



BTO 2020.002 | Januari 2020

## **BTO** rapport

Optimaal ontwerp van  
robuuste en  
toekomstbestendige  
streefstructuren



# BTO

## Optimaal ontwerp van robuuste en toekomstbestendige streefstructuren

BTO 2020.002 | Januari 2020

### Opdrachtnummer

402045/008

### Projectmanager

Nellie Slaats

### Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Drinkwatertechnologie van de toekomst

### Kwaliteitsborger(s)

Peter van Thienen

### Auteur(s)

Ina Vertommen, Karel van Laarhoven, Claudia Agudelo-Vera

### Verzonden aan

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

**Jaar van publicatie**  
2020

**Meer informatie**  
Msc, Ina Vertommen  
T +31(0)611599514  
E [ina.vertommen@kwrwater.nl](mailto:ina.vertommen@kwrwater.nl)

**Keywords**

Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)



BTO 2020.002 | Januari 2020 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

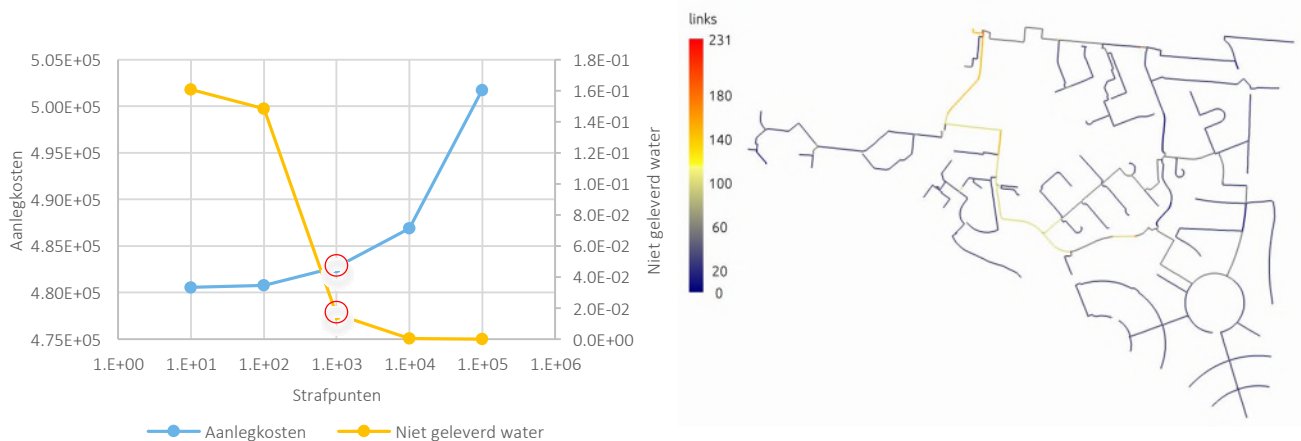
Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# BTO Managementsamenvatting

## Nieuwe benadering levert streefstructuren op die optimaal presteren onder verschillende watervraagscenario's

**Auteur(s)** Ina Vertommen MSc, Dr. Ir. Karel van Laarhoven en Claudia Agudelo-Vera PhD MSc

De watervraag is een essentiële factor in het ontwerp van streefstructuren. In het huidige ontwerpproces wordt een deterministisch aanpak gevolgd. Dit leidt tot één ontwerp dat voldoet aan de gekozen watervraag, maar dat kan onderpresteren indien de watervraag anders uitpakt. In dit onderzoek is een benadering uitgewerkt waarmee verschillende watervraagscenario's in aanmerking worden genomen in het ontwerpproces. Dit resulteert in inzicht in de afweging tussen aanlegkosten en de prestatie van een ontwerp. De voorgestelde benadering biedt de ontwerper zelf de keuze over de gewenste mate van risico-aversie, en de prestatie van het ontwerp kan worden beoordeeld op basis van de gewenste druk of van de geleverde watervraag. In dit onderzoek zijn watervraagscenario's gebaseerd op de historisch watervraag en toekomstscenario's uitgewerkt. Deze zijn gebruikt voor het ontwerp van een streefstructuur voor een Nederlandse stad. Uit de resultaten is duidelijk wat de relatie is tussen aanlegkosten en de prestatie onder de verschillende gekozen scenario's: bij een robuuster ontwerp horen hogere aanlegkosten. Toepassen van optimalisatietechnieken leidt tot significante besparingen in aanlegkosten. Met de ontwikkelde benadering kunnen drinkwaterbedrijven onderbouwde keuzes maken over hoeveel te investeren in een streefstructuur om een bepaalde robuustheid te bereiken.



*Links: Relatie tussen aanlegkosten en totale hoeveelheid niet-geleverd water voor 13 toekomstscenario's: de blauwe lijn toont de aanlegkosten (€) voor verschillende strafpunten in het model, de oranje lijn is de bijhorende hoeveelheid niet geleverd water over alle gewogen toekomstscenario's (m<sup>3</sup>, gedurende piekuur). Rechts: Leidingdiameters voor de streefstructuur die behoren tot het ontwerp aangeduid met een rode cirkel in de figuur links (aanlegkosten 483 k€).*

### Belang: een ideale kans om toekomstbestendige netten aan te leggen

Drinkwaterbedrijven zijn bezig met het (proactief) vernieuwen van hun leidingnetten. Dit biedt een ideale kans om het leidingnet te verbeteren aan de hand van een optimaal ontworpen, robuuste en toekomstbestendige streefstructuur. Hiervoor

besteedt het huidige ontwerpproces nog te beperkt aandacht aan onzekerheid in de watervraag, een van de grootste en invloedrijkste onzekerheden bij het ontwerp van een leidingnet. Vanwege de lange levensduur van een drinkwaterleiding is het van groot belang een robuust net aan te leggen: een leidingnet dat veranderingen in de watervraag

aankan en waarvan de prestatie steeds zo goed mogelijk blijft. Dit houdt in dat in de ontwerpfase rekening wordt gehouden met niet één, maar meerdere watervraagscenario's. Een dergelijke benadering vergt het uitrekenen van meerdere scenario's en ontwerpen en wordt daarom in een handmatige aanpak snel onhandelbaar. Numerieke optimalisatietechnieken bieden hierin de helpende hand.

#### Aanpak: watervraagscenario's genereren en meenemen in het ontwerpproces

Voor het genereren van watervraagscenario's is een top-downbenadering gekozen die gebruikmaakt van tijdreeksen van waterverbruik, gemeten aan een pompstation. Zo zijn historische piekfactoren en bijbehorende kansen verkregen. De gekozen piekfactoren zijn vervolgens toegekend aan alle verbruiksknoppen in een model. Daarnaast zijn ook toekomstscenario's gegenereerd. Om de watervraagscenario's en bijbehorende kansen in aanmerking te nemen tijdens het ontwerp van een streefstructuur, is een 'mean-variance' optimalisatieprobleem uitgewerkt. Hiermee worden de aanlegkosten en de prestatie (druk en geleverd water) van het ontwerp over alle gekozen scenario's geoptimaliseerd. Het in aanmerking nemen van de variantie bevordert ontwerpen waarvoor de prestatie minder afwijkt tussen scenario's. Hoe belangrijk dit is, kan worden bepaald door de ontwerper door middel van een variantiefactor: hoe hoger de variantiefactor, hoe beter ontwerpen zullen omgaan met onzekerheid. De benadering is toegepast op het ontwerp van een streefstructuur voor een wijk in een Nederlandse stad. De berekeningen zijn uitgevoerd in *Gondwana*. Om de prestatie onder de verschillende scenario's door te rekenen, is drukafhankelijk gerekend.

#### Resultaten: inzicht in de trade-off tussen kosten en robuustheid

Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dat het mogelijk is om onderbouwde watervraagscenario's uit te werken aan de hand van de historische watervraag. Hiermee kunnen ook kansen aan piekfactoren worden toegekend. Voor toekomstscenario's blijft dit lastiger en op dit vlak is ruimte voor verbetering. In de casestudy is de afweging tussen aanlegkosten en de totale (gewogen) prestatie onder de verschillende watervraagscenario's inzichtelijk gemaakt. Dit bevestigt dat hoe robuuster het ontwerp, hoe hoger

de aanlegkosten. De variantie speelt een belangrijke rol: bij een hogere variantiefactor presteren de ontwerpen beter onder de verschillende scenario's. De afwijking tussen de prestatie voor de verschillende scenario's is in dit geval ook veel kleiner. Dit wil zeggen dat de ontwerper zekerder is van hoe het ontwerp presteert. Daarnaast blijkt uit de casestudy dat het toepassen van optimalisatietechnieken leidt tot significante besparingen in aanlegkosten. Wanneer uitsluitend de huidige piekwatervraag in aanmerking wordt genomen, is het geoptimaliseerd ontwerp voor de casestudy 33% goedkoper dan het huidige leidingnetwerk, terwijl het nog steeds op alle knopen aan de drukeis voldoet. Hierbij zijn de leveringszekerheid en -continuïteit (nog) niet in aanmerking genomen.

#### Implementatie: eerst toepassing van de benadering in pilots

Drinkwaterbedrijven wordt geadviseerd hun streefstructuren te ontwerpen voor verschillende watervraagscenario's. Zij kunnen daarvoor de hier beschreven benadering voor het genereren van watervraagscenario's inzetten. Deze scenario's kunnen worden gebruikt om de prestatie van ontwerpen te beoordelen en waar nodig aan te passen, in een 'trial-and-error'-benadering. Het doorrekenen van meerdere scenario's is echter een arbeidsintensief proces en deze aanpak leidt tot één ontwerp dat in zekere mate voldoet aan de scenario's. Het toepassen van het 'mean-variance' optimalisatieprobleem, en het in aanmerking nemen van de kansen van de scenario's tijdens het ontwerpproces, vereist het gebruik van numerieke methoden. Deze zijn beschikbaar in het optimalisatieplatform *Gondwana*. Voor toepassing in de praktijk is het eerst van belang om de benadering bij één of meer drinkwaterbedrijven uitgebreid toe te passen in de vorm van een pilot. Hierin dienen leveringszekerheid en -continuïteit, en andere bedrijfsspecifieke aspecten in aanmerking te worden genomen, en kunnen randvoorwaarden voor toepassing in de praktijk en eventuele knelpunten worden geïdentificeerd.

#### Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Optimaal ontwerp van robuuste en toekomstbestendige streefstructuren* (BTO 2020.002).

# Inhoud

<b>Inhoud</b>	<b>2</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>4</b>
1.1 Aanleiding	4
1.2 Doel	5
1.3 Leeswijzer	5
1.4 Begeleidingsgroep	6
<b>2 Verkenning</b>	<b>7</b>
2.1 Watervraag	7
2.2 Ontwerp van waterdistributienetwerken	13
2.3 Stand van de praktijk	19
<b>3 Robuust ontwerp van streefstructuren</b>	<b>21</b>
3.1 Inleiding	21
3.2 Optimalisatieprobleem	21
3.3 Watervraagscenario's	23
<b>4 Functioneel ontwerp</b>	<b>28</b>
4.1 Uitbreiding Gondwana	28
<b>5 Casestudy</b>	<b>29</b>
5.1 Watervraagscenario's	29
5.2 Leidingnetmodel en aanvullende data	33
5.3 Uitgevoerde optimalisatieproblemen	34
5.4 Resultaten	36
5.5 Convergentie	43
<b>6 Ontwerp streefstructuren bij Dunea en Brabant Water</b>	<b>44</b>
6.1 Opdracht	44
6.2 Dunea	44
6.3 Brabant Water	45
<b>7 Implementatie</b>	<b>48</b>
7.1 Plan voor implementatie	48
<b>8 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>51</b>
8.1 Conclusies	51
8.2 Aanbevelingen	52
<b>Referentielijst</b>	<b>54</b>
<b>Bijlage I</b>	<b>57</b>
• <b>Enquête: ontwerp streefstructuren bij drinkwaterbedrijven</b>	<b>57</b>

<b>Bijlage II</b>	<b>61</b>
• <b>Oefening: Ontwerp streefstructuren door Dunea en Brabant Water</b>	<b>61</b>
Vraag: Wat is de inspanning om drie scenario's in aanmerking te nemen bij het ontwerp van de streefstructuur? Wat zou het betekenen moesten er 10 of 20 scenario's in aanmerking worden genomen?	64
Vraag: Zijn de kansen van de scenario's in aanmerking genomen?	64
Vraag: Wat is het effect voor de klant wanneer de druk niet wordt gehaald? Wordt er naar het niet geleverde water gekeken?	65

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

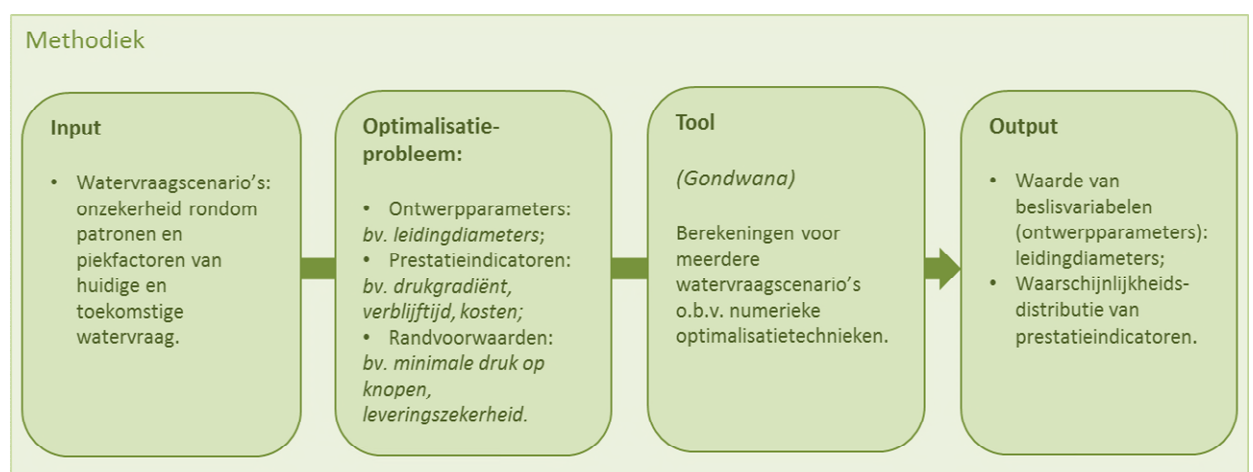
Het ontwerp van streefstructuren is een actueel onderwerp in de drinkwatersector. Drinkwaterbedrijven zijn bezig met het (proactief) saneren van hun leidingnetten. Tegelijkertijd zal in het kader van de energietransitie ook veel in de ondergrond worden gewerkt. Een ideale kans om het leidingnet te verbeteren w.b. diverse aspecten zoals robuustheid en waterkwaliteit. Hierbij geldt de vraag hoe een robuust en toekomstbestendige streefstructuur (d.w.z. een streefstructuur die zo goed mogelijk presteert onder verschillende mogelijke omstandigheden zowel nu als in de toekomst) optimaal kan worden ontworpen om deze kans zo goed mogelijk te benutten.

In 2011 is voor het eerst onderzoek gedaan naar dit onderwerp in het BTO (Vogelaar en Blokker, 2011). Vijf jaar later zijn de ontwikkelingen en ervaringen uit de praktijk onder de loep genomen en zijn de eerste stappen gezet naar een omvangrijk en gestandaardiseerd ontwerpproces (Agudelo-Vera en Blokker, 2016). Het begrip “streefstructuur” is hierin gegroeid: zowel het secundair als het primair net kunnen in aanmerking worden genomen. In 2017 is het BTO-project “Optimaal ontwerp van en transitie naar streefstructuren” afgerond, waarin een benadering is uitgewerkt voor het door optimalisatietechnieken (Gondwana) ondersteund ontwerpen van streefstructuren en de transitie van het huidige net naar de streefstructuur. In het huidige ontwerpproces (zowel in de praktijk als in onderzoek) wordt beperkt, of met onvoldoende detail, aandacht gegeven aan de onzekerheid rondom de huidige en toekomstige watervraag. De watervraag is echter een van de grootste en invloedrijkste onzekerheden bij het ontwerp van een leidingnet (Pasha en Lansley, 2005). In het BTO is een stresstest ontwikkeld om de robuustheid van huidige netwerk tegenover verschillende toekomstscenario's te toetsen (Agudelo-Vera en Blokker, 2014). Hiervoor zijn twaalf toekomstige watervraagscenario's gesimuleerd. De waarschijnlijkheid van elk scenario of bijbehorende onzekerheden zijn niet in aanmerking genomen en deze benadering is daarom niet direct toepasbaar in een ontwerpfase. Technologische ontwikkelingen, waarvan sommige in de toekomst tot grote afnames of toenames van waterverbruik (zowel huishoudelijk als grootverbruik) zouden kunnen leiden, volgen elkaar in een snel tempo. De brede invoering van deze ontwikkelingen kan echter wel 25-40 jaar duren en het is dus mogelijk om deze ontwikkeling te volgen en daarop te anticiperen (Agudelo-Vera, et al., 2015, Blokker, et al., 2015). Daarnaast is een verandering in gedrag van consumenten en bedrijven richting verduurzaming steeds sterker. De resulterende toename of afname in waterverbruik kan grote gevolgen hebben voor transport- en distributienetten. De leiding die vandaag wordt vervangen, moet worden teruggelegd in de juiste diameter. Dit wil zeggen dat drinkwaterbedrijven nu een inschatting moeten maken van hoe de watervraag zich ontwikkelt. Vanwege de lange levensduur van een drinkwaterleiding is het daarom van groot belang om een robuust en toekomstbestendig net aan te leggen: een leidingnet dat veranderingen in de watervraag aankan, en waarvan de prestatie zo goed mogelijk blijft.

De aanleg van een robuuste streefstructuur houdt in dat in de ontwerpfase rekening wordt gehouden met demografische en planologische ontwikkelingen, en de mogelijke veranderingen in de watervraag (zowel patronen als piekfactoren) en de eisen die de onzekerheid in de kennis daarover stelt aan het ontwerp van het net. Dit wil zeggen dat bij de verschillende prestatie-indicatoren die onderdeel uitmaken van het ontwerpproces, niet alleen rekening moet worden gehouden met de verwachte demografie en watervraag (of



piekfactor) maar expliciet ook met de bijbehorende onzekerheid die van toepassing is. Bij prestatie-indicatoren kan men denken aan de uitvoerparameters die worden uitgerekend per scenario, bv. verblijftijd, drukgradiënt, kosten, en aan de concrete eisen (randvoorwaarden) die gesteld worden aan het ontwerp (d.w.z. boven- en ondergrenzen op prestatie-indicatoren die door de gebruiker kunnen worden ingevuld, bv. minimale druk op knopen hoger dan 300 kPa). Rekening houden met de onzekerheid, betekent dat niet één, maar meerdere scenario's in aanmerking worden genomen in het optimalisatieprobleem en als resultaat daarvan de prestatie-indicatoren door middel van een waarschijnlijkheidsdistributie worden weergegeven. Een dergelijke benadering vergt het uitrekenen van een groot aantal scenario's en ontwerpen en wordt daarom in een handmatige aanpak snel onhandelbaar. Numerieke optimalisatietechnieken zoals geïmplementeerd in Gondwana (van Thienen en Vertommen, 2015) bieden hierin de helpende hand. Het stroomdiagram van de voorgestelde benadering is geïllustreerd in Figuur 1.



FIGUUR 1. STROOMDIAGRAM VAN DE VOORGESTELDE BENADERING. BIJ HET EERSTE BLOKJE (INPUT) GELDEN AANWIJZINGEN VANUIT PROMOTIEONDERZOEK (VERTOMMEN, ET AL., 2014, VERTOMMEN, ET AL., 2015) EN EERDER ONDERZOEK NAAR PIEKFACTOREN EN DE TOEKOMSTIGE WATERVRAAG (AGUDELO-VERA EN BLOKKER, 2014, VONK, ET AL., 2017). DE TWEDE EN DERDE BLOKJES (OPTIMALISATIEPROBLEEM EN TOOL) LIGGEN DEELS KLAAR EN MOETEN WORDEN UITGEBREID OM ONZEKERHEDEN IN AANMERKING TE NEMEN.

In dit onderzoek wordt gekeken naar de onzekerheid rondom de watervraag op de bestaande verbruiksknopen in een leidingnetmodel. Demografische en planologische ontwikkelingen worden (nog) niet expliciet meegenomen. De methodiek wordt wel zodanig ontwikkeld dat deze aspecten, wanneer uitgewerkt in concrete scenario's, wel in aanmerking kunnen worden genomen in het ontwerp- en optimalisatieproces.

## 1.2 Doel

Dit project heeft als doel het beantwoorden van: (1) hoe kan de onzekerheid rondom de watervraag in aanmerking worden genomen tijdens het ontwerpproces van een streefstructuur? (2) hoe kunnen prestatie-indicatoren onder verschillende scenario's worden uitgedrukt? en (3) hoe kunnen numerieke optimalisatietechnieken worden ingezet voor het optimaal ontwerp van een streefstructuur rekening houdend met de voorgaande aspecten?

## 1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft het literatuuronderzoek en stand van praktijk omtrent het ontwerp van leidingnetwerken en het modelleren van de watervraag. Verschillende benadering zijn

hierin geïdentificeerd en beschreven. Om inzicht te krijgen in de stand van praktijk is een enquête gestuurd aan de drinkwaterbedrijven. De volledige resultaten staan in Bijlage I van dit rapport. In hoofdstuk 3 is de gekozen benadering voor het robuust ontwerp van streefstructuren uitgewerkt. Dit houdt zowel de beschrijving van het optimalisatieprobleem als het genereren van watervraagscenario's in. Om het uitgewerkte optimalisatieprobleem door te rekenen in Gondwana, is het platform uitgebreid in functionaliteit. Het bijhorende functioneel ontwerp is gerapporteerd in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 behandelt de casestudy en de verkregen resultaten. Ook drinkwaterbedrijven hebben een ontwerp oefening uitgevoerd, deze zijn beknopt beschreven in hoofdstuk 6. De volledige resultaten zijn bijgevoegd als bijlage van dit rapport. Hoofdstuk 7 bevat een plan voor implementatie van de benadering in de praktijk. Tenslotte zijn de conclusies en aanbevelingen beschreven in hoofdstuk 8.

#### **1.4 Begeleidingsgroep**

Dit BTO-onderzoek is begeleid door Tjakko Haaijer (Brabant Water), Maurice van de Roer (Dunea) en Anton van Eijden (WML).

## 2 Verkenning

### 2.1 Watervraag

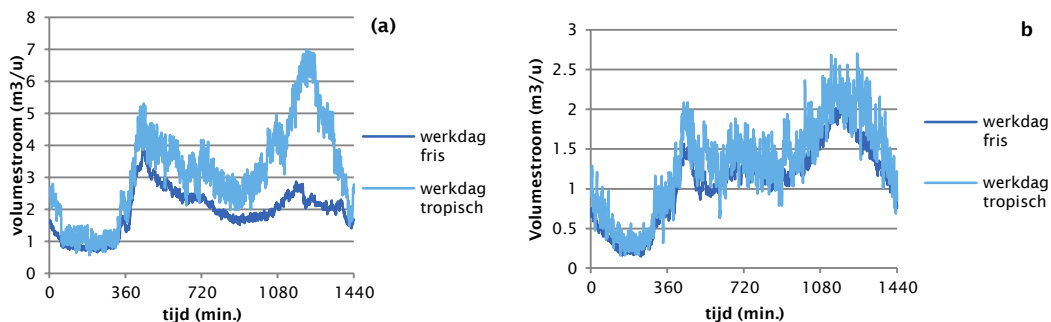
De watervraag is een van de grootste en invloedrijkste onzekerheden op het gebied van drinkwaterdistributiesystemen (Pasha & Lansey 2005). Om vraagstukken over ontwerp en beheer van deze systemen goed te beantwoorden is het daarom essentieel om de inherente variabiliteit en de onzekerheid rondom de huidige en toekomstige watervraag te begrijpen en in aanmerking te nemen. Deze verschillende aspecten worden hieronder toegelicht.

#### 2.1.1 Inherente variabiliteit

De watervraag varieert met oneindig veel aspecten van gedrag en gewoonten van mensen en omgeving. Dit kan worden vereenvoudigd in een model met de volgende parameters:

- Het type gebruiker: huishoudelijk, klein zakelijk en industrieel gebruik hebben allemaal specifiek verbruikspatronen. Hiermee is het daarom van belang om juiste informatie te hebben over welke gebruikers op de knopen van een leidingnetmodel aanwezig zijn.
- Het type dag: werk-, weekend-, feest- of vakantiedagen leiden tot andere verbruikspatronen, zie voorbeeld voor huishoudelijk gebruik.
- Het weer: zowel het totaal waterverbruik op een dag als het patroon varieert met de temperatuur (en mogelijk andere weersomstandigheden zoals het neerslagtekort). Deze invloed is anders voor landelijk en stedelijk gebied en woningen met of zonder tuin, zie voorbeeld over de invloed van de temperatuur op het huishoudelijk gebruik in Figuur 1.
- Het type woning (enkel voor huishoudelijk gebruik): het type woning (appartement, rijtjeswoning of vrijstaand), en met name de aanwezigheid van een tuin, beïnvloeden het waterverbruik.
- De gezinssamenstelling (enkel voor huishoudelijk gebruik): gezinsgrootte en -samenstelling beïnvloeden het waterverbruik.
- Het gebied (enkel voor huishoudelijk gebruik): huishoudens op landelijk, stedelijk of randstedelijk gebied hebben andere verbruikspatronen.

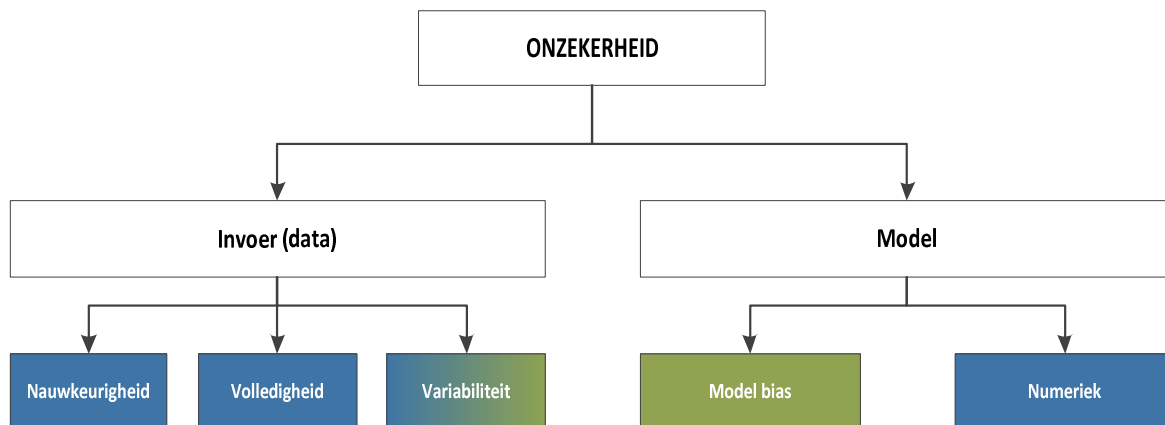
Voor verschillende berekeningen rondom drinkwaterdistributiesystemen is het daarom belangrijk om de juiste watervraagpatronen, met de juiste resolutie en op de juiste schaal (in ruimte en tijd), toe te passen. Zo is de variabiliteit op korte termijn (binnen een dag) van belang voor de bedrijfsvoering, bv. voor de optimale sturing van pompstations (Bakker, et al., 2013, Sampathirao, et al., 2014), zijn dagpatronen met een korte tijdsresolutie van belang voor waterkwaliteitsberekeningen, zijn de dagafzet en de -factoren van belang bij het bepalen van de benodigde productiecapaciteit om een voorzieningsgebied van water te voorzien (Vonk, et al., 2017) en, is de piekwatervraag op de verschillende knopen in een model van belang voor het ontwerp van een distributieleidingnetwerk.



FIGUUR 1. GEMIDDELDE GEMETEN VOLUMESTROMEN (MINUUTBASIS) VOOR WERKDAGEN FRIS (MAXIMALE TEMPERATUUR 10-20 °C) EN TROPISCH (MAXIMALE TEMPERATUUR >30 °C) OP: (A) LANDELIJK GEBIED (115 LUXE VRIJSTAANDE WONINGEN MET GROTE TUIN) EN (B) STEDELIJK GEBIED (119 RIJTJESWONINGEN MET KLEINE TUIN) VERZAMELD IN EERDER ONDERZOEK (VERTOMMEN, ET AL., 2018).

**2.1.2 Onzekerheden**

Naast de inherente variabiliteit van de watervraag, moeten ook onzekerheden in het vastleggen van de watervraag in aanmerking worden genomen. De watervraag begrijpen houdt in dat er wordt gekeken naar data en modellen, en aan beide zijn onzekerheden toe te kennen, zie Figuur 2. De onzekerheden kunnen ontstaan door een aantal oorzaken, waarvan een aantal inherent of parametrisch (onzekerheden die onvermijdelijk zijn, zoals bv. de variatie in materiaaleigenschappen binnen een leiding, en die enkel op basis van aannames of hypothese kunnen worden bepaald), een aantal onvoorspelbaar (onzekerheden die kleiner worden wanneer meer gegevens of betere meetmethodes beschikbaar zijn) en een aantal deels inherent en deels subjectief zijn (Moerman, et al., 2016).



FIGUUR 2. TYPOLOGIE VAN ONZEKERHEDEN IN ANALYSES; DE BLAUWE ELEMENTEN BETREFFEN VOORNAMELIJK SUBJECTIEVE ONZEKERHEDEN, DE GROENE ELEMENTEN VOORNAMELIJK INHERENTE ONZEKERHEDEN (MOERMAN, ET AL., 2016).

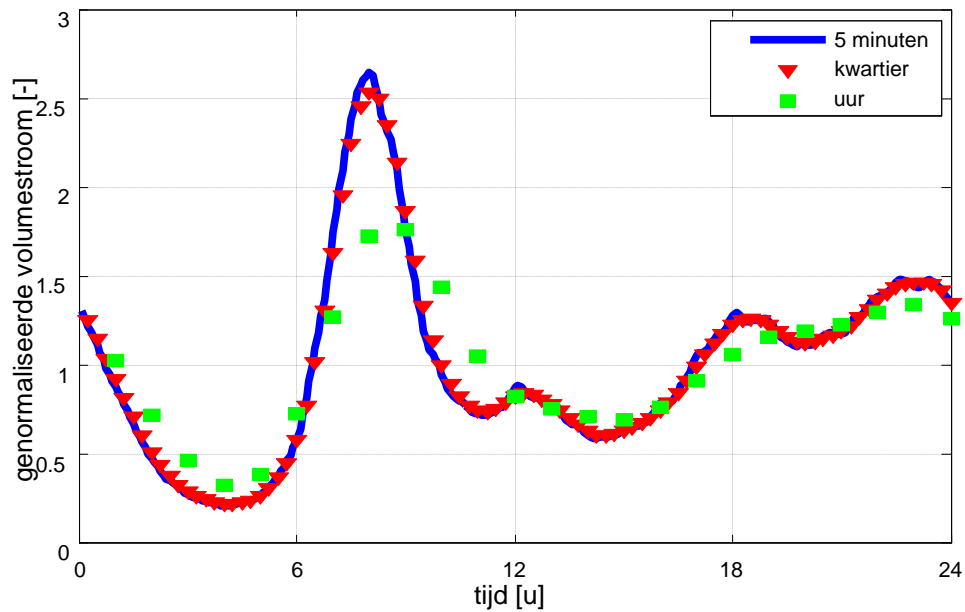
Aan de invoerzijde (data) hebben onzekerheden te maken met (Moerman, et al., 2016):

- **Nauwkeurigheid (precisie en juistheid):** is afhankelijk van meetonnauwkeurigheid, afrondingen, precisie van meetapparatuur en verschillen in interpretatie van uitkomsten van meetprocedures. Deze meetonzekerheden zijn te verkleinen door heldere protocollen en verbetering van meetapparatuur, maar meetonzekerheden zijn niet tot nul te reduceren.

- Volledigheid: onzekerheden m.b.t. onvolledigheid worden veroorzaakt door een tekort aan data voor een analyse op het gewenste schaalniveau. Om bv. de invloed van het weer op het verbruikspatroon van huishoudens te bepalen is een minimum aantal volumestroommetingen nodig om betrouwbare uitspraken te maken. Volledigheid kan ook refereren aan bijvoorbeeld onbekende typen aansluitingen in een gebied en of toekomstige ontwikkelingen (bv. waar zullen nieuwe aansluitingen in de komende 50 jaar komen?). Problemen met volledigheid kunnen ook worden veroorzaakt door het niet in rekening gebracht water (NRW), wanneer dit onbekend is. In de literatuur zijn methodes beschreven om het NRW in aanmerking te nemen mee te nemen, maar deze vallen buiten de scope van dit onderzoek.
- Variabiliteit: variaties in eigenschappen van de gegevens op een schaal kleiner dan de gewenste schaal. Tot voor kort bevatten leidingnetmodellen vooral de grotere (transport)leidingen en waren verbruikspatronen op basis van het gemeten verbruik van een voorzieningsgebied van bv. een pompstation afdoende. Drinkwaterbedrijven maken nu steeds vaker gebruik van gedetailleerdere, één-op-één leidingnetmodellen. Hierdoor ontstaat er een realistischer beeld van de hydraulica in het leidingnet. Maar dit houdt ook in dat meer gedetailleerde verbruikspatronen nodig zijn: niet meer op het niveau van een wijk, maar van individuele verbruikers die immers allemaal een eigen specifiek dagelijks waterverbruik vertonen. Wanneer data van de individuele gebruikers niet beschikbaar zijn en deze worden ingeschat o.b.v. metingen op wijkniveau, brengt dit onzekerheden met zich mee. Ook de tijdschaal speelt hierin een rol. Figuur 3 toont genormaliseerde standaardpatronen (op basis van SIMDEUM) voor het huishoudelijk waterverbruik op een werkdag voor verschillende tijdsresoluties: per 5 minuten, per kwartier en per uur. Hieraan is te zien dat de variabiliteit erg afhankelijk is van de gekozen tijdsschaal. Voor het correct bepalen van de piekwatervraag is het erg belangrijk om naar een kleinere tijdsresolutie te kijken.

Met betrekking tot het model hebben onzekerheden te maken met (Moerman, et al., 2016):

- Model bias: is gebonden aan het gebrek aan kennis in modellen. Deze kan deels worden verkleind door een beter begrip van processen, maar is deels inherent, omdat een model per definitie een versimpeling van de werkelijkheid is.
- Numeriek: deze onzekerheden komen voort uit oplossingsmethodieken. Computermodellen zijn discreet, niet continu, wat een bepaalde onzekerheid met zich meebrengt.



