



BTO 2017.081 | December 2017

## **BTO** rapport

Optimaal ontwerp en  
transitie van  
streefstructuren



# BTO

## Optimaal ontwerp en transitie van streefstructuren

BTO 2017.081 | December 2017

### Opdrachtnummer

400554/159

### Projectmanager

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

### Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Assetmanagement

### Kwaliteitsborger(s)

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

### Auteur(s)

I. (Ina) Vertommen MSc, dr. ir. C. M. (Claudia) Agudelo-Vera, dr. ir. K. A. (Karel) van Laarhoven en dr. P. (Peter) van Thienen

### Verzonden aan

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

Jaar van publicatie  
2017

#### Meer informatie

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

#### Keywords

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

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



BTO 2017.081 | December 2017 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

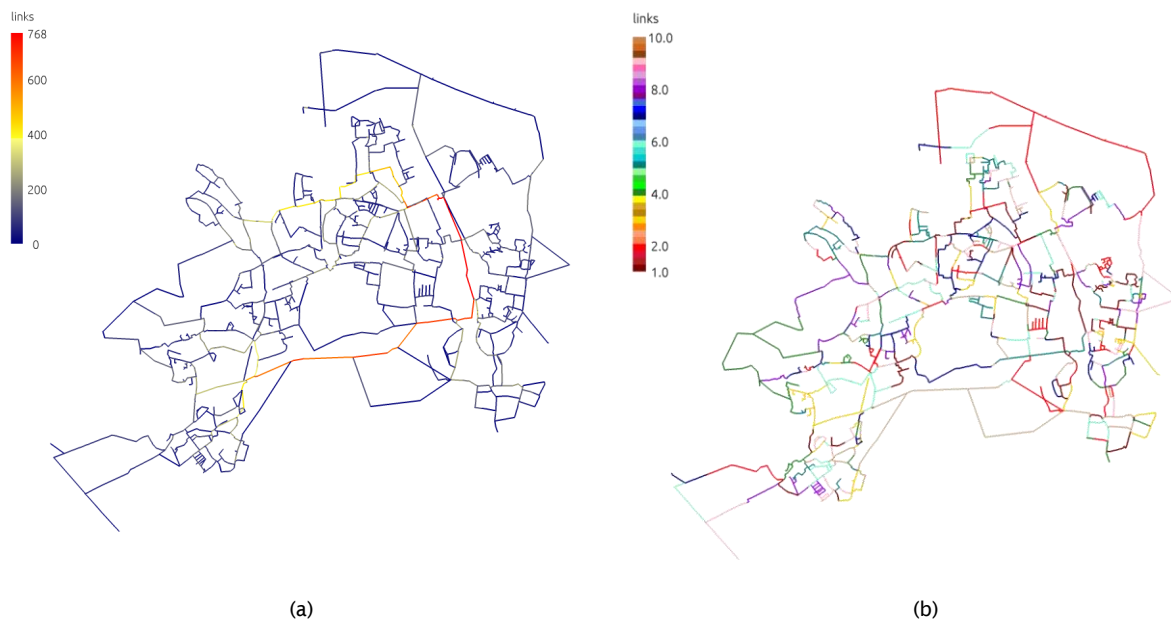
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# BTO Managementsamenvatting

## Gondwana maakt transitie van huidig naar optimaal leidingnet mogelijk

**Auteur(s)** Ina Vertommen MSc, dr. ir. Claudia Agudelo-Vera, dr. ir. Karel van Laarhoven en dr. Peter van Thienen

Door met het optimalisatieplatform Gondwana een streefstructuur voor het leidingnet te ontwerpen en vervolgens te bepalen wanneer welke leiding het beste kan worden gesaneerd, kan het netwerk van Helmond-Mierlo met 68% in volume worden gereduceerd. Bij een volledig nieuwe aanleg betekent dit in grote lijnen een kostendaling van 41.1 M€ naar 26.4 M€. Dit blijkt uit een casestudy voor dit leidingnet van Brabant Water. Wat betreft de transitie is inzicht gekregen in de trade-off tussen het aantal locaties in het net waar saneringswerkzaamheden moeten worden verricht en tot welke reductie dit leidt in het aantal storingen en verbetering van de hydraulische prestatie van het leidingnet. Inzet van Gondwana, zoals in dit onderzoek is gebeurd, ondersteunt leidingnetmodelleurs en assetmanagers in het maken van onderbouwde keuzes en het afwegen van verschillende doelen, scenario's en randvoorwaarden in optimalisatie van het ontwerp van streefstructuren en de transitie hiervan, gerekend vanuit een bestaande structuur van het leidingnetwerk..



Resultaten van het optimalisatieproces voor (a) het ontwerp van en (b) de transitie naar de streefstructuur voor het leidingnet van Helmond-Mierlo (Brabant Water), aangegeven in verschillende kleuren: (a) leidingdiameters (mm) van de geoptimaliseerde streefstructuur en (b) saneringsvolgorde van de leidingen voor zo min mogelijk overtredingen van de druknorm tijdens de transitie

### Belang: optimalisering streefstructuren en transitie

Een aanzienlijk deel van het leidingnet is naar verwachting de komende decennia aan vervanging toe. Daarom zijn verschillende drinkwaterbedrijven bezig met het ontwerpen van streefstructuren en de geleidelijke vervanging en verbetering van het net. Vanwege de omvang en veeleisendheid van

leidingnetten zijn dit complexe en tijdrovende processen.

In de huidige praktijk wordt gewerkt naar een streefstructuur die aan alle eisen voldoet, zonder vastlegging van 'optimale doelen'. Numerieke optimalisatietechnieken, zoals geïmplementeerd in Gondwana, bieden hierin een helpende hand.

Doorrekening en vergelijking van een groot aantal mogelijkheden leiden tot een beter ontwerp dan een handmatige benadering. Zo kunnen drinkwaterbedrijven in plaats van voor één ontwerp te kiezen, uitkomen op het optimale ontwerp dat aan alle eisen voldoet en bijvoorbeeld ook nog het goedkoopste is. In nog sterkere mate geldt dit voor het bepalen van de beste transitie, die handmatig moeilijk is vorm te geven. Wanneer moeten bijvoorbeeld welke leidingen worden gesaneerd zodat de storingsfrequentie zo snel mogelijk afneemt? Gondwana is bedoeld om dergelijke processen te optimaliseren.

#### Aanpak: vertaling van praktische vragen naar optimalisatieproblemen

Het ontwerp van en de transitie naar een streefstructuur is vertaald naar een optimalisatieprobleem met formele doelfuncties, randvoorwaarden en beslisvariabelen. Eerst zijn een literatuuronderzoek en een verkenning van de huidige praktijksituatie uitgevoerd omtrent leidingnetontwerp en vervangingsstrategieën. Daarna zijn het ontwerp van en de transitie naar streefstructuren in de vorm van optimalisatieproblemen beschreven. Door uitbreiding van het bestaande optimalisatieplatform met de nodige functionaliteit werd doorrekening van dergelijke problemen mogelijk gemaakt. Vervolgens is de benadering toegepast op een casestudy: het leidingnetwerk van Helmond-Mierlo (Brabant Water).

#### Resultaten: significante afslanking leidingnetwerk en opstellen saneringsplan

Door de formulering van optimalisatieproblemen zijn twee belangrijke resultaten behaald. Er is een flinke stap gezet in de definitie van betere en duidelijkere handvatten voor invoer, randvoorwaarden, doelen en beslisvariabelen voor optimalisatieproblemen. Daarnaast is Gondwana uitgebreid zodat per afsluitersectie het optimale

saneringsmoment kan worden bepaald op basis van storings- en hydraulische prestatie, wat leidt tot optimalisatie van de transitie naar streefstructuren. Op grond van de casestudy blijkt het leidingnetvolume significant te kunnen worden verkleint, terwijl het beter gaat voldoen aan de hydraulische randvoorwaarden. Het volume van de geoptimaliseerde streefstructuur is slechts 68% van het huidige leidingnetwerk. Bij een volledige nieuwe aanleg van het netwerk betekent dit in grote lijnen een kostendaling van 41.1 M€ naar 26.4 M€ voor het nieuwe ontwerp. Tegelijkertijd behaalt het nieuwe net op aanzienlijk meer locaties de gewenste waterdruk. Voor de transitie van de huidige structuur naar de streefstructuur zijn Pareto-curves berekend. Deze geven inzicht in de relatie tussen het aantal locaties met jaarlijkse saneringswerkzaamheden en de storingsreductie of hogere hydraulische prestaties die deze opleveren. Drinkwaterbedrijven kunnen zo zelf de oplossing kiezen die het beste aansluit op hun behoeftes.

#### Implementatie: optimalisatieprobleem op maat

In dit onderzoek is gekeken hoe het platform Gondwana kan worden ingezet voor de optimalisatie van zowel het ontwerp van streefstructuren en de transitie hiervan, gerekend vanuit een bestaande structuur. Dit ondersteunt leidingnetmodelleers en assetmanagers in het maken van onderbouwde keuzes en het afwegen van verschillende doelen, scenario's en randvoorwaarden. Behalve deze benadering zijn meerdere opties denkbaar. Voor toepassingen in de praktijk moeten bedrijfsspecifieke doelen en randvoorwaarden in aanmerking worden genomen en optimalisatieproblemen op maat worden geformuleerd.

#### Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Optimaal ontwerp en transitie streefstructuren* (BTO-2017.081).

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>2</b>
1.1	Achtergrond en aanleiding	2
1.2	Doelstelling	5
1.3	Aanpak en leeswijzer	5
1.4	Begeleidingsgroep	6
<b>2</b>	<b>Verkenning optimaal ontwerp</b>	<b>7</b>
2.1	Literatuuronderzoek: optimaal ontwerp van drinkwaterdistributienetwerken	7
2.2	Stand van de praktijk: ontwerp van streefstructuren en vervangingsstrategieën	9
<b>3</b>	<b>Optimaal ontwerp en transitie streefstructuren</b>	<b>16</b>
3.1	Handmatige vs geautomatiseerde benadering	16
3.2	Vertaling naar een optimalisatieprobleem	17
3.3	Onzekerheden	22
3.4	Houdbaarheid van het ontwerp en databeschikbaarheid voor herziening	25
3.5	Keuzemenu voor het ontwerp van en de transitie naar streefstructuren	27
<b>4</b>	<b>Benadering voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren</b>	<b>30</b>
4.1	Inleiding	30
4.2	Stapsgewijze Benadering	30
<b>5</b>	<b>Uitbreiding Gondwana</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>Casestudy</b>	<b>34</b>
6.1	Proefmodel	34
6.2	Invoergegevens	35
6.3	Uitvoering	37
6.4	Resultaten	40
6.5	Discussie	49
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>50</b>
7.1	Conclusies	50
7.2	Aanbevelingen	51
	<b>Referentielijst</b>	<b>53</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond en aanleiding

Het ontwerpen van streefstructuren is een redelijk recent onderwerp in de watersector. In 2011 is onderzoek gedaan naar hoe het secundair net beter kan worden ontworpen (Vogelaar en Blokker, 2011). In dit onderzoek is voor het eerst het begrip “streefstructuur” geïntroduceerd: het ontwerp van de hoofdstructuur van een netwerk voor de middellange termijn dat als richtsnoer dient bij renovaties en saneringen. Hiervoor is aan de hand van kennis en ervaring van de drinkwaterbedrijven een stappenplan uitgewerkt. Dit stappenplan biedt structuur, borging en inzicht in de randvoorwaarden en keuzes die de ontwerper moet maken bij het ontwerpen van het secundair net. Daarnaast zijn alle aspecten die met het ontwerp van het secundair leidingnet samenhangen in relatie tot elkaar gebracht in een ontwerpcirkel. In het onderzoek is verder aanbevolen om het stappenplan te toetsen in de praktijk en aan de hand van de ervaringen van bedrijven het ontwerpproces verder aan te scherpen. Tussen 2011 en 2016 hebben meerdere drinkwaterbedrijven ervaring opgedaan met het ontwerp van streefstructuren. Brabant Water, PWN en WML hebben streefstructuren ontworpen voor 56 (deel)gebieden. Naar verwachting zet dit tempo zich voort in de komende jaren. Uit een inventarisatie bij deze bedrijven blijkt dat er verschillende methodieken en uitgangspunten gehanteerd worden en dat er nog veel wordt gevaren op de expertise en ervaring van medewerkers (Agudelo-Vera en Blokker, 2016). Alhoewel bedrijven begonnen zijn met het documenteren van een formele werkprocedure, wordt deze impliciete kennis nog niet altijd vastgelegd. Het is daarom niet altijd te achterhalen waarom bepaalde keuzes zijn gemaakt.

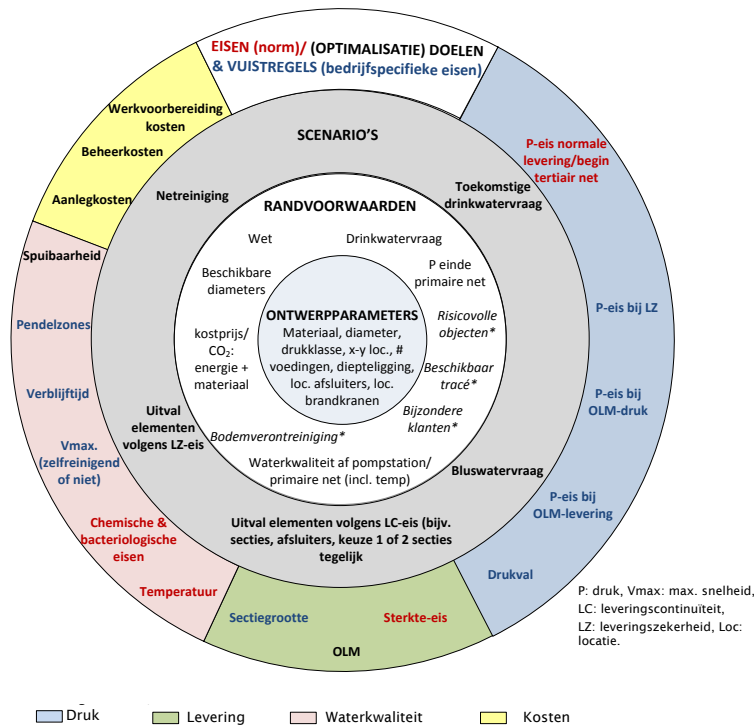
---

### Streefstructuur:

Een streefstructuur betreft het ontwerpen van een voldoende groot gebied (zodanig dat geen suboptimale lokale oplossingen ontstaan) dat gewenst is in de toekomst en dat voldoet aan gegeven randvoorwaarden. De streefstructuur biedt een integrale en toekomstbestendige aanpak om proactief in te spelen op renovatie van leidingen en appendages (Agudelo-Vera en Blokker, 2016).

---

Aan de hand van de aanbevelingen uit het BTO-rapport van 2011, de ontwikkelingen en ervaringen uit de praktijk, en de implementatie van numerieke optimalisatietechnieken door KWR, is in 2016 het onderwerp “streefstructuren” breed en gedetailleerd aangepakt. De resultaten van dit onderzoek zijn beschreven in het BTO-rapport “Ontwerp secundaire net aangescherpt, evaluatie na vijf jaar praktijkervaring” (Agudelo-Vera en Blokker, 2016). Het begrip “streefstructuur” is breder ingezet, zodanig dat indien gewenst naast het secundair net ook het primair net in aanmerking kan worden genomen. Daarnaast zijn definities gehanteerd voor eisen, doelen en vuistregels bij het inrichten van streefstructuren en is de ontwerpcirkel verder uitgewerkt om beter aan te sluiten bij een geautomatiseerd ontwerpproces (zie Figuur 1).



FIGUUR 1. ONTWERPCIRKEL 2016: DE ONTWERPPARAMETERS (BINNENSTE CIRKEL) WORDEN BEPAALD DOOR ZOWEL DE RANDVOORWAARDEN (EERSTE RING) DIE MEN OPLEGT ALS DE SCENARIO'S (TWEDE RING) DIE MEN KIEST EN DE EISEN, DOELEN OF VUISTREGELS (BUITENSTE RING) VOOR HET ONTWERP. DE BUITENSTE RING BEVAT VIER ONTWERPCRITERIA, ELK MET VERSCHILLENDE EISEN/DOELEN EN/OF VUISTREGELS (AGUDELO-VERA EN BLOKKER, 2016).

Op basis van de ervaring van de drinkwaterbedrijven zijn “best practices”, sterktes, zwaktes, kansen en bedreigingen bij het ontwerp van streefstructuren geïdentificeerd. Hieruit is gebleken dat automatisering en implementatie van een PDCA-cyclus (Plan-Do-Check-Act) kansen bieden voor kwaliteitsverbetering. Daarvoor zijn o.a. checklists opgesteld voor intern gebruik bij de bedrijven, die zowel kunnen worden ingezet op proces- als op projectniveau. Zo worden eisen, doelen, vuistregels en randvoorwaarden expliciet vastgelegd, waardoor het procesontwerp objectief en herhaalbaar wordt.

In de tussentijd is KWR gestart met de ontwikkeling van het optimalisatieplatform Gondwana (van Thienen en Vertommen, 2015). Gondwana is een softwaretool die in staat is om op gestructureerde wijze wijzigingen aan te brengen in het ontwerp of de operatie van een model van een drinkwaterdistributienetwerk, de prestatie van het gewijzigde ontwerp te bepalen op één of meerdere door de gebruiker gekozen doelstellingen, en aan de hand hiervan nieuwe wijzigingen aan te brengen, zodanig dat in een iteratief proces naar een optimaal presterend ontwerp dan wel operatie wordt toegewerkt. Vanwege het aantal mogelijkheden is het simpelweg onmogelijk om alle mogelijke combinaties door te rekenen (bijvoorbeeld: 10 verschillende mogelijke diameters voor 100 leidingsegmenten vergt het doorrekenen van  $10^{100}$  netwerkontwerpen). Door de complexiteit van netwerken en het grote aantal randvoorwaarden is het voor de geïnformeerde en ervaren professional ook niet meer mogelijk om te voorzien wat het beste ontwerp zal zijn. Daarom bieden numerieke optimalisatietechnieken zoals geïmplementeerd in Gondwana de helpende hand.



Gondwana maakt gebruik van EPANET (Rossman, 2000) voor de hydraulische berekeningen, en de Inspyred-bibliotheek (Garrett, 2012) die metaheuristische optimalisatietechnieken aanbiedt. De prestatie van Gondwana is op kleinschalige benchmark problemen al aangetoond (van Thienen en Vertommen, 2015). Gondwana vormt dus een geschikte tool om het ontwerp van streefstructuren te automatiseren en verbeteren. In de afgelopen twee jaar is Gondwana in de praktijk ingezet voor het optimale ontwerp van streefstructuren van primair en secundair net bij PWN, Oasen (Vertommen en van Thienen, 2017) en WML.

Automatisering is ook de randvoorwaarde voor het optimaliseren van streefstructuren. In het huidige proces wordt één ontwerp dat voldoet aan de vastgestelde eisen gebruikt als het eindresultaat. Door het ontwerpproces te automatiseren kunnen meerdere ontwerpen worden gemaakt. Door daarnaast 'optimalisatie-doelstellingen' vast te leggen, kan een optimaal ontwerp (het beste uit meerdere ontwerpen) worden bepaald. Door de complexiteit van distributienetwerken en het grote aantal randvoorwaarden is dit een arbeidsintensief proces. Numerieke optimalisatietechnieken zoals geïmplementeerd in Gondwana bieden hierin de helpende hand. Zo bleek bv. in het BTO-rapport van 2016 (Agudelo-Vera en Blokker, 2016) dat afsluiters niet expliciet worden meegenomen in het handmatig ontwerpproces, terwijl afsluiters heel bepalend zijn voor de prestatie van het secundair net (leveringscontinuïteit). Een eis aan leveringscontinuïteit is in Gondwana eenvoudig mee te nemen in de optimalisatie.

Het onderzoek beschreven in dit rapport draagt bij aan de doorontwikkeling op het gebied van streefstructuren door algemene eisen, doelen en vuistregels te vertalen naar optimalisatie-doelen en -randvoorwaarden, zodanig dat zowel het ontwerp van streefstructuren als de transitie daar naartoe beschreven worden door optimalisatieproblemen dat vervolgens door middel van numerieke optimalisatietechnieken, zoals geïmplementeerd in Gondwana, kunnen worden berekend. Omdat niet het hele leidingnet in een keer kan worden vervangen is het noodzakelijk om de transitie van de huidige naar de streefstructuur te beschouwen en te voorkomen dat tijdens de transitie slechte prestaties geleverd worden of grote risico's worden geïntroduceerd. Met behulp van optimalisatie is het mogelijk om een stap verder te gaan door de prestatie zo snel mogelijk te verbeteren door de "slechtste" leidingen eerst te vervangen, door bv. rekening te houden met de storingsfrequentie of de hydraulische prestatie.

Figuur 2 biedt een overzicht van het verrichte onderzoek en ontwikkelingen op het gebied van streefstructuren.



FIGUUR 2. OVERZICHT VAN DE ONTWIKKELINGEN OP HET GEBIED VAN STREEFSTRUCTUREN IN NEDERLAND.

## 1.2 Doelstelling

Dit project doelt op het beantwoorden van twee vragen:

(1) hoe kan het ontwerp van streefstructuren worden vertaald naar een optimalisatieprobleem zodanig dat het door middel van numerieke optimalisatietechnieken opgelost kan worden?

(2) hoe kan de transitie van de huidige structuur naar de streefstructuur optimaal worden ingericht?

## 1.3 Aanpak en leeswijzer

Om de voorgenoemde vragen te beantwoorden is zowel een wetenschappelijke literatuuronderzoek uitgevoerd als een verkenning van de huidige stand van praktijk omtrent het ontwerp van leidingnetwerken en vervangingstrategieën. Hiervoor is gesproken met leidingnetmodelleers en assetmanagers van drinkwaterbedrijven. Deze verkenning is

beschreven in hoofdstuk 2. Daarna is gekeken hoe dit soort problemen geautomatiseerd en beschreven kunnen worden in de vorm van optimalisatieproblemen. Hieraan hebben ook de mensen uit de begeleidingsgroep (zie onderaan) bijgedragen door een Gondwana-keuzemenu in te vullen. Deze vertaalslag is behandeld in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 is een benadering voor het ontwerp van een transitie naar streefstructuren voorgesteld en in detail uitgewerkt. Om de voorgestelde optimalisatieproblemen voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren op te lossen door middel van numerieke optimalisatietechnieken, is Gondwana uitgebreid met de nodige functionaliteit. Het hier bijhorende functioneel ontwerp is beschreven in hoofdstuk 5. De benadering is toegepast op een casestudy, het leidingnetwerk van Helmond-Mierlo. De resultaten zijn samen met Brabant Water geïnterpreteerd. De casestudy en de verkregen resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 6. Tot slot biedt hoofdstuk 7 conclusies en aanbevelingen.

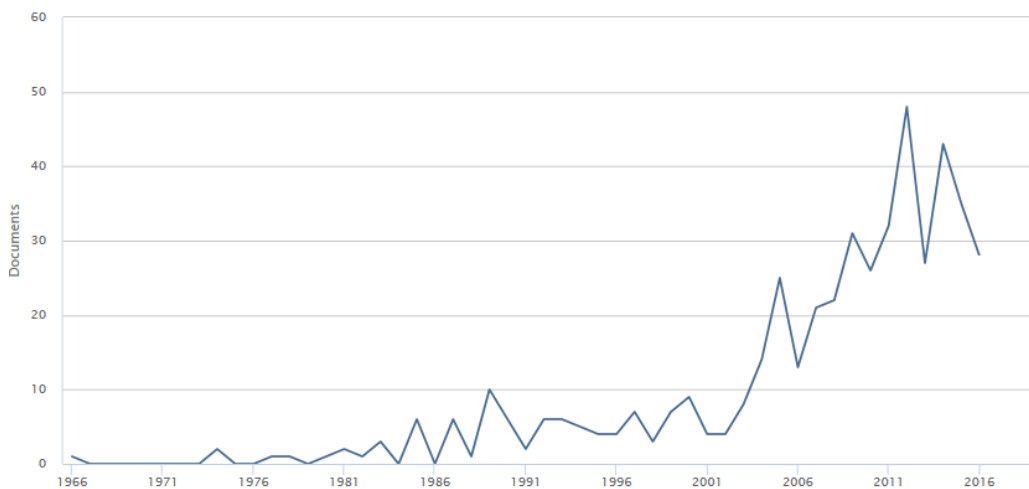
#### **1.4 Begeleidingsgroep**

Dit BTO-onderzoek is begeleid door Tjakko Haaijer (Brabant Water), Roel Diemel (Brabant Water), Martin Klein Arfman (PWN), Ralf de Groot (Waternet), Nico van der Moot (WMD), Wout Kompagnie (Waterbedrijf Groningen) en Pieter Piens (De Watergroep).

## 2 Verkenning optimaal ontwerp

### 2.1 Literatuuronderzoek: optimaal ontwerp van drinkwaterdistributienetwerken

Het optimaal ontwerp van drinkwaterdistributienetwerken (DWDN) is een welbekend probleem in de academische literatuur. De eerste publicatie over het onderwerp is verschenen in 1966 (Orth, 1966). Sindsdien zijn er diverse artikelen gepubliceerd, en vooral in de afgelopen 15 jaar is het onderwerp een “hot-topic” geworden in de academische wereld (zie Figuur 3).



FIGUUR 3. EVOLUTE VAN HET AANTAL PEER-REVIEWED PUBLICATIES OVER HET OPTIMAAL ONTWERP VAN WATERDISTRIBUTIENETWERKEN IN DE AFGELOPEN JAREN (SCOPUS, 2017). ZOEKTERMEN: OPTIMAL DESIGN OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS.

Gedurende de eerste jaren is het voornaamste doel van de optimalisatieproblemen het voldoen aan de watervraag met minimum druk tegen minimale kosten geweest. De klassieke formulering van het probleem is:

- doelfunctie: minimalisatie van kosten (als een functie van de leidingdiameters en -lengtes);
- randvoorwaarden: voldoen aan de watervraag en aan de minimale drukeisen op alle knooppunten van het primair netwerkmodel;
- beslisvariabelen: leidingdiameters (uit een lijst van beschikbare diameters).

De invoerparameters, zoals de watervraag, worden in deze klassieke benadering beschouwd als zijnde bekend en deterministisch. Dankzij de toename van reken capaciteit, is dit in de laatste decennium veranderd en wordt er nu vaak gerekend met onzekere watervraag. Dit houdt in dat er een mate van betrouwbaarheid wordt berekend bij de randvoorwaarden, en dat het optimalisatiemodel aangepast wordt naar: minimale kosten die een bepaald niveau van betrouwbaarheid op de randvoorwaarden biedt. Hiervoor zijn verschillende benaderingen ontwikkeld (Lansley, et al., 1989, Xu en Goulter, 1999, Kapelan, et al., 2004, Tolson, et al., 2004). Deze benaderingen verschillen in de formulering van het

optimalisatieprobleem (met name in de definitie van de randvoorwaarden) en in het soort optimalisatiealgoritme dat wordt toegepast om het optimalisatieprobleem door te rekenen.

De volgende ontwikkeling was om de afweging tussen de betrouwbaarheid van het netwerk en de kosten daarvan inzichtelijk te maken. Dit is mogelijk door twee doelstellingen in aanmerking te nemen in plaats van één (Kapelan, et al., 2005). Het resultaat van het optimalisatieproces is dan niet een getal maar een zogenaamde Pareto-curve: de optimale curve tussen de twee doelstellingen. Verschillende combinaties van doelstellingen kunnen in aanmerking genomen worden, zoals bv.: het minimaliseren van kosten en maximaliseren van de betrouwbaarheid (Babayan, et al., 2004, Tricarico, et al., 2006, Giustolisi, et al., 2009); minimaliseren van kosten en faalkans (Babayan, et al., 2005); minimaliseren van kosten en maximaliseren van het drukoverschot (Farmani, et al., 2005).

Een andere benadering betreft het expliciet maken van de robuustheid van het netwerk door verschillende specifieke scenario's (bv. uitval van een leiding, behoefte aan bluswater op een knoop) in aanmerking te nemen (Cunha en Sousa, 2010). In een dergelijke benadering wordt ook onderscheid gemaakt tussen "harde" en "zachte" randvoorwaarden (Mulvey, et al., 1995, Samsatli, et al., 1998). Harde randvoorwaarden staan onder geen enkele omstandigheid een schending toe (bv. minimale druk altijd boven 20 mwk), terwijl zachte randvoorwaarden een zekere mate van overtreding tolereren (bv. streven dat de druk boven de 25 mwk ligt). Het niveau waarbij wordt voldaan aan de zachte randvoorwaarden is in dit geval een mate van robuustheid.

De voorgenoemde ontwikkelingen richtten zich vooral op de inhoud van het optimalisatieprobleem. Daarnaast zijn er belangrijke stappen gezet op het gebied van numerieke optimalisatietechnieken. Algoritmen zoals *harmony search*, *simulated annealing* (Sousa en Cunha, 1998), *tabu search* (da Conceição Cunha en Ribeiro, 2004), *ant-colony* (Gil, et al., 2011), *genetic algorithms* (Savic en Walters, 1997, Babayan, et al., 2004, Tolson, et al., 2004, Babayan, et al., 2005), naast vele anderen, zijn reeds succesvol toegepast op het optimale ontwerp van distributienetwerken. Deze technieken verschillen voornamelijk in hoe de oplossingsruimte wordt doorzocht. Voor een overzicht van enkele van deze technieken wordt de lezer verwezen naar De Corte en Sörensen (2013).

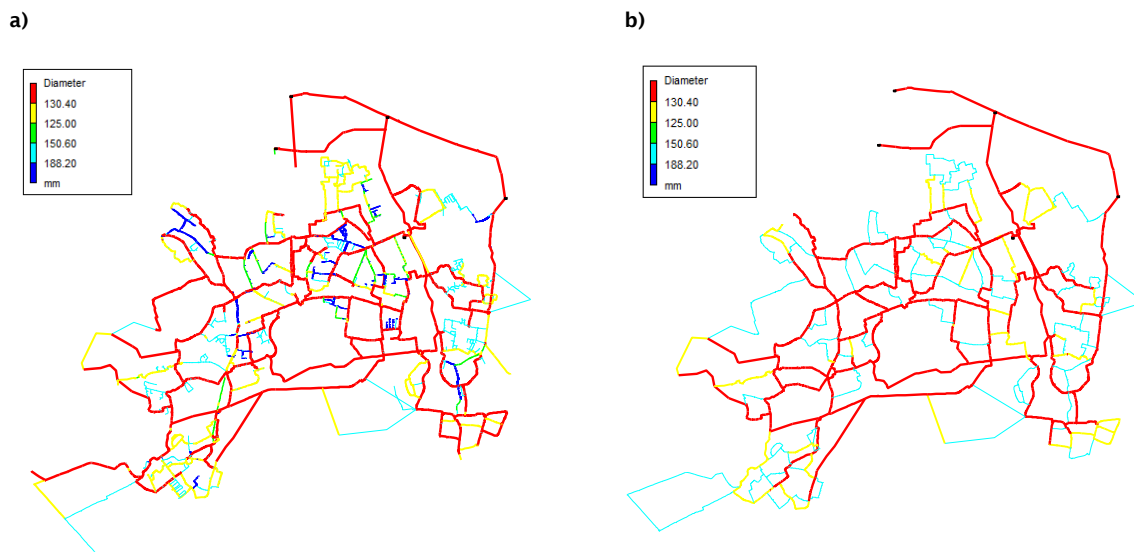
Ondanks de talloze ontwikkelingen omtrent het optimale ontwerp van waterdistributienetwerken in de academische wereld, is deze kennis nog nauwelijks toegepast in de praktijk. De oorzaak daarvan moet deels worden gezocht in het gebrek aan *tools* om de algoritmen toe te passen buiten de academische wereld. Dit lijkt te suggereren dat er met name een brug tussen het uitgevoerde onderzoek en de toepasbaarheid in de praktijk ontbreekt. Met deze specifieke doelstellingen voor ogen is het optimalisatieplatform Gondwana ontwikkeld (van Thienen en Vertommen, 2015). Gondwana maakt gebruik van numerieke optimalisatietechnieken (een genetisch algoritme) en is op een flexibele (i.v.m. uitgebreide toepassingen en vrijheid in instellingen) en gebruiksvriendelijke manier ingesteld. In dit laatste aspect zit met name ook het voor niet-experts bruikbaar en toegankelijk maken van de optimalisatietechnieken. Een andere verklaring voor het nauwelijks toepassen van optimalisatieproblemen in de praktijk kan te maken hebben met een gebrek aan (1) goede (accurate) modellen, (2) inzicht in randvoorwaarden en doelen, (3) definitie van scenario's en (4) gevoelde noodzaak (huidige ontwerpen worden als goed genoeg beschouwd). Met betrekking tot dit laatste punt is het juist interessant om Gondwana toe te passen en te evalueren wat de toegevoegde waarde is.

