



Peter van Thienen, KWR Watercycle Research Institute

Ad Vogelaar, KWR Watercycle Research Institute

Petra Holzhaus, Waterleidingmaatschappij Drenthe

Optimale locatiekeuze voor waterkwaliteitsensoren in het drinkwaterdistributienet

Bij waterbedrijven groeit de belangstelling voor het plaatsen van waterkwaliteitsensoren in het distributienet. Belangrijke vragen bij toepassing van sensoren zijn: hoeveel zijn er nodig voor een adequate detectie van eventuele besmettingen in het leidingnet en waar plaatsen we ze? Kostenoverwegingen zullen bovendien het aantal te installeren sensoren (in ieder geval in eerste instantie) beperken. Het in opdracht van het Amerikaanse EPA ontwikkelde programma TEVA-SPOT blijkt nuttig en bruikbaar gereedschap om deze vragen deels te beantwoorden en de middelen zo goed mogelijk in te zetten. KWR heeft het toegepast in een gemeente in Drenthe.

De recente belangstelling voor sensoren bij de Nederlandse drinkwaterbedrijven blijkt al uit de vele onderzoeksprojecten die op dit gebied lopen (DisConTo, SAWA, Prepared, en onderzoeken binnen TTIW en het bedrijfstakonderzoek voor de drinkwaterbedrijven). Diverse waterbedrijven zijn bij deze projecten betrokken. Ook vinden bij sensorleveranciers veel nieuwe ontwikkelingen plaats, waardoor steeds meer online gemeten kan worden. Belangrijke vragen zijn: hoeveel sensoren zijn nodig voor een adequate detectie van eventuele besmettingen in het leidingnet en waar plaatsen we ze? In het kader van het bedrijfstakonderzoek is een studie uitgevoerd naar het functioneren en de gevoeligheid van de optimalisatie van de plaatsing van sensoren met behulp van het modelleringsprogramma TEVA-SPOT. Waterleidingmaatschappij Drenthe, Waterleiding Maatschappij Limburg en Brabant Water namen deel aan dit onderzoek.

Optimale locatiekeuze voor sensoren

Er zijn verschillende manieren om tot een optimale plaatskeuze voor sensoren te komen. In de literatuur^{1),2)} worden hiervoor drie strategieën onderscheiden. In de eerste strategie (expertise) worden de sensorlocaties door deskundigen gekozen op basis van hun inschattingen en ervaring. Hierbij wordt geen gebruik gemaakt van modellen of berekeningen. De tweede

strategie (rangschikking) behelst het gebruik van informatie van die deskundigen om potentiële sensorlocaties te rangschikken. Hierbij kunnen gewenste locaties, bijvoorbeeld nabij een kritische gebruiker, hogere scores toegewezen krijgen. De derde strategie is optimalisatie (in de mathematische zin van het woord). Hierbij zoekt een numerieke optimalisatiemethode optimale sensorlocaties om het aantal 'slachtoffers' door blootstelling aan een eventuele besmetting te minimaliseren. Bij deze strategie wordt een numeriek model van het distributie- en sensornetwerk gebruikt om het functioneren van een sensornetwerk te beoordelen.

Wat is optimaal?

De invulling van het woord 'optimaal' hangt samen met de doelstelling waarvoor sensoren in het distributienet worden geplaatst. Zo kan men bijvoorbeeld bacteriologische besmettingen willen constateren met behulp van sensoren. Wanneer in deze context een sensornetwerk wordt opgezet, is de doelstelling ervan vaak het minimaliseren van de effecten van een eventuele besmetting. Dit kan worden uitgedrukt als het minimaliseren van het aantal mensen dat wordt blootgesteld aan besmetting en hiervan een bepaalde dosis binnen krijgt, ziek wordt of zelfs sterft. Ook kunnen parameters als de detectietijd of de omvang van de besmetting worden geminimaliseerd. Wanneer sensoren worden geplaatst om

waterkwaliteitsparameters te monitoren, is de doelstelling bijvoorbeeld een representatief beeld te verkrijgen van de waterkwaliteit in het voorzieningsgebied.