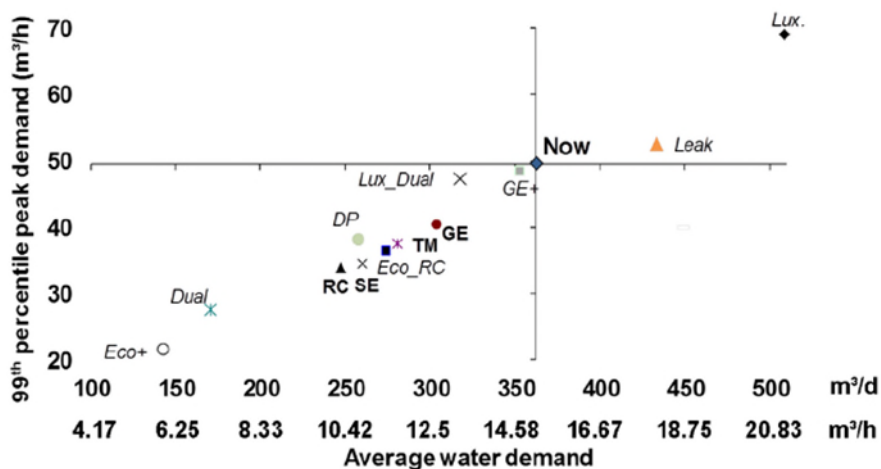
FIGUUR 3. GENORMALISEERDE STANDAARDPATRONEN OP BASIS VAN SIMDEUM VOOR HUISHOUDELIJK VERBRUIK VOOR EEN WERKDAG OP VERSCHILLENDE TIJDSRESOLUTIES.

### 2.1.3 Benaderingen voor het modelleren van de watervraag

In de literatuur zijn reeds meerdere benaderingen ontwikkeld om de watervraag te modelleren. Tabel 1 geeft een overzicht van enkele van de benaderingen die zijn beschreven in de literatuur.

TABEL 1. OVERZICHT VAN ENKELE BENADERINGEN VOOR HET MODELLEREN VAN DE WATERVRAAG.

Referentie	Type benadering	Beschrijving / toepassing
Herrera, et al. (2010)	Regressie-analyse en blackboxmodellen	Vergelijking van een reeks van voorspellende modellen voor de watervraag o.b.v. tijdreeksgegevens. Kunstmatige neurale netwerken, 'projection pursuit regression', 'multivariate adaptive regression splines', 'random forest' en 'support vector regression' komen aan de orde.
Blokker en Vloerberg (2011)	Combinatie SIMDEUM en scenario's	Voor vier toekomst scenario's uit het rapport Welvaart en Leefomgeving zijn invoergegevens voor SIMDEUM bepaald. Op basis daarvan zijn toekomstige verbruikspatronen gesimuleerd en zijn zowel het totaal hoofdelijk verbruik als de piekwatervraag bepaald.
Pieterse-Quirijns en van de Roer (2013)	SIMDEUM	Verbruikspatronenbibliotheek voor residentiële en niet residentiële verbruikers, o.b.v. SIMDEUM-simulaties. De bibliotheek bestaat uit standaardpatronen, genormeerd op een gemiddeld verbruik, voor verschillende categorieën van huishoudelijke en niet-huishoudelijke verbruikers. De verbruikspatronenbibliotheek is beschikbaar als excelbestanden met een tijdsbasis van 5 minuten, 15 minuten of 1 uur .
Bakker, et al. (2013)	Tijdreeksprognoses	Korte termijn voorspelling (48 uur) o.b.v. historische gegevens en metingen.
Sampathirao, et al. (2014)	Tijdreeksprognoses op basis van 'auto-regressive integrated moving average' modellen (ARIMA) en machine learning	Kortetermijnvoorspelling voor beheer. Vergelijking van 'Seasonal ARIMA', BATS (Box-Cox transform, ARIMA errors, Trend, and Seasonal components) and Support Vector Machine. Op deze manier is het mogelijk om synthetische scenario's te genereren met vergelijkbare statistische eigenschappen als die verkregen uit historische gegevens. Deze modellen worden gebruikt vanwege het vermogen om complexe lineaire dynamica te vangen uit historische gegevens.
Creaco, et al. (2014)	Linear demand growth model	Watervraag neemt proportioneel toe met de tijd.
Vertommen (2014)	Scaling laws en scenario's	De relatie tussen de statistieken van de watervraag (gemiddelde, variantie, covariantie en correlatie) en de schaal van analyse (aantal verbruikers en tijdschaal) is inzichtelijk gemaakt door middel van "scaling laws". O.b.v. van deze wetten kunnen de statistieken van het verbruik eenvoudig op verschillende schalen worden bepaald. De multivariate normale verdeling wordt gebruikt om verschillende watervraagscenario's en de kans dat die voorkomen voor een leidingnetwerk te bepalen.
(Cabral, et al., 2014)	Combinatie van regressie-analyse en scenario's	Handvatten voor het bepalen van watervraagscenario's op DMA-niveau voor de korte, middellange en lange termijn.
Marques, et al. (2015).	Scenario's	Een reeks van 102 piekvragen wordt gedetailleerd volgens een vraagstijging tussen 0 en 10% per ontwerpfase (20 jaar) van de tijdshorizon van 60 jaar. In totaal worden 102 scenario's gegenereerd om het hydraulische gedrag van alternatieve netwerkontwerpen te testen.
Agudelo-Vera, et al. (2016)	Combinatie SIMDEUM en scenario's	In een stress test die rekening houdt met een brede variatie in de toekomstige watervraag zijn met SIMDEUM patronen met korte tijdstap gesimuleerd voor 12 extreme maar plausibele toekomstscenario's. Zie Figuur 4.
Koutiva en Makropoulos (2016)	Agent based approach	Model om het gedrag van verbruikers te bepalen, bv. tijdens een water= restrictiecampagne.
Di Nardo, et al. (2018)	Statistische benadering en DMA's	Een stochastisch model van watervraag is gekoppeld aan 'partitioning' technieken, gebaseerd op spectrale clustering om ruimtelijke en temporele variabiliteit van de watervraag mee te nemen. Er werden onderscheidende watervraagpatronen per DMA gedefinieerd. De toepassing van de procedure op een echt middelgroot netwerk toont aan dat de variabiliteit van de vraag van grote invloed kan zijn op de hydraulische prestaties van het netwerk.
Gargano, et al. (2017)	Tijdreeksen en statistische analyses	Schatting van de piekvraag mogelijk door biparametrische kansverdelingen: Normaal- en Gumbelverdelingen geverifieerd om de piekwatervraag te bepalen en m.b.v. de log-Logistische verdeling kan het maximale dagelijkse waterverbruik worden bepaald.
Vonk, et al. (2017)	Tijdreeksen en statistische analyses gecombineerd met klimaatscenario's	Eerst zijn met een machinelearningmodel relaties gelegd tussen meteorologische omstandigheden (temperatuur en , vakantie-afwezigheid en de watervraag. Vervolgens is een zogeheten <i>peak-over-threshold</i> extremewaardenmodel gebruikt om uit de voorspelde watervraag voor 2050 en 2085 de dagpiekfactor af te leiden.



FIGUUR 4. OVERZICHT VAN WATERVRAAG EN PIEKVRAAG VOOR TWAALF SCENARIO'S DIE ZIJN ONTWIKKELD VOOR EEN STRESS-TEST IN EERDER BTO ONDERZOEK (AGUDELO-VERA, ET AL., 2016).

Afhankelijk van het doel waarvoor de watervraag wordt gemodelleerd, kunnen de modellen zich richten op de huidige watervraag of de toekomstige watervraag, en kunnen verschillende schalen in aanmerking worden genomen: voor één gebruiker of voor een heel gebied, op jaarbasis, dagbasis, of piekfactoren. In Blokker, et al. (2012) zijn vier benadering beschreven:

1. scenario's op basis van de expertise van deskundigen;
2. extrapolatie van hoofdelijk of piekverbruik o.b.v. tijdreeksen van historische gegevens;
3. regressie-analyse o.b.v. van verschillende parameters, zoals historisch verbruik, weer, waterprijs en demografische gegevens;
4. black-box modellen, zoals neurale netwerken en fuzzy logic, die gevoed worden met parameters, bv. de parameters die in de regressie-analyse worden gebruikt.

Er bestaat echter geen algemene consensus over welke type benadering het beste past bij welke toepassing, of welke informatie en niveau van detail in aanmerking moet worden genomen. Elke benadering heeft voor- en nadelen. Methodieken om de toekomstige watervraag, op lange termijn, te voorspellen op basis van de extrapolatie van historisch gegevens, hebben bv. als nadeel dat (1) trendbreuken, bijvoorbeeld de introductie van een geheel nieuw type waterverbruikende apparatuur, niet in aanmerking kunnen worden genomen, en (2) onderliggende factoren (o.a. klimaat, bevolking, gedrag, apparatuur) niet goed worden begrepen. Bepaalde aspecten hiervan zijn ook onvoorspelbaar.

Voor het ontwerp van leidingnetwerken is de piekwatervraag op elke verbruiksknoop in een leidingnetmodel van belang. Korte termijn voorspellingen o.b.v. tijdreeksprognoses zijn daarom minder geschikt.



## 2.2 Ontwerp van waterdistributienetwerken

In de academische wereld is al veel onderzoek gedaan naar het optimaal ontwerp van waterdistributienetwerken<sup>1</sup>. Voor een beknopt overzicht wordt de lezer verwezen naar (Vertommen, et al., 2017). Met betrekking tot de onzekerheid, kunnen de optimalisatieproblemen in de literatuur over het algemeen worden ingedeeld in drie verschillende benaderingen: deterministisch ontwerp, stochastisch ontwerp en robuust ontwerp. Deze benadering verschillen in het wel of niet in aanmerking nemen van onzekerheden in het optimalisatieproces en in de manier waarop dit wordt gedaan. Tabel 2 geeft hier een overzicht van.

---

<sup>1</sup> met "ontwerp" wordt begrepen het dimensioneren van het systeem gegeven een layout, bv. het bepalen van leidingdiameters.

TABEL 2. OVERZICHT VAN DE VERSCHILLENDE BENADERING VOOR HET ONTWERP VAN WATERDISTRIBUTIENETWERKEN.

	<b>Deterministische benadering</b>	<b>Stochastische benadering “betrouwbaarheid”</b>	<b>Robuuste benadering “risico”</b>
Wordt onzekerheid in aanmerking genomen?	Nee.	Ja. Twee aspecten worden in aanmerking genomen (afzonderlijk of gezamenlijk): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Het falen van componenten (bv. leidingbreuken);</li> <li>• Onzekerheid in de watervraag en wandruwheidscoëfficiënten van leidingen.</li> </ul>	Ja. Het falen van componenten en het optreden van bluswater op specifieke locaties in het net worden in aanmerking genomen.
Hoe wordt de onzekerheid gesimuleerd?	n.v.t.	Door middel van een stochastische benadering, bv.: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Monte Carlo simulaties;</li> <li>• Latin Hypercube simulaties;</li> <li>• Andere methodes (FORM, FOSM, <math>\theta</math>).</li> </ul>	Door middel van een beperkt aantal specifieke scenario's waarin componenten falen of een bluswater optreedt.
Hoe wordt betrouwbaarheid of robuustheid gemeten?	n.v.t.	Effect op klant staat centraal. Betrouwbaarheid = 1 - kans op falen (bv. niet voldoen aan de drukeis)	Het effect op het systeem in zijn geheel staat centraal. Robuustheid = prestatie over alle scenario's (bv. in welke mate wordt de drukeis gehaald onder de verschillende scenario's)
Hoe wordt de onzekerheid in aanmerking genomen?	n.v.t.	<b>In de randvoorwaarden:</b> Een bepaalde betrouwbaarheidseis wordt vastgelegd in de randvoorwaarden.	<b>In de randvoorwaarden:</b> Bv. door een minimale drukeis vast te leggen die moet worden gehaald onder alle scenario's.
	n.v.t.	<b>In de doelstelling:</b> De afweging tussen kosten en betrouwbaarheid wordt inzichtelijk gemaakt door twee doelfuncties in aanmerking te nemen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• minimalisatie van kosten (aanleg- en/of operationele kosten);</li> <li>• maximalisatie van de betrouwbaarheid van het systeem.</li> </ul> Het resultaat is een Paretocurve.	<b>In de doelstelling:</b> De doelstelling wordt samengesteld door aanlegkosten en de prestatie onder de verschillende scenario's. De prestatie kan bv. worden gekwantificeerd doormiddel van een gewenste drukeis (die hoger is dan de minimale druk). Wanneer deze eis niet wordt gehaald worden strafpunten toegekend aan de doelfunctie, en zo gaan de totale 'kosten' omhoog. Het resultaat is één ontwerp dat zo goed mogelijk voldoet aan alle scenario's.

	<b>Deterministische benadering</b>	<b>Stochastische benadering “betrouwbaarheid”</b>	<b>Robuuste benadering “risico”</b>
<b>Beperkingen</b>	De watervraag is deterministisch. Deterministische ontwerpen (d.w.z. geen rekening gehouden met onzekerheden; dit levert een schijnzekerheid)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lange rekentijden of aannames voor de relaties tussen in- en uitvoerparameters.</li> <li>• Onzekerheid in de watervraag is niet onderbouwd (bv. aanname van kansverdeling en bijbehorende parameters, bv. 10% voor de standaard deviatie, onafhankelijkheid tussen de watervraag op verschillende knopen).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De gedefinieerd scenario's en toegekende kansen zijn subjectief en worden gekozen door experts (in de huidige literatuur).</li> <li>• Veranderingen in de watervraag worden (tot zover bekend) niet in aanmerking genomen.</li> </ul>
<b>Referenties</b>	(Schaake, et al., 1969, Alperovitz en Shamir, 1977, Savic en Walters, 1997)	(Lansey, et al., 1989, Bao en Mays, 1990, Xu en Goulter, 1999, Babayan, et al., 2004, Kapelan, et al., 2004, Babayan, et al., 2005, Farmani, et al., 2005, Kapelan, et al., 2005, Kapelan, et al., 2005, Babayan, et al., 2007)	(Mulvey, et al., 1995, Cunha en Sousa, 2010, Jung, et al., 2012)

### 2.2.1 Deterministische benadering

Het deterministisch ontwerp is de meest klassieke benadering en houdt in dat de kosten (aanleg en/of operationele kosten) worden geminimaliseerd, onder voorbehoud dat de watervraag en drukeisen worden voldaan. Er worden geen onzekerheden in aanmerking genomen. Met betrekking tot de watervraag betekent dit dat een deterministische waarde wordt toegekend aan iedere knoop in het net (bv. de piekwatervraag). Het resulterende ontwerp is optimaal voor deze toegekende watervraag, maar suboptimaal als de watervraag anders blijkt te zijn. Vanwege de lange levensduur van een distributienet is de kans groot dat de watervraag anders is dan ingeschat tijdens het ontwerpproces. Benaderingen die onzekerheden in aanmerking nemen zijn daarom meer geschikt. Hieronder vallen de stochastische en robuuste benaderingen.

### 2.2.2 Stochastische benadering

De stochastische benadering neemt de betrouwbaarheid van het systeem in aanmerking. De betrouwbaarheid wordt begrepen als de kans dat het systeem niet faalt, waarin het falen van het systeem inhoudt dat niet aan de watervraag van de verbruikers wordt voldaan. Bij betrouwbaarheid staat het effect op de verbruiker (of klant) centraal, d.w.z. dat het netwerk wordt bekeken vanuit het gezichtspunt van de verbruiker (of klant). Het systeem kan falen door verschillende redenen: uitval van onderdelen van het leidingnetwerk (bv. een leidingbreuk), veranderingen in de watervraag of onzekerheden in andere parameters (bv. wandruwheid van verouderde leidingen).

#### Betrouwbaarheid kwantificeren

Het meten of kwantificeren van de betrouwbaarheid kan lastig zijn. Meerdere benaderingen zijn hiervoor onderzocht (Ostfeld en Shamir, 1993), waaronder benaderingen o.b.v. de entropie van het systeem, of van het volume van water dat niet wordt geleverd of van de connectiviteit tussen knopen. Een benadering die vaak wordt toegepast is de *capacity reliability* (Bao en Mays, 1990, Xu en Goulter, 1999), waarin de betrouwbaarheid op iedere knoop in het model wordt gekwantificeerd door:

$$Rel_i = 1 - kans(P_i < P_{i,min}) \quad (1)$$

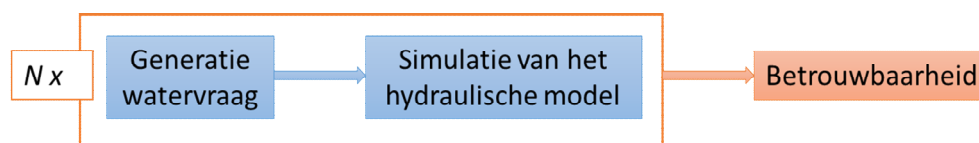
waarin,  $Rel_i$  de betrouwbaarheid op knoop  $i$  is,  $P_i$  de gesimuleerde druk op knoop  $i$ , en  $P_{i,min}$  de drukeis op knoop  $i$ . De kans dat de druk onder de drukeis komt, wordt bepaald doormiddel van een stochastische simulatiereeks. Ook voor de betrouwbaarheid van het systeem in het gehele,  $Rel_{sys}$ , zijn verschillende opties mogelijk, waaronder (Bao en Mays, 1990): de laagste betrouwbaarheid die optreedt in het systeem (2), het rekenkundig gemiddelde van de betrouwbaarheid van de  $n$  knopen in het model (3), het gemiddelde van de betrouwbaarheid op de knopen in het model gewogen met het respectievelijke gemiddeld waterverbruik op de knopen,  $\bar{Q}_i$  (4).

$$Rel_{sys} = minimum(Rel_i) \quad (2)$$

$$Rel_{sys} = rekenkundig\ gemiddelde = \frac{\sum_{i=1}^n Rel_i}{n} \quad (3)$$

$$Rel_{sys} = gewogen\ gemiddelde = \frac{\sum_{i=1}^n Rel_i \times \bar{Q}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{Q}_i} \quad (4)$$

Om de kans op falen te bepalen wordt het leidingnet meerdere keren gesimuleerd met verschillende invoerparameters. De kans op falen door uitval van onderdelen, bv. leidingbreuken, wordt gesimuleerd door alle leidingen in het model één voor één dicht te zetten<sup>2</sup> en (d.w.z. dat het aantal simulaties gelijk is aan het aantal leidingen in het model). De kans op falen door onzekerheid in de watervraag kan worden gesimuleerd door de watervraag te beschrijven door middel van een kansverdeling, bv. een normale verdeling met gemiddelde gelijk aan de deterministische watervraag en standaarddeviatie gelijk aan bv. 10% van het gemiddelde. Verschillende uitkomsten voor de watervraag kunnen worden gesimuleerd door Monte-Carlosimulatie (MCS) of Latin-Hypercubesimulatie (LHS), zie schematisch overzicht in Figuur 5. Dit vergt een groot aantal netwerksimulaties per iteratie in het optimalisatieproces<sup>3</sup>, waardoor de rekentijd snel toeneemt. Door de grootte van echte netwerken wordt de rekentijd geassocieerd met deze simulatietechnieken snel onhandelbaar.



FIGUUR 5. SCHEMA VAN HOE DE BETROUWBAARHEID VAN EEN SYSTEEM TEGENOVER ONZEKERE WATERVRAAG KAN WORDEN BEPAALD.

Om problemen met de rekentijd te verhelpen zijn enkele alternatieve methodes om de betrouwbaarheid te bepalen ontwikkeld, waarin het stochastisch probleem wordt vervangen door een deterministisch probleem door toepassing van analytische technieken. In deze methodes wordt de betrouwbaarheid dus niet (expliciet) doorgerekend maar ingeschat op basis van functies die de relatie tussen de onzekere invoerparameters (bv. watervraag) en de hydraulische prestatie (bv. druk) beschrijven. Enkele voorbeelden van dergelijke methodes zijn:

- De FOSM (*first-order second-moment*) methode (Xu en Goulter, 1998): in deze methode wordt een lineaire relatie aangenomen tussen de onzekere invoerparameters (bv. watervraag) en de responsparameters (bv. druk). Dit is echter vaak niet het geval in drinkwaterdistributiesystemen.
- De FORM (*advanced first-order second moment method*) (Xu en Goulter, 1999): deze methode is soortgelijk aan de FOSM, maar gaat beter om met de niet-lineariteit tussen invoer- en responsparameters en is daarom nauwkeuriger dan de FOSM.
- De *integration*-methode (Babayan, et al., 2006): net zoals in de FOSM, worden de twee eerste momenten van de responsparameters geschat. Maar in deze methode zijn de aannames over de relatie tussen de invoer- en responsparameters minder strikt. De auteurs geloven dat deze methode tot betere inschattingen leidt.
- De  $\theta$  methode (Sun, et al., 2011): in deze methode wordt de betrouwbaarheid vervangen door een parameter  $\theta$  die kan worden bepaald door een analytische formule. Deze methode wordt toegepast op optimalisatieproblemen met meerdere doelfuncties en lijkt tot kortere rekentijden te leiden.

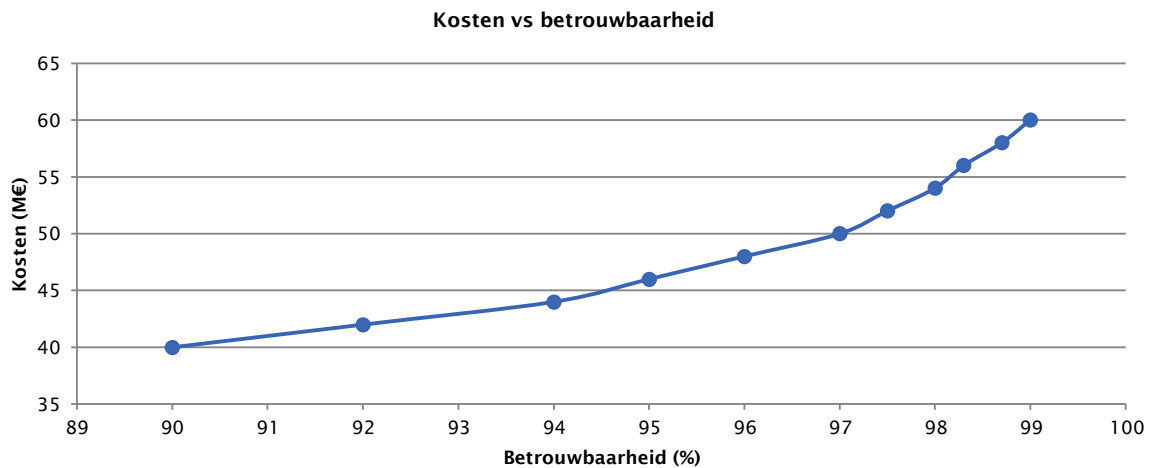
<sup>2</sup> deze benadering is vergelijkbaar met de leveringszekerheidstoets die in Nederland wordt toegepast door leidingnetmodellereurs.

<sup>3</sup> het totaal aantal berekeningen in een dergelijke benadering is gelijk aan het aantal MCS of LHS simulaties (denk aan orde grootte  $10^3$  tot  $10^5$ ) vermenigvuldigd met het aantal functie-evaluaties van het optimalisatie algoritme (denk aan minimale orde grootte  $10^6$ ), dus een totaal van  $10^9$  tot  $10^{11}$  hydraulische simulaties van het leidingnetmodel.

De voorgenoemde methodes zijn voordeliger qua rekentijd maar hebben het nadeel dat de betrouwbaarheid slechts ingeschat is (er kunnen dus afwijkingen t.o.v. de wekelijkheid optreden bij de berekeningen).

### Betrouwbaarheid als randvoorwaarden of als doelfunctie

Oorspronkelijk zijn de stochastische benaderingen uitgewerkt door een randvoorwaarde voor de betrouwbaarheid toe te voegen aan het deterministisch ontwerp (*single-objective optimalisatieproblemen*). Het resultaat hiervan is het goedkoopste ontwerp dat voldoet aan een bepaalde betrouwbaarheidseis. Betrouwbaarheid is hierin gedefinieerd als de kans dat een vooraf gedefinieerde minimale druk wordt gehaald in een reeks van simulaties met steeds veranderende watervraag. Doorontwikkelingen op het gebied van optimalisatiealgoritmes hebben het mogelijk gemaakt om de betrouwbaarheid als een tweede doelfunctie in aanmerking te nemen (*multi-objective optimalisatieproblemen*). Hiermee wordt een Pareto-curve verkregen die de *trade-off* tussen kosten en betrouwbaarheid inzichtelijk maakt (Figuur 6). Drinkwaterbedrijven kunnen op basis van een dergelijke curve beter onderbouwde keuzes maken, omdat de afweging tussen kosten en betrouwbaarheid juist inzichtelijk is gemaakt.



FIGUUR 6. VOORBEELD VAN HET RESULTAAT VAN EEN OPTIMALISATIEPROBLEEM MET TWEE DOELSTELLINGEN: DE VERKREGEN PARETO-CURVE MAAKT DE AFWEGING TUSSEN KOSTEN EN BETROUWBAARHEID INZICHTELIJK.

### 2.2.3 Robuuste benadering

In een stochastische benadering wordt een systeem ontworpen om aan een bepaalde betrouwbaarheid te voldoen, bv. 99%. Dit wil zeggen dat er een kans op falen van 1% wel degelijk bestaat en hoe het systeem presteert in deze situatie is onbekend. Sommige auteurs verdedigen dat het beter is om systemen te ontwerpen die “goed genoeg” presteren onder alle mogelijke omstandigheden (Brown, 2010). Dit is waar het concept robuustheid ontstaat: de robuustheid wordt begrepen als het vermogen van het systeem om te blijven functioneren onder verschillende omstandigheden. Bij robuustheid staat de prestatie van het netwerk in zijn geheel (als een systeem) tegenover de onzekerheid centraal, en het systeem wordt bekeken vanuit het standpunt van de ontwerper. Men kan ook zeggen dat in deze benadering risico centraal staat: de kans en effecten van scenario's worden expliciet in aanmerking genomen.

### Robuustheid kwantificeren

In robuuste optimalisatieproblemen worden de invoervariabelen vaak beschreven door middel van scenario's waaraan een bepaalde kans is toegekend, vaak op basis van expertinschatting. Het optimalisatieprobleem neemt dan alle scenario's in aanmerking om tot een oplossing te komen dat "robuust" is. Maar hoe wordt robuustheid gekwantificeerd? In de literatuur worden vaak twee soorten robuustheidsindicatoren in aanmerking genomen (Mulvey, et al., 1995):

- "Solution robust" betekent dat een oplossing *dicht* tegen het optimum is voor alle scenario's. D.w.z. dat voor elke individuele scenario één optimaal ontwerp wordt bepaald en de gekozen oplossing zo dicht mogelijk tegen alle individuele oplossingen is (term in het groen in vergelijking 5).
- "Model robust" betekent dat een oplossing *bijna* voldoet aan de randvoorwaarden voor alle scenario's, d.w.z. dat het niet voldoen aan een bepaalde randvoorwaarden wordt toegestaan maar strafpunten krijgt (term in het rood in vergelijking 5).

Een voorbeeld van een doelfunctie voor het robuust ontwerp van een leidingnetwerk is:

$$\text{Min} , \sum_{s=1}^{NS} \text{Prob}_s \left[ \left( \sum_{j=1}^{NP} C_j(D_j)L_j - \text{Cref}_s \right)^2 + C_{pen} \sum_{i=1}^{NN} \max \left\{ 0; (H_{\min des,i,s} - H_{i,s})^2 \right\} \right] \quad (5)$$

Waarin:

$\text{Prob}_s$  – kans dat scenario  $s$  voorkomt;  $NS$  – aantal scenario's, waarin een scenario wordt geïdentificeerd door  $s = 1, \dots, NS$ ;  $NP$  – leidingen in het model, geïdentificeerd door  $j = 1, \dots, NP$ ;  $C_j$  – unitaire kosten van leiding  $j$  afhankelijk van de diameter van de leiding ( $D_j$ );  $L_j$  – lengte van leiding;  $\text{Cref}_s$  – kosten van het ontwerp (enkel) geoptimaliseerd voor scenario  $s$ ;  $C_{pen}$  – strafpunten voor het niet halen van de gewenste druk;  $NN$  – knopen in het model, geïdentificeerd door  $i = 1, \dots, NN$ ;  $H_{\min des,i,s}$  – gewenste minimale druk op knoop  $i$  onder scenario  $s$ ; gesimuleerde druk op knoop  $i$  onder scenario  $s$ .

### 2.3 Stand van de praktijk

Aan de deelnemende drinkwaterbedrijven is gevraagd om een vragenlijst in te vullen over de huidige praktijk m.b.t. het ontwerp van streefstructuren en de daarin gebruikte watervraag. Voor de volledige reacties van de deelnemende drinkwaterbedrijven wordt de lezer verwezen naar bijlage I.

Onderstaande tabel bevat een samenvatting van de reacties. Hieruit is duidelijk dat streefstructuren worden ontworpen voor één toekomstige watervraag. Deze toekomstige watervraag is grof bepaald aan de hand van prognoses, de huidige watervraag en door veiligheidsmarges toe te kennen. Drinkwaterbedrijven hebben de neiging om bij een grote onzekerheid 'te groot' te dimensioneren. Dit is nadelig voor de kosten en waterkwaliteit. Verschillende scenario's of kansen worden niet formeel in aanmerking genomen. Daarnaast kunnen aspecten zoals de bluswatervraag vaak maatgevend zijn voor de laatste delen van het secundaire net en het tertiaire net. Ontwerpen worden wel regelmatig tegen het licht gehouden en waar nodig aangepast.

Uit de reacties is duidelijk dat er ruimte is voor verdere aanscherping van toekomstscenario's en meer inzicht over de factoren die de toekomstige watervraag bepalen. Daarnaast is er een gebrek aan een benadering om de meerdere scenario's in aanmerking te nemen in het ontwerpproces en deze tegen elkaar af te wegen.

TABEL 3. SAMENVATTING VAN DE REACTIES VAN DE DEELNEMENDE DRINKWATERBEDRIJVEN OP DE VRAGENLIJST MET BETREKKING TOT HET ONTWERP VAN STREEFSTRUCTUREN EN KEUZES VOOR DE GEBRUIKTE WATERVRAAG.

Vraag	Samenvatting van reacties
1. Voor welke termijn worden streefstructuren ontworpen?	Erg variërend: van 5 tot 50 jaar.
2. Welke watervraag wordt gebruikt bij het ontwerp van streefstructuren en hoe wordt deze watervraag bepaald?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Max-dag (historische max dag van de laatste 10 jaar) + ca 10% (afhankelijk van het gebied kan dit ook tussen de 8-12% zijn).</li> <li>• Prognoses gemaakt door Icastat of ABF research.</li> <li>• de <math>Q\sqrt{N}</math>-methodiek, waarin al een bepaalde mate van overschatting aanwezig is.</li> </ul>
3. Wordt onzekerheid in aanmerking genomen? a) Indien ja, hoe? b) Indien nee, waarom?	<p>De onzekerheid wordt in aanmerking genomen door een veiligheidsmarge toe te voegen aan de toekomstige watervraag, bv. plus 10%. Hiermee wordt in zeker zin overgedimensioneerd.</p> <p>Een andere genoemde aanpak is om ontwerpen regelmatig te herzien en aan te passen aan de hand van nieuwe ontwikkelingen.</p>
4. Hoe zou onzekerheid in aanmerking kunnen worden genomen?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nauwkeurigere groeipercentages, die het type verbruik ook in aanmerking nemen (huishoudelijk <i>versus</i> niet-huishoudelijk).</li> <li>• Overschrijdingskansen van de output bepalen i.p.v. de overschrijdingskansen op de input (hoe vaak wordt een druk onderschreden bij een bepaald scenario?).</li> <li>• Door regelmatig de ontwerpen te herzien.</li> </ul>
5. Waar loop je in de praktijk tegenaan?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebrek aan kennis over welke invloedsfactoren b.v. technische-, beleids-, of gedragsmatige ontwikkelingen en hun onderlinge verband, de grenswaarden voor de toekomstige watervraag bepalen.</li> <li>• Veranderingen van het type verbruikers in een gebied: bv. dat bestaande gebieden met een agrarisch of bedrijfsmatig gebruik opnieuw worden ingericht met een woonfunctie. Dit heeft zo'n grote lokale impact dat het systeem aangepast moet worden.</li> <li>• Overdimensionering op basis van bluscapaciteit (de watervraag is dan niet maatgevend maar de levering van bluswater wel, dit geldt meestal voor het tertiaire net, of enkele delen van het secundaire net), onduidelijkheden in afspraken met klanten met grotere aansluitingen, gebiedsspecifieke randvoorwaarden.</li> </ul>



## 3 Robuust ontwerp van streefstructuren

### 3.1 Inleiding

Uit het literatuuronderzoek is het duidelijk dat meerdere benaderingen mogelijk zijn voor het ontwerp van leidingnetwerken waarin de onzekerheid in invoerparameters in aanmerking wordt genomen. In dit project is gekozen om een robuuste benadering te volgen, d.w.z., een benadering waarin de onzekerheid (in dit geval met betrekking tot de watervraag) wordt beschreven doormiddel van scenario's met bijhorende kansen. Deze benadering is gekozen voor de volgende redenen:

- De rekentijd van een dergelijke benadering is naar verwachting behapbaar (in tegenstelling tot bv. stochastische benaderingen waarin duizenden (Monte Carlo) simulaties moeten worden doorgerend).
- De benadering is toepasbaar op verschillende soorten scenario's en kan daarom ook worden gebruikt om toekomstscenario's door te rekenen waarin veranderingen in de watervraag en/of aanleg van nieuwe wijken, in aanmerking worden genomen.
- De benadering biedt inzicht in hoe goed (of hoe slecht) een ontwerp blijft presteren onder verschillende scenario's, in tegenstelling tot benaderingen waarin enkel wordt gekeken of het ontwerp wel of niet voldoet aan bepaalde randvoorwaarden.
- De ontwerper kan zelf bepalen hoe belangrijk het voldoen aan de randvoorwaarden is door lagere of hogere strafpunten toe te kennen aan het optimalisatieprobleem.
- De benadering sluit goed aan bij de huidige praktijk (waarin één scenario met een kans van eens in de tien jaar wordt gerekend, d.w.z. de hoogste gemeten watervraag van de afgelopen tien jaar) wat de kans op een succesvolle implementatie vergroot.

