



Gondwana: numerieke optimalisatie toegepast op drinkwaterdistributienetwerken

Peter van Thienen en Ina Vertommen (KWR)

In de afgelopen decennia is de aandacht toegenomen voor de optimalisatie van drinkwaterdistributiesystemen. Voor traditionele oplossingsmethoden zijn de systemen echter te complex. Er zijn veel ontwikkelingen geweest op het gebied van numerieke optimalisatiemethoden. Specifiek voor de optimalisatie van drinkwaterdistributiesystemen heeft KWR een softwareplatform ontwikkeld: Gondwana. Dit platform combineert flexibiliteit en vrijheid van optimalisatievraagstukken met een gebruiksvriendelijke grafische interface en uitgebreide gebruikersondersteuning. Dit biedt de hydraulische experts van KWR, en daarmee de hele drinkwatersector, de mogelijkheid krachtige en vaak complexe optimalisatietechnieken in te zetten.

Het drinkwaterdistributienetwerk zoals dat nu in de grond ligt, is het resultaat van de evolutie van materiaalgebruik, ontwerpfilosofieën en –doelstellingen door de tijd heen. Het ontwerp berust vaak op ervaringskennis en extra veiligheidsmarges. De laatste decennia zijn onderdelen hiervan geoptimaliseerd op basis van inzicht van experts en hier en daar ondersteund door gespecialiseerde software. Nu veel drinkwaterbedrijven steeds meer leidingen moeten gaan vervangen, is het zinvol om na te denken over de gewenste netstructuur. Daarbij moet rekening worden gehouden met diverse aspecten als leveringszekerheid, waterkwaliteit, energie en natuurlijk kosten. Hoewel experts hierbij goede strategieën toepassen, blijkt dat, in ieder geval voor deelproblemen, numerieke optimalisatiemethoden tot betere ontwerpen kunnen leiden dan klassieke benaderingen. Bovendien zijn er zoveel mogelijkheden dat ze niet allemaal kunnen worden doorgerekend met de klassieke benaderingen. Uitgaande van bijvoorbeeld tien verschillende mogelijke diameters voor 100 leidingsegmenten, moeten 10¹⁰⁰ netwerkontwerpen worden doorgerekend. In deze context bieden numerieke methoden experts de mogelijkheid om meer varianten te onderzoeken. Er zijn in de afgelopen 20 jaar veel ontwikkelingen geweest op het gebied van numerieke oplossingsmethoden, de zogenaamde “heuristieken” (aansluitend op specifieke problemen) en metaheuristieken (voor generieke problemen). KWR doet onderzoek naar meerdere complexe problemen, zoals optimale sensorplaatsing en ontwerp van streefstructuren, waarin een dergelijke aanpak van aanzienlijke meerwaarde kan zijn. Met deze ontwikkelingen in het achterhoofd heeft KWR Gondwana ontwikkeld, een softwareplatform voor generieke optimalisatie van het ontwerp en de operatie van drinkwaterdistributienetwerken, dat de kracht van metaheuristieken benut.

Het doel van Gondwana is om waterbedrijven te voorzien van een *tool* en expertkennis van KWR, om hen in allerhande optimalisatieproblemen rondom waterdistributiesystemen te ondersteunen, met toepassing in onderzoeks- en adviesprojecten. Het platform sluit aan op de behoeften van KWR wat betreft flexibiliteit en toepasbaarheid, en op de verschillende velden van expertise van de KWR-onderzoekers. Het platform is gebruiksvriendelijk in het opzetten en doorrekenen van problemen. Tegelijkertijd is het flexibel en uitgebreid genoeg voor verschillende toepassingsmogelijkheden en biedt het de vrijheid om nieuwe problemen te definiëren. Hoewel een dergelijk platform niet voor alle denkbare problemen een optimale oplossing kan bereiken, lijkt de generieke aanpak op het eerste gezicht goed bruikbaar voor diverse optimalisatieproblemen.