## 2.2 Stand van de praktijk: ontwerp van streefstructuren en vervangingsstrategieën

### 2.2.1 Inleiding

Vanwege de grote investeringen en lange levensduur zijn DWDN behoorlijke inerte infrastructuren. In Nederland worden er anno 2017 relatief weinig complete nieuwe leidingnetten aangelegd, maar worden de bestaande netwerken geleidelijk vervangen, uitgebreid en aangepast om aan veranderende omstandigheden te voldoen. Deze aanpassingen worden vaak *ad hoc* gedaan (een falende leiding wordt bv. vaak door een leiding met dezelfde diameter vervangen), zonder het functioneren van het netwerk in zijn geheel in aanmerking te nemen.

Om hier verbetering in te brengen zijn drinkwaterbedrijven in de afgelopen jaren aan de slag gegaan met het **ontwerp** van **streefstructuren**. Een streefstructuur betreft het ontwerpen van een voldoende groot gebied (zodanig dat geen suboptimale lokale oplossingen ontstaan) dat gewenst is in de toekomst en dat voldoet aan gegeven randvoorwaarden. De streefstructuur biedt een integrale 'blauwdruk' om proactief in te spelen op de renovatie van het leidingnet (Agudelo-Vera en Blokker, 2016). Daarnaast is een streefstructuur een hulpmiddel om tijdens onverwachte storingen sneller te bepalen door welke nieuwe leiding de storende leiding moet worden vervangen. Figuur 4 toont een voorbeeld van een bestaande leidingnet en een streefstructuur (ontworpen door het drinkwaterbedrijf) voor hetzelfde gebied, in dit geval Helmond-Mierlo.



FIGUUR 4. VOORBEELD VAN A) HUIDIGE LEIDINGNETWERK VAN HELMOND EN B) STREEFSTRUCTUUR VOOR HELMOND-MIERLO.

De vervanging van een leidingnet is een geleidelijk proces. De **transitie** van de huidige structuur naar de streefstructuur betreft hoe een drinkwaterbedrijf van Figuur 4a naar Figuur 4b kan gaan.

Zowel de stand van praktijk rondom het **ontwerp** van streefstructuren als de **transitie** (o.b.v. vervangingsstrategieën) van de huidige structuur naar de streefstructuur worden hieronder beschreven.

### 2.2.2 Ontwerp van streefstructuren

Drinkwaterbedrijven zijn sinds 2011 bezig met het ontwerpen van streefstructuren. De mate waarin bedrijven hiermee bezig zijn varieert. Tabel 1 geeft een overzicht van de stand van zaken omtrent het ontwerp van streefstructuren en vervangingspercentages bij drie drinkwaterbedrijven. Deze drie bedrijven, Brabant Water (BW), PWN en WML, hebben gezamenlijk meer dan 14.000 km aan streefstructuren ontworpen tussen 2011 en 2016 (Agudelo-Vera en Blokker, 2016). WML is een koploper en heeft middels automatisering het gehele leveringsgebied ontworpen. Deze automatisering houdt het gebruik van SQL (Structured Query Language) in InfoWorks in. Hiermee worden iteratieve aanpassingen aan het ontwerp gemaakt en wordt gecontroleerd of het net voldoet aan bepaalde hydraulische parameters. BW is 'grootschalig' aan het saneren en maakt voor de betreffende (deel)gebieden een streefstructuur. Op dit moment heeft BW streefstructuren ontworpen voor ongeveer 35-40% van het leveringsgebied. Het doel is om eind 2017 streefstructuren te hebben voor 50% van het gebied. PWN streeft ernaar om in 2020 een streefstructuurontwerp te hebben voor het gehele secundaire leidingnet.

TABEL 1. OVERZICHT VAN HET AANTAL ONTWERPEN STREEFSTRUCTUREN EN VERVANGINGSPERCENTAGES BIJ PWN, WML EN BRABANT WATER (AGUDELO-VERA EN BLOKKER, 2016).

<i>Item</i>	<i>PWN</i>	<i>WML</i>	<i>Brabant Water</i>
Netlengte (km)	10,000	8,700	18,100
Streefstructuur ontworpen	7 projecten (tot 2016)	100% (2011-2016)	Ca. 33% (tot 2016) Doel 50% eind 2017
Vervangingspercentage of lengte	0.9%	1.25% (1.5 km voor project ca. 75-80 projecten per jaar)	2-4 km per wijk, ca. 50 wijken per jaar 300km op 18100km per jaar vanaf 2018

Over het algemeen volgen de bedrijven de volgende stappen voor het ontwerp van een streefstructuur (niet per se in dezelfde volgorde):

1. Vaststellen van specifieke randvoorwaarden (bv. aantal voedingen).
2. Bepaling van de ontwerpstructuur (vorm & tracé).
3. Indeling in secties (deze stap wordt niet bij alle bedrijven gedaan).
4. Bepaling van de diameter van leidingen (o.b.v. randvoorwaarden zoals bv. minimale druk).
5. Toetsing op brandkraancapaciteit (niet bij alle bedrijven).
6. Toetsing op leveringszekerheid en analyse van leveringscontinuïteit.

De meest tijdrovende stap is het bepalen van de ontwerpstructuur. Bij Brabant Water wordt met GIS de netvorm bepaald aan de hand van verschillende factoren (o.a. stratenpatroon, huidige netvorm, prioritering uit het beslissingsondersteuningssysteem (BOS), diameters, watervraag, bluswatervraag, hoogbouw, speciale klanten). Dit is een handmatig en maatwerkproces. Door het aantal invoergegevens wordt deze stap snel onoverzichtelijk.

Bij het ontwerp van een streefstructuur hanteert elk bedrijf eigen specifieke randvoorwaarden, zie voorbeelden in Tabel 2. In verband met de handmatige aanpak wordt niet rechtstreeks op kosten geëvalueerd. In het algemeen worden diameters één of twee maten kleiner in de streefstructuur. Dit betekent dat de kosten lager zijn dan wanneer dezelfde diameters zouden worden teruggelegd. In het huidige ontwerp van

streefstructuren wordt weinig aandacht geschonken aan de plaatsing van afsluiters. Idealiter zou het effect van de afsluiterconfiguraties worden meegenomen in het ontwerpproces.

TABEL 2. VOORBEELDEN VAN RANDVOORWARDEN VOOR HET ONTWERP VAN STREEFSTRUCTUUR BIJ PWN, BW EN WML (AGUDELO-VERA EN BLOKKER, 2016)

Indicator	Invloed op	Randvoorwaarden		
		PWN	BW	WML
# voedingen (v)	Tracé (input data)	≤ 150 AL: 1 v 150 - 1000 AL: minstens 2 v > 1000 AL: minstens 3 v	≤ 300 wa: 2 v 500-1000 wa: 3 v 1000-1500 wa: 4 v >1500 wa ≥ 4 v	pompstation / drukvermeerder- ingsinstallatie
Minimale drukhoogte (kPa) - Max-dag	Levering, kosten: aanleg diameter en operationeel: energie	260	300	300
Max Drukgradiënt (mwk/km)	kosten: aanleg diameter en operationeel: energie	2	4 (sec-lussen)	6
Maximale sectielengte (km/sectie)	OLM (Faal scenario)	1.0	1 (distributieleidingen) 1.5 (transportleidingen)	2.0
Sectiegrootte (aansl. /sectie)		n.v.t.	binnen bebouwde kom: 80 en buiten bebouwde kom: 50***]	n.v.t.**
maximale afstand tussen twee secundaire leidingen	Tracé	600 m bij 150-200 aansluitingen	n.v.t	360
Maximale snelheid (m/s)	Waterkwaliteit	Max. 1.5	Min. 0.2	Min. 0.3
% net met 1- richtingstroom	Waterkwaliteit	n.v.t.	Dmv controle stroombeeld	z.h.m.

Voed.: voeding(en), AL: aansluitingen, wa = woningadresn.v.t.: niet van toepassing, z.h.m.: zo hoog mogelijk.

\* overzichtelijke eenduidige nieuwbouwwijken

\*\* Bij het ontwerp wordt geen rekening gehouden met de sectiegrootte. Pas bij het in uitvoering gaan van een sanering wordt naar de sectiegrootte en de afsluiter plaatsing gekeken.

\*\*\* binnen bebouwde kom: 80 met een bandbreedte van 40 -120 aansl. en buiten bebouwde kom: 50 met een bandbreedte van 15 - 75 aansl.

Waterbedrijven beschouwen het huidige netwerk(ontwerp) als robuust ten opzichte van veranderingen in het waterverbruik (Agudelo-Vera en Blokker, 2014). De inschatting van BW is dat het huidige net een toename in waterverbruik van 10% goed aan kan. WML verwacht dat het verbruik in hun gebieden afneemt. Veranderingen in de watervraag ten gevolge van bv. bevolkingskrimp of decentralisatie, worden gevolgd om te bepalen of actie (het herontwerp van de streefstructuren) nodig is.

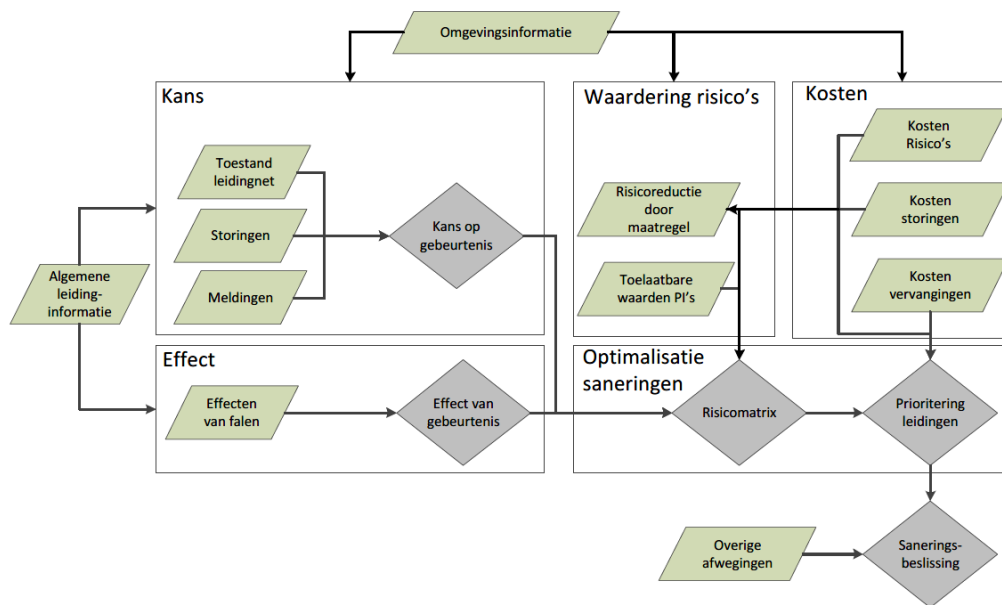


### 2.2.3 Vervangingsstrategieën

Een aanzienlijk deel van het leidingnet is naar verwachting de komende decennia aan vervanging toe, wat bij ongewijzigd beleid leidt tot een toename van saneringen. Om deze vervangingsopgave beheersbaar te houden ligt de focus steeds meer op de beheersing van kosten en een prioritering van welke leiding wanneer wordt vervangen. Een leiding te vroeg vervangen is een vorm van kapitaalvernietiging, een leiding te laat vervangen kan leiden tot overlast voor klanten en hogere kosten.

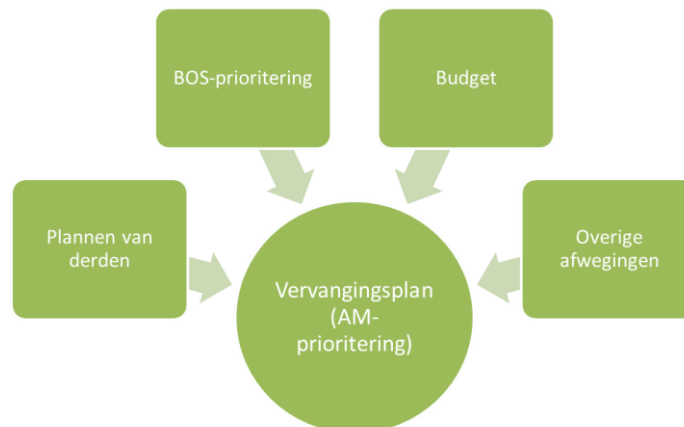
Het huidige vervangingspercentage van BW, PWN en WML ligt rond de 1% van het leidingnet per jaar (zie Tabel 1). Vervangingsstrategieën zijn bedrijfsspecifiek. Bij WML worden primaire leidingen bijvoorbeeld niet vaak vervangen. Dit zijn in het algemeen jongere leidingen. Veel van de vervangingen betreffen het tertiair net (van vermaasd naar vertakt).

Meestal gebruiken waterbedrijven softwarepakketen voor de ondersteuning van saneringsbeslissingen (BOS) van leidingen en/of risicomatrices voor prioritering van vervangingsprojecten (Agudelo-Vera, et al., 2016). Het huidige gebruik van BOS voor saneringsbeslissingen houdt rekening met storingen, leeftijd van leidingen, effecten veroorzaakt door het falen van leidingen, risicovolle objecten, bijzondere klanten en andere bedrijfsspecifieke eisen/voorkeuren, zie Figuur 5.



FIGUUR 5. FUNCTIONELE WEERGAVE VAN BESLISSINGSONDERSTEUNENDE SYSTEMEN BIJ DRINKWATERBEDRIJVEN (MOERMAN, ET AL., 2016).

De prioritering uit het BOS wordt gebruikt als uitgangspunt voor de uiteindelijke AM-prioritering of vervangingsplan. Daarnaast wordt er o.a. gekeken naar het beschikbare budget en plannen van derden (gemeente, energie- en gasbedrijven), zie Figuur 6. Dunea, PWN en Waternet schatten in dat zij in ca. 50% van de gevallen besluiten om werkzaamheden tegelijk met derden uit te voeren, d.w.z. 50% van de projecten zijn eigen initiatief (Agudelo-Vera, et al., 2017).



FIGUUR 6. AFWEGINGEN BIJ HET MAKEN VAN EEN VERVANGINGSPLAN. OVERIG AFWEGINGEN ZIJN BV.: TOEGESTANE OLM, MINIMUM AANTAL KM TE SANEREN PER JAAR, AANPASSINGEN DOOR NIEUWE AFNEMERS OF DOOR ANDERE VERANDERINGEN IN DE WATERVRAAG.

#### 2.2.4 Relatie tussen vervangingsstrategieën, ontwerp en transitie streefstructuren

Vervangingsstrategieën, het ontwerp van een streefstructuur en de transitie daarnaartoe zijn drie met elkaar verweven onderwerpen. In de huidige stand van de praktijk gaan bedrijven hier verschillend mee om. Over het algemeen kunnen de gevolgde benaderingen ingedeeld worden in de volgende drie opties:

- a) Leidingen worden gesaneerd aan de hand van de vervangingsstrategieën en er is geen streefstructuur aanwezig. De diameters van de nieuwe leidingen worden *ad hoc* bepaald. Dit geldt ook bij storingen.
- b) Een streefstructuur voor het hele gebied is ter beschikking en de transitie daarnaartoe wordt gedaan op basis van de vervangingsstrategieën (AM-prioritering). De diameters van de nieuwe leidingen zijn in de streefstructuur vastgelegd. Ook bij storingen zijn de diameters van de nieuwe leidingen bekend uit het streefstructuur. WML volgt deze benadering.
- c) Op basis van de vervangingsstrategieën worden deelgebieden geselecteerd waarvoor een streefstructuur gemaakt wordt. Dit betekent dat er streefstructuren voor specifieke deelgebieden worden gemaakt, maar niet een compleet eindplaatje voor het hele leveringsgebied. De diameters van de nieuwe leidingen in het te saneren deelgebied zijn in de bijbehorende (deel)streefstructuur vastgelegd. Bij onverwachte storingen, die buiten de deelgebieden waarvoor een streefstructuur is gemaakt vallen, worden de diameters van de nieuwe leidingen *ad hoc* bepaald. BW volgt deze benadering.

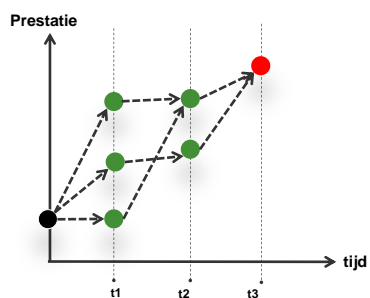
De vervanging van leidingen is een kans voor netverbetering. Het maken van streefstructuren biedt hierin duidelijk voordelen. Benadering "a" is daarom minder gewenst. Uit benaderingen "b" en "c" is duidelijk dat het ontwerp van streefstructuren op verschillende (ruimtelijke) schalen kan gebeuren. Tabel 3 toont een overzicht van de voor- en nadelen van deze twee benaderingen voor het ontwerp van streefstructuren, met name het hele gebied ontwerpen of gericht op deelgebieden uit AM-prioritering ontwerpen. Hieruit volgt dat ook de relatie tussen het ontwerp van de streefstructuur en de transitie daarnaartoe in beide benaderingen anders is: in het ideale geval is in benadering "b" is de streefstructuur leidend en is de transitie daarnaartoe het gevolg van de vervangingsstrategieën, terwijl in benadering "c" de transitie, o.b.v. de vervangingsstrategieën, leidend is en de uiteindelijke

streefstructuur het gevolg daarvan is. In de handmatige benadering is het vaak een tussenvorm. Figuur 7 illustreert dit verschil. In 7a is de streefstructuur leidend. Er is vanaf het begin een duidelijke eindplaatje (rode punt) en er zijn verschillende paden (stippellijnen) om tot dit plaatje te komen. De transitie bepaalt welk pad gevolgd wordt. In 7b is de transitie leidend en is dus het eindplaatje aan het begin nog niet bekend. In elke tijdstep wordt een streefstructuur voor een deelgebied ontworpen.

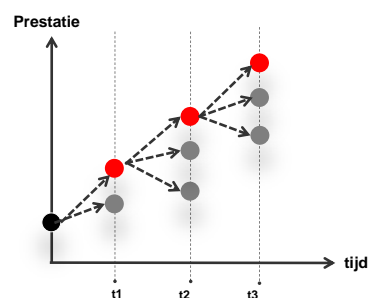
TABEL 3. VOOR- EN NADELEN VAN TWEE MOGELIJKE BENADERINGEN VOOR HET ONTWERP VAN STREEFSTRUCTUREN.

	Voordelen	Nadelen
<b>Hele gebied</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gebied in het geheel optimaliseren (samenhang is deel van de optimalisatie);</li> <li>Langetermijnoverzicht van het hele gebied;</li> <li>Faciliteert beslissingen bij onverwachte storingen;</li> <li>Overzicht van gebieden die hydraulische minder goed presteren (aanvullend op AM-prioritering).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grotere initiële inspanning (manuren) voor ontwerp<sup>1</sup>;</li> <li>Ontwerp op lange termijn is gebonden aan meer onzekerheden;</li> <li>Behoefte aan onderhoud en mogelijk herberekening van het ontwerp (o.b.v. nieuwe informatie/kennis);</li> <li>Ontwerpen die niet gebruikt worden en verouderen, zijn een soort kapitaalvernietiging.</li> </ul>
<b>Gericht op deelgebieden uit AM-prioritering</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geleidelijke inspanning voor het ontwerp;</li> <li>Gerichte aanpak op (deel)gebieden die aan vervanging toe zijn (o.b.v. AM-model);</li> <li>Ontwerp en aanleg volgen elkaar op korte termijn op (minder onzekerheden).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimale deelgebieden leiden mogelijk niet tot een optimaal (hele) gebied (samenhang wordt niet in aanmerking genomen);</li> <li><i>Ad-hoc</i> oplossingen voor storingen (sub-optimaal);</li> <li>Minder overzicht lange-termijn;</li> <li>Hydraulische prestatie van deelgebieden wordt gemist.</li> </ul>

Streefstructuur is leidend



Transitie is leidend



FIGUUR 7. VERGELIJING VAN TWEE BENADERINGEN VOOR HET ONTWERP VAN EN TRANSITIE NAAR EEN STREEFSTRUCTUUR. DE RODE STIPPEN ZIJN DE GEKOZEN ONTWERPEN VOOR DE STREEFSTRUCTUREN. GRIJZE STIPPEN ZIJN MOGELIJK ONTWERPEN DIE NIET GEKOZEN ZIJN. GROENE STIPPEN ZIJN MOGELIJKE AANPASSINGEN AAN DE LEIDINGNETTEN. DE STIPPENLIJN IS HET MOGELIJK PAD VAN HET HUIDIGE LEIDINGNET NAAR DE STREEFSTRUCTUUR.

<sup>1</sup> N.B. Door automatisering van het ontwerp voor het hele gebied kan een reductie op kosten worden verwacht waardoor de grotere initiële inspanning kan worden gecompenseerd door de genoemde voordelen.

Uit de vorige punten is duidelijk dat in de huidige stand van praktijk de vervangingsstrategieën (AM-prioritering) een leidende rol spelen in de transitie van het huidige naar het toekomstige leidingnetwerk. De transitie, d.w.z., het bepalen van welke leidingen in welk jaar vervangen wordt om van de huidige naar de toekomstige structuur te gaan, kan echter op meerdere manieren ingericht worden, zoals:

- De AM-prioritering is leidend, d.w.z. dat het moment waarop leiding vervangen worden uitsluitend wordt bepaald aan de hand van de AM-prioritering (huidige praktijk). In deze benaderingen kunnen weleens problemen optreden wanneer geen rekening wordt gehouden met de hydraulische prestatie van het leidingnet.
- De hydraulische prestatie is leidend, d.w.z., dat het moment waarop leidingen vervangen worden uitsluitend wordt bepaald aan de hand van de hydraulische prestatie van het netwerk (o.a. druk, volumestroom). Dit betekent bv. dat het vervangen van een bepaalde leiding naar een kleinere diameter mogelijk gepaard moet gaan met het vervangen van een andere leiding naar een grotere diameter om een goede prestatie van het net te behouden.
- De transitie wordt bepaald door een combinatie van de vorige twee aspecten, d.w.z., dat naast de hydraulische prestatie ook OLM en kosten van meegaan met derden een rol spelen in het inrichten van de transitie. Dit is handmatig lastig te bepalen en wellicht kunnen hierin optimalisatie en automatisering van toegevoegde waarde zijn.

## 3 Optimaal ontwerp en transitie streefstructuren

### 3.1 Handmatige vs geautomatiseerde benadering

Door de complexiteit van netwerken en het grote aantal randvoorwaarden is in een handmatige benadering voor het ontwerp van streefstructuren moeilijk te doorzien wat het beste ontwerp en de beste keuzes zijn. Numerieke optimalisatietechnieken bieden hierin de helpende hand door op een slimme manier de oplossingsruimte te onderzoeken, diverse ontwerpen met elkaar te vergelijken en zo te convergeren naar een optimaal ontwerp. Eigenlijk is het alleen door automatisering en het gebruik van numerieke optimalisatietechnieken mogelijk om i.p.v. één ontwerp te kiezen dat aan alle eisen voldoet, een optimaal ontwerp te kiezen, d.w.z. een ontwerp dat aan alle eisen voldoet en ook nog bv. het goedkoopste, of het meest robuuste is.

---

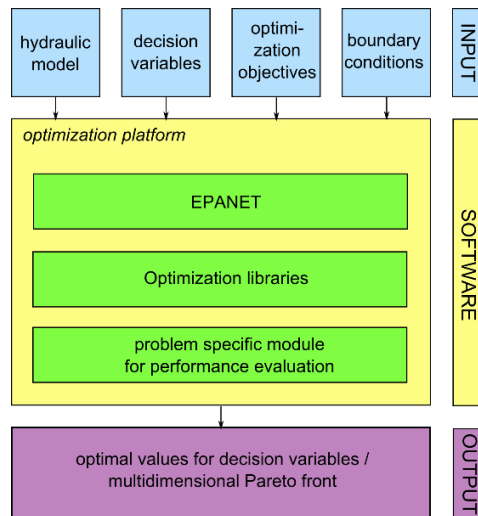
Een optimaal ontwerp is een ontwerp dat aan alle eisen voldoet en ook nog het goedkoopste of het meest robuuste tussen alle mogelijke ontwerpen is.

---

Daarnaast blijkt dat in de praktijk slechts een beperkt aantal scenario's wordt uitgewerkt/doorgerekend (namelijk leveringszekerheid). Door automatisering en het toepassen van numerieke optimalisatietechnieken kunnen meerdere scenario's op een overzichtelijke manier meegenomen worden in het ontwerpproces.

Ook bij het inrichten van de transitie van de huidige naar de toekomstige netstructuur bieden automatisering en numerieke optimalisatietechnieken voordelen, door meerdere mogelijke "wegen" naar de streefstructuur te onderzoeken en zowel hydraulische- als asset-managementaspecten in aanmerking te nemen.

Gondwana is een geschikte tool om het ontwerp van streefstructuren en de transitie daarnaartoe te ondersteunen. Figuur 8 toont een overzicht van het ontwerpproces in Gondwana.



FIGUUR 8. PROCESOVERZICHT VAN EEN OPTIMALISATIE IN GONDWANA. IN BLAUW DE INVOERGEGEVENS, IN GEEL DE SOFTWARE MET DAARIN DE VERSCHILLENDE MODULES IN HET GROEN EN IN PAARS DE OUTPUTGEVENS.

## 3.2 Vertaling naar een optimalisatieprobleem

### 3.2.1 Inleiding

Om numerieke optimalisatietechnieken toe te passen in het ontwerp van en transitie naar streefstructuren, moeten deze vraagstukken in de vorm van een optimalisatieprobleem geformuleerd worden. Dit vergt de definitie van:

- hydraulische model en invoergegevens;
- beslisvariabelen;
- (optimalisatie)doel of -doelen;
- randvoorwaarden.

Deze aspecten worden in de volgende sub-secties toegelicht.

### 3.2.2 Hydraulische model en invoergegevens

De invoergegevens zijn alle gegevens die bekend zijn en vastliggen, en die in aanmerking worden genomen voor het berekenen van het optimalisatieprobleem, zoals bv. de configuratie van het leidingnetwerk, wandruwheid van nieuwe leidingen, de aanlegkosten per meter leiding, het waterverbruik op knopen. Hierin kunnen ook scenario's in aanmerking worden genomen: bv. uitval van een leiding of een sectie van het leidingnetwerk, of veranderingen in de watervraag.

### 3.2.3 Optimalisatiedoelstellingen: wat wil je bereiken?

Het doel (of doelen) van een optimalisatieprobleem beschrijft wat er bereikt moet worden met de optimalisatie. Op basis daarvan kan de beste oplossing uit alle mogelijke oplossingen worden gekozen. Dit doel wordt beschreven door een functie die geminimaliseerd of gemaximaliseerd wordt, bv.:

- **minimaliseer de aanlegkosten**, waarin aanlegkosten bv. een functie zijn van de diameter en lengte van de nieuwe leidingen;
- **minimaliseer het energieverbruik**, waarin het energieverbruik bv. een functie is van de drukgradiënt;

- **maximaliseer de waterkwaliteit**, waarin de waterkwaliteit bv. een functie is van de verblijftijd;
- **minimaliseer OLM**, waarin OLM bv. een functie is van de storingsfrequenties en afsluiterlocaties.

De voorgenoemde doelfuncties zijn enkel voorbeelden. Meer opties zijn denkbaar. Er zijn vier type prestatiecriteria gedefinieerd die, in verschillende vormen, in aanmerking kunnen komen voor de doelstelling van een optimalisatieprobleem:

- druk;
- levering;
- waterkwaliteit;
- kosten.

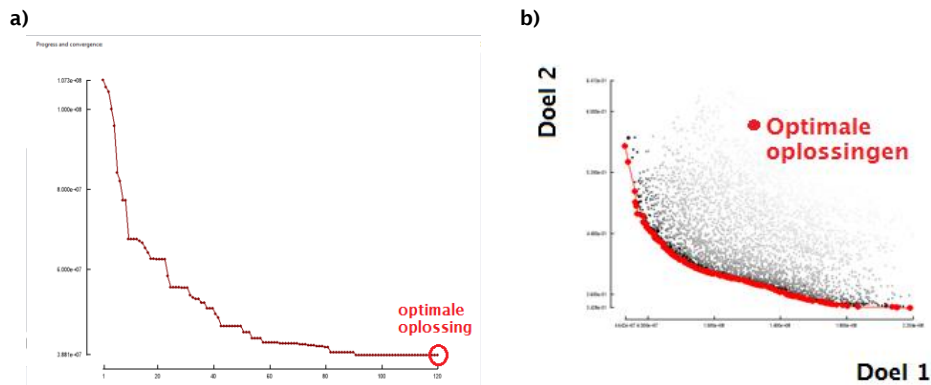
Elk van de criteria kan worden beschreven of uitgedrukt aan de hand van verschillende prestatieindicatoren. Deze indicatoren zijn te zien in de ontwerpcirkel (Figuur 1) en zijn beschreven in Agudelo-Vera et al. (2016), bv. waterkwaliteit kan worden beschreven aan de hand van (gemiddelde, minimale of maximale) snelheid (m/s) of verblijftijd (dagen). Energieverbruik en verblijftijd zijn indicatoren die kunnen worden berekend door de hydraulische software in een simulatie. Andere prestatieindicatoren kunnen worden afgeleid uit het ontwerp (bijvoorbeeld aanlegkosten) of operatie (bijvoorbeeld watertemperatuur berekend door een model voor de uitwisseling van thermische energie met de omringende bodem).

Een complexere optimalisatieprobleem betreft het in aanmerking nemen van meerdere doelen. Dit kan door middel van één enkele doelfunctie die verschillende doelen impliciet combineert (bv. aanlegkosten plus robuustheid) of twee (of meer) verschillende expliciete doelfuncties (bv. aanlegkosten *versus* robuustheid). In het eerste geval worden de verschillende doelen opgeteld en worden er gewichtsfactoren gebruikt om het relatieve belang van elk doel te kwantificeren. De doelfunctie kan worden berekend als equivalente eenheden (*eq. eenheden*), bv. eq. € of eq. CO<sub>2</sub> emissies:

$$\text{Doelfunctie} = \sum_{i=1}^n \text{doel}_i * \text{eq. factor}_i * \text{gf}_i \quad \text{Vergelijking 1}$$

Waar de 'equivalent factor' (eq. factor) de criteria vertaalt naar de gewenste eenheid, bv. Euro en de gewichtsfactor (gf) het belang van het doel aangeeft.