Numerieke optimalisatie

Het principe van numerieke optimalisatie is weergegeven in afbeelding 1. Uitgaande van een hydraulisch netwerkmodel met daarin een grote hoeveelheid potentiële locaties voor de plaatsing van sensoren en één of meer doelstellingen (zoals hierboven besproken) waarop de optimalisatie moet worden uitgevoerd, levert de optimalisatiemethode de deelverzameling van sensorlocaties die de doelstelling het best benadert. Er bestaan veel academische codes die deze optimalisatie kunnen uitvoeren. Hiernaast bestaat commerciële en vrij beschikbare software op dit gebied. Gekozen is voor TEVA-SPOT³⁾ vanwege de vele analyse-mogelijkheden en vrije beschikbaarheid van het programma.

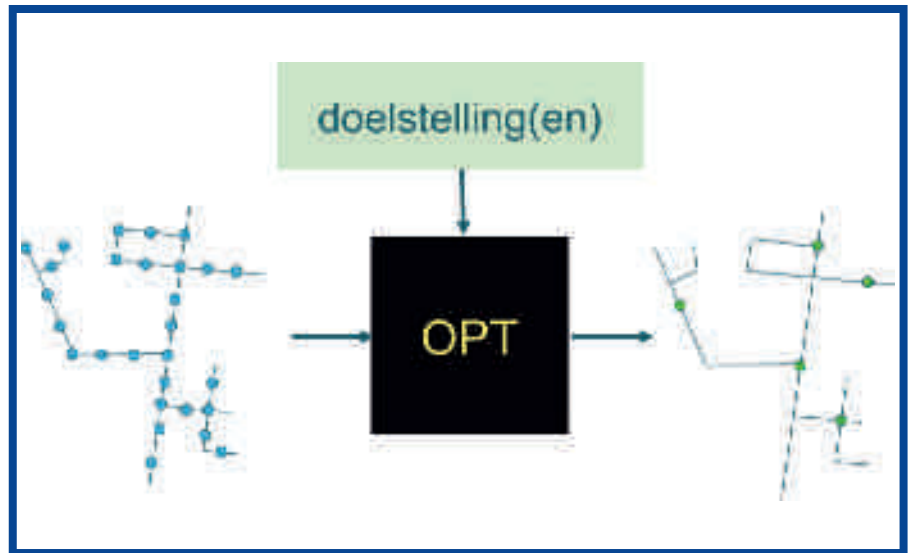
TEVA-SPOT

TEVA-SPOT staat voor Threat Ensemble Vulnerability Analysis - Sensor Placement Optimization Tool, oftewel de analyse van kwetsbaarheid voor groepen bedreigingen met een instrument voor de optimalisatie van sensorplaatsing. Het programma is ontwikkeld door het Amerikaanse milieuagentschap EPA en Sandia Laboratories, Argonne National Laboratory en de universiteit van Cincinnati. De basis voor de analyse

en optimalisatie die TEVA-SPOT uitvoert, is het hydraulisch model EPANET⁴⁾. Met dit model berekent TEVA-SPOT op basis van een netwerkmodel en verbruiksgegevens of bevolkingsaantallen de theoretische stromingen in het leidingnet gedurende de hele dag. Een combinatie van mogelijke besmettingen wordt gevormd door een besmettingsscenario te definiëren (bijvoorbeeld de toediening van X gram besmettingsmateriaal per minuut gedurende Y minuten) en mogelijke plaatsen waarop deze besmetting plaats kan vinden (bijvoorbeeld alle verbruiksknoppen). Op basis van het hydraulische model en de besmettingscombinatie berekent TEVA-SPOT hoe de individuele besmettingen uit de combinatie zich door het netwerk verspreiden. Op basis van de versochte bevolkingsgegevens wordt vervolgens de blootstelling van de bevolking aan de besmetting berekend. Met deze gegevens bepaalt TEVA-SPOT de optimale sensorplaatsing voor de gekozen doelstelling en het geselecteerde aantal sensoren. Zo kunnen het netwerk, de plaatsing en de gezondheidseffecten van besmettingen worden geanalyseerd.

