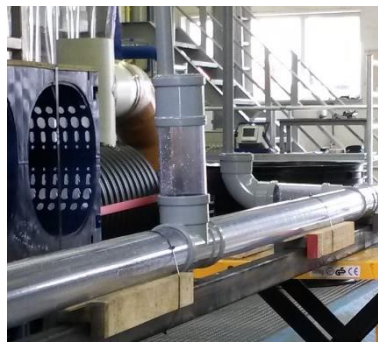
Uit de berekeningen blijkt dat met een vrij grove benadering van het terugbrengen van de diameters in een rioolstelsel een werkend systeem berekend kan worden dat met veel klei-

neren diameters nagenoeg dezelfde hydraulische prestatie levert. Verdere verbeteringen zullen ook nog mogelijk zijn als alleen strengen worden ontworpen die als takken op het hoofdriool aansluiten. Dan wordt niet alleen bespaard op leidingmateriaal, maar ook nog op leidinglengte.

Op sommige plaatsen kunnen de putten vol lopen. Hoewel het gevaar hiervoor beperkt lijkt, zeker als een nauwkeuriger beschouwing van het ontwerp wordt gemaakt, zal het effect vaker op kunnen treden als bij een groter gedimensioneerd systeem. Het effect zal zijn een drukopbouw in de putten en eventueel ontsnappen van lucht via het putdeksel. Dat zal mogelijk voor stankoverlast kunnen zorgen. In een zorgvuldig ontwerp zal hier meer rekening mee moeten worden gehouden.

De grote onbekende in deze berekening is het gedrag van het sediment in de leidingen. In principe kan worden gesteld dat als in het huidige systeem geen excessieve accumulatie van sediment optreedt, dit ook niet zal gebeuren in het nieuwe systeem.

Gezien de hydraulische redundantie die in het huidige systeem zit, kan het echter zijn dat er veel sediment accumuleert zonder dat dit tot problemen zal leiden. Het is daarom ook van belang om meer inzicht te krijgen in het ophopen van sediment in een dergelijk vuil water systeem. Het is aannemelijk dat het systeem in de Danswijk in Almere representatief is voor vele systemen in Nederland. Wat opvalt in het ontwerp is dat er slechts een gering hydraulisch verval wordt gebruikt in het stelsel: 70 cm. Terwijl de dekking op de leidingen wel vrij veel is. De meeste huisaansluitingen worden haaks bovenop de leiding gemaakt. Dit betekent dat bij de aansluiting van de leiding ongeveer 30 tot 50 cm 'hoogte' wordt gebruikt, zoals in Figuur 29 is te zien. Een andere manier van detaillering van die huisaansluiting geeft een geringere dekking op de leiding, maar geeft ook meer beschikbaar verval in de hoofdleiding. In Figuur 30 is eend dergelijk alternatief weergegeven.



Figuur 29 Conventionele huisaansluiting loodrecht (89°) op de hoofdleiding



Figuur 30 Alternatieve configuratie van een huisaansluiting met een liggende uitvoering.

De alternatieve aansluiting is liggend, waardoor er op de hoogteligging van de leiding kan worden gewonnen. Gebruikelijk is dat de huisaansluiting van het riool boven de gas- en waterleiding wordt gevoerd. De waterleiding heeft een dekking van 1 meter, waarmee de huisaansluiting van het riool een dekking zal hebben van ongeveer 80 cm (110 mm leiding en enige ruimte tussen de waterleiding en de rioolhuisaansluiting.) Gerekend van de onderkant van de rioolleiding en een dekking van 1 meter op de rioolleiding ligt de BOB dan op 1,1 meter beneden maaiveld. In het model van de bestaande leiding ligt de "hoogste" BOB op 1,8 meter beneden maaiveld.

Aangezien het verval een zeer relevante parameter is die de hydraulische prestatie van de leiding bepaalt, is het de moeite om nader onderzoek te doen naar deze alternatieve manier van aansluiten. In het geval van de Danswijk zou het beschikbare verhang hierdoor verdubbelen: van 70 cm naar 140 cm.

7.4 Kosten?

Het resultaat van het terugbrengen van de diameters van de leidingen is samengevat in Tabel 11 op pagina 53. Ruim 10% van de leidinglengte kan worden gereduceerd tot 160 mm en bijna 90% van de lengte kan worden gereduceerd naar 100 mm. Daarnaast kunnen wellicht ook putten kleiner worden gedimensioneerd en in een later stadium ook tracés worden verkort.

Als een materiaal besparing van 5 euro per meter wordt gerealiseerd, kan voor het proefgebied ongeveer € 25.000,= bespaard worden in de aanleg van het systeem. Per i.e. is dat ongeveer 11 euro of per aansluiting 33 euro.

Naast het terugbrengen van de diameter kan ook de lengte van de leidingen worden teruggebracht door de vermazing niet uit te voeren, maar de leidingen als takken naar het hoofdriool te leiden. Hiermee kan ongeveer 10% op de totale leidinglengte worden bespaard.

Het alternatief voor de 'staande' huisaansluiting geeft niet alleen meer verval ter beschikking, maar kan ook de graafdiepte van de leidingen verminderen. Uitgaande van de 'hoogste' BOB van -1,8 meter en een 'laagste' BOB van -2,5 m is de gemiddelde graafdiepte 2,15 meter. In het alternatieve geval is de 'hoogste' BOB -1,1 meter en blijft de 'laagste' BOB -2,5 meter. De gemiddelde graafdiepte in het alternatieve geval is dat 1,8 meter. Dat zou een besparing in graven van 16% geven.

Een ruwe schatting van de totale besparingen komt dan in de orde van 20%.

8 Internationale ontwikkelingen en oplossingen

8.1 De remmende voorsprong

In de westerse wereld is reeds lang geleden gekozen om het hygiënische en het overlast probleem van afvalwater in de stedelijke omgeving op te lossen met een centraal rioleringsstelsel. Dat blijkt een effectieve maar ook veelal kostbare oplossing te zijn. Ook is het huidige systeem niet goed inzetbaar om tot meer duurzame oplossingen voor de genoemde problemen te komen. De duurzaamheid wordt dan vooral bepaald door de mogelijkheden voor het terugwinnen van grondstoffen.

Het eerste grote centrale zuiverings- en rioleringsproject werd in 1858 in Londen gestart na de zogenaamde 'Great Stink' in dat jaar (Black 2008). Een combinatie van het succes van waterclosets met een erg droog jaar waardoor de doorspoeling van de Thames zeer gering was zorgde voor een ernstige vervuiling. Er was een efficiënt transport van excreta naar het oppervlaktewater, maar dat kon dat niet goed verwerken met de (on)voorstelbare stank in de stad. Naast protesten tegen de hoge kosten van het project (3 miljoen pond dat bovendien door een nieuw en onervaren overheidslichaam moest worden besteed) was er ook twijfel over de verspilling van goede grondstoffen. Een gedicht uit die tijd luidt:

*Sewage, O why with rain dilute?
Your rain with sewage, why pollute?
Each will the other spoil;
To mix them is the great mistake;
Your rainfall to the river take,
Your sewage to the soil.*

In de historische ontwikkeling in Engeland in de 19^e eeuw, heeft het 'watergedreven' transport van het vaste menselijk afval het 'gewonnen' van het 'droge' transport. Zoals ook met de drinkwater voorziening heeft deze Engelse oplossing gestaan voor de opzet en uitwerking van de openbare drinkwaternetten en afvalwaternetten. Opmerkelijk is dat in eerste instantie het succes van de water closetten, toiletten, leidingen appendages etc. de aanleiding is geweest voor het aanleggen van een riolering en een waterleiding. Het was dus het comfort dat werd geleverd dat belangrijk was en niet zozeer de hygiëne. Pas veel later is het element van volksgezondheid toegevoegd en heeft de lokale en nationale politiek de verantwoordelijkheid geleidelijk aan overgenomen.

Het ligt voor de hand om deze les mee te nemen in het bepalen van eventuele alternatieven voor de huidige systemen.

8.2 Low cost oplossingen

Een groot gedeelte van de wereld bevolking is verstoken van adequate sanitatie. Het aanbieden van de conventionele oplossing om deze grote groepen van adequate sanitatie te voorzien is geen realistische oplossing. Daardoor zijn verschillende alternatieven ontwikkeld voor alternatieven voor deze problemen. De denkpatronen achter deze oplossingen zijn vooral ingegeven door de noodzaak om kleinschalige oplossingen te vinden die bovendien goedkoop

en onderhoudsarm moeten zijn. Een mooie samenvatting voor deze benadering wordt gegeven door Mara (Mara and Broome 2008). De ontwerpgrondslagen die hij geeft voor wat genoemd wordt 'simplified sewer' passen goed in wat beschreven wordt in hoofdstuk 7 van dit rapport.