In het laatste geval wordt er niet een enkele oplossing verkregen, maar een Pareto-curve: een set van oplossingen (ontwerpen) waarin elke oplossing een optimale combinatie is van de verschillende doelfuncties (zie Figuur 9). En waar achteraf door de gebruiker een keuze kan worden gemaakt tussen de verschillende mogelijke oplossingen.



FIGUUR 9. CONVERGENTIECURVES VAN EEN OPTIMALISATIEPROCES VOOR (A) ÉÉN DOELFUNCTIE: HET OPTIMUM IS EEN PUNT EN (B) TWEE DOELFUNCTIES: HET OPTIMUM IS EEN PARETO CURVE.

### 3.2.4 Randvoorwaarden: welke eisen worden gesteld?

De randvoorwaarden van een optimalisatieprobleem beschrijven de eisen waaraan de oplossingen moeten voldoen. Zonder randvoorwaarden zou bijvoorbeeld het netwerk dat de minste energie verbruikt een netwerk zijn dat geen water levert. Door middel van randvoorwaarden kunnen dus eisen aan de prestatie van het net worden opgelegd. Het resultaat van het optimalisatieprobleem zal altijd aan deze eisen voldoen.

Ook de randvoorwaarden kunnen worden geselecteerd uit de ontwerpcirkel zowel uit de buitenste ring als uit de “randvoorwaarden” ring. Dit betekent dus dat een criterium uit de ontwerpcirkel zowel een doelfunctie als een randvoorwaarde kan zijn. Aanlegkosten kunnen bijvoorbeeld een doelfunctie zijn: “minimaliseer de aanlegkosten”, of een randvoorwaarde “maak een ontwerp dat in een vastgesteld budget past”. Tabel 4 geeft hier enkele voorbeelden van. Alle randvoorwaarden hebben twee opties: *Enforce* of *Penalize*. *Enforce* betekent dat oplossingen die niet aan de randvoorwaarden voldoen worden weggelaten. *Penalize* betekent dat oplossingen die niet aan de randvoorwaarden voldoen worden geaccepteerd, maar ten koste van strafpunten die de doelfunctie benadelen. Het optimalisatiealgoritme zal dan proberen om zo goed mogelijk aan de randvoorwaarde te voldoen.

Net zoals de doelfuncties kunnen de randvoorwaarden berekend worden aan de hand van de hydraulische simulatie van het netwerk (bv. druk, volumestroom) of afgeleid worden van het ontwerp (bv. kosten, leeftijd leidingen). Voor de hydraulische berekeningen kunnen verschillende invoerscenario's in aanmerking worden genomen bv. max-uur-max-dag, bluswater, uitval van afsluitersecties. In dit geval moet ook worden aangegeven voor welke scenario's de randvoorwaarden moeten worden getoetst.



TABEL 4. VOORBEELDEN VAN PRESTATIEINDICATOREN BIJ ELK CRITERIUM DIE ZOWEL ALS DOELFUNCTIE ALS RANDVOORWAARDE KUNNEN DIENEN BIJ HET ONTWERP VAN EN DE TRANSITIE NAAR STREEFSTRUCTUREN.

criterium	Prestatieindicator	Doelfunctie	Randvoorwaarden
<b>Druk</b>	Druk	Maximaliseer drukoverschot op knopen (robuustheid)	Druk > x kPa
	<b>Levering</b>	Leeftijd	Minimaliseer leeftijd van het net
<b>Waterkwaliteit</b>	OLM	Minimaliseer de storingsfrequentie	Gemiddelde/ maximale Storingsfrequentie < x
	Verblijftijd	Minimaliseer verblijftijd	Verblijftijd < x uur
	Pendelzones	Minimaliseer aantal pendelzones	Aantal pendelzones < x
<b>Kosten</b>	CAPEX	Minimaliseer aanlegkosten (leidingen + afsluiters)	Aanlegkosten < budget
	OPEX	Minimaliseer drukgradiënt	Drukgradiënt < x m/km

### 3.2.5 Beslisvariabelen: de draaiknoppen

De beslisvariabelen zijn de onbekende variabelen die men wil bepalen door middel van het optimalisatieprobleem, bv. de leidingdiameters die tot de laagste aanlegkosten leiden. De beslisvariabelen kunnen worden gezien als "draaiknoppen": alles waaraan gedraaid kan worden om het doel te bereiken. De waardes die de beslisvariabelen kunnen aannemen worden beperkt door de randvoorwaarden. Bv. om een zo slank mogelijk net te bereiken worden de diameters verkleind, om een drukgradiënt te verlagen worden de diameters vergroot. Maar door de veronderstelde watervraag, de beschikbare diameters en drukeisen op knopen kunnen de diameters niet oneindig worden verkleind, en door snelheidseisen kunnen de diameters niet oneindig worden vergroot.

Enkele voorbeelden van beslisvariabelen zijn (binnenste cirkel in Figuur 1):

- leidingdiameters;
- tracé;
- locatie van afsluiters;
- vervangingsjaar van leidingen.

Een gedetailleerde beschrijving van de draaiknoppen, die zijn weergegeven in de ontwerpcirkel, is te vinden in Agudelo-Vera en Blokker (2016). Randvoorwaarden of invoergegevens zoals i) hoeveelheid water dat geleverd kan worden per voeding en ii) beheermaatregelen (bv. drukpatroon van pompen of vaste druk van watertoren), kunnen ook als beslisvariabelen/draaiknoppen in aanmerking worden genomen. Deze twee aspecten kunnen variëren in de tijdshorizon van het ontwerp en kunnen een grote invloed hebben op de toekomstige prestatie van het net.

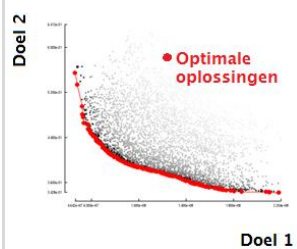
TABEL 5. VOORBELDEN VAN BESLISVARIABLEN EEN EFFECT OP CRITERIA (↑ TOENAME, ↓ AFNAME EN △ VARIATIE).

Draaiknoppen	Gevolgen	Effect op criteria			
		Druk	Levering	Kwaliteit	Kosten
↑ Diameter	↑ Volume en kosten ↓ drukgradiënt	x		x	x
↓ Diameter (evt. lengte)	↓ Volume ↑ snelheid	x		x	x
↓ Diameter / tracé	↓ pendelzones	x	x	x	x
△ Sectionering	△ sectielengte △ Sectiegrootte △ OLM		x		x
△ Tracé	△ Drukgradiënt, △ volume, △ snelheid, △ OLM , etc.	x	x	x	x

### 3.2.6 Voorbeelden van optimalisatieproblemen

Er zijn verschillende optimalisatieproblemen denkbaar voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren. Tabel 6 toont een aantal voorbeelden van mogelijke optimalisatieproblemen en de vorm van de resultaten hiervan. In optie 1 is het doel het minimaliseren van de aanlegkosten, met als randvoorwaarden zoals minimale druk op de verbruiksknoppen en een leveringszekerheidseis. In dit geval is het resultaat van de optimalisatie de leidingdiameters die leiden tot de laagste kosten. Optie 4 betreft een optimalisatieprobleem waarin twee doelfuncties tegenover elkaar worden gezet. Het resultaat is een Pareto-curve met optimale combinaties tussen beide doelfuncties. De gebruiker krijgt inzicht in de verhouding tussen beide doelen en kan er één selecteren voor implementatie. In optie 5 worden ook twee doelen in aanmerking genomen, maar worden deze gecombineerd in één enkele doelfunctie. Het resultaat is in dit geval één ontwerp.

TABEL 6. VOORBEELDEN VAN OPTIMALISATIEPROBLEMEN VOOR HET ONTWERP VAN EN TRANSITIE NAAR STREEFSTRUCTUREN.

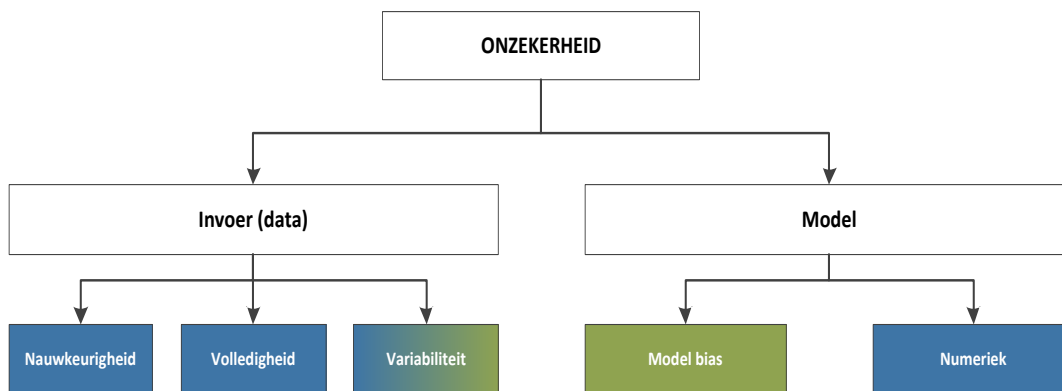
#	Doelfunctie(s)	Randvoorwaarden	Beslisvariabelen	Resultaat
1	Minimalisatie van aanlegkosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Druk &gt; x kPa</li> <li>Leveringszekerheid seis</li> </ul>	Leidingdiameters	Eén ontwerp: leidingdiameters die leiden tot de laagste aanlegkosten.
2	Minimalisatie sommatie van Lengte x Diameter (surrogaat voor aanlegkosten en/of waterkwaliteit)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Druk &gt; x kPa</li> <li>Leveringszekerheid seis</li> </ul>	Tracé en leidingdiameters	Eén ontwerp: tracé en leidingdiameters die leiden tot de minimale sommatie van Lengte x Diameter (voor alle leidingen in het model).
3	Minimalisatie van de storingsfrequentie	<ul style="list-style-type: none"> <li>lengte te saneren leidingen &lt; x km/jaar</li> </ul>	Vervangingsjaar	Eén plan: vervangingsjaar voor alle leidingen in het model.
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimalisatie Volume (surrogaat voor aanlegkosten of waterkwaliteit)</li> <li>Minimalisatie drukgradiënt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Druk &gt; x kPa</li> <li>Leveringszekerheid seis</li> <li>snellheid &gt; x m/s</li> </ul>	Leidingdiameters	<p>Paretocurve: verschillende ontwerpen die leiden tot optimale combinaties van volume en drukgradiënt (rode stippen).</p> 
5	Minimalisatie van volume en drukgradiënt door middel van gewichtsfactoren (gf): Min. Vol (m <sup>3</sup> ) * gf <sub>1</sub> + Min. drukgradiënt (m/km) * gf <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Druk &gt; x kPa</li> <li>snellheid &gt; x m/s</li> </ul>	Leidingdiameters	Eén ontwerp : leidingdiameters die leiden tot de minimale som van volume en drukgradiënt.

### 3.3 Onzekerheden

Het ontwerp van streefstructuren is gebonden aan verschillende onzekerheden. Een streefstructuur moet voor een lange termijn een gebied van water voorzien. Er zijn geen specifieke richtlijnen om de planhorizon van een streefstructuur te bepalen. Hoe langer de planhorizon is, hoe groter de onzekerheden zijn.

Het in aanmerking nemen van onzekerheden in het ontwerp van en transitie naar streefstructuren valt buiten de scope van dit project en worden daarom niet meegenomen in de optimalisatieproblemen. Wel is het van belang om een beknopt overzicht van onzekerheden te geven. Onzekerheden kunnen op hoofdlijnen ingedeeld worden in twee groepen: inherente en subjectieve onzekerheden (zie Figuur 10):

- Inherente onzekerheden zijn onzekerheden die onvermijdelijk zijn en alleen op basis van aannamen of hypothesen kunnen worden bepaald. In deze categorie vallen bijvoorbeeld:
  - variatie in materiaaleigenschappen binnen een leiding (ruimtelijke variabiliteit);
  - variatie in waterkwaliteit, agressiviteit en dergelijke (temporele variabiliteit);
  - variatie in hydraulische omstandigheden (temporele variabiliteit);
  - variatie in externe belasting door de omgeving van de leiding over korte leidinglengtes (ruimtelijke variabiliteit);
- Subjectieve onzekerheden zijn onzekerheden die kleiner worden met meer gegevens, betere meetmethoden, meer kennisopbouw van processen en dergelijke, bijvoorbeeld door het verfijnen van de resolutie van de verbruikspatronen van 1 uur tijdstap naar 5 minuten.



FIGUUR 10. TYPOLOGIE VAN ONZEKERHEDEN IN ANALYSES; DE BLAUWE ELEMENTEN BETREFFEN VOORNAMELIJK SUBJECTIEVE ONZEKERHEDEN, DE GROENE ELEMENTEN VOORNAMELIJK INHERENTE ONZEKERHEDEN (MOERMAN, ET AL., 2016).

Onzekerheden kunnen worden ingedeeld in een aantal oorzaken, waarvan een aantal inherent, een aantal subjectief en een aantal deels inherent en deels subjectief zijn. Onzekerheden kunnen ontstaan aan de invoerzijde van het model (data) of door het model zelf. In Tabel 7 worden de begrippen “nauwkeurigheid”, “volledigheid” en “variabiliteit” toegelicht en worden enkele voorbeelden met betrekking tot streefstructuren gegeven.

In Tabel 8 worden enkele concrete voorbeelden van onzekerheden gebonden aan de invoerparameters genoemd en worden opties om met deze onzekerheden om te gaan voorgesteld. Anno 2017 wordt aanbevolen om onzekerheden in scenario's op te nemen. In de toekomst gaan onzekerheden expliciet in aanmerking worden genomen (BTO 2018-2019).

TABEL 7. BESCHRIJVING, VOORBEELDEN EEN AANPAK VAN ONZEKERHEDEN.

	Nauwkeurigheid	Volledigheid	Variabiliteit
Beschrijving	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 zijn niet tot nul te reduceren.	Onzekerheden m.b.t. onvolledigheid worden veroorzaakt door een tekort aan data voor een analyse op het gewenste schaalniveau.	Variaties in eigenschappen van de gegevens op een schaal kleiner dan de gewenste schaal.
Voorbeelden streefstructuur	Nauwkeurigheid van: Huidig en toekomstig verbruik, wandruweidscoefficiënt, diameters en ligging en diepte van leidingen.	Volledigheid van het model is afhankelijk van: - specifiek verbruikspatroon per type verbruikers; - informatie over jaar van aanleg en materiaal voor alle leidingen.	- Huidige en toekomstig waterverbruik, kosten. - Degradatie van leidingen.
Aanpak	Statistische benaderingen. Gevoeligheidsanalyse.	Kalibratie met drukmetingen / volumestromen.	Gebruik: bandbreedte van prognose en/of verkennende scenario's.

TABEL 8. VOORBEELDEN VAN ONZEKERHEDEN VOOR HET ONTWERPEN VAN STREEFSTRUCTUREN EN OPTIES OM ER MEE OM TE GAAN.

Onzekerheden	Aspect	Optie
Huidige drinkwatervraag (en variatie)	Eén patroon per gebied	(max-dag) + gevoeligheidsanalyse (+/- x %) Gemiddelde dag Meerdere watervraagscenario's
	Patroon per aansluiting, specifiek per type klant (huishoudelijk, kantoor, hotel, etc.)	Stochastisch vraag op aansluiting (bv. met SIMDEUM $\mu+\sigma$ ) Meerdere patronen per aansluiting
	Focus van ontwerp	Focus alleen op maxuur-maxdag met verschillende tijdstap: 1 uur, 15 min, 10 sec, etc. Meerdere dagen simulatie
	Grote of bijzondere klanten	Eigen patroon Patronenbibliotheek
Toekomstige drinkwatervraag	Lekkage	Constant / drukafhankelijk
	Variatie over tijd	Scenario's +/- x% Variatie dagelijks verbruik of piekverbruik scenario's
Nieuwe ontwikkelingen, bv. nieuwe huizen of bedrijven (watervraag en locatie van aansluitingen)	Ontwikkelingen over tijd	Voorspelling watervraag (nieuwe apparatuur)
		Ontwerpen met en zonder deze locaties
Bluswatervraag	Andere normen/eisen	Additionele vragen bv. bluswatervraag: geen, 30 m <sup>3</sup> /h of 60 m <sup>3</sup> /h Bluswater wel/niet testen
	Toekomstige locaties met specifieke bluswaterinstallaties	
Wandruwheid	Onzekerheid van waardes voor bestaande leidingen	Verandering door corrosie, degradatie, meenemen als functie van leeftijd en materiaal (voor GGJ)
Voeding(en)	Aantal voedingen en hoeveelheid water per voeding	Meerdere opties berekenen Vast/variabel
	Druk ingang op voedingen/pompstations/reservoirs	Vast/variabel

### 3.4 Houdbaarheid van het ontwerp en databeschikbaarheid voor herziening

Het ontwerp van een streefstructuur veroudert als één of meer invoerparameters, randvoorwaarden of doelen veranderen. Het volgen van trends en ontwikkelingen in het gebied waarvoor een streefstructuur wordt ontworpen is daarom belangrijk. Tabel 9 toont een overzicht van vijf mogelijke veranderingen en check en act stappen die daar bijhoren (Agudelo-Vera en Blokker, 2016). Het kunnen monitoren van deze veranderingen is afhankelijk van de beschikbaarheid (en periodiciteit) van data.

TABEL 9. MOGELIJKE VERANDERINGEN (AGUDELO-VERA EN BLOKKER, 2016).

Mogelijk veranderingen	Termijn (intern of sectorbreed)	Check
1. Watervraag (en alternatieve bronnen, bv. grijs water uit regenton)	Op lange termijn (intern en sectorbreed)	Jaarlijks verbruik en prognose controleren. Contextscenario's blijven volgen.
2. Ontwikkeling van nieuwe gebieden	Middellange/lange termijn (intern)	Elke 1-2 jaar plannen en realisatie controleren.
3. Implementatie van de streefstructuur	Korte termijn (intern)	Elk jaar plannen en realisatie controleren.
4. Nieuwe normen/eisen/bedrijfsdoelen	Korte t/m lange termijn (sectorbreed)	Continu volgen.
5. Nieuwe kennis/tools	Korte termijn (intern en sectorbreed)	Elk jaar blijven controleren.
6. Nieuwe ontwerpparadigma's (bv. centraal – decentraal)	Op lange termijn (intern en sectorbreed)	Contextscenario's blijven volgen.

Tijdens de transitie van de huidige structuur naar de streefstructuur kunnen er trendbreuken optreden (bijv. trendbreuk in watervraag, heel andere wet- en regelgeving, nieuwe materialen, etc.). Ondanks dat tijdens het ontwerp er (nu) nog geen rekening mee kan worden gehouden, is het belangrijk om de veranderingen te volgen, en zo nodig het ontwerp voor de streefstructuur te herzien tijdens de transitie. Tabel 10 toont een overzicht van een aantal datasets en hun periodiciteit die belangrijk zijn voor het ontwerp van streefstructuren. Een overzicht van andere trends en trendbreuken die op een meer strategische niveau een rol spelen zijn te vinden op: <https://nl.padlet.com/dwsi/horizonscanning>.

TABEL 10. OVERZICHT VAN EEN AANTAL DATASETS EN HUN VERSCHIJNINGSFREQUENTIE.

Rapporten	Periodiciteit
Benchmark drinkwaterbedrijven (Water in zicht)	Elk drie jaar
Waterverbruik thuis	Elk drie jaar
CPB scenario's	2002 – 2010*
Leidingen-cohorten	4 jaar (2011 en 2015)
Prognose landelijke drinkwatervraag (Vewin)	2002 (t/m 2020) 2005 (t/m 2020) 2008 (t/m 2025)
Prognose drinkwatervraag (eigen bedrijf)	9 jaar (2006 en 2015)
BAG-gegevens	Periodieke controle

\*Four futures of Europe (CPB 2003) en The Netherlands in 2040 (2010).

### 3.5 Keuzemenu voor het ontwerp van en de transitie naar streefstructuren

#### 3.5.1 Inleiding

Op basis van de checklist voor het ontwerp van streefstructuren (Agudelo-Vera en Blokker, 2016), en met het vertalen van het probleem naar een optimalisatieprobleem in gedachten, is een 'keuzemenu' gemaakt om de uitgangspunten voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren vast te leggen, zie Tabel 11. Hiermee kunnen bedrijven op een transparante en gestandaardiseerde wijze hun verwachtingen en doelen bij het ontwerp van streefstructuren in kaart brengen. De ingevulde keuzemenu's kunnen als input dienen om een optimalisatieprobleem te formuleren.

TABEL 11. KEUZEMENU VOOR HET ONTWERP VAN EEN STREEFSTRUCTUUR IN GONDWANA: OVERZICHT VAN MOGELIJK INVOERGEGEVENS, DOELFUNCTIES, RANDVOORWAARDEN EN BESLISVARIABLEN.

Scope van optimalisatie - input data	
<b>Dimensionering van :</b>	
<input type="checkbox"/> Primair net en/of <input type="checkbox"/> secundair net <b>Inclusief:</b> <input type="checkbox"/> Locatie afsluiters <input type="checkbox"/> Locatie brandkranen	
<b>Uitgangspunten voor tracé:</b>	
<input type="checkbox"/> huidig netwerk <input type="checkbox"/> wegnnet <input type="checkbox"/> huidige afsluitersconfiguratie <input type="checkbox"/> nieuwe afsluitersconfiguratie o.b.v. _____ Ontwikkelingen: <input type="checkbox"/> nieuwbouw <input type="checkbox"/> nieuwe wegen <input type="checkbox"/> andere: _____	
<b>Locatiespecifieke aspecten:</b>	
<input type="checkbox"/> bodemverontreiniging <input type="checkbox"/> risicovolle elementen <input type="checkbox"/> bijzondere klanten <input type="checkbox"/> particuliere blusinstallaties <input type="checkbox"/> andere _____ <input type="checkbox"/> Type verbruikers: huishoudelijk, grootverbruikers, bijzondere klanten (o.a. ziekenhuis, school) flats, etc.	
<b>Hydraulische berekeningen op basis van:</b> <input type="checkbox"/> Max-dag-max-uur <input type="checkbox"/> gemiddelde dag <input type="checkbox"/> meerdere dagen	
<b>(Aggregatie van) resultaten:</b> <input type="checkbox"/> per leidingstuk <input type="checkbox"/> cluster per sectie <input type="checkbox"/> cluster per wijk <input type="checkbox"/> andere _____	
Randvoorwaarden	
<input type="checkbox"/> Specifieke minimale druk per leidingfunctie:	Indien Ja, welke: P____, S____, T____ (mwk)
<input type="checkbox"/> Druk-eis normale levering/begin tertiair net	_____ (mwk)
<input type="checkbox"/> Maximale sectielengte	_____ (km/sectie)
<input type="checkbox"/> Sectiegrootte	_____ (# aansl. /sectie)
<input type="checkbox"/> Snelheid (m/s)	<input type="checkbox"/> Minimale snelheid: _____ m/s <input type="checkbox"/> Eens per dag <input type="checkbox"/> Eens per _____ dagen <input type="checkbox"/> Maximale snelheid: _____ m/s <input type="checkbox"/> Eens per dag <input type="checkbox"/> Eens per _____ dagen
<input type="checkbox"/> % net met 1-richtingstroom	<input type="checkbox"/> $v_{min} > 0$ m/s
<input type="checkbox"/> Leveringszekerheid	_____ (mwk) en/of _____%
<input type="checkbox"/> Leveringscontinuïteit	_____ (mwk)
<input type="checkbox"/> Andere:	
Ontwerpscenario's:	
<input type="checkbox"/> Huidige watervraag	
<input type="checkbox"/> Toekomstige watervraag: Tijdshorizon _____ databron _____	
<input type="checkbox"/> Andere watervraagscenario's: _____	
<input type="checkbox"/> Bluswatervraag: <input type="checkbox"/> 0 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> 30 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> 60 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> Andere: _____ m <sup>3</sup> /u	
<input type="checkbox"/> Andere: Leveringszekerheid, falende afsluiters	
Optimalisatiedoelen	
<input type="checkbox"/> Minimalisatie volume	Som van het volume van alle leidingen
<input type="checkbox"/> Minimalisatie Drukgradiënt (mwk/km)	<input type="checkbox"/> Maximale drukgradiënt (som van maximale drukgradiënt op alle leidingen) <input type="checkbox"/> Gemiddelde drukgradiënt (gemiddelde drukgradiënt van alle leidingen)
<input type="checkbox"/> Minimalisatie verblijftijd	<input type="checkbox"/> Maximale verblijftijd <input type="checkbox"/> Gemiddelde verblijftijd
<input type="checkbox"/> Minimalisatie aanlegkosten (incl. afsluiters)	<input type="checkbox"/> Som van de prijs per meter leiding x leidinglengte (incl. materiaal en werkzaamheden) <input type="checkbox"/> Prijs per afsluiter x aantal afsluiters (incl. materiaal en werkzaamheden)



<input type="checkbox"/> Minimalisatie operationele kosten (bv. energieverbruik)	<input type="checkbox"/> Verschil tussen druk en hoogte in reservoirs <input type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> anders:
<input type="checkbox"/> Minimalisatie ongepland OLM	Som van OLM
<input type="checkbox"/> Minimalisatie leeftijd	Gemiddelde of maximale leeftijd van het net
<input type="checkbox"/> Minimalisatie storingsfrequentie	Som van aantal storingen Het aantal storingen varieert per leiding afhankelijk van het cohort.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie potentiële schadekosten	Schadekosten kunnen voortkomen uit: OLM, ontgrondingskuilen, bruinwater, etc.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie risico's	Som van kosten effect x faalkans Waar het aantal storingen per meter leiding per cohort varieert
<input type="checkbox"/> Maximalisatie waterkwaliteit	Waterkwaliteit wordt beschreven door KPI's zoals: snelheid, # pendelzones, verblijftijd, etc. <input type="checkbox"/> Snelheid in leidingen <input type="checkbox"/> Pendelzones <input type="checkbox"/> Verblijftijd <input type="checkbox"/> Combinatie van voorgaande (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
<input type="checkbox"/> Maximalisatie Prestatie	Prestatie (P) wordt beschreven door KPI's: Minimale druk, OLM, WK en/of Kosten. <input type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> OLM <input type="checkbox"/> Waterkwaliteit <input type="checkbox"/> Kosten (aanleg en/of operationeel) <input type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:

### 3.5.2 Voorkeur drinkwaterbedrijven

Medewerkers van de drinkwaterbedrijven Brabant Water, Waterbedrijf Groningen, Waternet en De Watergroep, hebben het keuzemenu ingevuld. De ingevulde keuzemenu's staan in Bijlage II.

Tabel 12 geeft een overzicht van de resultaten verkregen uit de ingevulde keuzemenu's. PWN heeft de keuzemenu in een later stadium ingevuld. De door PWN ingevulde keuzemenu is opgenomen in Bijlage II, maar de resultaten zijn niet opgenomen in Tabel 12. De verschillende aspecten die in aanmerking kunnen worden genomen bij het ontwerp van streefstructuren zijn ingedeeld in "erg belangrijk" (alle 4 bedrijven hebben deze keuze aangegeven), "relatief belangrijk" (2 of 3 bedrijven hebben deze keuze aangegeven), en "minder belangrijk" (maximaal één bedrijf heeft deze keuze aangegeven). Hieruit is te zien over welke aspecten alle bedrijven het eens zijn en welke aspecten bedrijfsspecifiek zijn. Wat betreft de invoerdata, randvoorwaarden en ontwerpscenario's zijn er duidelijk overeenkomsten. Wat betreft de optimalisatie doelstellingen zijn de wensen meer verdeeld. Waterkwaliteit (met name verblijftijd of een combinatie van parameters), aanlegkosten, storingsfrequentie en risico's scoren het hoogst, maar geen van de doelstellingen wordt door alle vier de bedrijven genoemd. Dit maakt duidelijk dat het formuleren van optimalisatieproblemen maatwerk is.

TABEL 12. VOORKEUR DRINKWATERBEDRIJVEN VOOR ONTWERP VAN EN TRANSITIE NAAR STREEFSTRUCTUREN (ANNO 2017).

	<b>Erg belangrijk (score 4)</b>	<b>Relatief belangrijk (score 2-3)</b>	<b>Minder belangrijk (score 0-1)</b>
<b>Input data</b>	Dimensionering primair net Dimensionering secundair net Locatie afsluiters Tracé - huidig net Ontwikkelingen nieuwbouw	Locatie brandkranen Berekening met gemiddelde dag Aggregatie per leidingstuk Tracé - weggenet Ontwikkelingen nieuwe wegen Berekening met max-dag max-uur	Tracé - huidige afsluiter configuratie Bodemverontreiniging Risicovolle elementen Bijzondere klanten Particuliere blusinstallaties Type verbruikers Berekening met criterium dag Berekening met meerdere dagen Cluster per sectie Cluster per wijk % net met een-richtingstroom
<b>Randvoorwaarden</b>	Minimale druk begin tertiair net Minimale snelheid eens per dag Leveringszekerheid	Minimale druk per leidingfunctie Maximale sectielengte Sectiegrootte Maximale snelheid Leveringscontinuïteit	
<b>Ontwerp-scenario's</b>	Huidige watervraag Toekomstige watervraag	Andere watervraagscenario's Bluswater	
<b>Optimalisatiedoelen</b>		Verblijftijd Aanlegkosten Storingsfrequentie Risico's Waterkwaliteit (combinatie van parameters)	Volume Drukgradiënt Operationele kosten Ongepland OLM Leeftijd Potentiële schadekosten

## 4 Benadering voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren

### 4.1 Inleiding

Er zijn twee benadering voorgesteld voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren: multicriteria gefaseerd ontwerp en stapsgewijze benadering. In de benadering multicriteria gefaseerd ontwerp worden het ontwerp en de transitie in een enkel optimalisatieprobleem verwerkt en worden verschillende watervraagscenario's in aanmerking genomen om het best presterende ontwerp (incl. transitie) te kiezen. Deze keuze wordt gemaakt door middel van een multicriteria-analyse. In de stapsgewijze benadering worden het ontwerp en transitie in eerste instantie uit elkaar gehaald, en worden twee verschillende optimalisatieproblemen geformuleerd: één met specifieke doelstellingen en randvoorwaarden voor het ontwerp van streefstructuren, en één met specifieke doelstellingen en randvoorwaarden voor de transitie naar een streefstructuur. De twee optimalisatieproblemen zijn met elkaar verbonden: de transitie wordt voortgebouwd op de resultaten van het geoptimaliseerd ontwerp. De stapsgewijze benadering is eenvoudiger en overzichtelijker en is daarom gekozen voor verdere uitwerking in dit project. Gondwana is uitgebreid om op basis van de stapsgewijze benadering te kunnen rekenen en de benadering is toegepast op de casestudy.

De stapsgewijze benadering wordt hieronder toegelicht en de multicriteria gefaseerd ontwerp benadering is terug te vinden in Bijlage III.

