

BTO 2017.019 | april 2017

BTO rapport

Verkenning van flexibele
assets voor een
veerkrachtig
drinkwaterdistributienet:
het slang-in-leiding
concept

BTO

Verkenning van flexibele assets voor een veerkrachtig drinkwaterdistributienet: het slang-in-leiding-concept

BTO 2017.019 | april 2017

Opdrachtnummer

401304

Projectmanager

drs. Nellie (P.G.G.) Slaats

Opdrachtgever

BTO – Speerpuntonderzoek Brabant Water

Kwaliteitsborger(s)

dr. ir. Mirjam (E.J.M.) Blokker

Auteur(s)

dr. Joost (J.R.G.) van Summeren

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.
Een jaar na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie

dr. Joost (J.R.G.) van Summeren
T +31 30 606 9667

E Joost.van.Summeren@kwrwater.nl

Keywords

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



Watercycle
Research
Institute

BTO 2016.083 | Oktober 2016 © 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.

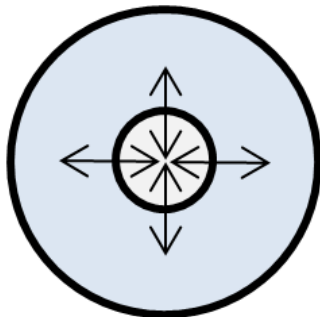
BTO Managementsamenvatting

Verder onderzoek naar haalbaarheid slang-in-leiding-concept voor flexibele distributie van drinkwater geadviseerd

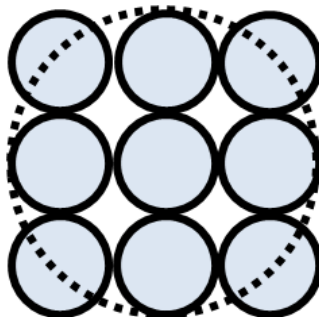
Auteur dr. Joost (J.R.G.) van Summeren

Brabant Water verkent de mogelijkheden voor een distributiesysteem dat (abrupte) veranderingen in de watervraag kan opvangen en tegelijkertijd grip houdt op de hydraulische omstandigheden (snelheid, verblijftijden, drukniveaus) in het leidingnet. Drie concepten zijn beschreven, waarvan één –het slang-in-leiding-concept– nader is geïnventariseerd. Een analyse toont dat met dit concept een substantiële verkleining van de leidinginhoud mogelijk is, waarbij de snelheid en drukval toenemen. Er is nog aanvullende kennis nodig om dit concept goed op waarde te schatten. Die kennis kan bijvoorbeeld worden opgedaan met een proefopstelling en een stresstest. In dit onderzoek zijn de aandachtspunten beschreven met betrekking tot technische uitvoerbaarheid, mogelijke vervuilingrisico's en financiële of strategische meeropbrengsten. Over geschikte en veilige materialen voor een flexibele slang en de beheersbaarheid van de slangdiameter is overleg met materiaalfabrikanten nodig.

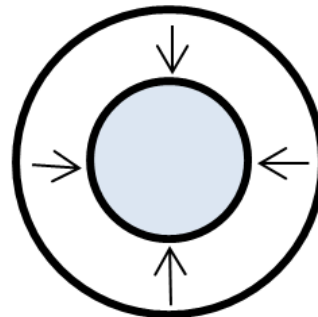
a) Slang-in-leiding



b) Parallelle leidingen



c) Gefaseerde vervanging



Concepten voor flexibele assets, schematisch weergegeven als dwarsdoorsneden van een transportleiding, met in blauw drinkwater: (a) slang-in-leiding, (b) parallelle leidingen en (c) in situ diameterverkleining. Slang-in-leiding is als meest veelbelovende optie nader onderzocht.

Belang: een flexibel distributienetwerk dat bestendig is tegen toekomstige veranderingen in waterverbruik

Brabant Water verwacht in de nabije toekomst abrupte, permanente veranderingen in de lokale watervraag. Zulke veranderingen kunnen bijvoorbeeld het gevolg zijn van ontwikkelingen (expansie of krimp) bij industrie of andere grootverbruikers, zoals ASML in Veldhoven. In een regulier, inflexibel netwerk kunnen abrupte veranderingen ongewenste gevolgen hebben, zoals lage snelheden en lange verblijftijden, met risico's

op bruin water of microbiologische problemen bij laag verbruik. Ook te lage of te hoge drukniveaus (onder de comfortdruk of zo hoog dat ze een bedreiging vormen voor de leidingintegriteit) kunnen problemen opleveren. Inzet van flexibele assets kan een goede voorbereiding vormen op zulke verbruiksveranderingen. Door de effectieve leidingdiameter beheersbaar te maken, is het mogelijk om snelheid, druk en verblijftijd van het water aan te passen aan variaties in de watervraag zonder meteen grootschalige vervangingen of uitbreidingen van het leidingnet te moeten

doorvoeren. Zulke flexibele assets kunnen een inherent duurzaam en veerkrachtig drinkwaterdistributiesysteem opleveren. Om deze redenen onderzoekt Brabant Water de technische mogelijkheden om het leidingnet flexibeler maken.

Aanpak: verkenning van het slang-in-leiding concept: materialen, uitvoering en vervuiling

Eerst zijn drie types flexibele assets geïnventariseerd waarmee de effectieve diameter te beheersen is: het slang-in-leiding (SiL-) concept, een bundel parallelle transportleidingen en simultane diameterreductie voor de gehele ringleiding rond Eindhoven door hierin eerst een kleinere binnenleiding aan te brengen en vervolgens de buitenste leiding af te sluiten. Deze opties zijn als respectievelijk a, b en c weergegeven in de figuur. Van deze drie opties bleek het SiL-concept het meest veelbelovend. Dit concept is daarom vervolgens in meer detail uitgewerkt. Met een theoretische analyse is de invloed van een diameter-verkleining op de drukval en snelheid onderzocht. Ook is onderzocht wat geschikte materialen zijn, of deze beschikbaar zijn, wat de aandachtspunten zijn voor technische uitvoering en welke potentiële vervuilingsrisico's toepassing van het SiL-concept met zich meebrengt.

Resultaten: technische uitdagingen en onzekerheden belemmeren inschatting haalbaarheid nog

Er zijn twee potentiële wegen geïdentificeerd waarlangs een SiL-systeem kan bijdragen aan schoon en veilig drinkwater. In de eerste plaats is reductie van bruinwaterisico's mogelijk, omdat met SiL de watersnelheid beter beheersbaar wordt, waardoor minder spui-/schoonmaakacties nodig zijn. SiL kan mogelijk ook leiden tot een reductie van microbiologische risico's door de verblijftijden te verkorten. De haalbaarheid van het SiL-concept is op dit moment echter nog erg onzeker. Materiaalontwikkeling, aanvullend onderzoek, technische uitvoering en aansturing zullen aanzienlijke kosten meebrengen. Ook bestaan er reële, maar nog niet volledig in te schatten risico's op deeltjesvervuiling en microbiologische activiteit. De werking en risico's hangen samen met het

slangmateriaal, maar er zijn geen bestaande materialen gevonden die aan de benodigde rekeigenschappen en kwaliteitseisen voldoen. Daarnaast kost het meer energie om water te transporteren in een SiL-systeem: volgens berekeningen zal een reductie van 50% van de leidinginhoud met een SiL-systeem leiden tot een 30% hogere drukval dan in reguliere leidingen.

Een modelstudie voor vervanging van de transportleidingen rond Eindhoven (concept c in de figuur) wijst erop dat bij gefaseerde vervanging de drukkiveaus niet zo hoog zullen worden dat een gevaar voor de leidingnetintegriteit ontstaat.

Implementatie: eerst proefopstelling en stresstest

Toepassing van een veerkrachtig distributiesysteem in een steeds sneller veranderende wereld is soms een goede oplossing. Ontwikkeling van flexibele assets is dus aan te bevelen. Voor het SiL-systeem is aangetoond dat snelheid en verblijftijd in principe kunnen worden aangepast aan veranderende vraagpatronen. De haalbaarheid is nog onduidelijk vanwege technische uitdagingen, risico's op bruin water en microbiologische problemen en onzekerheden in kosten en opbrengsten. Als eerste stap in een mogelijk vervolgtraject wordt daarom aanbevolen een proefopstelling te bouwen om technische ervaring op te doen en investeringen voor installatie en gebruik in te schatten. Samenwerking met een materiaalfabrikant wordt aanbevolen om een geschikt materiaal voor de slang te ontwikkelen. Ook is een stresstest nodig aan de hand van numerieke berekeningen en op de schaal van een leidingnet te bepalen hoe de opbrengsten, robuustheid, toekomstbestendigheid en meerwaarde uitvallen ten opzichte van bestaande oplossingen.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport: *Verkenning van flexibele assets voor een veerkrachtig drinkwaterdistributiesysteem: het slang-in-leiding concept* (BTO-2017.019).

Meer informatie

dr. Joost (J.R.G.) van Summeren
T +31 30 606 9667
E Joost.van.Summeren@kwrwater.nl

KWR

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands



Watercycle
Research
Institute

Inhoud

1	Introductie	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Concepten voor flexibele assets: Beheersbare effectieve leidingdiameter	5
2	Slang-in-leiding concept	7
2.1	Slang-in-leiding concept uitgelegd	7
2.2	Vulmedium: water	7
2.3	Randvoorwaarden voor slangmateriaal	7
2.4	Effectieve diameter, snelheid en drukval	8
2.5	Invloed op de schaal van een drinkwaterdistributiesysteem	10
3	Inventarisatie van risico's voor de chemische en microbiologische waterkwaliteit	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Potentiële risico's van flexibele materialen	12
3.3	Potentiële risico's als gevolg van onregelmatigheden van het slangoppervlak	13
3.4	Potentiële risico's bij lekkage	14
3.5	Conclusies	14
4	Aandachtspunten voor ontwerp, ontwikkeling en uitvoering	16
4.1	Aandachtspunten voor operatie en energiekosten	16
4.2	Afweging kosten en opbrengsten	17
4.3	Mogelijk ontwikkelingstraject	18
5	Conclusies en aanbevelingen voor vervolgtraject	20
5.1	Conclusies	20
5.2	Aanbevelingen voor mogelijke doorontwikkeling	21
6	Literatuur	32

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Brabant Water verwacht in de nabije toekomst abrupte, permanente veranderingen in de lokale watervraag als gevolg van ontwikkelingen (expansie of krimp) van industrie/grootverbruikers, zoals bijvoorbeeld ASML in Veldhoven. Andere mogelijke oorzaken voor variatie in de watervraag zijn (van kort- naar langdurend): piekverbruik op extreem warme dagen, seizoensinvloeden, meerjarige variatie in demografie en langjarige veranderingen in klimaat. Omdat het leidingnet uit vaste assets bestaat en over het algemeen wordt aangelegd voor een periode van vele tientallen jaren, is het lastig om voorbereid te zijn op veranderingen op middellange of korte termijn. Als echter geen maatregelen worden getroffen, kunnen ongewenste effecten in het omliggende gebied optreden. Zo is van belang dat overal in het leidingnet boven de comfortdruk wordt geleverd, terwijl hoge drukniveaus een bedreiging kunnen vormen voor de leidingnetintegriteit. Tegelijkertijd mogen veranderingen in snelheidspatronen niet tot een verhoogd risico op bruin water of langere verblijftijden tot microbiologische risico's leiden (vanwege langere verblijftijden)¹.