Optimalisatiesoftware voor drinkwaterdistributie

Er is veel academische belangstelling voor het ontwikkelen van diverse optimalisatie(meta-)heuristiek. Er bestaan talloze publicaties met betrekking tot dit thema, maar desondanks blijkt het in de praktijk weinig te worden toegepast. De oorzaak daarvan moet voornamelijk worden gezocht in het gebrek aan geschikte tools om de algoritmen toe te passen buiten de academische wereld. Hoewel er behoefte is aan een verdere ontwikkeling van deze modellen, ontbreekt een brug tussen het uitgevoerde onderzoek en de toepasbaarheid in de praktijk. Dit hangt samen met het feit dat er specialistische kennis nodig is voor doeltreffende toepassing van deze methodieken.

Er is een aantal commerciële softwarepakketten voor het optimaliseren van drinkwaterdistributiesystemen beschikbaar. Meerdere daarvan maken echter geen gebruik van (meta-)heuristieken en blijven dientengevolge beperkt tot kleinschalige problemen. Andere integreren wel heuristieken en zelfs



evolutionaire algoritmen, maar deze zijn in de regel ingesteld op een beperkt aantal doelstellingen en bieden beperkte flexibiliteit en vrijheid in het instellen van de optimalisatieparameters.

Een academisch gerichte tool, zoals *GANetXL*, ontwikkeld door de *Centre for Water Systems (University of Exeter)*, is krachtig en biedt flexibiliteit, maar eist veel kennis en expertise in het definiëren van de optimalisatieproblemen. Bovendien is het voor verschillende doelstellingen nodig om het programma aan te passen. Dit soort tools is daarom niet voor elke eindgebruiker geschikt, noch voor projecten met een beperkte doorlooptijd.

Er is dus ruimte voor een optimalisatietool die gebruik maakt van moderne (meta-)heuristieken, uitgebreide toepassingen kent (van ontwerp tot kalibratie, operatie en beheer) en geen ervaring met optimalisatietechnieken vereist. Met deze specifieke doelstellingen voor ogen is Gondwana ontwikkeld.

Gondwana

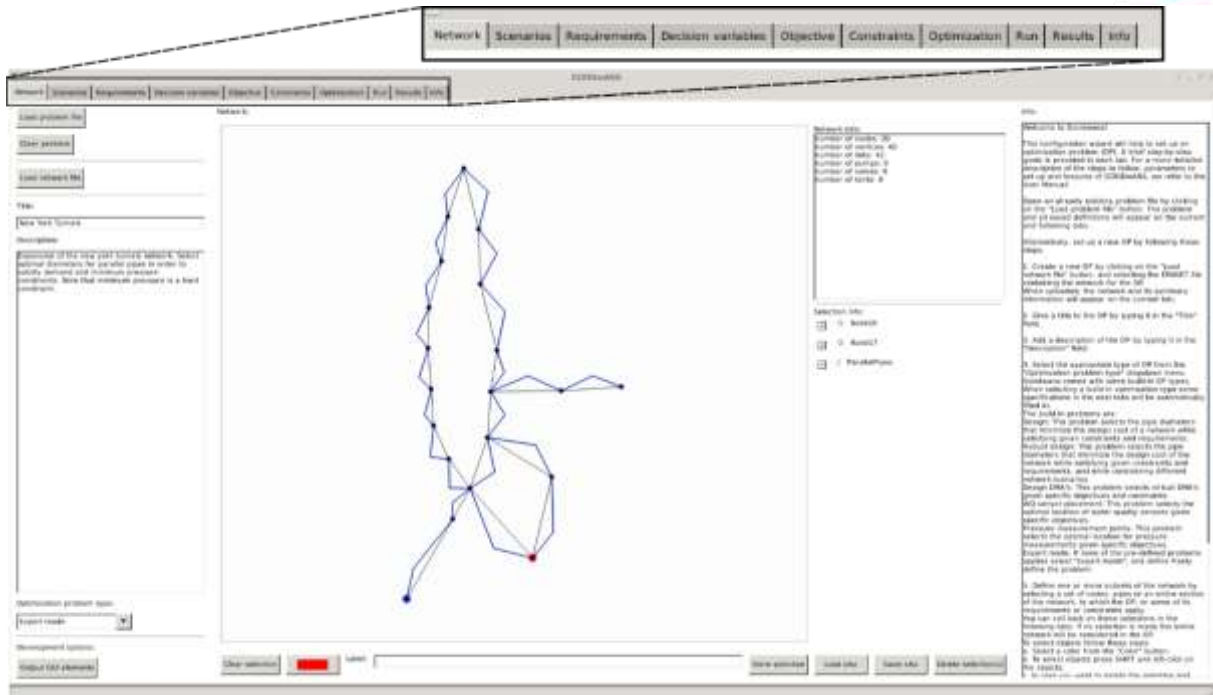
De structuur en het functioneren van een drinkwaterdistributienetwerk kunnen worden beschreven met een opsomming van componenten (knooppunten, leidingen, afsluiters, pompen, etc.), gebruiksregels (sturingen, vraagpatronen, schakelingen, condities) en hun onderlinge samenhang. Elk van deze componenten en gebruiksregels bevat een aantal kenmerken, zoals bijvoorbeeld de diameter en wandruwheid voor een leiding of de watervraag op ieder uur van de dag voor een verbruikspunt. Iedere toevoeging of weglating van een component of gebruiksregel, en iedere wijziging van een kenmerk ervan of een aspect van de onderlinge samenhang, kan gevolgen hebben voor de prestatie van het netwerk. Met prestatie wordt in dit geval bedoeld in hoeverre het netwerk in staat is om alle aansluitingen gedurende de gehele dag van water te voorzien met een voldoende hoge druk. Zo kan het vergroten van de diameter van een bepaalde leiding zorgen voor een hogere druk in de periferie van het netwerk. De prestatie kan echter ook breder worden gezien, bijvoorbeeld in termen van (aanleg-)kosten of waterkwaliteit (gemiddelde verblijftijd), of als combinatie van verschillende doelstellingen.