Toepassing in Nederland

In het kader van het bedrijfstakonderzoek paste KWR Watercycle Research Institute TEVA-SPOT toe op het drinkwaterdistributienet van een Drentse gemeente⁵⁾. De nadruk lag hierbij op het minimaliseren van de effecten van een besmetting van het drinkwater met bijvoorbeeld rioolwater. Niet alleen zijn optimale sensorlocaties bepaald, maar er is met name gekeken naar de gevoeligheid van de optimalisatie voor een aantal zaken als vereenvoudiging van het netwerkmodel en variatie in waterverbruikspatronen. Hieronder wordt een aantal resultaten weergegeven. Let op dat



Afb. 1: Optimalisatie van sensorlocaties. Uitgaande van een verzameling potentiële locaties en één of meer optimalisatiedoelstellingen wordt de deelverzameling van sensorlocaties gevonden die het best beantwoordt aan de doelstelling.

deze steeds gelden voor een specifieke set van modelparameters en besmettings-scenario's.

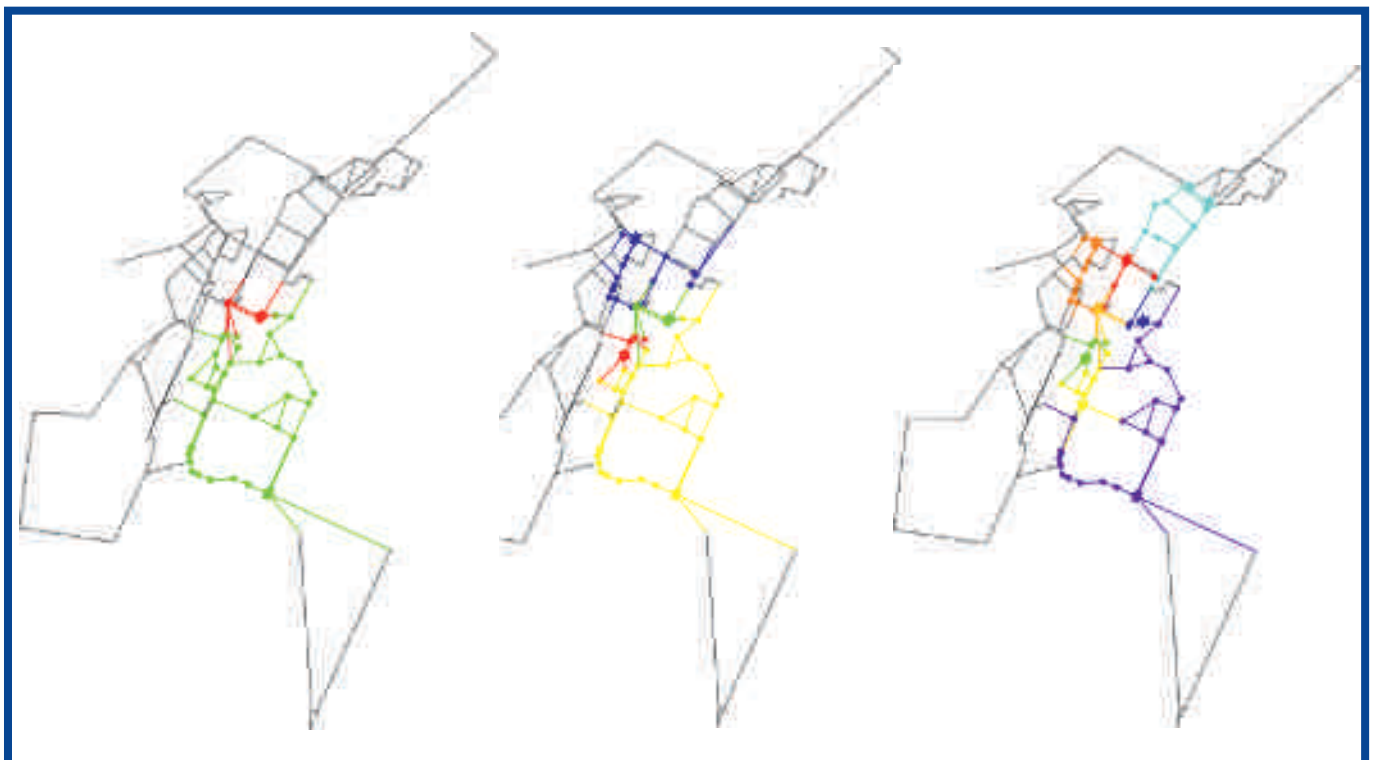
Optimale sensorlocaties

Optimale sensorlocaties voor het testgebied zijn weergegeven in afbeelding 2. Het toevoegen van extra sensoren ten opzichte van de basissituatie met twee sensoren levert een uitbreiding van de bestaande verzameling op. Bij de uitbreiding van vier naar acht sensoren wordt een sensor een klein stukje verplaatst. Bovendien tonen de afbeeldingen voor de sensorconfiguraties in welke delen van het leidingnetmodel de sensoren besmettingen registreren. Zoals verwacht kan, naarmate meer sensoren worden geplaatst, een groter deel van het