In geval van een structurele *toename* van de lokale watervraag zijn hogere snelheden te verwachten. De leidingen zijn dan echter ondergedimensioneerd wat gepaard gaat met een ongewenste weerstandstoename. In geval van een sterke *verlaging* van de lokale watervraag is er een risico op ongewenst lage snelheden en lange verblijftijden. Om deze effecten tegen te gaan, wordt traditioneel een leiding vervangen. Het is echter duur om leidingen te vervangen voordat de levensduur is bereikt. Tevens zou in geval van toekomstige veranderingen in de watervraag opnieuw moeten worden vervangen. Een voorbeeld van discrepantie tussen leidingdiameter en watervraag is de transportleiding rondom Eindhoven. Deze is aan vervanging toe en het is de wens van Brabant Water om deze terug te brengen naar 600 mm. Deze grootscheepse vervanging zou normaal gesproken gefaseerd worden uitgevoerd. De zorg is echter dat een dergelijke fasering zal leiden tot ongewenst hoge drukniveaus in het distributienetwerk optreden met veel lekkage tot gevolg.

In het licht van bovenstaande zaken, verkent Brabant Water daarom oplossingen die het leidingnet inherent flexibeler maken, zodat de watervraag, druk en snelheid kunnen worden aangepast aan variaties in watervraag zonder grootschalige vervangingen of uitbreidingen van het leidingnet. Hoewel er traditionele methoden zijn om de druk in een voorzieningsgebied te beheersen (zoals reduceerklappen, op/-aftoeren van pompen), biedt een inherent flexibele (effectieve) leidingdiameter (in combinatie met traditionele sturing) nieuwe mogelijkheden om op een veranderende vraag te anticiperen. Het zou een meerwaarde bieden om de beheersbaarheid van volumestromen (ten behoeve van een flexibele watervraag), drukniveaus (ten behoeve van leidingnetintegriteit en bereiken van comfortdruk) en snelheden en verblijftijden (ten behoeve van het verlagen van bruinwaterisico's) te vergroten. Er wordt in dit onderzoek uitgegaan van distributiegebied Eindhoven omdat dit een uitdagend gebied vormt: (i) er wordt een grote variatie in toekomstige vraag voorzien, (ii) het is een uitdagend gebied om druk boven comfortniveau

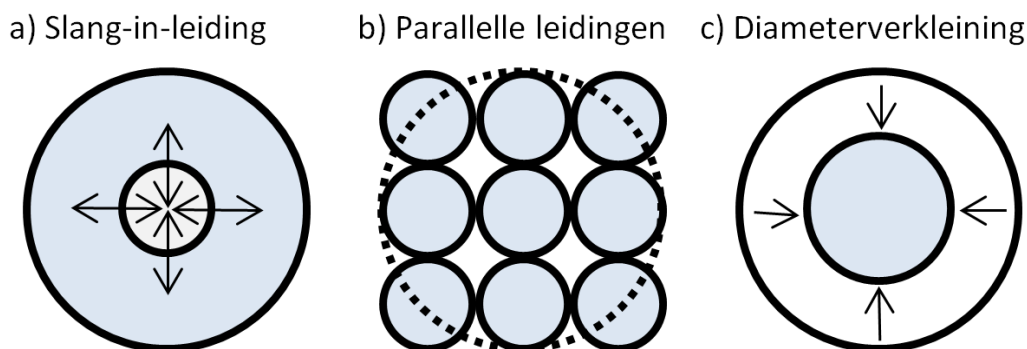
¹ Voor distributieleidingen is aangetoond dat risico's op accumulatie van deeltjes en bruinwaterincidenten verkleinen wanneer dagelijks voldoende hoge snelheden op treden. Een beperking van lange verblijftijden beperkt het risico op negatieve effecten op de microbiologische stabiliteit.

en onder kritische niveaus te houden en (iii) er zijn relatief veel bruinwatermeldingen in dit gebied.

1.2 Concepten voor flexibele assets: Beheersbare effectieve leidingdiameter

In dit onderzoek zijn drie concepten tegen het licht gehouden die allen betrekking hebben op het beheersbaar maken van de effectieve diameters en daarmee het (primaire) leidingnet flexibeler te maken.

Het slang-in-leiding (SiL) concept (Figuur 1a) beoogt de effectieve leidingdiameter aanpasbaar te maken door een uitzetbare slang in een reguliere transportleiding in te brengen en door middel van een drukverandering (ten opzichte van de heersende waterdruk in de leiding) de slang te laten uitzetten of krimpen. In Hoofdstuk 2 wordt het concept beschreven en randvoorwaarden voor vulmedium, materiaalkeuze, weerstand op lokale en netwerk-brede schaal uitgewerkt. In Hoofdstuk 3 worden mogelijk vervuilingrisico's geïnterpreteerd. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van aandachtspunten voor ontwerp, testen in de praktijk en uitvoering van het SiL-concept. In Hoofdstuk 5 staan de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.



FIGUUR 1. DWARSDOORSNEDEN VAN DRIE BESCHREVEN CONCEPTEN: A) SLANG-IN-LEIDING, B) PARALLELLE LEIDINGEN EN C) SIMULTANE DIAMETERVERKLEINING. HET DEEL VAN DE LEIDING DAT DRINKWATER TRANSPORTEERT, IS AANGEGEVEN IN BLAUW.

Twee andere concepten zijn verkend in Bijlage II en Bijlage III. Op basis van deze verkenning is in overleg met Brabant Water besloten om alleen het SiL-concept als meest veelbelovend verder uit te werken.

Het concept van *parallelle leidingen* (Figuur 1b) beoogt de effectieve diameter van een transportleiding aanpasbaar te maken door deze uit te voeren als een bundel van parallelle leidingen met kleine diameters. Met behulp van afsluiters kan het aantal watervoerende leidingen worden afgestemd op de watervraag of de gewenste snelheid. Dit concept wordt beschreven in Bijlage II.

Het derde concept beoogt diameterverkleining door een leiding in een leiding aan te brengen, zodat de diameter van de buitenste leiding (eventueel eenmalig) kan worden teruggebracht naar die van de binnenste leiding (Figuur 1c). Dit kan als oplossing worden verkent voor het verkleinen van de diameter van de transportleiding rondom Eindhoven, waarbij de zorg is dat gefaseerde vervanging tot ongewenst hoge drukniveaus zal leiden (zie §1.1). Het beoogde voordeel van het leiding-in-leiding concept is om in één keer een diameterverkleining te realiseren voor de gehele rondom-leiding door eerst overal een 600

mm leiding in te brengen en aan te sluiten. Pas daarna zou in één keer de buitenste 1000 mm leiding worden afgesloten. In Bijlage III zijn de gevolgen van gefaseerde diameterovergang onderzocht met een numerieke simulatie.

2 Slang-in-leiding concept

2.1 Slang-in-leiding concept uitgelegd

Het slang-in-leiding (SiL) concept beoogt de effectieve diameter van een drinkwaterleiding aanpasbaar te maken door een met een medium te vullen slang in de waterleiding in te brengen (Figuur 1a). Door de druk aan te passen is het volume van de slang en daarmee de effectieve diameter van de leiding te variëren. De beoogde voordelen zijn een betere beheersing van drukniveaus, snelheden en verblijftijden. Het doel is om hiermee beter voorbereid te zijn op plotse toekomstige, lokale veranderingen in de watervraag, zonder dat dure vervangingen nodig zijn van nog werkzame assets. De toepassing richt zich op leidingen met een transportfunctie in het primaire en secundaire deel van het drinkwaterleidingnet.

2.2 Vulmedium: water

Voor de hand liggende media om de slang mee te vullen zijn lucht en water. Lucht in de slang zal bij eventuele lekkage of permeatie door de slang tot ongewenste vorming van luchtbellens leiden. In geval van een leidingbreuk, levert samendrukbare lucht een ontploffingsgevaar. Drinkwater kent deze nadelen niet en daarom is gekozen om uit te gaan van drinkwater als beoogd vulmedium.

2.3 Randvoorwaarden voor slangmateriaal

Het materiaal van de slang is van belang voor het mechanisch gedrag, energieverbruik voor het op druk brengen en vanwege vervuilingrisico's. Vanuit mechanisch oogpunt is het rekgedrag belangrijk aangezien de diameter van de slang wordt bepaald door een balans tussen de druk in de slang enerzijds en de druk in de leiding plus de oppervlaktespanning van de elastische slang anderzijds. Fysische randvoorwaarden voor het materiaal zijn ten minste:

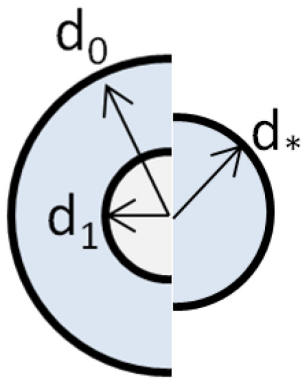
- *Sterkte*: Het materiaal moet bestand zijn tegen herhaaldelijk uitzetten en krimpen gedurende een periode van vele tientallen jaren. Schuren langs de leidingwand en de trekkrachten die het water op de slang uitoefent mogen niet tot snelle degradatie leiden. Een levensduur vergelijkbaar met de levensduur van de leidingen (vele tientallen jaren) is gewenst.
- *Elastisch*: Het materiaal moet na uitrekken terugkeren naar de originele vorm.
- *Rekgedrag*: Het rekgedrag (verband tussen een opgelegde spanning en deformatie) bepaalt de benodigde energie voor het oppompen en op druk houden van de slang. De uitzetting bij een gegeven druktoename moet groot genoeg zijn om bij veilige en economisch haalbare drukniveaus te opereren en klein genoeg om beheersbaar te kunnen opereren dus: niet te grote diameterveranderingen bij zeer kleine variaties in drukverschil tussen slang en leiding.
- *Impermeabel*: Ondoordringbaarheid van vloeistoffen is gewenst om intrusie van water uit de slang in het drinkwater te voorkomen. Permeatie vormt geen probleem als het water in de slang van drinkwaterkwaliteit is, maar in dat geval mogen er tijdens permeatie geen chemicaliën worden opgenomen met een nadelige invloed op de drinkwaterkwaliteit in de leiding.