Een troep chimpansees met typemachines zal wellicht ooit toevallig een sonnet van Shakespeare intypen (volgens de statistische “Stelling van de eindeloos typende apen”) maar toch vooral ook veel onzin produceren. Evenzo zullen willekeurige wijzigingen in componenten, gebruiksregels, kenmerken en hun samenhang vaak leiden tot een verslechtering van de prestatie. Maar enkele willekeurige wijzigingen zouden tot een verbetering van de prestatie kunnen leiden. Door op willekeurige wijze veranderingen aan te brengen, maar *op gestructureerde wijze de enkele resulterende verbeteringen op te merken en verder te brengen* in een proces dat een “evolutionair algoritme” heet, kan stap voor stap naar een beter presterend netwerk worden gerekend. Dit lijkt een beetje op natuurlijke evolutie.

Dit is precies wat Gondwana doet. Gondwana staat voor *generic optimization platform for network design and operation*. De gebruiker kan bestaande netwerken laten inlezen, definiëren aan welke eisen het verbeterde netwerk moet voldoen en vaststellen in welke zin het verbeterd moet worden. Gondwana voert dit proces uit en geeft het resultaat weer.

Gebruik van Gondwana

De interface van Gondwana (Afbeelding 1) vormt een handvat om optimalisatieproblemen op gestructureerde wijze op te zetten. Op een reeks tabbladen worden in een logische volgorde achtereenvolgens de verschillende aspecten van een optimalisatieprobleem gedefinieerd of ingesteld (zie tabel 1). Voorbeelden van de definitie van beslisvariabelen, doelstellingen en randvoorwaarden zijn weergegeven in afbeelding 2. Tijdens het uitvoeren van de berekeningen worden de vorderingen gevisualiseerd (afbeelding 3).