### 3.2 Optimalisatieprobleem

#### 3.2.1 Doelfunctie

Om vorm te geven aan de robuuste benadering voor het ontwerp van streefstructuren zijn meerdere optimalisatieproblemen denkbaar. In dit onderzoek is een optimalisatieprobleem gebaseerd op een "mean-variance model" (Mulvey, et al., 1995, Yamashita, et al., 2007, Cunha en Sousa, 2010b, Creaco, et al., 2015) ontwikkeld. Dit optimalisatieprobleem is gericht op het vinden van een ontwerp dat de som van het gemiddelde en de variantie van een functie minimaliseert. De doelfunctie is beschreven door:

$$\mathbf{Min.} \mu + \lambda \cdot Var(f_s) \quad (1)$$

Met:

$$\mu = \sum_{s=1}^{NS} p_s \cdot f_s \quad (2)$$

$$Var(f_s) = \sum_{s=1}^{NS} p_s \cdot (f_s - \mu)^2 \quad (3)$$

De functie  $f_s$  beschrijft de prestatie voor een individuele scenario  $s$ . De eerste term in vergelijking (1) is het gewogen gemiddelde van de functie  $f_s$  voor de verzameling  $S$  van alle

scenario's, met  $NS$  leden, zie vergelijking (2). De tweede term in vergelijking (1) is de variantie van de functie  $f_s$  voor de verzameling  $S$  van alle scenario's, zie vergelijking (3). De kans van optreden voor iedere scenario is gegeven door  $p_s$ . De coëfficiënt  $\lambda$  is de zogenaamde variantiefactor gekozen door de gebruiker en geeft de mate van risico-aversie aan. Door rekening te houden met het gemiddelde en de variantie van de functie  $f_s$ , kan onderscheid worden gemaakt tussen ontwerpen met hetzelfde gemiddelde (som van kosten en prestatie) maar verschillende prestaties onder de verschillende scenario's. Ontwerpen waarvoor de prestatie beter is, d.w.z., waaraan minder strafpunten worden toegekend en waarvoor de prestatie minder afwijkt tussen scenario's, worden hierdoor bevorderd. Wanneer enkel het gemiddelde in aanmerking wordt genomen, kan een ontwerp dat gemiddeld goed presteert, maar heel slecht op een scenario presteert, worden gekozen. Het in aanmerking nemen van de variantie maakt het dus mogelijk om het risico op slecht presteren onder controle te houden. Om hier inzicht in te krijgen kan de ontwerper verschillende waarden voor  $\lambda$  uitproberen.

De functie  $f_s$  houdt rekening met de kosten en de prestatie van het ontwerp onder de verschillende watervraagscenario's en is beschreven door:

$$f_s = \text{kosten} + C_{pen} \cdot \text{prestatie} = \sum_{j=1}^{NP} L_j \times C_j(D_j) + C_{pen} \cdot \left(1 - \frac{\sum_i^{NN} q_{i,s}}{\sum_i^{NN} d_{i,s}}\right) \quad (2)$$

De eerste term beschrijft de aanlegkosten van het ontwerp. De kosten per leiding  $C_j$ , zijn afhankelijk van het gekozen materiaal en diameter voor de leiding ( $D_j$ ), en de lengte van de leidingen ( $L_j$ , uit het leidingnetmodel). De tweede term is gebaseerd op de "mate van voldoening" (Creaco, et al., 2015) en beschrijft de prestatie van het ontwerp op basis van de mate waarin de watervraag wordt voldaan onder de verschillende watervraagscenario's. Voor een bepaald ontwerp (waarvoor de kosten zijn bepaald in de eerste term) wordt voor iedere knoop  $i$  en ieder scenario  $s$  het werkelijke geleverde water op een enkele tijdstip ( $q_{i,s}$ ) bepaald door een simulatie van het leidingnetmodel. Het geleverde water op ieder knoop is afhankelijk van de druk op de knoop en wordt doorgerekend aan de hand van de volgende benadering (Wagner, et al., 1988):

$$q_{i,s} = \begin{cases} 0 & \text{if } H_{i,s} < H_{i,0} \\ d_{i,s} \left( \frac{H_{i,s} - H_{i,0}}{H_{i,min} - H_{i,0}} \right)^\gamma & \text{if } H_{i,0} \leq H_{i,s} < H_{i,min} \\ d_{i,s} & \text{if } H_{i,s} \geq H_{i,min} \end{cases} \quad (3)$$

Waarin  $H_{i,s}$  de druk op knoop  $i$  onder scenario  $s$  is,  $H_{i,0}$  de minimale druk om enig water te kunnen leveren is,  $H_{i,min}$  de minimale druk om 100% van de watervraag te kunnen leveren is, en  $\gamma$  een exponent is, gebruikelijk gelijk aan 0,5.

Wanneer het geleverde water lager is dan de watervraag ( $d_{i,s}$ ) worden strafpunten toegekend aan de functie. Deze strafpunten zijn afhankelijk van de strafcoëfficiënt  $C_{pen}$  (gekozen door de ontwerper) en de mate waarin niet aan de watervraag wordt voldaan. Het niet voldoen aan de watervraag benadeelt dus de doelfunctie. Het is van belang om een geschikte waarde voor  $C_{pen}$  te kiezen. Dit kan zowel door (1) het probleem door te rekenen met verschillende waarden en aan de hand van de resultaten en interpretatie daarvan, de meest geschikte waarde te kiezen, of (2) op basis van prestatiekosten die, aan de hand van expertkennis of vastgelegde bedrijfsstrategie, monetair kunnen worden beschreven.

### 3.2.2 Randvoorwaarden

Naast de doelfunctie dient het optimalisatieprobleem ook enkele randvoorwaarden in aanmerking te nemen, met name:

- De diameters voor de leidingen mogen worden gekozen uit een lijst met beschikbare diameters (aangeleverd door het drinkwaterbedrijf).
- Per leiding kan één diameter worden gekozen.
- De afgedwongen minimale druk is  $H_0$ , om enig water te kunnen leveren (dit kan gelijk zijn voor alle knopen in leidingnetmodel of kan per knoop worden gespecificeerd). Ontwerpen die hier niet aan voldoen worden afgewezen. Drinkwaterbedrijven kunnen, desgewenst, een hogere minimale druk afdwingen.
- De gewenste minimale druk is  $H_{min}$ , om 100% van de watervraag te kunnen leveren (dit kan gelijk zijn voor alle knopen in leidingnetmodel of kan per knoop worden gespecificeerd). Ontwerpen die hier niet aan voldoen krijgen strafpunten zoals aangegeven in de doelfunctie.

Andere optionele randvoorwaarden zoals de leveringszekerheid en -continuïteit, minimale snelheid, of verblijftijd, zouden ook in aanmerking kunnen worden genomen.

### 3.2.3 Beslisvariabelen

De beslisvariabelen zijn de diameters van de leidingen in het leidingnetmodel,  $D_j$ .

## 3.3 Watervraagscenario's

### 3.3.1 Modeleren onzekere watervraag

Een beperkt aantal watervraagscenario's en bijhorende kansen worden in aanmerking genomen in het optimalisatieprobleem. Voor ieder scenario wordt een specifieke (piek)watervraag aan elke knoop in het leidingnetmodel toegekend en ieder scenario heeft een bijhorende kans. Een watervraagscenario wordt dus begrepen als een combinatie van (piek)watervragen die tegelijkertijd voorkomen op de verschillende verbruiksknopen in een leidingnetmodel, en kan worden beschreven door middel van een vector:

$$D_s = [d_{1,s}, d_{2,s}, \dots, d_{n,s}], \quad \text{voor } i = 1, 2, \dots, n \text{ en } s = 1, 2, \dots, S$$

waarin  $D_s$  de verbruiksvector is voor scenario  $s$ , en  $d_{i,s}$  het (piek)verbruik op knoop  $i$  voor scenario  $s$ . De kans dat dit scenario optreedt is  $P_s$ .

De vraag is nu hoe verschillende waarden voor  $D_s$  en  $P_s$  te bepalen. Hiervoor zijn twee benaderingen denkbaar: de top-down en de bottom-up.

### 3.3.2 Top-down

In deze benadering wordt het patroon (en de piekfactoren) aan het pompstation gelijk verdeeld over alle gebruikers in het gebied. Dit betekent dat alle gebruikers hetzelfde patroon krijgen en dat de piekwatervraag dus tegelijkertijd voorkomt op alle knopen van het leidingnet.

Op basis van langdurige metingen aan het pompstation (tijdreeksen) kan de kansverdeling voor piekwatervragen worden bepaald, onder de veronderstelling dat deze verdeling constant is in de tijd. Deze benadering wordt gevolgd door drinkwaterbedrijven voor het bepalen van max-uur max-dag: het hoogste verbruik van de afgelopen 10 jaar gemeten aan pompstations die leveren aan een voorzieningsgebied. Het gaat dus in feite om een uitbreiding van de huidige praktijk, waarin niet één piekwatervraag, maar verschillende piekwatervragen,  $D_s$  vectoren, met verschillende kansen,  $P_s$ , worden bepaald.

Deze benadering kan ook worden uitgebreid door een toekomstige dagafzet en piekfactoren in te schatten, afhankelijk van klimaatverandering, vakantiespreiding en kenmerken van de leveringsgebieden. Hiervoor kunnen bijvoorbeeld de modellen beschreven in de BTO-projecten 'De gevolgen van klimaatverandering en vakantiespreiding voor de drinkwatervraag' (Vonk, et al., 2017) en 'Oorzaak piekverbruik' (Hillebrand, 2018) als basis worden gebruikt. Met deze modellen is het mogelijk om gemiddelde en dagfactoren van het toekomstige verbruik te voorspellen. De piekfactoren op uurbasis, van belang voor het ontwerp van streefstructuren, worden op dit moment niet door deze modellen voorspeld. Dit wil dus zeggen, dat er nog aanvullend onderzoek nodig is om de voorgenoemde benadering te kunnen gebruiken voor het genereren van watervraagscenario's voor het ontwerp van streefstructuren.

### 3.3.3 Bottom-up

In deze benadering worden, per knoop in het leidingnetmodel, tijdreeksen van verbruik gesimuleerd, bv. met SIMDEUM. Voor elke knoop worden de statistieken van max-uur bepaald (gemiddelde, variantie en correlatie tussen knopen). Op basis van de statistieken per knoop en de correlatie tussen knopen, kan doormiddel van een sampling methode (bv. Latin Hypercube) een groot aantal gelijktijdige reeksen van verbruik voor het gehele leidingnet worden gegenereerd. Deze reeksen worden vervolgens teruggebracht naar een beperkt aantal scenario's, de  $D_s$  vectoren en de bijbehorende kansen,  $P_s$ , worden bepaald.

Veranderingen in de toekomstige watervraag kunnen in vervolgonderzoek in aanmerking worden genomen door veranderingen in gezinssamenstelling en waterverbruikende apparatuur in te voeren in SIMDEUM. Zo kunnen bijvoorbeeld de toekomstscenario's beschreven in (Agudelo-Vera en Blokker, 2014) worden gebruikt om de gemiddelde toekomstige watervraag te voorspellen. Deze aanpak biedt ook de mogelijkheid om het piekverbruik van een gemiddelde dag te voorspellen. Op een gemiddelde dag komt het piekverbruik in de ochtend voor, doordat veel mensen gaan douchen. Het verbruik van max-uur op max-dag komt echter niet overeen met het ochtendverbruik, maar vindt juist plaats aan het einde van de middag/vroege avond, door (vermoedelijk) een combinatie van het sproeien van tuinen en douchen. Het toepassen van deze benadering vergt dus ook aanvullend onderzoek, om juist max-uur van max-dag te kunnen voorspellen.

Tabel 4 geeft een overzicht van de voor- en nadelen van de top-down- en bottom-up-benaderingen.

TABEL 4. VOOR- EN NADELEN VAN DE TOP-DOWN- EN BOTTOM-UPBENADERINGEN VOOR HET GENEREN VAN WATERVRAAGSCENARIO'S.

	Voordelen	Nadelen
Top-down	<ul style="list-style-type: none"> <li>De statistische beschrijving van de piekwatervraag is gebaseerd op metingen, dus de "echte" variabiliteit wordt in kaart gebracht;</li> <li>specifiek voor een gebied.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Behoeft aan metingen van meerdere jaren (minstens 10 jaar);</li> <li>aanname van hetzelfde patroon voor alle gebruikers in het gebied en een gelijktijdige piekwatervraag;</li> <li>veronderstelling dat de kansverdeling van metingen uit het verleden representatief is voor gedrag in de toekomst (onvoorspelbaarheid).</li> </ul>
Bottom-up	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geen behoefte aan metingen;</li> <li>geen aanname van gelijktijdigheid van de piekwatervraag.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Behoeft aan invoer informatie voor SIMDEUM (o.a. gezinssamenstelling, leeftijden), dit leidt tot parametrische onzekerheid;</li> <li>veronderstelling dat toekomstig gedrag goed te voorspellen is met het gebruikte model, dit leidt tot structurele onzekerheid;</li> <li>langere rekentijd voor het genereren van de scenario's.</li> </ul>

### 3.3.4 Stappenplan top-down benadering: historische gegevens

In overleg met de begeleidingsgroep is unaniem besloten om in dit onderzoek de top-down benadering te volgen. Op dit moment sluit deze benadering het beste aan bij de huidige methode van patroon en piekwatervraag bepaling in de praktijk, en is daarom wellicht ook makkelijker te implementeren in de praktijk.

Figuur 7 biedt een overzicht van de verschillende stappen die gevolgd dienen te worden om watervraagscenario's te genereren op basis van de top-downbenadering.

In de eerste fase, datavergaring, is het van belang om een omvangrijke tijdreeks van metingen te kiezen. Hoe groter deze tijdreeks, hoe beter de statistische onderbouwing van de daaruit volgende watervraagscenario's. De gebruikte tijdreeksen dienen minstens 10 jaar aan metingen te bevatten. Ook de tijdstap van de metingen is van belang: hoe kleiner de tijdstap hoe dichter bij de momentane piekfactor kan worden gerekend. Bij grotere tijdstappen wordt de piekwatervraag uitgemiddeld, wat zich vertaalt in een "verlies" aan informatie en aan extremen. Een tijdstap van enkele seconden tot enkele minuten is ideaal. Voor tijdstappen groter dan één uur wordt de analyse erg beperkt. Daarnaast is het uiteraard van belang om de analyse toe te passen op reële watervraag, d.w.z. dat uitbijters door fouten in metingen, lekkages of spuiacties uit de data gefilterd dienen te worden.



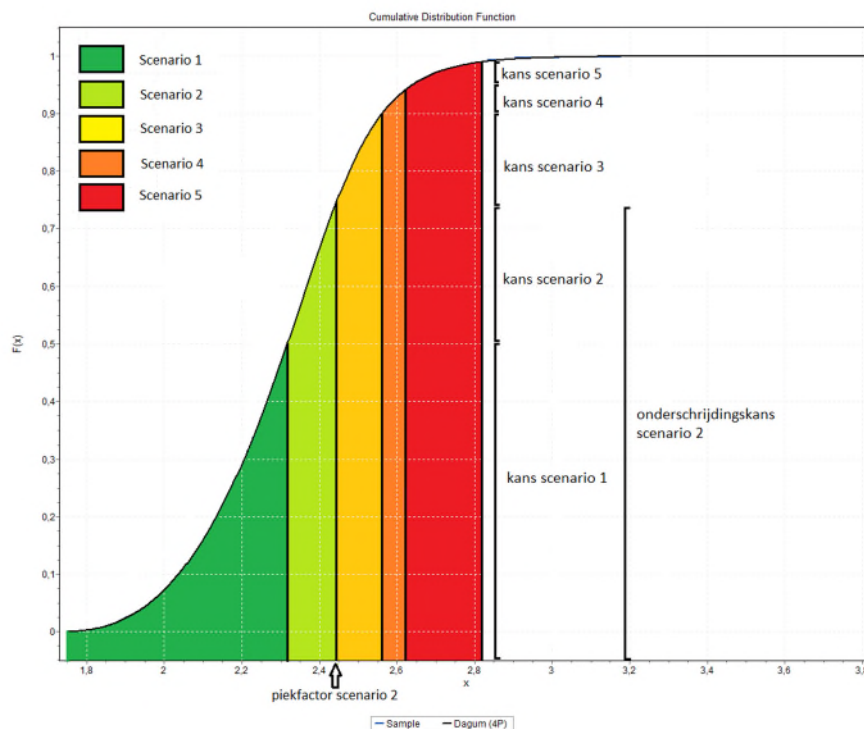
FIGUUR 7. STAPPENPLAN VOOR HET GENEREREN VAN WATERVRAAGSCENARIO'S OP BASIS VAN DE GEKOZENTOP-DOWN BENADERING. <sup>4</sup>

De reeks met dagelijkse piekfactoren kan worden bepaald door de maximale waterverbruik te delen door de gemiddelde watervraag. Indien een leidingnetmodel van het gebied beschikbaar is, is het ook van belang om de daarin opgenomen gemiddelde watervraag te vergelijken met de metingen. Indien nodig kan de watervraag in het model worden bijgesteld. De volgende stap is om te bepalen of de reeks met piekfactoren kan worden

<sup>4</sup> Het kan dat de er geen geschikte kansverdeling is om de data te beschrijven. In dit geval kunnen overschrijdingskansen van piekfactoren worden bepaald doormiddel van een frequentieanalyse van de metingen, d.w.z. door te bepalen hoe vaak een piekfactor wordt overschreden (of onderschreden).

beschreven door een kansverdeling. Hiervoor kunnen de bijhorende overschrijdingskansen worden bepaald doormiddel van een frequentieanalyse, d.w.z. voor een bepaald waarde wordt geteld hoe vaak piekfactoren hieronder (of hierboven) voorkomen in de tijdreeks. De alternatief is om statistische toetsen te gebruiken, zoals de Kolmogorov-Smirnov-, Anderson-Darling- of Chi-kwadraattoets. Deze toetsen onderzoeken of de verdeling waaruit de data (piekfactoren) getrokken is, significant afwijkt van bekende verdelingen zoals de normale kansverdeling. Wanneer een geschikte kansverdeling wordt gevonden om de piekfactoren te beschrijven, dienen ook de bijhorende parameters van de verdeling te worden bepaald.

De volgende stap betreft het definiëren van een aantal scenario's. De gebruiker kiest zelf hoeveel scenario's hij in aanmerking wil nemen. Voor ieder scenario wordt een piekfactor gekozen en de bijhorende onderschrijdingskans bepaald (of vice-versa). Hiervoor wordt of de (cumulatieve) kansverdeling of de frequentieanalyse gebruikt. Dit betekent dat de piekfactor van de scenario de maximale watervraag is die kan voorkomen in het scenario. De kans van iedere scenario is gelijk aan de onderschrijdingskans van de piekfactor van het scenario min de onderschrijdingskans van de voorgaande scenario's. Zie Figuur 8 voor een illustratie van deze stap. Tenslotte wordt voor ieder scenario het waterverbruik per knoop bepaald, door de gemiddelde watervraag per knoop te vermenigvuldigen door de piekfactor die bij het scenario hoort.



FIGUUR 8. WATERVRAAGSCENARIO'S EN BIJHORENDE KANSEN.

### 3.3.5 Stappenplan top-down benadering: toekomstscenario's

Het hierboven uitgelichte stappenplan resulteert in historische watervraagscenario's. Dit impliceert de veronderstelling dat de toekomst als het heden zal zijn. De toekomst kan echter verschillen door o.a. veranderingen in de bevolking (incl. gemiddelde gezinssamenstelling), bebouwing, bedrijvigheid, in de waterverbruikende apparatuur en penetratie daarvan, in het gedrag van mensen (bv. meer milieubewust of comfort gericht gedrag) en de omstandigheden (bv. klimaatverandering). Drinkwatersystemen, die

ontworpen zijn op basis van de historische piekvraag, zullen niet optimaal werken wanneer de watervraag drastisch verandert, bijvoorbeeld door installatie van regendouches in plaats van waterbesparende douches.

Het stappenplan voor de top-down benadering kan ook worden toegepast om toekomstscenario's te genereren. In dit geval is het startpunt niet een tijdreeks van metingen, maar dient er eerst een tijdreeks van toekomstige watervraagwaardes te worden gegenereerd. Een dergelijke tijdreeks kan worden gegenereerd op basis van de al eerdere genoemde benaderingen in (Agudelo-Vera en Blokker, 2014) en (Vonk, et al., 2017) en (Hillebrand, 2018).

## 4 Functioneel ontwerp

### 4.1 Uitbreiding Gondwana

Om het voorgestelde optimalisatieprobleem voor het robuust ontwerp van streefstructuren door te kunnen rekenen, is Gondwana uitgebreid met nieuwe functionaliteit. De uitbreiding was voornamelijk nodig om drukafhankelijke simulaties van leidingnetmodellen uit te kunnen voeren, en de prestatie van het ontwerp onder verschillende watervraagscenario's te kunnen beoordelen. Tabel 5 geeft hier een overzicht van.

TABEL 5. UITBREIDING VAN FUNCTIONALITEIT IN GONDWANA.

Tabblad	Uitbreiding
Netwerk	Drukafhankelijke simulatie van een leidingnetmodel. De EPANETpdd tool (Morley en Tricarico, 2008) is hiervoor ingebouwd in Gondwana. De gebruiker kan zelf een drempelwaarde voor de minimale druk vastleggen. Bij een druk hoger dan de drempelwaarde wordt 100% van de watervraag geleverd. Wanneer de druk lager is dan de drempelwaarde is de hoeveelheid geleverd water drukafhankelijk.
Scenario's	Verschillende watervraagscenario's en bijhorende kansen inlezen uit een Excel-bestand en voor ieder scenario een simulatie van het leidingnetmodel uitvoeren.
Doelfuncties	Prestatie per scenario uitrekenen. Gemiddelde en variantie van de prestatie over alle scenario's uitrekenen, waarin de kansen van de scenario's in aanmerking worden genomen (gewogen somming van alle scenario's o.b.v. bijhorende kansen).
Randvoorwaarden	Mate waarin de watervraag wordt geleverd: geleverd water moet gelijk zijn aan de watervraag van ieder scenario (berekening per scenario). Wanneer de druk lager is dan de drempelwaarde, is de hoeveelheid geleverd water kleiner dan de watervraag (o.b.v. van de drukafhankelijke simulatie) en worden strafpunten (gekozen door de gebruiker) toegekend aan de bijhorende scenario en opgeteld bij de doelfunctie.
Resultaten	Visualisatie van de prestatie per scenario: weergave van de druk en geleverd water per scenario. Weergave van de prestatie van de oplossing: totaal en uitgesplitst naar gemiddelde en variantie, kosten leidingen en strafpunten.



## 5 Casestudy

### 5.1 Watervraagscenario's

#### 5.1.1 Scenario's op basis van historische gegevens

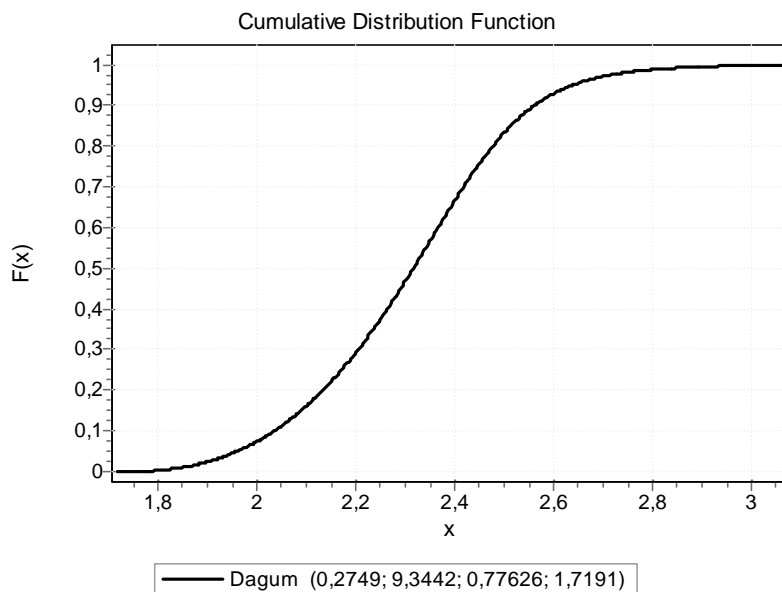
Dunea en Brabant Water hebben beide data aangeleverd voor analyse en uitwerking van de watervraagscenario's. Deze data zijn tijdreeksen van waterverbruik van de gebieden Roosendaal (Brabant Water), Wassenaar en Vlietregio (Dunea), gemeten aan de pompstations gedurende een lange termijn. Tabel 6 bevat een samenvatting van de beschikbare data.

De datasets zijn onderzocht en de resultaten zijn besproken met Dunea en Brabant Water. De tijdreeks van Wassenaar is gekozen voor verdere uitwerking: dit is een zeer volledige en langdurige meetset, en is daardoor geschikt voor het bepalen van historische piekfactoren. Voor het bepalen van de historische piekfactoren is het eerder beschreven stappenplan (3.3.4.) toegepast.

Samen met Dunea is in detail gekeken naar afwijkende data en de dataset is waar nodig gecorrigeerd. Vervolgens is de reeks met het dagelijkse maximale verbruik bepaald. Daarnaast is ook het gemiddelde verbruik over de hele meetperiode bepaald en het gemiddelde verbruik in het leidingnetmodel van Wassenaar. Het gemiddelde gemeten verbruik ( $208.34 \text{ m}^3\text{u}^{-1}$ ) wijkt af van het gemiddelde verbruik in het leidingnetmodel ( $198.39 \text{ m}^3\text{u}^{-1}$ ). Om (mogelijk) in de toekomst de scenario's te laten matchen met het leidingnetmodel, is gekozen om het verbruik in het leidingnetmodel te gebruiken voor het bepalen van de piekfactoren. Vervolgens is bepaald welke kansverdeling het beste past op de reeks piekfactoren, doormiddel van statistische testen. Uit zowel de Kolmogorov-Smirnov-, Anderson-Darling- en Chi-kwadraattesten, komt de Dagumverdeling met vier parameters het beste uit. De cumulatieve kansverdeling van de piekfactoren en bijhorende parameters is weergegeven in Figuur 9. Als laatste stap zijn watervraagscenario's aangemaakt door een aantal piekfactoren en bijhorende onderschrijdingskansen te bepalen. Tabel 7 en Tabel 8 illustreren de resultaten voor respectievelijk vijf en tien scenario's. In deze tabellen is naast de cumulatieve kans o.b.v. van de Dagumkansverdeling, ook de cumulatieve frequentie o.b.v. van de beschikbare data uitgerekend, d.w.z. dat de onderschrijdingskansen van de gekozen piekfactoren zijn bepaald door middel van een frequentieanalyse van de metingen. Het verschil tussen beide benaderingen is niet erg significant. De kans van ieder scenario is bepaald door de onderschrijdingskans van de voorgaande scenario's af te trekken van de onderschrijdingskans van de piekfactor van de scenario. Hiervoor zijn de onderschrijdingskansen gebaseerd op de frequentieanalyse in aanmerking genomen.

TABEL 6. BESCHIKBARE TIJDREEKSEN VAN WATERVERBRUIK (M<sup>3</sup>U<sup>-1</sup>).

Gebied	Jaar	Gemiddelde	Maximum	Tijdstap	Kwaliteit en volledigheid
Roosendaal	2002	454,16	956,25	2 min	zo goed als compleet
	2003	438,26	2902,50	2 min	redelijk compleet, maar onbetrouwbaar (verdachte waardes)
	2004	488,07	3577,50	2 min	redelijk compleet, maar onbetrouwbaar
	2005	567,24	4815,00	2 min	redelijk compleet, maar onbetrouwbaar
	2006	613,40	1350,00	2 min	weinig data
	2007	543,42	2587,50	2 min	redelijk compleet, maar onbetrouwbaar
	2008	555,41	1260,00	2 min	zo goed als compleet
	2009	552,59	1215,00	2 min	redelijk compleet
	2010	604,98	1440,00	2 min	zo goed als compleet
	2011	608,33	1485,00	2 min	zo goed als compleet
	2012	571,94	2835,00	2 min	redelijk compleet, maar onbetrouwbaar
	2013	546,55	2632,50	2 min	redelijk compleet, maar onbetrouwbaar
	2014	462,59	2354,29	2 min	redelijk compleet, maar onbetrouwbaar
	2015	462,61	1102,50	2 min	weinig data
	2016	432,34	1105,93	2 min	weinig data
2017	522,22	1082,20	2 min	weinig data	
Wassenaar	2003	231,88	684,00	5 min	compleet
	2004	224,21	624,00	5 min	compleet
	2005	206,72	564,00	5 min	compleet
	2006	213,47	756,00	5 min	compleet
	2007	211,44	588,00	5 min	compleet
	2008	208,52	588,00	5 min	compleet
	2009	213,77	564,00	5 min	compleet
	2010	207,04	600,00	5 min	compleet
	2011	214,66	595,00	5 min	compleet
	2012	200,55	556,00	5 min	compleet
	2013	200,98	560,00	5 min	compleet
	2014	181,64	547,00	5 min	compleet
	2015	200,18	617,00	5 min	compleet
	2016	202,90	520,00	5 min	compleet
2017	207,08	568,00	5 min	compleet	
Vlietregio	2006	2805,98	6322,00	5 min	compleet
	2007	2785,06	5594,18	5 min	compleet
	2008	2796,32	6859,00	5 min	compleet
	2009	2890,77	7736,00	5 min	compleet
	2010	2913,78	6715,00	5 min	compleet
	2011	2952,36	6750,00	5 min	compleet
	2012	2967,06	6821,00	5 min	compleet
	2013	2969,39	6754,00	5 min	compleet
	2014	2963,49	6722,00	5 min	compleet
	2015	3020,44	6921,00	5 min	compleet
	2016	3030,69	6837,00	5 min	compleet
2017	3077,18	6879,00	5 min	compleet	



FIGUUR 9. CUMULATIEVE KANSVERDELINGS VAN DE HISTORISCHE PIEKFACTOREN GEMETEN IN WASSENAAR (DUNEA).

TABEL 7. VOORBEELD VAN VIJF WATERVRAAGSCENARIO'S GEBASEERD OP DE HISTORISCHE WATERVRAAG VAN WASSENAAR (DUNEA).

Scenario	piekfactor	Cumulatieve kans (Dagum 4P)	Cumulatieve kans (frequentieanalyse)	Kans Scenario
1	2,32	0,50	0,52	0,52
2	2,45	0,75	0,76	0,24
3	2,56	0,90	0,90	0,14
4	2,64	0,95	0,95	0,05
5	2,82	0,99	0,99	0,04

TABEL 8. VOORBEELD VAN TIEN WATERVRAAGSCENARIO'S GEBASEERD OP DE HISTORISCHE WATERVRAAG VAN WASSENAAR (DUNEA).

Scenario	piekfactor	Cumulatieve kans (Dagum 4P)	Cumulatieve kans (frequentieanalyse)	Kans Scenario
1	2,32	0,50	0,52	0,52
2	2,37	0,60	0,64	0,11
3	2,42	0,70	0,67	0,04
4	2,45	0,75	0,76	0,09
5	2,48	0,80	0,77	0,02
6	2,56	0,90	0,90	0,13
7	2,64	0,95	0,95	0,05
8	2,72	0,975	0,98	0,02
9	2,82	0,99	0,99	0,012
10	3,14	0,999	0,998	0,007

### 5.1.2 Toekomstscenario's

Met als doel te illustreren dat de benadering voor het robuust ontwerp van streefstructuren ook kan worden toegepast op toekomstscenario's, zijn naast de watervraagscenario's gebaseerd op de historische meetgegevens, ook enkele toekomstscenario's uitgewerkt. Het grondig onderbouwen en uitwerken van toekomstige watervraagscenario's valt buiten de strekking van dit onderzoek, en daarom is gekozen om de scenario's ontwikkeld voor Sittard in het BTO-project 'How future proof is our drinking water infrastructure' (Agudelo-Vera en Blokker, 2014) als basis te gebruiken.

In het voorgenoemde onderzoek zijn 13 scenario's uitgewerkt, waarvan één scenario gelijk is aan de huidige watervraag en 12 scenario's gebaseerd zijn op veranderingen in demografie, beleid en technologie. Tabel 9 bevat een beschrijving van de scenario's.

TABEL 9. BESCHRIJVING VAN TOEKOMSTSCENARIO'S (AGUDELO-VERA EN BLOKKER, 2014).

Scen	Name	Characteristics
0	Now	Baseline: current situation
1	RC	Regional Communities: per capita demand declines because the economic downfall results in (water) saving behaviour, coupled with decreasing population. The average age of the population increases.
2	SE	Strong Europe: Despite low economic growth, mobility increases due to open borders. Personal hygiene habits have changed with an increase in shower frequency. Water pricing based on real cost drives alternative water resources to be adapted on a larger scale; e.g. rain water tanks for watering the garden.
3	TM	Transatlantic Market: Population growth causes increases in drinking water demand. Innovations aim at luxury and wellness products.
4	GE	Global Economy: Economic growth causes increases in consumption. Innovations are aimed at luxury and wellness, people shower longer and water their garden more frequently to diminish the effects of climate change.
5	Dual	Toilet, laundry machine and outside tap are not supplied by DWDS
6	Eco_RC	Based on RC with innovative sanitation concepts. 100% adoption of 1 L flushing toilets
7	Lux.	Luxury, based on current situation with 100% adoption of luxurious shower
8	GE+	Based on "GE" but with a shower frequency of one shower per day.
9	Leak	Based on "Now" with leakage of 20%
10	Lux. + dual	Based on "Now" with 100% adoption of luxurious shower with dual system for toilet, laundry machine and outside tap
11	Eco+	Adoption of innovative sanitation concepts plus water use efficient showers, washing machines and dishwashers
12	DP	Diminishing population: 30% reduction of the population in the area due to empty houses

Voor alle 13 toekomstscenario's is de watervraag voor een gemiddelde dag met SIMDEUM gesimuleerd en is de gemiddelde totale watervraag voor het gehele netwerkmodel van Sittard bepaald (Tabel 10). Voor meer informatie over de scenario's en het genereren van de watervraag wordt de lezer verwezen naar het BTO-rapport 2014.011 (Agudelo-Vera en Blokker, 2014). In het voorgenoemde rapport is ook de piekwatervraag bepaald. Echter is deze piek voor een reguliere dag bepaald en voor het ontwerp van een streefstructuur is de piekwatervraag gerelateerd aan max-uur van max-dag van belang. Daarom is gekozen om de piekfactor met een overschrijdingskans gelijk aan 1%, uit de historische meetgegevens van Wassaenaar in aanmerking te nemen voor het bepalen van de piekwatervraag voor de 13 toekomstscenario's. Dit wil zeggen dat wordt aangenomen dat de gemiddelde watervraag verandert aan de hand van demografische en technologische ontwikkelingen beschreven in de scenario's, maar dat de piekfactor gelijk blijft aan de historische piekfactor. In de

casestudy betekent dit dat voor ieder toekomstscenario de gemiddelde watervraag van het scenario vermenigvuldigd is met 2,82 (zie Tabel 7). Dit is uiteraard uitsluitend een aanname ter illustratie van de casestudy. In een echte toepassing, verdient dit aspect zeker meer aandacht. Aan de hand van de beschrijving van de scenario's is te verwachten dat de piekfactoren voor de verschillende toekomstscenario's van elkaar afwijken. Bijvoorbeeld is te verwachten dat de piekfactor bij scenario GE hoger is dan bij scenario SE, waarin regenwater wordt gebruikt om de tuin te sproeien. Wat betreft de kans van voorkomen van ieder scenario, is gekozen om een gelijke kans (onvoorspelbaarheid) aan ieder scenario toe te kennen, d.w.z. gelijk aan 1/13.

TABEL 10. GEMIDDELDE WATERVRAAG VOOR IEDER SCENARIO.