De SiL-toepassing mag geen risico's voor de volksgezondheid opleveren. Om de *chemische* waterkwaliteit te waarborgen, mogen er geen stoffen in het drinkwater terecht komen via

erosie, oplossing of ontbinding van het slangmateriaal. Tevens mag er geen *microbiologisch* risico optreden. Dit betekent dat het materiaal geen rijke voedingsbodem mag zijn voor micro-organismen en moet voldoen aan de kwaliteitseisen die zijn gesteld in de ministeriële “Regeling materialen en chemicaliën drink- en warm tapwatervoorziening”. Ook de vorm en structuur van de slang is een aandachtspunt. Groeven, vouwen of andere oneffenheden die in de slang optreden zouden tot accumulatie van deeltjes kunnen leiden. Dit is ongewenst, vanwege het risico op bruinwater en microbiologische activiteit. In Hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op vervuilingrisico’s en geschikte materialen voor bovengenoemde randvoorwaarden.

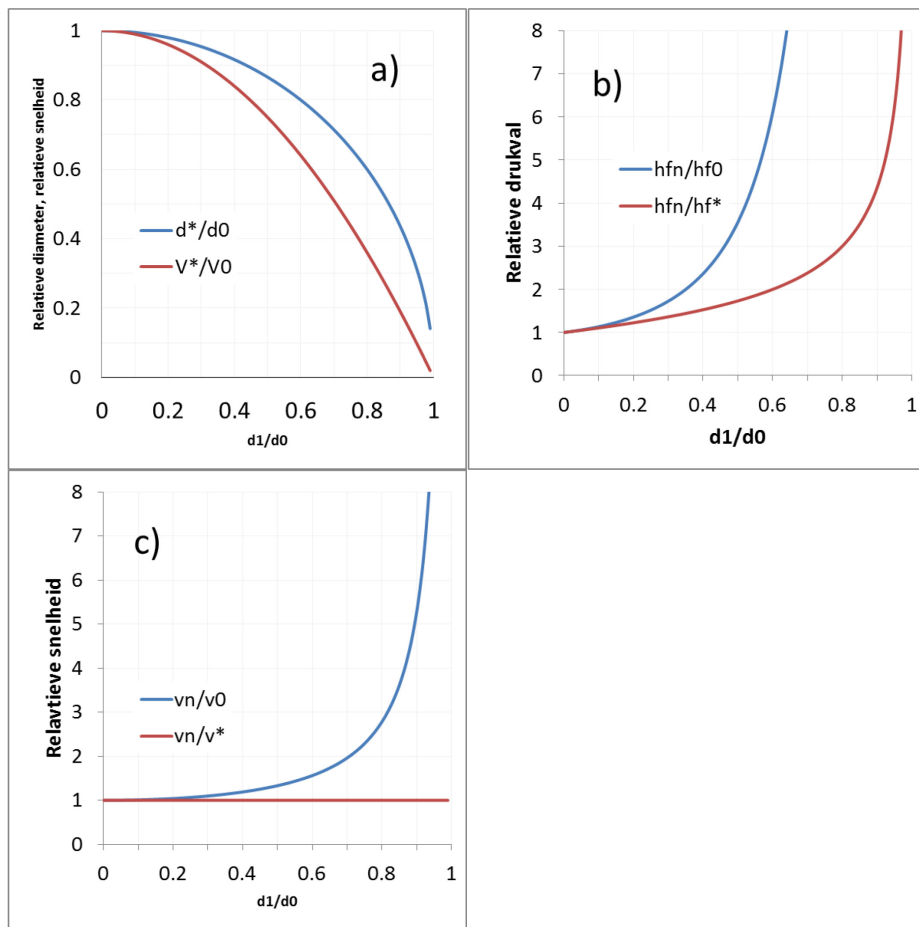
2.4 Effectieve diameter, snelheid en drukval

Om meer inzicht te krijgen in het presteren van het SiL-concept zijn de drukval en snelheid geanalyseerd, gebruikmakend van de theorie beschreven in Bijlage I. Figuur 2 toont (links) een dwarsdoorsnede van het SiL-systeem met leidingdiameter d_0 en slangdiameter d_1 . De SiL-constructie is op te vatten als een alternatief voor een dunnere leiding met dezelfde inhoud. Daarom wordt het SiL-systeem vergeleken met een fictieve leiding met dezelfde inhoud als het SiL-systeem (Figuur 2, rechts). Voor de diameter geldt dan $d_* = \sqrt{d_0^2 - d_1^2}$.



FIGUUR 2. (LINKS) SCHEMATISCHE DWARSDOORSNEDE VAN HET SLANG-IN-LEIDING SYSTEEM, MET LEIDINGDIAMETER d_0 EN SLANGDIAMETER d_1 . (RECHTS) REGULIERE ENKELVOUDIGE LEIDING MET EENZELFDE LEIDINGINHOUD ALS HET SiL-SYSTEEM (DIAMETER d_*).

Figuur 3a toont hoe een toename van de diameterverhouding slang-leiding (d_1/d_0) resulteert in een afname van de effectieve leidingdiameter (d_*/d_0) en leidingvolume (V_*/V_0). De kromming van de curves toont dat een ruime expansie van de slang nodig is om de leidinginhoud substantieel te reduceren: Zo resulteert een expansie tot bijvoorbeeld de helft van de leidingdiameter ($d_1/d_0 = 0.5$) slechts in een afname van 13% van de effectieve diameter en 25% van de leidinginhoud.



FIGUUR 3. A) AFNAME VAN EFFECTIEVE DIAMETER (D^*/D_0 , BLAUWE CURVE) EN LEIDINGVOLUME (V^*/V_0 , RODE CURVE) BIJ TOENEMENDE DIAMETER VAN DE SLANG T.O.V. DE LEIDING. B) TOENAME IN DRUKVAL VAN HET SiL-SYSTEEM T.O.V. EEN VERGELIJKBARE LEIDING ZONDER SLANG (BLAUWE CURVE) EN EEN LEIDING ZONDER SLANG MET VERGELIJKBARE INHOUD (DIAMETER D^* , RODE CURVE). C) SNELHEID IN HET SiL-SYSTEEM TEN OPZICHTE VAN EEN LEIDING MET DEZELFDE DIAMETER ZONDER SLANG.

De aanwezigheid van een slang in de leiding zal een extra weerstand over de wand tot gevolg hebben. Om dit te onderzoeken is de drukval berekend bij verschillende diameters van de slang in het SiL-systeem, ten opzichte van een leiding met dezelfde diameter zonder slang en bij gelijkblijvende volumestroom. Figuur 3b (blauwe curve) toont hoe de drukval over de leiding steeds sterker toeneemt met toenemende slangdiameter, uitgaande van de formules uit Bijlage I. De drukval verdubbelt bij $d_1/d_0=0,35$ en verviervoudigt bij $d_1/d_0=0,51$. Dit is een gevolg van (i) de extra oppervlakteweerstand door de aanwezigheid van de slang en (ii) een snelheidstoename bij afnemende leidinginhoud.

De beheersbaarheid van de gemiddelde snelheden is onderzocht door de relatieve snelheidstoename in het SiL-systeem te berekenen, ten opzichte van een reguliere leiding met dezelfde buitendiameter (Figuur 3c). Bij een inflatie tot 70% ($d_1/d_0=0,7$) is een verdubbeling van de snelheid te verwachten. Een (voldoende hoge) diametervergroting is dus effectief in het verhogen van de lokale snelheid en verkorten van de verblijftijd. Een herhaaldelijke snelheidsverhoging kan worden ingezet om de snelheid boven de (zelfreinigende) snelheid te brengen waarbij deeltjes opwerpen en zo accumulatie van grote hoeveelheden sediment te voorkomen. Het voordeel van het verkorten van de verblijftijd is dat daarmee risico's op microbiologische vervuiling verkleinen. De getoonde relaties geven

vuistregels voor zulke strategieën: Hoever moet de slang worden opgepompt om een voldoende hoge snelheid te bereiken.

Een SiL-systeem moet “concurreren” met een reguliere leiding met dezelfde diameter. Daarom is de drukval in het SiL-systeem vergeleken met een reguliere leiding met gelijke leidinginhoud en snelheid, d.w.z. diameter d_i (rode curve, Figuur 3b). De toename in drukval is dan minder extreem (dan wanneer wordt vergeleken met een slangloze leiding van gelijke buitendiameter), maar nog steeds substantieel (vgl. rode en blauwe curves in Figuur 3b).

Stel bijvoorbeeld, dat de watervraag halveert, en ter compensatie een slangdiameter van $d/d_0=0,7$ wordt gebruikt (Figuur 3c). In dat geval zal de drukval ruwweg 10 maal zo groot worden ten opzicht van de reguliere, slangloze leiding (en ruim 2 maal zo groot als bij een kleinere leiding zonder slang met dezelfde inhoud als de SiL-sectie). Een waterbedrijf moet bepalen of het SiL-concept hiermee nog steeds een aantrekkelijk perspectief biedt.

Aangezien de slang uitzet op basis van een overdruk ten opzichte van de leidingdruk die non-lineair afhangt van de slang-diameter, moet de slang-druk continu worden aangepast aan de variërende leidingdruk, met inachtnaam van veiligheidsnormen voor maximum druk. Vouwen of onregelmatigheden in de slang of positionering uit het midden van de leiding (bovenin, onderop) zal in een extra weerstandtoename resulteren. Tevens is bekend dat de aanwezigheid van de slang de stromingspatronen door de leiding verandert en dit heeft invloed op de drukval (zie Mossa (2007)) voor een beschrijving van de concentrische situatie). Deze invloeden zijn hier niet onderzocht en beter te onderzoeken met een praktijktest.

Samenvattend kan worden gesteld dat een slang in een SiL-systeem een behoorlijke diameter moet hebben om de leidinginhoud substantieel te verkleinen, de snelheid te verhogen en de verblijftijd te verkorten. Dit gaat echter ook gepaard met een substantiële toename in de drukval ten opzichte van een reguliere leiding met dezelfde effectieve diameter (zelfs zonder rekening te houden met onregelmatigheden en afwijkende stromingspatronen). Dit betekent een hoger energieverbruik, bovenop de energie die gepaard gaat met op druk brengen en houden van slang.