leidingnet in de gaten worden gehouden. Bij acht sensoren blijkt de dekking nog verre van compleet voor de gekozen simulatieparameters. De omvang van het zichtveld van een sensor is echter niet gelijk aan het gebied dat baat heeft bij de aanwezigheid van deze sensor. Benedenstrooms van een sensor bevinden zich namelijk aansluitingen die wel profiteren van de detectie – door een sensor van een besmetting bovenstrooms ervan – maar niet in het zichtveld van de sensor liggen. Bovendien kunnen bovenstrooms van een sensor gebieden liggen die wel door de betreffende sensor worden gezien maar ook door één of meer andere sensoren.

Afbeelding 3 laat zien hoe het aantal

Afb. 2: Optimale locaties (sterren) van twee (a), vier (b) en acht (c) sensoren in het distributienet van het testgebied en delen van het netwerkmodel waarin door de individuele sensoren verontreinigingen worden vastgesteld (gekleurde zones).

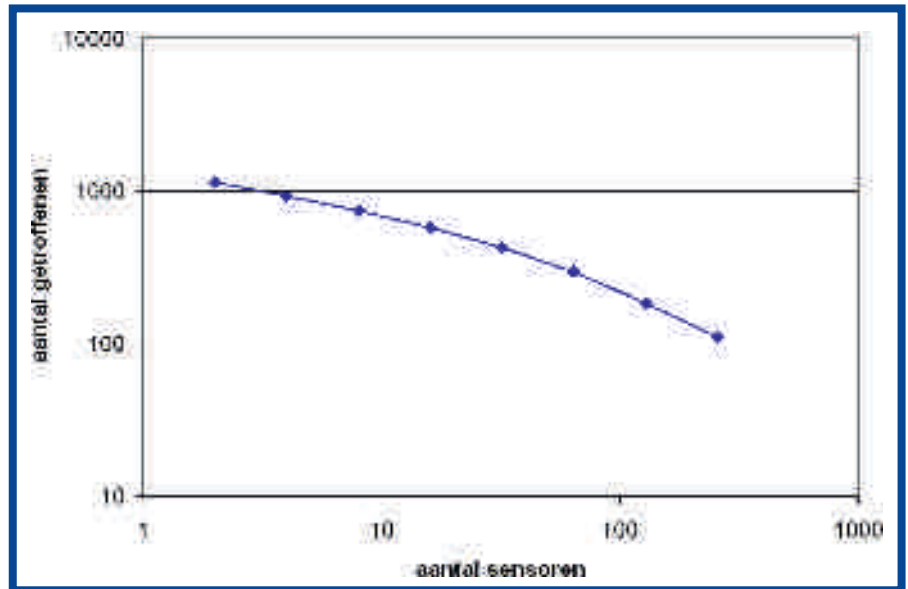


getroffenen voor een bepaalde groep besmettingsscenario's afneemt voor een toenemend aantal sensoren. Het optimalisatie-algoritme werkt zodanig dat extra toegevoegde sensoren vaak worden geplaatst in gebieden die reeds tot het zichtveld van een bestaande sensor behoren. Dit kan optimaal zijn doordat het de detectietijd van besmettingen in relatief dichtbevolkte gebieden kan verkorten. Hiermee wordt het totale zichtveld echter slechts beperkt uitgebreid, maar neemt de gemiddelde omvang van het zichtveld van individuele sensoren wel af. Zo wordt de winst, dat wil zeggen de reductie in het aantal getroffen, steeds kleiner voor iedere extra geplaatste sensor.