Scenario	Gemiddelde watervraag (m <sup>3</sup> dag <sup>-1</sup> )	Piekfactor	Kans scenario
Now	363	2,82	1/13
RC	250	2,82	1/13
SE	255	2,82	1/13
TM	280	2,82	1/13
GE	310	2,82	1/13
Dual	165	2,82	1/13
Eco	265	2,82	1/13
Lux	510	2,82	1/13
GE+	350	2,82	1/13
Leak	440	2,82	1/13
Lux+	320	2,82	1/13
Eco+	140	2,82	1/13
DP	225	2,82	1/13

## 5.2 Leidingnetmodel en aanvullende data

Om de methodiek voor het robuust ontwerp van streefstructuren te toetsen zijn drie opties voorgesteld aan de projectgroep: (1) een (klein) benchmarkmodel uit de wetenschappelijke literatuur, (2) een deelmodel van een Nederlandse stad – Stad A (van gemiddelde omvang), en (3) het (grote) Wassenaar-model. De voorkeur is duidelijk om niet een benchmarkmodel uit de wetenschappelijke literatuur, maar een reëel model te kiezen als casestudy. Het vertakt leidingnetmodel van Stad A bevat 497 knopen, 474 leidingen en één reservoir. Hiermee is dit model tien keer kleiner dan het model van Wassenaar, waardoor de rekentijd gunstiger is. Omdat het voor het project belangrijk is om, binnen het termijn van het project meerdere optimalisatieproblemen door te rekenen, rekening houdend met historische en toekomstscenario's, en de verschillende waarden voor de factoren in het optimalisatieprobleem uit te testen, is gekozen om het leidingnetmodel van Stad A te gebruiken als casestudy.

Naast het leidingnetmodel, is het ook nodig om de mogelijke diameters voor de nieuwe leidingen te definiëren. Hiervoor zijn twee verschillende lijsten met diameters in aanmerking genomen: een lijst met diameters gedefinieerd door WML en een lijst met extra tussendiameters. De leidingdiameters zijn samengevat in Tabel 11. In beide gevallen is de optie om geen nieuwe leiding te leggen ook beschikbaar, door een diameter gelijk aan nul in aanmerking te nemen. Voor het bepalen van de aanlegkosten wordt uitgegaan van een meterprijs van 1 euro per mm diameter.

TABEL 11. LIJSTEN MET LEIDINGDIAMETERS DIE GEBRUIKT MOGEN WORDEN IN HET OPTIMALISATIEPROBLEEM: LIJST 1 ZIJN DE DIAMETERS DIE BIJ WML BESCHIKBAAR ZIJN, LIJST 2 BEVAT ENKELE EXTRA TUSSENDIAMETERS. DE LIJSTEN BEVATTEN ENKELE KLEINERE DIAMETERS OMDAT HET GEBIED EEN WIJK BETREFT WAARIN OOK TERTIAIRE LEIDINGEN IN AANMERKING WORDEN GENOMEN.

Lijst 1 - diameters WML (mm)	Lijst 2 - extra tussendiameters (mm)	
0 (geen nieuwe leiding)	0 (geen nieuwe leiding)	87,3
34	13,2	101,6
58,2	21,2	130,8
101,6	36	147,6
147,6	42,6	163,6
184,6	58,2	190
230,8	66	200
	72,8	

### 5.3 Uitgevoerde optimalisatieproblemen

Om de uitgewerkte benadering voor het robuust ontwerp van streefstructuren te toetsen, zijn verschillende optimalisatieproblemen doorgerekend. De volgende aspecten zijn hiermee onderzocht:

- prestatie van het huidige leidingnetmodel;
- ‘standaard’ optimaal ontwerp (ontworpen voor de huidige piekwatervraag in het model):
  - gebruik makend van de lijst van beschikbare diameters;
  - gebruik makend van de lijst met tussendiameters;
- ‘standaard’ optimaal ontwerp (ontworpen voor een hogere piekwatervraag);
- robuust optimaal ontwerp o.b.v. historische watervraag (5 scenario’s uit Tabel 7):
  - invloed van de toegekende strafpunten ( $C_{pen}$  in vergelijking 2);
  - invloed van de variantiefactor (coëfficiënt  $\lambda$  in vergelijking 1);
  - “tevredenheidspercentage” o.b.v. gewenste minimale druk gelijk aan 200 kPa;
  - “tevredenheidspercentage” o.b.v. geleverd water;
- robuust optimaal ontwerp o.b.v. toekomstige watervraag:

Tabel 12 biedt een overzicht van de doorgerekende problemen en de eindresultaten. De resultaten worden hierna in verschillende paragrafen verder toegelicht. Het doel van deze oefening is om inzicht te krijgen in de mogelijkheden van de voorgestelde benadering, hoe aanlegkosten en robuustheid zich tegenover elkaar verhouden en de invloed van de verschillende parameters op de resultaten. Het doel is niet om puur, zonder context, naar de aanlegkosten te kijken en één-op-één vergelijkingen te maken met de huidige situatie.

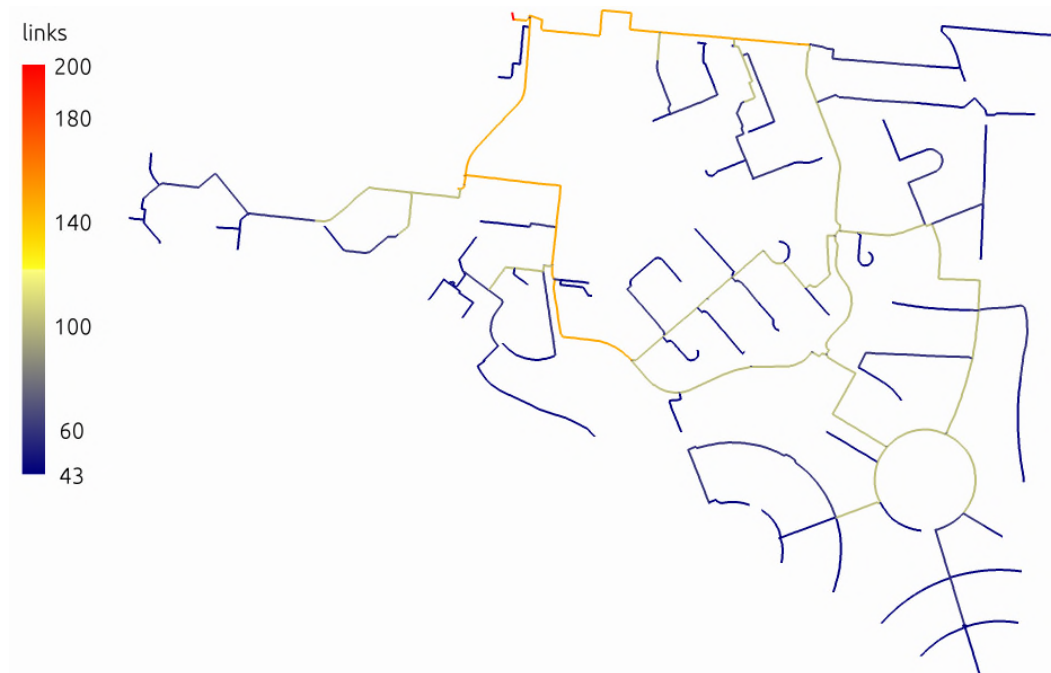
TABEL 12. SAMENVATTING VAN DE VERSCHILLENDE OPTIMALISATIEPROBLEMEN DIE IN AANMERKING ZIJN GENOMEN EN BIJHORENDE RESULTATEN.

		Huidige leidingnet	Probleem 1	Probleem 2	Probleem 3	Probleem 4	Probleem 5	Probleem 6
Optimalisatieprobleem	Doelfunctie	-	Minimaliseer aanlegkosten (diameter x lengte)	Minimaliseer aanlegkosten (diameter x lengte)	Minimaliseer aanlegkosten (diameter x lengte)	Minimaliseer aanlegkosten (diameter x lengte) + strafpunten voor niet geleverd water	Minimaliseer aanlegkosten (diameter x lengte) + strafpunten voor druk < 200kPa	Minimaliseer aanlegkosten (diameter x lengte) + strafpunten voor niet geleverd water
	C <sub>pen</sub>	-	-	-	-	1, 10, 100, 1°3, 1°4, 1°5, 1°6	1, 10, 100, 1°3, 1°4, 1°5	1, 10, 100, 1°3, 1°4, 1°5, 1°6
	λ	-	-	-	-	0, 0,1, 1	0, 1	1
	Randvoorwaarden	-	P <sub>min</sub> ≥ 300 kPa (harde-eis)	P <sub>min</sub> ≥ 300 kPa (harde-eis)	P <sub>min</sub> ≥ 200 kPa (harde-eis)	P <sub>min</sub> ≥ 200 kPa (zachte eis) P <sub>min</sub> ≥ 100 kPa (harde-eis)	P <sub>min</sub> ≥ 200 kPa (zachte eis) P <sub>min</sub> ≥ 100 kPa (harde-eis)	P <sub>min</sub> ≥ 200 kPa (zachte eis) P <sub>min</sub> ≥ 100 kPa (harde-eis)
	Beslisvariabelen	-	Beschikbare leidingdiameters (Lijst 1)	Extra tussendiameters (Lijst 2)	Beschikbare leidingdiameters (Lijst 1)	Beschikbare leidingdiameters (Lijst 1)	Beschikbare leidingdiameters (Lijst 1)	Beschikbare leidingdiameters (Lijst 1)
Watervraagscenario's	-	Piekwatervraag in model (max-uur van maxdag, piekfactor = 2.769)	Piekwatervraag in model (max-uur van maxdag, piekfactor = 2.769)	Één watervraag- scenario o.b.v. historische gegevens (piekfactor = 2.82, kans op overschrijding = 1%)	5 watervraagscenario's gebaseerd op historische gegevens	5 watervraagscenario's gebaseerd op historische gegevens	13 toekomstscenario's voor de watervraag	
Resultaten	Aanlegkosten	792 k€	528 k€	405 k€	454 k€	441-465 k€	451-465 k€	481-502 k€
	Minimale druk (kPa)	341,5	300,2	300,4	200,2	-	-	-
	Niet geleverd water (m <sup>3</sup> , piekuur)	0	0	0	0	0,30-0	-	0,16-0

## 5.4 Resultaten

### 5.4.1 Huidige leidingnet

Indien er voor leidingkosten een meterprijs van 1 euro per mm diameter wordt gehanteerd, geldt dat de kosten van het huidige leidingnet 792 k€ bedragen. Tijdens max-uur van max-dag is de laagste druk in het leidingnet 341,5 kPa. Hiermee wordt 100% van de watervraag geleverd. Figuur 10 illustreert de diameters van het huidige leidingnetwerk van Stad A.



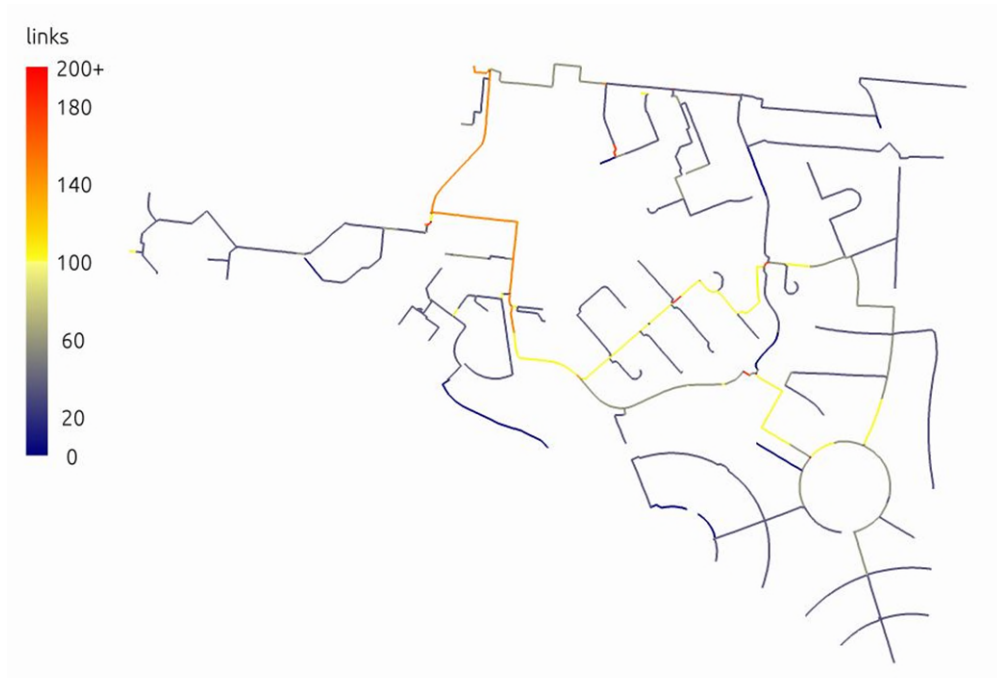
FIGUUR 10. DIAMETERS VAN HET HUIDIG LEIDINGNETWERK VAN STAD A: DE KLEURENSCHAAL GEEFT DE DIAMETERS (IN MM) AAN.

### 5.4.2 Deterministisch optimaal ontwerp

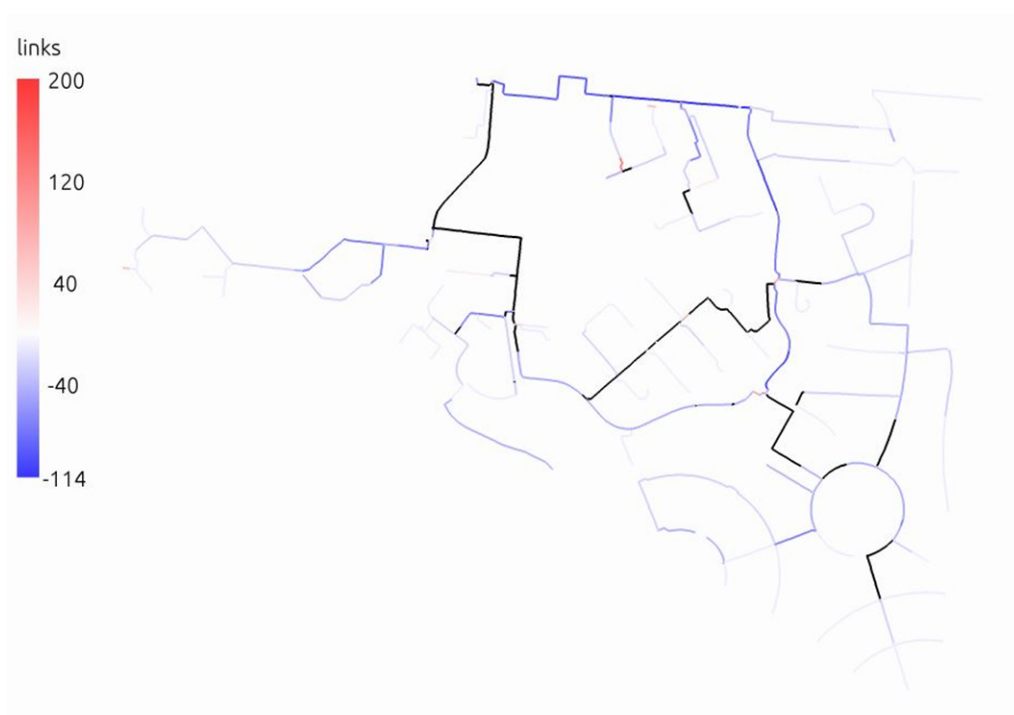
Problemen 1 tot en met 3 betreffen een deterministisch optimalisatieprobleem waarin één watervraagscenario in aanmerking is genomen.

In probleem 1 zijn de randvoorwaarden van het huidige leidingnet in aanmerking genomen, d.w.z., de huidige watervraag horend tot max-uur van max-dag, de beschikbare leidingdiameters, en een minimale druk gelijk aan 300 kPa. Aan het einde van 500.000 doorgerekende functie-evaluaties (ca. 24u rekentijd, met 1 CPU), zijn de aanlegkosten van het geoptimaliseerd ontwerp 528 k€, terwijl de minimale druk (300kPa) op alle knopen in het leidingnetmodel wordt gehaald. Dit wil zeggen dat het geoptimaliseerd ontwerp 33% goedkoper is dan het huidige ontwerp, bij een gelijke prestatie op minimale druk. Leveringszekerheid en -continuïteit zijn niet in aanmerking genomen, om de rekentijd behapbaar te houden. In een echte toepassing, dienen deze aspecten uiteraard in aanmerking te worden genomen. In Figuur 11 zijn de diameters die bij het optimaal ontwerp voor Probleem 1 horen geïllustreerd. Hierin zijn enkele kleine stukjes leiding met een grotere diameter, tussen leidingen met een kleinere diameter, zichtbaar. Dit heeft te maken met het niet volledig convergeren van het optimalisatieprobleem. Naar verwachting worden deze leidingen kleiner gemaakt bij het doorrekenen van extra functie evaluaties. Figuur 12 illustreert het verschil in diameters met het huidige ontwerp.





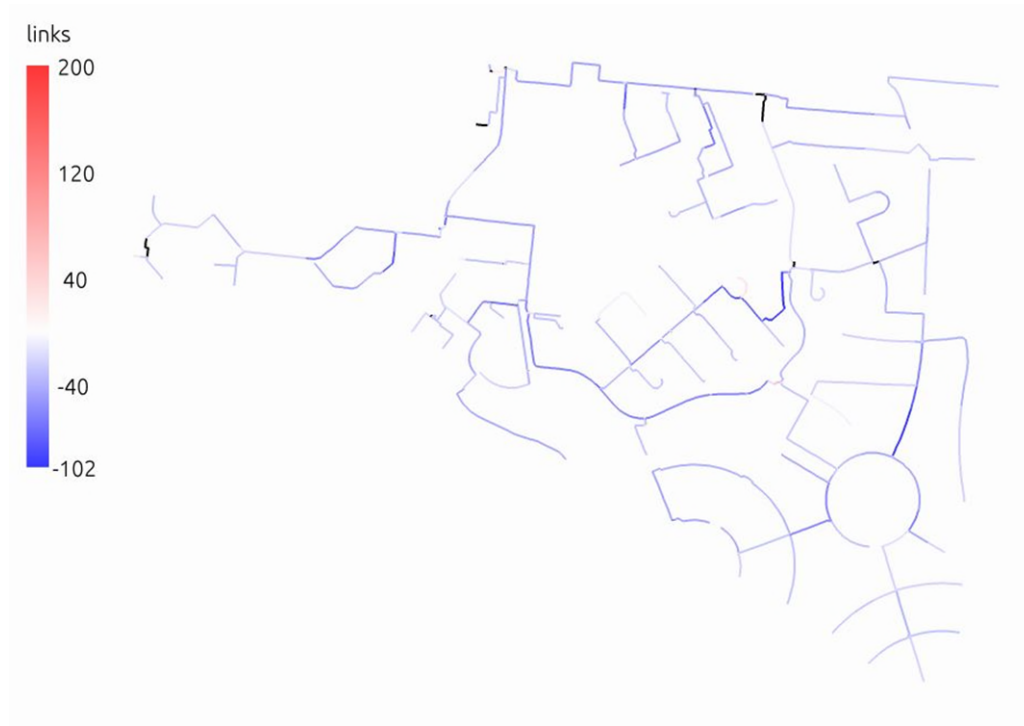
FIGUUR 11. DIAMETERS VAN HET GEOPTIMALISEERD LEIDINGNETWERK VAN STAD A, IN OVEREENSTEMMING MET PROBLEEM 1 : DE KLEURENSCHAAL GEEFT DE DIAMETERS (IN MM) AAN.



FIGUUR 12. VERSCHIL TUSSEN DE DIAMETERS VAN HET GEOPTIMALISEERD LEIDINGNETWERK (PROBLEEM 1) EN HET HUIDIGE ONTWERP. DE KLEURENSCHAAL GEEFT HET VERSCHIL IN DIAMETERS (IN MM) AAN: IN HET ZWART ZIJN DE HUIDIGE DIAMETERS AANGEHOUDEN, IN HET BLAUW ZIJN DE DIAMETERS KLEINER EN IN HET ROOD ZIJN DE DIAMETERS IN HET GEOPTIMALISEERD ONTWERP GROTER. HOE DONKERDER DE KLEUR, HOE GROTER HET VERSCHIL.

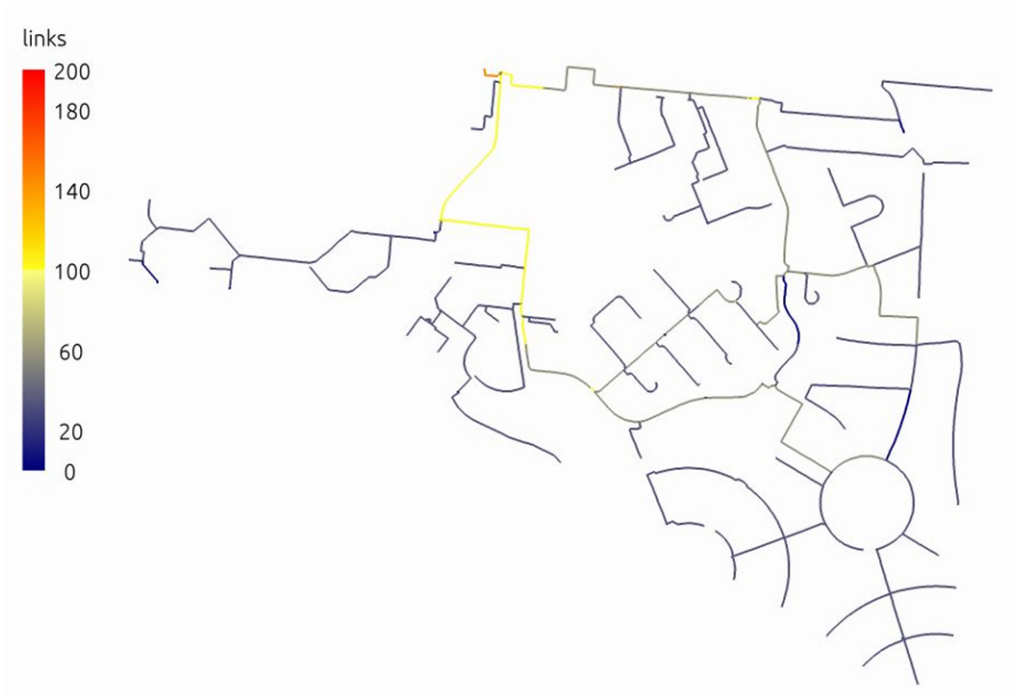
In probleem 2 zijn extra tussendiameters in aanmerking genomen. Daarmee heeft het optimalisatiealgoritme extra opties (meer 'bewegingsruimte') om het leidingnet te

optimaliseren. Zo komt het optimalisatieproces aan het einde van 500 000 functie evaluatie aan 405 k€ aanlegkosten, 23% minder dan bij probleem 1, en slechts 51% van de aanlegkosten van het huidige ontwerp. Dit terwijl de minimale druk 300,4 kPa is, en het ontwerp dus voldoet aan de drukeis. Figuur 13 illustreert het verschil in diameters tussen het geoptimaliseerd ontwerp voor probleem 2 en het huidige ontwerp. In vergelijking met Figuur 12, zijn nu zo goed als alle diameters kleiner dan in het huidige ontwerp.



FIGUUR 13. DIAMETERS VAN HET GEOPTIMALISEERD LEIDINGNETWERK VAN STAD A, IN OVEREENSTEMMING MET PROBLEEM 2: DE KLEURENSCHAAL GEEFT DE DIAMETERS (IN MM) AAN.

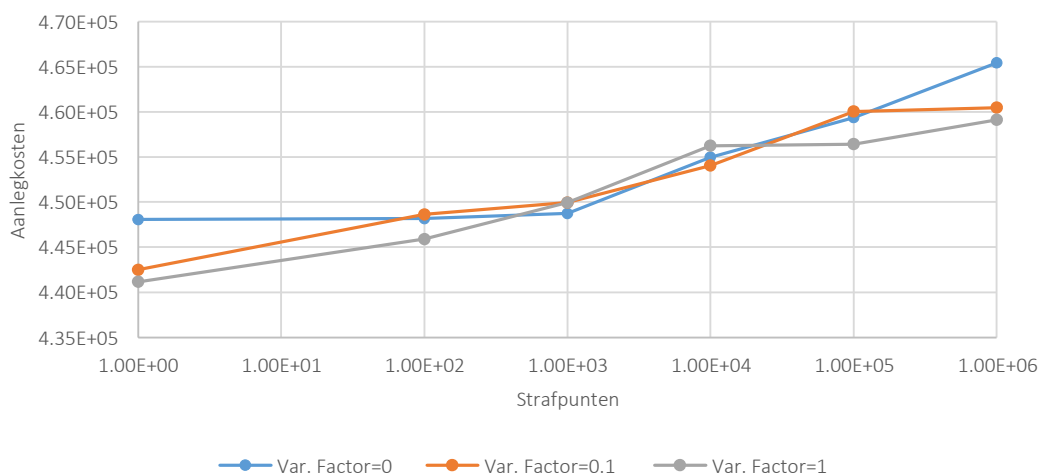
In probleem 3 is geoptimaliseerd voor de meest veeleisende scenario, d.w.z. scenario 5 uit Tabel 7, en is een harde drukeis van 200kPa gehanteerd. Deze drukeis is lager dan in de voorgaande problemen, maar hiermee wordt naar verwachting nog steeds de watervraag 100% geleverd. De aanlegkosten van het geoptimaliseerd ontwerp zijn in dit geval 454 k€. De bijhorende diameters zijn geïllustreerd in Figuur 14. Ook hier zijn nog enkele stukjes grotere leidingen te zien, en zijn extra functie evaluaties nodig om deze eruit te halen.



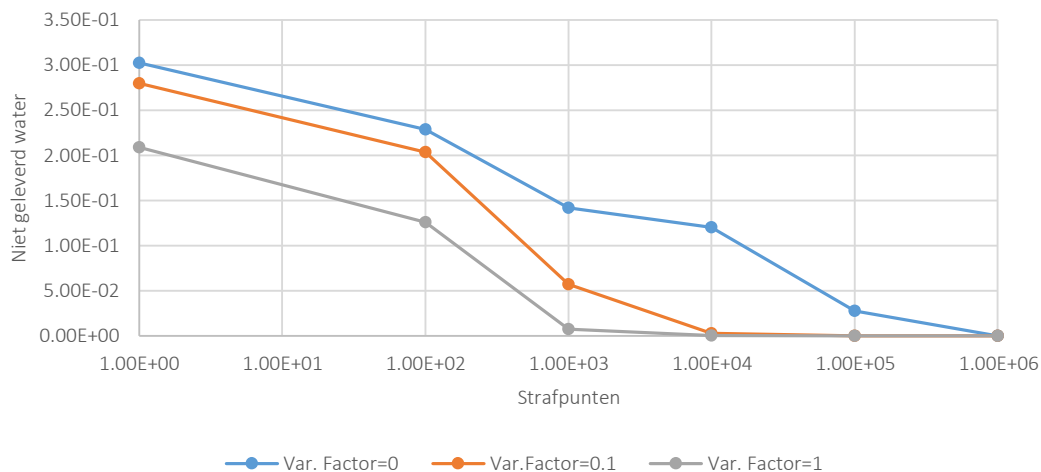
FIGUUR 14. DIAMETERS VAN HET GEOPTIMALISEERD LEIDINGNETWERK VAN STAD A, IN OVEREENSTEMMING MET PROBLEEM 3: DE KLEURENSCHAAL GEEFT DE DIAMETERS (IN MM) AAN.

### 5.4.3 Robuust optimaal ontwerp: kosten vs geleverd water

In probleem 4 wordt het ‘mean-variance’ robuust model doorgerekend voor vijf historische watervraagscenario’s (Tabel 7) en met verschillende waarden voor de variantiefactor en de strafpunten, die worden toegekend wanneer het daadwerkelijke geleverde water minder is dan de watervraag, met name: strafpunten variëren tussen 1 en  $1^6$ , en variantiefactoren gelijk aan 0, 0,1 en 1. Hiermee wordt een beeld verkregen van hoe deze parameters de resultaten beïnvloeden en/of het optimalisatieproces in een bepaalde richting duwen. Figuren 15 tot en met 17 bieden inzicht in deze relaties.



FIGUUR 15. RELATIE TUSSEN AANLEGKOSTEN (IN EURO'S), STRAFPUNTEN EN DE VARIANTIEFACTOR VOOR PROBLEEM 4.



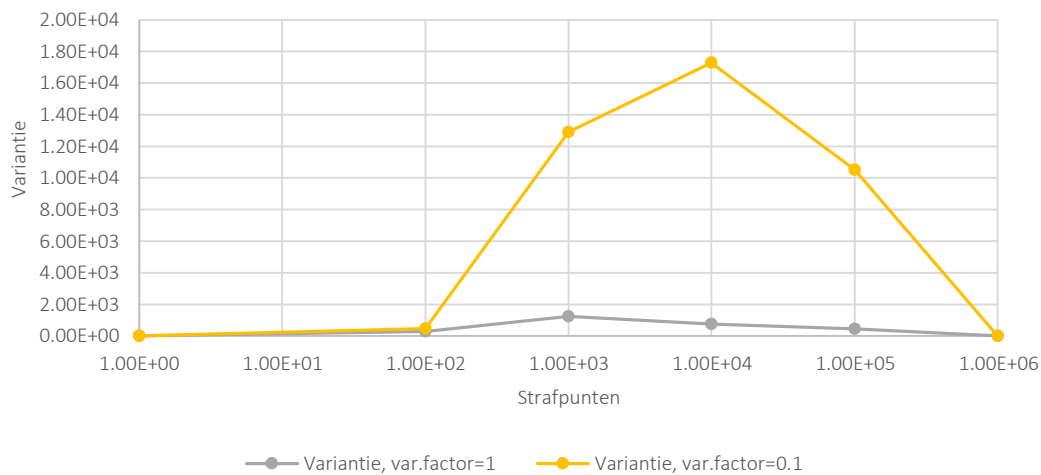
FIGUUR 16. RELATIE TUSSEN NIET GELEVERD WATER (IN M<sup>3</sup>, GEDURENDE PIEKUR), STRAFPUNTEN EN DE VARIANTIEFACTOR.

Zoals verwacht laten figuren 15 en 16 zien dat bij lagere straffpunten goedkopere ontwerpen worden verkregen, maar dat deze ontwerpen niet volledig aan de watervraag voldoen onder de verschillende scenario's. Naarmate de straffpunten toenemen, worden de ontwerpen duurder, maar verbetert de prestatie, d.w.z., het vermogen van het netwerk om onder alle watervraagscenario's de watervraag ook daadwerkelijk te leveren.

Bij de aanlegkosten is de invloed van de variantie wisselend. De aanlegkosten zijn over het algemeen iets hoger wanneer de variantie niet in aanmerking wordt genomen. Bij een variantiefactor gelijk aan 1 zijn de aanlegkosten over het algemeen iets lager. Dit kan echter ook te maken hebben met het convergeren van het optimalisatieprobleem. De verschillende optimalisatieproblemen zijn voor 500.000 functie evaluaties doorgerekend, maar zijn hiermee niet helemaal uitgeconvergeerd. Het zou te verwachten zijn dat bij hogere variantiefactoren de aanlegkosten duurder zouden zijn.

Bij de prestatie is de invloed van de variantiefactor duidelijker: hoe hoger de variantiefactor, hoe kleiner de hoeveelheid niet geleverd water en hoe sneller dit convergeert naar nul bij toenemende straffpunten. Bij straffpunten gelijk aan 1000, is het verschil in aanlegkosten van de ontwerpen verkregen voor een variantiefactor gelijk aan 0, 0,1 en 1 zeer klein, maar is er wel een degelijk verschil in de hoeveelheid niet geleverde water. Voor het ontwerp verkregen bij een variantiefactor gelijk aan 1, zijn de aanlegkosten  $4,5^e5$  en zo goed als 100% van de watervraag wordt geleverd bij alle scenario's. Wanneer de variantiefactor niet in aanmerking wordt genomen, zijn voor dezelfde straffpunten, de aanlegkosten  $4,49^e5$ , en het niet geleverde water gedurende piekuren is  $0,14 \text{ m}^3$  (0,3% van de totale watervraag).

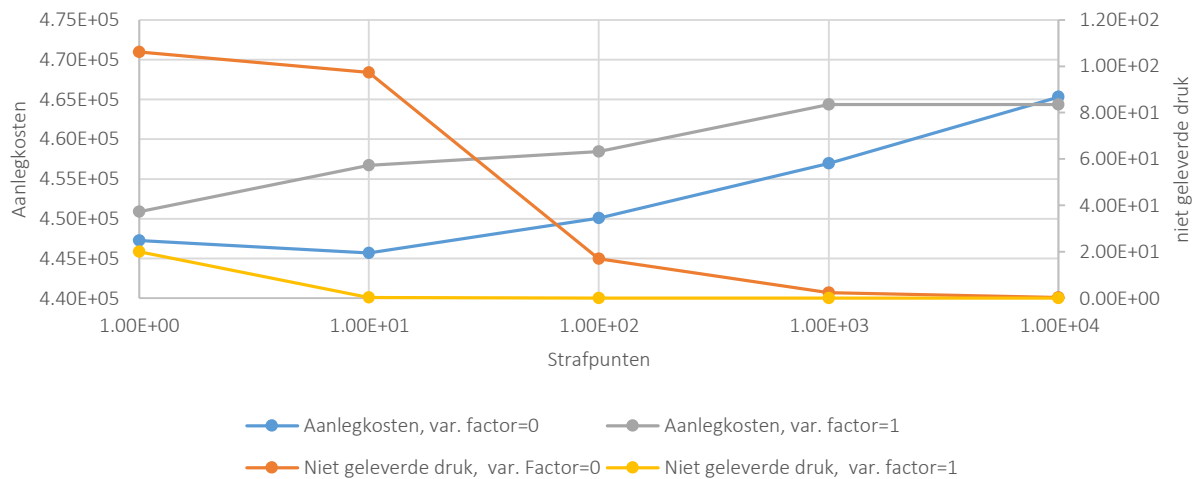
Figuur 17 biedt verder inzicht in de invloed van de variantiefactoren op de resultaten. Hieruit is te zien dat het verschil in variantie tussen de prestaties (niet geleverd water) onder de verschillende scenario's, voor een variantiefactor gelijk aan 0.1 (oranje lijn) en 1 (grijze lijn) significant is. Met name voor straffpunten tussen de  $1^e3$  en  $1^e5$  is het verschil in varianties, en dus de prestatie over de verschillende scenario's, erg groot. Dit wil zeggen dat de ontwerpen die zijn verkregen door een hogere variantiefactor in aanmerking te nemen robuuster zijn, bij vergelijkbare aanlegkosten (Figuur 15).



FIGUUR 17. VARIANTIE TUSSEN PRESTATIES VOOR VERSCHILLENDE VARIANTIEFACTOREN: DE GELE LIJN IS DE VARIANTIE VOOR EEN VARIANTIEFACTOR GELIJK AAN 0,1 EN DE GRIJZE LIJN IS DE VARIANTIE VOOR EEN VARIANTIEFACTOR GELIJK AAN 1.