2.5 Invloed op de schaal van een drinkwaterdistributiesysteem

De toename in drukval en snelheid berekend in §2.4 geldt voor afgesloten SiL-systemen. Echter, als in de praktijk een SiL-stuk in verbinding staat met een drinkwaterdistributiesysteem is een invloed op de hydraulische omstandigheden op grote schaal mogelijk. Zo bevordert een lokale weerstandstoename in de SiL-sectie een grotere waterstroom langs alternatieve routes. Daarmee neemt de volumestroom door de leiding verder af en moet de slangdiameter verder worden opgeblazen totdat de juiste snelheid wordt bereikt. Als wordt besloten tot drukverhoging bij pompstations om overal de comfortdruk te halen, dan zal tevens de druk elders in het netwerk toenemen. Uit de numerieke simulaties voor Eindhoven gepresenteerd in Bijlage III kan alvast worden vastgesteld dat het terugbrengen van de transportleiding rond Eindhoven van 1000 mm naar 600 mm geen drukniveaus oplevert die een groot gevaar vormen voor de integriteit van transport en distributieleidingen.

Bovengenoemde secundaire effecten m.b.t. veranderingen in stroom- en drukpatronen in het gehele leidingnet verzwakken het doel van flexibele assets om meer grip te krijgen op de snelheden, volumestromen en drukniveaus in het leidingnetwerk.

Als het doel is om permanent verblijftijden te verkorten of snelheden te verhogen, dan toont bovenstaande analyse dat de hoge weerstanden in een SiL-sectie hier een grens aan stelt. De precieze werking van een SiL-systeem is echter situatie- en omgevingsspecifiek en met bovenstaande analyse niet exact in te schatten. Met een numerieke modelstudie voor een specifieke grootverbruiker Eindhoven zou de invloed van een SiL-sectie op grootschalige stromingspatronen kunnen worden nagegaan, voor tot daadwerkelijke aanleg wordt overgegaan.

Een andere interessante toepassing is wellicht om leidingen waar veel bruinwaterklachten worden veroorzaakt door sedimentatie van deeltjes te voorzien van een SiL-systeem en daarmee de snelheid dagelijks (tijdelijk) boven de zelfreinigende snelheid te brengen om zo sedimentvorming te voorkomen.

3 Inventarisatie van risico's voor de chemische en microbiologische waterkwaliteit

3.1 Inleiding

De kwaliteit van drinkwater wordt beïnvloed door organische en anorganische stoffen die vanaf de pompstations het netwerk inkomen of in distributieleidingen ontstaan en microbiologische processen: hechting, aangroei en loslaten van micro-organismen op de materialen. Tijdens distributie staat drinkwater in intensief contact met de oppervlakten van materialen gebruikt in het drinkwatersysteem. Leidingmaterialen mogen geen stoffen afgeven die nadelige gevolgen hebben voor de volksgezondheid, maar het gebruik van synthetische materialen en additieven hebben een potentieel negatieve invloed op de chemische en/of microbiologische waterkwaliteit.

Waterbedrijven in Nederland zijn dan ook gebonden aan specifieke eisen voor gebruik van leidingmaterialen en chemicaliën in contact met drinkwater zoals vastgelegd in de Drinkwaterwet en het Drinkwaterbesluit en in de "Regeling materialen en chemicaliën drink- en warm tapwatervoorziening" (Meerkerk 2013). Voor leidingmaterialen in contact met drinkwater moet een erkende kwaliteitsverklaring worden verkregen die voldoet aan De Regeling waarbij de toelaatbaarheid wordt beoordeeld op toxicologische (evaluatie van stoffen en mogelijke migratie in drinkwater), organoleptische (troebelheid, kleur, geur, smaak) en microbiologische (nagroei) aspecten.

Dit hoofdstuk behandelt mogelijke risico's op chemische of microbiologische vervuilingen waarmee rekening moet worden gehouden bij het ontwerp en de ontwikkeling van een SiL-systeem. Op dit moment is een risico-inschatting alleen mogelijk met ervaringen uit de bestaande drinkwaterpraktijk en mogelijk incompleet.

3.2 Potentiële risico's van flexibele materialen

Vervuilingsrisico's zijn sterk gerelateerd aan materiaalgebruik. Met de specifieke randvoorwaarden voor het slangmateriaal (§2.3) zijn de mogelijkheden van bestaande of nieuw te ontwikkelen materialen nagegaan. Er bestaat een verscheidenheid aan polymeren en elastomeren met elastische eigenschappen voor een specifieke toepassing. Deze rubberachtige materialen hebben een aantal interessante eigenschappen voor de SiL-toepassing. Voorbeelden van materialen zijn:

- Ethyleen-Propyleen-Dieën Monomeer (EPDM) heeft een hoge elasticiteit over een groot temperatuurbereik, en een lange levensduur (>50 jaar). Het wordt op grote schaal geproduceerd, o.a. voor afdichtingstrips en tuinslangen.
- Styreen-butadieën rubber (SBR) wordt op grote schaal geproduceerd voor o.a. autobanden.
- Siliconen rubber: Dit is een chemisch inert elastomeer met het voordeel dat de mechanische eigenschappen erg ongevoelig zijn voor temperatuursveranderingen.

Bij de productie van bovenstaande polymeren wordt de verhouding van monomeren afgestemd op de toepassing. Dit bepaalt de kristalstructuur die van invloed is op o.a. hardheid, dichtheid en doorlaatbaarheid van het eindproduct.

Een groot nadeel van deze rubberachtige materialen is de grote microbiologische risico's die zijn verbonden aan het gebruik van deze materialen (zie Tabel 1). Systematisch onderzoek naar de invloed van materialen op de microbiologische groeipotentie heeft het volgende aangetoond (Van der Kooij and Veenendaal 2007):

- De microbiologische groeipotentie van EPDM en SBR is vele malen hoger dan voor gangbare leidingmaterialen zoals RVS, PVC of PE.
- De groeipotentie van siliconen rubber is lager dan voor EPDM en SBR, maar nog steeds significant hoger dan voor gangbare leidingmaterialen (vergelijkbaar met PP).

Zonder bescherming zijn deze materialen ongeschikt om toe te passen in een drinkwatersysteem. Vanwege de noodzakelijke flexibiliteit enerzijds en de microbiologische veiligheid anderzijds, kan gedacht worden aan een composiet van flexibel materiaal met een beschermende coating. Ook moet het materiaal aan de chemische eisen voldoen, wat betekent dat het materiaal niet mag degraderen of chemicaliën mag afgeven. Een korte inventarisatie in de chemische industrie (SABIC, persoonlijke communicatie) en voedingsindustrie (via Ilse Pieterse, persoonlijke communicatie) heeft echter geen concrete aanknopingspunten opgeleverd voor geschikte bestaande materialen voor het SiL-systeem. Het ligt daarom voor de hand dat mogelijke oplossingen onderzocht moeten worden in een ontwikkelingstraject met een materiaalfabrikant.

TABEL 1. BIOMASSAPRODUCTIEPOTENTIE (BPP) NAAR VAN DER KOOIJ AND VEENENDAAL (2007): VOOR VERSCHILLENDE MATERIALEN, (*) ONGECORRIGEERD EN (**) GECORRIGEERD VOOR GLAS .

Materiaal	BPP* (pg ATP/cm ²)	BPP** (pg ATP/cm ²)
Water	22.4±6.7	0
Glas	45.1±8.8	0
Roestvrij staal	109±11	64
Koper	355±97	310
PVC-U	107±1.7	62
PVC-C	131±7.4	86
PE40	757±124	346
PE80	425±41	712
PE100	713±110	379
Polypropyleen (PP)	442±64	397
Siliconen rubber	391±40	346
EPDMa	19361±4948	19316
EPDMb	7089±2874	7044
Styreen-butadieen rubber (SBR)	46406±9873	46361
PVC-P	39609±6184	39564

3.3 Potentiële risico's als gevolg van onregelmatigheden van het slangoppervlak

Naast risico's die direct zijn verbonden aan het materiaal (zie bovenstaande paragraaf), mogen er geen negatieve vervuiliingsrisico's optreden als gevolg van geometrische onregelmatigheden op het slangoppervlak. Hierbij is te denken aan bruinwaterisico's gerelateerd aan de accumulatie en opwerveling van deeltjesmateriaal en mogelijk gerelateerde microbiologische activiteit. Een micro-fysische beschouwing geeft een aantal nuttige inzichten in de invloed van onregelmatigheden (Van Thienen 2012):

- Er is aannemelijk gemaakt dat bochten geen rol van betekenis spelen in het afzetten van deeltjes.
- Afzetting van deeltjes in groeven is te verwachten, maar opwerveling van deeltjes in groeven is dat niet (omdat een groef zich zal opvullen en mechanisch gezien als onderdeel van de leidingwand zal gaan gedragen). Het is echter nog steeds denkbaar dat groeven opgevuld met deeltjes als biologisch substraat steeds een microbiologisch risico vormen. Bovendien geldt deze conclusie voor een reguliere (starre) leidingwand. Voor een slang die herhaaldelijk uitzet en krimpt, is het niet onaannemelijk dat opwerveling wel optreedt
- Verwijdingen zoals diameterovergangen in het leidingnet kunnen hydraulische recirculatiezones veroorzaken die zich gedragen als een deeltjesval. Eenmaal geaccumuleerde deeltjes kunnen loslaten bij een snelheidsafname. Hierdoor kan de deeltjesconcentratie van het uitstromende water tientallen malen hoger zijn dan van het instromende water. Dit mechanisme is specifiek beschouwd voor diameterovergangen van reguliere leidingen. Rimpels of vouwen in de slang (in gekrompen toestand) zouden mogelijk tot soortgelijke verstoringen in het stroompatroon kunnen leiden en invanging en opwerveling van deeltjes veroorzaken.

Ook de positie van de slang in de leiding (gecentreerd of boven- of onderin de leiding) en het herhaaldelijk raken of schuren van de slang- en leidingwand hebben een waarschijnlijke, maar onbekende invloed op de hydraulische condities en daarmee op deeltjesgedrag, microbiologische processen en de uitwisseling tussen biologische activiteit van de slang en leiding.

Indien groeven, rimpels, vouwen of herhaaldelijk contact met de leidingwand, of nog andere onvoorziene mechanismes significante bruinwater- of microbiologische risico's tot gevolg hebben, dan zouden een belangrijke motivatie voor het SiL-concept ondermijnen, namelijk het verkleinen van bruinwater risico's d.m.v. een snelheidsverhoging boven het opwerveling-criterium of een microbiologische risicoreductie middels een verblijftijdsverkortung. Het optreden van bovenstaande risico's specifiek voor het SiL-concept zou daarom beter moeten worden onderzocht, bijvoorbeeld met een proefinstallatie of praktijktest.