In de wereld zijn een aantal van deze alternatieve sanitaties uitgevoerd, en resultaten daarvan zijn gedocumenteerd. In de komende tijd zullen deze gevallen nader worden bestudeerd, met name om het hydraulisch functioneren van de systemen te bekijken. Op voorhand zijn veel van de oplossingen die gekozen zijn niet werkzaam of functioneren na een succesvolle introductie maar een beperkte tijd. Een constatering die Black ook maakt is dat het systeem van watergedreven sanitatie pas na een ontwikkelingsperiode van ongeveer 60 jaar als een succes kon worden aangemerkt (Black 2008). Effectief betekent dit dat er twee tot drie generaties nodig zijn om een nieuw systeem te introduceren. Ervaringen uit ontwikkelingslanden zijn daarom belangrijke leerscholen om dit fenomeen te bestuderen.

Bijlage I SIMSEM

Inleiding

Door stijgende energiekosten en klimaatveranderingen staat de (Nederlandse) waterketen/waterindustrie voor de uitdaging om duurzaamheid en klimaat neutraal opereren na te streven. In de riolering- en afvalwatersector zijn een aantal initiatieven gestart, zoals het terugwinnen van warmte uit het riool, hergebruik van afvalwater, terugwinnen van nutriënten uit afvalwater en het reduceren van broeikasgasemissies. Tevens wordt ernaar gestreefd om de kwaliteit in de rioleringen te verhogen, zoals het verbeteren van het ontwerp van de riolering en standleidingen in hoogbouw om stank- en gezondheidsproblemen te voorkomen. Daarnaast wordt gewerkt aan het efficiënt beheren van de kwaliteit van het oppervlaktewater en zuivering door het voorspellen van de concentratie geneesmiddelen in het afvalwater. In al deze initiatieven worden modellen gebruikt, waarin een aannname wordt gedaan voor de grootte en kwaliteit van de afvalstroom. Een realistische schatting van de hoeveelheid van het afvalwater dat in het riool terecht komt en de temperatuur ervan zal de uitkomsten van de gebruikte modellen verbeteren.

Simulatie van chemische analyse van rioolwater is een nieuwe en zich heel snel ontwikkelende discipline die trends in het gebruik van verdovende middelen (maar ook andere middelen) op het niveau van de gehele stedelijke bevolking bijna real-time in beeld brengt. Door het bemonsteren van een goed gedefinieerde (punt)bron van afvalwater, zoals het influent van een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI), kan de vracht aan verdovende middelen in een gemeente worden berekend aan de hand van concentraties van de drugs of hun omzettingsproducten die na consumptie in het lichaam ontstaan en met urine worden uitgescheiden.

SIMDEUM voorspelt hoeveel koud en warm water in een woning of gebouw op elk tappunt wordt gebruikt. Het model is uitgebreid getoetst aan metingen en geeft realistische voorspellingen van zowel het koud- als warmwaterverbruik. Hiermee heeft SIMDEUM en zijn basis op fysische kennis zich bewezen als model. Wanneer het mogelijk is om met SIMDEUM een dagelijks vraagpatroon te berekenen van het waterverbruik op secondebasis, is het ook mogelijk om een gedetailleerd afvoerpatroon te berekenen: het gevraagde water wordt immers per tappunt ook weer geloosd. De afvoer van het water zal met een andere volumestroom (toilet wordt op een andere manier gevuld, dan dat het water van het toilet afgevoerd wordt) en met een vertraging (een bad loopt op een ander moment leeg dan dat het gevuld wordt) plaatsvinden t.o.v. de aanvoer of watervraag. Dit vergt een aanpassing van SIMDEUM. Het doel is om, op basis van SIMDEUM, een model te ontwikkelen dat berekent hoeveel water per seconde in het riool terecht komt en met welke temperatuur: SIMSEM (SIMulation of SEwage production Model). Met bestaande kentallen kan dan ook de vaste last en de concentratie aan geneesmiddelen en nutriënten berekend worden in de afvalstroom.

SIMSEM handhaaft de structuur en de rekenmethode van SIMDEUM, maar berekent per tappunt niet de vraag naar water, maar de lozing van het water. In eerste instantie wordt SIMSEM ontwikkeld voor huishoudens. In de toekomst kan SIMSEM uitgebreid worden voor overige gebouwen.

Invoergegevens SIMSEM

Invoergegevens: temperatuur en volumestroom

SIMDEUM maakt gebruik van de eigenschappen van het tappunt (volumestroom, duur en gewenste temperatuur) en van de kennis over het waterverbruikend gedrag van de aanwezige gebruikers. In SIMSEM zal het gedrag van de gebruikers t.a.v. een tappunt hetzelfde zijn als in SIMDEUM (tijdstip en frequentie van gebruik), alleen zijn de eigenschappen voor de afvoer per tappunt anders dan voor de vraag/aanvoer van water. Om SIMDEUM aan te passen voor afvoer moeten per tappunt de afvoercharacteristieken in kaart gebracht worden:

1. de lozingsvolumestroom en de duur van lozing (Tabel 8-1); het product is het volume van de afvoer dat gelijk moet zijn aan het volume van de aanvoer;
2. de temperatuur van het geloosde water (Tabel 8-2);
3. het tijdstip van lozen: de vertraging tussen vraag (die nu in SIMDEUM is ingebouwd) en afvoer (Tabel 8-1);
4. vertraging in gebouw van tappunt naar centrale afvoer;
5. bij het berekenen van de totale stroom van afvalwater: mengen van volumestromen met verschillende temperaturen.

Voor de vertaling van deze gegevens naar het simulatiemodel geldt het volgende:

1. In SIMSEM kunnen per tappunt de duur en intensiteit worden aangepast in de invoerbestanden. De verschillen zijn er alleen voor wasmachine, vaatwasser, bad en wc. Voor wasmachine en vaatwasser kan eenvoudig een afvoerpatroon worden ingevoerd. Voor bad en wc kunnen andere tijdsduur en volumestroom worden ingevoerd. Bij een tijdsresolutie van seconden is dit nodig; bij een tijdsresolutie van 5 minuten is de aan- en afvoer van de wc toch gelijk en voor het bad bijna gelijk. Bij een grotere tijdsresolutie kan dus ook gerekend worden met de standaard invoerparameters zonder deze aan te passen voor afvoer.
2. In SIMSEM kan per tappunt de "gevraagde" (verwachte) temperatuur van het geloosde water worden ingevoerd en de temperatuur van het koude water. Aangenomen wordt dat het koude water wordt opgewarmd tijdens gebruik en transport in het huis, naar gemiddeld bijvoorbeeld 20°C. Deze is afhankelijk van het seizoen en van de verblijftijd in de drinkwaterinstallatie. De verwachte temperatuur van het geloosde water van verwarmd water is afkomstig uit metingen. Bij de wasmachine en vaatwasser is de temperatuur van de verschillende wascycli verschillend en daardoor ook de temperatuur van het geloosde water. In SIMDEUM is verondersteld dat de temperatuur van het (geloosde) water gelijk voor de hele lozing, dus niet anders voor de eerste wascyclus en de 2^e en 3^e van de wasmachine en vaatwasser. Dit kan worden opgelost door post-processing in SIMSEM: nadat de simulaties gedaan zijn kan voor de patronen van de wasmachine en vaatwasser de temperatuur worden aangepast voor de 2^e en 3^e wascyclus naar die van het koude water.
3. Voor de meeste tappunten geldt dat het water dat uit de kraan loopt vrijwel direct weer afgevoerd wordt. Voor de wasmachine en vaatwasser geldt een specifiek afvoerpatroon, die bekend zijn bij de fabrikant. Voor bad en afwasteiltje geldt een vertraging. Afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid en de gekozen tijdsresolutie is het interessant om deze vertraging mee te nemen. Een mogelijkheid voor een vertraging is er nu niet in SIMDEUM. Omdat beide waterverbruiken (bad en afwas) maar beperkt bijdragen aan het

totale verbruik en omdat de tijd van het openen van de kraan stochastisch wordt bepaald, lijkt het niet nodig om de softwarecode aan te passen en de vertraging wel mee te nemen.

4. Omdat voor ieder gebouw de lengtes en diameters van de binnenriolering variëren, en omdat niet precies te modelleren valt hoe snel het afgevoerde water de riolering in de straat bereikt wordt dit aspect niet meegenomen. We veronderstellen een instantane afvoer. In werkelijkheid zal dit niet zo gelden, maar wanneer een tijdsresolutie van enkele minuten wordt aangehouden is de aanname wel geldig. Voor de afvoer van huishoudelijk afvalwater wordt uitgegaan van 100 - 150 l per persoon per dag. Het lozingspatroon van huishoudelijk afvalwater zal lijken op het vraagpatroon van drinkwater. De te verwachten afvalwaterbelasting is van belang voor het dimensioneren van rioolstelsels. Voor het in rekening brengen van een stationaire belasting wordt veelal uitgegaan van 10 tot 15 l.inw⁻¹.h⁻¹ over een periode van 10 uur (Spiller, Vreeburg et al. 2015).
5. De sommatie van de temperatuur wordt gedaan op basis van een instantane menging van alle volumestromen met hun temperaturen op basis van een energiebalans.

TABEL 8-1. TIJDSDUUR VAN LOZING, INTENSITEIT VAN DE LOZING EN VERTRAGING VAN DE LOZING TEN OPZICHTE VAN DE WATERVRAAG, PER TAPPUNT. GEARCEERD ZIJN DE VERSCHILLEN MET DE AANVOERPATRONEN.