#### 5.4.4 Robuust optimaal ontwerp: kosten vs drukeis

In probleem 5 is het 'mean-variance' robuust model doorgerekend, met verschillende waarden voor de variantiefactor en voor de strafpunten, die in dit geval zijn toegekend wanneer niet aan de minimale drukeis van 200kPa wordt voldaan, met name: strafpunten variëren tussen 1 en  $1^4$ , en variantiefactoren gelijk aan 0 en 1. De verschillende optimalisatieproblemen zijn voor 500.000 functie evaluaties doorgerekend. Figuur 18 illustreert de verkregen resultaten voor probleem 5. Hieruit is te zien dat naarmate de strafpunten toenemen, ook de aanlegkosten toenemen en de niet geleverde druk afneemt. Duurdere ontwerpen voldoen beter aan de drukeis van 200 kPa onder verschillende watervraagscenario's. Wanneer de variantie tussen de prestaties (niet geleverde druk) onder de verschillende watervraagscenario's in aanmerking wordt genomen (variantiefactor gelijk aan 1), zijn de ontwerpen duurder (grijze lijn) dan wanneer de variantie niet in aanmerking wordt genomen (blauwe lijn). Wanneer de variantie in aanmerking wordt genomen, neemt de prestatie van de ontwerpen op de drukeis sneller toe naarmate de strafpunten toenemen (gele lijn versus de oranje lijn).

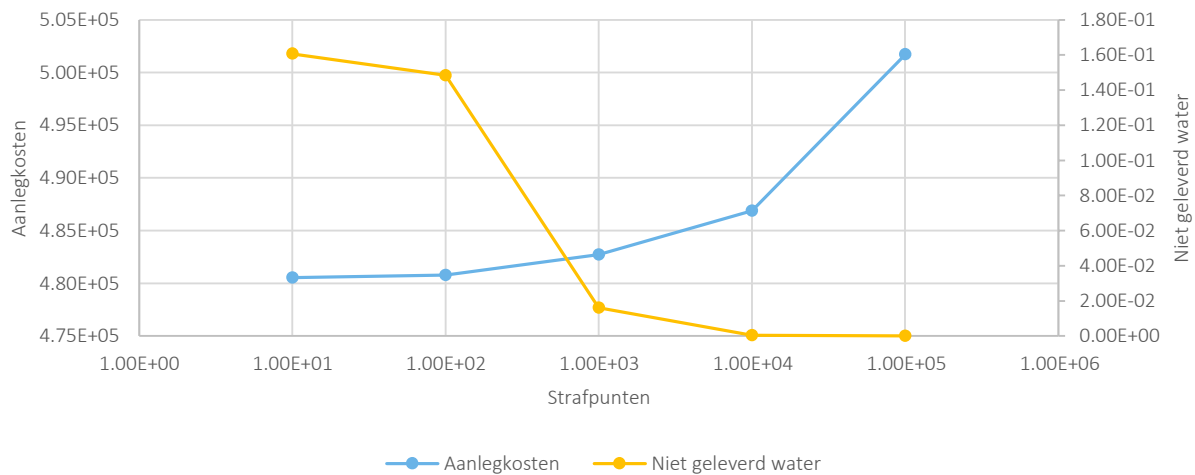


FIGUUR 18. RELATIE TUSSEN AANLEGKOSTEN EN NIET GELEVERDE DRUK VOOR VERSCHILLENDE VARIANTIEFACTOREN: DE BLAUWE EN GRIJZE LIJNEN ZIJN DE AANLEGKOSTEN (€) VOOR VERSCHILLENDE STRAFPUNTEN, DE GELE EN ORANJE LIJNEN ZIJN DE BIJHORENDE NIET GELEVERDE DRUKKEN GESOMMEERD OVER DE KNOPEN (IN METERS, GEDURENDE PIEKIJUR).

#### 5.4.5 Robuust optimaal ontwerp: toekomstige watervraag

In probleem 6 is het 'mean-variance' robuust model doorgerekend voor de 13 toekomstscenario's en zijn straffpunten toegekend aan het niet geleverde water. Dit probleem is doorgerekend voor een variantiefactor gelijk aan 1 en straffpunten variërend tussen 10 en  $1^5$ . De verschillende optimalisatieproblemen zijn voor 500 000 functie evaluaties doorgerekend.

Figuur 19 illustreert de resultaten, met name de aanlegkosten *versus* het niet geleverde water voor verschillende ontwerpen. Ook hieruit is te zien dat naarmate de straffpunten toenemen, ook de aanlegkosten toenemen en de hoeveelheid niet geleverd water afneemt. De aanlegkosten zijn hoger dan in de optimalisatieproblemen waarin de watervraagscenario's zijn gebaseerd op de historische gegevens, maar nog steeds lager dan het huidige ontwerp. In de toekomstscenario's varieert de watervraag meer en de scenario's hebben allemaal een gelijke kans. Het scenario met de hoogste watervraag weegt dus evenveel als het scenario waarin de watervraag het laagst is. Hierdoor wordt het leidingnetwerk zwaarder ontworpen. In de voorgaande problemen, waarin de scenario's zijn gebaseerd op de historisch watervraag, zijn de kansen per scenario anders: de meest veeleisende scenario heeft een kleine kans op voorkomen en weegt daarom minder in het optimalisatieprobleem. Het toekennen van andere kansen aan de toekomstscenario's zou daarom mogelijk tot andere resultaten leiden.



FIGUUR 19. RELATIE TUSSEN AANLEGKOSTEN EN NIET GELEVERD WATER VOOR VERSCHILLENDE STRAFPUNTEN (CPEN): DE BLAUWE LIJN ZIJN DE AANLEGKOSTEN (IN EURO'S) VOOR VERSCHILLENDE STRAFPUNTEN, DE GELE LIJN IS DE BIJHORENDE HOEVEELHEID NIET GELEVERD WATER (IN M<sup>3</sup>, GEDURENDE PIEKUR).

### 5.5 Convergentie

Voor ieder optimalisatieprobleem zijn 500.000 functie evaluaties doorgerekend. Het proces is in de aantal doorgerekende functie evaluaties niet volledig uitgeconvergeerd. Dit betekent dat er nog (beperkt) ruimte is voor verbetering en, voor ieder optimalisatieprobleem, een slanker en robuuster leidingnet mogelijk is. In het kader van dit project is besloten om de berekeningen hierbij te laten. De verkregen resultaten zijn van voldoende kwaliteit om de voorgestelde benadering te demonstreren en bieden een aanzienlijke verbetering op de onderzochte aspecten. In een toepassing in de praktijk zou het doorrekenen van het optimalisatieprobleem tot convergentie wenselijk zijn. Naar verwachting is dit mogelijk door ca. 100.000 extra functie evaluaties in aanmerking te nemen.

In de casestudy zijn geen leveringszekerheid en -continuïteit berekeningen uitgevoerd. Deze aspecten vergen het doorrekenen van een groot aantal uitvalscenario's, waardoor de rekentijd aanzienlijk zou toenemen. In het kader van dit project is daarom gekozen om deze aspecten niet in aanmerking te nemen. Bij toepassing in de praktijk dienen deze aspecten wel in aanmerking te worden genomen, in vorm van randvoorwaarden in het optimalisatieprobleem. Naar verwachting, zouden deze randvoorwaarden hardere eisen stellen aan het ontwerp, waardoor de ontwerpen mogelijk duurder worden.

## 6 Ontwerp streefstructuren bij Dunea en Brabant Water

### 6.1 Opdracht

Om inzicht te krijgen in hoe verschillende drinkwaterscenario's in de huidige praktijk in aanmerking kunnen worden genomen bij het ontwerp van streefstructuren, hebben Maurice van de Roer (Dunea) en Tjakko Haaijer (Brabant Water) een actieve rol gespeeld in het project. Dit heeft ingehouden: het ontwerpen van een streefstructuur voor een (deel)model rekening houdend met drie verschillende watervraagscenario's. In overleg is afgesproken om de drie watervraagscenario's te baseren op de verbruiksdata van Wassenaar. Tabel 13 bevat een samenvatting van de beschouwde piekfactoren en bijhorende kansen.

TABEL 13. BESCHIKBARE TIJDREKSEN VAN WATERVERBRUIK (M<sup>3</sup>U<sup>-1</sup>).

Scenario	Piekfactor	Kans
1	2,32	0,53
2	2,45	0,24
3	2,82	0,23

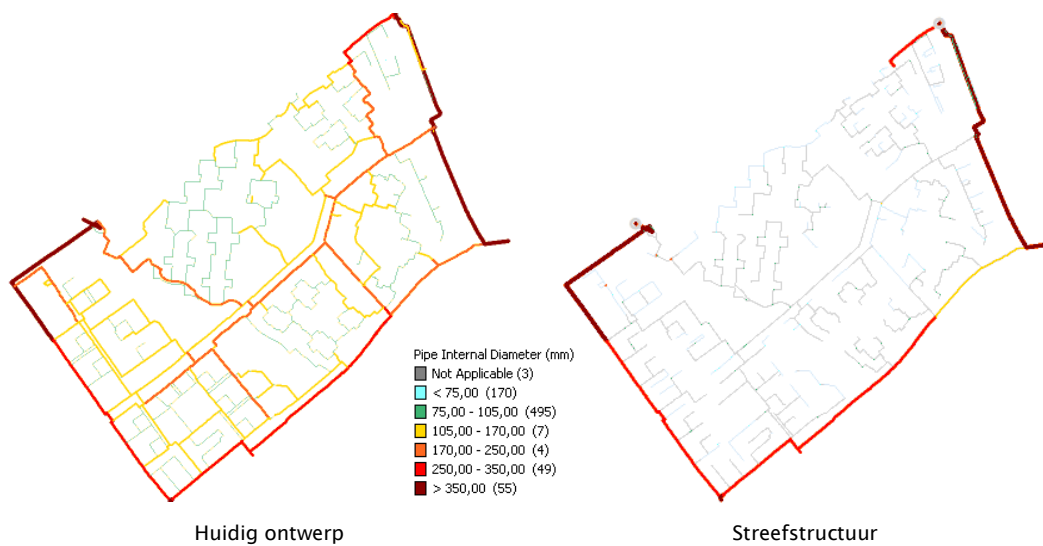
Als randvoorwaarden zijn een verplichte minimale druk gelijk aan 230 kPa en een gewenste druk gelijk aan 260 kPa aangehouden. De resultaten van de oefening zijn hierna beknopt beschreven. De volledige rapportages van Brabant Water en Dunea zijn in bijlage II terug te vinden.

### 6.2 Dunea

Dunea heeft handmatig een streefstructuur ontworpen voor de wijken Essesteijn en 't Loo, in de gemeente Leidschendam-Voorburg. Dit projectgebied bestaat uit 760 leidingen en 681 knopen, zie Figuur 20. De streefstructuur is ontworpen op druk. Zelfreinigende capaciteit, capaciteit van brandkranen en leveringszekerheid zijn niet in aanmerking genomen.

Dunea heeft als eerste stap naar de prestatie van het huidige ontwerp onder de drie verschillende watervraagscenario's gekeken. Uit deze analyse blijkt dat het huidige leidingnet bijna dezelfde prestaties levert voor de 3 verschillende watervraagscenario's, zie Tabel 14. Dit komt omdat het huidige ontwerp heel ruim is. Bij het opstellen van de streefstructuur is in eerste instantie het aantal mazen in het netwerk geminimaliseerd tot vijf. Vervolgens zijn de diameters verkleind tot de geëiste druk is bereikt in alle scenario's. Hierbij is gekeken naar het verhang van de leidingen om te kijken waar de diameter verkleind kan worden zonder dat de minimum druk te laag wordt. Het leidingnet is behoorlijk verkleind in zowel lengte (door van vermaasde delen vertakte delen te maken) als diameter. De resultaten zijn geïllustreerd in Figuur 20.





FIGUUR 20. NETWERKMODEL VAN DE WIJKEN ESSESTEIJN EN T'LOO (DUNEA): HUIDIG ONTWERP EN STREEFSTRUCTUUR. DE KLEUREN GEVEN DE LEIDINGDIAMETERS AAN.

De gemiddelde druk in de streefstructuur is 5 kPa lager dan in het huidige leidingnet. De prestatie onder de verschillende watervraagscenario's is samengevat in Tabel 14. Met betrekking tot de verplichte minimale druk, presteert het nieuw ontwerp bijna zo goed als het huidige ontwerp. Enkel bij het meest eisend scenario is het aantal knopen die niet aan de randvoorwaarden voldoet hoger. Het grote verschil zit in het aantal knopen onder de gewenste druk gelijk aan 260kPa. Dit zijn aanzienlijk meer in de streefstructuur. Voor het meest eisend scenario zijn dit 124 knopen. Omdat de kans dat dit scenario voorkomt redelijk laag is, is dit voor Dunea acceptabel. Van veel leidingen kan de diameter nog verder worden verkleind waardoor de druk van meer knopen onder de gewenste druk komt. Dit is niet verder uitgezocht.

TABEL 14. PRESTATIE VAN HET HUIDIGE ONTWERP EN DE STREEFSTRUCTUUR VOOR DE VERSCHILLENDE WATERVRAAGSCENARIO'S. PF = PIEKFACTOR.

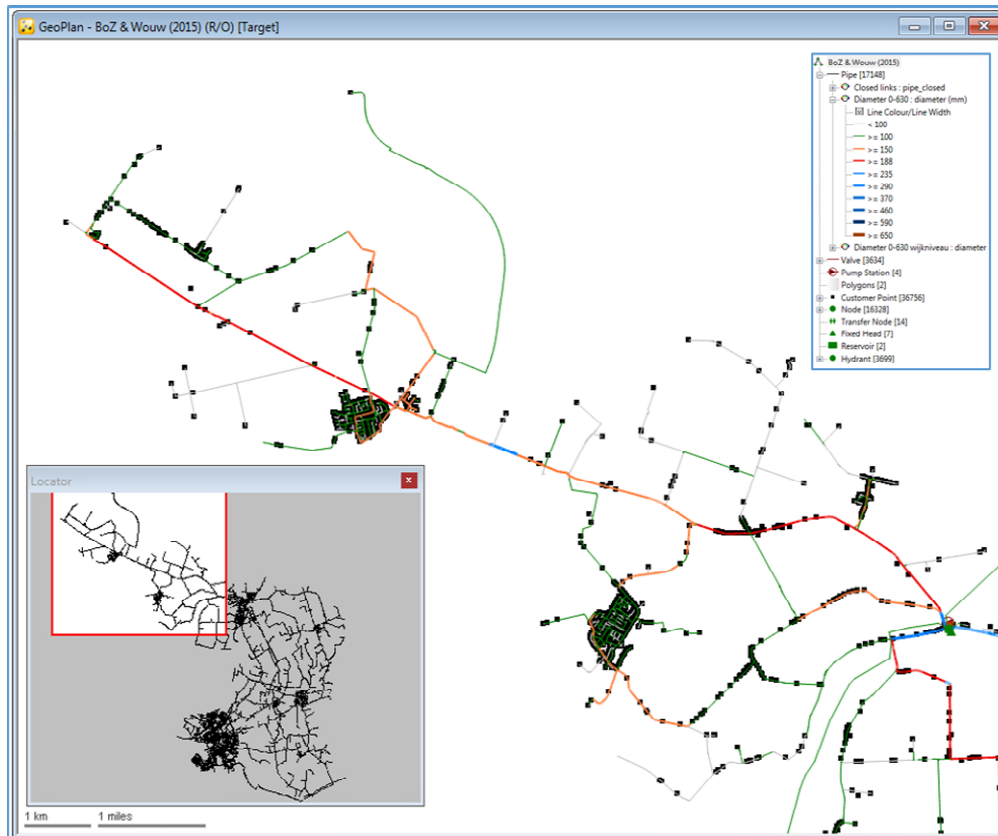
	Prestaties	Scenario 1 Pf = 2,32	Scenario 2 Pf = 2,45	Scenario 3 Pf = 2,82
Huidig ontwerp	aantal knopen druk < 230 kPa	3	3	3
	aantal knopen druk < 260 kPa	9	9	9
Streefstructuur	aantal knopen druk < 230 kPa	3	3	4
	aantal knopen druk < 260 kPa	14	24	124

De kansen van de watervraagscenario's zijn niet expliciet in aanmerking genomen tijdens het ontwerpproces. Wel zijn de kansen gebruikt om een afweging te maken of het wel of niet acceptabel is om op een aantal knopen niet aan de gewenste druk te voldoen, en of het de moeite waard is om leidingen te vergroten in deze gevallen. Dunea heeft geconstateerd dat er behoefte is aan een meer geformaliseerde afweging om met deze vragen op een gestructureerde manier om te gaan.

### 6.3 Brabant Water

Brabant Water heeft gekozen om de reeds ontworpen streefstructuur voor het distributienet achter de aanjager Steenberg tegen het licht gehouden aan de hand van de drie watervraagscenario's. Dit projectgebied levert water aan de dorpen Sint Philipsland (Tholen),

Nieuw Vossemeer (Steenbergen) en De Heen (Steenbergen). Het bijhorende leidingnetmodel heeft een totaal van 1547 knopen 1646 leidingen en is geïllustreerd in Figuur 21. Het gemiddeld verbruik in het gebied is  $80 \text{ m}^3 \text{ u}^{-1}$  op max-dag. De piekfactor voor max-uur van max-dag is 1,971. De processtappen voor het ontwerp van de streefstructuur zijn door Brabant Water gerapporteerd, zie Bijlage II.



FIGUUR 21. NETWERKMODEL VAN HET DISTRIBUTIENET ACHTER DE AANJAGER STEENBERG. DE KLEUREN GEVEN DE LEIDINGDIAMETERS AAN.

Brabant Water eist bij het ontwerpen van streefstructuren een minimale druk in het secundaire net gelijk aan 300 kPa op max-uur van de max-dag. Deze randvoorwaarden is gebruikt voor het beoordelen van de prestatie van de streefstructuur onder de verschillende watervraagscenario's. Het model van de streefstructuur is doorgerekend voor de verschillende watervraagscenario's door een vermenigvuldigingsfactor (multiplier) toe te passen op alle knopen in het model. De berekeningen zijn op dagbasis met kwartierwaarden doorgevoerd. De resultaten voor max-uur zijn gerapporteerd in Tabel 15 en Figuur 22.

TABEL 15. PRESTATIE VAN DE STREEFSTRUCTUUR VOOR MAX-UUR VAN MAX-DAG (WAARVOOR DE STREEFSTRUCTUUR IS ONTWERPEN) EN DE VERSCHILLENDE WATERVRAAGSCENARIO'S.

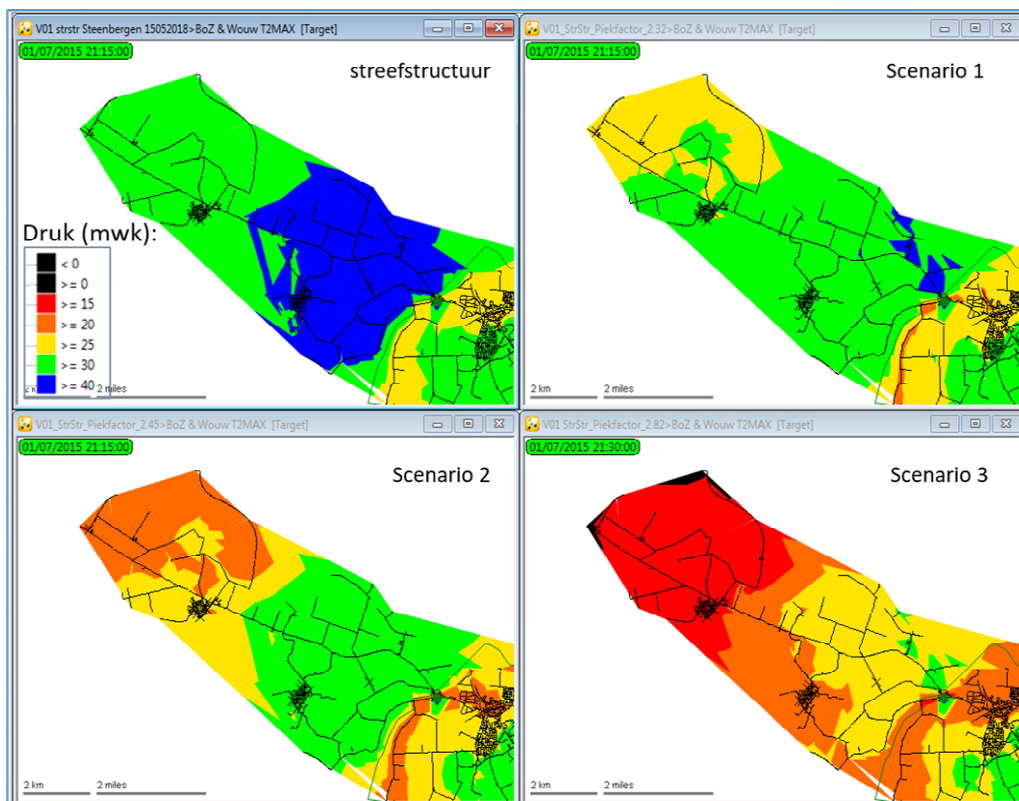
Scenario	Piekfactor	% v.h. netwerk met <i>onde presterende druk</i> op knopen op max uur-max dag
Max-uur max-dag	1,97	0 %
1	2,32	16 %
2	2,45	49 %
3	2,82	94 %

Uit de resultaten is duidelijk dat de prestatie van de streefstructuur significant wordt beïnvloed door de variatie in de watervraag. De streefstructuur is ontworpen voor één watervraag en voldoet hiervoor aan de drukeis. Wijzigingen in de watervraag op basis van de drie voorgestelde scenario's leiden tot een sterk toenemend onderprestatie op druk. De invloed van de piekfactoren is dus groot.

Om te voldoen aan de gewenste druk (300 kPa) moeten er, volgens Brabant Water, drie nieuwe varianten voor de streefstructuur worden ontworpen. Hiervoor zijn verschillende opties denkbaar, met name:

1. Distributienetaanpassing:
  - Vergroten van de diameters.
  - Wijziging aan de bestaande secundaire netvorm.
  - Introduceren van nieuwe leidingtracés.
2. Productieaanpassing:
  - Wijziging inzet (= regeling) bestaande productiemiddelen (aanjager).
  - Wijziging hardware productiemiddelen (= nieuwe, andere pomp).

De 3 watervraagscenario's in combinatie met de bovengenoemde 5 mogelijke ontwerpvariabelen moeten d.m.v. "Trial and error" daaropvolgend berekend worden. De kansen van de scenario's zijn niet in aanmerking genomen.



FIGUUR 22. DRUKVERDELING VOOR DE VERSCHILLENDE DOORGEREKNDEN SCENARIO'S. DE KEUREN GEVEN DE DRUK IN MWK AAN.

# 7 Implementatie

## 7.1 Plan voor implementatie

### 7.1.1 Zonder optimalisatietool

De benadering voor het genereren van onderbouwde watervraagscenario's kan door drinkwaterbedrijven worden toegepast. Deze scenario's kunnen worden gebruikt om de prestatie van ontwerpen te beoordelen en waar nodig aan te passen, in een 'trial-and-error'-benadering.

Volgens Brabant Water biedt de methodiek een aanvullende kwaliteitsbeoordeling van een streefstructuur, mits toegespitst op een eenvoudige onderzoeksgebied met beperkte prestatie indicatoren. Daarnaast is de kwantitatieve en kwalitatieve beperkingen van bruikbare historische data m.b.t. waterverbruik genoemd. Bijvoorbeeld kan het toepassen van de top-down benadering worden beperkt door onvolledige en onvoldoende betrouwbare historische waterverbruiken vanaf pompstations.

Brabant Water zal in 2020 de streefstructuren voor het hele voorzieningsgebied voltooiën. In 2020-2021 gaan de streefstructuren die zijn gemaakt in de periode 2012-2015 worden herzien. Vanaf 2021 is Brabant Water van plan om te oriënteren naar de praktische toepassing van additionele toetsingshulpmiddelen, zoals optimalisatietools. Het praktisch en eenvoudig toepasbaar maken van een uniform optimalisatietool blijft een aandachtspunt en wens voor Brabant Water.

Drinkwaterbedrijf Dunea heeft de volgende aandachtspunten genoemd voor implementatie:

- Op korte termijn wil Dunea inzicht krijgen in overschrijdingskansen van piekfactoren voor de eigen verschillende leveringsgebieden/DMA's.
- Op korte termijn gaat Dunea voor kritische, grote investeringen in transportleidingen, pompstations en distributiepompstations, toetsen op verschillende watervraagscenario's.
- Op korte termijn gaat Dunea afwegen waar flexibiliteit in het systeem, om verschillende watervraagscenario's op te vangen, gewenst is. Hiervoor wordt gekeken naar de uitkomsten van het rapport "Flexibele oplossingen in transportleidingen" (KWR 2019.026), om een integrale afweging van leidingnet, pompen en reinwaterbergingen te maken.
- Op langere termijn wil Dunea inzicht krijgen in uurfactoren voor verschillende watervraagscenario's.

### 7.1.2 Met optimalisatietool

Door gebruik van een optimalisatietool is het mogelijk om op een minder arbeidsintensieve manier meerdere varianten voor een streefstructuur door te rekenen en, wordt de afweging tussen aanlegkosten en prestatie onder verschillende watervraagscenario's duidelijker.

Daarnaast vergt het toepassen van het 'mean-variance' optimalisatieprobleem, en het in aanmerking nemen van de kansen van de scenario's tijdens het ontwerpproces, het gebruik van numerieke methode. Deze zijn beschikbaar in het optimalisatieplatform Gondwana. Om het optimalisatieprobleem voor het robuust ontwerp van streefstructuren klaar te maken voor toepassing in de praktijk is het eerst van belang om de benadering bij één of meer drinkwaterbedrijven uitgebreid toe te passen in de vorm van een pilot/casestudy.

Voor de selectie van de casestudy gelden de volgende randvoorwaarden :

- Keuze van een projectgebied waarvoor het volgende beschikbaar is:
  - Een geverifieerd, voldoende representatief hydraulisch model in EPANET-formaat dat zonder foutmeldingen kan worden doorgerekend;
  - beschikbare diameters voor nieuwe leidingen;
  - kwalitatieve tijdreeks van metingen van waterverbruik, d.w.z., met minstens 10 jaar aan metingen, met een tijdstap van enkele seconden tot enkele minuten, en gecorrigeerd op outliers door fouten in metingen, lekkages of spuiacties.
- Omvangrijke projectgroep waarin kennis over leidingnetmodellen, ontwerp van streefstructuren en bedrijfseisen, -doelen en strategie (zoals risicomatrices en prestatiekosten) aanwezig is en die tijdig beschikbaar is voor overleg en samenwerking.
- Voor een goede aansluiting op de praktijk is het van belang om een deel van de werkzaamheden uit te voeren ten kantore van het drinkwaterbedrijf. Hiertoe is een werkplek beschikbaar en is de projectgroep (of deel daarvan) beschikbaar om vragen te beantwoorden en tussenresultaten te beoordelen.

Voor het uitvoeren van de casestudy gelden de volgende activiteiten:

1. Vergaren en voorbereiden van de benodigde data, o.a. het hydraulisch model en de metingen van waterverbruik.
2. Afstemming over bedrijfsspecifieke doelstellingen en randvoorwaarden voor het ontwerp van streefstructuren. Aspecten zoals leveringszekerheid en -continuïteit moeten ook in deze stap worden besproken.
3. Berekenen van historisch watervraagscenario's o.b.v. de metingen en bijhorende kansen.
4. Eventuele uitwerking van onderbouwde toekomstscenario's en inschatting op kansen op voorkomen.
5. Doorrekenen van het optimalisatieprobleem voor de verschillende watervraagscenario's in Gondwana.
6. Evaluatie van tussenresultaten waarin grondig wordt gekeken naar de scenario's die in aanmerking zijn genomen, de geschikte parameters van het optimalisatieprobleem (strafpunten en variantiefactor) en de bedrijfsspecifieke doelstellingen en randvoorwaarden, en waar nodig deze aspecten aanscherpen.
7. Indien mogelijk, vergelijking van het resulterende streefstructuur met de streefstructuur die door het drinkwaterbedrijf is ontworpen om te onderzoeken hoe groot de verschillen zijn (kosten en prestatie onder de verschillende scenario's).
8. Rapportage van de resultaten en verkregen inzichten inclusief knelpunten en afwegingen.

Voor de praktische inzetbaarheid van een optimalisatietool, heeft Brabant Water de volgende punten onder aandacht gebracht:

- De complexiteit van de verbruiksgebieden (aanwezigheid van meerdere en variabele (druk) inzet van waterproductiebedrijven, variatie in gebied typologieën, stedelijke, industrie, buitengebied of combinaties) maakt vertaalslag van het probleem naar optimalisatietools ook complex.
- De complexiteit van de software (Gondwana) vereist een bepaald kennisniveau van gebruikers. Een productieversie van Gondwana zou hierin helpen.

- De eerste introductie en verkenning in een optimalisatietool is tijdrovend en arbeidsintensief.

## 8 Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

De watervraag is een essentiële factor in het ontwerp van streefstructuren. Uit de praktijk blijkt dat drinkwaterbedrijven vaak de maximale watervraag van de afgelopen tien jaar (maxuur van max-dag) plus ca. 10% in aanmerking nemen voor het ontwerp van streefstructuren. Deze deterministische aanpak leidt tot een ontwerp dat goed presteert voor deze ene specifieke watervraag, maar dat kan onderpresteren indien de watervraag anders uitpakt. Wanneer de watervraag verandert, worden de streefstructuren tegenover deze nieuwe vraag getoetst en waar nodig (handmatig) aangepast. Dit is uiteraard enkel mogelijk wanneer het betreffende deel van de streefstructuur nog niet is aangepast. De onzekerheid rondom de watervraag wordt door drinkwaterbedrijven enkel in aanmerking genomen door de "10%" die wordt opgeteld bij de historische maximale watervraag, dat als een veiligheidsmarge functioneert.

Uit dit onderzoek blijkt dat het door middel van een 'mean-variance' model mogelijk is om verschillende watervraagscenario's in aanmerking te nemen tijdens het ontwerpproces, en dat dit resulteert in meer inzicht in de prestatie van een ontwerp en uiteindelijk in een robuustere streefstructuur. Het model, waarin de prestatie van een streefstructuur kan worden beoordeeld op basis van de drukeis of van de geleverde watervraag, biedt de ontwerper zelf de keuze over de gewenste mate van risico-aversie, doormiddel van het toekennen van strafpunten voor onderprestatie en een variantiefactor tussen scenario's. Aspecten zoals de bluswatervraag, leveringszekerheid en -continuïteit zijn in dit onderzoek niet in aanmerking genomen wegens rekentijd, maar kunnen in een vervolgstap of bij toepassing in de praktijk worden toegevoegd aan het model.

Uit de casestudy is het volgende gebleken:

- Het is mogelijk om concrete en onderbouwde watervraagscenario's uit te werken aan de hand van de historische watervraag. Hiermee kunnen ook kansen aan piekfactoren worden toegekend.
- Het uitwerken van toekomstscenario's is iets lastiger, met name het toekennen van kansen aan de verschillende scenario's blijft een subjectieve stap. Hier is nog ruimte voor verbetering.
- Het 'mean-variance' model vereist het gebruik van numerieke optimalisatietechnieken voor het doorrekenen van het ontwerpprobleem. Gondwana is een geschikte tool om het model door te rekenen voor een reëel netwerk in Nederland.
- Bij een deterministische aanpak resulteert het toepassen van numerieke optimalisatietechnieken in een significant kleiner (en dus goedkoper) ontwerp (het geoptimaliseerd ontwerp is 33% goedkoper dan het huidige leidingnetwerk), terwijl het nog steeds op alle knopen aan de drukeis voldoet. Door extra tussendiameters in aanmerking te nemen, kan de streefstructuur nog verder worden verkleind tot slechts 51% van de aanlegkosten van het huidige leidingnetwerk. Kleinere ontwerpen zijn niet alleen goedkoper, maar presteren ook beter op waterkwaliteit voor de gemiddelde watervraag (dit leidt ook tot een reductie van de behoefte aan spuien bv.) In deze voorbeelden zijn leveringszekerheid en -continuïteit niet in aanmerking genomen. Het in aanmerking nemen van deze criteria resulteert, naar verwachting, in een groter ontwerp.

- Doormiddel van een 'mean-variance' model is inzicht verkregen in de afweging tussen aanlegkosten en de prestatie van het ontwerp onder verschillende watervraagscenario's. Hiermee kunnen drinkwaterbedrijven onderbouwde keuzes maken over hoeveel te investeren in het leidingnet en welke prestatie en mate van robuustheid gewenst is.
- Duurdere ontwerpen voldoen beter aan de drukeis en de watervraag onder verschillende watervraagscenario's.
- De variantiefactor heeft een belangrijke invloed op de resultaten: bij een hogere variantiefactor presteren, bij dezelfde aantal strafpunten, de ontwerpen beter onder de verschillende scenario's. De afwijking tussen de prestatie voor de verschillende scenario's is in dit geval ook veel kleiner. Dit wil zeggen dat de ontwerper zekerder is van hoe het ontwerp presteert onder verschillende scenario's.
- Wanneer het geleverde water in aanmerking wordt genomen blijkt zelfs dat bij een hogere variantiefactor de ontwerpen robuuster zijn terwijl de aanlegkosten vergelijkbaar zijn.

Aan twee drinkwaterbedrijven (Brabant Water en Dunea) is gevraagd om verschillende watervraagscenario's in aanmerking te nemen bij het ontwerp van een streefstructuur voor een klein projectgebied. Uit deze oefening zijn onderstaande conclusies getrokken:

- Drinkwaterbedrijven toetsen de prestatie van een streefstructuur onder de verschillende watervraagscenario's en identificeren zo knopen die niet voldoen aan de drukeis. De kansen van de scenario's worden niet in aanmerking genomen in dit proces. Er wordt puur gekeken naar de druk (eis), en niet naar het niet geleverde water (effect op de klant).
- Door Dunea is geïdentificeerd dat een ontwerper snel de neiging heeft om 'alle rode puntjes 'weg' te ontwerpen' (punten die niet aan de eis voldoen), ook voor scenario's met een heel lage kans op voorkomen. Hiermee concludeert Dunea dat het van belang is om te kijken naar hoe vaak een scenario voorkomt en wat een drinkwaterbedrijf er voor over heeft om ook in deze extreme situaties de prestatie op peil te houden. Er is duidelijk een behoefte aan een geformaliseerde afweging voor een bedrijf om hier gestructureerd mee om te gaan.

## 8.2 Aanbevelingen

Aan de hand van de resultaten van het uitgevoerde onderzoek wordt het volgende aanbevolen:

- Streefstructuren ontwerpen niet voor één, maar verschillende watervraagscenario's, door de uitgewerkte benadering toe te passen. Dit biedt drinkwaterbedrijven een onderbouwde afweging tussen aanlegkosten en prestatie van het leidingnetwerk.
- Het in de streefstructuur kunnen aanwijzen van leidingen die gevoeliger zijn voor uitbreiding van watervraag of toename van piekfactoren is ook een wens die blijft staan bij de drinkwaterbedrijven.
- Onderzoek te doen naar de toegevoegde waarde van het aannemen van extra tussendiameters door drinkwaterbedrijven: kosten in organisatie *versus* mogelijke besparingen bij het ontwerpen en aanleggen van streefstructuren.
- Leveringszekerheid en -continuïteit in aanmerking nemen in het optimalisatieprobleem, in de vorm van randvoorwaarden of als prestatie indicatoren in de doelfunctie. Ervaring leert dat verschuiving en/of wijziging van grote watervragen kan leiden tot het wel of niet voldoen aan deze criteria.
- Ervaring opdoen met de parameters in het 'mean-variance' optimalisatieprobleem, om gevoel te krijgen voor geschikte waarden voor strafpunten en de variantiefactor. Dit kan door het optimalisatieprobleem door te rekenen voor verschillende waarden voor de voorgenoemde parameters, en dit te herhalen voor leidingnetwerkmodellen met



verschillende groottes en kenmerken. Ook kan het interessant zijn om verschillende waardes voor de variantiefactor in aanmerking te nemen op verschillende delen van het model, d.w.z. een hogere waarde op primaire leidingen, een lagere waarde op secundaire of tertiaire leidingen.