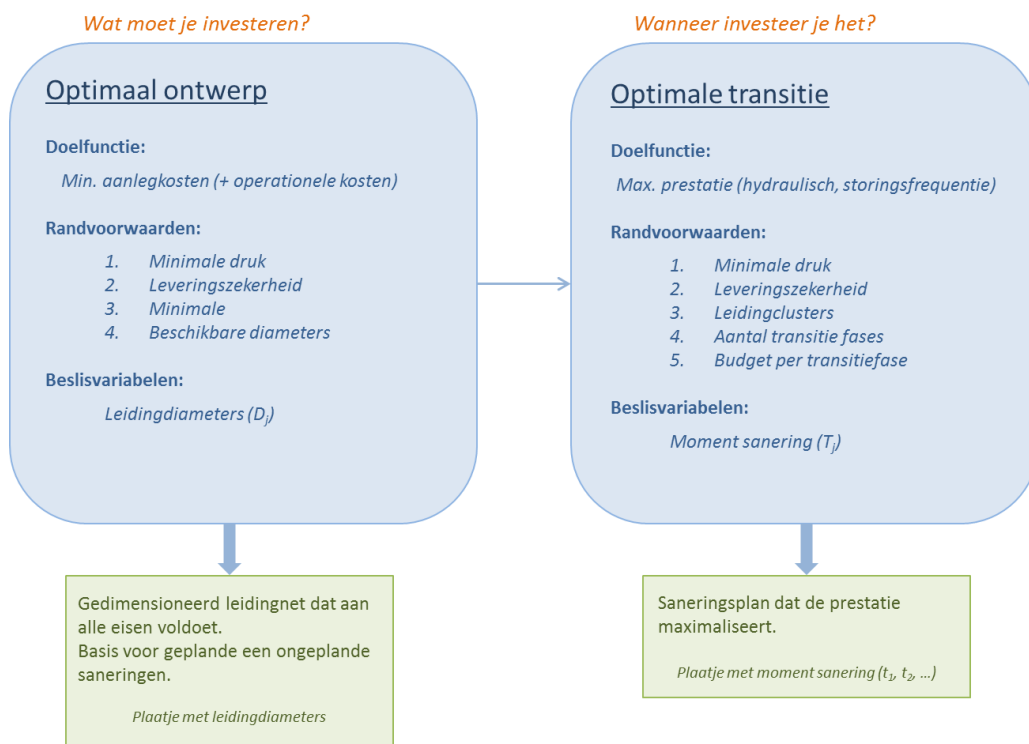
### 4.2 Stapsgewijze Benadering

Figuur 11 biedt een schematisch overzicht van de voorgesteld benadering voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren. De benadering komt overeen met linker plaatje in Figuur 7.

De eerste stap in de benadering is het ontwerp van de streefstructuur. Hierbij geldt de vraag wat moet worden geïnvesteerd om een goed presterend net te aan te leggen. De doelfunctie is daarom het minimaliseren van aanlegkosten (en eventueel operationele kosten), onder een set van prestatie-randvoorwaarden zoals bv. leveringszekerheid, druk- en snelheidseisen, en de keuze uit beschikbare diameters. De beslisvariabelen zijn de leidingdiameters, die kunnen worden gekozen uit een set van beschikbare diameters. Het resultaat van deze optimalisatie is een gedimensioneerd leidingnet, de streefstructuur (of eindplaatje met de optimale diameters voor alle leidingen in het model) dat aan alle randvoorwaarden voldoet en ook nog het goedkoopste is.

De tweede stap in de benadering is het bepalen van de optimale transitie van de huidige structuur naar de optimale streefstructuur. Hierbij geldt de vraag van hoe de investering het beste kan worden verdeeld over de tijd (wat moet worden geïnvesteerd is al in de eerste stap bepaald). Dit kan worden vertaald in een doelfunctie die de prestatie maximaliseert. De prestatie kan gebaseerd zijn op hydraulische indicatoren, zoals bv. het zo goed mogelijke halen van de drukeis tijdens de transitie, of op een zo hoog mogelijke reductie van de storingsfrequentie, of een combinatie van beide. De randvoorwaarden die hierbij gelden zijn het aantal transitiefases (bv. voor een tijdshorizon van 30 jaar kunnen 30 fases van één jaar

of 15 fases van 2 jaar in aanmerking worden genomen), het beschikbare budget per transitiefase en het aantal afsluitersecties per transitiefase. De afsluitersecties zijn de locaties waar gesaneerd wordt en worden gedefinieerd aan de hand van de afsluiters in het model. Zonder deze randvoorwaarde zou het optimalisatiealgoritme met een (ongewenste) oplossing kunnen komen waarin er in een transitiefase bv. op 1000 verschillende locaties wordt gesaneerd om 1 meter leiding te vervangen. De randvoorwaarde geeft dus aan op hoeveel locaties gesaneerd wordt per transitiefase. De beslisvariabelen zijn de saneringsmomenten waarin de leidingen worden gesaneerd. Het resultaat van deze optimalisatie is een transitieplan (optimale vervangingsmoment voor elke afsluitersectie in het model), dat aan alle randvoorwaarde voldoet en de prestatie maximaliseert.



FIGUUR 11. SCHEMATISCH OVERZICHT VAN DE STAPSGEWIJZE BENADERING VOOR HET ONTWERP VAN EN TRANSITIE NAAR STREEFSTRUCTUREN.

## 5 Uitbreiding Gondwana

Gondwana is uitgebreid met functionaliteit om de stapsgewijze benadering door te kunnen rekenen. De uitbreiding was voornamelijk nodig om de transitie van de huidige structuur naar de streefstructuur te kunnen optimaliseren (stap 2). Stap 1 (optimaal ontwerp) was al grotendeels geïmplementeerd. Tabel 13 geeft hier een overzicht van.

TABEL 13. UITBREIDING VAN FUNCTIONALITEIT IN GONDWANA.

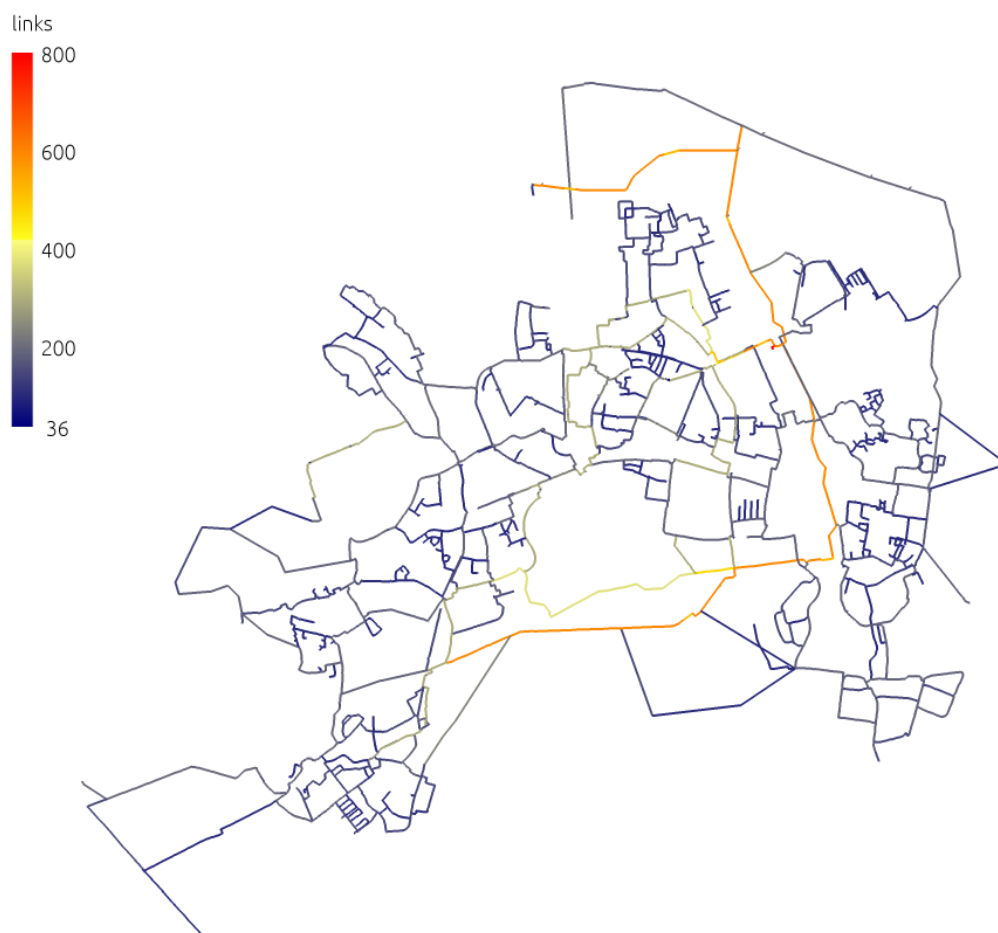
Tabblad	Uitbreiding
Datasets	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inlezen van lijst met leiding ID's en (nieuwe) bijbehorende diameters en wandruwheidscoëfficiënten (o.b.v. het resultaat van de optimalisatie van de streefstructuur).</li> <li>Inlezen van lijst met leiding ID's en bijbehorende reductie van de storingsfrequentie wanneer de leiding wordt vervangen (functie van de storingsfrequentie van de huidige leiding en de nieuwe leiding).</li> </ul>
Beslisvariabelen	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Nieuwe beslisvariabele: de parameter transitie.</b> Hierin wordt het aantal fases gekozen waarin de transitie zal plaatsvinden. Iedere leiding wordt aan een van die fases toegewezen. Op die fase zal een parameter van die leiding (bijvoorbeeld de diameter) worden aangepast volgens de opgegeven lijst (zie hierboven). Dit definieert een volgorde van vervangingsmomenten voor het hele net. Die volgorde zal worden geoptimaliseerd.</li> </ul>
Doelfuncties	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Nieuwe functionaliteit: aggregatie over transitiefases:</b> er is functionaliteit toegevoegd om de prestatie van het net op iedere fase van de transitie uit te rekenen, waarbij voor iedere fase steeds de bijbehorende leidingen worden vervangen. De functionaliteit is zo opgezet dat alle bestaande doelfuncties (bijvoorbeeld de drukeis, de som van een lijst storingsreducties (zie hierboven), of de fragmentatie van transitiefases (zie hieronder)) gevolgd kunnen worden gedurende transitie.</li> <li><b>Nieuwe doelfunctie: fragmentatie van transitiefases.</b> Deze doelfunctie berekent in welke mate de leidingen die worden vervangen in één bepaalde fase van de transitie, naast elkaar liggen. Door de fragmentatie te minimaliseren, minimaliseer je het aantal plaatsen waar de straat open moet tijdens één stap in de transitie.</li> <li><b>Nieuwe doelfunctie: leidinglengte in transitiefases.</b> Deze doelfunctie berekent hoeveel meter leiding vervangen wordt per transitiefase. Met deze doelfunctie kan het vervangingsbudget per transitiefase worden opgelegd.</li> </ul>
Randvoorwaarden	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Nieuwe functionaliteit: aggregatie over transitiefases.</b> Zoals bij de doelfuncties is bij de randvoorwaarden functionaliteit toegevoegd om voor iedere fase in de transitie te controleren of het net op dat moment aan alle vereiste randvoorwaarden voldoet (bijvoorbeeld drukeis).</li> </ul>

Optimization	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Nieuwe randvoorwaarden.</b> De nieuwe functionaliteit die is genoemd bij de Doelfuncties kan ook als randvoorwaarde worden gebruikt.</li><li>• <b>Nieuwe functionaliteit: transitie variatoren.</b> Er is functionaliteit toegevoegd om mutatie en crossover toe te passen op de 'parameter transitie' beslisvariabele (zie hierboven). De mutatie en crossover brengen variatie aan in de verdeling van leidingen over de transitiefases. Er zijn ook twee hybride varianten van mutatie toegevoegd om de convergentie van het optimalisatieprobleem te versnellen: één om gericht de fragmentatie van transitiefases te reduceren, en één om de volgorde van transitiefases te variëren zonder de verdeling van leidingen over de fases aan te passen.</li></ul>
Results	<ul style="list-style-type: none"><li>• Figuur met weergave van het moment waarop elke afsluitersectie wordt gesaneerd.</li></ul>
Anders	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Nieuwe functionaliteit: afsluitersecties als bouwsteen.</b> Alle bovenstaande functionaliteit is zo opgezet dat deze toegepast kan worden op afsluitersecties in plaats van individuele leidingen. Op die manier wordt gegarandeerd dat leidingen binnen één sectie allemaal in dezelfde transitiefase worden vervangen. Ook levert dit een aanzienlijke reductie in benodigde rekentijd op.</li><li>• verbetering van de rekensnelheid en reductie van het verbruik van werkgeheugen.</li></ul>

## 6 Casestudy

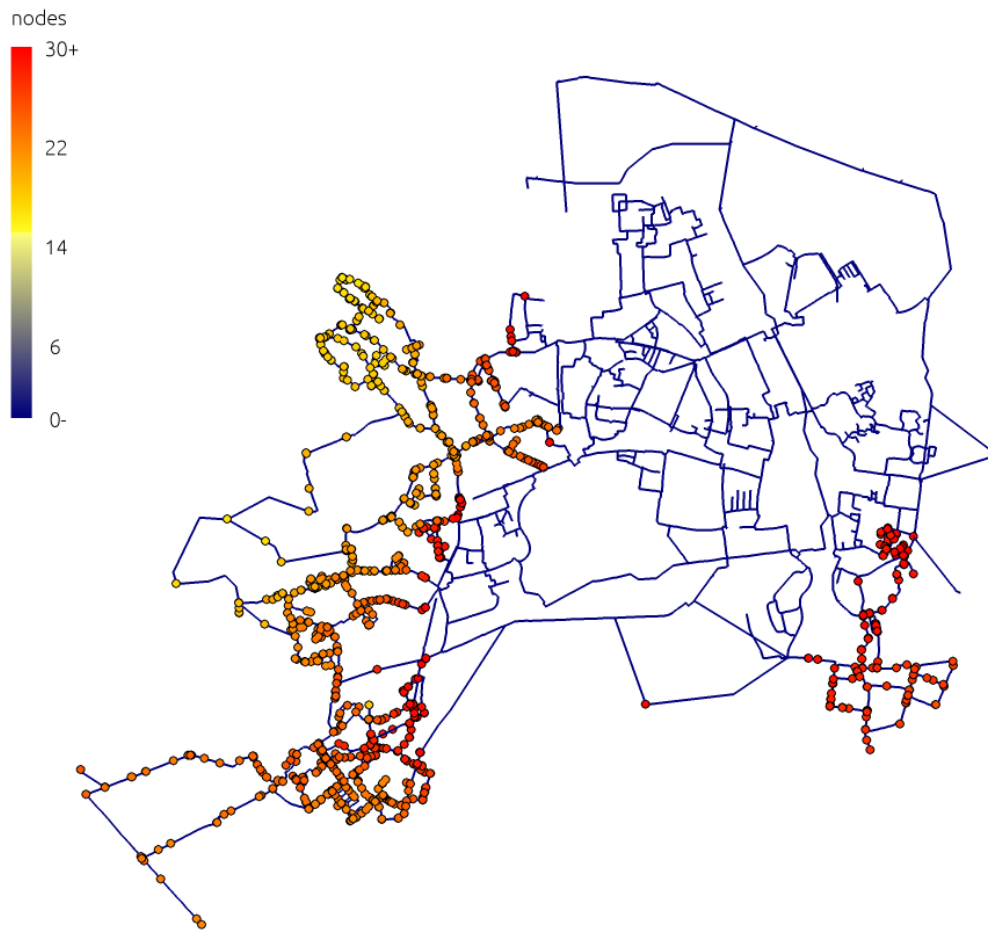
### 6.1 Proefmodel

De uitgewerkte stapsgewijze benadering voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren is toegepast op het netwerkmodel van Helmond-Mierlo (Brabant Water) als casestudy (zie Figuur 12). Dit netwerk levert water aan ca. 105.000 inwoners en bestaat uit 14775 knopen, 11975 leidingen, 5 reservoirs en 3877 afsluiters.



FIGUUR 12. NETWERKMODEL VAN HELMOND-MIERLO (BRABANT WATER). DE VERSCHILLENDE KLEUREN GEVEN DE HUIDIGE LEIDINGDIAMETERS AAN.

Het volume van het huidige ontwerp is 8803 m<sup>3</sup>. Brabant Water hanteert een gewenste druk van minimaal 300 kPa op alle knopen van het secundair netwerkmodel (tijdens max-uur van max-dag). Figuur 13 laat de knopen zien waar deze streefwaarde momenteel niet gehaald wordt.



FIGUUR 13. KNOPEN WAAR DE DRUK OP MAX-UUR LAGER IS DAN 30 MWK (300 KPA) IN HET HUIDIG NETWERK. DE VERSCHILLENDE KLEUREN GEVEN DE DRUK (MWK) OP DEZE KNOPEN AAN.

## 6.2 Invoergegevens

Voor de optimalisatie in Gondwana zijn de volgende door Brabant Water aangeleverde invoergegevens gebruikt:

- a) representatief en werkend hydraulisch model van Helmond-Mierlo in EPANET;
- b) beschikbare (inwendige) diameters, materialen en wandruwheidscoëfficiënten.

Op basis van de aangeleverde diameters is een lijst van diameters opgesteld waaruit gekozen mag worden voor de optimalisatie van de streefstructuur (Tabel 14).



TABEL 14. LIJST MET DIAMETERS EN MATERIAL WAARUIT GESELECTEERD KAN WORDEN VOOR DE OPTIMALISATIE VAN DE STREEFSTRUCTUUR.

inwendige diameter (mm)	materiaal	inwendige diameter (mm)	materiaal	inwendige diameter (mm)	materiaal
0.00001	-	87.3	PVC	299.6	PVC
13.2	PVC	100.6	PVC	327	PE
16.8	PVC	104.6	PVC	368	PE
21.2	PVC	130.8	PE	376.6	PVC
27.2	PVC	152.0	PVC	409	PE
36.0	PVC	163.6	PE	458	PE
48.0	PVC	190.2	PVC	470.8	PVC
55	PE	204.4	PE	515	PE
59	PVC	237.6	PVC	593.3	PVC
66	PE	257.6	PE	672.2	Staal
72.8	PVC	290	PVC	767.8	Staal

Daarnaast zijn ook de storingsfrequenties voor ieder leiding in het huidige model bepaald. De leeftijd van de leidingen was niet snel te achterhalen (door verschillen in leiding-ID's tussen het EPANET-model en het GIS), daarom is in overleg met Brabant Water besloten om storingsfrequentie voor ieder leiding in het model te bepalen aan de hand van de diameters en het materiaal van de leidingen (Tabel 15) en ook geen rekening te houden met de toename van de storingsfrequentie over de leeftijd van het net.

TABEL 15. STORINGSFREQUENTIES PER DIAMETERKLASSE EN MATERIAAL UIT USTORE VOOR ALLE DRINKWATERBEDRIJVEN (KWR WATERCYCLE RESEARCH INSTITUTE, 30-05-2017).

Diameter	Materiaal	Storingsfrequentie (storingen/(km.jaar))	Diameter	Materiaal	Storingsfrequentie
[40, 100]	AC	0.0886	[170, 320)	NG	0.0137
[100, 170]	AC	0.0726	[320, 600)	NG	0.0049
[170, 320]	AC	0.0601	[600, 1500)	NG	0.0015
[320, 600]	AC	0.0062	[40, 100)	PE	0.0107
[600, 1500]	AC	0.0017	[100, 170)	PE	0.0252
[40, 100)	GG	0.1068	[170, 320)	PE	0.0195
[100, 170)	GG	0.0605	[320, 600)	PE	0.0079
[170, 320)	GG	0.0361	[40, 100)	PVC	0.0164
[320, 600)	GG	0.0176	[100, 170)	PVC	0.0159
[600, 1500)	GG	0.0205	[170, 320)	PVC	0.0309
[40, 100)	NG	0.0291	[320, 600)	PVC	0.0228
[100, 170)	NG	0.0102	[600, 1500)	PVC	0.0057

## 6.3 Uitvoering

### 6.3.1 Optimalisatieprobleem 1: ontwerp streefstructuur

In Tabel 16 zijn de verschillende aspecten van het optimalisatieprobleem voor het ontwerp van de streefstructuur voor Helmond-Mierlo beschreven. De grenswaarden voor de randvoorwaarden zijn in overleg met Brabant Water vastgesteld. Daarnaast is ook in overleg met Brabant Water besloten om in het kader van dit project de leveringszekerheid niet in aanmerking te nemen. Het in aanmerking nemen van de leveringszekerheid zou extra rekentijd en aanvullende invoergegevens vergen, en geen aanzienlijk verschil maken in de demonstratie van de voorgestelde benadering (doel van de casestudy). In andere projecten (voor bv. PWN) wordt de leveringszekerheid wel in aanmerking genomen.

TABEL 16. OPTIMALISATIEPROBLEEM VOOR HET ONTWERP VAN DE STREEFSTRUCTUUR VOOR HET LEIDINGNETMODEL VAN HELMOND-MIERLO.

Aspect	Beschrijving
Doelfunctie	Minimalisatie van <i>leidingdiameters x leidinglengte</i> gesommeerd over alle leidingen in het model, als surrogaat voor aanlegkosten.
Randvoorwaarden	<p>De gewenste minimale druk op alle knopen van het model is 300 kPa. Oplossingen die hier niet aan voldoen krijgen strafpunten. Hierdoor geeft Gondwana voorkeur aan oplossingen die zo goed mogelijk aan de gewenste druk voldoen.</p> <p>De afgedwongen minimale druk is 280 kPa op de knopen die in het huidige ontwerp aan deze randvoorwaarden voldoen. Oplossingen die hier niet aan voldoen worden door Gondwana afgewezen.</p> <p>De afgedwongen minimale druk is 160 kPa op de knopen die in het huidige ontwerp aan deze randvoorwaarden voldoen. Oplossingen die hier niet aan voldoen worden door Gondwana afgewezen.</p> <p>De gewenste minimale stroomsnelheid in leidingen is eens per dag 0.2 m/s. Oplossingen die hier niet aan voldoen krijgen strafpunten. Hierdoor geeft Gondwana voorkeur aan oplossingen die zo goed mogelijk aan de gewenste snelheid voldoen. De doelfunctie "duwt" oplossingen ook al in deze richting door de leidingdiameters zo klein mogelijk te maken.</p>
Beslisvariabelen	De beslisvariabelen zijn de leidingdiameters voor de nieuwe leidingen. Alle leidingen in het model worden aangepast. De diameters mogen gekozen worden uit een lijst met beschikbare diameters.
Aannames	<p>Leveringszekerheid wordt niet in aanmerking genomen.</p> <p>Verbruik van max-dag wordt in aanmerking genomen voor de simulatie van het model.</p>
Optimalisatieparameters (de betekenis is in Bijlage III toegelicht)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Populatie: 100 individuen;</li> <li>• Startpunt optimalisatie: diameters huidig model;</li> <li>• <i>Selector</i>: <i>tournament</i>, met elitisme gelijk aan 15%;</li> <li>• <i>Crossover</i>: 0.9 (één punt);</li> <li>• <i>Mutation rate</i>: <i>uniform</i> = 0, <i>proximity</i> = 0,01 (proximity level=1), <i>flatiron</i> = 0.1;</li> <li>• Aantal generaties: 4000</li> </ul>

In eerste instantie zijn lage strafpunten toegekend aan de drukeis van 300 kPa (met name: 1 strafpunt per 10 kPa onder de 300 kPa, d.w.z. dat een knoop waar de druk 280 kPa is een totaal van 2 strafpunten krijgt). De analyse van een tussenresultaat heeft laten zien dat dit heeft geleid tot een significante reductie van het volume van het leidingnet, maar dat de gewenste druk op een groot aantal knopen niet werd gehaald. In overleg met Brabant Water is besloten om dit te verhelpen door de strafpunten te verhogen. Het optimalisatieprobleem voor het ontwerp van de streefstructuur is daarom een tweede keer doorgerekend met een hogere waarden voor de strafpunten (1000 strafpunten per 10 kPa onder de 300 kPa) voor een totaal van 400 000 functie evaluaties (aantal individuen in de populatie x aantal generaties).

### 6.3.2 Optimalisatieprobleem 2: transitie

Voor de transitie van de huidige structuur naar de streefstructuur voor Helmond-Mierlo zijn twee optimalisatieproblemen geformuleerd: probleem 2A gericht op de reductie van de storingsfrequentie, en probleem 2B gericht op de hydraulische prestatie. In Tabel 17 zijn de verschillende aspecten van het optimalisatieprobleem 2A beschreven, en in Tabel 18 zijn de verschillende aspecten van het optimalisatieprobleem 2B beschreven.

Het aantal transitiefases dat in aanmerking wordt genomen kan als een jaargetal worden geïnterpreteerd maar ook als een prioriteringslijst. Bijvoorbeeld kunnen 30 transitiefases een 30-jaren plan zijn waarin elke transitiefase de werkzaamheden voor een jaar bevatten, of een prioritering van de 30 stappen die drinkwaterbedrijven in hun eigen tempo kunnen doorlopen om van de huidige structuur naar de streefstructuur te gaan.

Het doorrekenen van de hydraulische prestatie per transitiefase vergt een aanzienlijke toename in de rekentijd. In het kader van dit project is daarom besloten om in probleem 2A de hydraulische prestatie niet in aanmerking te nemen in de randvoorwaarden, en om voor probleem 2B enkel een klein aantal transitiefases en functie-evaluaties door te rekenen.

TABEL 17. OPTIMALISATIEPROBLEEM 2A (REDUCTIE STORINGSFREQUENTIE) VOOR DE TRANSITIE VAN HET HUIDIGE LEIDINGNET VAN HELMOND-MIERLO NAAR DE GEOPTIMALISEERDE STREEFSTRUCTUUR.

Aspect	Beschrijving
Doelfunctie	<p>2 doelfuncties:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Minimalisatie van het aantal te saneren fragmenten ("clusters" van afsluitersecties) per transitiefase. Het leidingnet wordt ingedeeld in afsluitersecties. Per transitiefase wordt uitgerekend welke afsluitersecties worden gesaneerd. Wanneer twee of meer te saneren afsluitersecties aan elkaar liggen vormen deze één fragment. Per transitiefase wordt het aantal te saneren fragmenten berekend en hoe kleiner dit getal hoe beter. Dit representeert 'op hoeveel verschillende plaatsen er per jaar gegraven moet worden'.</li> <li>Maximalisatie van het aantal voorkomen storingen. De doelfunctie berekent hoeveel minder storingen er tijdens de transitieperiode optreden in het netwerk dat een transitie doormaakt, ten opzichte van een net dat gedurende de hele transitieperiode niet zou veranderen. Effectief is de uitkomst van de doelfunctie dus: het aantal storingen dat wordt bespaard door de transitie in deze volgorde uit te voeren (d.w.z. het leidingnet te saneren).</li> </ul>
Randvoorwaarden	<p>De minimale leidinglengte die per transitiefase moet worden gesaneerd is 4.5 km. Op deze manier wordt er recht gedaan aan het feit dat er in iedere stap van de transitie ongeveer evenveel moet worden aangepast i.v.m. saneringsbudgetten.</p>
Beslisvariabele	<p>De beslisvariabele is de transitiefase waarin elke afsluitersectie wordt gesaneerd. Het aantal transitiefases dat in aanmerking wordt genomen is 30. D.w.z. dat het hele net in 30 stappen wordt gesaneerd (bv. een 30-jaren plan).</p>
Aannames	<p>De storingsfrequenties zijn afhankelijk van de diameter en materiaal van de leidingen, maar onafhankelijk van de leeftijd. D.w.z. dat bv. wanneer een oude PVC leiding wordt vervangen door een nieuwe PVC leiding van dezelfde diameterklasse er geen reductie van het aantal storingen is.</p> <p>De reductie van het aantal storingen is uitgerekend als:  <math>(\text{storingsfrequentie huidige leiding} - \text{storingsfrequentie nieuwe leiding}) \times \text{leidinglengte} \times \text{aantal transitiefases}</math>.</p> <p>Aanname is dat dit getal constant blijft gedurende de hele transitie. De drukeis wordt niet gecontroleerd in de transitiefases wegens rekentijd.</p>
Optimalisatieparameters	<ul style="list-style-type: none"> <li>Populatie: 100 individuen;</li> <li><i>Selector</i>: <i>tournament</i>, met elitisme gelijk aan 33%;</li> <li><i>Crossover</i>: 0.1 (één punt);</li> <li><i>Mutation rate</i>: <i>uniform</i> = 0.002, <i>proximity</i> = 0.3 (proximity level = 1), <i>flatiron</i> = 0.4;</li> <li>Aantal generaties: 1000</li> </ul>

TABEL 18. OPTIMALISATIEPROBLEEM 2B (HYDRAULISCHE PRESTATIE) VOOR DE TRANSITIE VAN DE HUIDIGE LEIDINGNET VAN HELMOND-MIERLO NAAR DE GEOPTIMALISEERDE STREEFSTRUCTUUR.

Aspect	Beschrijving
Doelfunctie	<p>2 doelfuncties:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Minimalisatie van het aantal te saneren fragmenten ("clusters" van afsluitersecties) per transitiefase. Het leidingnet wordt ingedeeld in afsluitersecties. Per transitiefase wordt uitgerekend welke afsluitersecties worden gesaneerd. Wanneer twee of meer te saneren afsluitersecties aan elkaar liggen vormen deze één fragment. Per transitiefase wordt het aantal te saneren fragmenten berekend en hoe kleiner dit getal hoe beter.</li> <li>Minimalisatie van de strafpunten voor het niet halen van de gewenste minimale druk (300 kPa). Per transitiefase wordt gekeken naar het aantal knopen waar de druk onder de 300 kPa is. Deze knopen krijgen strafpunten, en deze strafpunten worden over alle transitiefases gesommeerd. Deze som wordt geminimaliseerd. Hierdoor geeft Gondwana voorkeur aan oplossingen die zo goed mogelijk aan de gewenste druk voldoen.</li> </ul>
Randvoorwaarden	De minimale leidinglengte dat per transitiefase moet worden gesaneerd is 4.5 km.
Beslisvariabele	De beslisvariabele is de transitiefase waarin elke afsluitersectie wordt gesaneerd. Het aantal transitiefases dat in aanmerking wordt genomen is 10. D.w.z. dat het hele net in 10 stappen wordt gesaneerd (bv. een 10-jaren plan).
Optimalisatieparameters	<ul style="list-style-type: none"> <li>Populatie: 45 individuen;</li> <li><i>Selector: tournament</i>, met elitisme gelijk aan 33%;</li> <li><i>Crossover</i>: 0.1 (één punt);</li> <li><i>Mutation rate: uniform</i> = 0.002, <i>proximity</i> = 0.3 (proximity level = 1), <i>flatiron</i> = 0.4;</li> <li>Aantal generaties: 1000 .</li> </ul>

## 6.4 Resultaten

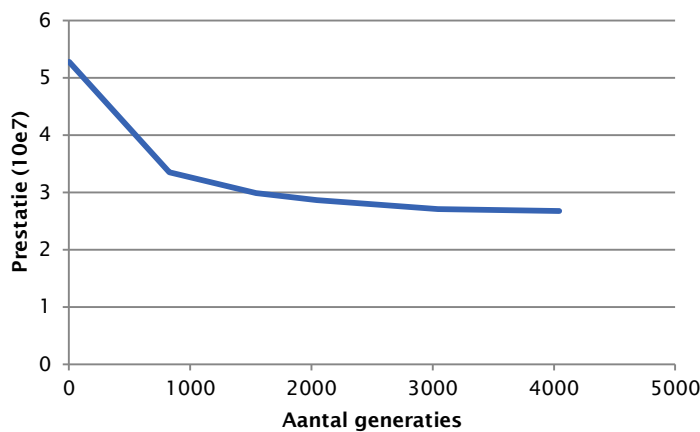
### 6.4.1 Ontwerp (stap 1)

Tabel 19 bevat een samenvatting van de verkregen resultaten aan het einde van 400 000 doorgerekende functie evaluaties van het optimalisatieproces (4000 generaties x 100 individuen). Het proces is in de aantal doorgerekende generaties niet volledig uitgeconvergeerd (zie Figuur 14). Dit betekent dat er nog (beperkt) ruimte is voor verbetering en een slanker leidingnet mogelijk is. In het kader van dit project is besloten om de berekeningen hierbij te laten. De verkregen resultaten zijn voldoende om de benadering te demonstreren. In een toepassing in de praktijk zou het doorrekenen van het optimalisatieprobleem tot convergentie wenselijk zijn. Indien de leveringszekerheid in aanmerking zou zijn genomen, zou naar verwachting het volume van het geoptimaliseerd ontwerp iets groter zijn.