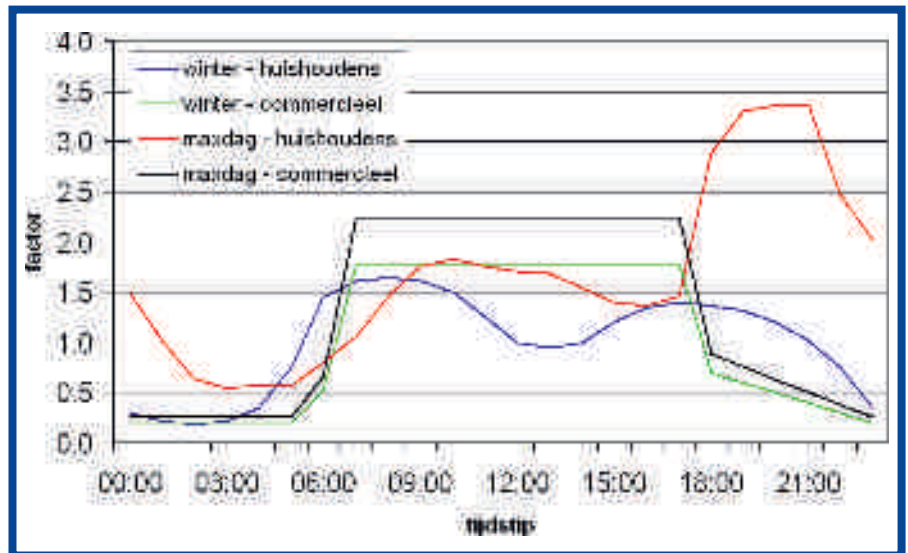
Gevoeligheidsanalyse

Om de rekentijd te verkorten, worden hydraulische netwerkmodellen vaak vereenvoudigd (verdund), waarbij de kleinste leidingen worden verwijderd/samengevoegd en ook aansluitingen worden gebundeld. Verdunning van netwerkmodellen leidt tot besmettingsscenario's die uitsluitend op de grotere leidingen werken. De resultaten met een verdund model zijn daarom niet zonder meer vergelijkbaar met die uit onverdunde modellen. Dit komt doordat verontreinigingen op grotere leidingen tot hogere aantallen 'getroffenen' leiden. Wanneer naar een gemiddeld besmettings-scenario wordt gekeken, betekent dit dus dat het gemiddelde besmettingsscenario ook beduidend meer 'getroffenen' zal kennen in een model met uitsluitend grotere leidingen dan in een model dat ook besmettingen op kleine leidingen omvat. Dit verschil wordt ondervangen door steeds vergelijkbare verzamelingen besmettingsscenario's te kiezen, bijvoorbeeld door in het detailmodel alleen besmettingen te laten doorrekenen op grote leidingen, omdat die ook in het verdunde model zitten.

Verbruikspatronen variëren in geringe



Afb. 3: Aantal getroffen bij een besmetting als functie van het aantal sensoren in het net van een gemeente in Drenthe, doorgerekend voor een specifieke groep besmettingsscenario's.



Afb. 4: Verschillende toegepaste verbruikspatronen voor huishoudelijke en commerciële verbruikers.

Belangrijkste parameters bij de bepaling van een optimale sensorconfiguratie met behulp van TEVA-SPOT.

prioriteit	parameter	commentaar
1	keuze van representatief besmettingsscenario	Heeft de grootste invloed op het aantal getroffen. Keuze moet zorgvuldig worden gemaakt op basis van bijvoorbeeld waarschijnlijkheidsinschattingen van individuele besmettingen. De gemiddelde impact van alle scenario's (hier toegepast) biedt een bruikbare benadering.
2	verdunning van hydraulisch model	Heeft groot effect op schatting aantal getroffen, doordat verdunning zorgt voor een focus in de besmettingsscenario's op grotere leidingen. Een grotere mate van verdunning verkort de rekentijd wel aanzienlijk.
3	reactietijd van het drinkwaterbedrijf	Heeft een significante invloed op het aantal getroffen. Dit is een parameter waarop waterbedrijven in de praktijk invloed kunnen uitoefenen.
4	detectiegrens	De detectiegrens moet voldoende laag zijn om concentraties die significante effecten op de schaal van de bevolking hebben te detecteren. Het omslagpunt is goed te bepalen m.b.v. TEVA-SPOT, zodat vast te stellen is welke detectielimiet een sensor in de praktijk moet hebben.
5	verbruikspatroon	Zorgt voor een iets andere sensorconfiguratie. Beter om winterdagpatroon te gebruiken voor optimalisatie dan maxdagpatroon. Sensorconfiguratie op basis van winterdagpatroon presteert beter op maxdag dan andersom.