Afbeelding 1: Hoofdscherm van Gondwana met tabbladen voor de definitie van deelaspecten, uitvoeren van berekeningen en analyse van resultaten. Voorbeeldnetwerk betreft het benchmarkprobleem 'New York tunnels'

Tabel 1: Beschrijving van tabbladen voor definitie van deelaspecten

| Tabblad | Beschrijving | Weergave |
|------------------|--|---------------|
| Netwerk | Begin van probleemdefinitie, inladen van startnetwerk en definitie van leiding- en knooppuntgroepen. | |
| Scenario's | Definitie van verschillende typen scenario's (wijzigingen in het netwerk, watervraag, besmettingsscenario's) | |
| Invoergegevens | Definitie/import/export van aanvullende gegevens, zoals kosten. | |
| Beslisvariabelen | Definitie van de componenten, gebruiksregels en kenmerken die door Gondwana aangepast kunnen worden. | Afbeelding 2a |
| Doelstellingen | Instellen van één of meerdere doelstellingen (voor impliciete of expliciet multicriteriumoptimalisatie) | Afbeelding 2b |
| Randvoorwaarden | Definitie van randvoorwaarden voor het netwerk, eventueel voor individuele scenario's. | Afbeelding 2c |
| Optimalisatie | Instellingen van het optimalisatieproces | |
| Uitvoeren | Inplannen en uitvoeren van optimalisatieberekeningen, monitoring gedurende berekeningen | |
| Resultaten | Analyse, visualisatie en export van de resultaten van de optimalisaties. | |

a)



We zien verschillende toepassingsmogelijkheden van Gondwana, in zowel (BTO-)onderzoeks- als adviesprojecten. Een aantal daarvan wordt hieronder summier beschreven.

I. Ontwerp:

Dit is een erg omvangrijk onderwerp dat bij verschillende optimalisatieproblemen speelt, zoals:

- het bepalen van optimale leidingdiameters, met als doelstellingen lage kosten en goede prestaties. Prestaties kunnen worden bepaald door mate van leveringszekerheid, gewenste druk, snelheid in leidingen (bv. voor garantie van zelfreiniging), verblijftijd, energieverbruik, waterkwaliteit etc.;
- het bepalen van optimale *DMA's (District Metered Areas)*, met als mogelijke doelstelling de detecteerbaarheid van lekken etc.
- het bepalen van optimale afsluiterconfiguraties, met als doelstellingen (of randvoorwaarden) lage ondermaatse leveringsminuten (OLM) en goede spuikbaarheid van secties
- het bepalen van optimale locaties van waterkwaliteitssensoren of monsternames, met als doelstellingen het minimaliseren van de detectietijd, het maximaliseren van de detectiekans of dekkingsgraad, het faciliteren van bronbepaling, etc.
- het bepalen van optimale locaties van drukmeetpunten, met als doelstellingen snelle lekdetectie en beheersen van minimale druk
- het ontwerp van streefstructuren en het ombouwen van huidige configuraties naar streefstructuren. Dit onderwerp beschouwt niet alleen de keuze van leidingdiameters, maar vereist ook de definitie van een secundair en tertiair net, keuze tussen vermaasde en vertakte ontwerpen, sectiegrootte, etc.