TABEL 19. RESULTATEN VOOR HET LEIDINGNET VAN HELMOND-MIERLO VOOR EN NA DE OPTIMALISATIE.

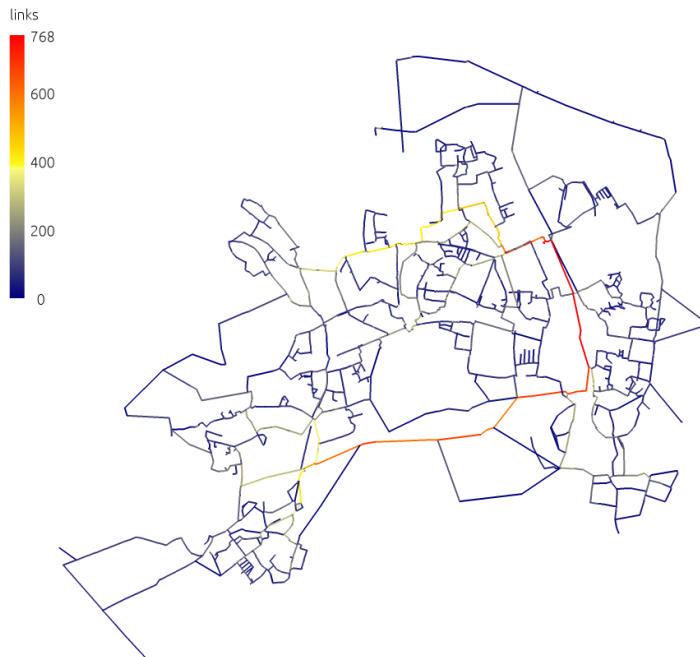
	Huidig netwerk	Geoptimaliseerd ontwerp
Prestatie (Diameter x Leidinglengte + strafpunten)	5.276x10 <sup>7</sup>	2.763x10 <sup>7</sup>
Strafpunten voor het niet halen van de drukeis van 300 kPa	9812	360
Diameter x Leidinglengte	4.112x10 <sup>7</sup>	2.64x10 <sup>7</sup>
Volume leidingen	8803 m <sup>3</sup>	6004 m <sup>3</sup>
<b>Benadering aanlegkosten</b>	<b>41.1 M€</b>	<b>26.4 M€</b>

Voor de huidige resultaten geldt dat indien er voor de leidingkosten een meterprijs van 1 euro per mm diameter wordt gehanteerd, de kosten van het geoptimaliseerd ontwerp circa 26.4 miljoen euro zouden bijdragen, terwijl de kosten van het huidige netwerk circa 41.1 miljoen euro bijdragen.

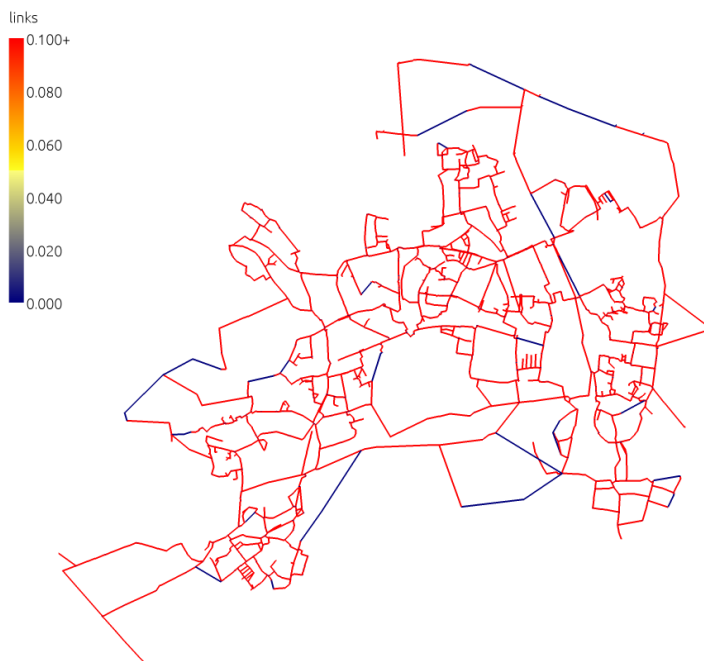


FIGUUR 14. RECONSTRUCTIE VAN DE CONVERGENTIECURVE VAN HET OPTIMALISATIEPROCES. DE VORM VAN DE CURVE LAAT ZIEN DAT ER NOG GEEN CONVERGENTIE IS BEREIKT (DE LIJN IS NOG NIET HORIZONTAAL). DIT BETEKENT DAT ER NOG RUIMTE VOOR VERBETERING IS INDIEN ER MEER GENERATIES WORDEN DOORGEREKEND.

In Figuur 15 zijn de leidingdiameters van het geoptimaliseerd ontwerp voor Helmond-Mierlo geïllustreerd. Omdat de leveringszekerheid niet in aanmerking wordt genomen, worden in het optimalisatieproces enkele leidingen verwijderd uit het model (d.w.z. dat aan deze leidingen een diameter nul wordt toegekend). Deze zijn in Figuur 16 in het blauw geïdentificeerd. Het verschil tussen de huidige leidingdiameters en de geoptimaliseerde leidingdiameters is in Figuur 17 geïllustreerd.



FIGUUR 15. LEIDINGDIAMETERS VAN HET GEOPTIMALISEERD ONTWERP VOOR HELMOND-MIERLO. DE KLEURENSCHAAL GEEFT DE DIAMETERS IN MM AAN.



FIGUUR 16. LEIDINGEN DIE EEN DIAMETER NUL KRIJGEN IN HET OPTIMALISATIEPROCES ZIJN IN BLAUW WEERGEGEVEN. DEZE LEIDINGEN WORDEN UIT HET MODEL VERWIJDERD.

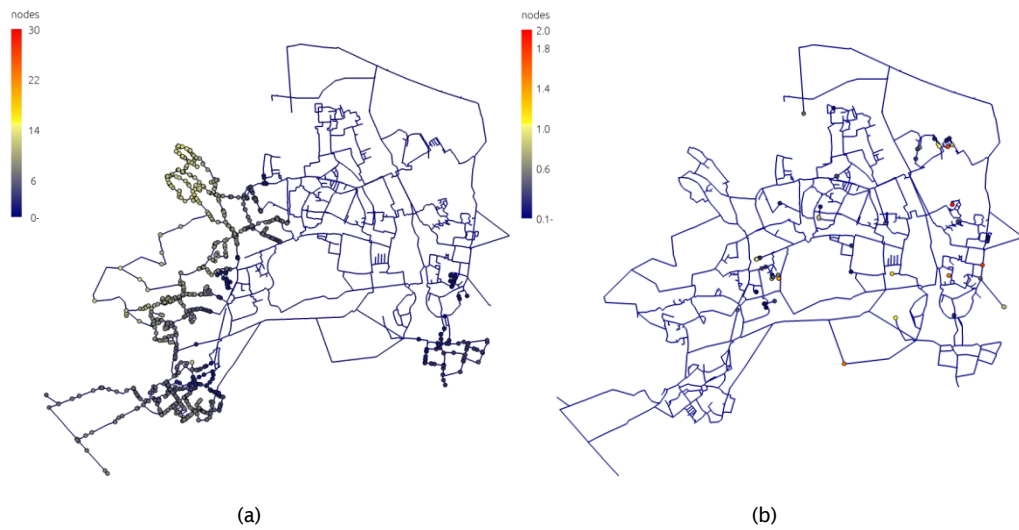


FIGUUR 17. VERSCHIL IN LEIDINGDIAMETERS TUSSEN HET HUIDIGE LEIDINGNET EN HET GEOPTIMALISEERD ONTWERP VOOR HELMOND-MIERLO. DE KLEURENSCHAAL GEEFT DE TOENAME (ROOD) OF AFNAME (BLAUW) VAN DIAMETERS AAN. HOE DONKERDER DE KLEUR HOE GROTER HET VERSCHIL. DIAMETERS DIE NIET WORDEN VERANDERD ZIJN IN ZWART.

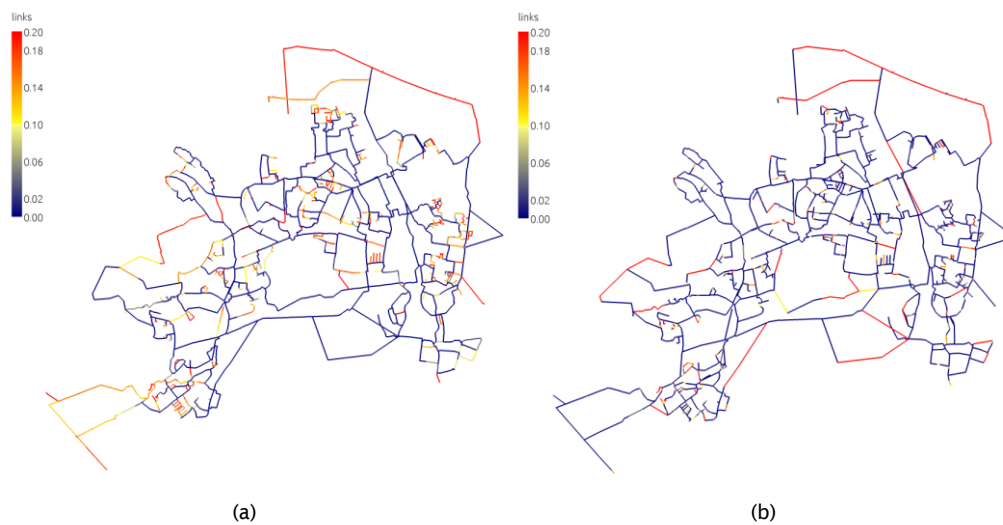
In Figuur 18 zijn de knopen waar de gewenste druk van 300 kPa niet wordt gehaald getoond, voor zowel het huidige als het geoptimaliseerd ontwerp. Hieruit is te zien dat het aantal knopen waar de gewenste druk niet wordt gehaald significant lager is in het geoptimaliseerd ontwerp. De mate waarin de druk niet wordt gehaald daalt ook aanzienlijk: in de huidige situatie kan het verschil tussen de minimale en gewenste druk tot 130 kPa oplopen, terwijl in het geoptimaliseerd ontwerp de minimale druk met maximaal 20 kPa onder de gewenste druk ligt. In totaal betekent dit dat de strafpunten voor het niet bereiken van de gewenste druk in het geoptimaliseerd ontwerp slechts 3% zijn van de strafpunten in het huidige ontwerp.

In Figuur 19 wordt de overtreding van de snelheidsrandvoorwaarden geïllustreerd. De kleur geeft aan in hoeverre de snelheidseis niet wordt gehaald. Voor leidingen in het blauw is de overtreding nul, d.w.z. dat de minimale snelheid van 0.2 m/s eens per dag wordt gehaald. Voor leidingen in het oranje en rood is de snelheid het laagste, d.w.z. dat de minimale snelheid niet wordt gehaald. Door de verkleining van het net is het aantal leidingen waarin de snelheidseis niet wordt gehaald lager in het geoptimaliseerd ontwerp dan in het huidige net. Let hierbij op dat verschillende leidingen in het rood in feite leidingen zijn die niet meer in het model zitten (de snelheid wordt niet gehaald omdat de leiding er niet ligt).





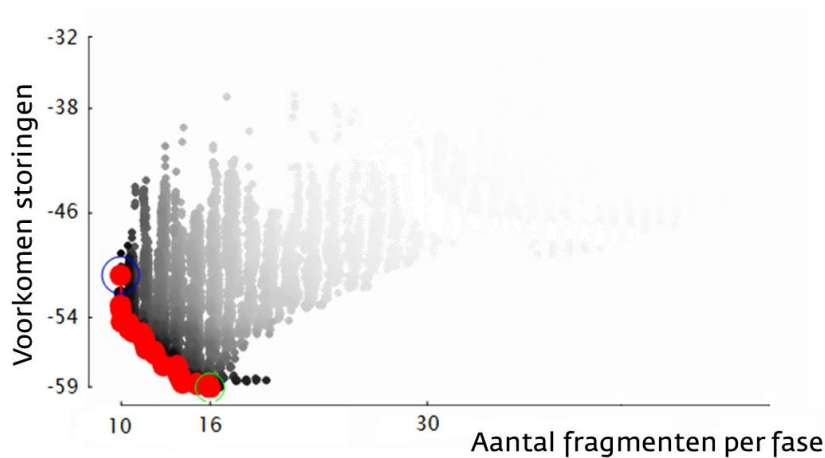
FIGUUR 18. KNOPEN WAAR DE DRUKEIS VAN 300 KPA NIET WORDT GEHAALD VOOR HET (A) HUIDIGE LEIDINGNET EN (B) GEOPTIMALISEERD ONTWERP. DE KLEURENSCHAAL GEEFT DE TOTALE SCHENDING VAN DE DRUKEIS AAN.



FIGUUR 19. OVERTREDING VAN DE MINIMALE SNELHEIDSEIS IN DE LEIDINGEN VOOR HET (A) HUIDIGE LEIDINGNET EN (B) GEOPTIMALISEERD ONTWERP. DE SCHAAL GEEFT AAN IN HOEVERRE DE SNELHEIDSEIS NIET GEHAALD IS: BIJ LEIDINGEN IN HET BLAUW (0) WORDT DE MINIMALE SNELHEID GELIJK AAN 0.2 M/S EENS PER DAG GEHAALD. BIJ LEIDINGEN IN HET ORANJE EN ROOD IS DE SNELHEID HET LAAGSTE. DE GETALLEN GEVEN DE MATE VAN ONDERSCHRIJDING WEER (IN M/S).

#### 6.4.2 Transitie 2A (stap 2)

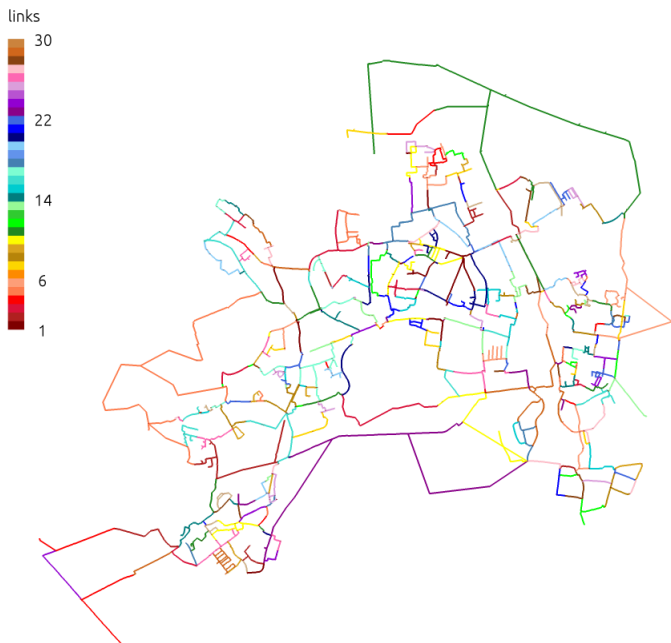
Voor de transitie van de huidige netstructuur naar de streefstructuur zijn twee doelfuncties in aanmerking genomen. Dit betekent dat niet één resultaat, zoals bij het ontwerp, maar een reeks van resultaten in de vorm van een Pareto-curve zijn verkregen. Figuur 20 illustreert de Pareto-curve voor probleem 2A na 100 000 doorgerekende functie-evaluaties. Elke rode punt op de Pareto-curve is een optimale combinatie van het aantal te saneren fragmenten (x-as) en hoeveel minder storingen er optreden door het uitvoeren van de transitie (y-as).



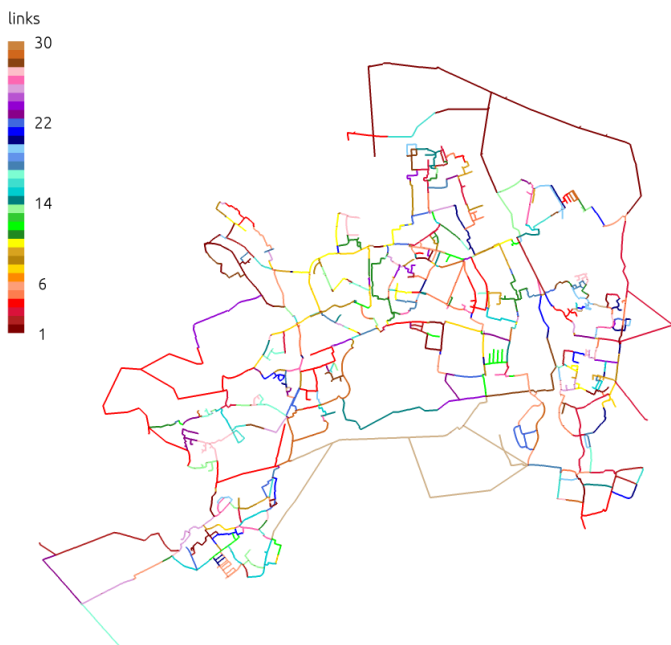
FIGUUR 20. IN HET ROOD IS DE PARETOCURVE TUSSEN HET GEMIDDELTE AANTAL TE SANEREN FRAGMENTEN PER TRANSITIEFASE (X-AS) EN HOEVEEL MINDER STORINGEN OPTREDEN (Y-AS) WEERGEGEVEN. TWEE SPECIFIEKE OPLOSSINGEN ZIJN GEMARKEERD VOOR VERDERE TOELICHTING: OPLOSSING MET EEN BLAUWE CIRKEL EN OPLOSSING MET EEN GROENE CIRKEL. DE GRIJZE PUNTENWOLK ZIJN DE OPLOSSINGEN VAN EERDERE GENERATIES IN HET OPTIMALISATIEPROCES. DE GRIJZE PUNTENWOLK IS GECONVERGEERD IN DE RODE PARETOCURVE.

Aan de hand van de gemaakte aannames zou een totaal van ca. 115 storingen over 30 jaar kunnen worden bespaard indien de huidige structuur in één keer zou worden vervangen door de streefstructuur. Het vervangen van het hele net in één keer is uiteraard niet realistisch. Met de geleidelijke vervanging van de huidige structuur gedurende 30 jaar kunnen in totaal tussen de 51 en 59 storingen worden bespaard (blauwe en groene oplossing, respectievelijk). Hierbij horen verschillende aantal te saneren fragmenten: gemiddeld 10 a 16 fragmenten per transitiefase voor respectievelijk de blauwe en groene oplossing. De Paretocurve maakt de afweging tussen het aantal te besparen storingen en het aantal locaties waar moet worden gegraven duidelijk: van 59 storingen verwijderen door gemiddelde 16 fragmenten per transitiefase te saneren, tot 51 (-14%) storingen te verwijderen door gemiddelde 10 fragmenten (-60%) per transitiefase te saneren. Hiermee kunnen drinkwaterbedrijven de oplossing kiezen die het beste aansluit aan de behoeftes.

Figuur 21 en Figuur 22 illustreren de transitiefases waarin elke afsluitersectie wordt gesaneerd voor respectievelijk de oplossing gemarkeerd met een blauwe en een groene cirkel in de Paretocurve. Als voorbeeld is een deel van de lijst van leidingen die in elke fase worden gesaneerd weergegeven in Bijlage IV.



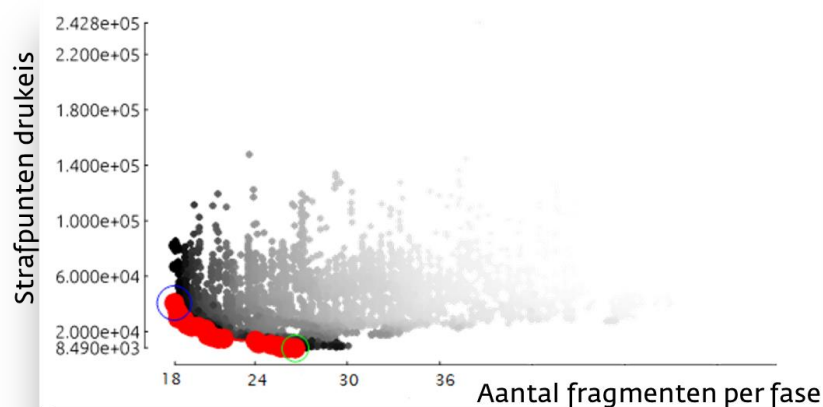
FIGUUR 21. TRANSITIEFASE WAARIN ELKE AFSLUITERSECTIE WORDT GESANEERD VOOR DE OPLOSSING GEMARKEERD MET EEN BLAUWE CIRKEL IN DE PARETOCURVE. ELKE TRANSITIEFASE WORDT DOOR EEN KLEUR GEÏDENTIFICEERD. LEIDINGEN MET DEZELFDE KLEUR WORDEN IN DEZELFDE TRANSITIEFASE GESANEERD.



FIGUUR 22. TRANSITIEFASE WAARIN ELKE AFSLUITERSECTIE WORDT GESANEERD VOOR DE OPLOSSING GEMARKEERD MET EEN GROENE CIRKEL IN DE PARETOCURVE. ELKE TRANSITIEFASE WORDT DOOR EEN KLEUR GEÏDENTIFICEERD. LEIDINGEN MET DEZELFDE KLEUR WORDEN IN DEZELFDE TRANSITIEFASE GESANEERD.

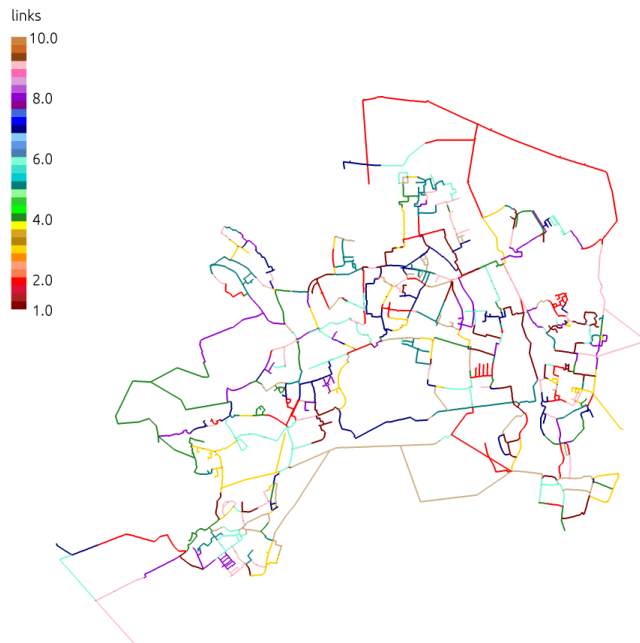
### 6.4.3 Transitie 2B (stap 2)

Figuur 23 illustreert de Paretocurve voor probleem 2B na 45 000 doorgerekende functie-evaluaties. Elke rode punt op de Paretocurve is een optimale combinatie van het aantal te saneren fragmenten (x-as) en het aantal strafpunten voor het niet halen van de gewenste druk (300 kPa) gesommeerd over de hele transitieperiode (y-as). In dit geval zijn enkel 10 transitiefases doorgerekend. Dit kan worden uitgebreid naar een groter aantal transitiefases wanneer er meer rekentijd beschikbaar is. In het kader van dit project is besloten om de berekeningen hierbij te laten. De verkregen resultaten zijn voldoende om de benadering te demonstreren.

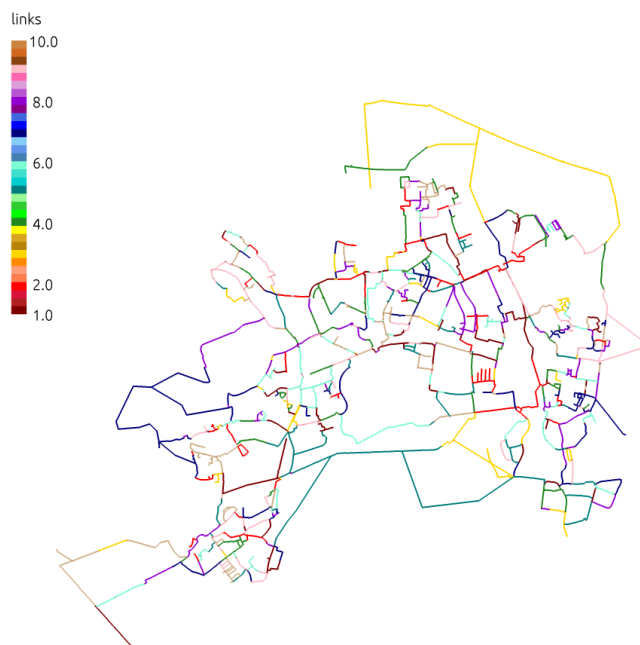


FIGUUR 23. IN HET ROOD IS DE PARETOCURVE TUSSEN HET GEMIDDELDE AANTAL TE SANEREN FRAGMENTEN PER TRANSITIEFASE (X-AS) EN HET AANTAL STRAFPUNTEN VOOR HET NIET HALEN VAN DE DRUKEIS (Y-AS) WEERGEGEVEN. TWEE SPECIFIEKE OPLOSSINGEN ZIJN GEMARKEERD VOOR VERDERE TOELICHTING: OPLOSSING MET EEN BLAUWE CIRKEL EN OPLOSSING MET EEN GROENE CIRKEL. DE GRIJZE PUNTENWOLK ZIJN DE OPLOSSINGEN VAN EERDERE GENERATIES IN HET OPTIMALISATIEPROCES. DE GRIJZE PUNTENWOLK IS GECONVERGEERD IN DE RODE PARETOCURVE.

Voor elke 10 kPa onder de 300 kPa is een strafpunt toegekend aan het leidingnet. Aan de hand van de gemaakte aannames zou een totaal van  $9.8 \times 10^5$  worden toegekend aan de huidige structuur indien deze niet zou worden vervangen (dit zijn de strafpunten van het huidige leidingnet gesommeerd over 10 transitiefases). Indien de huidige structuur in één keer zou worden vervangen door de streefstructuur zou het totaal aantal strafpunten over 10 transitiefases gelijk zijn aan 3600 (dit zijn de strafpunten van het geoptimaliseerd ontwerp gesommeerd over 10 transitiefases). Met de geleidelijke vervanging van de huidige structuur in 10 transitiefases worden in totaal tussen de 8490 en 40000 strafpunten toegekend aan het leidingnet (blauwe en groene oplossing, respectievelijk). Hierbij horen verschillende aantal te saneren fragmenten: gemiddeld 18 a 26 fragmenten per transitiefase, respectievelijk voor de blauwe en groene oplossing. Om minder strafpunten te krijgen moet op aanzienlijk meer locaties worden gegraven per transitiefase. Het aantal fragmenten per transitiefase kan ook worden gereduceerd door de transitie op te delen in meer transitiefases. De Paretocurve maakt de afweging tussen het aantal strafpunten en het aantal locaties waar moet worden gegraven duidelijk. Hiermee kunnen drinkwaterbedrijven de oplossing kiezen die het beste aansluit op de behoefte. Figuur 24 en Figuur 25 illustreren de transitiefases waarin elke afsluitersectie wordt gesaneerd voor respectievelijk de oplossing gemarkeerd met een blauwe en een groene cirkel in de Paretocurve.



FIGUUR 24. TRANSITIEFASE WAARIN ELKE AFSLUITERSECTIE WORDT GESANEERD VOOR DE OPLOSSING GEMARKEERD MET EEN GROENE CIRKEL IN DE PARETOCURVE. ELKE TRANSITIEFASE WORDT DOOR EEN KLEUR GEÏDENTIFICEERD. LEIDINGEN MET DEZELFDE KLEUR WORDEN IN DEZELFDE TRANSITIEFASE GESANEERD.



FIGUUR 25. TRANSITIEFASE WAARIN ELKE AFSLUITERSECTIE WORDT GESANEERD VOOR DE OPLOSSING GEMARKEERD MET EEN GROENE CIRKEL IN DE PARETOCURVE. ELKE TRANSITIEFASE WORDT DOOR EEN KLEUR GEÏDENTIFICEERD. LEIDINGEN MET DEZELFDE KLEUR WORDEN IN DEZELFDE TRANSITIEFASE GESANEERD.

## 6.5 Discussie

Tijdens het uitvoeren van de casestudy zijn tussenresultaten voor zowel het ontwerp van als de transitie naar de streefstructuur besproken met Brabant Water. Deze overlegmomenten hebben duidelijk gemaakt hoe belangrijk het is om tussenresultaten van optimalisatieprocessen tijdig en in overleg met drinkwaterbedrijven te interpreteren en op basis daarvan de optimalisatieproblemen aan te scherpen. Het evalueren van tussenresultaten helpt drinkwaterbedrijven om de invloed van keuzes rondom doelen en randvoorwaarden goed te begrijpen, omdat ze in praktische vorm worden geïllustreerd. Dit helpt drinkwaterbedrijven om de meest geschikte keuzes te maken met betrekking tot het optimalisatieprobleem. Zo is bv. voor de casestudy besloten om (1) de straffpunten voor het niet halen van de drukeis te verhogen voor het ontwerp van de streefstructuur, en (2) naast de transitie op basis van de storingsreductie, ook de transitie op basis van de hydraulische prestatie van het net uit te voeren.

Wat betreft de transitie, blijkt dat juist het optimaliseren van hydraulische-gedreven saneringsmomenten van toegevoegde waarde is, omdat hydraulische aspecten nog niet in de huidige praktijk in aanmerking worden genomen. Wanneer de reductie van het aantal storings in aanmerking wordt genomen om de transitie van de huidige structuren naar streefstructuren te optimaliseren is het van belang om de leeftijd van leidingen en storingsvoorspelling (Van Vossen en van Laarhoven, 2017) in aanmerking te nemen, naast het materiaal en diameterklasse.

Voor drinkwaterbedrijven is het waardevol als Gondwana helpt om de transitie naar de streefstructuur zo glad mogelijk te laten verlopen. Hiervoor is een goede aansluiting van de optimaliseringsresultaten op het BOS dat door de drinkwaterbedrijven wordt gebruikt van groot belang. In de praktijk kan veelal een bepaalde leiding door een kleinere diameter worden vervangen, maar is er om hydraulische redenen geen directe noodzaak om de leiding te vervangen. De reden om een leiding te vervangen zal veelal eerder komen door de kans op falen en bijkomend potentieel effect. Dit is afkomstig van het BOS en andere input zoals conditiebepalingen. Echter heeft het vervangen van de leiding wel een invloed op de hydraulische prestatie van het net. Het helpt drinkwaterbedrijven als Gondwana naast de prioritering van vervangingsprojecten door o.a. het BOS, aangeeft in welke volgorde hydraulische knelpunten uit de streefstructuur, tijdens de transitiestappen, extra moeten worden meegenomen om aan de hydraulische randvoorwaarden te voldoen. Tijdens de transitiestappen aangeleverd door het BOS mag dit op zijn minst niet gaan verslechteren. Zo kan Gondwana met de doorkijk van een jaarlijks vervangingsprogramma aandachtspunten meegeven om de transitie naar de streefstructuur vlekkeloos te laten verlopen. Een andere optie zou zijn om de vervangingsprioritering vanuit het BOS in Gondwana op te nemen en Gondwana elk project bv. 2 jaar naar voor dan wel naar achter te laten schuiven zodat een hydraulische beste volgorde ontstaat van het vervangingsprogramma.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

### 7.1 Conclusies

In dit onderzoek is aangetoond dat zowel het ontwerp van streefstructuren als de transitie van de huidige structuur naar de streefstructuur kunnen worden beschreven in de vorm van optimalisatieproblemen. Hiervoor is (1) een flinke stap vooruit gezet met enerzijds betere en duidelijkere handvatten voor invoer, randvoorwaarden, doelen en beslisvariabelen om optimalisatieproblemen te definiëren, en (2) Gondwana uitgebreid voor de optimalisatie van de transitie naar streefstructuren o.b.v. storingen en hydraulische prestatie, zodanig dat per afsluitersectie het optimale saneringsmoment wordt bepaald.