- Onderzoek te doen naar alternatieve benaderingen om de onzekerheid in de watervraag in aanmerking te nemen tijdens het ontwerpproces, zoals de stochastische benaderingen of alternatieve scenario-gebaseerde optimalisatieproblemen, met name het 'regret' model. Een 'regret' model kan verschillen en overeenkomsten tussen de optimale ontwerpen voor verschillende scenario's duidelijk maken. Op basis hiervan zouden leidingen die vaak overeenkomen (een soort "backbone") kunnen worden geselecteerd voor eerdere vervanging, terwijl de vervanging van leidingen die vaker verschillen tussen scenario's zo lang mogelijk uitgesteld zou kunnen worden, d.w.z. tot de toekomst iets zekerder is.
- Voor toepassing in de praktijk is het van belang om de benadering voor het robuust ontwerp van streefstructuren bij één of meer drinkwaterbedrijven uitgebreid, en in nauwe samenwerking met het drinkwaterbedrijf, toe te passen in de vorm van een pilot/casestudy.
- In dit project is gekozen om de top-downbenadering toe te passen op historische gegevens van waterverbruik. Het is interessant om ook watervraagscenario's doormiddel van de bottom-up benadering (tijdreeksen van verbruik simuleren per knoop in het model) uit te werken en te onderzoeken of dit tot andere watervraagscenario's en ontwerpresultaten leidt.
- Het uitwerken van de toekomstige watervraag blijft een complex, maar zeer belangrijk punt voor het ontwerp van streefstructuren. Om onderbouwde toekomstscenario's te generen zijn verschillende benaderingen denkbaar, zoals:
  - De top-downbenadering kan worden uitgebreid door de toekomstige dagafzet en piekfactoren in te schatten, afhankelijk van klimaatverandering, vakantiespreiding en kenmerken van de leveringsgebieden. Hiervoor kan het model beschreven in (Vonk, et al., 2017) worden gebruikt. Wel is het van belang om ook uurfactoren te genereren als aanvulling op de dagfactoren die het model nu in aanmerking neemt.
  - Ook de bottom-upbenadering kan worden uitgebreid om de toekomstige watervraag te modelleren, door bv. demografische en planologische ontwikkelingen, veranderingen in gezinssamenstelling en waterverbruikend apparatuur in te voeren in SIMDEUM. Een agent-gebaseerd model kan ook een uitkomst bieden. Deze aanpak wordt verkend in het verkennend onderzoek 'Sim City: agent gebaseerd watervraagmodel'.
  - De keuze voor een top-down of een bottom-up benadering dient gespiegeld te worden aan het type distributienet dat wordt beschouwd. Bijvoorbeeld, zal een top-down methode beter volstaan voor een gebied type "stad" of "uitgestrekt landelijk". Terwijl voor "wijken - straat" een bottom-up benadering geschikter lijkt.

# Referentielijst

- Agudelo-Vera, C. en E. J. M. Blokker (2016). *Ontwerp secundair net aangescherpt, evaluatie na vijf jaar praktijkervaring* BTO 2016.090, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Nederland.
- Agudelo-Vera, C. A. en E. J. M. Blokker (2014). *How future proof is our drinking water infrastructure?* BTO 2014.011, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands.
- Agudelo-Vera, C. A., C. Büscher, L. Palmen, I. Leunk en E. J. M. Blokker (2015). *Transitions in the drinking water infrastructure – a retrospective analysis from source to tap*. BTO 2015.051, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands.
- Agudelo-Vera, C. M., M. Blokker, J. Vreeburg, H. Vogelaar, S. Hillegers en J. P. Van Der Hoek (2016). *Testing the robustness of two water distribution system layouts under changing drinking water demand*. Journal of Water Resources Planning and Management.
- Alperovitz, E. en U. Shamir (1977). *Design of optimal water distribution systems*. Water Resources Research **13**(6).
- Babayan, A. V., Z. S. Kapelan, D. A. Savic en G. A. Walters (2006). *Comparison of two methods for the stochastic least cost design of water distribution systems*. Engineering Optimization **38**(3): 281-297.
- Babayan, A. V., D. A. Savic en G. A. Walters (2004). *Multiobjective optimization of water distribution systems under uncertain demands and pipe roughnesses*. Modelling and Control for Participatory Planning and Managing Water Systems. Venice.
- Babayan, A. V., D. A. Savic en G. A. Walters (2005). *Multiobjective optimization for the least cost design of water distribution systems under correlated uncertain parameters*. Impacts of Global Change.
- Babayan, A. V., D. A. Savic, G. A. Walters en Z. S. Kapelan (2007). *Robust Least-Cost Design of Water Distribution Networks Using Redundancy and Integration-Based Methodologies*. Journal of Water Resources Planning and Management **133**(1): 67-77.
- Bakker, M., J. H. G. Vreeburg, K. M. van Schagen en L. C. Rietveld (2013). *A fully adaptive forecasting model for short-term drinking water demand*. Environmental Modelling and Software **48**: 141-151.
- Bao, Y. en L. W. Mays (1990). *Model for Water Distribution System Reliability*. Journal of Hydraulic Engineering **116**(9): 1119-1137.
- Blokker, E. J. M., C. Büscher, L. Palmen en C. A. Agudelo-Vera (2015). *Strategische planning van drinkwaterinfrastructuur: een conceptueel kader en bouwstenen voor drinkwaterbedrijven – Nederlandstalige samenvatting*. BTO 2015.049, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands.
- Blokker, M. en I. Vloerberg (2011). *Kwantitatieve toekomstscenario's waterverbruik. (in Dutch)*, KWR, Nieuwegein - the Netherlands.
- Blokker, M., I. Vloerbergh en S. Buchberger (2012). *Estimating peak water demands in hydraulic systems II-future trends*. WDSA 2012: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, 24-27 September 2012 in Adelaide, South Australia, Engineers Australia.
- Brown, C. (2010). *The End of Reliability*. Journal of Water Resources Planning and Management **136**(2): 143-145.
- Cabral, M., D. Loureiro, A. Mamade en D. Covas (2014). *Water Demand Projection in Distribution Systems Using a Novel Scenario Planning Approach*. Procedia Engineering **89**: 950-957.
- Creaco, E., A. Fortunato, M. Franchini en M. R. Mazzola (2015). *Water distribution network robust design based on energy surplus index maximization*. Water Science and Technology: Water Supply **15**(6): 1253-1258.
- Creaco, E., M. Franchini en T. M. Walski (2014). *Accounting for phasing of construction within the design of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management **140**(5): 598-606.

- Cunha, M. C. en J. J. O. Sousa (2010b). *Robust design of water distribution networks: A comparison of two different approaches*. Integrating Water Systems - Proceedings of the 10th International on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2009.
- Cunha, M. d. C. en J. J. d. O. Sousa (2010). *Robust Design of Water Distribution Networks for a Proactive Risk Management*. Journal of Water Resources Planning and Management **136**(2): 227-236.
- Di Nardo, A., M. Di Natale, R. Gargano, C. Giudicianni, R. Greco en G. F. Santonastaso (2018). *Performance of partitioned water distribution networks under spatial-temporal variability of water demand*. Environmental Modelling & Software **101**: 128-136.
- Farmani, R., G. A. Walters en D. A. Savic (2005). *Trade-off between total cost and reliability for Anytown water distribution network*. Journal of Water Resources Planning and Management **131**(3).
- Gargano, R., C. Tricarico, F. Granata, S. Santopietro en G. de Marinis (2017). *Probabilistic Models for the Peak Residential Water Demand*. Water **9**(6): 417.
- Herrera, M., L. Torgo, J. Izquierdo en R. Pérez-García (2010). *Predictive models for forecasting hourly urban water demand*. Journal of Hydrology **387**(1-2): 141-150.
- Hillebrand, B., Vonk, E., Raterman, B. W. (2018). *Oorzaak piekverbruik*. BTO 2019.205a(s), KWR Water Research Institute, Nieuwegein, Nederland.
- Jung, D., D. Kang en K. E. Lansey (2012). *Water Distribution Network Design Using a Robustness Index*. World Environmental and Water Resources Congress 2012.
- Kapelan, Z., A. V. Babayan, D. A. Savic, G. A. Walters en T. S. Khu (2004). *Two new approaches for the stochastic least cost design of water distribution systems*. Water Science and Technology: Water Supply **4**(5).
- Kapelan, Z., D. A. Savic en G. A. Walters (2005). *An Efficient Sampling-Based Approach for the Robust Rehabilitation of Water Distribution Systems Under Correlated Nodal Demands*. Impacts of Global Climate Change.
- Kapelan, Z. S., D. A. Savic en G. A. Walters (2005). *Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty*. Water Resources Research **41**(W11407).
- Koutiva, I. en C. Makropoulos (2016). *Modelling domestic water demand: An agent based approach*. Environmental Modelling & Software **79**: 35-54.
- Lansey, K. E., N. Duan, L. W. Mays en Y. K. Tung (1989). *Water distribution system design under demand uncertainty*. Journal of Water Resources Planning and Management **115**(5).
- Marques, J., M. Cunha en D. Savić (2015). *A Multicriteria Approach for a Phased Design of Water Distribution Networks*. Procedia Engineering **119**: 1231-1240.
- Moerman, A., J. van Vossen en R. H. S. Beuken (2016). *UKNOW: zicht op leidingdegradatie door samenhang van informatiesystemen*. BTO 2016.031, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Nederland.
- Morley, M. S. en C. Tricarico (2008). *Pressure driven demand extension for EPANET (EPANETpdd)*. Exeter, UK, Tech. Rep., Center for Water Systems, University of Exeter.
- Mulvey, J. M., R. J. Vanderbey en S. A. Zenios (1995). *Robust optimization of large scale systems*. Operations Research **43**(2).
- Ostfeld, A. en U. Shamir (1993). *Incorporating reliability in optimal design of water distribution networks—review and new concepts*. Reliability Engineering & System Safety **42**(1): 5-11.
- Pasha, M. en K. E. Lansey (2005). *Analysis of Uncertainty on Water Distribution Hydraulics and Water Quality*. Impacts of Global Climate Change, ASCE.
- Pieterse-Quirijns, I. en M. van de Roer (2013). *Verbruikspatronenbibliotheek*.
- Sampathirao, A. K., J. M. Grosso, P. Sopasakis, C. Ocampo-Martinez, A. Bemporad en V. Puig (2014). *Water demand forecasting for the optimal operation of large-scale drinking water networks: The Barcelona Case Study*. IFAC Proceedings Volumes **47**(3): 10457-10462.
- Savic, D. A. en G. A. Walters (1997). *Genetic Algorithms for the Least-cost Design of Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management **123**(7): 67-77.
- Schaake, J. C., D. Lai en F. H. Lai (1969). *Linear Programming and Dynamic Programming Application to Water Distribution Network Design*, M.I.T. Hydrodynamics Laboratory.
- Sun, S., S.-T. Khu, Z. Kapelan en S. Djordjević (2011). *A fast approach for multiobjective design of water distribution networks under demand uncertainty*. Journal of Hydroinformatics **13**(2): 143-152.

- van Thienen, P. en I. Vertommen (2015). *Gondwana: A Generic Optimization Tool for Drinking Water Distribution Systems Design and Operation*. Computer Control for Water Industry Conference (CCWI 2015) Sharing the best practice in water management, Leicester, UK, Procedia Engineering.
- Vertommen, I., C. A. Agudelo-Vera, K. van Laarhoven en P. van Thienen (2017). *Optimaal ontwerp en transitie streefstructuren* BTO 2017.081, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Nederland.
- Vertommen, I., E. J. M. Blokker, M. F. M. A. Albert en C. A. Agudelo-Vera (2018). *Weers- en seizoensinvloeden op waterverbruik*, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands.
- Vertommen, I., R. Magini en M. d. C. Cunha (2014). *Generating Water Demand Scenarios Using Scaling Laws*. Procedia Engineering 70: 1697-1706.
- Vertommen, I., R. Magini en M. d. C. Cunha (2015). *Scaling Water Consumption Statistics*. Journal of Water Resources Planning and Management 141(5): 04014072.
- Vogelaar, A. en E. J. M. Blokker (2011). *Ontwerpen secundair leidingnet*. BTO 2011.025, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Nederland.
- Vonk, E., G. Cirkel en I. Leunk (2017). *De gevolgen van klimaatverandering en vakantiespreiding voor de drinkwatervraag*. BTO 2017.043, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands.
- Vonk, E., G. Cirkel en I. Leunk (2017). *De gevolgen van klimaatverandering en vakantiespreiding voor de drinkwatervraag*, KWR, Nieuwegein.
- Vonk, E., G. Cirkel en I. Leunk (2017). *De invloed van klimaatverandering en vakantiespreiding op de drinkwatervraag*, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands.
- Wagner, J. M., U. Shamir en D. H. Marks (1988). *Water Distribution Reliability: Simulation Methods*. Journal of Water Resources Planning and Management 114(3): 276-294.
- Xu, C. en I. C. Goulter (1998). *Probabilistic Model for Water Distribution Reliability*. Journal of Water Resources Planning and Management 124(4): 218-228.
- Xu, C. C. en I. C. Goulter (1999). *Reliability-based optimal design of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management 125(6).
- Yamashita, D. S., V. A. Armentano en M. Laguna (2007). *Robust optimization models for project scheduling with resource availability cost*. Journal of Scheduling 10: 67-76.

# Bijlage I

## Enquête: ontwerp streefstructuren bij drinkwaterbedrijven

### 1. Voor welke termijn worden streefstructuren ontworpen?

Brabant Water	<p>De termijn is (nog niet) niet officieel vastgelegd.</p> <p>Gedacht wordt aan 5 jaar maar kan per streefstructuur onderzoeksgebied verschillen.</p> <p>Is afhankelijk van:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- % aan saneringsprojecten dat is of wordt gerealiseerd in een bepaalde tijdsperiode. Of anders gezegd; 'waar staan we m.b.t ons leidingnet in de transitie naar de op dat moment voorgestelde streefstructuur'?</li> <li>- Extreme wijziging in watervraag door grootzakelijke waterverbruikers. Dit kan zowel toename als afname zijn.</li> <li>- Optreden van een hoge(re) piekwatervraag op max uur max dag anders dan die is gemodelleerd bij de bouw van de streefstructuur.</li> <li>- Wijziging in de grote waterverdeling zoals het opheffen of verschuiven van winvergunningen. <i>(Moet normaliter onderdeel zijn van een lange termijn strategie en dus bekend zijn bij het start ontwerp of revisie van een streefstructuur)</i></li> </ul>
Dunea	<p>We maken ontwerpen voor het tertiaire net met Diverdi. Het verbruik in Diverdi wordt bepaald a.h.v. het aantal huizen en andere verbruikers. Hier zit geen prognosehorizon in.</p> <p>We maken ook ontwerpen voor de secundaire en primaire leidingen met een leidingnetberekeningsprogramma. Het model dat hiervoor wordt gebruikt heeft een verbruiksprognose van +40 jaar in zich. Het leidingnet wordt dus getoetst voor een periode van 40 jaar, maar we gaan ervan uit dat de leidingen een langere levensduur hebben.</p>
Evides	<p>In principe voor de lengte van de technische levensduur van de leiding: 50+ jaar.</p> <p>Binnen Evides is dit echter sterk geografisch gebonden i.v.m. gebieden die veel en weinig ondergrondzettingen kennen.</p>
WML	5-10 jaar

### 2. Welke watervraag wordt gebruikt bij het ontwerp van streefstructuren?

Brabant Water	<p>Twee situaties van netwerkmodellen worden per verbruiksgebied standaard ontworpen om het actuele netwerk door te kunnen rekenen, n.l. Criterium dag (1,1 dag) en Maximum dag. Met de laatste worden toekomstige netontwerpen waaronder streefstructuren doorgerekend.</p> <p>Voor de bepaling van de watervraag geldt als uitgangspunt de jaaranalyse van de drinkwaterafzet van de waterproductiebedrijven in dat verbruiksgebied met een terugblik <math>\leq 10</math> jaar met de optredende maximum dag (en veelal samenvallende maximum uur) in die periode. Desbetreffende debieten met (dag)afzetpatroon worden in het model aangebracht.</p>
---------------	--

	Deze maximum opgetreden en gemodelleerde watervraag ( $m^3/uur$ ) wordt opgehoogd met 10 %. Die bestaat uit groei in watervraag (het meer water gaan verbruiken) en uitbreiding in watervraag (meer nieuwe aansluitingen in het verbruiksgebied).
Dunea	De drinkwatervraag 2040 op een maximum dag en een gemiddelde dag.
Evides	Dit is veelal een lastig punt. Voor uitgebreide structuren (primaire en secundaire transport) wordt gebruik gemaakt van het "prognose rekenmodel". Dit model wordt elke 4 jaar vernieuwd op basis van de dan geldende prognose binnen Evides. Voor simpele tertiaire takken wordt het momentane model gebruikt (op basis van facturatie en geschat lekverlies). Het gaat hier immers om een inschatting op basis van $Q\sqrt{N}$ of SIMDEUM. Evides gebruikt voorsnog de $Q\sqrt{N}$ methodiek waarin al een bepaalde mate van overschatting aanwezig is.
WML	De historische max dag van de laatste 10 jaar + ca 10% (dit is afhankelijk van het modelgebied, in het ene is het 8% en het andere 12%). De historische max dag valt in veel gebieden in 2006. Deze wordt verhoogd met de geprognosticeerde toename van het verbruik conform prognose hoog, voor een periode van 10 jaar.

### 3. Hoe wordt deze watervraag bepaald?

Brabant Water	A.h.v. prognose drinkwatervraag t/m 2030 in voorzieningsgebied Brabant Water van Icastat (uitgave 2015) waarbij de prognose van huishoudelijk drinkwater als meest bepalend wordt aangenomen. Andere deelgebruiken zijn agrarisch, bedrijfsmatig en overig. Er zijn door Icastat per deelgebruik drie mogelijk ontwikkelingen van drinkwaterverbruik uitgewerkt n.l. een basis prognose (2013) met een onder- en bovengrens van die basisprognose. Voor huishoudelijk verbruik wordt t/m 2030 een toename voorzien met een ondergrens van 3,7% en een bovengrens van 11% . Met een algehele ophoging van 10 % van de meest recente maximum dag (= Maximum dag netmodel) wordt de toekomstige watervraag ingericht.
Dunea	Bijzondere stijging in watervraag van grootzakelijke klanten worden ieder apart bezien en indien noodzakelijk meegenomen in het Maximum dag netmodel. Het basisverbruik in de knopen van het model is gebaseerd op het jaarverbruik van de klanten uit het facturatiesysteem. Dit verbruik wordt toegekend aan de leidingen in het model door middel van de locatie van de klant/aansluiting. Het basisverbruik wordt gecorrigeerd voor het NIRG (niet in rekening gebracht verbruik). Vervolgens wordt het basisverbruik vermenigvuldigd met een factor om op de verbruiksprognose +40 te komen. Eventuele grootschalige nieuwbouwprojecten worden indien bekend lokaal toegekend in het model. Tenslotte worden er verbruiksprofielen toegekend aan het basisverbruik om het jaarverbruik om te rekenen naar piekverbruik (uurverbruiken op een gem dag en max dag).
Evides	Zie antwoord op vraag 2.
WML	WML laat sinds 2012 jaarlijks een prognose opstellen van de drinkwatervraag door ABF research. De prognoses betreffen zowel het particuliere als het zakelijke waterverbruik. De prognoses worden berekend voor alle jaren tot en met 2045. Diverse uitsplitsingen worden geleverd: ■ Prognoses per verbruikscategorie (verbruik <300 $m^3$ , 300-1.000 $m^3$ , 1.000-10.000 $m^3$ en $\geq 10.000 m^3$ ). De verbruikscategorie < 300 $m^3$ wordt gezien als

particulier verbruik. Deze prognoses zijn beschikbaar tot op het niveau van gemeenten.

- Prognoses per sector (12 sectoren) voor het zakelijk verbruik. Deze prognoses zijn beschikbaar tot op het niveau van geografische clusters.
- Prognoses per cluster waarin een optelling wordt gemaakt van particulier verbruik en zakelijk verbruik.
- Prognoses voor productie- en distributieverliezen.

Naast een trendprognose wordt een prognose “hoog” en een prognose “laag” opgesteld. Ook worden aparte berekeningen gemaakt voor het totale waterverbruik door key accounts die WML onderscheidt. Voor een variant van de trendprognose wordt rekening gehouden met targetstelling op het niveau van sectoren die wordt gespecificeerd door WML.

#### 4. Wordt onzekerheid in aanmerking genomen? a) Indien ja, hoe? b) Indien nee, waarom?

Brabant Water	Ja, in zekere zin wel. De basis prognose zoals die door Icastat wordt beschreven wordt ook wel aangeduid als de prognose volgens het continuïteitsscenario en is de watervraag die zich met grote waarschijnlijkheid zal gaan ontwikkelen volgens/met de huidige beschikbare informatie. De bandbreedte waarin die watervraag zich met grote waarschijnlijkheid zal gaan ontwikkelen wordt gevormd door de onder- en bovengrens. Beide zijn nog steeds denkbaar maar wel veel minder waarschijnlijk. Door een groeipercentage te kiezen boven de basisprognose en net onder of tegen de bovengrens wordt een zekere vorm van “veilige” onzekerheid meegenomen.
Dunea	Onzekerheden in de drinkwatervraag worden niet standaard meegenomen. De onzekerheden in de uitkomsten van het model worden uiteraard wel bekeken. Voor het transportnet wordt wel rekening gehouden met de onzekerheid in het wel of niet verlengen van de engrosleveringen naar en van onze buurbedrijven. Bij kritische beslissingen (diameterkeuze van een lange transportleiding) kan het voorkomen dat berekeningen worden gemaakt met een iets hogere of lagere piekfactor. Deze werkwijze is echter niet formeel vastgelegd: wanneer wordt dit wel of niet gedaan.
Evides	Ja, in het prognosemodel d.m.v. reservering voor klimaat (de klimaatreserve is meestal 2 tot 4%). Verder wordt de bekende “toeter” (stijgende en de dalende lijnen aan het einde van een prognoselijne, mate van onzekerheid) niet in het model meegenomen. Het model wordt gebaseerd op de mediaan.
WML	Nee, gedachte is, als om de 5-10 jaar een nieuwe streefstructuur wordt gemaakt er tijdig rekening kan worden gehouden met ontwikkelingen in de watervraag of andere onzekerheden.  Een streefstructuur is ook niet in beton gegoten. Het komt regelmatig voor dat de streefstructuur aangepast moet worden door voortschrijdend inzicht of ontwikkelingen waar bij het ontwerp geen rekening mee is gehouden.

#### 5. Hoe zou onzekerheid in aanmerking kunnen worden genomen?

Brabant Water	De huidige werkwijze bij het opstellen van de Icastat prognoses is door onderscheid te maken naar zo homogeen mogelijke deelgebruiken (huishoudelijk / agrarisch / bedrijfsmatig / overig).  Bij het ontwerp van de streefstructuren richten we ons nu voornamelijk op het groeipercentage van het deelgebruik ‘huishoudelijk gebruik’ aangezien die het grootste aandeel in de waterafzet heeft.  Echter waardoor het groeipercentage van ‘huishoudelijk gebruik’ wordt veroorzaakt en waarvan deze afhankelijk is, is niet bekend (welke scenario’s liggen hieraan te grondslag?). Daarnaast: onzekerheden van de overige deelgebruiken worden bij
---------------	--

	<p>gebrek aan beter onder huishoudelijk groeipercentage geschaard. Deze zouden in feite apart beschouwd moeten worden. Grootzakelijke verbruikers uitgezonderd die worden apart beschouwd. Door zo goed mogelijk in te kunnen schatten welk scenario per deelgebruik de grootste kans van slagen heeft moet een nauwkeuriger groeipercentage t.o.v. de basisprognose te bepalen zijn. <i>(Een punt in de bandbreedte tussen onder-, en bovengrens.</i></p>
Dunea	<p>De overschrijdingskansen van de drinkwatervraag in een voorzieningsgebied worden bepaald met behulp van statistiek (maximum dagfactoren). Vervolgens wordt het systeem hierop getoetst en gekeken of het wel of niet voldoet. In plaats van de overschrijdingskansen op de input te bepalen is het misschien wel beter om de overschrijdingskansen van de output te bepalen. Hoe vaak wordt een druk onderschreden bij een bepaald scenario? Dit geeft misschien wel een beter beeld van de prestaties van het systeem.</p>
Evides	<p>Lastig, bij rekening houden met een te grote onzekerheid dimensioneer je het net snel te groot (waterkwaliteit ↓, Capex ↑ en Opex ↑) of te klein (waterkwaliteit ↑, Opex ↓, Capex ↓) maar in later stadium leiding vervangen voor einde afschrijvingstermijn dus desinvesteringen en alsnog Capex ↑ en Opex ↑.</p> <p>Waterleidingbedrijven kennend zullen zij eerder te groot dan te klein ontwerpen. Dit staat dan weer haaks op de verbetering van de netconfiguratie.</p>
WML	<p>Zie vorig punt. Regelmatig nieuwe streefstructuur maken.</p>

## 6. Waar loop je in de praktijk tegenaan?

Brabant Water	<p>We weten niet welke invloedsfactoren b.v. technische-, beleids-, of gedragsmatige ontwikkelingen en hun onderlinge verband de grenswaarden bepalen. Welke scenario's zijn mogelijk en het meest reëel dat ze zullen optreden? <i>(Stapsgewijze aanpak en verdieping!? De kans dat en mate van de bevolking groeit of vergrijst, vakanties zich meer spreiden, het klimaat wijzigt, circulaire regendouches hun intrede doen, ...etc. ?)</i></p>
Dunea	<p>In het voorzieningsgebied van Dunea is sprake van groei van het aantal inwoners en woningen. Het komt steeds vaker voor dat bestaande gebieden met een agrarisch of bedrijfsmatig gebruik opnieuw worden ingericht met een woonfunctie. Dit heeft zo'n grote lokale impact dat het systeem aangepast moet worden.</p>
Evides	<p>Overdimensionering op basis van bluscapaciteit, onduidelijkheden in afspraken met klanten met grotere aansluitingen (het al dan niet rechten kunnen ontlenen aan het hebben van een QN 7 watermeter, in relatie tot de wettelijke drukeis bij 1 m<sup>3</sup>/u), zachte waterkwaliteitsparameters (max verblijftijden, wandcontacttijden) onduidelijkheid over minimale stroomsnelheden in primair en secundair net. Relatie schuifspanning sediment en type aanwezig sediment (bepaling minimale stroomsnelheid of pulsen in stroomsnelheid). Gebied specifieke randvoorwaarden v.b. druk af pompstation is 3 meter hoger dan de toegestane einddruk in het tertiair net waardoor creëren van verhang in secundair net bijna onmogelijk is zo ook behalen van "voldoende" stroomsnelheid.</p>
WML	<p>WML heeft als uitgangspunt dat brandkranen op de lussen van de streefstructuur minimaal 60 m<sup>3</sup>/h leveren. Dit betekent dat op basis van regulier verbruik kunnen leidingen vaak verkleind worden maar dat deze voor de levering van 60 m<sup>3</sup>/h weer vergroot moeten worden. De reguliere watervraag is dan niet maatgevend maar de levering van bluswater.</p>



## Bijlage II

### Oefening: Ontwerp streefstructuren door Dunea en Brabant Water

#### II.1 Dunea

Het projectgebied ligt in de wijken Essesteijn en 't Loo van de gemeente Leidschendam-Voorburg. Het leidingnet bestaat voornamelijk uit AC-leidingen, die op de nominatie staan om te saneren. Het leidingnet is in het noord-oosten 2 keer aangesloten op 1200 mm betonleiding en in het zuid-westen op een 700mm AC-leiding. Tussen de 700mm en 1200mm ligt een ringleiding van 400/300mm, die zorgt voor de distributie van het drinkwater in het projectgebied, maar ook voor transport richting Leidschenveen-Ypenburg.

#### Scope

- De diameter van alle leidingen in het gebied kunnen worden aangepast, behalve 1200mm, 700mm, 400mm en 300mm ringleiding
- Er wordt ontworpen op druk
- Er wordt niet ontworpen op zoveel mogelijk zelfreinigende leidingen (vertakt)
- Er wordt niet ontworpen op capaciteit van brandkranen of eventuele aanwezigheid van sprinklers
- Er wordt niet ontworpen op leveringszekerheid

#### Ontwerpeisen

- Gewenste druk 26 mwk
- Geëiste druk 23 mwk

#### Verbruik en piekfactoren

Het totale basisverbruik in het gebied is 50,25 m<sup>3</sup>/uur. Dit komt overeen met ongeveer 4.500 aansluitingen (gebaseerd op 120 lpd en 2,2 personen per huishouden). Voor het gebied resulteert dit in de volgende piekverbruiken met bijbehorende kansen.

Kans	Piekfactor	Piekverbruik
0,53	2,32	116,6
0,24	2,45	123,1
0,23	2,82	141,7

#### Huidig leidingnet in scope

Totale lengte	27.608 m <sup>3</sup>
Totaal volume	407 m <sup>3</sup>
Aantal knopen	681
Aantal leidingen	760

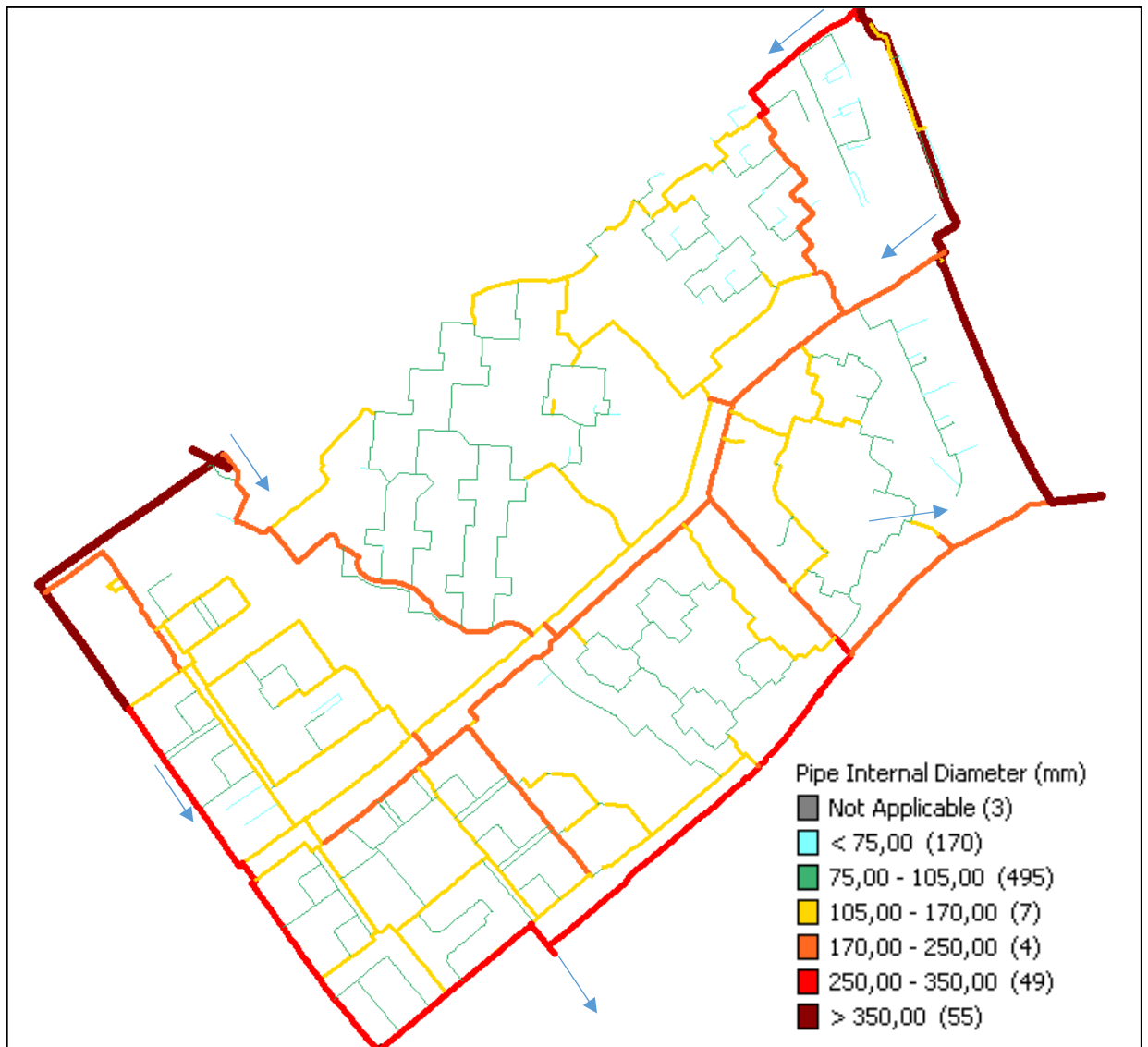
Diameter van - tot/met	Lengte in meter
0-50	1.067
50-100	11.178
100-175	10.870
175-300	4.493
Totaal	27.608

### Prestaties

Aan de hand van de berekeningen op piek uur met de piekfactoren levert het huidige leidingnet de volgende prestaties:

Prestaties	Pf = 2,32	Pf = 2,45	Pf = 2,82
aantal knopen druk < 23 mwk	3	3	3
aantal knopen druk < 26 mwk	9	9	9
Gem. druk alle knopen	27,48	27,47	27,46
Max druk	28,92	28,92	28,92
Min druk	20,79	20,78	20,76
Gem HGL	27,37	27,36	27,35
Max HGL	27,90	27,90	27,90
Min HGL	27,00	27,00	27,00

Uit de tabel valt af te lezen dat het huidige leidingnet bijna dezelfde prestaties levert voor de 3 verschillende piekverbruiken. De gemiddelde druk en head is 1 cm lager voor de 3 piekverbruiken.