3.4 Potentiële risico's bij lekkage

Om de kwaliteit van het drinkwater te waarborgen mogen er geen vervuilingen van binnenin de slang de leiding binnendringen middels permeatie of lekkage. Hoewel een groot lek mogelijk zal opvallen omdat het SiL-systeem niet meer goed is te sturen, kan een klein lek onopgemerkt blijven. Om risico's uit te sluiten, dient ook het water in de slang aan de kwaliteitseisen voor drinkwater te voldoen. De slang moet daarom gevuld worden met gezuiverd water en dient regelmatig verversd te worden. Permeatie van slang naar leiding is geen probleem indien het water in de slang van drinkwaterkwaliteit is, mits er tijdens permeatie geen vervuiling van chemicaliën plaatsvindt. Een nadeel van verversing is dat er meer water verloren gaat naarmate de verversingsgraad toeneemt.

3.5 Conclusies

Uit de beschouwing in dit hoofdstuk wordt het volgende geconcludeerd:

- Mogelijkheden voor de productie van een flexibel en veilig slangmateriaal moeten nader worden onderzocht, bijvoorbeeld in samenwerking met een materiaalfabrikant. Microbiologische en chemische vervuilingrisico's hangen sterk af van de materiaalkeuze.

- Om vervuilingsrisico's als gevolg van lekkage van de slang te beperken, wordt aanbevolen om water van drinkwaterkwaliteit door de slang te voeren. Het water in de slang moet dus regelmatig worden verversd en hiermee gaat, zonder extra voorziening, drinkwater verloren.
- Risico's als gevolg van deeltjes en (gerelateerde) microbiologische risico's als gevolg van onregelmatigheden in de slang (groeven, vouwen, rimpels, etc.) zijn reëel. Om deze risico's goed in te schatten is nadere toetsing nodig, bijvoorbeeld met een proefopstelling.

Mogelijk zijn er nog andere aspecten die nu nog niet voorzien zijn.

4 Aandachtspunten voor ontwerp, ontwikkeling en uitvoering

4.1 Aandachtspunten: technische uitdagingen, operatie en energieverbruik

Beheersbaarheid slangdiameter. Het beheersen van de diameter van de slang vergt een goede sturing van het drukverschil tussen slang en leiding. In dit drukverschil zullen zich over de lengte van een SiL-sectie kleine variaties voordoen, bijvoorbeeld als gevolg van verbruik en kleine verschillen tussen de slang en de leiding in hoe de druk afneemt met de afstand. Van belang hierbij is hoe de diameter van de slang zal reageren op kleine drukveranderingen in de leiding of in de slang². Om de beheersbaarheid te realiseren is aan een aantal oplossingen te denken:

- *Een meet-regelsysteem.* Monitor de druk in de slang en leiding en de diameter van de slang op voldoende locaties en met een monitorfrequentie die hoog genoeg is om response op drukvariaties in het leidingnet mogelijk te maken. In combinatie met een regelsysteem wordt hiermee een snelle sturing beoogd (denk aan een tijdschaal van maximaal enkele minuten): de slangdruk wordt aangepast aan de lokale omstandigheden om zo de gewenste, instelbare slangdiameter te realiseren. Om bijvoorbeeld voldoende snel te reageren op drukveranderingen samenhangend met de ochtendpiek in verbruik moet worden gedacht aan een tijdschaal van maximaal enkele minuten. Een dergelijk regelsysteem kan ook dienen als event detector bij eventuele lekken of onvoorziene operationele problemen.
- *Inzicht in de druk-diameter respons.* Indien er voldoende inzicht is in de druk in de leiding en in de slang (bijvoorbeeld op basis van een hydraulisch model en beperkt aantal metingen) en kennis van het rekgedrag van de slang kan de gewenste diameter worden geregeld op basis van de instelbare slangdruk. De respons van de slangdiameter op drukverschillen moet bekend zijn, bijvoorbeeld op basis van tests met een proefopstelling. Deze aanpak is goedkoper dan een meet-regelsysteem, maar de werking er van is minder goed te controleren en eventuele lekken of operationele problemen zijn niet direct te herkennen.

Verstopping van aftakken leidingen. Aftakken leidingen zullen situatie-specifieke, aanzuigende werking hebben op een flexibele slang in een aanvoerleiding. In hoeverre de slang daadwerkelijk richting de aftakking beweegt, hangt af van de stijfheid en drijfkracht van de slang die samenhangen met materiaaleigenschappen en omgevingsvariabelen zoals de temperatuur. Om eventuele verstoppingen te voorkomen kan de slang worden verzwaard, verankerd, of kunnen doorlaatbare kappen rond de aansluitende leiding worden aangebracht.

Slangophoping. Bij een lange leidingsectie moet verplaatsing in de stroomrichting en opeenhoping van de slang aan het einde van de sectie worden voorkomen. Of dit plaatsvindt

² Voor een gegeven SiL-sectie is een positieve feedback mogelijk tussen het drukverschil (tussen slang en leiding) en de diameter van de slang: Stel dat lokaal de leidingdruk afneemt ten opzichte van de druk in de slang. Hierdoor zal de slang uitzetten wat volgens de Wet van Bernoulli resulteert in een lokale snelheidsverhoging en afname van de statische druk in de leiding (als de voordruk gelijk blijft). Dit kan een verdere diametervergroting tot gevolg hebben. Dit positieve-feedback-mechanisme wordt tegengewerkt door een toename in de oppervlaktespanning van de slang bij uitzetting. Uiteindelijk stelt zich een evenwicht in, afhankelijk van de materiaaleigenschappen van de slang.

en de doorstroming (deels) blokkeert is hier niet nader geëvalueerd. Een voor de hand liggende oplossing is verankering van de slang aan de leidingwand.

Afvoer van water in de slang. Om de verversing van water in de slang te realiseren, moet worden voorzien in een afsluiter aan het eind van elke SiL-sectie en de mogelijkheid om het water te lozen of af te voeren.

Bochten. In het SiL-systeem kunnen bochten een extra uitdaging vormen: de slang zou sneller kunnen degraderen als gevolg van herhaaldelijk vouwen of schuren tegen de leidingwand. Er zou moeten worden onderzocht of het SiL-concept, eventueel met aanpassingen in leidingbochten, geschikt is voor toepassing in bochten.

Sectielengte. Er moet onderzocht worden wat een haalbare of optimale lengte van een SiL-sectie is en wat de beperkende factoren zijn. Deze sectielengte is van belang voor de haalbaarheid, aangezien voor elke sectie een voorziening voor pompen, afvoer en sturing nodig is.

Energie. Energie-gerelateerde kosten dienen te worden geïnventariseerd. In §2.4 is aangetoond dat de weerstand voor het transport van water groter is voor SiL-systeem dan voor een reguliere transportleiding. Er moet dus met een hogere druk geleverd worden om de druk aan de tap op niveau te houden. Daarnaast is energie nodig om in de slang een overdruk te genereren, naar wens bij te sturen en te verversen om een lange verblijftijd en gerelateerde microbiologische risico's te beperken. Deze inspanning is afhankelijk van de materiaaleigenschappen.

4.2 Afweging kosten en opbrengsten

Met bovengenoemde aandachtspunten in het achterhoofd, zijn er nog veel onzekerheden in de kostenposten die ontwikkeling en implementatie van een SiL-systeem met zich meebrengen. Er moet in ieder geval rekening worden gehouden met volgende kostenposten:

- Onderzoek naar en ontwikkeling van geschikte materialen, mogelijk met een materiaalfabrikant
- Materiaalkosten voor slang, pompen, afsluiters, afvoervoorziening, stuursysteem, sensoren, enz.
- Ontwerp en ontwikkeling van het concept in een proefopstelling.
- Toetsen van werking, sturingsmogelijkheden en vervuilingsrisico's met een proefopstelling
- Opstellen van een business case
- Onderhoud, sturing en vervanging van een SiL-systeem in de praktijk

Investeringskosten moeten worden afgezet tegen de verwachte financiële of strategische opbrengsten. Om de opbrengsten te bepalen moet in een mogelijk vervolgtraject de doelstelling worden omschreven en meetbare prestatie-indicatoren worden geformuleerd. De opbrengsten kunnen samenhangen met één of meer van de volgende aspecten:

- Een verbeterde waterkwaliteit. Een hogere of beter beheersbare snelheid kan mogelijk bruinwaterisico's beperken, wat zich mogelijk vertaalt in een afname van benodigde spui/-schoonmaakacties en een beter klantvertrouwen.
- Een verblijftijdverkortung zou op vergelijkbare manier microbiologische risico's kunnen beperken en het klantvertrouwen verhogen.

De haalbaarheid op lange termijn is met de huidige kennis niet goed in te schatten, daarvoor moeten de kosten en baten op lange termijn worden gekwantificeerd. En om de meerwaarde van het SiL-systeem goed te beoordelen, moeten de investeringen en opbrengsten (financieel of strategisch) worden afgezet tegen die van bestaande methoden met vergelijkbare functies. Zo is het ook mogelijk om risico's gerelateerd aan lange reistijden of lage maximale snelheden te reduceren met bijvoorbeeld spui-acties, leidingvervangingen of herinrichting van het leidingnet.

Een haalbaarheidsanalyse valt buiten de omschrijving van het huidige project. Deze informatie zal gaandeweg een ontwikkelingstraject vollediger worden. Hiermee kan worden toegewerkt naar een business case die inzicht geeft in de meerwaarde van het SiL-systeem, ten opzichte van operatie in een regulier, inflexibel leidingnet. Bij een positieve business case is installatie in het werkelijke leidingnet te overwegen.

4.3 Mogelijk ontwikkelingstraject

Bovenstaande paragraaf maakt duidelijk dat met de huidige kennis voor het SiL-systeem niet goed is aan te geven wat de levensduur, haalbaarheid en financiële of strategische meerwaarde op lange termijn is ten opzichte van gangbare oplossingen. Wel is een beeld te schetsen van een mogelijk vervolgtraject, alvorens installatie in de praktijk te overwegen. De stappen uit Tabel 2 zijn van belang.