Tappunt / gebruik		Duur		Intensiteit (L/s)		Vertraging (min)
		μ	pdf	μ	pdf	
Bad (120 L)		2 min	N.A. (vast)	1.0	N.A. (vast)	30
Wastafel	Wassen en scheren	40 s	Lognormaal	0.042	Uniform	0
	Tandenpoetsen	15 s				0
Vaatwasser		Specifiek patroon (3 x afvoer, totaal 19 s, 0.75 L/sec = 14 L)				
Keuken- kraan	Consumptie	16 s	Lognormaal	0.083	Uniform	0
	Afwassen	6 s		1.000		15
	Handen wassen	15 s		0.083		0
	Overig	37 s		0.083		0
Buitenkraan		N.A. (Water wordt niet afgevoerd naar riool)				
Douche	Normaal	8.5 min	χ^2	0.142	N.A. (vast)	0
	Waterbesparende douchekop			0.123		
Wasmachine		Specifiek patroon (3 x afvoer, totaal 67 s, 0.75 L/sec = 50 L)				
WC	6 L stortbak	3 s	N.A. (vast)	2	N.A. (vast)	0
	9 L stortbak	9 s				

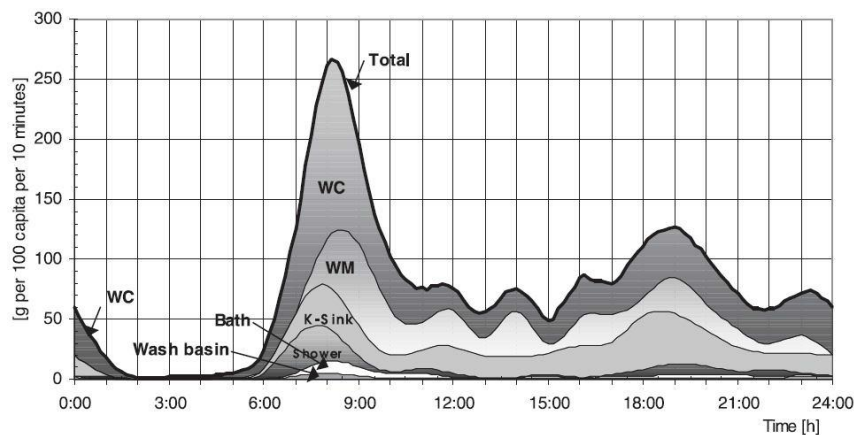
TABEL 8-2. TEMPERATUUR VAN HET GELOOSDE WATER PER TAPPUNT.

Tappunt / gebruik	Temp (°C)	Toelichting	
Bad (120 L)	35	Zie douche	
Was-tafel	Wassen en scheeren	35 Zie douche	
	Tanden-poetsen	KW*	
Vaatwasser	35	Vergelijkbaar met wasmachine (zie bijlage I)	
Keukenkraan	Consumptie	KW	
	Afwassen	45	Met de hand afwassen met 55 °C, na afloop van afwas als water wegloopt (we nemen aan dat in een teiltje wordt afgewast) is nog 45 °C over
	Handen wassen	KW	
	Overig	KW	
Douche	35	douche gemeten 39.5 °C uit de douchekop, 35 °C bij het afvoerputje	
Wasmachine	35 / 45	De wasmachine heeft typisch een wasprogramma op 40 °C en 60 °C. Dit betekent dat in de eerste cyclus het water eenmalig wordt opgewarmd tot de opgegeven temperatuur. De afvoertemperatuur is gemeten als 35 °C en 45 °C respectievelijk voor de eerste afvoer, de 2 ^e en 3 ^e afvoer hebben de temperatuur van het koude water (zie bijlage I).	
WC	KW	Temperatuur van het koude water (KW)	

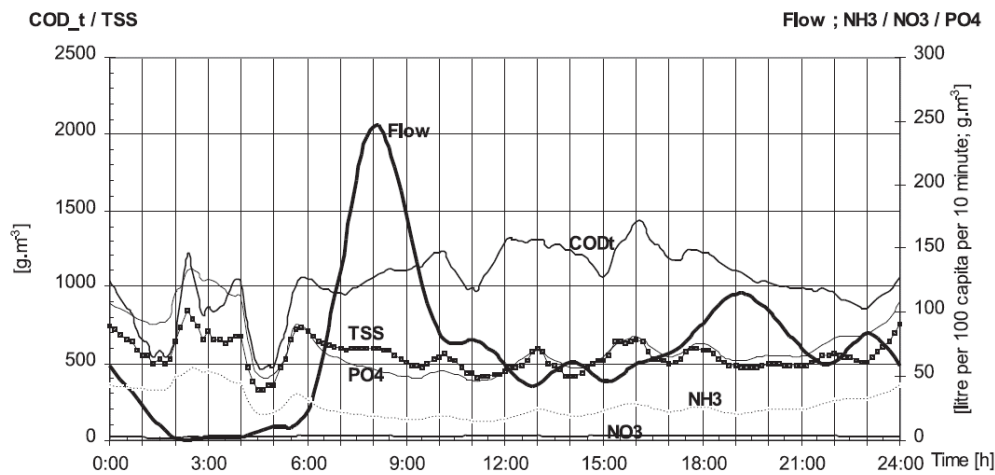
* De temperatuur van het koude water is afhankelijk van de temperatuur van het drinkwater in het distributiesysteem en de opwarming in de installatie, en daarmee van het seizoen.

Invoergegevens: nutriënten

Urine en fecaliën bevatten ca. 90% N, 80% P, 80% K en 70% COD van het huishoudelijk afvalwater (Spiller, Vreeburg et al. 2015). Urine bevat ook medicijnresten en resten van recreatieve drugs. Verschillende studies hebben vrachten en concentraties van nutriënten, zouten en andere elementen gerapporteerd, maar deze getallen zijn behoorlijk specifiek voor de locatie (land) en jaar van de metingen. Vaak worden deze gegevens niet opgegeven voor specifiek gebruik, maar enkel als totaal voor grijs- of zwartwaterstromen (i.j.G. Voorhoeve 2003; Donner, Eriksson et al. 2010). Figuur 8-1 en Figuur 8-2 laten wat voorbeelden zien van afvoer over de dag.



FIGUUR 8-1. GEMIDDELDE COD PER TAPPUNT PER WONINGAANSLUITING EN VARIATIE OVER DE DAG (SPILLER, VREEBURG ET AL. 2015).



FIGUUR 8-2. GEMIDDELDE COD EN ANDERE NUTRIËNTEN PER WONINGAANSLUITING EN VARIATIE OVER DE DAG (SPILLER, VREEBURG ET AL. 2015).

In de literatuur is alleen een overzicht van vrachten en concentraties van nutriënten en andere elementen per tappunt gevonden; waarin een aantal studies wordt samengevat (Eriksson, Auffarth et al. 2002). Opmerkelijk is dat een beperkt aantal studies beschikbaar is vanuit de jaren 1970-1980. De verschillende studies richten zich op diverse doelen en dus variëren de gegevens per referentie. De gerapporteerde categorieën zijn, o.a., fysische, chemische en microbiologische eigenschappen, nutriënten, zware metalen en XOC's (Xenobiotic organic compounds). Dit overzicht laat zien dat de informatie per tappunt zeer beperkt is. Er is dus behoefte aan een betere beschrijving van de samenstelling van de huishoudelijke afvalwaterstromen.

Met SIMSEM is het mogelijk om alle willekeurige stoffen te simuleren. De belangrijkste parameters worden hier beschreven. In dit rapport focussen wij op vier indicatoren als voorbeelden: Totaal Stikstof (TN), Totaal Fosfor (TP), COD en BOD₅. De vrachten en concentraties per tappunten worden berekend, gebaseerd op de overzichten van (Eriksson, Auffarth et al. 2002; ij.G. Voorhoeve 2003), zie onderstaande tabellen. Alles is omgerekend naar g/persoon per dag.

TABEL 8-3. TOTAAL STIKSTOF (TN) IN HET GELOOSDE WATER PER TAPPUNT.

Tappunt / gebruik		Volume L/cap/d	TN		Toelichting
			mg/L	g/cap/d	
Bad (120 L)		2.8	7.5	0.02	Ca. 5-10 mg/L (Nolde 2000)
Was- tafel	Was- sen en sche- ren Tan- den- poet- sen	6.1	7.5	0.05	Geen data beschikbaar hier hetzelfde als douche en wasma- chine aangenomen
Vaatwasser		3	40	0.12	(Siegrist, Witt et al. 1976)
Keu- ken- kraan	Con- sump- tie Afwas- sen Han- den was- sen Overig	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	
		9.8	74	1	(Siegrist, Witt et al. 1976)
Douche		48.6	7.5	0.36	Ca. 5-10 mg/L (Nolde 2000)
Wasmachine		14.3	7.5	0.11	ca. 5-10 mg/L (Nolde 2000); ca. 0-11 NH ₄ -N mg/L (Friedler 2004), NH ₄ -N/TN ratio van 0.7 (Wilsenach and Van Loosdrecht 2003)
WC		36	300	10.8	Ca. 8.5 tot 13 g N per persoon per dag wordt via urine en feces afgescheiden (Spiller, Vreeburg et al. 2015). Met een gemiddelde frequentie van 6 toiletbezoeken per dag is dat ca. 1.8 g N per spoelbeurt. De urine wordt verdund met 3 L (halve spoeling van een 6L stortbak) tot 9 L (volledige spoel- ing van een 9L stortbak). Dus ca. 1.8 g/6L = 0.30 g/L = 300mg/L.
			Totaal	12.2	Total N = 12 g/cap/d (ij.G. Voorhoeve 2003)

TABEL 8-4. TOTAAL FOSFOR (TP) IN HET GELOOSDE WATER PER TAPPUNT.