Een mogelijke benadering voor het ontwerp van en transitie naar van streefstructuren is uitgewerkt en toegepast op een casestudy, het leidingnet van Helmond-Mierlo. Het volume van de geoptimaliseerde streefstructuur is slechts 68% van het volume van het huidige leidingnetwerk, en kan nog (beperkt) verder worden verkleind indien het optimalisatieproces langer wordt doorgerekend. In een grove benadering dalen de aanlegkosten, zou het net nu volledig worden aangelegd, van 41.1 naar 26.4 M€. Het aantal knooppunten waar de gewenste drukeis niet wordt gehaald daalt ook aanzienlijk. In deze casestudy is gekozen om de leveringszekerheid niet in aanmerking te nemen. Het in aanmerking nemen van de leveringszekerheid zou mogelijk tot andere resultaten kunnen leiden. Wat betreft de transitie zijn twee situaties uitgewerkt: (1) een Pareto-curve tussen het aantal locaties waar saneringswerkzaamheden moeten plaatsvinden per transitiefase en het aantal storingen dat hiermee kan worden bespaard, en (2) een Pareto-curve tussen het aantal locaties waar saneringswerkzaamheden moeten plaatsvinden en het totaal aantal strafpunten voor het niet halen van de gewenste drukeis. Beide curves maken de afweging tussen de doelfuncties inzichtelijk. Hiermee kunnen drinkwaterbedrijven een onderbouwde keuze maken tussen het aantal locaties waar werkzaamheden worden verricht en het aantal storingen dat ze willen reduceren of de mate waarin de gewenste druk gehaald dient te worden. Bij ieder punt van de verkregen Pareto-curves hoort een transitieplan: voor elke afsluitersectie in het leidingnet wordt de transitiefase waarin die dient te worden gesaneerd geïdentificeerd. Deze geoptimaliseerde transitie biedt ondersteunende informatie voor het maken van de vervangingsplannen bij drinkwaterbedrijven. Het indelen van het leidingnet in afsluitersecties en de prioritering van afsluitersecties i.p.v. leidingen, zoals gebeurt in de BOS, biedt voordelen voor drinkwaterbedrijven: de aggregatie wordt meegenomen in de optimalisatie en dus wordt de optimale volgorde van gebieden geïdentificeerd en hoeven drinkwaterbedrijven niet zelf handmatig deze gebieden te kiezen o.b.v. de prioritering van leidingen. Ook de prioritering op basis van hydraulische aspecten is nieuw. De huidige vervangingsstrategieën zijn voornamelijk risico-gedreven. Een hydraulische-gedreven prioritering is van toegevoegde waarde, omdat deze nog niet in de huidige praktijk in aanmerking wordt genomen.

Voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren zijn meerdere benaderingen mogelijk. Ook bij de keuze van invoergegevens, doelstellingen, randvoorwaarden en beslisvariabelen zijn verschillende opties denkbaar. Bij toepassing in de praktijk dienen drinkwaterbedrijven hier zelf keuzes in te maken om een optimalisatieprobleem dat goed aansluit op de behoeftes en locatie specifieke situatie te kunnen formuleren. Door het ontwerp van en transitie naar streefstructuren te vertalen naar een optimalisatieprobleem, kunnen deze

worden doorgerekend m.b.v. numerieke optimalisatietechnieken zoals geïmplementeerd in Gondwana. Hiermee wordt niet één ontwerp en transitie dat aan alle eisen voldoet verkregen (zoals in handmatige benaderingen), maar een optimaal ontwerp en transitie, d.w.z. een ontwerp dat aan alle eisen voldoet en ook nog bv. het goedkoopste is, en een transitie waarin het aantal storingen maximaal wordt gereduceerd of waarin de hydraulische prestatie wordt gemaximaliseerd.

## 7.2 Aanbevelingen

De uitgewerkte benadering is klaar voor implementatie in de praktijk. Hiervoor wordt aanbevolen om:

- optimalisatieproblemen voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren op maat te formuleren, zodanig dat geschikte keuzes kunnen worden gemaakt met betrekking tot randvoorwaarden, doelen en beslisvariabelen die het beste aansluiten op de behoeftes en locatie specifieke situatie;
- voldoende tijd te nemen voor model- en datavoorbereiding (alle benodigde data voor de optimalisatie dient formeel te worden beschreven, bv. knopen in het model waar drukeisen geldig zijn, leidingen die wel of niet mogen worden aangepast);
- de resultaten van optimalisaties te vergelijken met de resultaten van de benaderingen voor het ontwerp en vervangingsstrategieën die in de praktijk worden ingezet, om in beide benaderingen sterktes, zwaktes en mogelijke verbeterpunten te identificeren.

Naast implementatie van de benadering in de praktijk wordt onderzoeksgericht aanbevolen om:

- de multicriteria gefaseerd ontwerp benadering uit te werken en te toetsen op een casestudy;
- meerdere ontwerpscenario's in aanmerking nemen voor het ontwerp van en transitie naar streefstructuren, zoals bijvoorbeeld verschillende watervraagscenario's, om flexibele en robuuste ontwerpen te optimaliseren. In het BTO 2018-2019 zal dit onderwerp worden opgepakt, door een methodiek te ontwikkelen voor het robuust en toekomstbestendig optimaal ontwerp van streefstructuren waarin (1) aan de ingang van het optimalisatieproces de onzekerheid rondom de watervraag expliciet wordt meegenomen, en (2) aan de uitgang van het optimalisatieproces de prestatie-indicatoren waarop wordt ontworpen met een bepaalde waarschijnlijkheid worden uitgedrukt.
- het optimaliseren van tracés voor het leidingnet aan te pakken: het handmatig bepalen van tracés is een tijdrovend proces waarin optimalisatietechnieken leidingnetmodellereurs kunnen helpen;
- de te optimaliseren transitie op basis van de hydraulische prestatie van het leidingnet verder uit te werken door onderzoek te doen naar de meest geschikte doelfuncties (om de hydraulische prestatie het beste uit te drukken) en ook leveringscontinuïteit- en leveringszekerheidsaspecten in aanmerking te nemen;
- onderzoek te doen naar hoe de benadering voor het optimaliseren van de transitie aansluit en/of aanvullend is op de informatie uit BOS die drinkwaterbedrijven op dit moment inzetten voor het bepalen van de vervangingsplannen (bv. kan informatie uit de vervangingsplannen in aanmerking worden genomen in het optimalisatieproces en/of kan een kader worden ontwikkeld om de resultaten van beiden te goed te vergelijken en combineren);
- het optimalisatiealgoritme verder aan te scherpen om sneller te convergeren (hierbij kan gedacht worden aan nieuwe mutators en crossover-functionaliteiten, of aan hybride optimalisatiealgoritmes);



- onderzoek te doen naar de meest geschikte optimalisatieparameters voor het ontwerp van streefstructuren van deze grootte;
- onderzoek doen naar het aantal (te verwachten) benodigde functie-evaluaties om tot convergentie te komen en een afweging te maken tussen rekentijd en convergentie naar een lokaal of globaal optimum;
- een bottom-up (optimalisatie starten met kleine diameters en deze vergroten – deze optie vergt een aangepaste aanpak voor de randvoorwaarden) vs een top-down (optimalisatie starten met de huidige diameters en deze in het proces verkleinen, zoals in dit project is gedaan) benadering uit te testen.

# 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., R. H. S. Beuken, P. Horst, K. Ruijg, A. Bosch en E. J. M. Blokker (2017). *Using pipe inspection data to validate pipe replacement decisions*. LESAM 2017. Trondheim, Norway.

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. M., A. Moerman en A. J. Vogelaar (2016). *Kwantitatieve risicoanalyse van leidingnetten - Stand van zaken sinds 2008*, KWR, Nieuwegein.

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.

Cunha, M. en J. Sousa (2010). *Robust design of water distribution networks for a proactive risk management*. *Journal of water resources Planning and Management* **136**(2).

da Conceição Cunha, M. en L. Ribeiro (2004). *Tabu search algorithms for water network optimization*. *European Journal of Operational Research* **157**(3): 746-758.

De Corte, A. en K. Sörensen (2013). *Optimisation of gravity-fed water distribution network design: a critical review*. *European Journal of Operational Research* **228**: 1-10.

Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal en T. Meyarivan (2002). *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* **6**(2).

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).

Garrett, A. (2012). *Inspyred 1.0 Documentation*. <https://aarongarrett.github.io/inspyred> Python Software Foundation.

Gil, C., R. Baños, J. Ortega, A. L. Márquez, A. Fernández en M. G. Montoya (2011). *Ant Colony Optimization for Water Distribution Network Design: A Comparative Study*. Advances in Computational Intelligence: 11th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, IWANN 2011, Torremolinos-Málaga, Spain, June 8-10, 2011, Proceedings, Part II. J. Cabestany, et al. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 300-307.

Giustolisi, O., D. Laucelli en A. F. Colombo (2009). *Deterministic versus stochastic design of water distribution networks*. *Journal of Water Resources Planning and Management* **135**(2).

- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*.
- Goldberg, D. E. en C. H. Kuo (1987). *Genetic Algorithms in Pipeline Optimization*. Journal of Computing in Civil Engineering **1**(2): 128-141.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- 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.
- KWR Watercycle Research Institute (30-05-2017). *USTORE Database*.
- 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. C., D. A. Savic en M. Cunha (2015). *A multicriteria approach for the 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.
- Mulvey, J. M., R. J. Vanderbey en S. A. Zenios (1995). *Robust optimization of large scale systems*. Operations Research **43**(2).
- Orth, H. M. (1966). *Model-based design of water distribution and sewage systems*, John Wiley & Sons Ltd
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. EPA/600/R-00/057, U.S. Environmental Protection Agency.
- Samsatli, N. J., L. G. Papageorgiou en N. Shah (1998). *Robustness metrics for dynamic optimization models under parameter uncertainty*. Process Systems Engineering **44**(9).
- Savic, D. A. en G. A. Walters (1997). *Genetic Algorithms for least cost design of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management **123**(2).
- Scopus. (2017). "Scopus." Retrieved 21-02-2017, 2017.
- Sousa, J. en M. Cunha (1998). *On solving water distribution network design problems with stochastic search optimization techniques*. 7th International Conference on Hydraulic Engineering
- Software HYDROSOFT, Italy, Computational Mechanics Publ. .
- Tolson, B. A., H. R. Maier, A. R. Simpson en B. J. Lence (2004). *Genetic Algorithms for reliability-based optimization of water distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management **130**(1).

Tricarico, C., R. Gargano, Z. Kapelan, D. A. Savic en G. Marinis (2006). *Economic level of reliability for the rehabilitation of hydraulic networks*. Civil Engineering and Environmental Systems **23**(3).

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.

Van Vossen, J. en K. van Laarhoven (2017). *Voorspellen storingsfrequenties* KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands.

Vertommen, I. en P. van Thienen (2017). *Optimalisatie streefstructuur Zuid met Gondwana*. KWR 2017.086, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands.

Vogelaar, A. en E. J. M. Blokker (2011). *Ontwerpen secundair leidingnet*. BTO 2011.025, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Nederland.

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).

Yandamuri, S. R. M., K. Srinivasan en S. M. Bhallamudi (2006). *Multiobjective Optimal Waste Load Allocation Models for Rivers Using Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II*. Journal of Water Resources Planning and Management **132**(3): 133-143.

# Bijlage I

## Gondwana Keuzemenu's

Hieronder worden de door de drinkwaterbedrijven (die deel uitmaken van de begeleidingsgroep) ingevulde keuzemenu's gerapporteerd.

**Bedrijf:** Brabant Water

**Ingevuld door:** Tjakko Haaijer en Roel Diemel

Scope van optimalisatie – input data	
<b>Dimensionering van :</b> <input checked="" type="checkbox"/> Primair net en/of <input checked="" type="checkbox"/> secundair net <b>Inclusief:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Locatie <b>huidige</b> afsluiters <input type="checkbox"/> Locatie brandkranen	
<b>Uitgangspunten voor tracé:</b> <input checked="" type="checkbox"/> huidig netwerk <input checked="" type="checkbox"/> wegnnet <b>beter is: openbare ruimte (b.v.k. langs wegen)</b> <input checked="" type="checkbox"/> huidige afsluitersconfiguratie <input type="checkbox"/> nieuwe afsluitersconfiguratie o.b.v. ----- Ontwikkelingen: <input checked="" type="checkbox"/> nieuwbouw <input checked="" type="checkbox"/> nieuwe wegen <input type="checkbox"/> andere: -----	
<b>Locatiespecifieke aspecten:</b> <input type="checkbox"/> bodemverontreiniging <input type="checkbox"/> risicovolle elementen <input checked="" type="checkbox"/> bijzondere klanten <input checked="" type="checkbox"/> particuliere blusinstallaties <input checked="" type="checkbox"/> andere <b>BEEL gebieden vermijdend</b> <input checked="" type="checkbox"/> Type verbruikers: huishoudelijk, grootverbruikers, bijzondere klanten (o.a. ziekenhuis, school) flats, etc.	
<b>Hydraulische berekeningen op basis van:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Max-dag-max-uur <input checked="" type="checkbox"/> <b>gemiddelde criterium (1,1)</b> dag <input type="checkbox"/> meerdere dagen  <b>(Aggregatie van) resultaten:</b> <input checked="" type="checkbox"/> per leiding stuk <input type="checkbox"/> cluster per sectie <input type="checkbox"/> cluster per wijk <input type="checkbox"/> andere -----	
Randvoorwaarden	
<input checked="" type="checkbox"/> Specifieke minimale druk per leidingfunctie:	Indien Ja, welke: P <b>35 (eind)</b> , S <b>30 (eind)</b> , T <b>25 (eind)</b> (mwk)
<input checked="" type="checkbox"/> Druk-eis normale levering/begin tertiair net	<b>30 (= eind sec)</b> (mwk)
<input checked="" type="checkbox"/> Maximale sectielengte ( <b>secundair</b> )	<b>1,0</b> (km/sectie)
<input checked="" type="checkbox"/> Sectiegrootte	<b>Binnen bebouwde kom 80; met bandbreedte min 40, max 120</b> Buiten bebouwde kom 50; met bandbreedte min 25, max 75 (# aansl. /sectie)
<input checked="" type="checkbox"/> Snelheid (m/s)	<input type="checkbox"/> Minimale snelheid: ----- m/s <input type="checkbox"/> Eens per dag <input type="checkbox"/> Eens per ----- dagen <input checked="" type="checkbox"/> Maximale snelheid: <b>0,2 m/s</b> <b>1x per dag optredend</b>
<input type="checkbox"/> % net met 1-richtingstroom	<input type="checkbox"/> $v_{min} > 0$ m/s
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringszekerheid	<b>(InfoWorks simulatie op max dag om de 75 % regeling VEWIN-regel te benaderen) P &gt;15 (mwk)</b> <b>Controle op die Customer Points die geclusterd een P &lt;15 mwk opleveren bij afsluiting van een (P of S)leidingsectie. Indien &lt;15 mwk dan niet LZ en/of ___%</b>
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringscontinuïteit	<b>Bij afsluiting secundaire sectie op max uur / max dag mag de druk in de aangrenzende secties niet lager zijn dan 25 (mwk)</b>
<input checked="" type="checkbox"/> Andere:	<b>Drukval Secundaire net; Delta H &lt;= 4 mwk/km</b>

Ontwerpscenario's:	
<input type="checkbox"/> Huidige watervraag	
<input checked="" type="checkbox"/> Toekomstige watervraag: Tijdshorizon 2030 _____ databron lcastadt _____	
<input checked="" type="checkbox"/> Andere watervraagscenario's: mogelijke lange(re) termijn ontwikkelscenario's Maatschappij	
<input type="checkbox"/> Bluswatervraag: <input type="checkbox"/> 0 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> 30 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> 60 m <sup>3</sup> /u <input checked="" type="checkbox"/> Andere: sprinkler debiet in m <sup>3</sup> /u volgens opgave en zoals gespecificeerd in contract	
<input type="checkbox"/> Andere:	
Optimalisatie doelen	
<input type="checkbox"/> Minimalisatie volume	Som van de volume van alle leidingen
<input type="checkbox"/> Minimalisatie Drukgradiënt (mwk/km)	<input type="checkbox"/> Maximale drukgradiënt (som van maximale drukgradiënt op alle leidingen) <input type="checkbox"/> Gemiddelde drukgradiënt (gemiddelde drukgradiënt van alle leidingen)
<input type="checkbox"/> Minimalisatie verblijftijd	<input type="checkbox"/> Maximale verblijftijd <input type="checkbox"/> Gemiddelde verblijftijd
<input type="checkbox"/> Minimalisatie aanleg kosten (incl. Afsluiters)	<input type="checkbox"/> Som van de prijs per meter leiding x leidinglengte (incl. materiaal en werkzaamheden) <input type="checkbox"/> Prijs per afsluiter x aantal afsluiters (incl. materiaal en werkzaamheden)
<input type="checkbox"/> Minimalisatie operationele kosten (bv. energieverbruik)	<input type="checkbox"/> Verschil tussen druk en hoogte in reservoirs <input type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> anders:
<input type="checkbox"/> Minimalisatie ongepland OLM*	Som van OLM op leidingen en OLM op afsluiters
<input type="checkbox"/> Minimalisatie leeftijd	Gemiddelde leeftijd van het net
<input type="checkbox"/> Minimalisatie storings frequentie	Som van aantal storingen Waar # storingen/m varieert per leiding afhankelijke van de cohort.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie potentiële schadekosten*	Waar schadekosten kan zijn: OLM, ontgrondingskuilen, bruinwater, etc.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie risico's*	Som van kosten effect x faalkans Waar het aantal storingen per meter leiding per cohort variëren
<input checked="" type="checkbox"/> Maximalisatie waterkwaliteit	Waar Water kwaliteit (WK) wordt beschreven door KPI's zoals: snelheid, # pendelzones, verblijftijd, etc. <input type="checkbox"/> Snelheid in leidingen <input type="checkbox"/> Pendelzones <input checked="" type="checkbox"/> Verblijftijd <input checked="" type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
<input checked="" type="checkbox"/> Maximalisatie Prestatie*	Waar Prestatie (P) wordt beschreven door KPI's: Minimale druk, OLM, waterkwaliteit en/of Kosten. <input checked="" type="checkbox"/> Drukgradiënt <input checked="" type="checkbox"/> OLM <input type="checkbox"/> Waterkwaliteit <input checked="" type="checkbox"/> Kosten (aanleg en/of operationeel (vooral energie vandaar keuze voor drukgradiënt)) <input checked="" type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
Andere:	



**Bedrijf:** Waterbedrijf Groningen

**Ingevuld door:** Eddy Postmus, Jan Visser, Bernard Enthoven, Wim Doeleman, Mark Schaap, Wout Kompagnie

Scope van optimalisatie – input data	
<b>Dimensionering van :</b> <input checked="" type="checkbox"/> Primair net en/of <input checked="" type="checkbox"/> secundair net <b>Inclusief:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Locatie afsluiters <input type="checkbox"/> Locatie brandkranen	
<b>Uitgangspunten voor tracé:</b> <input checked="" type="checkbox"/> huidig netwerk <input checked="" type="checkbox"/> wegnnet <input type="checkbox"/> huidige afsluitersconfiguratie <input type="checkbox"/> nieuwe afsluitersconfiguratie o.b.v. _____ Ontwikkelingen: <input checked="" type="checkbox"/> nieuwbouw <input checked="" type="checkbox"/> nieuwe wegen <input checked="" type="checkbox"/> andere: openbare grond	
<b>Locatiespecifieke aspecten:</b> <input type="checkbox"/> bodemverontreiniging <input checked="" type="checkbox"/> risicovolle elementen <input type="checkbox"/> bijzondere klanten <input type="checkbox"/> particuliere blusinstallaties <input type="checkbox"/> andere _____ <input checked="" type="checkbox"/> Type verbruikers: huishoudelijk, grootverbruikers, bijzondere klanten (o.a. ziekenhuis, school) flats, etc.	
<b>Hydraulische berekeningen op basis van:</b> <input type="checkbox"/> Max-dag-max-uur <input type="checkbox"/> gemiddelde dag <input checked="" type="checkbox"/> meerdere dagen  <b>(Aggregatie van) resultaten:</b> <input type="checkbox"/> per leiding stuk <input type="checkbox"/> cluster per sectie <input type="checkbox"/> cluster per wijk <input checked="" type="checkbox"/> andere overzicht: per primair/secundair net; mogelijkheid om in te zoomen tot op leidingniveau	
Randvoorwaarden	
<input type="checkbox"/> Specifieke minimale druk per leidingfunctie:	Indien Ja, welke: P____, S_____, T____ (mwk)
<input checked="" type="checkbox"/> Druk-eis normale levering/begin tertiair net	300 kPa
<input checked="" type="checkbox"/> Maximale sectielengte	2 (km/sectie)
<input checked="" type="checkbox"/> Sectiegrootte	200 (# aansl. /sectie) (?? Op transport en secundair net zitten geen aansluitingen)
<input checked="" type="checkbox"/> Snelheid (m/s)	<input checked="" type="checkbox"/> Minimale snelheid: __0.25_____ m/s <input checked="" type="checkbox"/> Eens per dag <input type="checkbox"/> Eens per _____ dagen <input checked="" type="checkbox"/> Maximale snelheid: 1 m/s
<input checked="" type="checkbox"/> % net met 1-richtingstroom	<input checked="" type="checkbox"/> $v_{min} > 0$ m/s
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringszekerheid (voor zwaarte punten van verbruik)	15 (mwk) en/of 75% begin tertiair net
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringscontinuïteit (niet zwaarte punten)(voorkomen insluiting)	15 (mwk) begin tertiair net
<input type="checkbox"/> Andere:	
Ontwerpscenario's:	
<input checked="" type="checkbox"/> Huidige watervraag	
<input checked="" type="checkbox"/> Toekomstige watervraag: Tijds horizon: 25 jaar databron: Prognose watervraag	
<input checked="" type="checkbox"/> Andere watervraagscenario's: industriële ontwikkelingen, krimp- groeiregio's (inzicht deelgebieden)	
<input type="checkbox"/> Bluswatervraag: <input type="checkbox"/> 0 m³/u <input checked="" type="checkbox"/> 30 m³/u <input type="checkbox"/> 60 m³/u <input type="checkbox"/> Andere: ____ m³/u	
<input type="checkbox"/> Andere:	

Optimalisatiedoelen	
<input type="checkbox"/> Minimalisatie volume	Som van de volume van alle leidingen
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie Drukgradiënt (mwk/km)	<input type="checkbox"/> Maximale drukgradiënt (som van maximale drukgradiënt op alle leidingen) <input checked="" type="checkbox"/> Gemiddelde drukgradiënt (gemiddelde drukgradiënt van alle leidingen)
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie verblijftijd	<input type="checkbox"/> Maximale verblijftijd <input checked="" type="checkbox"/> Gemiddelde verblijftijd
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie aanleg kosten (incl. Afsluiters)	<input checked="" type="checkbox"/> Som van de prijs per meter leiding x leidinglengte (incl. materiaal en werkzaamheden) <input type="checkbox"/> Prijs per afsluiter x aantal afsluiters (incl. materiaal en werkzaamheden) Meenemen: vermijden kunstwerken.
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie operationele kosten (bv. energieverbruik)	<input type="checkbox"/> Verschil tussen druk en hoogte in reservoirs <input checked="" type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> anders:
<input type="checkbox"/> Minimalisatie ongepland OLM*	Som van OLM op leidingen en OLM op afsluiters
<input type="checkbox"/> Minimalisatie leeftijd	Gemiddelde leeftijd van het net
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie storings frequentie	Som van aantal storingen Waar # storingen/m varieert per leiding afhankelijke van de cohort.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie potentiële schadekosten*	Waar schadekosten kan zijn: OLM, ontgrondingskuilen, bruinwater, etc.
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie risico's*	Som van kosten effect x faalkans Waar het aantal storingen per meter leiding per cohort variëren
<input checked="" type="checkbox"/> Maximalisatie waterkwaliteit	Waar Water kwaliteit (WK) wordt beschreven door KPI's zoals: snelheid, # pendelzones, verblijftijd, etc. <input type="checkbox"/> Snelheid in leidingen <input type="checkbox"/> Pendelzones <input type="checkbox"/> Verblijftijd <input checked="" type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
<input checked="" type="checkbox"/> Maximalisatie Prestatie*	Waar Prestatie (P) wordt beschreven door KPI's: Minimale druk, OLM, waterkwaliteit en/of Kosten. <input type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> OLM <input type="checkbox"/> Waterkwaliteit <input type="checkbox"/> Kosten (aanleg en/of operationeel) <input checked="" type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
Opmerking:	Top 3: Maximalisatie waterkwaliteit, - Prestatie, minimalisatie operationele kosten

**Bedrijf:** De Watergroep

**Ingevuld door:** Gisèle Peleman (Ir.); Afdelingshoofd Watertechnologie

Maarten Torbeyns (Ir.); Celhoofd Waterleveringsplannen

Pieter Piens (Ing.); Procesingenieur Waterleveringsplannen

Scope van optimalisatie – input data	
<b>Dimensionering van :</b> <input checked="" type="checkbox"/> Primair net en/of <input checked="" type="checkbox"/> secundair net	
<b>Inclusief:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Locatie afsluiters <input checked="" type="checkbox"/> Locatie brandkranen	
<b>Uitgangspunten voor tracé:</b> <input checked="" type="checkbox"/> huidig netwerk <input checked="" type="checkbox"/> wegennet <input type="checkbox"/> huidige afsluitersconfiguratie <input type="checkbox"/> nieuwe afsluitersconfiguratie o.b.v. _____ Ontwikkelingen: <input checked="" type="checkbox"/> nieuwbouw <input checked="" type="checkbox"/> nieuwe wegen <input checked="" type="checkbox"/> andere: <i>clustering bestaande waterproductiecentra</i>	
<b>Locatiespecifieke aspecten:</b> <input type="checkbox"/> bodemverontreiniging <input type="checkbox"/> risicovolle elementen <input type="checkbox"/> bijzondere klanten <input type="checkbox"/> particuliere blusinstallaties <input type="checkbox"/> andere _____ <input checked="" type="checkbox"/> Type verbruikers: huishoudelijk, grootverbruikers, bijzondere klanten (o.a. ziekenhuis, school) flats, etc.	
<b>Hydraulische berekeningen op basis van:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Max-dag-max-uur <input checked="" type="checkbox"/> gemiddelde dag <input type="checkbox"/> meerdere dagen	
<b>(Aggregatie van) resultaten:</b> <input type="checkbox"/> per leiding stuk <input type="checkbox"/> cluster per sectie <input type="checkbox"/> cluster per wijk <input type="checkbox"/> andere _____ Wat wordt hier juist mee bedoeld?	
Randvoorwaarden	
<input checked="" type="checkbox"/> Specifieke minimale druk per leidingfunctie:	Indien Ja, welke: P__5__ S__5__ T__25__ (mwk)
<input checked="" type="checkbox"/> Druk-eis normale levering/begin tertiair net	__≥30__ (mwk)
<input type="checkbox"/> Maximale sectielengte	_____ (km/sectie)
<input type="checkbox"/> Sectiegrootte	_____ (# aansl. /sectie)
<input checked="" type="checkbox"/> Snelheid (m/s)	<input checked="" type="checkbox"/> Minimale snelheid: __0.25__ m/s <input checked="" type="checkbox"/> Eens per dag <input type="checkbox"/> Eens per _____ dagen <input checked="" type="checkbox"/> Maximale snelheid: __5__ m/s
<input type="checkbox"/> % net met 1-richtingstroom	<input type="checkbox"/> $v_{min} > 0$ m/s
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringszekerheid	__15__ (mwk) en/of _____%
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringscontinuïteit	__15__ (mwk)
<input type="checkbox"/> Andere:	
Ontwerpscenario's:	
<input checked="" type="checkbox"/> Huidige watervraag	
<input checked="" type="checkbox"/> Toekomstige watervraag: Tijdshorizon __20j__ databron ____ <i>Klimatologische &amp; Technologische evolutie</i> _____	
<input checked="" type="checkbox"/> Andere watervraagscenario's: <i>toenemend gebruik van regenwaterinstallaties</i>	
<input type="checkbox"/> Bluswatervraag: <input type="checkbox"/> 0 m³/u <input type="checkbox"/> 30 m³/u <input type="checkbox"/> 60 m³/u <input type="checkbox"/> Andere: ____ m³/u	
<input checked="" type="checkbox"/> Andere: ____ <i>Clustering van kleine winningen/productiestations</i> _____	

Optimalisatiedoelen	
<input type="checkbox"/> Minimalisatie volume	Som van de volume van alle leidingen
<input type="checkbox"/> Minimalisatie Drukgradiënt (mwk/km)	<input type="checkbox"/> Maximale drukgradiënt (som van maximale drukgradiënt op alle leidingen) <input type="checkbox"/> Gemiddelde drukgradiënt (gemiddelde drukgradiënt van alle leidingen)
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie verblijftijd	<input type="checkbox"/> Maximale verblijftijd <input type="checkbox"/> Gemiddelde verblijftijd
<input type="checkbox"/> Minimalisatie aanleg kosten (incl. Afsluiters)	<input type="checkbox"/> Som van de prijs per meter leiding x leidinglengte (incl. materiaal en werkzaamheden) <input type="checkbox"/> Prijs per afsluiter x aantal afsluiters (incl. materiaal en werkzaamheden)
<input type="checkbox"/> Minimalisatie operationele kosten (bv. energieverbruik)	<input type="checkbox"/> Verschil tussen druk en hoogte in reservoirs <input type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> anders:
<input type="checkbox"/> Minimalisatie ongepland OLM*	Som van OLM op leidingen en OLM op afsluiters
<input type="checkbox"/> Minimalisatie leeftijd	Gemiddelde leeftijd van het net
<input type="checkbox"/> Minimalisatie storings frequentie	Som van aantal storingen Waar # storingen/m varieert per leiding afhankelijke van de cohort.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie potentiële schadekosten*	Waar schadekosten kan zijn: OLM, ontgrondingskuilen, bruinwater, etc.
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie risico's*	Som van kosten effect x faalkans Waar het aantal storingen per meter leiding per cohort variëren
<input type="checkbox"/> Maximalisatie waterkwaliteit	Waar Water kwaliteit (WK) wordt beschreven door KPI's zoals: snelheid, # pendelzones, verblijftijd, etc. <input type="checkbox"/> Snelheid in leidingen <input type="checkbox"/> Pendelzones <input type="checkbox"/> Verblijftijd <input type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
<input checked="" type="checkbox"/> Maximalisatie Prestatie*	Waar Prestatie (P) wordt beschreven door KPI's: Minimale druk, OLM, waterkwaliteit en/of Kosten. <input type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> OLM <input checked="" type="checkbox"/> Waterkwaliteit <input checked="" type="checkbox"/> Kosten (aanleg en/of operationeel) <input checked="" type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
Andere:	