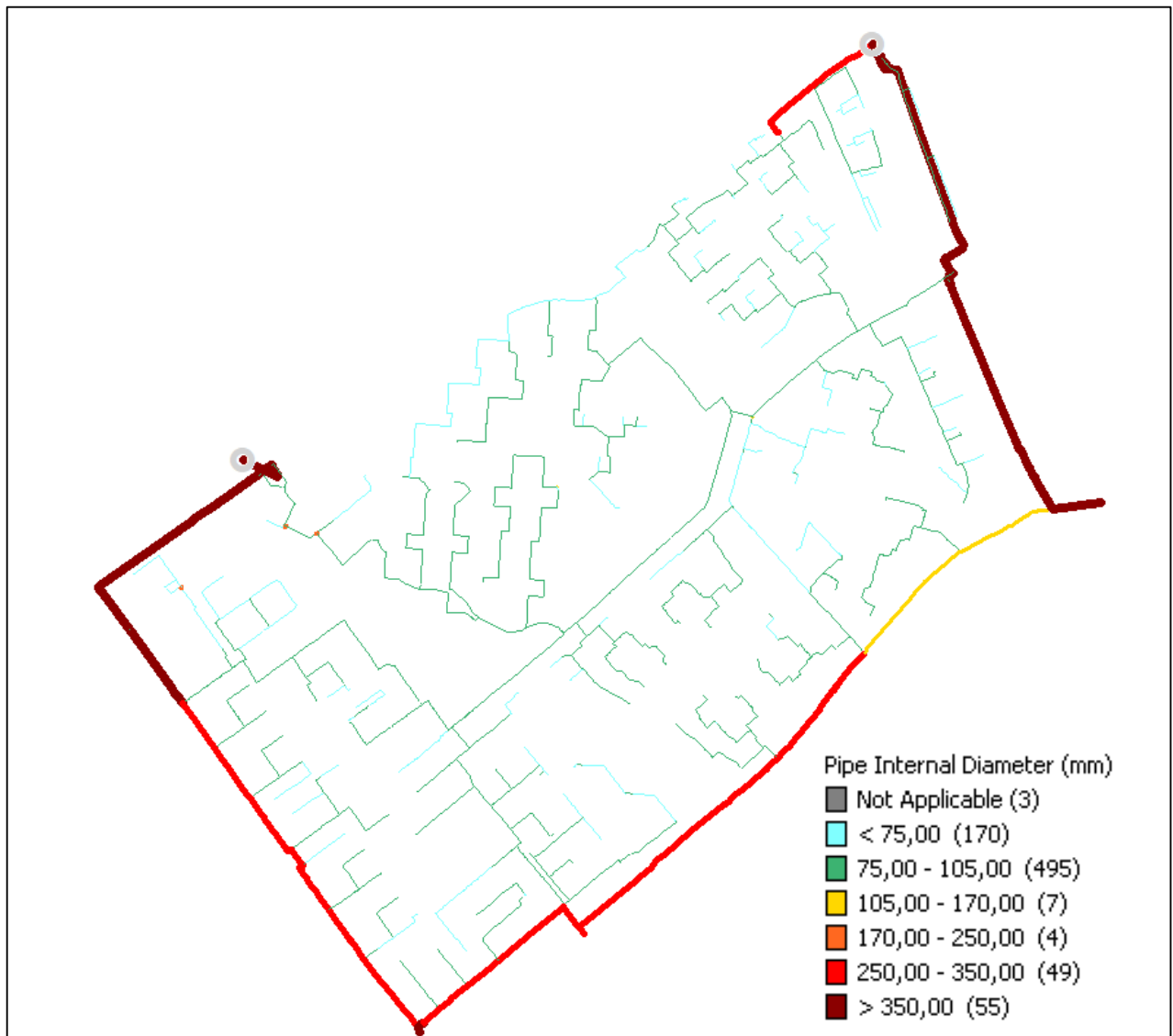


**Streefstructuur**

Bij het opstellen is van de streefstructuur is in eerste instantie het aantal leidingen die vermaasd zijn is geminimaliseerd tot 5. Vervolgens zijn de diameters verkleind tot de geëiste druk bereikt wordt in alle scenario's. Er is hierbij gekeken naar het verhang van de leidingen om te kijken waar de diameter verkleind kan worden zonder dat de min druk te laag wordt. Het leidingnet is behoorlijk verkleind in zowel lengte als diameter. De gemiddelde druk is wel 0,5 mwk lager dan het huidige leidingnet. Van veel leidingen kan de diameter nog verder verkleind worden waardoor de druk van meer knopen onder de gewenste druk komt. Dit is niet verder uitgezocht.

Diameter van - tot/met	Lengte in meter
0-50	2.219
50-100	10.690
100-175	9.101
175-300	158
totaal	22.168

prestaties	Pf = 2,32	Pf = 2,45	Pf = 2,82
aantal knopen druk < 23 mwk	3	3	4
aantal knopen druk < 26 mwk	14	24	124
Gem. druk alle knopen	27,00	26,94	26,77
Max druk	28,92	28,92	28,92
Min druk	20,11	20,02	19,75
Gem HGL	26,90	26,84	26,66
Max HGL	27,90	27,90	27,90
Min HGL	25,71	25,55	25,05



## II.2 Ervaring bij Dunea

**Vraag:** Wat is de inspanning om drie scenario's in aanmerking te nemen bij het ontwerp van de streefstructuur? Wat zou het betekenen moesten er 10 of 20 scenario's in aanmerking worden genomen?

**Reactie:** De inspanning valt wel mee, ik heb hiervoor het gebruikelijke 24-uurspatroon gebruikt. Van dit patroon heb ik 3 uren misbruikt waarin ik de 3 piekfactoren heb ingevuld. Dus met 1 model kan ik 3 scenario's doorrekenen. Door de tijd heen te wandelen kan je vervolgens de resultaten van de 3 scenario's zien. Op zich kan je zo heel gemakkelijk veel scenario's bekijken, zeker als de pieken ordent van laag naar hoog. Synergi is niet beperkt tot 24 piekfactoren, maar ik denk dat 10 scenario's al heel veel zijn. Dit gaat alleen op als de rest van het model geen elementen bevat die in de tijd iets anders gaan doen, zoals bv een pomp die op tijd schakelt of een reservoir dat in de tijd gevuld/geleegd wordt.

**Vraag:** Zijn de kansen van de scenario's in aanmerking genomen?

**Reactie:** Je moet denk ik wel iets met de kansen doen, zeker als je in bepaalde scenario's de gewenste druk niet haalt. Dit slaat ook op de vraag die je stelt in het document. Als je moet beoordelen of je het erg vindt dat met een extreme piekfactor heel veel knopen onder de

gewenste druk komt ga je denk ik toch naar deze kans kijken. Hoe vaak komt het voor en wat heb je er voor over om ook in deze situatie de druk op peil te houden? Er zal toch iets van een geformaliseerde afweging moeten komen voor een bedrijf om hier gestructureerd mee om te gaan.

Ik vond het ook wel lastig om leidingen aan te passen waarmee je onder de gewenste drukeis uitkomt. Je hebt toch al snel de neiging als ontwerper om alle rode puntjes 'weg' te ontwerpen. Hier zal Gondwana toch echt wel iets toevoegen.

**Vraag: Wat is het effect voor de klant wanneer de druk niet wordt gehaald? Wordt er naar het niet geleverde water gekeken?**

Reactie: Nee ik heb niet drukafhankelijk gerekend. Dit gebruiken we eigenlijk alleen bij uitval van leidingen (leveringszekerheidsanalyses). Uiteindelijk moet er worden voldaan aan een wettelijke drukeis. De gewenste drukeis ligt daarboven. Het effect voor de klant is afhankelijk van het gebouw en de aansluiting. Een hele korte aansluitleiding zal nog niet zoveel gevolgen hebben voor de klant, net zoals de aanwezigheid van een hydrofoor. Maar een warmwatervoorziening op een 3e of 4e woonlaag kan bij een lage druk al snel tot overlast leiden.

## II.3 Brabant Water

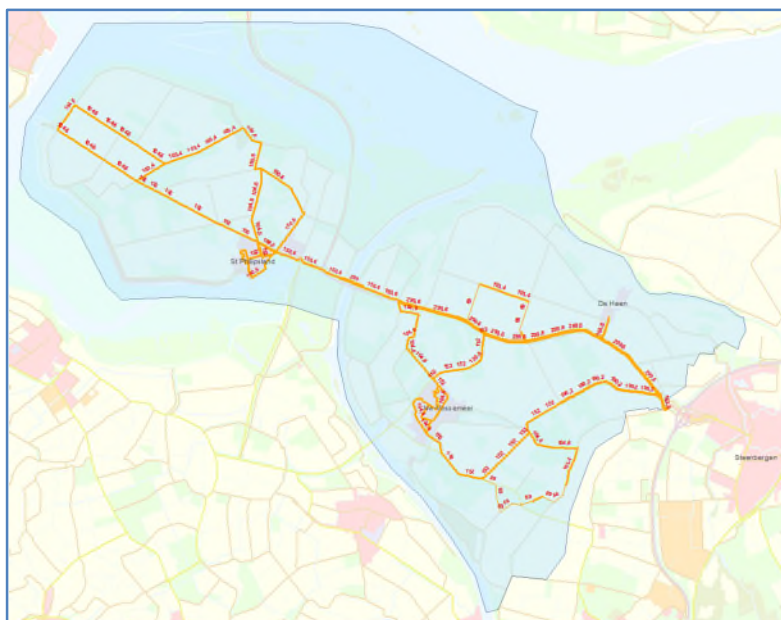
## Optimaal ontwerp van robuuste streefstructuren

Wat is de invloed hierop bij verschillende watervraag-scenario's o.b.v. piekfactoren.

Een casestudy voor BTO onderzoek

### Postadres

Postbus 1068  
5200 BC 's-Hertogenbosch



Streefstructuur Str0039

## Colofon

### Auteur

T.L. Haaijer

### Datum

1 mei 2019

### Kenmerk

Advies nr.: 19-069

### Opdrachtgever

KWR-BTO

### Kwaliteitsborger

Brabant Water, Afdeling Watervoorziening

### Versie

0.001

### Status

Gereed / definitief

## Inhoud

Colofon .....	1
1. Doelstelling .....	3
2. Parameters .....	3
3. Pilot gebiedskeuze .....	4
3.1 Distributienet achter Aanjager Steenberg .....	4
3.2 Streefstructuur .....	5
4. InfoWorks Netwerkmodel .....	6
4.1 Model BoZ & Wouw (2015) .....	6
5. Berekeningen.....	7
5.1 V01_Streefstructuur (Str0039) .....	7
5.2 Piekfactor 2,32.....	9
5.3 Piekfactor 2,45.....	11
5.4 Piekfactor 2,82.....	13
6. Resumé berekeningen.....	15
7. Processtappen ontwerp streefstructuur .....	16
7.1 Algemeen.....	16
7.2 Voorbereiding en Inventarisatie.....	16
7.2.1 Stuurinformatie .....	16
7.2.2 Rekenhulpmiddelen.....	16
7.3 Ontwerp.....	16
7.3.1 Bepaling onderzoeksgebied.....	16
7.3.2 Bepaling Concept netvorm en diameters.....	16
7.3.3 Ontwerpberekeningen Concept netvorm StrStr .....	17
7.3.4 Leveringszekerheid controle berekening DO_01 .....	17
7.3.5 Leveringscontinuïteit controle berekening DO_02 .....	17
7.3.6 Begrenzer capaciteit controle berekeningen DO_03 .....	17
7.3.7 Sprinkler & Brandkraan controle berekeningen DO_04.....	17
7.3.8 Afronding en Kwaliteitsborging .....	17
7.3.9 Oplevering .....	17
8. Conclusie.....	19
8.1 Drukeis en onder prestaties op nodes .....	19
8.2 Variant mogelijkheden. ....	19
8.3 Werk inspanning.....	20



## 1. Doelstelling

Bepaal aan de hand van drie verschillende watervraagscenario's (door middel van verschillende piekfactoren) wat de invloed is op de vereiste minimale druk voor een reeds voltooid streefstructuur.

Beschrijf de te volgen stappen die noodzakelijk zijn geweest om een streefstructuur te maken. Geef aan welke ontwerpstappen opnieuw doorlopen moeten worden voor de verschillende watervraag scenario's om aan de gestelde eisen te voldoen

## 2. Parameters

Te hanteren piekfactoren	kans	<i>(DUNEA Casestudy Wassenaar)</i>
a) 2,32	0,53	
b) 2,45	0,24	
c) 2,82	0,23	

Minimaal vereiste druk	<i>(DUNEA Casestudy Wassenaar)</i>
d) $P_{\text{minimaal}}$ :	23 mwk (230 kPa) verplicht
e) $P_{\text{gewenst}}$ :	26 mwk (260 kPa) gewenst

### Opmerking:

Brabant Water eist bij het ontwerpen van streefstructuren een minimale druk overal in het secundaire net van minimaal 300 kPa op maximum uur van de maximum dag. De bovenstaande parameters worden hierop aangepast.

- |                             |                                |
|-----------------------------|--------------------------------|
| d) $P_{\text{minimaal}}$ :  | = 30 mwk ( 300 kPa) verplicht  |
| e) $P_{\text{optioneel}}$ : | > 30 mwk (> 300 kPa) optioneel |

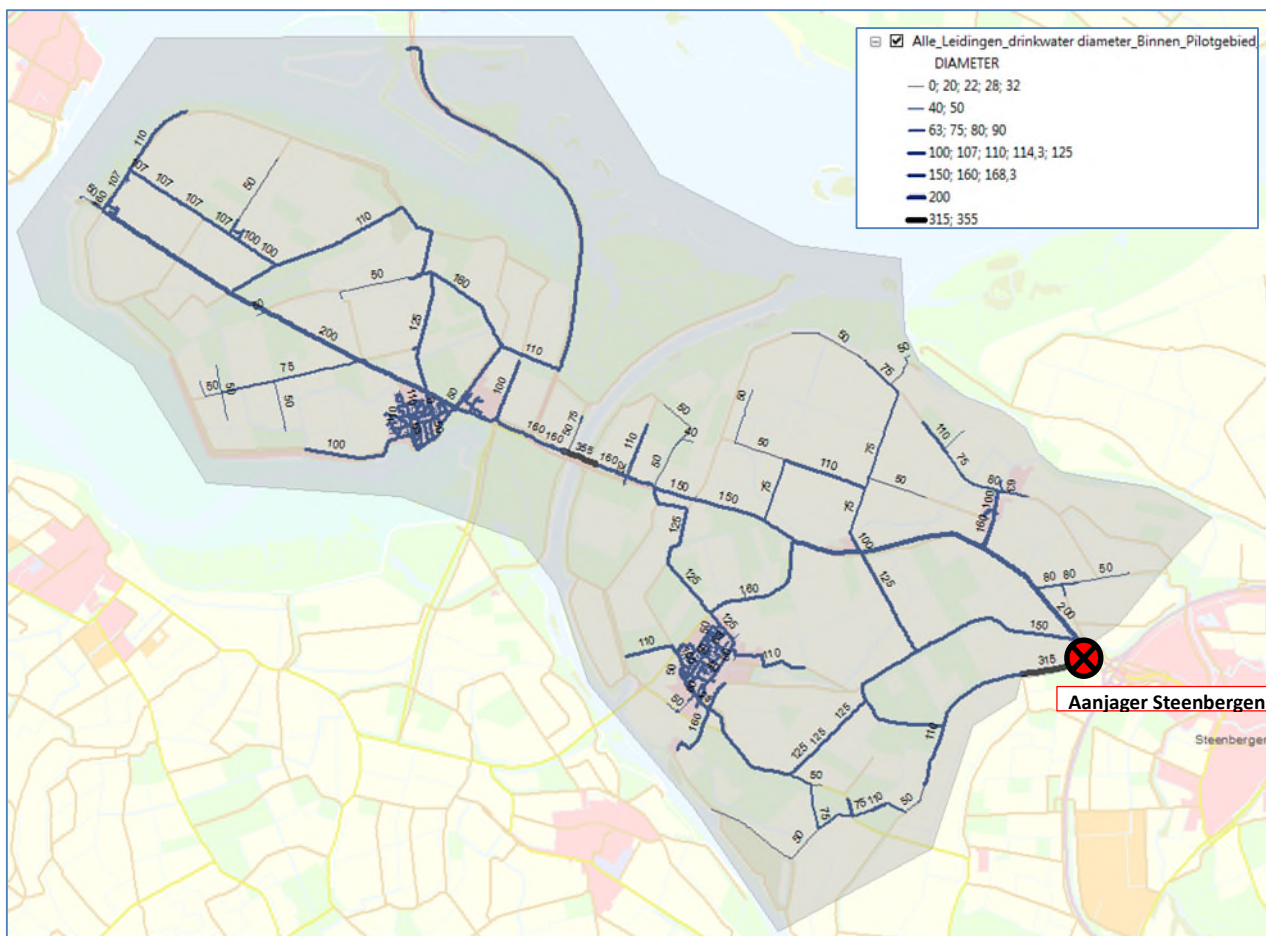
### 3. Pilot gebiedskeuze

#### 3.1 Distributienet achter Aanjager Steenberg

Kerkdorpen:

- Sint Philipsland (Tholen)
- Nieuw Vossemeer (Steenbergen)
- De Heen (Steenbergen)

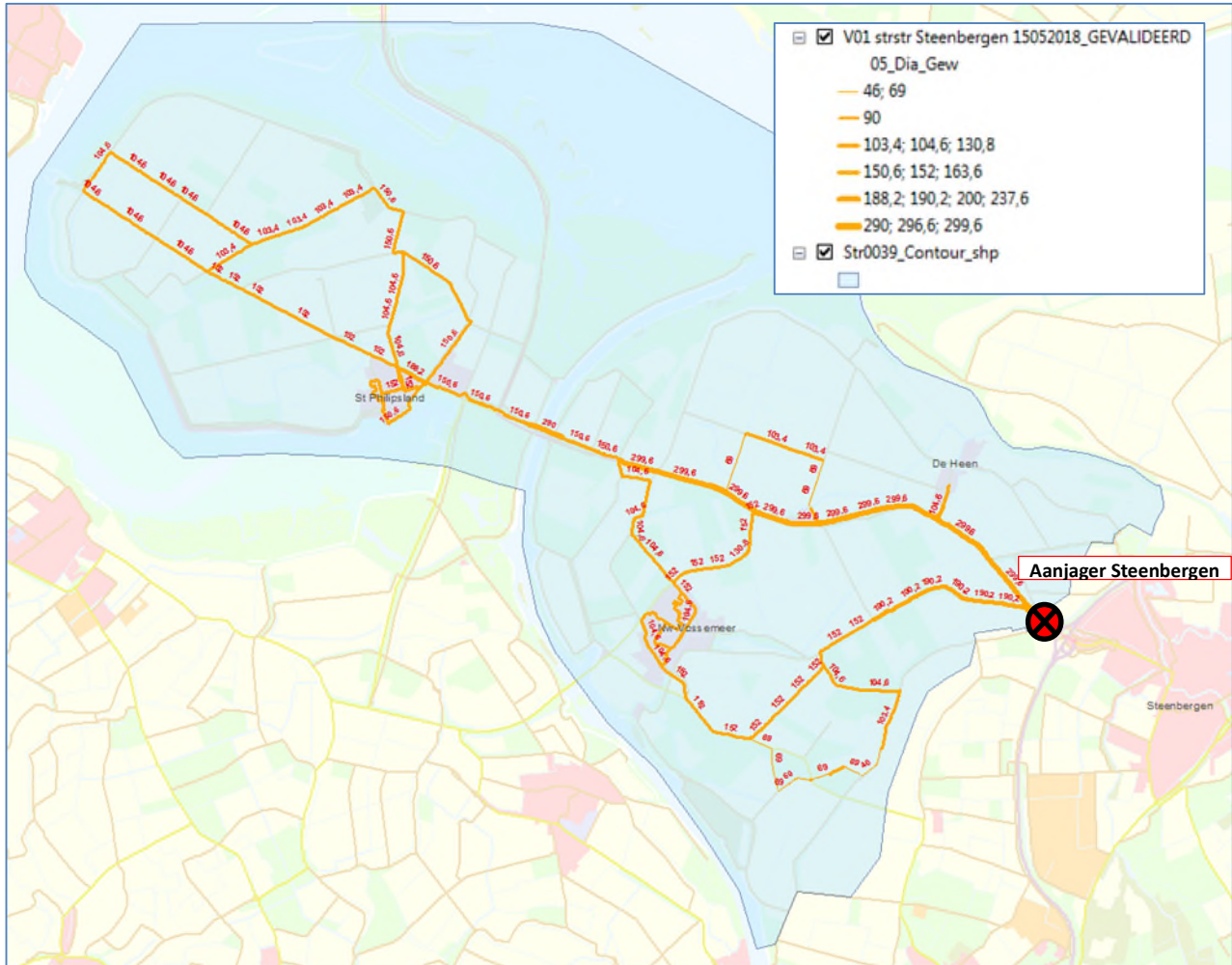
Bestaande distributienet incl. diameters:



Totale leidinglengte = 108 km  
Aantal servicepunten = 2420

### 3.2 Streefstructuur

Streefstructuur Str0039 15052018 incl. secundaire netvorm & gewenste diameters inwendig:







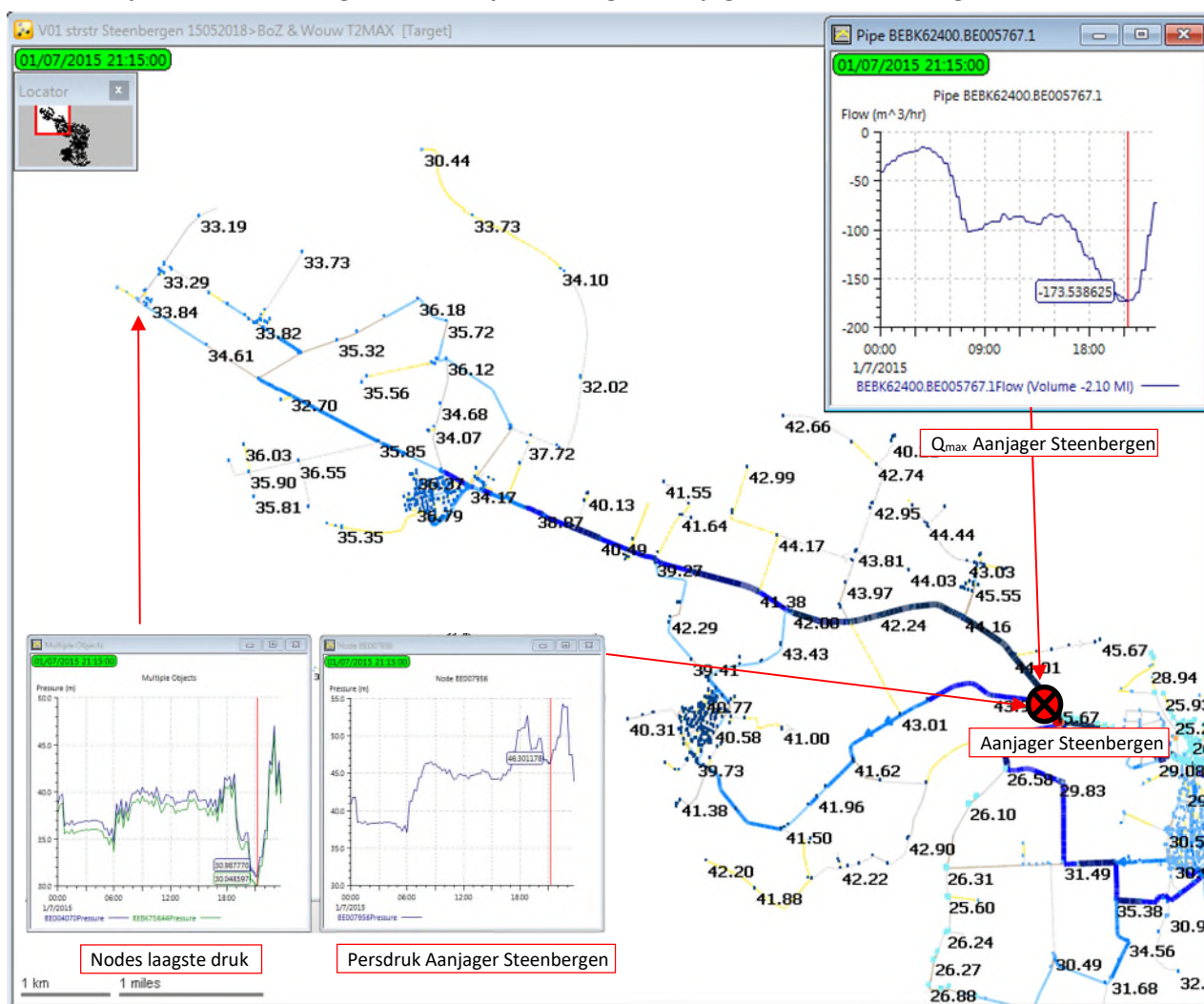
## 5. Berekeningen

Uitgangspunt is het reeds ontworpen netwerkmodel en de bijbehorende maximumdag berekeningen van de streefstructuur Str0039 met een piekfactor van 1,97. Door een vermenigvuldigingfactor (multiplier) toe te passen op alle nodes in het pilotgebied worden de drie gewenste hogere piekfactoren behaald en het netwerkmodel van de streefstructuur doorgerekend. De drie berekeningen zijn op dagbasis met kwartierwaarden, maar het maximum uur is hier het focuspunt.

### 5.1 V01\_Streefstructuur (Str0039)

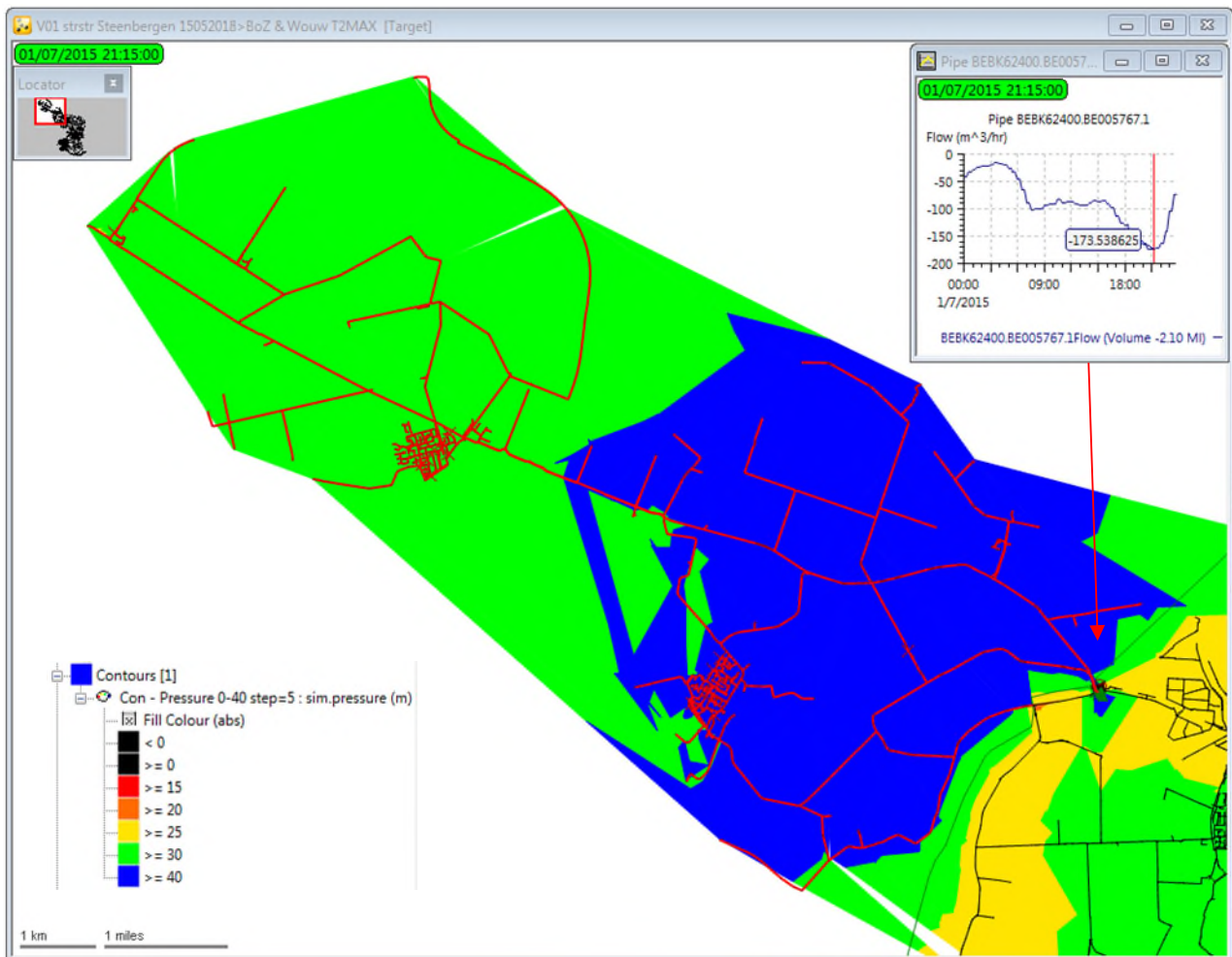
Gemiddeld verbruik max dag = 80,06 m<sup>3</sup>/uur  
 Piekfactor Max uur-Max dag = 1,971  
 Q<sub>max</sub> uur = 80,06 x 1,971 = 157,79 m<sup>3</sup>/uur

Drukken op max uur-max dag / Q<sub>max</sub> en P persleiding na aanjager / Nodes met laagste druk:



Drukken op 1547 Nodes >= 300 kPa (100% drukeis gehaald op alle Nodes)  
 Hoeveelheidseis op Nodes = 100% voor 1547 Nodes (⇒ Leveringszekerheid = OK)  
 Hiermee is de streefstructuur V01-strstr-Steenbergen-15052018 voor wat betreft de drukeis akkoord bevonden.

Drukhoogte kaart:



## 5.2 Piekfactor 2,32

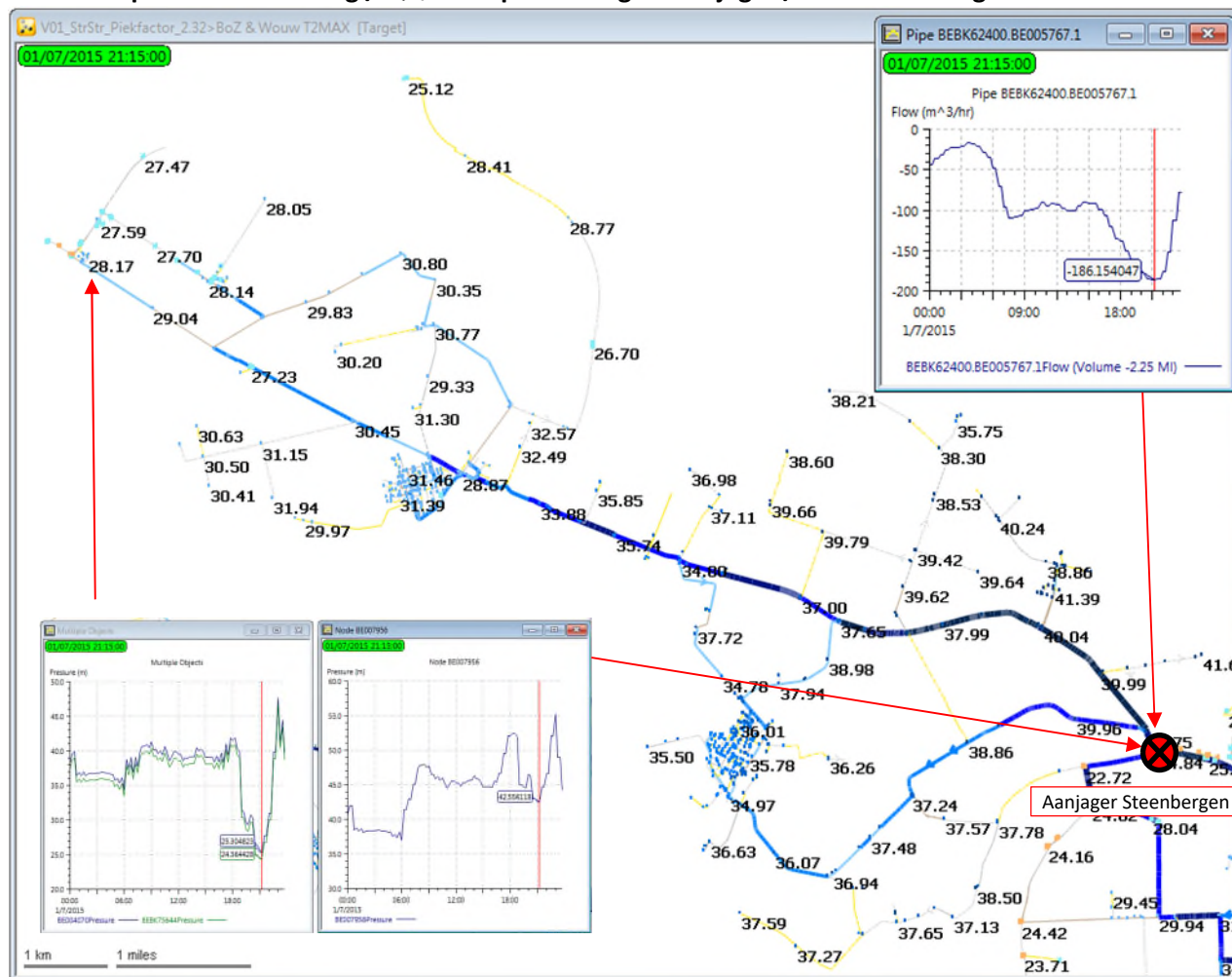
Gemiddeld verbruik max dag = 80,06 m<sup>3</sup>/uur

(Basis)Piekfactor Max uur-Max dag = 1,971

Multiplier = **1,18**

Q<sub>max</sub> uur = 80,06 x 1,971 x 1,18 = 186,2 m<sup>3</sup>/uur

Drukken op max uur-max dag / Q<sub>max</sub> en P persleiding na aanjager / Nodes met laagste druk:



Opmerking: persdruk aanjager Steenbergens valt c.a. 3 mwk lager uit (43 mwk i.p.v. 46 mwk!)