Tappunt / gebruik		Volume L/cap/d	TP		Toelichting
			mg/L	g/cap/d	
Bad (120 L)		2.8	0.4	0.001	Ca. 0.2-0.6 mg/l (Nolde 2000)
Wasta- fel	Wassen en sche- ren Tanden- poetsen	6.1	14.8	0.09	Geen data beschikbaar hier hetzelfde als keukenkraan aangenomen
Vaatwasser		3	68	0.2	(Siegrist, Witt et al. 1976)
Keu- ken- kraan	Con- sumptie Afwassen Handen wassen Overig	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	
		9.8	9.2	0.09	0.09 g/p/d (Hargelius, et al., 1995)
Douche		48.6	1.9	0.09	Geen data beschikbaar hier hetzelfde als keukenkraan aangenomen

Tappunt / gebruik	Volume L/cap/d	TP		Toelichting
		mg/L	g/cap/d	
Wasmachine	14.3	14.0	0.20	0.2g/cap/d Hargelius et al, 1995; 21 mg/L (Spiller, Vreeburg et al. 2015); N.B. In wasmiddelen wordt tegenwoordig geen fosfaat meer gebruikt.
WC	36	36.1	1.3	0.5 g/cap/d in feces en 0.8 g/cap/d in urine (ij.G. Voorhoeve 2003)
		Totaal	2.0	Total P = 1.7 g/cap/d (ij.G. Voorhoeve 2003)

TABEL 8-5. COD IN HET GELOOSDE WATER PER TAPPUNT.

Tappunt / gebruik		Volume L/cap/d	COD		Toelichting
			mg/L	g/cap/d	
Bad (120 L)		2.8	424	1.2	zoals douche
Wastafel	Wassen en scheren Tandenpoetsen	6.1	433	2.6	(Surendran and Wheatley 1998)
Vaatwasser		3	2675	8.0	Geen data beschikbaar, dit is berekend gebaseerd op wat totaal gerapporteerd is voor NL
Keukenkraan	Consumptie	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	
	Afwassen	9.8	936	9.2	(Surendran and Wheatley 1998)
	Handen wassen Overig				
Douche		48.6	424	20.6	(Surendran and Wheatley 1998); 100-200mg/L (Nolde 2000)
Wasmachine		14.3	725	10.4	(Surendran and Wheatley 1998); Hargelius et al, 1995 12.8 g/cap/d
WC		36	1694	61	(ij.G. Voorhoeve 2003)
			Totaal	113	Total COD = 113 g/cap/d (ij.G. Voorhoeve 2003)

TABEL 8-6. BOD5 IN HET GELOOSDE WATER PER TAPPUNT.

Tappunt / gebruik		Volume L/cap/d	BOD5		Toelichting
			mg/L	g/cap/d	
Bad (120 L)		2.8	216	0.6	Zie douche
Wastafel	Wassen en scheren Tandenpoetsen	6.1	138	10.5	ca. 76 -200 mg/L (Christova-Boal, Eden et al. 1996)
Vaatwasser		3	414	1.2	Vaatwasser 1040 mg/L en keukenkraan 1460 mg/L (Siegrist, Witt et al. 1976). Om aan het totaal 56.5 mg/cap/d te komen, is totaal BOD5 van alle tappunten, behalve vaatwasser en keukenkraan, opgeteld, daarna is de rest verdeeld over de vaatwasser en keukenkraan volgens de ratio gerapporteerd door (Siegrist, Witt et al. 1976)
Keukenkraan	Consumptie	n.v.t.			
	Afwassen	9.8	178	1.7	
	Handen wassen Overig				
Douche		48.6	216	10.5	(Surendran and Wheatley 1998); 100-200mg/L (Nolde 2000)
Wasmachine		14.3	169	2.4	ca. 48 -290 mg/L (Christova-Boal, Eden et al. 1996), gemiddeld 169 mg/L
WC		36	819	29.5	(ij.G. Voorhoeve 2003)
			Totaal	56.5	Total BOD5 = 56.5 g/cap/d (ij.G. Voorhoeve 2003)

Uitvoergegevens SIMSEM

SIMSEM berekent de volumestromen, temperatuur en nutriëntenconcentratie (N, P, BDO5, COD) van de afvalwaterlozingen.

Aanpassingen voor SIMSEM

Pre-processing

SIMDEUM werkt met een .stats bestand als invoer waarin alle statistische gegevens staan over de watervraag per tappunt: penetratiegraad van toestellen, gebruiksfrequentie, volumestroom, gebruiksduur en gewenste temperatuur. Voor SIMSEM kunnen een aantal zaken worden aangepast. Afhankelijk van de gewenste tijdstap is dit wel of niet nodig.

Tijdens een pre-processing stap kunnen een aantal zaken in het .stats bestand worden aangepast. Er is voor gekozen om alleen volumestroom en tijdsduur (gezamenlijk leidend tot een gelijk volume als voor de watervraag) aan te passen voor bad, wc, wasmachine en vaatwasser; de buitenkraan wordt verwijderd (zie Tabel 8-1). De vertraging tussen watervraag en afvoer wordt nu niet in de simulatie meegenomen.

De temperatuur wordt niet in deze stap aangepast.

Post-processing van de data

Nadat SIMDEUM op basis van het (aangepaste) .stats bestand verbruikspatronen heeft gesimuleerd, welke zijn opgeslagen in .house bestanden, vindt er post-processing plaats. In deze stap worden de temperaturen aangepast en worden de nutriënten toegevoegd.

In SIMDEUM is de uitvoer een "flowPattern", met daaronder een volumestroom van de totale watervraag en een volumestroom van de warmwatervraag. Voor de afvoer is deze structuur minder geschikt. Daarom is aan de structuur een eigenschap "temperature" toegevoegd en "nutrientLoad" waarin voor tot maximaal vier verschillende nutriënten de naam van het nutriënt en een belastingspatroon over de tijd is opgenomen (zie bijlage II).

Post-processing voor temperatuur

Per tappunt kan worden meegegeven (flexibel) wat de temperatuur van het afgevoerde water is. Dit kan een enkel getal zijn, of een reeks van getallen waar random uitgetrokken kan worden. Door bijvoorbeeld de reeks [35 35 35 45] mee te geven wordt in 75% een temperatuur van 35 °C toegepast, en in 25% een temperatuur van 45 °C. Voor de verschillende tappunten worden de volgende bewerkingen toegepast:

- De eerste stap is om de temperatuur van het koude water aan te passen; deze zal 18 tot 20 °C kunnen zijn.
- Bad en douche: de temperatuur wordt aangepast aan de opgegeven afvoertemperatuur.
- wc: idem, dit is meestal wel de temperatuur van het koude water, of eventueel enige opwarming in de stortbak.
- Wastafel en keukenkraan: de temperatuur van het verwarmde water (waar in de SIMDEUM resultaten dus een vraag is naar warm water) wordt aangepast aan de opgegeven afvoertemperatuur.
- Wasmachine: de eerste afvoervolumes (er kunnen meerdere gebruiken per dag zijn) worden geïdentificeerd en voor dat volume wordt de temperatuur aangepast aan de opgegeven afvoertemperatuur; de 2^e en volgende afvoervolumes hebben de temperatuur van het koude water.

- Vaatwasser: de eerste en laatste afvoervolumes (er kunnen meerdere gebruiken per dag zijn) worden geïdentificeerd en voor het eerste volume wordt de temperatuur aangepast aan de opgegeven afvoertemperatuur; de 2^e en volgende afvoervolumes hebben de temperatuur van het koude water, en het laatste afvoervolume is 5 °C hoger dan de opgegeven temperatuur (voor het droogproces).

Post-processing voor nutriënten

Per tappunt kan worden meegegeven (flexibel) wat de belasting is van N, P, COD en BDO5 in het afgevoerde water is. Dit is een enkel getal. Voor alle tappunten worden de volgende bewerkingen toegepast:

- Per water use event worden start en einde opgezocht en wordt de duur van de afvoer bepaald. Voor wasmachine en vaatwasser wordt alleen de duur van waterafvoer meegenomen, niet de tijd ertussen wanneer tijdens het wassen geen water wordt afgevoerd.
- Gedurende deze duur wordt de belasting (in g) over de duur van de afvoer gelijkmatige verdeeld.