In het vervolgtraject wordt het verkrijgen van meer inzicht in met behulp van onderzoek met een proefinstallatie aanbevolen om technische aspecten te onderzoeken (zie Tabel 2 voor verder toelichting). Tevens wordt aanbevolen om de opbrengsten, robuustheid en toekomstbestendigheid van een SiL-systeem te beoordelen. Dit is mogelijk door de analyse op leidingniveau van het huidige onderzoek uit te breiden naar het niveau van een leidingnetwerk. De invloed van één of meerdere SiL-leidingen voor verschillende (toekomstige) levering- en vraagscenario's is numeriek door te rekenen. Deze aanpak is bijvoorbeeld gebruikt bij het beoordelen van de toekomstbestendigheid van drinkwaterdistributiesystemen middels hydraulische stress tests (Agudelo-Vera, Blokker et al. 2016).

TABEL 2. AANBEVOLEN ACTIVITEITEN VOOR DOORONTWIKKELING VAN HET SIL-CONCEPT.

Activiteit
<i>Beslissen over doorontwikkeling op basis van de huidige inzichten.</i> Hoewel een goede inschatting van kosten en baten op lange termijn nog niet mogelijk, is al wel duidelijk dat onderstaande activiteiten een belangrijke investering zullen vragen. Hierover dient Brabant Water een beslissing te nemen.
<i>Ontwikkeling materiaal.</i> Met een materiaalfabrikant mogelijkheden evalueren en een materiaal ontwikkelen wat ten minste voldoet aan de randvoorwaarden van §2.3
<i>Ervaring opdoen met een proefopstelling.</i> Technische aspecten onderzoeken en daarbij in toenemende mate van complexiteit ervaring opdoen: - Beheersing van de diameter van een slang in een leiding. Ook het gedrag in bochten, bij aftakkende leidingen begrijpen en invloed van variërende leidingdruk en temperatuur begrijpen - Indien nodig een meet-regelsysteem installeren en testen om de slangdiameter te sturen - Voorzien in het afvoeren van water in de slang - Degradatie en levensduur van de slang-in-leiding-evalueren - Risico's op chemische en microbiologische vervuilingen evalueren. - Bepalen van het (extra) energieverbruik en inschatten van de energiekosten samenhangend met op druk houden, expanderen en verversen van water in de slang.
<i>Beoordelen van opbrengsten, robuustheid en toekomstbestendigheid.</i> - Op het niveau van een leidingnetwerk de invloed van een SiL-systeem berekenen voor verschillende (toekomstige) leverings- en vraagscenario's met behulp van numerieke simulaties.
<i>Business case.</i> Opstellen van een lange termijn business case met inschatting van kosten (onderzoek en ontwikkeling, aanleg, operatie) en financiële en/of strategische opbrengsten (mogelijke OLM-reductie, waterbesparing, beperken van chemisch, microbiologische of bruinwaterrisico's). Om de meerwaarde te bepalen moeten kosten en opbrengsten worden afgezet tegen die van bestaande oplossingen zoals bijvoorbeeld spuien, leidingvervanging of leidingnet-herinrichting.

5 Conclusies en aanbevelingen voor vervolgtraject

5.1 Conclusies

In dit rapport zijn enkele concepten voor flexibele assets beschreven en één daarvan is in meer detail verkend. Dit zogenoemde “slang-in-leiding”(SiL-)systeem beoogt het inbrengen van een slang in een leiding die kan worden opgepompt met water om daarmee de effectieve diameter van een transportleiding aanpasbaar te maken. Het beoogde voordeel is de leidinginhoud af te kunnen stemmen op een veranderende watervraag (bijvoorbeeld als gevolg van op- of afschalende grootverbruikers) zonder dat dit gepaard gaat met ongewenst lage snelheden of lange verblijftijden. Op basis van de bevindingen wordt het volgende geconcludeerd:

- Een relevante inhoudsafname of snelheidstoename (ten opzicht van een reguliere transportleiding) gaat gepaard met een flinke toename van de slangdiameter en de weerstand en drukval over de leiding (zie §2.4): Een expansie van de slangdiameter tot 50% van de leidingdiameter resulteert in een inhoudsreductie van 25%, een snelheidstoename van 33%, een toename in drukval van ~300%. De toenemende drukval zal extra energiekosten opleveren voor het watertransport per kubieke meter en kan veranderingen in stroompatronen in het leidingnet tot gevolg hebben.
- De SiL-toepassing vereist een flexibel materiaal voor een uitzetbare slang dat tegelijkertijd aan specifieke randvoorwaarden moet voldoen voor de chemische en microbiologische veiligheid, mechanische eigenschappen (elastisch) en sterkte om een levensduur van vele tientallen jaren te waarborgen. Rubberachtige materialen hebben in potentie de juiste mechanische eigenschappen, maar zijn vanwege een hoge microbiologische groeipotentie ongeschikt. Gebruik van composiete materialen met een beschermende coating ligt voor de hand, maar een korte inventarisatie heeft geen concrete aanknopingspunten opgeleverd voor geschikte, bestaande materialen. Oplossingen dienen nader onderzocht te worden, bijvoorbeeld in een ontwikkel-traject met een materiaalfabrikant.
- Er worden nog veel aandachtspunten voorzien voor de technische uitvoerbaarheid van het SiL-systeem (§ 4.1) die nog nadere toetsing vereisen. Deze omvatten:
 - o Beheersing van de slangdiameter waarvoor mogelijk een apart monitor- en meet-regelsysteem nodig is
 - o Verankering of andere maatregelen om verstoppingen van aftakkende leidingen of ophoping van slangmateriaal te voorkómen
 - o Voorzieningen voor het verversen en afvoeren van water in de slang
 - o Bepaling van maximaal haalbare SiL-sectielengtes
 - o Inzicht in energetische inspanningen gerelateerd aan toegenomen weerstand in de leiding, transport door de slang en het op druk brengen en expanderen van de slang
 - o Bepalen van de veroudering en levensduur van het slangmateriaal in de praktijk
 - o Bepalen van chemische en microbiologische risico's en risico's op de bruinwaterincidenten als gevolg van deeltjes ophoping en resuspensie.

- Inzicht in de financiële of strategische meerwaarde. Dit vergt een duidelijke omschrijving van doelen in termen van meetbare prestatie-indicatoren en bepaling van meerkosten en -opbrengsten op lange termijn (ten opzichte van productie, aanleg, operatie en vervanging van reguliere, inflexibele leidingen).
- Resultaten van een numerieke modelstudie voor vervangingsstrategie van een transportleiding rond Eindhoven tonen geen aanwijzingen voor verhoogde drukniveaus die de leidingnetintegriteit tijdens vervanging negatief zouden beïnvloeden, maar voor een completer beeld worden aanvullende berekeningen met gefaseerde vervanging en afgesloten secties aanbevolen.

5.2 Aanbevelingen voor mogelijke doorontwikkeling

Gezien de huidige onzekerheden rond kosten voor doorontwikkeling en uitvoering en rond de daadwerkelijke meeropbrengst en de potentiële chemische, microbiologische, en bruinwater-vervuilingsrisico's, moet worden besloten over een vervolgtraject waarvan in §4.3 een beeld is geschetst.

KWR beveelt aan om –indien doorontwikkeling is gewenst– een proefopstelling aan te leggen voor het opbouwen van expertise en het verkrijgen van inzicht in technische uitdagingen (§4.1) en vervuilingsrisico's (Hoofdstuk 3) en kosten en opbrengsten van het SiL-concept. Om meer inzicht te krijgen in de robuustheid en toekomstbestendigheid en de opbrengsten en meerwaarde op lange termijn ten opzichte van bestaande oplossingen wordt. Tevens wordt aanbevolen om de functie van een SiL-systeem te beoordelen op de schaal van een leidingnetwerk en onder verschillende (toekomstige) leverings- en vraagscenario's te berekenen, met als doel om inzicht te krijgen in de toekomstbestendigheid en de robuustheid en meerwaarde op lange termijn van een SiL-systeem ten opzichte van bestaande oplossingen.

KWR doet de aanbeveling om op basis van bevindingen in een proefopstelling toe te werken naar een business case voor implementatie in de praktijk, om daarmee de financiële, operationele en strategische meerwaarde voor aanleg in de praktijk te bepalen. De centrale vraag hierbij is of de uitvoering van het SiL-concept haalbaar is en daadwerkelijk tot een flexibeler of veerkrachtig drinkwaterdistributiesysteem zal leiden. Aangezien de randvoorwaarden voor een flexibel slangmateriaal als een grote uitdaging wordt ingeschat, wordt aanbevolen om ook alternatieve flexibele assets te beschouwen. Voorbeelden zijn het in dit rapport beschreven concept van parallelle leidingen³ (Bijlage II), of een alternatief SiL-concept waarin de slang (in plaats van de leiding) watervoerend is.

Samenvattend kan gesteld worden dat de haalbaarheid van het SiL-concept nog erg onzeker is, vanwege de technisch uitvoerbaarheid, de huidige onzekerheden in kosten voor ontwikkeling en uitvoering en de onzekere meeropbrengst ten opzichte van gangbare transportleidingen. Voor een mogelijk vervolgtraject wordt aanbevolen om expertise op te bouwen met een proefinstallatie. Hiermee zou beter kunnen worden bepaald of het SiL-concept werkelijk zal resulteren in een veerkrachtiger drinkwaterdistributiesysteem en wat dit betekent voor chemische, microbiologische of bruinwaterisico's en kosten op lange termijn.

³ Bij parallelle leidingen is de totale weerstand hoger ten opzichte van normale leidingen bij de hoogst mogelijke effectieve diameter, maar neemt af bij opeenvolgend sluiten van de leidingen. Voor het SiL-systeem is de (theoretische) drukval juist gelijk aan de normale situatie in geval van maximum diameter en neemt deze toe met afnemende effectieve diameter. In beide alternatieven resulteren in een substantiële weerstandsverhoging ten opzichte van een reguliere, enkelvoudige leiding.

Bijlage I

Analyse drukval voor SiL-systeem

Beschouw een turbulente stroming met snelheid v_o die door een concentrische leiding met diameter d_o beweegt. De standaard uitdrukking voor de drukval als gevolg van weerstand, h_f , wordt berekend door de weerstand langs de leidingwand (τ) over een lengte (L_o) gelijk te stellen aan de druk vermenigvuldigd met het leidingoppervlak (Stephenson 1984) :

$$\tau \pi d_o L_o = \frac{\gamma h_f \pi d_o^2}{4}. \quad (1.1)$$

Dit is te herschrijven als:

$$h_f = \frac{\lambda L_o v_o^2}{2g d_o} = \frac{8 \lambda L_o Q_o^2}{\pi^2 g d_o^5}. \quad (1.2)$$

Met $\gamma = f(\text{Re}, k/D)$, Darcy frictie factor $\lambda = \frac{4\tau}{\gamma} / \frac{v_o^2}{2g}$ en g de zwaartekrachtsversnelling.