mate van dag tot dag, maar wel significant tussen bijvoorbeeld kalme winterdagen en warme zomerdagen. In het laatste geval zal de watervraag behoorlijk hoger liggen dan op een gemiddelde dag. Ook hebben huishoudens een heel ander waterverbruikspatroon dan niet-huishoudelijke verbruikers. Hiermee is rekening gehouden door toepassing van verschillende verbruikspatronen (zie afbeelding 4). Zowel winterdagen als dagen met een grote watervraag (zogenaamde maxdagen) zijn onderzocht. Het blijkt dat een verbruikspatroon voor een maxdag in een model dat is geoptimaliseerd voor een winterdagverbruik leidt tot slechts een geringe verandering van het aantal getroffen (zie afbeelding 5); andersom blijkt het verschil groter te zijn.

Reactietijd

De reactietijd, de tijd die verstrijkt tussen de eerste meting van een besmetting door een sensor en het effectief stilleggen van de consumptie van water via informatievoorziening vanuit het waterleidingbedrijf, heeft een grote invloed op het aantal getroffen. Het terugbrengen van de reactietijd op een geconstateerde besmetting is een zeer effectieve manier om het aantal getroffen klanten significant terug te brengen (zie afbeelding 6). Bij een relatief korte reactietijd leidt het plaatsen van extra sensoren tot een sterke afname van het aantal getroffen. Als de reactietijd te lang wordt, is het effect echter veel geringer. Aan het terugbrengen van de reactietijd zitten zowel technologische (snelle detectie en verificatie) als communicatieve (klachten van klanten als sensormeting) en organisatorische aspecten.

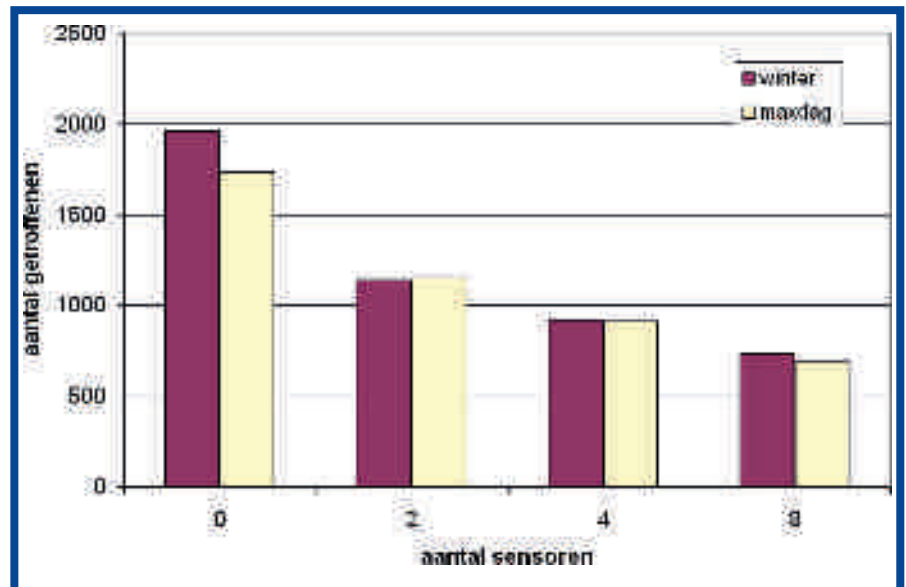
Doordacht toepassen

TEVA-SPOT blijkt een zeer bruikbaar programma te zijn dat een ondersteunende rol kan spelen bij de bepaling van de optimale locatiekeuze voor een beperkt aantal sensoren in een drinkwaterdistributienetwerk. Eenduidige antwoorden moet men echter niet verwachten van de geautomatiseerde optimalisatie. Het programma produceert een grote hoeveelheid aan resultaten en laat bovendien zien dat de berekende optimale sensorlocaties erg gevoelig kunnen zijn voor diverse keuzes die worden gemaakt in het simulatie- en optimalisatieproces. Op zichzelf hoeft dit geen probleem te zijn, aangezien verschillende ontwerpen (bijna) gelijkwaardig kunnen presteren en vaak gezamenlijk wel besmettingen in hetzelfde deel van het netwerk kunnen detecteren.