II. Inversieproblemen:

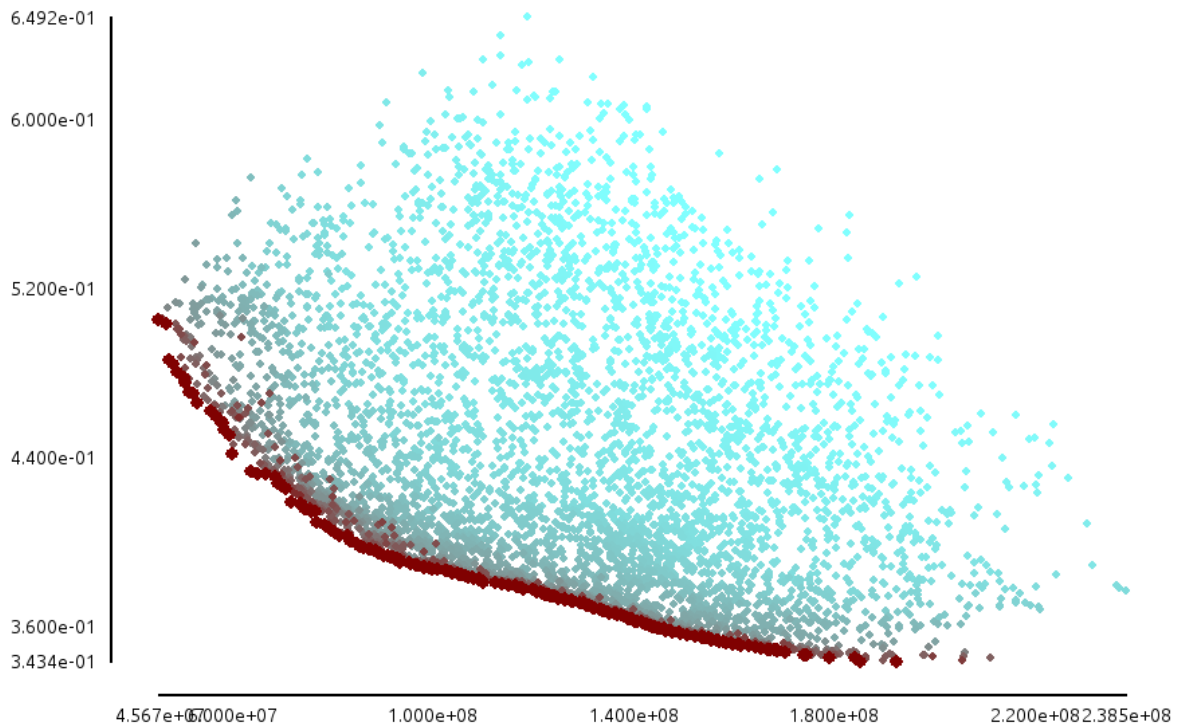
Inversieproblemen betreffen het omzetten van metingen in nieuwe kennis over een netwerk. Voorbeelden hiervan zijn het bepalen van de locatie van lekken en afsluiterstanden op basis van metingen. Dit is vooral van belang voor onderzoek.

III. Operatie

Dit aspect heeft betrekking op keuzes in operatie en pompsturing en kent doelstellingen als prestaties in waterkwaliteit en energieverbruik. Ook hier kunnen verschillende scenario's (bv. elektriciteitsstarieven en veranderende watervraag) en gevoeligheidsanalyses bij betrokken worden.

Afweging van doelstellingen

In de regel moet een ontwerp aan meerdere doelstellingen tegelijk voldoen en is dus een zogenoemde multicriteriumoptimalisatie nodig. Zo wil men bijvoorbeeld een zo hoog mogelijke opbrengst van een investering, maar daarnaast ook een zo laag mogelijk energieverbruik. De afweging tussen beide doelstellingen kan bij het uitvoeren van een optimalisatie van tevoren worden gemaakt, door te stellen dat bijvoorbeeld beide voor 50% meewegen in het eindresultaat. Wij noemen dit een "impliciete multicriteriumoptimalisatie", die zal leiden tot één ontwerp dat het best presteert op de gekozen combinatie en weging van de doelstellingen. Het is echter ook mogelijk om de afweging naderhand te maken in een zogeheten "expliciete multicriteriumoptimalisatie". Dit leidt tot een verzameling van ontwerpen die allemaal in wisselende verhoudingen optimaal presteren op de gekozen doelstellingen. Deze verzameling wordt een "Paretofront" genoemd. Een voorbeeld is weergegeven in afbeelding 4, waarin op de twee assen de prestatie op twee doelstellingen is weergegeven. Op beide doelstellingen is minimalisatie gewenst. Alle punten representeren een ontwerp, maar alleen de bruine punten aan de linker onderrand (het Paretofront) presteren optimaal. De gebruiker kan de verschillende ontwerpen op het Paretofront vergelijken en besluiten in hoeverre een verbetering op de ene doelstelling een concessie op de andere rechtvaardigt.