Bovenstaande formules zijn te herschrijven voor het SiL-systeem. De diameter in de linkerhand van de bovenste formule verandert van d_o in $(d_o + d_i)$, en het oppervlak verkleint zodat in de rechterhand-term d_o^5 verandert in $(d_o^2 - d_i^2)$:

$$\tau \pi (d_o + d_i) L_o = \frac{\gamma h_f \pi (d_o^2 - d_i^2)}{4}. \quad (1.3)$$

De drukval in de nieuwe situatie is nu te vergelijken met de referentiesituatie voor een enkelvoudige leiding met diameter :

$$\frac{h_{f1}}{h_{f0}} = \frac{v_o^2 d_o (d_o + d_i)}{v_i^2 (d_o^2 - d_i^2)} = \frac{d_o^5 (d_o + d_i)}{(d_o^2 - d_i^2)^3}. \quad (1.4)$$

Er is aangenomen dat de volumestroom gelijk blijft en de snelheid door het SiL-systeem toeneemt ten opzicht van de originele leiding:

$$\frac{v_h^2}{v_o^2} = \frac{d_o^4}{(d_o^2 - d_i^2)^2}. \quad (1.5)$$

Een snelheidstoename (hoger Reynolds) zal voor turbulente stroming een kleine afname van de frictiefactor tot gevolg hebben. De bijbehorende afname van de drukval zal echter klein zijn ten opzichte van de oppervlakte- en snelheidseffect en is daarom verwaarloosd in de analyse. In geval de effectieve diameter is aangepast aan een volumestroom-afname, zodanig dat de snelheid niet verandert t.o.v. de referentiesituatie, zal het Reynolds getal gelijk blijven.

Vergelijken we de drukval met de virtuele leiding met diameter d_* dan wordt de formule:

$$\frac{h_{f1}}{h_{f0}} = \frac{v_h^2 d_* (d_o + d_i)}{v_o^2 (d_o^2 - d_i^2)} = \frac{d_* (d_o + d_i)}{(d_o^2 - d_i^2)}. \quad (1.6)$$

Aangezien de leidinginhoud in beide situaties gelijk is, geldt $v_h/v_o = 1$.

In bovenstaande verwaarlozen we een toename van de drukval als gevolg van de afwijkende stromingspatronen in de SiL geometrie. (beschreven in Mossa (2007) voor de concentrische situatie).

Vouwen of onregelmatigheden in de slang of positionering uit het midden van de leiding (bovenin, onderop) zal in een weerstands-toename resulteren. Deze zijn hier niet beschouwd, en het best te onderzoeken met een praktijktest, zoals nader beschreven in §3.3.

Bijlage II

Meervoudige parallelle leidingen

Deze bijlage beschrijft een flexibele asset waarbij een transportleiding wordt uitgevoerd als een bundel parallelle leidingen, waarbij de volumestroom is af te stemmen op de watervraag en gewenste druk, snelheid en verblijftijd. De beoogde toepassing is gelijk aan die voor het SiL-concept. In deze beschouwing zijn slechts een aantal eerste aandachtspunten aangestipt.

Idee

In plaats van een reguliere, enkelvoudig uitgevoerde transportleiding, wordt voorzien in een bundel van parallelle leidingen met een kleine diameter (bijvoorbeeld 40 mm PVC), zoals schematisch weergegeven in Figuur 1b in §1.1. Met behulp van afsluiters kan het aantal watervoerende leidingen worden ingesteld en daarmee wordt de effectieve leidingdiameter en leveringscapaciteit variabel. Om leveringscontinuïteit te garanderen, worden aftakkende leidingen geplaatst op moffen waar het water van de watervoerende leidingen samenkomt. Door de moffen staan parallelle leidingen in onderlinge verbinding zodat een gelijke kwaliteit en drukniveau van het water in deze leidingen is te verwachten.

Weerstand

Als uitgangspunt beschouwen we (als in Bijlage I) een turbulente stroming met snelheid v_0 door een concentrische leiding met diameter D_0 . De standaard uitdrukking voor de drukval voor een turbulente stroming door een concentrische leiding (Vgl. I.1 en I.2):

$$h_f = \frac{\lambda L_0 v_0^2}{2g D_0} = \frac{8 \lambda L_0 Q_0^2}{\pi^2 g D_0^5}. \quad (\text{II.1})$$

Indien de totale volumestroom wordt uitgesplitst over n leidingen met diameter D_n , dan geldt $D_n = D_0/\sqrt{n}$ en $Q_n = Q_0/n$. Uit bovenstaande formules kan worden afgeleid dat de drukval toeneemt met de wortel van het aantal parallelle leidingen:

$$\frac{h_{fn}}{h_{f0}} = \frac{\sqrt{n}}{\alpha^2}. \quad (\text{II.2})$$

Met n totaal aantal leidingen (watervoerend en afgesloten) en α de fractie watervoerende leidingen (een hele breuk tussen 0 en 1). Bovenstaande eerste-orde benadering verwaarloost een (secundaire) toename van de drukval, via de frictiefactor, als gevolg van een afname van de diameter en het Reynolds getal. Deze benadering laat zien dat er altijd energieverlies optreedt als meerdere leidingen worden gebruikt bij gelijkblijvende volumestroom, maar hoeveel hangt af van de keuze van n en α . (D_n volgt uit de keuze voor n). Ook zijn met deze formules te berekenen hoeveel watervoerende leidingen in gebruik moeten worden genomen om (tijdelijk) aan een snelheidseis te voldoen (bijv. om bruinwaterisico's te beperken of de verblijftijd te verkorten) en wat de bijbehorende drukval is. Dit kan ook worden ingezet met als doel de parallelle leidingen schoon te spoelen door tijdelijk maar één of enkele leidingen op te zetten waardoor een hoge snelheid en schuifspanning optreedt.

In een eerste-orde benadering neemt de drukval toe met de wortel van het aantal parallelle leidingen (bij gelijkblijvende snelheid). De benodigde energie om een gegeven hoeveelheid water door parallelle leidingen te pompen is altijd groter dan voor enkelvoudige leidingen. Het energieverlies is afhankelijk van het aantal watervoerende leidingen.

Aandachtspunten voor ontwikkeling

Energieverbruik. De berekende weerstand toont dat er met parallelle leidingen meer energie nodig is dan in een reguliere leiding om water te transporteren bij een gegeven druk. Deze extra energie is situatie-specifiek (o.a. afhankelijk van het aantal watervoerende parallelle leidingen) en in de meeste gevallen minder dan met een SiL-systeem. Er moet nagegaan worden wat de invloed is op totale energieverbruik en drukniveaus (comfortdruk halen, en piekdrukken voorkomen).

Vervuilingssrisico's:

- Er moet worden nagegaan of stromingspatronen in moffen een risico vormen voor deeltjesophoping/-vervuiling of microbiologische nagroei.
- Er moet nagegaan worden of stilstaand water in niet-watervoerende leidingen een microbiologisch gevaar opleveren. Hoe vaak moet worden doorstroomd om dit te voorkomen? Of volstaat het om afwisselend met andere leidingen te leveren?

Technische complexiteit. Is het gebruik van moffen en op afstand bedienbare afsluiters technisch uitvoerbaar en betrouwbaar? Vormt de levensduur van afsluiters een beperkende factor, in geval van frequent afsluiter-gebruik?

Financiële haalbaarheid. Het van belang de kosten en opbrengsten tegen elkaar af te wegen (zie ook de opmerkingen voor het SiL-systeem, Hoofdstuk 4). Mogelijke opbrengsten zijn het terugdringing van OLM en lagere vervangingskosten. Kostenposten omvatten o.a. materiaal en het installeren van moffen, afsluiters en verbindingen met aftakkende leidingen.

In een eventueel vervolgtraject is met een proefopstelling en (model) berekeningen meer inzicht te krijgen in operationele en technische zaken, vervuilingssrisico's en of het concept rendabel is.

Bijlage III

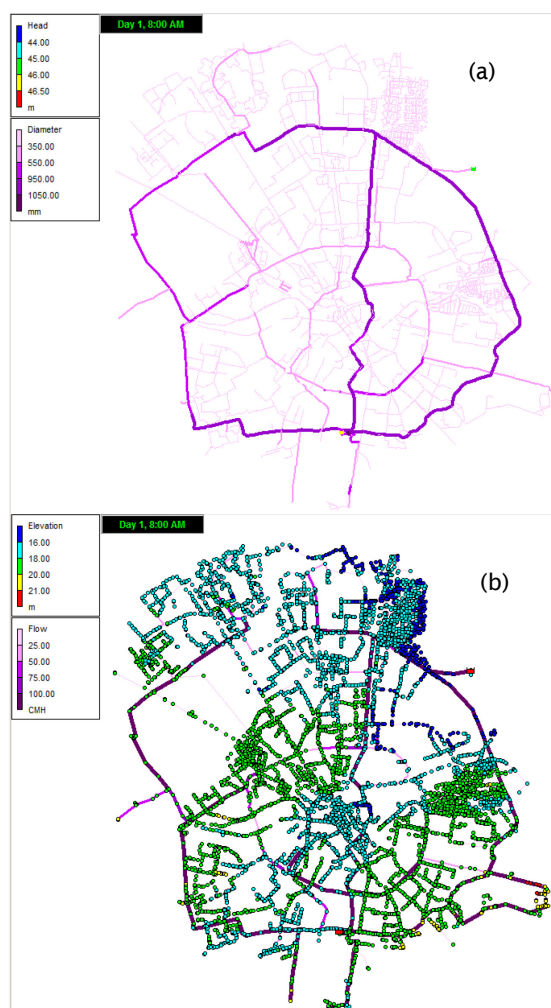
Vervanging 1000 mm transportleiding rond Eindhoven

Invloed van volgorde fasering van vervanging op druk in het leidingnet van Eindhoven

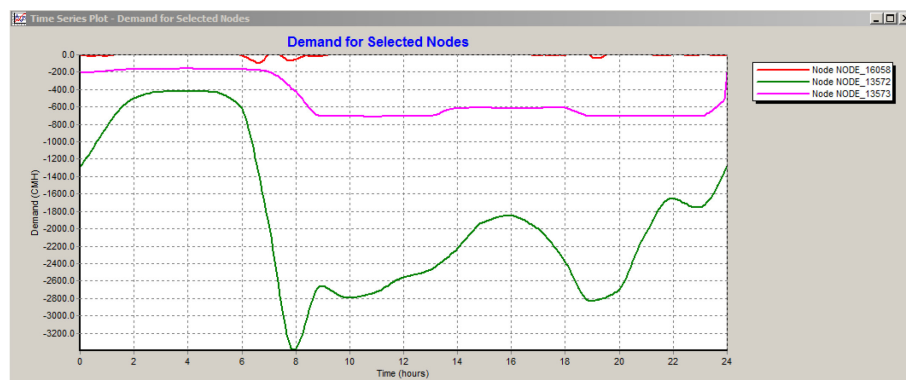
Om de invloed van gefaseerde vervanging op de drukniveaus in Eindhoven te onderzoeken zijn enkele modelstudies uitgevoerd met het EPANET hydraulische pakket en gebruikmakend van (deels) in SIMDEUM berekende stochastische verbruikspatronen. In onderstaande wordt enige voorkennis van de drinkwaterdistributiesituatie in Eindhoven verondersteld.