Validatie SIMSEM

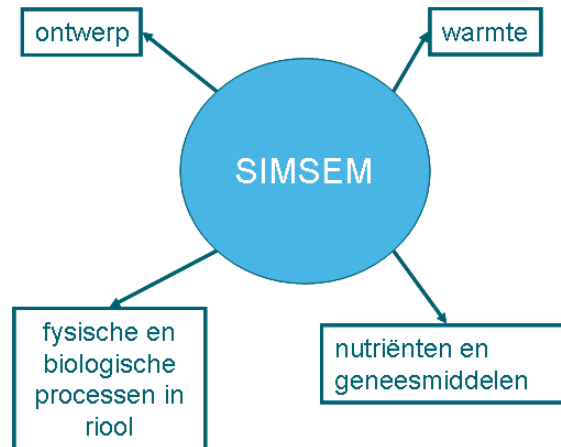
SIMDEUM is gevalideerd voor koud- en warmwaterverbruik, waardoor de fysische basis van het model bewezen is. Omdat SIMSEM dezelfde basis heeft, is het vertrouwen in de resulterende afvalwaterpatronen groot als ook in de temperatuur ervan, onder de aanname dat de watervraag en de afvalwaterstroom zich één op één verhoudt. Het aantal gevallen dat deze aanname niet geldt, zoals bijvoorbeeld planten water geven of water voor de bereiding van voedsel, zal verwaarloosbaar klein zijn; het gebruik van de buitenkraan wordt niet meegenomen in SIMSEM.

De temperatuur van het drinkwater dat via de aansluitleiding een woning in gaat is afhankelijk van de bodemtemperatuur en daardoor van het seizoen. Daarnaast zal er nog opwarming van het koude water in de woning plaats kunnen vinden. Daarom worden er bij voorkeur per woning twee patronen berekend: voor een zomer- en een winterdag. Voor de validatie van de aannames voor de temperatuur, zie ook SIMDEUM-PRO (hoofdstuk **Error! Reference source not found.**).

Voor de nutriënten is het lastig om de validatie van SIMSEM op dit moment te doen; de aannames zijn zeer globaal en eventuele metingen zijn er alleen op het niveau van de RWZI.

Voorbeeld van toepassing SIMSEM

SIMSEM heeft vele toepassingsmogelijkheden, zoals weergegeven in het schema van Figuur 8-3. Het kan een rol spelen in het ontwerp van rioleringen en grijswatersystemen, in het berekenen van de hoeveelheid warmte en nutriënten die teruggewonnen kunnen worden uit het riool, de hoeveelheid geneesmiddelen in het afvalwater en in een klimaatneutrale procesvoering. Concrete mogelijkheden zijn: koppeling aan ProRiool (een simulatietool van TNO), aan SOBEK inclusief een warmtemodel (dit is gedaan in het project “warmte en koude uit drinkwater en riolering” (Arsénio 2013)), ontwikkeling van grijswatersystemen (eventueel in samenwerking met WUR). Daarbij kunnen verschillende scenarioanalyses worden uitgevoerd voor veranderde vrachten of concentratie van nutriënten als gevolg van andere huishoudelijke producten (zeep, wasmiddel, etc.) of door andere watertoestellen, bijvoorbeeld luxe douches of waterbesparende WC's met een andere volume aan water.



FIGUUR 8-3. SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE TOEPASSINGSMOGLIJKHEDEN VAN SIMSEM.

Voor de haalbaarheidsstudie voor de wijk de Oude Dokken in Gent (Eric Oosterom 2013)

is SIMSEM succesvol ingezet. SIMSEM is ingezet om de karakteristieken (volumestroom en de temperatuur) van de afvoerstromen voor vier verschillende wijkscenario's te bepalen. Met deze gegevens kan de opdrachtgever de haalbaarheid van het nieuwe gescheiden sanitatie-concept voor de Oude Dokken onderzoeken.

De gemiddelde temperatuur van de afvoerstromen bedraagt in de alternatieve concepten ongeveer 32-33°C. De hogere lozingstemperaturen van wasmachine en vaatwasser zijn wel te zien in de instantane temperaturen van de afvoer, maar leiden in de gemiddelde temperatuur van de afvoer tot een relatief kleine temperatuurstijging. Tevens is bekend uit ander onderzoek, dat in het riool de temperatuur snel afneemt (Arsénio 2013).

SIMSEM is nog niet ingezet om de nutriëntenlast van de afvalwaterstroom te bepalen.

Bijlage II Proevenreeks transportverschijnselen.

Inleiding

In de herfst van 2014 is een eerste proevenreeks uitgevoerd met een doorzichtige leiding onder vrij verval in de proefinstallatie van Wavin in Dedemsvaart. Doel van de proevenreeks was om de theoretische hydraulische capaciteit van een dergelijke leiding en de invloed van de hellingshoek daarop te demonstreren. Daarnaast is gekeken naar de effecten van verschillende manieren van het maken van een huisaansluiting. Als laatste is een verkenning gedaan naar het ontstaan van verstoppingen.

De conclusie van de proeven is dat het demonstreren van de hydraulische capaciteit en de invloed van de hellingshoek ten dele is geslaagd, maar dat er nog een aantal onvolkomenheden in de setup en de uitvoering zijn geconstateerd. De eerste indrukken van het ontstaan en ontwikkelen van verstoppingen hebben ook nieuwe vragen opgeworpen.

Voor een vervolg proevenreeks zal de nadruk daarom liggen op het verbeteren van de omstandigheden zodat er meer betrouwbaar en reproduceerbaar over de hydraulische capaciteit kan worden geoordeeld. Het hoofddoel van de proeven zal echter liggen op een uitgebreider onderzoek naar de omstandigheden waaronder verstoppingen kunnen ontstaan en zich verder ontwikkelen. Ook de invloed van de diameter op die processen wordt nader onderzocht.

Opzet proeven

Een aantal punten voor de algemene opzet:

- De proeven worden uitgevoerd in een 110 mm leiding en een 200 mm leiding. Naast de hydraulische verschijnselen in de leidingen zal een gedeelte van de proeven gericht zijn op de effecten van de diameter op verstoppingen of blokkades. Naast de kleinere diameters is het dan ook interessant om de effecten van grotere diameters te zien.
- De instellingsmogelijkheden voor de leiding en de meting van de waterhoogten in de leiding moeten stabiel worden gemaakt. Dit zal voornamelijk bereikt worden door een stijver frame te maken, wellicht een vakwerk met een relatief hoge profielhoogte of een slanke I (of H)balk. Het frame zal de leiding voldoende moeten fixeren, maar met ruimte om de waterhoogte te kunnen meten. De ondersteuning van de leiding moet continue over de lengte zijn, maar de verbindingen moeten spanningsvrij kunnen bestaan. Dit kan door de leiding op watervast multiplex te leggen met uitsparingen voor de verbindingen.
- In de leiding wordt een voorziening gemaakt waardoor een verzakking of een hoekverdraaiing in een verbinding kan worden aangebracht. De maximale hoekverdraaiing in een verbinding is 7° . Een aantal verschillende soorten verzakking kan worden bewerkstelligd. Eventueel kan een verzakking ook worden bewerkstelligd door een rechte leiding een negatief verhang te geven.
- De totale lengte van de installatie is 10 meter. De eerste 2 meter kan beschouwd worden als een stabilisatiezone (10-20 maal de diameter)
- De regelmogelijkheden voor de pomp moeten zodanig zijn dat een volumestroom met een nauwkeurigheid van 5-10 l/min kan worden ingesteld.

- Naast de continue wateraanvoer zal er ook een regime met meer variatie worden toegepast om droogvallen van de leiding te simuleren en geringe afvoer.
- Wellicht is het handig om in de 'invoerput' een schot aan te kunnen brengen om de invoer van grotere volumestromen gelijkmatiger in te voeren.
- In de eerste twee meter van de leiding wordt een y-stuk met 45 graden aangebracht om test objecten in te kunnen brengen. De 'poot' van de Y is tegen de stroomrichting in (om objecten te lanceren)
- Aan het einde van de leiding is weer een 90 graden bocht om water te laten weggopen. Vlak daarvoor is een y-stuk met 45 graden om objecten te kunnen opvissen.
- Een opvangbak met maatverdeling aan het einde van de leiding om nauwkeurig de lagere volumestroom te kunnen bepalen (vultijd van de bak)

Schets proefinstallatie

4 hydraulische ondersteuning

Twee toegangspunten rondom het midden om verstoppingen aan te brengen. Aan begin en einde van de buis flauwe Y-stukken om objecten te kunnen lanceren en opvissen.

Toegangspunt om zand in te brengen. In combinatie met een riool ontstoppingsveer (zie later) en een prop of swab is eventueel zand in te brengen of te verwijderen.