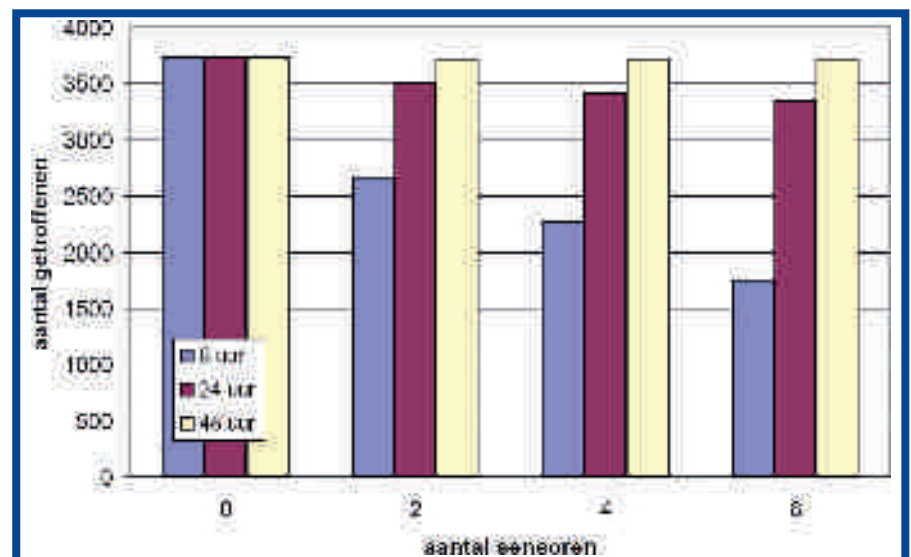
Als belangrijkste conclusie kan worden gesteld dat de toepassing van TEVA-SPOT veel inzicht levert in de gevoeligheden van de prestatie van sensorconfiguraties. Bij de toepassing van TEVA-SPOT moet over een aantal aspecten goed worden nagedacht. Deze aspecten zijn, in volgorde van belang, weergegeven in de tabel.

Aanbevelingen

Aanbevolen wordt aan drinkwaterbedrijven om TEVA-SPOT toe te passen wanneer zij groepen waterkwaliteitssensoren in hun netwerken willen plaatsen. Er zal geen unieke



Afb. 5: Vergelijking van resultaten op het detailmodel met een winterverbruikspatroon en een maximaal vraagpatroon.



Afb. 6: Door de reactietijd, oftewel de tijd tussen de eerste constatering van een besmetting en het effectief stoppen van de consumptie, te verminderen, kan het aantal getroffen significant worden gereduceerd.

optimale plaatsing worden gevonden, maar wel een collectie van configuraties die allemaal min of meer gelijkwaardig presteren, waarmee een beeld van de gevoeligheden van het betreffende netwerk voor de detectie van besmettingen ontstaat.

5) Van Thienen P. en A. Vogelaar (2012). Optimalisatie en gevoeligheid van sensorplaatsing in het leidingnet. BTO-rapport 2012.017.

LITERATUUR

- Hart W. en R. Murray (2010). Review of sensor placement strategies for contamination warning systems in drinking water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136, pag. 611-619.
- Murray R., T. Haxton, R. Janke, W. Hart, J. Berry en C. Phillips (2010). Sensor network design for drinking water contamination warning systems. A compendium of research results and case studies using the TEVA-SPOT software. USA Environmental Protection Agency. EPA/600/R-09/141.
- Berry J., E. Boman, L. Riesen, W. Hart, C. Phillips, J. Watson en R. Murray (2010). User's manual TEVA-SPOT toolkit version 2.4. Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-08/041B.
- Rossman L. (2000). EPANET 2 users manual. EPA/600/R-00/057.