Referentiescenario

De ~1000 mm ringleiding in Eindhoven wordt gevoed vanuit pompstation Aalsterweg (constante hydraulische drukhoogte van 46,2 meter waterkolom = 462 kPa) en Welschap dat met een vaststaande hoeveelheid levert (Figuur 4). De westzijde van de ring, in de buurt van Welschap, is deels uitgevoerd in 600 mm leiding (Figuur 4a). De ring wordt van noord naar zuid doorkruist door een 1000 mm leiding die ook tot de ring wordt gerekend. Figuur 5 toont dat voor de referentiesituatie pompstation Aalsterweg de bulk van het water levert. Dal- en pieklevering vindt plaats rond 04:00 uur, respectievelijk 08:00 uur 's ochtends. Figuur 4b toont hoe de hoofdstromen vanuit Aalsterweg en Welschap het gebied voeden.

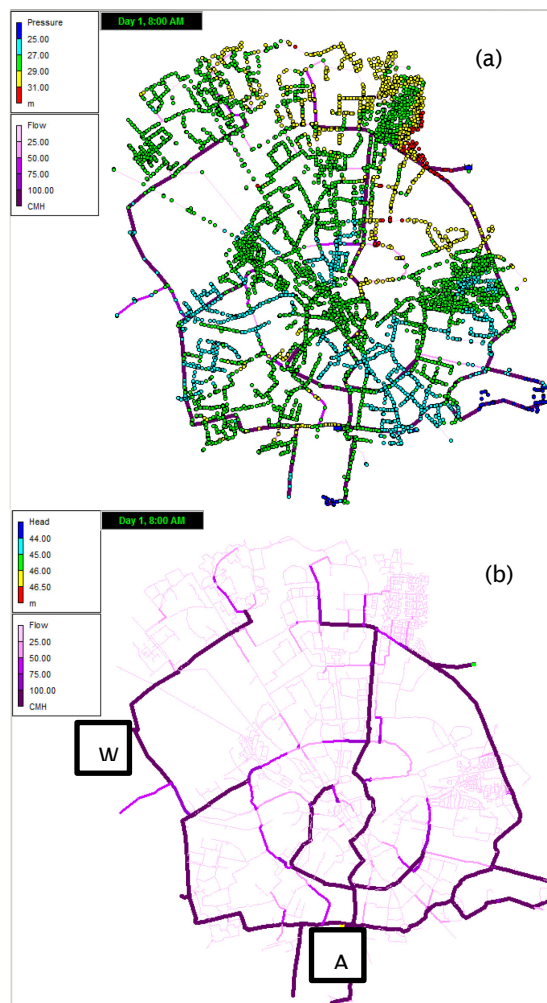


FIGUUR 4. (A) LEIDINGDIAMETERS EN (B) TOPGRAFIE VAN EINDHOVEN.

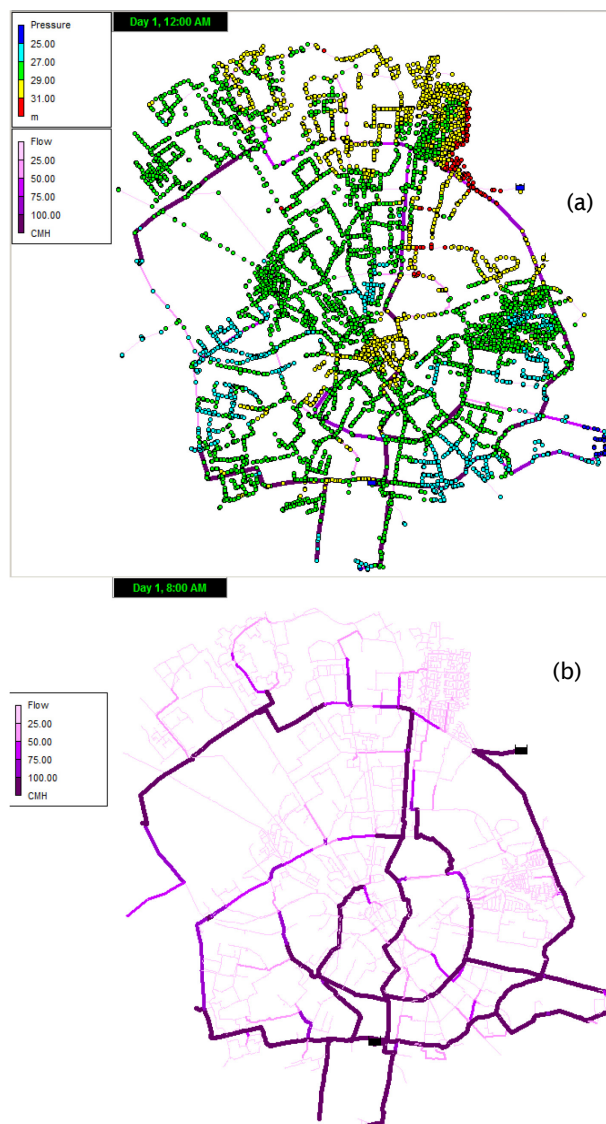


FIGUUR 5. LEVERING VANUIT AALSTERWEG (GROENE CURVE) EN WELSCHAP (PAARSE CURVE).

Er is nagegaan dat de verdeling van druk t.o.v. maaiveld een substantiële bijdrage kent van de hoogteverschillen in Eindhoven (ruim 5 meter, Figuur 4b) en een kleinere bijdrage als gevolg van hydraulische drukvariaties (ca. 2,2 meter, niet getoond). De drukniveaus tijdens maximum verbruik variëren tussen ca. 25 meter in de Zuidoostelijke periferie en ca. 31 meter in het Noordoosten als gevolg van topografische hoogteverschillen (Figuur 6a). Figuur 6b toont hoe de hoofdstromen vanuit Aalsterweg en Welschap het gebied voeden.



FIGUUR 6.(A) DRUK T.O.V. MAAIVELD EN (B) VOLUMESTROMEN EN OM 08:00 UUR IN DE REFERENTIEBEREKENING. LABEL "A" EN "W" GEVEN DE POMPSTATIONS AALSTERWEG EN WELSCHAP WEER.



FIGUUR 7. (A) DRUK T.O.V. MAAVELD EN (B) VOLUMESTROMEN IN EINDHOVEN IN DE SITUATIE WAARIN DE RINGLEIDING IS VERVANGEN MET 600 MM LEIDINGEN.

Om de mogelijke drukverhoging als gevolg van vervangen met 600 mm leidingen te onderzoeken is de uiterste situatie gemodelleerd waarbij de ringleiding van 1000 mm naar 600 mm is gebracht (leidingen in het westen van ca. 600 mm zijn niet aangepast). Dit wordt als uiterste situatie beschouwd, omdat bij een gedeeltelijke vervanging (met zowel oude 1000 mm als nieuwe 600 mm diameter leidingen) lagere drukk niveaus zijn te verwachten dan bij complete vervanging. Dit is echter geen waterdichte garantie omdat (i) vanwege topologische complexiteiten in Eindhoven er mogelijk onverwachte stroom- en drukpatronen optreden, (ii) tijdelijke afsluitingen voor onderhoud niet zijn beschouwd en kunnen mogelijk tot hogere waterstromen drukk niveaus elders zou kunnen leiden. Een volledig beeld is te verkrijgen door met aanvullende modelstudies gedeeltelijke vervanging en afgesloten secties te simuleren. De optimale volgorde van vervanging kan mogelijk worden berekend met het door KWR in BTO-verband ontwikkelde optimalisatieplatform Gondwana (Thienen and Vertommen 2015).

Als gevolg van volledige vervanging stijgt in de numerieke simulatie het netwerkbrede hydraulische drukverschil tot ruwweg 4 meter. De nieuwe (extreme) situatie lijkt niet tot significant hogere drukniveaus te leiden op de ring (vgl. Figuur 6a en Figuur 7a). Ook de minimum drukniveaus in de periferie (zuidoosten van Eindhoven) veranderen slechts in beperkte mate, aangezien deze gebieden relatief dicht bij het pompstation liggen en daarom weinig last hebben van een hogere drukval. Als gevolg van de hogere weerstand in de 600 mm leidingen t.o.v. 1000 mm is er wel een klein, maar zichtbaar effect op de stromingspatronen, waarbij de leidingen die niet tot de ring behoren zwaarder dan voorheen worden belast (vgl. Figuur 6b en Figuur 7b).

De resultaten van de numeriek modelstudie suggereren dat het niet noodzakelijk is om met significant hogere druk te leveren tijdens of na vervanging (met een risico op hogere drukken die de leidingnetintegriteit negatief zou kunnen beïnvloeden). Voor een completer begrip wordt aanbevolen om de modelstudie uit te breiden met een gevoeligheidsanalyse en calamiteitentest. De optimale volgorde van vervanging kan eventueel door KWR worden berekend met een daarvoor geschikt optimalisatieplatform.

6 Literatuur

Agudelo-Vera, C. M., et al. (2016). "Testing the robustness of two water distribution system layouts under changing drinking water demand." Journal of Water Resources Planning and Management.

Meerkerk, M. A. (2013). Wet- en regelgeving in Nederland voor leidingmaterialen in contact met drinkwater, KWR Watercycle Research institute.

Mossa, M. (2007). "Resistance coefficient in a smooth concentric annular pipe." Journal of Hydraulic Research 44(6): 832-840.

Stephenson, D. (1984). Pipeflow Analysis. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.

Thienen, P. v. and I. Vertommen (2015) Gondwana: numerieke optimalisatie toegepast op drinkwaterdistributienetwerken. H2O Online

Van der Kooij, D. and H. R. Veenendaal (2007). Assessment of the microbial growth potential of materials in contact with treated water intended for human consumption, Kiwa Water Research.

Van Thienen, P. (2012). Microfysische beschouwing van afzetting en resuspensie van deeltjes in bochten, groeven en verwijdingen in het distributienet, KWR **BTO 2012.001(s)**.