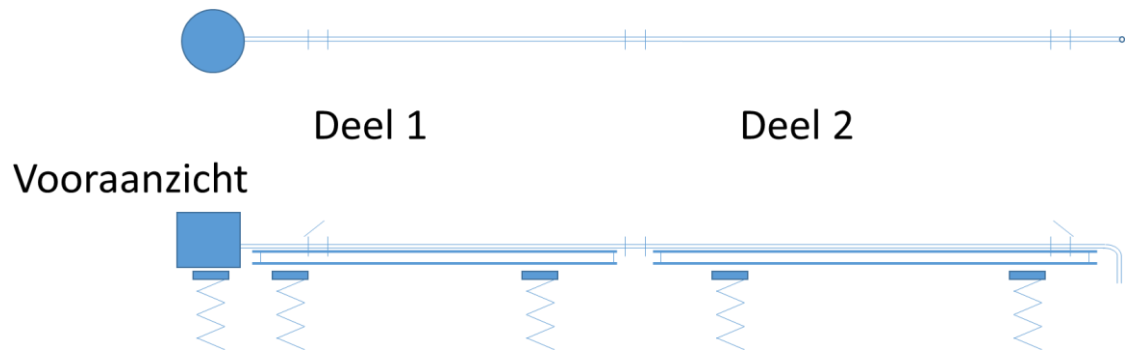
In Figuur 4 een schematische tekening van de beoogde installatie. De verbinding tussen deel 1 en deel 2 is een mof verbinding waar enige hoekverdraaiing in mogelijk is. Bij voorkeur is dit een T-stuk dat eventueel is af te doppen om een drukopbouw in de leiding te kunnen toestaan. De ondersteunende constructie is splitsbaar tussen deel 1 en deel 2 om een verzakking aan te kunnen brengen.

NB: een stijve ondersteuningsconstructie is belangrijk voor het eenduidig aanbrengen van een verhang. Eventueel kan de ondersteuning in het midden ook door één hydraulisch punt worden gedaan. Hierdoor wordt de installatie op drie punten ondersteund.

De verbinding tussen de leiding (deel 1) en de put van waaruit het water wordt voorzien, is bij voorkeur enigszins flexibel. Als dat niet mogelijk is, dan kan de put en de ondersteunende constructie voor de leiding ook op één hydraulisch steunpunt staan. Hiermee neemt het aantal steunpunten af, en dient de 'betrouwbaarheid' groter te zijn.

Deel 1 en deel 2 worden verondersteld om uit één gedeelte te bestaan, maar zullen wellicht vanwege de beschikbaarheid verbindingen kennen. Als er verbindingen moeten worden gebruikt, dan graag met T of Y stukken, zodat de leiding toegankelijk is.

Bovenaanzicht

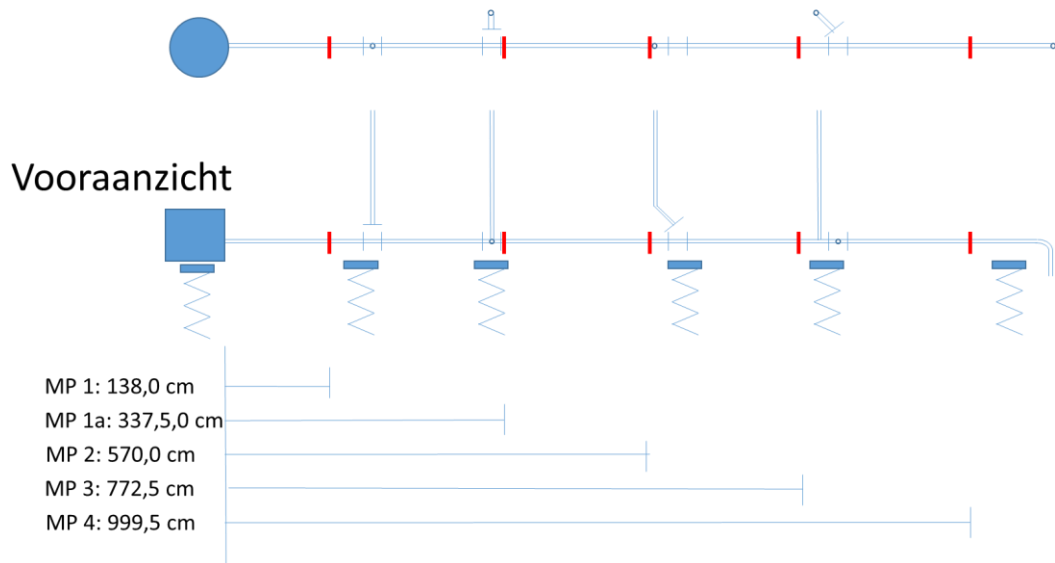


Figuur 4 Schets proefinstallatie

Voor de uitvoering is een riool ontstopping veer noodzakelijk die eventueel ook uitgerust kan worden met een soort kogel of spons. Dit om obstakels die zijn blijven steken los te kunnen maken of om de leiding te kunnen reinigen als er zand o.i.d. zal worden toegevoegd.

Ter illustratie ook een schematische tekening van de eerste proefinstallatie in Figuur 5.

Bovenaanzicht



Figuur 5 Schets eerste proefinstallatie

Diameter en hydraulische capaciteit

De proeven zullen worden uitgevoerd in een doorzichtige 110 mm leiding.

De hydraulische capaciteit wordt bepaald analoog aan de eerste proevenreeks onder hellingshoeken van 1:1000, 1:500, 1:250 en 1:100

Verstopping

Verstopping in riolen wordt veroorzaakt complex mechanisme dat uiteindelijk tot een blokkade van het doorstroomprofiel kan leiden. Een uitgebreidere literatuurstudie zal worden uitgevoerd. Op basis van een voorlopige verkenning wordt geconcludeerd dat het proces van verstopping relatief onderbelicht is in het ontwerp en beheer van riolering. Ook over de effectiviteit van de uitvoering van preventieve acties als schoonmaken is weinig bekend. In de UK wordt in een inventariserende studie in 1998 aangegeven dat blokkades in de vorm van vetten en olies een hoge prioriteit zouden moeten hebben. Toch wordt aangegeven dat schoonmaken niet meer de norm is, ondanks een eerdere rapportage dat schoonmaken een zeer kosten-effectieve wijze was om met overstorten om te gaan (Iasmin, Dean et al. 2014). Vooruitlopend op de genoemde literatuurstudie worden de mechanismen die kunnen leiden tot verstopping onderverdeeld in biologische, chemische en fysische processen.

Biologische processen

In het riool kunnen processen plaatsvinden die leiden tot verschillende schadelijke effecten, vanaf het vrijkomen van giftige gassen tot aan het aantasten van de wand en afdichtingsrubbers. Hoewel de aantasting van de wand kan leiden tot onvolkomenheden, die in zichzelf weer voor problemen zorgen, wordt er vooralsnog van uit gegaan dat dit soort biologische processen geen directe aanleiding geven tot ophopingen van materiaal. Bij de vorming van vet afzettingen spelen wel biologische processen; deze worden echter beschreven bij de chemische processen.

Chemische processen

In eerste instantie wordt naar de vorming van afzettingen gekeken als het uitharden van vloeibaar vet als gevolg van het dalen van de temperatuur. Het blijkt echter veeleer te gaan om een proces van verzeping, waarbij een relatie gelegd kan worden met de hardheid van het water en de clacium houdende vetzuren en calcium zouten in het water en de FOG resten (Fat, Oil and Grease; FOG). Vrij recent heeft onderzoek plaatsgevonden naar de vorming van afzetting van vetten en olie (Williams, Clarkson et al. 2012; Iasmin, Dean et al. 2014). In de eerste studie werd vooral gekeken naar de samenstelling van de FOG afzettingen die gevonden zijn in riolen in Engeland. De suggestie wordt gedaan dat er twee processen spelen. De studie is echter gedaan op lokaties die al bekend stonden als problematisch voor wat betreft afzettingen van vet. Veelal waren deze in omgevingen waar veel horeca activiteit was met niet goed werkende of ontbrekende vetafscheiders. Het typische gehalte van vaste bestanddelen en olie en vet waren veel hoger dan wat normaal wordt aangeboden aan de RWZI's.

De samenstelling van de afzettingen lieten een gehalte aan vetzuren zien die niet alleen te verklaren valt uit het kookproces: slecht een klein gedeelte van de vetzuren wordt dan afgebroken. Het hoge gehalte van relatief korte vetzuren suggereert dat er een biologische activiteit plaatsvindt in het riool die de ketenlengte van de vetzuren verandert (Van C18 naar C16), waarin de *Clostridium perfringens* een belangrijke rol kan spelen. Deze omzetting leidt tot een hoger smeltpunt van het vet en kan daardoor dus afzetten in het water. Naast de biologische activiteit speelt de verblijftijd in het riool een relatief grote rol.

Een andere, nieuwe, relatie wordt gelegd met de hardheid van het water: een toenemende hardheid leidde tot een toenemend gehalte aan Calcium in de afzettingen. Hoe hoger het calcium gehalte, hoe hoger het smeltpunt van het vet en ook de hardheid van de aangetroffen afzettingen.

Deze (bio)chemische processen zouden verder moeten worden onderzocht om gericht naar oplossingen te kunnen zoeken. De suggestie is dat er verschillende mogelijkheden zijn om in te grijpen. Ten eerste is de samenstelling van het afvalwater van belang. In de geciteerde

studies werd vooral onderzoek gedaan naar bekende probleemlocaties die ook nagenoeg allemaal waren te relateren aan lozingen door restaurants of snack bars. Een manier om hier verandering in te brengen is om middels voorlichting en gerichte maatregelen de lozing van vet en olie op het riool te verminderen.