Afbeelding 4: Afweging tussen twee doelstellingen (prestaties op de horizontale resp. verticale as), met optimale oplossingen op het Paretofront in het bruin weergegeven

Validatie

Om het functioneren van Gondwana te testen en te bepalen in hoeverre het programma tot optimale oplossingen komt, is het toegepast op een tweetal benchmarks uit de wetenschappelijke literatuur. Het zijn weliswaar veel kleinere netwerken dan die waar Gondwana voor ontworpen is, maar voor deze benchmarks zijn door diverse onderzoekers door de jaren heen resultaten gepubliceerd waarmee een goede vergelijking kan worden gemaakt. De eerste benchmark is het *New York Tunnels*-probleem[1]. Dit betreft de vraag hoe een bestaande netwerkstructuur zo goedkoop mogelijk kan worden uitgebreid met extra leidingen parallel aan bestaande leidingen, om aan de toegenomen vraag te voldoen bij handhaving van vastgestelde minimale druk op alle punten. De tweede benchmark is het ontwerp van het hoofdnetwerk voor de stad Hanoi[2]. Ook hierbij geldt de wens om de aanleg zo goedkoop mogelijk te maken en toch aan de watervraag en minimale druk op alle punten te voldoen.

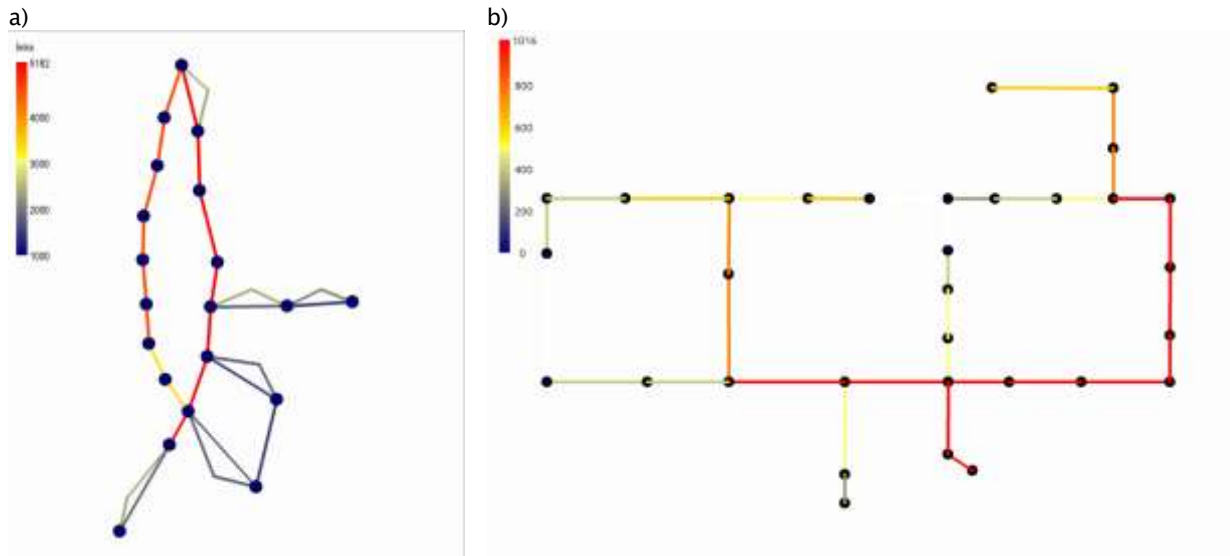
In beide gevallen zijn de leidingdiameters de beslisvariabelen. Deze zijn te kiezen uit een lijst van commercieel beschikbare leidingdiameters met bijbehorende kosten. Het betreft 21 mogelijke parallelle leidingen en 16 beschikbare diameters voor het New York Tunnels-probleem en 34 leidingen en 6 beschikbare diameters voor het Hanoi-probleem (in beide gevallen inclusief de optie om geen leiding te leggen). Het aantal mogelijke oplossingen is daardoor respectievelijk 16^{21} en 6^{34} . Voor elke gegenereerde oplossing controleert Gondwana of deze aan de randvoorwaarden voldoet door de druk op de knooppunten te simuleren in EPANET[3]. De doelfunctie van beide problemen berekent de ontwerpkosten door de kosten per meter leiding op te tellen voor het volledige netwerk.

De verkregen resultaten tonen dat Gondwana goed werkt. Voor beide problemen presteert Gondwana zelfs iets beter dan in de literatuur gepubliceerde technieken en oplossingen (zie tabel 2). Voor beide gevallen zijn de leidingdiameters voor het optimale ontwerp ter illustratie weergegeven in afbeelding 5.