**Bedrijf:** Waternet

**Ingevuld door:** Ralf de Groot

Scope van optimalisatie – input data	
<b>Dimensionering van :</b> <input checked="" type="checkbox"/> Primair net en/of <input checked="" type="checkbox"/> secundair net	
<b>Inclusief:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Locatie afsluiters <input checked="" type="checkbox"/> Locatie brandkranen	
<b>Uitgangspunten voor tracé:</b> <input checked="" type="checkbox"/> huidig netwerk <input type="checkbox"/> wegennet <input type="checkbox"/> huidige afsluitersconfiguratie <input type="checkbox"/> nieuwe afsluitersconfiguratie o.b.v. _____ Ontwikkelingen: <input checked="" type="checkbox"/> nieuwbouw <input type="checkbox"/> nieuwe wegen <input type="checkbox"/> andere: _____	
<b>Locatiespecifieke aspecten:</b> <input type="checkbox"/> bodemverontreiniging <input type="checkbox"/> risicovolle elementen <input type="checkbox"/> bijzondere klanten <input type="checkbox"/> particuliere blusinstallaties <input type="checkbox"/> andere _____ <input checked="" type="checkbox"/> Type verbruikers: huishoudelijk, grootverbruikers, bijzondere klanten (o.a. ziekenhuis, school) flats, etc.	
<b>Hydraulische berekeningen op basis van:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Max-dag-max-uur <input checked="" type="checkbox"/> gemiddelde dag <input type="checkbox"/> meerdere dagen <b>(Aggregatie van) resultaten:</b> <input checked="" type="checkbox"/> per leiding stuk <input checked="" type="checkbox"/> cluster per sectie <input type="checkbox"/> cluster per wijk <input type="checkbox"/> andere _____	
Randvoorwaarden	
<input type="checkbox"/> Specifieke minimale druk per leidingfunctie:	Indien Ja, welke: P____, S____, T____ (mwk)
<input checked="" type="checkbox"/> Druk-eis normale levering/eind tertiair net	__20____ (mwk)
<input type="checkbox"/> Maximale sectielengte	_____ (km/sectie)
<input checked="" type="checkbox"/> Sectiegrootte	_200_____ (# aansl. /sectie)
<input checked="" type="checkbox"/> Snelheid (m/s)	<input type="checkbox"/> Minimale snelheid: __0,25_____ m/s <input checked="" type="checkbox"/> Eens per dag <input type="checkbox"/> Eens per _____ dagen <input checked="" type="checkbox"/> Maximale snelheid: __1_____m/s
<input type="checkbox"/> % net met 1-richtingstroom	<input type="checkbox"/> $v_{min} > 0$ m/s
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringszekerheid	_____ (mwk) en/of __75_____%
<input type="checkbox"/> Leveringscontinuïteit	_____ (mwk)
<input type="checkbox"/> Andere:	
Ontwerpscenario's:	
<input checked="" type="checkbox"/> Huidige watervraag	
<input checked="" type="checkbox"/> Toekomstige watervraag: Tijdshorizon __2025_____ databron _____	
<input type="checkbox"/> Andere watervraagscenario's: _____	
<input type="checkbox"/> Bluswatervraag: <input type="checkbox"/> 0 m <sup>3</sup> /u <input checked="" type="checkbox"/> 30 m <sup>3</sup> /u <input checked="" type="checkbox"/> 60 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> Andere: ____ m <sup>3</sup> /u	
<input type="checkbox"/> Andere:	
Optimalisatie doelen	
<input type="checkbox"/> Minimalisatie volume	Som van de volume van alle leidingen



<input type="checkbox"/> Minimalisatie Drukgradiënt (mwk/km)	<input type="checkbox"/> Maximale drukgradiënt (som van maximale drukgradiënt op alle leidingen) <input type="checkbox"/> Gemiddelde drukgradiënt (gemiddelde drukgradiënt van alle leidingen)
<input type="checkbox"/> Minimalisatie verblijftijd	<input type="checkbox"/> Maximale verblijftijd <input type="checkbox"/> Gemiddelde verblijftijd
<input type="checkbox"/> Minimalisatie aanleg kosten (incl. Afsluiters)	<input type="checkbox"/> Som van de prijs per meter leiding x leidinglengte (incl. materiaal en werkzaamheden) <input type="checkbox"/> Prijs per afsluiter x aantal afsluiters (incl. materiaal en werkzaamheden)
<input type="checkbox"/> Minimalisatie operationele kosten (bv. energieverbruik)	<input type="checkbox"/> Verschil tussen druk en hoogte in reservoirs <input type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> anders:
<input type="checkbox"/> Minimalisatie ongepland OLM*	Som van OLM op leidingen en OLM op afsluiters
<input type="checkbox"/> Minimalisatie leeftijd	Gemiddelde leeftijd van het net
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie storings frequentie	Som van aantal storingen Waar # storingen/m varieert per leiding afhankelijke van de cohort.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie potentiële schadekosten*	Waar schadekosten kan zijn: OLM, ontgrondingskuilen, bruinwater, etc.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie risico's*	Som van kosten effect x faalkans Waar het aantal storingen per meter leiding per cohort variëren
<input type="checkbox"/> Maximalisatie waterkwaliteit	Waar Water kwaliteit (WK) wordt beschreven door KPI's zoals: snelheid, # pendelzones, verblijftijd, etc. <input type="checkbox"/> Snelheid in leidingen <input type="checkbox"/> Pendelzones <input type="checkbox"/> Verblijftijd <input type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
<input checked="" type="checkbox"/> Maximalisatie Prestatie*	Waar Prestatie (P) wordt beschreven door KPI's: Minimale druk, OLM, waterkwaliteit en/of Kosten. <input type="checkbox"/> Drukgradiënt <input checked="" type="checkbox"/> OLM <input type="checkbox"/> Waterkwaliteit <input type="checkbox"/> Kosten (aanleg en/of operationeel) <input type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
Andere:	

**Bedrijf: \_PWN**

**Ingevuld door: Martin Klein Arfman**

Scope van optimalisatie – input data	
<b>Dimensionering van :</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Primair net en/of <input checked="" type="checkbox"/> secundair net	
<b>Inclusief:</b>	
<input type="checkbox"/> Locatie afsluiters <input type="checkbox"/> Locatie brandkranen	
<b>Uitgangspunten voor tracé:</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> huidig netwerk <input checked="" type="checkbox"/> wegennet <input type="checkbox"/> huidige afsluitersconfiguratie <input type="checkbox"/> nieuwe afsluitersconfiguratie o.b.v. _____	
Ontwikkelingen: <input checked="" type="checkbox"/> nieuwbouw <input type="checkbox"/> nieuwe wegen <input type="checkbox"/> andere: _____	
<b>Locatiespecifieke aspecten:</b>	
<input type="checkbox"/> bodemverontreiniging <input type="checkbox"/> risicovolle elementen <input type="checkbox"/> bijzondere klanten <input checked="" type="checkbox"/> particuliere blusinstallaties <input type="checkbox"/> andere _____	
<input checked="" type="checkbox"/> Type verbruikers: huishoudelijk, grootverbruikers, bijzondere klanten (o.a. ziekenhuis, school) flats, etc.	
<b>Hydraulische berekeningen op basis van:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Max-dag-max-uur <input checked="" type="checkbox"/> gemiddelde dag <input type="checkbox"/> meerdere dagen	
<b>(Aggregatie van) resultaten:</b> <input type="checkbox"/> per leiding stuk <input checked="" type="checkbox"/> cluster per sectie <input type="checkbox"/> cluster per wijk <input type="checkbox"/> andere _____	
Randvoorwaarden	
<input checked="" type="checkbox"/> Specifieke minimale druk per leidingfunctie:	Indien Ja, welke: P __290, S__260__, T__230_ (mwk)
<input type="checkbox"/> Druk-eis normale levering/begin tertiair net	__260__ (mwk)
<input checked="" type="checkbox"/> Maximale sectielengte	____1____ (km/sectie)
<input checked="" type="checkbox"/> Sectiegrootte	_80-150 (# aansl. /sectie)
<input checked="" type="checkbox"/> Snelheid (m/s)	<input type="checkbox"/> Minimale snelheid: _____ m/s <input type="checkbox"/> Eens per dag <input type="checkbox"/> Eens per _____ dagen <input checked="" type="checkbox"/> Maximale snelheid: _1,5_m/s
<input type="checkbox"/> % net met 1-richtingstroom	<input type="checkbox"/> $v_{min} > 0$ m/s
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringszekerheid	___ (mwk) en/of __75% (volgens leveringszekerheidseis)
<input checked="" type="checkbox"/> Leveringscontinuïteit	__260_ (mwk) (in S- net tijdens 75%-dag)
<input checked="" type="checkbox"/> Andere:	Aantal voedingen per hoeveelheid aansluitingen <150 1 voeding >150 2 voedingen >1000 3 voedingen
Ontwerpscenario's:	
<input checked="" type="checkbox"/> Huidige watervraag	
<input checked="" type="checkbox"/> Toekomstige watervraag: Tijdshorizon _2040_ databron _Intern, CBS en gemeente__	
<input type="checkbox"/> Andere watervraagscenario's: _____	
<input type="checkbox"/> Bluswatervraag: <input type="checkbox"/> 0 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> 30 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> 60 m <sup>3</sup> /u <input type="checkbox"/> Andere: _____ m <sup>3</sup> /u	
<input type="checkbox"/> Andere:	

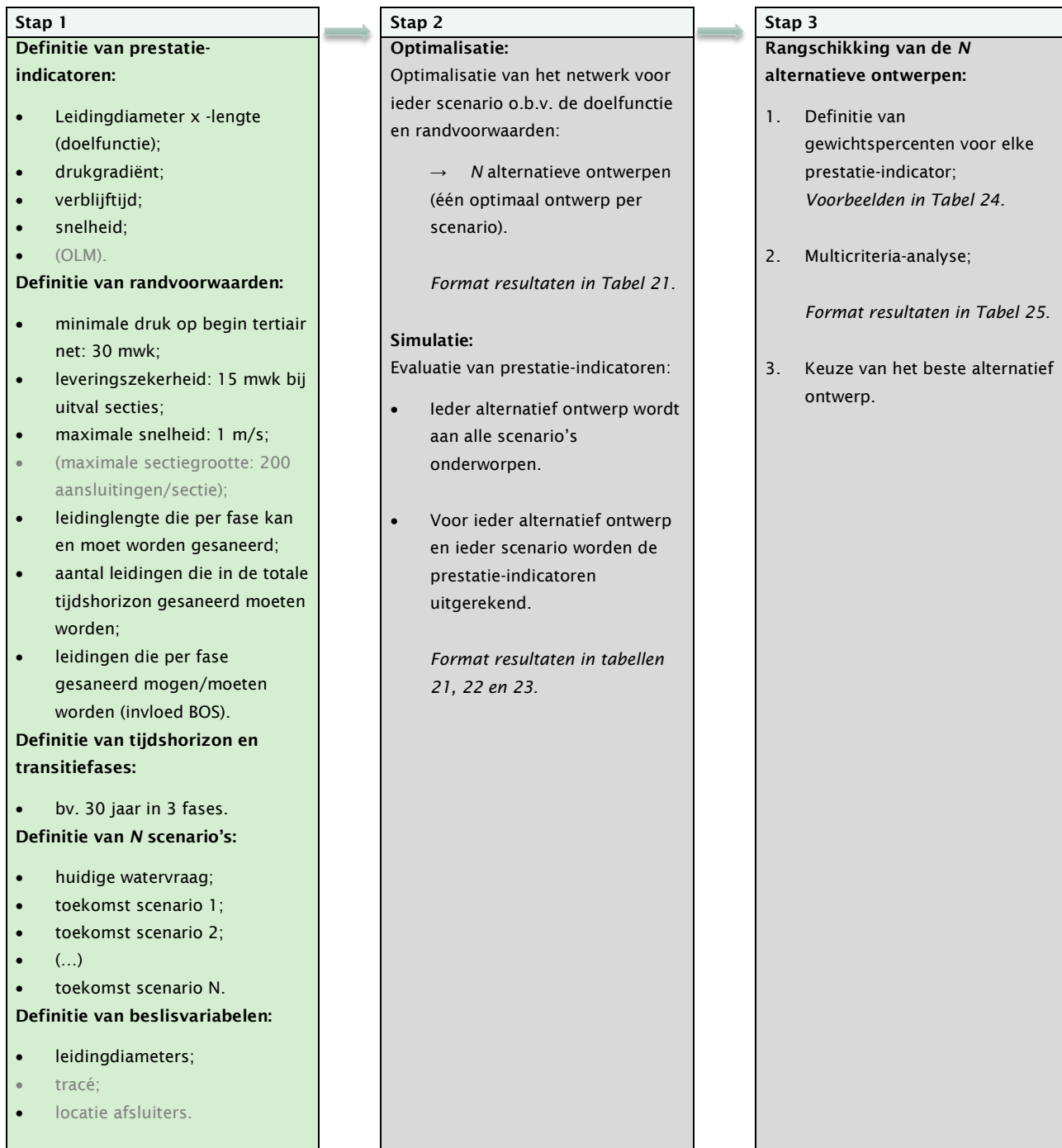
Optimalisatiedoelen	
<input type="checkbox"/> Minimalisatie volume	Som van de volume van alle leidingen
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie Drukgradiënt (mwk/km)	<input checked="" type="checkbox"/> Maximale drukgradiënt (maximale drukgradiënt < 2mwk) <input type="checkbox"/> Gemiddelde drukgradiënt (gemiddelde drukgradiënt van alle leidingen)
<input type="checkbox"/> Minimalisatie verblijftijd	<input type="checkbox"/> Maximale verblijftijd <input type="checkbox"/> Gemiddelde verblijftijd
<input type="checkbox"/> Minimalisatie aanleg kosten (incl. Afsluiters)	<input type="checkbox"/> Som van de prijs per meter leiding x leidinglengte (incl. materiaal en werkzaamheden) <input type="checkbox"/> Prijs per afsluiter x aantal afsluiters (incl. materiaal en werkzaamheden)
<input checked="" type="checkbox"/> Minimalisatie operationele kosten (bv. Energieverbruik)	<input type="checkbox"/> Verschil tussen druk en hoogte in reservoirs <input checked="" type="checkbox"/> Drukgradiënt <input type="checkbox"/> anders:
<input type="checkbox"/> Minimalisatie ongepland OLM*	Som van OLM op leidingen en OLM op afsluiters
<input type="checkbox"/> Minimalisatie leeftijd	Gemiddelde leeftijd van het net
<input type="checkbox"/> Minimalisatie storings frequentie	Som van aantal storingen Waar # storingen/m varieert per leiding afhankelijke van de cohort.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie potentiële schadekosten*	Waar schadekosten kan zijn: OLM, ontgrondingskuilen, bruinwater, etc.
<input type="checkbox"/> Minimalisatie risico's*	Som van kosten effect x faalkans Waar het aantal storingen per meter leiding per cohort variëren
<input type="checkbox"/> Maximalisatie waterkwaliteit	Waar Water kwaliteit (WK) wordt beschreven door KPI's zoals: snelheid, # pendelzones, verblijftijd, etc. <input type="checkbox"/> Snelheid in leidingen <input type="checkbox"/> Pendelzones <input type="checkbox"/> Verblijftijd <input type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
<input checked="" type="checkbox"/> Maximalisatie Prestatie*	Waar Prestatie (P) wordt beschreven door KPI's: Minimale druk, OLM, waterkwaliteit en/of Kosten. <input checked="" type="checkbox"/> Drukgradiënt

	<input type="checkbox"/> OLM <input type="checkbox"/> Waterkwaliteit <input type="checkbox"/> Kosten (aanleg en/of operationeel) <input type="checkbox"/> Combinatie van vorige (gelijk verdeeld of gewicht per KPI aangeven) <input type="checkbox"/> anders:
Andere:	Maximale afstand tussen 2 secundaire leidingen is 600 meter

## Bijlage II

### Multicriteria gefaseerd ontwerp van streefstructuren

De multicriteria gefaseerd ontwerp van streefstructuren is hieronder beschreven in de vorm van een stappenplan. Deze benadering is gebaseerd op het artikel van Marques *et al.* (2015). De benadering houdt rekening met de huidige structuur, wensen voor de streefstructuur en de transitie naar de streefstructuur. De benadering is generiek en flexibel opgesteld. Dit betekent dat het verder aangescherpt kan worden wanneer toegepast. Prestatie-indicatoren (en prioritering daarvan), doelfunctie, randvoorwaarden, beslisvariabelen, tijdshorizon, transitiefases en scenario's, kunnen allemaal aangepast worden. Indien er bv. geen rekening gehouden hoeft te worden met de transitie, kan dit door één enkele transitiefase in aanmerking te nemen. Het resultaat van deze benadering is één streefstructuur (eindplaatje) uitgewerkt in verschillende transitie-fases die het beste presteert onder veranderende omstandigheden (toekomstscenario's). Figuur 26 biedt een overzicht van de voorgestelde methode. De verschillende stappen worden daaronder toegelicht.



FIGUUR 26. OVERZICHT VAN BENADERING I. ASPECTEN IN HET GRIJS WORDEN IN EEN EERSTE (VEREENVOUDIGDE) STAP NIET IN AANMERKING GENOMEN.

## II.1 Stap 1

### Definitie van prestatie indicatoren

Aan de hand van de door de projectgroep ingevulde keuzemenu's zijn de volgende vijf prestatie-indicatoren gekozen:

**a. Doelfunctie:**

Een zo klein mogelijk net kan vertaald worden in het product tussen leidinglengte en leidingdiameter, gesommeerd over alle leidingen. Deze prestatie indicator is gekozen als doelfunctie van het optimalisatieprobleem, d.w.z. dat het ontwerp per scenario hierop gestuurd wordt. Dit getal kan desgewenst eenvoudig vertaald worden in aanleg kosten.

Functie:

$$\text{Minimaliseer } \sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times \text{leidingdiameter}_{jt} \times \text{leidinglengte}_j$$

$y_{jt}$  - binaire variabele gelijk aan 1 indien leiding  $j$  in fase  $t$  gesaneerd wordt en 0 indien niet.

$T$  - tijdshorizon.

$M$  - leidingen in het model.

**b. Drukgradiënt:**

De drukgradiënt dient of (1) zo laag mogelijk of (2) onder de 40 kPa/km te zijn. Twee benaderingen zijn denkbaar.

(1) Minimale drukgradiënt: voor ieder ontwerp wordt per scenario de gewogen gemiddelde maximale drukgradiënt uitgerekend (over alle leidingen en alle transitie-fases). Hierna wordt de maximale drukgradiënt tussen alle scenario's geselecteerd ("worst case scenario").

Functies:

$$\text{Maximale drukgradiënt} = \max_s^S (\text{gem. max. drukgradiënt}_s)$$

$$\text{gem. max. drukgradiënt}_s = \frac{\sum_t^T \sum_j^M \text{maximale drukgradiënt}_{jt} \times \text{leidinglengte}_j}{\text{totale leidinglengte}}$$

(2) Maximale overtreding van de drukgradiënt: voor ieder ontwerp wordt per scenario de overtreding van de drukgradiënt uitgerekend - leidingen waarin de drukgradiënt hoger is dan de toegestane 40 kPa/km (over alle leidingen en alle transitie fases). De maximale overtreding tussen alle scenario's wordt gekozen ("worst case scenario").

Functies:

$$\text{Maximale overtreding drukgradiënt} = \max_s^S (\text{overtreding drukgradiënt}_s)$$

$$\text{overtreding drukgradiënt}_s = \sum_t^T \sum_j^M \max\{0; (\text{drukgradiënt}_{jt} - 4)\}$$

$s$  - scenario,  $s = 1, \dots, S$

**c. Verblijftijd:**

De verblijftijd dient zo kort mogelijk te zijn. De verblijftijd wordt voor ieder ontwerp per scenario uitgerekend (over alle transitie fases).

Functie:

$$\text{Maximale verblijftijd} = \max_s^S (\text{verblijftijd}_s)$$



$$verbliftijd_s = \sum_t \sum_j^M \max\{verbliftijd\}$$

- d. Snelheid:** De snelheid in de leidingen moet eens per dag minimaal 0.25 m/s zijn om zelfreinigende condities te halen. De overtreding van de minimale snelheid wordt voor elk ontwerp per scenario uitgerekend (over alle transitie fases). De maximale overtreding tussen alle scenario's wordt gekozen ("worst case scenario").

Functie:

$$Maximale\ overtreding\ snelheid = \max_s (overtreding\ snelheid_s)$$

$$overtreding\ snelheid_s = \sum_t \sum_j^M \max\{0; (0.25 - maximale\ snelheid_{jt})\}$$

- e. (OLM) later uitwerken

### Definitie van randvoorwaarden

Hierbij horen de volgende randvoorwaarden:

- a. Minimale druk:** De druk op het begin van het tertiair net moet minimaal 300 kPa zijn onder normale omstandigheden.  
Functie:  
$$minimale\ druk_{it} \geq 300, \forall i \in N, t \in T$$
  
 $i$  - knooppunt in het model,  $i = 1, \dots, N$
- b. Leveringszekerheid:** De leveringszekerheid wordt getoetst aan de hand van afsluitersecties die één-voor-één falen. In de niet falende secties moet de druk minimaal 15 mwk zijn.  
Functie:  
$$minimale\ druk_{it} \geq 15, \forall i \in N, t \in T$$
- c. Maximale snelheid:** De snelheid in de leidingen mag maximaal 1 m/s zijn.  
Functie:  
$$maximale\ snelheid_{jt} \leq 1, \forall j \in M, t \in T$$
- d. Leidinglengte te saneren per fase:** Aan de hand van de asset management doelen en het beschikbaar budget is er per fase een minimale en maximale leidinglengte die gesaneerd kan/moet worden.  
Functie:  
$$minimum\ leidinglengte\ te\ saneren_t \leq \sum_j^M y_{jt} \times leidinglengte_j \leq maximum\ leidinglengte\ te\ saneren_t$$
- e. Leidingen te saneren in de totale tijdshorizon:** Aan het einde van het tijdshorizon dienen alle leidingen van het netwerk gedimensioneerd te zijn.  
Functie:

$$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} = M, \forall j \in M, t \in T$$

Gelijk aan randvoorwaarde g

- f. **Leidingen te saneren per fase:** Per transitie fase is een subset  $m_t$  van leidingen gedefinieerd die gesaneerd mogen worden (uit het BOS).

Functie:

$$j_t \in m_t, \forall t \in T$$

- g. **Leidingen te saneren in de totale tijdshorizon:** In de totale tijdshorizon is elke leiding één keer gesaneerd. Dit betekent dat elke leiding niet meer dan één keer gesaneerd kan worden en dat aan het einde van de tijdshorizon alle leidingen van het netwerk gedimensioneerd zijn.

Functie:

$$\sum_t^T y_{jt} = 1, \forall j \in M$$

- h. **Sectiegrootte** later uitwerken *aantal aansluitingen per sectie*  $\leq 200$
- i. (OLM) later uitwerken

### Definitie van tijdshorizon en transitiefases

De streefstructuur wordt voor een bepaalde tijdshorizon  $T$  ontworpen. Deze tijdshorizon is ingedeeld in transitiefases  $t$ , waarbij wordt bepaald welke leidingen in welke fase gesaneerd worden. Dit wil zeggen dat de beslisvariabelen, prestatie-indicatoren en randvoorwaarden voor elke fase uitgerekend worden.

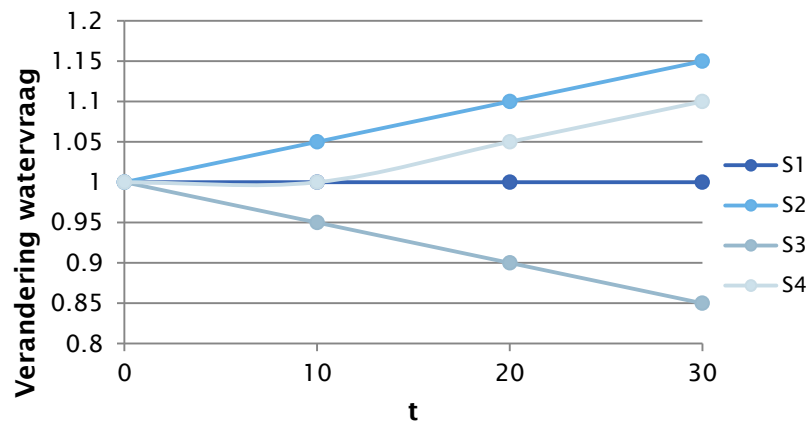
Er kan gedacht worden aan bijvoorbeeld een tijdshorizon van 30 jaar ingedeeld in 3 transitiefases:  $t_1$ : 0-10 jaar,  $t_2$ : 10-20 jaar,  $t_3$ : 20-30 jaar.

### Definitie van scenario's

De watervraag in de tijdshorizon waarvoor de streefstructuur wordt ontworpen is onbekend. Om de onzekerheid in de toekomstige watervraag in aanmerking te nemen wordt de streefstructuur voor- en op verschillende scenario's ontworpen en getoetst.

Er zijn verschillende opties denkbaar om scenario's te definiëren. In het kader van dit project worden de volgende vier willekeurige scenario's in aanmerking genomen:

- Scenario 1: De watervraag blijft constant en gelijk aan de huidige watervraag gedurende de hele tijdshorizon.
- Scenario 2: De watervraag neemt met 15% toe, gelijkmatig verdeeld over de tijdshorizon.
- Scenario 3: De watervraag neemt met 15% af, gelijkmatig verdeeld over de tijdshorizon.
- Scenario 4: De watervraag blijft de eerste 10 jaar constant en gelijk aan de huidige watervraag en neemt daarna gelijkmatig met 10% toe in de komende 20 jaar.



FIGUUR 27. SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE VIER VERSCHILLENDE WATERVRAAGSCENARIO'S DIE IN AANMERKING WORDEN GENOMEN BIJ DE OPTIMALISATIE EN EVALUATIE VAN DE ALTERNATIEVE ONTWERPEN.

### Definitie van beslisvariabelen

Aan de hand van de door de projectgroep ingevulde keuzemenu's zijn de beslisvariabelen van dit probleem:

- leidingdiameters;
- tracé; (later uitwerken)
- locatie afsluiters. (later uitwerken)

In een eerste instantie zullen enkel de leidingdiameters in aanmerking worden genomen. Dit betekent dat ook de OLM en sectiegrootte in eerste instantie niet in aanmerking worden genomen bij de prestatieindicatoren en randvoorwaarden.

## II.2 Stap 2

### Optimalisatie

In deze stap wordt voor elk scenario een alternatief ontwerp geoptimaliseerd aan de hand van de gedefinieerde doelfunctie en randvoorwaarden. Dit betekent dat er vier ontwerpen worden verkregen (zie tweede kolom in Tabel 20). De beslisvariabelen en doelfunctie worden voor de gehele tijdshorizon en per transitie fase berekend. Dit betekent dat elk ontwerp ingedeeld is in drie tussenontwerpen (zie derde kolom in Tabel 20). Tabel 21 biedt een voorbeeld van hoe de resultaten eruit komen te zien.

TABEL 20. OVERZICHT VAN ALTERNATIEVE ONTWERPEN EN TUSSENONTWERPEN.

Scenario	Alternatief eindontwerp	Tussenontwerp
Scenario 1	→ Ontwerp 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ontwerp 1, <math>t_1</math></li> <li>▪ Ontwerp 1, <math>t_2</math></li> <li>▪ Ontwerp 1, <math>t_3</math></li> </ul>
Scenario 2	→ Ontwerp 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ontwerp 2, <math>t_1</math></li> <li>▪ Ontwerp 2, <math>t_2</math></li> </ul>

Scenario 3	→ Ontwerp 3	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ontwerp 2, <math>t_3</math></li><li>▪ Ontwerp 3, <math>t_1</math></li><li>▪ Ontwerp 3, <math>t_2</math></li><li>▪ Ontwerp 3, <math>t_3</math></li></ul>
Scenario 4	→ Ontwerp 4	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ontwerp 4, <math>t_1</math></li><li>▪ Ontwerp 4, <math>t_2</math></li><li>▪ Ontwerp 4, <math>t_3</math></li></ul>

TABEL 21 . FORMAT VOOR DE RESULTATEN VAN HET OPTIMALISATIEPROCES. DE GEWIJZIGDE LEIDINGEN EN BIJBEHORENDE NIEUWE DIAMETERS WORDEN PER SCENARIO EN TRANSITIE FASE WEERGEGEVEN.

	Scenario 1 - Ontwerp 1			Scenario 2 - Ontwerp 2			Scenario 3 - Ontwerp 3			Scenario 4 - Ontwerp 4		
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$
	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$
	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$
	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$	$j, D_j$
	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
Doelfunctie per fase	$\sum_j^M D_{jt1} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt2} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt3} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt1} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt2} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt3} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt1} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt2} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt3} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt1} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt2} \times L_j$	$\sum_j^M D_{jt3} \times L_j$
Doelfunctie per scenario	$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times D_{jt} \times L_j$			$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times D_{jt} \times L_j$			$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times D_{jt} \times L_j$			$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times D_{jt} \times L_j$		

**Simulatie - evaluatie prestatie-indicatoren**

In deze stap wordt elk alternatief ontwerp verkregen in stap 2 aan alle scenario's onderworpen. Hiermee worden de prestaties van elk alternatief ontwerp onder de verschillende scenario's verkregen. Dit geeft inzicht in hoe elk alternatief ontwerp presteert op drukgradiënt, verblijftijd en snelheid, indien de toekomst anders is dan het scenario waarvoor het geoptimaliseerd is. De prestatie van elk alternatief ontwerp onder elk scenario wordt per transitiefase gesimuleerd. Tabel 22 illustreert de berekeningen voor één prestatie indicator. Deze berekeningen dienen voor alle prestatie-indicatoren uitgevoerd te worden. In Tabel 23 worden de prestatie indicatoren per ontwerp samengevat.

TABEL 22. VOORBEELD VAN DE BEREKENING VAN EEN PRESTATIE INDICATOR (DRUKGRADIËNT, VERBLIJFTIJD OF SNELHEID). DE VERSCHILLENDE KLEUREN GEVEN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S AAN.

	Scenario 1			Scenario 2			Scenario 3			Scenario 4		
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
Ontwerp 1, t <sub>1</sub>	PI			PI			PI			PI		
Ontwerp 1, t <sub>2</sub>		PI			PI			PI			PI	
Ontwerp 1, t <sub>3</sub>			PI			PI			PI			PI
	totaal			totaal			totaal			totaal		
<b>Maximum: prestatie ontwerp 1</b>												
Ontwerp 2, t <sub>1</sub>	PI			PI			PI			PI		
Ontwerp 2, t <sub>2</sub>		PI			PI			PI			PI	
Ontwerp 2, t <sub>3</sub>			PI			PI			PI			PI
	totaal			totaal			totaal			totaal		
<b>Maximum: prestatie ontwerp 2</b>												
Ontwerp 3, t <sub>1</sub>	PI			PI			PI			PI		
Ontwerp 3, t <sub>2</sub>		PI			PI			PI			PI	
Ontwerp 3, t <sub>3</sub>			PI			PI			PI			PI
	totaal			totaal			totaal			totaal		
<b>Maximum: prestatie ontwerp 3</b>												
Ontwerp 4, t <sub>1</sub>	PI			PI			PI			PI		
Ontwerp 4, t <sub>2</sub>		PI			PI			PI			PI	
Ontwerp 4, t <sub>3</sub>			PI			PI			PI			PI
	totaal			totaal			totaal			totaal		
<b>Maximum: prestatie ontwerp 4</b>												

TABEL 23. OVERZICHT VAN PRESTATIE-INDICATOREN PER ONTWERP.