Een tweede factor is de verblijftijd: hoe korter deze is, hoe minder de effecten kunnen optreden.

Uitgangspunt is dat verstoppingen ontstaan op plaatsen waar een discontinuïteit in de leiding aanwezig is. Rondom deze discontinuïteit zal een ophoping van materiaal plaatsvinden dat uiteindelijk tot de verstopping zal leiden.

Fysische processen

Het fysisch proces dat tot verstopping kan leiden, bestaat uit het bezinken en ophopen van materiaal op een zodanige manier dat de doorstroomopening van de leiding ernstig wordt gereduceerd

Verzakkingen worden veel genoemd als oorzaak voor verstoppingen. Het water staat in de verzakking stil waardoor de verzakking wordt 'opgevuld' met materiaal dat zich in het water bevindt. De stroomlijn zal zich langs de ophoping vormen, waardoor de opwerveling van eenmaal opgebouwde lagen niet groot zal zijn. Kenmerkend effect van de diameter van de leiding is dat er in een grotere leiding meer materiaal kan worden opgeslagen, voordat dit tot een afsluiting of een ernstige verkleining van het doorstroomoppervlak zal leiden. Bovendien zal het bij een grotere leiding langer duren voordat de verzakking, al dan niet opgevuld, 'verdrongen' zal zijn. Dit betekent dat het laagste niveau van de onderkant van de leiding minimaal één maal de diameter lager ligt dan het hoogste niveau van de onderkant van de leiding in de benedenstroomse richting. Naast de mogelijke bezinking van materiaal, kunnen zo ook problemen ontstaan met de ontspanning van het riool.

In de proefopstelling kan een verzakking worden opgenomen op een dusdanige manier dat die bij een 100 mm 'verdrongen' zal zijn en bij een 200 mm niet. Als "ophopend" materiaal wordt zand gebruikt dat hydraulisch zal worden aangevoerd.

Het ophopende materiaal is los van samenstelling, zodat het eventueel bij hoge schuursnelheden kan worden opgewerveld en afgevoerd. De veronderstelling is dat het ophopen welliswaar tot een vernauwing in de doorstroomopening zal leiden, maar dit niet volledig hydraulisch afgesloten zal worden. Door de openingen zal het water met hoge snelheid doorstromen en zo een gat open schuren c.q. open zal houden.

Dit mogelijke fenomeen zal zowel in de 110 als de 200 mm worden nagebootst.

Obstakels en objecten

Verstoppingen ontstaan voornamelijk als het doorstroomprofiel van de leiding belemmerd wordt, Dit kan op twee manieren gebeuren, namelijk door een obstakel of door een object. Het verschil is dat een obstakel een vaste blokkade is. Dit kan bijvoorbeeld wortelingroei zijn. Een object is een los voorwerp in de leiding dat verwijderd of verplaatst kan worden met behulp van hydraulische krachten. Volgens deze definitie kan een object een obstakel worden als die op de een of andere manier vastgroeit of vast komt te zitten.

In de proefopstelling zal voornamelijk worden gekeken naar objecten, dwz voorwerpen die hydraulisch verwijderd kunnen worden, maar ook hydraulisch aangebracht kunnen worden.

Zo zal een zandophoping plaatsvinden met zand dat hydraulisch wordt aangevoerd en vervolgens ophoopt. De ophoping in zichzelf kan de hydraulische omstandigheden vervolgens weer beïnvloeden: een verkleining van het doorstroomoppervlak, waardoor de snelheid kan toenemen en het zand (gedeeltelijk) weer kan afgevoerd worden. Het aantreffen van zand of andere objecten in de leiding, behoeft dus niet noodzakelijkerwijs een belemmering te vormen voor het functioneren van het riool.

Krachtspel rond grotere objecten

Het krachtspel rondom een object in een horizontale leiding is getekend in onderstaande figuur.

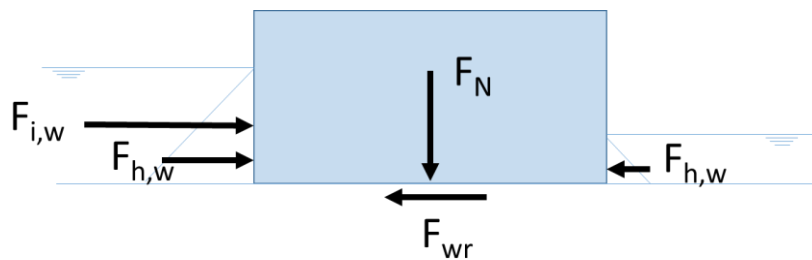


Fig XXX. Schematische weergave van de krachten op een object.

De impuls van het water: $F_{i,w} = \frac{1}{2} C_w \rho (v_w - v_{object})^2 \cdot A$

Waarin

C_w	:	weerstandscoefficiënt
ρ	:	soortelijke massa water
v_w	:	de snelheid van het water
v_{object}	:	de snelheid van het object.
A	:	aangestroomd oppervlak.

De hydrostatische kracht van het water: $F_{h,w} = \frac{1}{2} \rho g (h_{voor} - h_{achter}) \cdot A$

Waarin

G	:	zwaartekrachtsversnelling
A	:	oppervlak van het object, waarbij een staafvormig en regelmatig object wordt verondersteld

De wrijving van het object met de buiswand $F_{wr} = f_{wr} * F_N$

Waarin

f_w : wrijvingscoëfficiënt [-]
 F_N : de normaalkracht loodrecht op het oppervlak als gevolg van het gewicht van het object, eventueel vermindert met de opdrijvende kracht als het object omringd is door water.

Er is ook nog een wrijvingskracht van het water dat langs het object beweegt, maar die wordt verwaarloosd.

Als de impuls en de hydrostatische kracht van het water groter zijn dan de wrijvingskracht, dan zal het object gaan bewegen.

Invloedsfactoren op de beweging van objecten

Als de leiding onder een verhang wordt gelegd, treden er verschillende effecten op:

De snelheid van het water wordt groter → de impuls zal toenemen

Het niveau van het water zal verlagen omdat de snelheid toeneemt → deze tegengestelde effecten op de impulskracht zijn onbekend

De hydrostatische kan iets toenemen omdat door de plaatshoogte aan het einde van het object afneemt.

De gewichtsc component als gevolg van de zwaartekracht verandert: de verticale zwaartekracht wordt ontbonden in een component loodrecht op de bodem van de leiding en een component evenwijdig aan de leiding. De component loodrecht veroorzaakt de wrijvingskracht en deze wordt dus kleiner. De component evenwijdig aan de leidingbodemp werkt in de bewegingsrichting en wordt toegevoegd aan de 'bewegingskrachten'.

Dit betekent dat er een aantal invloeden zijn die het bewegen van de objecten bepaald:

- De snelheid van het water (effect op de impuls kracht)
- De relatie tussen het doorstroomoppervlak en het aangestroomde oppervlak van het object (effect op de hydrostatische kracht: hoe 'vullender' het object is, hoe minder water er langs kan lekken)
- De wrijvingscoëfficiënt tussen het object en de leidingwand
- Het contactoppervlak van het object en de leidingwand (de vorm van het object)
- De soortelijke massa van het object

'Belastend materiaal' c.q. objecten

Om de verstopping te bewerkstelligen zal een reproduceerbare hoeveelheid 'belastend materiaal' gemaakt worden. Het belastend materiaal zal uit drie onderdelen bestaan:

- Testobject
Om het krachtenspel te testen en duidelijk te maken welke effecten de er kunnen optreden als gevolg van de verschillende invloedsfactoren wordt een testobject gemaakt in de

vorm van een kunststof cilinder die kan worden gevuld en afgedopt. Dit kan bijvoorbeeld een stukje leiding zijn in verschillende diameters. Daarnaast een testobject met een andere vorm, afwijkend van de rond vorm om het contact oppervlak tussen object en leidingwand zo klein mogelijk te maken.

De testen met dit object kunnen ook worden gebruikt om de grootte van de verschillende krachten te bepalen en de coëfficiënten te kalibreren.

lengte object minimaal 12 cm (voorkomen dat het 'dwars' gaat)

afdoppen met interne doppen om gladde buitenkant te houden. Doppen moeten verwijderbaar zijn, maar wel waterdicht (de soortelijke massa van het object wordt bepaald door een hoeveelheid water in het stukje leiding te brengen. Anders een reeks van objecten maken met verlijmde doppen.

diameters in beschikbare handelsmaten, oplopend tot 90 mm uitwendig

- **Organisch materiaal**
Dit materiaal heeft een dichtheid van ongeveer 1 en een zekere cohesieve samenstelling. Voor de proeven wordt een mengsel gemaakt van ontbijtkoek en zand dat in een plastic zakje wordt gedaan. Het resultaat heeft een soortelijke massa iets groter dan water en zal in diverse groottes worden gemaakt. (van complete producten tot kleinere fragmenten die mogelijk verstoppend kunnen werken). Het effect van een plattere en vervormbare massa is dat er een groter contact oppervlak is tussen het materiaal en de buiswand. Dit kan een zekere 'kleverigheid' tot gevolg hebben.
- **Toiletpapier**
Toiletpapier blijkt een gunstig effect te hebben op de rheologie van het mengsel. Met andere woorden: met wat papier stroomt het materiaal beter en blijft minder makkelijk steken achter obstakels. Aan de andere kant zal toiletpapier relatief snel uiteenvallen en de kleinere onderdelen kunnen een volledige afsluiting van een beginnende verstopping veroorzaken.
- **Consistent materiaal.**
Dit bestaat uit doeken en propen die hun integriteit in het water zullen behouden en een zekere vorm hebben. Te denken valt aan de vochtige doekjes die in het toilet worden gebruikt, papieren handdoeken en vormvaste dweilen. (analoog aan de eerste proevenreeks)

Proefschema

In de proefinstallatie worden in eerste instantie de hydraulische aspecten bekeken: de capaciteit van de leiding en de mechanische vervuiling c.q. het transportvermogen van de objecten.