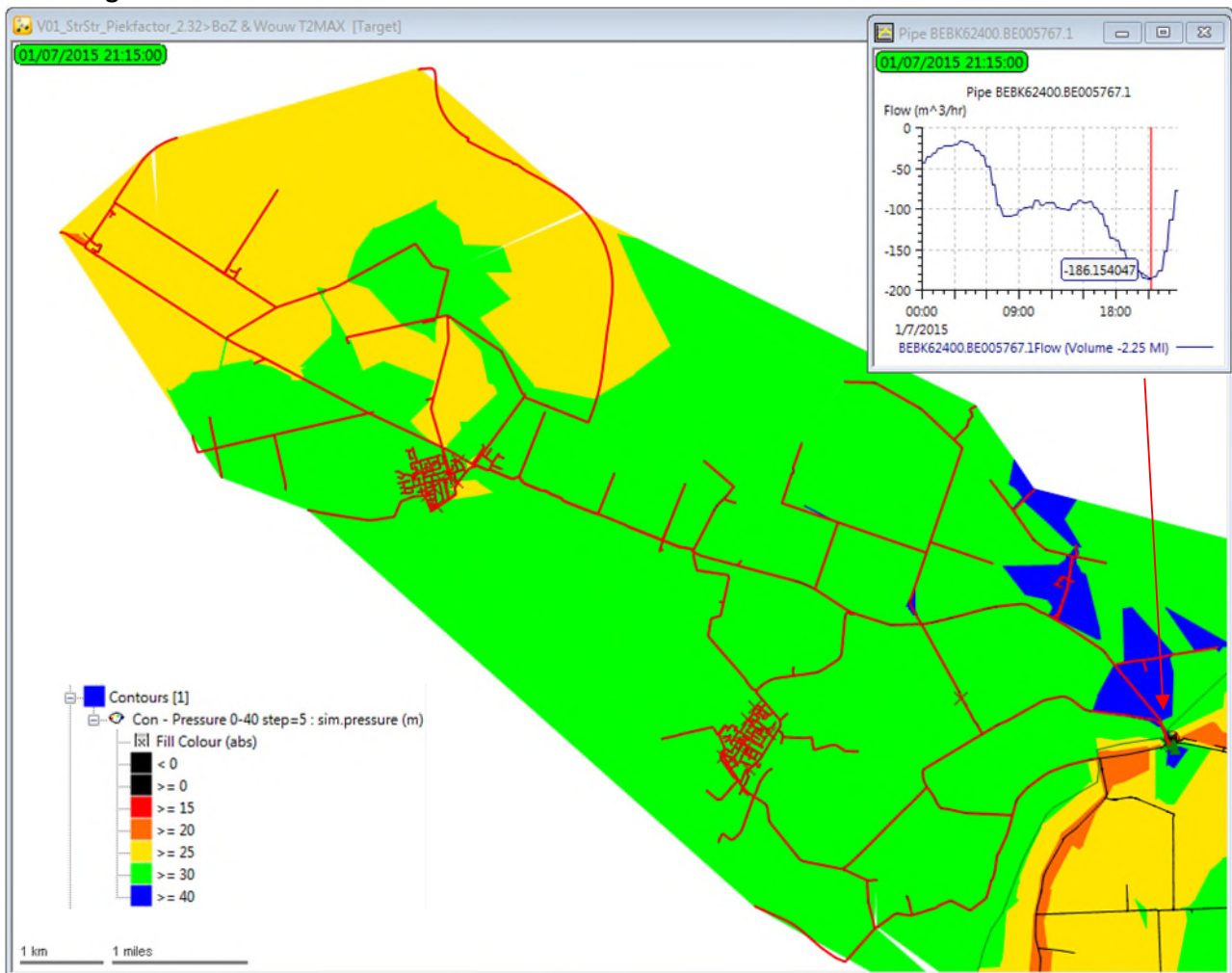
Dit is het gevolg van de verhoogde watervraag die het 'voorland' (= verbruiksgebied Wouw) moet leveren aan het pilotgebied en leidt tot een lagere voordruk aan de zuigzijde van de aanjager en waarbij de pompkarakteristiek van aanjager Steenbergens hetzelfde blijft.

Drukken op 247 Nodes < 300 kPa (**16 % van de Nodes onder prestatie**)

Drukken op 1300 Nodes >= 300 kPa = OK! (84 % Nodes drukeis gehaald)

Hoeveelheidseis op Nodes = 100% voor 1547 Nodes (⇒ Leveringszekerheid = OK)

Drukhoogte kaart:

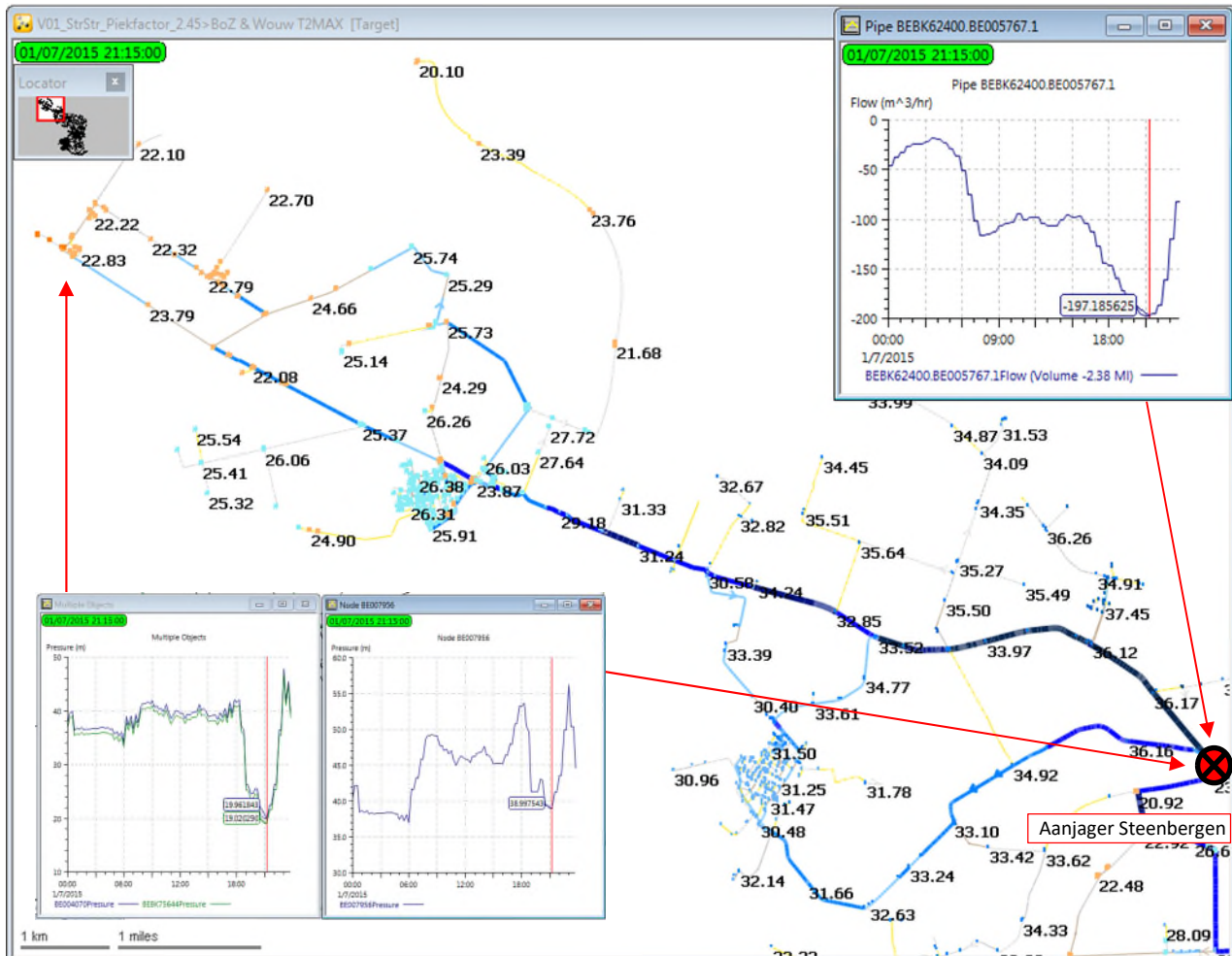




### 5.3 Piekfactor 2,45

Gemiddeld verbruik max dag = 80,06 m<sup>3</sup>/uur  
 (Basis)Piekfactor Max uur-Max dag = 1,971  
 Multiplier = **1,25**  
 Q<sub>max</sub> uur = 80,06 x 1,971 x 1,25 = 197,3 m<sup>3</sup>/uur

Drukken op max uur-max dag / Q<sub>max</sub> en P persleiding na aanjager / Nodes met laagste druk:

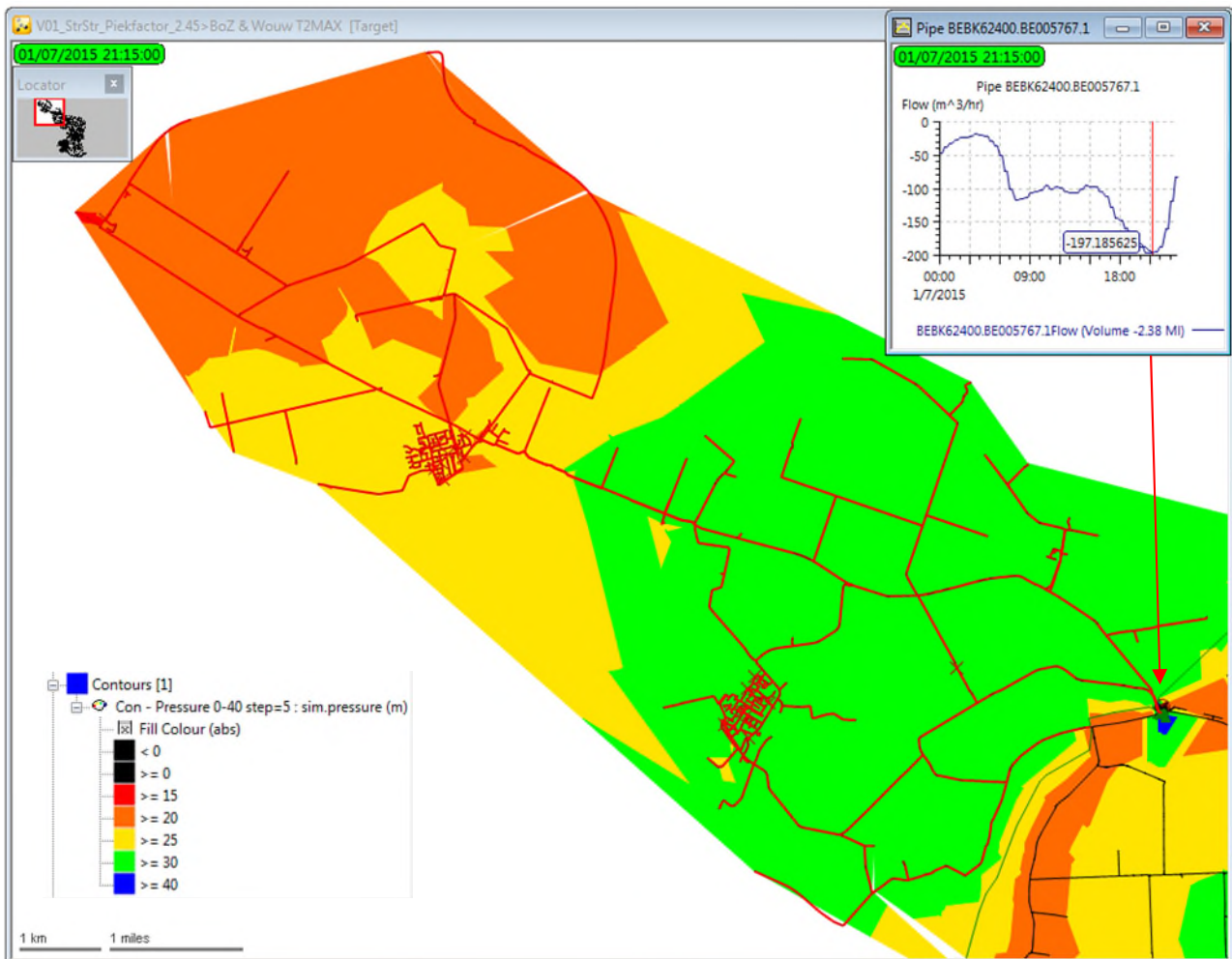


Opmerking: persdruk aanjager Steenberg valt c.a. 7 mwk lager uit (39 mwk i.p.v. 46 mwk !)  
 Ook hier is dit het gevolg van de verhoogde watervraag die het 'voorland' (= verbruiksgebied Wouw) moet leveren aan het pilotgebied en leidt tot een lagere voordruk aan de zuigzijde van de aanjager en waarbij de pompkarakteristiek van aanjager Steenberg hetzelfde blijft.

Drukken op 751 Nodes < 300 kPa (49 % van de Nodes onder prestatie)  
 Drukken op 796 Nodes >= 300 kPa = OK! (51 % Nodes drukeis gehaald)

Hoeveelheidseis op Nodes = 100% voor 1547Nodes (⇒ Leveringszekerheid = OK)

Drukhoogte kaart:



Optimaal ontwerp van robuuste streefstructuren

## 5.4 Piekfactor 2,82

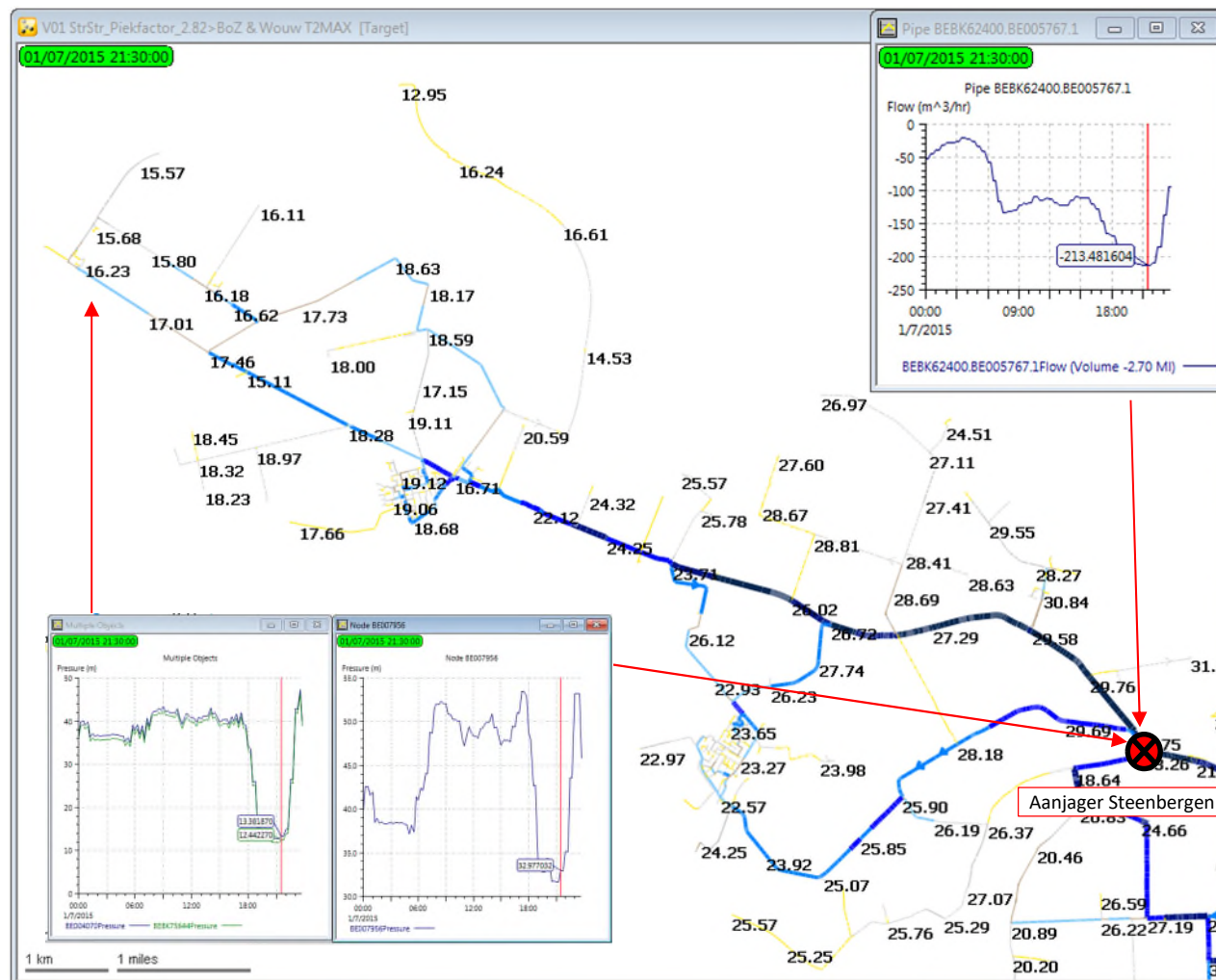
Gemiddeld verbruik max dag = 80,06 m<sup>3</sup>/uur

(Basis)Piekfactor Max uur-Max dag = 1,971

Multiplieur = **1,43**

Q<sub>max</sub> uur = 80,06 x 1,971 x 1,43 = 225,6 m<sup>3</sup>/uur

Drukken op max uur-max dag / Q<sub>max</sub> en P persleiding na aanjager / Nodes met laagste druk:



Opmerking: persdruk is t.o.v. c.a. 13 mwk lager (33 i.p.v. 46)

Idem voorgaande

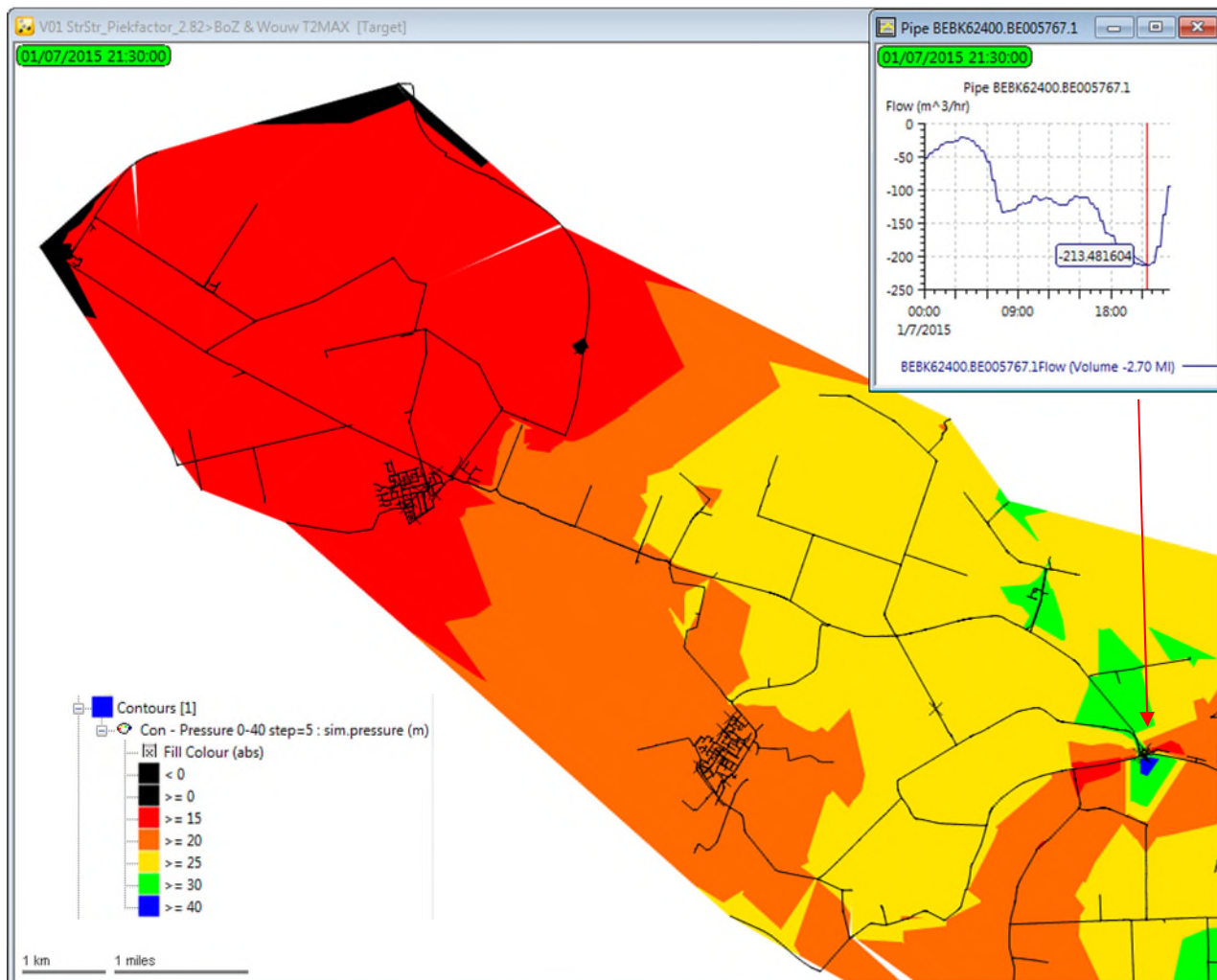
Drukken op 1461 Nodes < 300kPa (94 % van de Nodes onder prestatie)

Drukken op 86 Nodes >= 300 kPa OK! (6 % Nodes drukeis gehaald)

Hoeveelheidseis op Nodes = 100% voor 1320 Nodes

= 93% tot 99% voor 227 Nodes (⇒ Leveringszekerheid = OK)

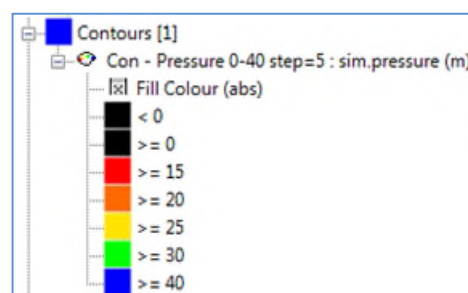
Drukhoogte kaart:



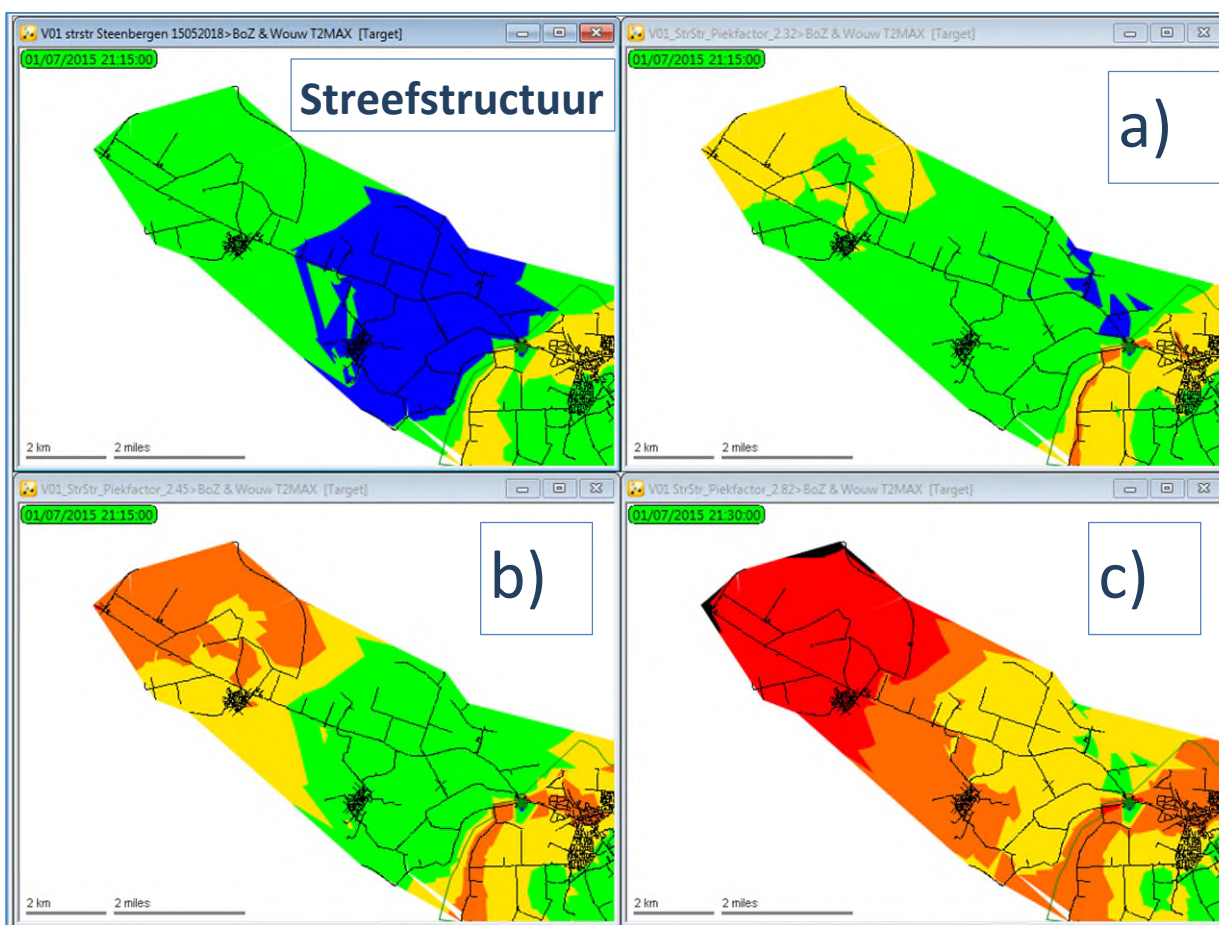


## 6. Resumé berekeningen

Situatie	Piekfactor	% v.h. netwerk met <b>onder presterende druk</b> op Nodes op max uur-max dag
Streefstructuur	1,97	0 %
a)	2,32	16 %
b)	2,45	49 %
c)	2,82	94 %



Weergave Drukhoogtekaart max uur-max dag:



## 7. Processtappen ontwerp streefstructuur

### 7.1 Algemeen

Streefstructuren worden in zijn algemeenheid volgens de volgende stappen ontworpen. Afhankelijk van het verbruiksgebied en uitstaande plannen omtrent de grote watervoorziening of grote uitbreiding van een watervraag (A-accounts) kunnen aanvullende stappen toegevoegd worden om meerder varianten in beeld te krijgen.

### 7.2 Voorbereiding en Inventarisatie

#### 7.2.1 Stuurinformatie

- Ontwerprichtlijnen Hydraulisch
  - Leveringsdruk
  - Stroomsnelheid
  - Delta P
  - Leveringszekerheid Primair eis
  - Leveringscontinuïteit Secundair eis
  - Aantal pendels
  - Uitbreiding in watervraag (punt watervraag / structurele groei / uitbreiding / ...)
- Ontwerprichtlijnen netvorm
  - Aantal wijkingen secundaire net
  - Sectiegrootte
  - Asset criteria m.b.t. leidingkwaliteit (prioriteit = AC-sanering)
  - Geprojecteerde nieuwbouwlocaties
- GIS data
  - Hoogbouw
  - Gemiddeld jaarverbruik
  - Sprinkler locaties
  - Gebruik panden
  - Begrenzers
  - Bluscapaciteiten (speciaal)

#### 7.2.2 Rekenhulpmiddelen

- InfoWorks
  - Beschikbaarheid actueel rekenmodel (netwerk / verbruik / pompsturing)
- DiVerDi
- PI-meetsysteem
  - Druk- en debietmetingen waterproductiebedrijven, drukmetingen in leidingnet en druk- en debietmetingen bij accounts
- ESRI-ArcGIS

### 7.3 Ontwerp

#### 7.3.1 Bepaling onderzoeksgebied

- Per verbruiksgebied (voorkeur) of per deelgebied

#### 7.3.2 Bepaling Concept netvorm en diameters

- Bepaling van tracés die in aanmerking komen voor primaire en secundaire functionaliteit a.h.v. stuurinformatie
  - Bepaling meest logische concept diameters voor de primaire en secundaire leidingen
  - Tertiaire net functionaliteit (= eindige leidingen) realiseren d.m.v. "pipe closed" optie
- ⇒ **Concept netvorm StrStr in InfoWorks**

### 7.3.3 Ontwerpberekeningen Concept netvorm StrStr

- Maximum dag berekeningen
    - o Huidige watervraag
    - o Huidige + toekomstige watervraag (= uitbreiding & groei / 1 variant)
  - Toetsing aan ontwerp parameters
    - o Druk op Nodes:  $\geq 300$  kPa
    - o Drukval:  $> 4$ mwk/km
    - o Stroomsnelheid:  $< 0,2$  m/sec en  $\varnothing > 110$ mm
    - o Stroombeeld (visueel)
  - Ontwerp variabele voor alle navolgende berekeningen d.m.v. "Trial and error"
    - o Vergroten of verkleinen diameters
    - o Introduceren Leiding koppelingen
    - o Introduceren nieuwe leiding tracés
- ⇒ **Definitief ontwerp\_01 StrStr in InfoWorks**

### 7.3.4 Leveringszekerheid controle berekening DO\_01

- Primaire net
- ⇒ **Definitief ontwerp\_02 StrStr in InfoWorks**

### 7.3.5 Leveringscontinuïteit controle berekening DO\_02

- Secundaire net
- ⇒ **Definitief ontwerp\_03 StrStr in InfoWorks**

### 7.3.6 Begrenzer capaciteit controle berekeningen DO\_03

- Indien aanwezig lokale toets op  $Q_{vereist}$  en lokaal optredende  $P_{minimaal}$
- ⇒ **Definitief ontwerp\_04 StrStr in InfoWorks**

### 7.3.7 Sprinkler & Brandkraan controle berekeningen DO\_04

- Indien aanwezig lokale toets op  $Q_{vereist}$  en lokaal optredende  $P_{minimaal}$
- ⇒ **Definitief ontwerp (DO) StrStr in InfoWorks**

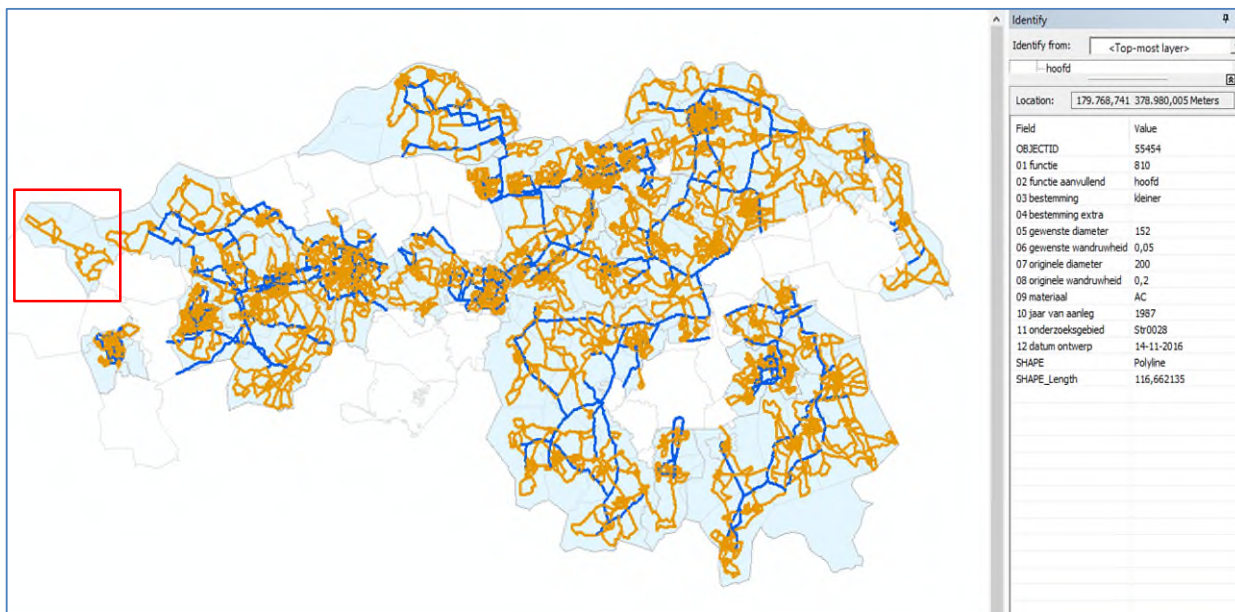
### 7.3.8 Afronding en Kwaliteitsborging

- Rapportage van de gemaakte keuzen tijdens het ontwerpen

### 7.3.9 Oplevering

- Omzetten InfoWorks DO-netwerkmodel van de streefstructuur naar GIS Shape.
- Toevoegen GIS Shapefiles "Streefstructuur" (lines) + "Ontwerpgebied" (polygon) aan centrale Brabant Water gdb.
- Product Streefstructuur gereed en bedrijfsbreed beschikbaar via GIS platform, inclusief leidinginformatie per leidingdeel, zie figuur Eindproduct.

**Eindproduct: Streefstructuur in ArcGIS:**





## 8. Conclusie

### 8.1 Drukeis en onder prestaties op nodes

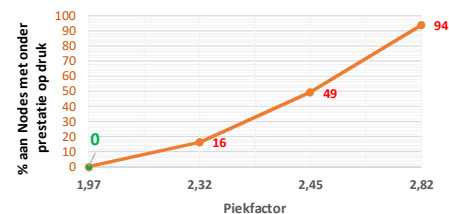
De huidige V01\_streefstructuur is ontworpen voor **1 variant**, d.w.z.

- 1 watervraag (= uitbreiding + groei).
- bestaande productie middelen, hier een aanjager (2 pompen) met huidige pomp karakteristieken en regelingen.
- maximum uur maximum dag.

Bij deze streefstructuur wordt naast nog een aantal ander criteria voldaan aan de gewenste druk op Nodes n.l.;  $P_{\text{minimaal}} = 30 \text{ mwk}$  ( 300 kPa)

Wijziging in watervraag op basis van de drie verschillende hogere piekfactoren leidt direct tot een sterk toenemende onder prestatie op druk op Nodes. 16% → 49% → 94 %

De invloed is dus groot.



### 8.2 Variant mogelijkheden.

Om te voldoen aan de gewenste druk op Nodes:  $P_{\text{minimaal}} = 30 \text{ mwk}$  ( 300 kPa) moeten er dus 3 nieuwe streefstructuur varianten worden ontworpen.

Oplossingen om aan de drukeis te voldoen kan men aan distributie- of aan productie zijde aanbrengen of een combinatie daarvan.

De beschikbare ontwerp variabele om weer tot de vereiste druk op Nodes te komen voor de 3 nieuwe watervraag varianten zijn;

Distributienet aanpassing

1. Vergroten van diameters streefstructuur\_V01
2. Wijziging van bestaande secundaire netvorm V01
3. Introduceren van nieuwe leidingtracés

Productie aanpassing

4. Wijziging inzet (= regeling) bestaande productiemiddelen (aanjager)
5. Wijziging hardware productie middelen (= nieuwe, andere pomp)

De 3 watervraag varianten in combinatie met de bovengenoemde 5 mogelijke ontwerp variabelen moeten d.m.v. "Trial and error" daaropvolgend berekend worden.

Duidelijk is dat er nu een groot aantal varianten mogelijk zijn. Bijvoorbeeld 'een combinatie van' distributie- en productie aanpassing 1+4, 1+2+4 of 'alleen' een productie aanpassing 4

### 8.3 Werk inspanning

In de meeste gevallen dat niet aan een drukeis op nodes wordt voldaan wordt de oplossing gezocht in de het vergroten van bestaande diameters en/of wijziging van bestaande secundaire netvorm.

Dit betekent dat vanaf ontwerpstep 7.2.3. of 7.3.3. een nieuwe variant berekening opgepakt moet worden. Afhankelijk van de gecompliceerdheid van het onderzoeksgebied (verschillende voedende pompstations) kan het aantal varianten berekeningen flink oplopen.

Echter in ons pilot voorbeeld kan men er voor kiezen om de oplossing direct te zoeken aan de productiezijde. In ons geval is dat een aanjager met twee pompen en de regeling hiervan aan te passen voor het maximum uur op maximum dag, mits de pomp(en) het hogere debiet aankunnen. Zo niet dan zal of zullen er pompen met een hoger maximum debiet geplaatst moeten worden.

Betreft het een waterproductiebedrijf dan is die keuze niet zo eenvoudig. Dan gaat het over groter installaties, grotere afzetgebieden met grotere impact op druk debiet en energieverbruik.