	Doelfunctie	Max. drukgradiënt	Max. verblijftijd	Max. overtreding snelheid
Ontwerp 1	$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times D_{jt}$ $\times L_j$ (uit tabel 2)	Maximum >> prestatie ontwerp 1 (uit tabel 3)	Maximum >> prestatie ontwerp 1 (uit tabel 3)	Maximum >> prestatie ontwerp 1 (uit tabel 3)
Ontwerp 2	$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times D_{jt}$ $\times L_j$ (uit tabel 2)	Maximum >> prestatie ontwerp 2 (uit tabel 3)	Maximum >> prestatie ontwerp 2 (uit tabel 3)	Maximum >> prestatie ontwerp 2 (uit tabel 3)
Ontwerp 3	$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times D_{jt}$ $\times L_j$ (uit tabel 2)	Maximum >> prestatie ontwerp 3 (uit tabel 3)	Maximum >> prestatie ontwerp 3 (uit tabel 3)	Maximum >> prestatie ontwerp 3 (uit tabel 3)
Ontwerp 4	$\sum_t^T \sum_j^M y_{jt} \times D_{jt}$ $\times L_j$ (uit tabel 2)	Maximum >> prestatie ontwerp 4 (uit tabel 3)	Maximum >> prestatie ontwerp 4 (uit tabel 3)	Maximum >> prestatie ontwerp 4 (uit tabel 3)

### II.3 Stap 3

In stap 2 is voor elk alternatief ontwerp de prestatie op de verschillende criteria bepaald. Om het beste ontwerp te kiezen is het nodig om de alternatieve ontwerpen te vergelijken en rangschikken. Dit kan door middel van een multicriteria-analyse. Een multicriteria-analyse helpt om het beslissingsproces transparant te houden en beslissingen te onderbouwen. In het kader van dit project wordt een eenvoudige multicriteria-analyse voorgesteld, met daarin de volgende stappen:

1. **Normalisatie:** prestaties worden genormaliseerd op de hoogste waarde. Het resultaat daarvan is een tabel in de vorm van

3. Tabel 23 waarin alle prestatie-indicatoren en getal zijn tussen 0 en 1.
4. Weging: elke prestatie-indicator krijgt een "gewicht". Meerdere opties zijn denkbaar, bv. alle prestatie indicatoren krijgen hetzelfde gewicht, of een ander. In Tabel 24 worden vijf opties weergegeven.
5. Gewogen somming: per alternatief ontwerp en voor elke weeg-optie worden de genormaliseerde prestatie indicatoren door middel van een gewogen somming opgeteld:

$$\text{score}(\text{ontwerp } x, \text{optie } y) = \sum_{\text{prest.ind.}} \text{gewicht}(y) \times \text{genormaliseerde prestatie indicator}(x)$$

Zo wordt per ontwerp en optie een score verkregen, zoals weergegeven in Tabel 25.

6. Rangschikking: voor elke weeg-optie worden de alternatieve ontwerpen gerangschikt. Het ontwerp met de laagste score wordt nummer één in de rangschikking, het ontwerp met de hoogste score wordt de laatste in de rangschikking. Zo wordt per optie het beste ontwerp geselecteerd.

TABEL 24. WEGING VAN PRESTATIE INDICATOREN: VOORBEELDEN VAN OPTIES.

Optie	Doelfunctie	Max. drukgradiënt	Max. verblijftijd	Max. overtreding snelheid
1	0.25	0.25	0.25	0.25
2	0.4	0.2	0.2	0.2
3	0.2	0.4	0.2	0.2
4	0.2	0.2	0.4	0.2
5	0.2	0.2	0.2	0.4

TABEL 25. GEWOGEN SOMMING.

	Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4	Optie 5
Ontwerp 1	<i>score (1,1)</i>	<i>score (1,2)</i>	<i>score (1,3)</i>	<i>score</i>	<i>score</i>
Ontwerp 2	<i>score (2,1)</i>	<i>score</i>	<i>score</i>	<i>score</i>	<i>score</i>
Ontwerp 3	<i>score (3,1)</i>	<i>score</i>	<i>score</i>	<i>score</i>	<i>score</i>
Ontwerp 4	<i>score</i>	<i>score</i>	<i>score</i>	<i>score</i>	<i>score</i>



## Bijlage III

### Basic notions on genetic algorithms

GAs were first proposed by Holland (1975), and then further developed by Goldberg (1989) and others in the following years. The first application to optimization of a water distribution pipeline is reported in the paper of Goldberg and Kuo (1987).

The idea behind GAs is based on evolution mechanisms observed in nature, i.e., a GA mimics the natural evolution of populations. This is, a higher fitness of an individual with respect to its environment results in a higher likelihood of that individual transferring the genes responsible for this fitness to the next generation. In terms of an optimization problem each individual (also referred to as chromosome) is a possible solution to the problem, and is represented by a vector containing a set of genes:

$$\text{individual} = \{\text{gene}_1 \text{ gene}_2 \text{ gene}_3 \dots \text{gene}_x\}$$

---

As an example consider the design of a distribution network. The solution to this problem is assigning one diameter to each pipe. The diameter assigned to each pipe is a gene, and the vector containing the diameters assigned to all pipes is an individual.

---

#### Classic genetic algorithm

A classic GA, used for single-objective and implicit multi-objective optimization problems starts with an initial population of individuals and from this point on it is basically an iterative process with each iteration consisting of two steps: evaluation and generation. This iterative process goes on until a given stop criteria is met. At that point, the best individual from the final population is chosen as the solution to the problem. The entire procedure can briefly be described as follows:

1. **Initial population**

The algorithm starts with an initial population formed by a group of feasible randomly generated individuals. The size of the population is determined by the user.

2. **Evaluation**

The performance of each individual of this population as a solution to the problem is determined through an evaluation function, which is problem dependent.

---

As an example consider the same design problem. If the objective is to minimize pipe costs, then the performance of each individual, or vector with diameters, is the summed cost associated with those diameters for their respective lengths in the network.

---

### 3. Generation

The generation step includes selection and recombination of individuals and produces a new population of individuals (offspring). For the creation of new individuals the following genetic operators are used:

3.1. **Selection:** selection is the process used to select individuals for reproduction to create the next generation. It is a resource that guides the search towards better individuals. A fitness function<sup>2</sup> is used to determine how many offspring that individual can produce. In this way, high-fitness individuals are more likely to produce offspring and to propagate their genes to the next generation. There are different selectors available. In GONDWANA the following selectors can be chosen by the user:

- **Rank:** this selector ranks individuals by their evaluation value and assigns a fitness dependent on the position of each individual in the rank list. Selection by rank introduces a uniform scaling over the population and is simple and straightforward method for controlling selective pressure;
- **Truncation:** this selector sorts individuals according to their evaluation value and then selects a percentage of individuals that are allowed to produce offspring, based on a truncation threshold. The selected individuals produce uniform and at random offspring. The truncation threshold is a parameter defined by the user;
- **Tournament:** this selector chooses a number of individuals to compete in a tournament. Individuals compete two-by-two, and the one with the highest fitness wins and is chosen to produce offspring.

3.2. **Crossover:** Crossover is an exploitative resource that leads the population to converge in the direction of good solutions. This operation consists in exchanging genes between two parent individuals that survived the selection process and produce new offspring individuals with characteristics of both parents. The crossover rate determines how many of the selected individuals undergo crossover. There are several types of crossover. In GONDWANA the following are available:

- **One-point crossover:** In one-point crossover a point in the vector of the parent individuals is chosen at random. The genes to the right of this point are exchanged between the parent individuals, forming two new individuals: the offspring. Figure 27(a) illustrates an example of one-point crossover.
- **Two-point or multi-point crossover:** In two-point crossover and multi-point crossover two, or more points, respectively, in the vector of the parent individuals are chosen at random. The genes between these points are exchanged between the parent individuals, forming two new individuals: the offspring. Figure 27 (b) illustrates an example of two-point crossover.

---

<sup>2</sup> Evaluation of an individual and its fitness are sometimes used as being the same concept, but they are not. The evaluation function provides a measure of an individual's performance, independently of other individuals in the population. The fitness function provides a measure of probability of reproduction of each individual, and depends on the evaluation of the individual, on the evaluation of other individuals and on the type of selector that is considered.

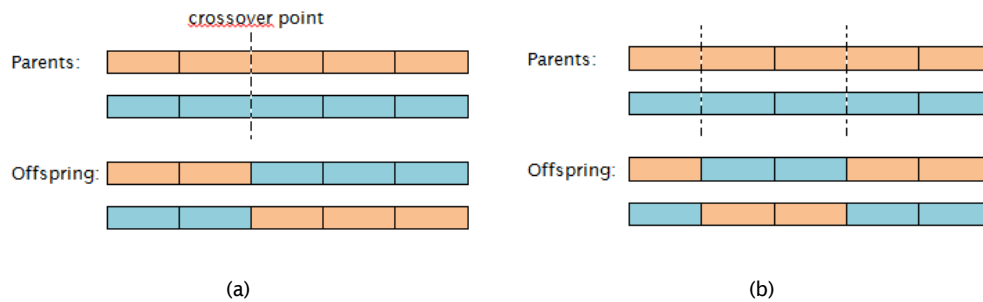


FIGURE 27. ILLUSTRATIVE EXAMPLE OF (A) ONE-POINT CROSSOVER, AND (B) TWO-POINT CROSSOVER.

3.3. **Mutation:** mutation is an exploratory resource. This operator consists in altering one gene at random from an individual. By introducing some random variability, mutation is responsible for avoiding that individuals become too similar and that the algorithm evolves in only one direction. Figure 28 illustrates an example of mutation. Different types of mutation are included in GONDWANA:

- **uniform mutation:** with a uniform likelihood of a gene mutating to any value within the specified valid range;
- **proximity mutation:** with a uniform likelihood of a gene mutating to any value within a specified proximity range, either in number space or topologically speaking on the network (for element selections). The proximity range is defined by the user.

*As an example consider a decision variable that can adopt any of the following ordered values [a, b, c, d, e, f, g], and a gene whose current value is d. A uniform mutation will change the value d to any other value in the list. A proximity mutation with proximity level 1 will change the value of the gene to either c or e, while with a proximity level 2 to either b, c, e or f.*

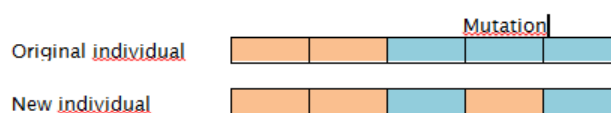


FIGURE 28. ILLUSTRATIVE EXAMPLE OF MUTATION.

3.4. **Replacer:** Once the new individuals are created the new population can be generated. To choose which individuals from the parent population to replace by offspring individuals an operator called **replacer** is used. There are several types of replacers. For single-objective and implicit multi-objective problems GONDWANA automatically uses a generational replacer. The generational replacer can be subdivided in:

- **Pure generational:** this is the most well-known and used algorithm. This algorithm creates an entirely new offspring population at each iteration, i.e., all parent individuals are replaced by new offspring individuals.
- **Generational elitist:** elitism can be added to the pure generational algorithm, transforming it into a **generational elitist GA**. Elitism is responsible for

keeping some individuals from one generation to the next. This ensures that the best solutions are not lost from one generation to the next.

#### 4. Stop criteria

There are different possibilities to define stop criteria, or conditions for termination, based on the convergence of solutions or on the number of iterations. GONDWANA offers the user the possibility of choosing between the following criteria:

- 4.1. **Evaluation:** the algorithm stops when a given number of evaluations is reached. The number of evaluations is specified by the user;
- 4.2. **Generation:** the algorithm stops when a given number of generations is reached. The number of generations is specified by the user;
- 4.3. **Change:** the algorithm stops when the chance of improvement in following generation is assumed to be too low. In GONDWANA this stop criteria is met when a relative change between solutions is less than a threshold value, over a given number of consecutive generations, both specified by the user.

Figure 29 illustrates how a GA works.

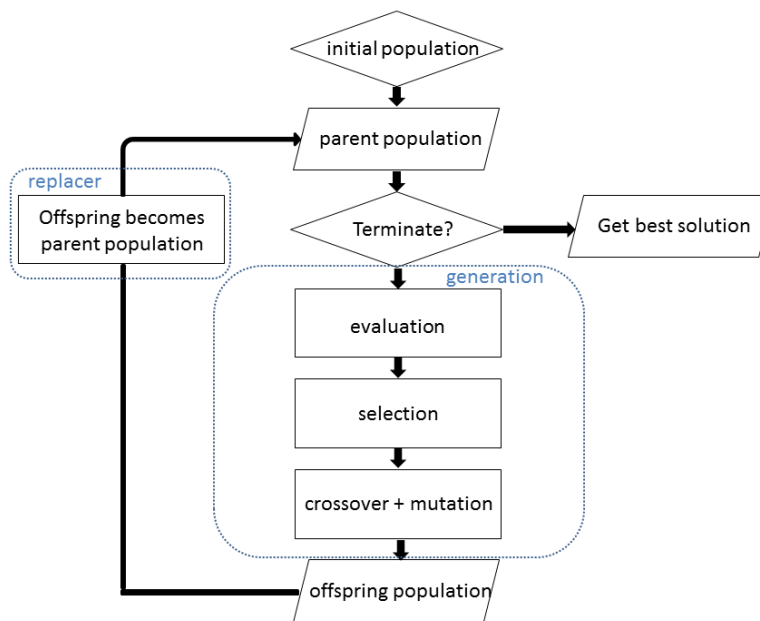


FIGURE 29. SCHEMATIC REPRESENTATION OF HOW A GENERATIONAL GA WORKS.

#### Non-dominated sorting GA (NSGA II)

A Non-dominated sorting GA (NSGA II), used for explicit multi-objective optimization works according to the following steps (Deb, et al., 2002):

1. At first an initial population  $P_0$ , with size  $N$ , is created.
2. This population is sorted based on non-domination<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> To understand this concept keep in mind that multi-objective problems give rise to a set of optimal solutions (the so called Pareto front) instead of a single optimal solution. One solution on this Pareto front cannot be said to be better than the others, as they perform differently on different objectives. This means that it is not possible to rank solutions in 1<sup>st</sup> best, 2<sup>nd</sup> best, and so on, like with single-objective problems. For instance, imagine a problem with two objectives you

3. A rank is assigned to each non-dominated solution, equal to its non-domination level (1 is the best front, 2 is the next front level, and so on).
4. The first offspring population  $Q_0$ , also with size  $N$ , is created from the initial parent population using binary tournament, crossover and mutation.
5. From this first generation onwards, new generations are created by (Figure 30 illustrates these steps):
  - i. first combining the parent ( $P_t$ ) and offspring populations ( $Q_t$ ) into one population ( $R_t$ ) of size  $2N$ .
  - ii. Then, a non-dominated sorting classifies this entire population, identifying all non-dominated fronts ( $F_1, F_2, \dots$ ).
  - iii. A new parent population ( $P_{t+1}$ ) of size  $N$  is formed by adding individuals starting from the first front ( $F_1$ ) and proceeding with the individuals of the subsequent fronts until the number of individuals exceeds  $N$  (in Figure 24 this would be the sum of population sizes of  $F_1, F_2$  and  $F_3$ ). At this point, no more individuals from subsequent fronts are added and the number of already added individuals needs to be reduced to  $N$ . In order to reduce the number of individuals to  $N$ , some of the individuals from the last front need to be rejected. This rejection is based on a crowding distance<sup>4</sup> assigned to each individual. The solutions with a smaller crowding distance are rejected.
  - iv. A new offspring population ( $Q_{t+1}$ ) of size  $N$  is created from the parent population ( $P_{t+1}$ ) obtained in the previous step through selection, crossover and mutation.
  - v. Repeat these steps until the stop criterion is met.

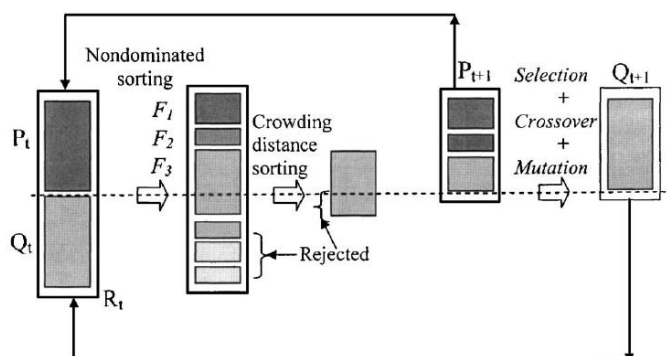


FIGURE 30. SCHEMATIC REPRESENTATION OF HOW A NSGAII WORKS (YANDAMURI, ET AL., 2006).

wish to minimize, and assume the following solutions are obtained: A(1,6), B(2,5), C(3,4), D(2,6), E(4,5) and F(3,6). How can one tell which solution is best? It is not possible to say if A performs better than B or C, but it is possible to say that A performs better than D, that B performs better than D and E, and that C performs better than F. This means that D, E and F are dominated by A, B and C. A, B and C are not dominated by any other solutions and therefore form the first non-dominated front. Putting aside this first front, one can look at the remaining solutions: D and E are not dominated, and F is dominated by D. So, D and E form the second non-dominated front. F goes into the third non-dominated front. Non-domination sorting basically divides the solutions in fronts with different levels of non-domination.

<sup>4</sup> The crowding distance is an estimate of the distance between a particular solution and its neighbour solutions on the same non-dominated front. A solution with a smaller crowding distance is more crowded by other solutions, than a solution with a larger crowding distance. When selecting solutions on the same non-dominated front, solutions located in a less crowded region (thus with a larger crowding distance) are preferred.

## Bijlage IV

Voorbeeld lijst met transitiefases

TABEL 26. DEEL VAN DE LIJST VAN LEIDINGEN DIE IN ELKE FASE WORDEN GESANEERD VOOR DE OPLOSSING GEMARKEERD MET EEN GROENE CIRKEL IN DE PARETOCURVE 2A (HOOFDSTUK 6.4.2).

leiding	fase	leiding	fase	leiding	fase	leiding	fase	leiding	fase	leiding	fase	leiding	fase
X00191.X10248.1	1	X04839.X09588.1	1	X07726.X07727.1	1	X08104.X05799.1	1	X09807.X00781.1	1	X11607.X07128.1	1	X12781.X04741.1	1
X00193.X08089.1	1	X05030.X10973.1	1	X07727.X07728.1	1	X08115.X05752.1	1	X09807.X11852.1	1	X11607.X12880.1	1	X12781.X04744.1	1
X00196.X10246.1	1	X05292.X07987.1	1	X07729.X07730.1	1	X08115.X07894.1	1	X09808.X09809.1	1	X11660.X12278.1	1	X12781.X09588.1	1
X00274.X10293.1	1	X05304.X05305.1	1	X07729.X07731.1	1	X08311.X08312.1	1	X09808.X12586.1	1	X11852.X00760.1	1	X12816.X01669.1	1
X00288.X10297.1	1	X05306.X10910.1	1	X07731.X07746.1	1	X08311.X10404.1	1	X09828.X10294.1	1	X11852.X11853.1	1	X12880.X03354.1	1
X00369.X13629.1	1	X05310.X09010.1	1	X07731.X07747.1	1	X08456.X00728.1	1	X10058.X13291.1	1	X11853.X00724.1	1	X13202.X08456.1	1
X00486.X12491.1	1	X05314.X08675.1	1	X07735.X07727.1	1	X08460.X08461.1	1	X10246.X00203.1	1	X11884.X04837.1	1	X13327.X13328.1	1
X00497.X11660.1	1	X05332.X07988.1	1	X07735.X07736.1	1	X08461.X00635.1	1	X10246.X10247.1	1	X11884.X04840.1	1	X13327.X14778.1	1
X00550.X10803.1	1	X05456.X09494.1	1	X07737.X07735.1	1	X08480.X03343.1	1	X10247.X00194.1	1	X11884.X04842.1	1	X13328.X12342.1	1
X00551.X07975.1	1	X05464.X09240.1	1	X07739.X07737.1	1	X08480.X08961.1	1	X10247.X10248.1	1	X12120.X10403.1	1	X13396.X11571.1	1
X00628.X08461.1	1	X05465.X13624.1	1	X07739.X07740.1	1	X08491.X03352.1	1	X10248.X13774.1	1	X12168.X05467.1	1	X13396.X14777.1	1
X00718.X10058.1	1	X05747.X07894.1	1	X07745.X07731.1	1	X08492.X08493.1	1	X10293.X00272.1	1	X12212.X09116.1	1	X13624.X05475.1	1
X00721.X10058.1	1	X05750.X08115.1	1	X07747.X07749.1	1	X08675.X06009.1	1	X10293.X10294.1	1	X12212.X14252.1	1	X13624.X12168.1	1
X00723.X13291.1	1	X05797.X08056.1	1	X07750.X07739.1	1	X08675.X08676.1	1	X10297.X00283.1	1	X12220.X05301.1	1	X13629.X07745.1	1
X00725.X08456.1	1	X05800.X08056.1	1	X07751.X07750.1	1	X08736.X08168.1	1	X10297.X00286.1	1	X12220.X05303.1	1	X13744.X12455.1	1
X00779.X09807.1	1	X05803.X08102.1	1	X07752.X07751.1	1	X08886.X08887.1	1	X10402.X03061.1	1	X12220.X07987.1	1	X13774.X00287.1	1
X01626.X08886.1	1	X05806.X11113.1	1	X07753.X07754.1	1	X08887.X01644.1	1	X10402.X03064.1	1	X12278.X00503.1	1	X14053.X07126.1	1
X01630.X08996.1	1	X05816.X08103.1	1	X07753.X07755.1	1	X08961.X03071.1	1	X10402.X10403.1	1	X12280.X12281.1	1	X14053.X12764.1	1
X01643.X09382.1	1	X05829.X11324.1	1	X07755.X07752.1	1	X08961.X09791.1	1	X10403.X03073.1	1	X12281.X07929.1	1	X14061.X07729.1	1
X01646.X08887.1	1	X05831.X11324.1	1	X07756.X07757.1	1	X08964.X04507.1	1	X10577.X10578.1	1	X12285.X11606.1	1	X14061.X10869.1	1
X01648.X08997.1	1	X05931.X05912.1	1	X07759.X07761.1	1	X08964.X12672.1	1	X10803.X10804.1	1	X12342.X06455.1	1	X14252.X03026.1	1

X01666.X12816.1	1	X06106.X06299.1	1	X07759.X07761.2	1	X08995.X08996.1	1	X10804.X00707.1	1	X12342.X12278.1	1	X14382.X09809.1	1
X01672.X09301.1	1	X06421.X10870.1	1	X07760.X07762.1	1	X08995.X08997.1	1	X10829.X00483.1	1	X12455.X12456.1	1	X14579.X12285.1	1
X01717.X09070.1	1	X06469.X13328.1	1	X07761.X07760.1	1	X08996.X11660.1	1	X10829.X10882.1	1	X12456.X03218.1	1	X14767.X13744.1	1
X01720.X09070.1	1	X06701.X12120.1	1	X07762.X07753.1	1	X08997.X09382.1	1	X10829.X12491.1	1	X12456.X12457.1	1	X14768.X13744.1	1
X02504.X08460.1	1	X06737.X09828.1	1	X07894.X07401.1	1	X09010.X09011.1	1	X10869.X10870.1	1	X12457.X12545.1	1	X14777.X13202.1	1
X02512.X12532.1	1	X06747.X07756.1	1	X07929.X05832.1	1	X09010.X10910.1	1	X10910.X05308.1	1	X12491.X01629.1	1	X14777.X14778.1	1
X03062.X10404.1	1	X06759.X07719.1	1	X07950.X05822.1	1	X09011.X05311.1	1	X10973.X05027.1	1	X12532.X02507.1	1	X14778.X13291.1	1
X03065.X09791.1	1	X06772.X07975.1	1	X07950.X08103.1	1	X09011.X08676.1	1	X10973.X05031.1	1	X12532.X08460.1	1	GBL00055.X07719.1	1
X03221.X12457.1	1	X07020.X14382.1	1	X07975.X10803.1	1	X09070.X06933.1	1	X11114.X05801.1	1	X12545.X03226.1	1	LBK00618.X07756.1	1
X03342.X08736.1	1	X07125.X08168.1	1	X07987.X07988.1	1	X09116.X09117.1	1	X11114.X11113.1	1	X12580.X08886.1	1	LBK00618.X07759.1	1
X03344.X08493.1	1	X07276.X10578.1	1	X07993.X10577.1	1	X09117.X08736.1	1	X11323.X05807.1	1	X12580.X12581.1	1	X07721.GBL00055.1	1
X03351.X08492.1	1	X07362.X09494.1	1	X08056.X11114.1	1	X09240.X12168.1	1	X11323.X11113.1	1	X12581.X01621.1	1	X07747.LBK00336.1	1
X03353.X08492.1	1	X07720.X07719.1	1	X08087.X06565.1	1	X09301.X01674.1	1	X11323.X11324.1	1	X12581.X14766.1	1	X07751.LBK00336.1	1
X03355.X08491.1	1	X07722.X07721.1	1	X08087.X08088.1	1	X09301.X12771.1	1	X11569.X00712.1	1	X12585.X04937.1	1	X09791.X08312.1	1
X03358.X08491.1	1	X07723.X07722.1	1	X08087.X08089.1	1	X09382.X01649.1	1	X11569.X11570.1	1	X12585.X12586.1	1	X09588.X04748.1	1
X04251.X07929.1	1	X07724.X07723.1	1	X08088.X00124.1	1	X09493.X05461.1	1	X11570.X11571.1	1	X12672.X08104.1	1	X11606.X11607.1	1
X04511.X12672.1	1	X07725.X07724.1	1	X08102.X08103.1	1	X09493.X09240.1	1	X11570.X11572.1	1	X12764.X12285.1	1	X12771.X12816.1	1
X04838.X07993.1	1	X07725.X07726.1	1	X08102.X08104.1	1	X09493.X09494.1	1	X11605.X11606.1	1	X12771.X01675.1	1		

leiding	fase	leiding	fase	leiding	fase	leiding	fase
X00487.X11579.1	2	X05551.X05568.1	2	X09277.X00509.1	2	X12383.X12384.1	2
X01025.X09847.1	2	X05605.X09202.1	2	X09277.X11484.1	2	X12384.X09037.1	2
X01068.X08667.1	2	X05727.X09021.1	2	X09655.X08825.1	2	X12384.X12317.1	2
X01259.X08708.1	2	X05731.X12234.1	2	X09746.X03024.1	2	X12504.X11120.1	2



X01262.X08708.1	2	X05736.X13865.1	2	X09746.X09747.1	2	X12504.X12234.1	2
X01364.X12063.1	2	X06182.X07110.1	2	X09747.X03028.1	2	X12696.X06543.1	2
X01366.X12063.1	2	X06545.X13344.1	2	X09834.X09835.1	2	X12696.X06546.1	2
X01367.X12063.1	2	X06547.X12696.1	2	X09834.X09836.1	2	X12725.X12822.1	2
X01793.X09905.1	2	X06548.X02089.1	2	X09835.X02472.1	2	X12750.X04249.1	2
X01839.X12107.1	2	X06755.X06753.1	2	X09847.X11816.1	2	X12750.X04252.1	2
X01989.X10530.1	2	X06767.X09277.1	2	X09847.X14591.1	2	X12822.X05732.1	2
X01991.X12107.1	2	X07220.X12750.1	2	X09904.X09905.1	2	X12927.X02661.1	2
X01994.X09991.1	2	X07385.X12287.1	2	X09905.X01796.1	2	X12927.X02666.1	2
X01996.X09991.1	2	X07386.X12288.1	2	X10341.X13344.1	2	X13162.X00238.1	2
X02006.X11634.1	2	X08105.X08106.1	2	X10342.X02654.1	2	X13162.X08278.1	2
X02007.X11634.1	2	X08105.X08107.1	2	X10471.X03011.1	2	X13194.X03441.1	2
X02066.X10582.1	2	X08239.X10662.1	2	X10471.X09038.1	2	X13194.X03448.1	2
X02079.X14073.1	2	X08277.X08107.1	2	X10492.X08106.1	2	X13194.X03458.1	2
X02082.X13256.1	2	X08277.X08278.1	2	X10492.X10493.1	2	X13256.X02081.1	2
X02085.X13949.1	2	X08278.X07716.1	2	X10493.X10494.1	2	X13256.X10582.1	2
X02088.X08715.1	2	X08498.X00488.1	2	X10494.X10630.1	2	X13717.X08931.1	2
X02090.X08714.1	2	X08498.X00490.1	2	X10530.X09991.1	2	X13865.X10630.1	2
X02091.X10341.1	2	X08498.X00491.1	2	X11120.X09021.1	2	X13949.X00611.1	2
X02094.X10341.1	2	X08665.X08666.1	2	X11311.X09904.1	2	X13949.X08715.1	2
X02471.X12725.1	2	X08666.X08667.1	2	X11483.X11484.1	2	X14028.X00705.1	2
X02655.X10342.1	2	X08708.X01365.1	2	X11483.X11579.1	2	X14028.X06768.1	2
X02659.X11200.1	2	X08714.X02087.1	2	X11559.X02475.1	2	X14073.X02080.1	2
X02662.X08825.1	2	X08715.X14073.1	2	X11559.X11560.1	2	X14152.X09655.1	2
X02664.X12927.1	2	X08716.X08717.1	2	X11560.X07434.1	2	X14152.X11200.1	2

X02665.X10342.1	2	X08716.X11782.1	2	X11560.X09836.1	2	X14154.X13717.1	2
X02667.X09655.1	2	X08717.X11634.1	2	X11579.X00493.1	2	X14276.X05599.1	2
X02670.X08825.1	2	X08931.X08932.1	2	X11756.X10582.1	2	X14276.X12288.1	2
X03017.X14154.1	2	X08932.X09746.1	2	X11782.X11311.1	2	X14306.X09022.1	2
X03392.X08239.1	2	X09021.X09022.1	2	X11816.X02835.1	2	X14306.X13865.1	2
X03456.X10662.1	2	X09037.X09038.1	2	X12107.X10530.1	2	X14425.X08714.1	2
X03457.X10662.1	2	X09200.X05602.1	2	X12234.X05733.1	2	X14425.X11756.1	2
X03460.X08239.1	2	X09200.X09201.1	2	X12287.X09201.1	2	X14591.X00999.1	2
X03598.X03589.1	2	X09200.X09202.1	2	X12316.X08932.1	2	X14591.X08666.1	2
X05139.X11200.1	2	X09202.X05603.1	2	X12316.X12317.1	2	X12383.X07088.1	2
(...)							

leiding	fase	leiding	fase
X00310.X08125.1	30	X08136.X10584.1	30
X01589.X09752.1	30	X08181.X06393.1	30
X01591.X09752.1	30	X08181.X13053.1	30
X01594.X09752.1	30	X08365.X05481.1	30
X02162.X11447.1	30	X08365.X10926.1	30
X02172.X13053.1	30	X08731.X05474.1	30
X02299.X09846.1	30	X08731.X10926.1	30
X02923.X13427.1	30	X08798.X02304.1	30
X03169.X08135.1	30	X09441.X05917.1	30
X03180.X08136.1	30	X09846.X02301.1	30
X03181.X08136.1	30	X09846.X08798.1	30
X04607.X11139.1	30	X10584.X03812.1	30

X04612.X11139.1	30	X10760.X06392.1	30
X05477.X08731.1	30	X10760.X10761.1	30
X05479.X10926.1	30	X11139.X04610.1	30
X05483.X08365.1	30	X11410.X05932.1	30
X05720.X08181.1	30	X11410.X09441.1	30
X05918.X07427.1	30	X12315.X13508.1	30
X05920.X09441.1	30	X12641.X02909.1	30
X05933.X11410.1	30	X12641.X02912.1	30
X06391.X08181.1	30	X12829.X11447.1	30
X06903.X14776.1	30	X13352.X13053.1	30
X07009.X10761.1	30	X13427.X02906.1	30
X07010.X12315.1	30	X13427.X12641.1	30
X07011.X08798.1	30	X14388.X12829.1	30
X08125.X02170.1	30	X14388.X13352.1	30
X08125.X02171.1	30	X14776.X12641.1	30
X08135.X03177.1	30	X14776.X13508.1	30
X08135.X03182.1	30	X12315.lungend01.1	30
lungend01.X08125.1	30		