Capaciteit

Capaciteitsbepaling leidingen onder verhang 1:1000, 1:500, 1:250 en 1:100

Proevenreeks voor beide diameters met buizen op een stijf frame.

Vervuiling, obstakels en objecten

Een eerste testreeks wordt gedaan met testobjecten. In eerste instantie een horizontale leiding. Het object kan aan het begin via een y-aansluiting (bij voorkeur 45 graden) ingebracht worden.

Proevenreeks:

- Water diepte ongeveer 2 à 3 cm in het begin (20 tot 30% vulling). Volumestroom meten (aflezen meter, wellicht ook opvangen en daarmee meten)
- Aanbrengen van verschillende testobjecten (diameter); objecten worden ingebracht in een stationaire situatie (losgelaten bij het eerste Y-stuk) en de progressie wordt gemeten. De verwachting is dat het drijvende object gewoon wordt meegevoerd terwijl bij zwaarder wordende objecten het 'hortend en stotend' zal gaan. Het object zal zinken, waardoor het een obstakel gaat vormen en er stuwing zal gaan plaatsvinden. Daardoor neemt de hydrostatische kracht én de impulskracht toe en kan het weer een stukje verder komen, etc. Als een object blijft steken, kan het flow regime worden opgevoerd, waardoor de hydrostatische en impuls kracht weer zullen toenemen, etc.

De meetparameters zijn de tijd die een object erover doet om een zekere afstand te overbruggen en de afstand van eerste 'stranding'.

- o Soortelijke massa minder dan 1 (drijvend voorwerp)
- o Soortelijke massa oplopend in stappen van 0,05 of kleiner. (0,90, 0,95, 1,00, 1,05, 1,10, etc tot het object blijft steken). Het is handig om een reeks van gelijksoortige objecten met verschillende soortelijke massa geprepareerd te hebben.
- Zelfde regime, maar nu met een verhang (1:1000, 1:500, 1:250, 1:100) etc.

Inbouwen van obstakel in een rechte leiding:

- Via een toegangspunt in de leiding (T-stuk) een obstakel inbrengen waarachter materiaal kan blijven 'steken'. Hiervoor wordt een combinatie van consistent materiaal en organisch materiaal gebruikt. Het obstakel is een stok of een plaat die rechtop in de leiding wordt aangebracht (en kan worden verankerd aan het T-stuk). Er zijn obstakels van verschillende dikte die in een oplopende reeks kunnen worden aangebracht. Het aanvoeren van materiaal kan in verschillende hydraulische regiems worden gedaan: In eerste instantie worden de regiems aangehouden waarbij objecten met een soortelijke massa van 1,1 net niet bleven steken.

constante hoge stroming, lage stroming en intermitterend, waarbij bewust naar een maximale verstopping wordt gestreefd. (dus langzaam aanstromen en laten 'aanslibben' eventueel extra papier toevoegen om 'de gaatjes te dichten')

De opbouw van de verstopping wordt onder verschillende hellingshoeken uitgevoerd: Bij een flauwe hellingshoek wordt naar het meest effectieve 'verstoppingsregiem' gezocht en dit wordt vervolgens toegepast onder dezelfde omstandigheden, maar een andere (steilere) hellingshoek. (Het horizontale regime heeft hier geen zin, omdat de objecten moeten worden aangevoerd)

Obstakels in verzakte leiding:

De verzakking in de leiding wordt aangebracht door een hoekverdraaiing in het midden van de leiding aan te brengen.

Eerst wordt de reeks met de testobjecten uitgevoerd (het laatste stukje dan 'heuvelop')

- Via een toegangspunt in de leiding wordt een hoeveelheid zand ingebracht dat nagenoeg de leiding verstopt.

Tijdens een eerste proevenreeks wordt geobserveerd hoe dit obstakel 'stand houdt' onder verschillende hydraulische regimes (bijvoorbeeld 2 aansluitingen, 10 en 50 aansluitingen of meer).

Bij het regime waarbij het obstakel stabiel is, wordt nu een reeks van belastende materialen ingevoerd (Bijvoorbeeld 5 artificiële uitwerpselen, halve rol toiletpapier en een aantal papieren handdoeken).

Bijlage III Referenties

- Ackres, J. C., D. Butler, et al. (1996). Design of sewers to control sediment problems. CIRIA.
- Arsénio, A. M. (2013). Lifetime Prediction of PVC Push-fit Joints. PhD, TU Delft.
- Black, M. (2008). "The experience of the first sanitary revolution: Are there lessons for today's global sanitation crisis?" Waterlines 27(1).
- Blokker, E. J. M. (2010). Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks. PhD, Delft University of Technology.
- Blokker, E. J. M., H. Beverloo, et al. (2011). "A bottom-up approach of stochastic demand allocation in a hydraulic network model; a sensitivity study of model parameters." Journal of Hydroinformatics 13(4): 714-728.
- Blokker, E. J. M., S. G. Buchberger, et al. (2008). "Importance of demand modelling in network water quality models: a review." Drink. Water Eng. Sci.(1): 27-38.
- Christova-Boal, D., R. E. Eden, et al. (1996). "An investigation into greywater reuse for urban residential properties." Desalination 106(1): 391-397.
- Donner, E., E. Eriksson, et al. (2010). "Presence and fate of priority substances in domestic greywater treatment and reuse systems." Science of the Total Environment 408(12): 2444-2451.
- Eric Oosterom, R. H. (2013). Riolering in beeld, Benchmark rioleringszorg 2013. Ede, Nederland, Stichting Rioned.
- Eriksson, E., K. Auffarth, et al. (2002). "Characteristics of grey wastewater." Urban water 4(1): 85-104.
- Friedler, E. (2004). "Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse possibilities." Environmental technology 25(9): 997-1008.
- lasmin, M., L. O. Dean, et al. (2014). "Factors that influence properties of FOG deposits and their formation in sewer collection systems." Water Research 49(0): 92-102.
- ij.G. Voorhoeve, A. J. v. d. K. (2003). Rioolvreemd water, Onderzoek naar hoeveelheden en oorsprong afvalwater. STOWA. Utrecht, STOWA.
- Luijtelaar, H. v. and A. C. J. Koot (1982). "Wandschuifspanning en vulhoogte als functie van de afvoer in gedeeltelijk gevulde leidingen." H2O 15(12): 302-307.
- Mara, D. and G. Broome (2008). "A return to basics to benefit the poor." Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Municipal Engineer 161 ME4(december 2008): 231-237.
- Nolde, E. (2000). "Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings—over ten years experience in Berlin." Urban water 1(4): 275-284.
- Rioned (2009). Riool in cijfers 2009-2010. Rioned.
- Rioned (2014). Riolering in beeld, Benchmark 2013. Ede, Rioned.
- Siegrist, R. L., M. D. Witt, et al. (1976). The characteristics of rural household wastewater, Small Scale Waste Management Project, University of Wisconsin--Madison and University of Wisconsin--Extension.
- Spiller, M., J. H. G. Vreeburg, et al. (2015). "Flexible design in water and wastewater engineering - Definitions, literature and decision guide." Journal of Environmental Management 149: 271-281.
- Surendran, S. and A. Wheatley (1998). "Grey - water reclamation for non - potable re - use." Water and Environment Journal 12(6): 406-413.
- Veldhuis, M. C. t. (2010). Quantitative risk analysis of urban flooding in low land areas. PhD, TU Delft.
- Voorhoeve, J. G. and A. J. v. d. Kerk (2003). Rioolvreemd water. STOWA, STOWA.
- Vreeburg, J. H. G. (2015). "Proefopstelling transport vrij verval leiding."
- Vreeburg, J. H. G. (2015). Proefopstelling vrij verval leiding.

- Vreeburg, J. H. G., E. J. M. Blokker, et al. (2009). "Velocity based self cleaning residential drinking water distribution systems." Water Science and Technology **9**(6): 635-641.
- Williams, J. B., C. Clarkson, et al. (2012). "Fat, oil and grease deposits in sewers: Characterisation of deposits and formation mechanisms." Water Research **46**(19): 6319-6328.
- Wilsenach, J. and M. Van Loosdrecht (2003). "Impact of separate urine collection on wastewater treatment systems." Water Science & Technology **48**(1): 103-110.
- Worst, W., F. Clemens, et al. (2012). "Een perspectief voor hemelwatersystemen." WT-Afvalwater(6).