Tabel 2: Vergelijking van benchmarkresultaten.

| | Gondwana | Veelvoorkomende resultaten in de literatuur |
|------------------|----------------|---|
| New York tunnels | \$38,5 miljoen | \$38,6 miljoen |

| | | |
|-------|----------------|----------------|
| Hanoi | \$5,95 miljoen | \$6,08 miljoen |
|-------|----------------|----------------|



Afbeelding 5: Geoptimaliseerde ontwerpen voor de benchmarkgevallen: a) *New York Tunnels*, b) Hanoi

In het geval van de New York Tunnels identificeert Gondwana de aanleg van zes nieuwe parallelle leidingen als oplossing om aan de toegenomen watervraag en minimale drukvoorwaarden te voldoen. Dit resultaat verschilt met die in de literatuur in de parallelle leidingen die gekozen worden en de toegekende diameters. In het geval van Hanoi voldoet een vertakt netwerk blijkbaar aan de opgelegde randvoorwaarden en is dit ook het meest gunstig wat betreft kosten. Veelvoorkomende resultaten in de literatuur identificeren als oplossing voor dit probleem een vermaasd netwerk.

De volgende stap: praktijktoepassing streefstructuren

Een van de beoogde toepassingen op korte termijn is de inzet van Gondwana voor het ontwerp van streefstructuren. Deze toepassing sluit perfect aan op de huidige behoefte van de praktijk en biedt KWR een uitdagende kans om Gondwana verder uit te breiden en de waarde ervan aan te tonen. Hierbij moet een aantal stappen worden doorlopen:

1. formuleren van bedrijfsspecifieke doelfuncties, zoals bijvoorbeeld de minimalisatie van kosten, drukgradiënt of inhoud van het netwerk
2. formuleren van bedrijfsspecifieke randvoorwaarden, zoals leveringszekerheid en -continuïteit, waterkwaliteit (eventueel in verblijftijd of snelheid te vertalen), veiligheidsstralen in de nabijheid van dijken en monumentale panden
3. keuze van beslisvariabelen, in de regel de leidingdiameters op een geselecteerd deel van of het gehele netwerk en eventueel ook afsluiterlocaties
4. definitie van scenario's, onder meer verschillende verbruiks- en stringsscenario's

Het doorrekenen van leveringszekerheid vergt het automatisch opstellen van een reeks uitvalsscenario's voor individuele leidingen of secties, waarbij voor ieder scenario wordt getoetst of het aan de randvoorwaarden voldoet.

Perspectief

Op de korte termijn zal Gondwana worden ingezet in verschillende projecten voor diverse optimalisatieproblemen, zoals bijvoorbeeld optimale locatiekeuze voor waterkwaliteitssensoren. De flexibele opzet van Gondwana maakt het mogelijk om steeds nieuwe problemen aan te pakken. We verwachten ook dat door de toepassing van optimalisatietechnieken in de praktijk duidelijk wordt waar verdere ontwikkeling op dit vlak nodig is.



In eerste instantie is Gondwana bedoeld voor toepassing door onderzoekers binnen KWR ten behoeve van vraagstukken bij waterbedrijven en in het bedrijfstakonderzoek. Doordat bij individuele projecten waar nodig steeds specifieke functionaliteit aan Gondwana wordt toegevoegd, blijft het platform groeien in mogelijkheden en toepasbaarheid. Hiermee blijft de aansluiting op de behoeften van onderzoekers en de praktijk gewaarborgd en wordt tevens een uitgebreide bibliotheek van standaardproblemen opgesteld. De rijping van het programma die tijdens dit proces zal plaatsvinden, maakt het mogelijk om over enkele jaren de software ook voor gebruikers bij drinkwaterbedrijven beschikbaar te stellen.

Referenties

1. Schaake, J. and Lai, D. (1969). Linear programming and dynamic programming applications to waterdistribution network design. Cambridge, Mass., Dept. of Civ. Engrg., Massachusetts Inst. of Technol.
2. Fujiwara, O. and Khang, D. B. (1990). "A two-phase decomposition method for optimal design of looped distribution networks." *Water Resources Research* **26**(4): 539-549.
3. Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 Users Manual, U.S. Environmental Protection Agency.