



Optimalisatie en gevoeligheid van sensorplaatsing in het leidingnet

BTO 2012.017
Juli 2012

KWR

Watercycle Research Institute





Watercycle Research Institute

Optimalisatie en gevoeligheid van sensorplaatsing in het leidingnet

BTO 2012.017
Juli 2012

© 2012 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.

Colofon

Titel

Optimalisatie en gevoeligheid van sensorplaatsing in het leidingnet

Opdrachtnummer

B111694-003

Onderzoeksprogramma

BTO

Projectmanager

Nellie Slaats

Opdrachtgever

CvO

Kwaliteitsborger(s)

Mirjam Blokker

Auteurs

Peter van Thienen en Ad Vogelaar

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Samenvatting

Voor het kosteneffectief bewaken van het drinkwaterdistributienet tegen besmettingen moet volstaan worden met een beperkt aantal sensoren. Deze moeten op de juiste plaats in het net worden gepositioneerd. Het programma TEVA-SPOT kan een belangrijke ondersteunende rol spelen bij de bepaling van deze optimale plaatsing. Voor het netwerk van Hoogeveen is deze optimalisatie uitgevoerd. Dit heeft ook een goed beeld opgeleverd van de factoren die bepalen hoe goed besmettingen in het leidingnet kunnen worden gedetecteerd.

Belang: locatie sensoren bepaalt beschermingsniveau

Er is een groeiende behoefte aan snelle en/of instantane methoden om verontreinigingen in het leidingnet te detecteren, zowel opzettelijke als onopzettelijke. In-situ sensoren zijn daarvoor beter geschikt dan de traditionele laboratoriummethoden. Het is echter praktisch en budgettair gezien ondoenlijk iedere meter leiding van sensoren te voorzien en de zo gegenereerde datastroom te analyseren. Om een beperkt aantal sensoren in het distributienet zo effectief mogelijk in te zetten, is een onderbouwde keuze van de locaties van deze sensoren essentieel.

Aanpak: TEVA-SPOT getest op model Hoogeveen

Om de bestaande optimalisatiemethoden voor de plaatsing van waterkwaliteitssensoren te inventariseren en beoordelen op hun geschiktheid is een literatuurstudie uitgevoerd. De focus lag daarbij op de enkelvoudige detectie van stoffen (één stof, één type sensor). Op basis hiervan is gekozen om een optimalisatie en gevoeligheidsanalyse te gaan uitvoeren met TEVA-SPOT. Dit is een vrij beschikbaar programma dat specifiek voor deze doelstellingen is ontwikkeld, in opdracht van het Amerikaanse EPA. TEVA-SPOT is toegepast op het leidingnet van Hoogeveen (WMD). Eerst is de optimale plaatsing van verschillende aantallen sensoren (2-256) in het net voor het minimaliseren van de gevolgen van een besmetting bepaald met behulp van TEVA-SPOT. Daarna is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarbij is onderzocht wat het effect is van factoren als besmettingstijdstip, reactietijd en specifieke verbruikspatronen op de kwaliteit en bruikbaarheid van de verkregen optimale sensorplaatsing. Ook is bepaald hoe de prestatie van een sensornetwerk verandert bij het verplaatsen of toevoegen van sensoren.

Resultaten: bruikbaar maar niet eenduidig

TEVA-SPOT blijkt zeer bruikbaar als ondersteuning bij de bepaling van de optimale plaatsing van een beperkt aantal sensoren in een drinkwaterdistributienetwerk. Eenduidige antwoorden moet men echter niet verwachten van deze geautomatiseerde optimalisatie. Het programma produceert een grote hoeveelheid gegevens en laat bovendien zien dat de berekende optimale sensorplaatsingen 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. Hiernaast levert toepassing van TEVA-SPOT veel inzicht in de gevoeligheden van de prestatie van sensorconfiguraties. Opvallend is dat 50% (256 sensoren) tot 80% (2 sensoren) van de optredende besmettingen niet binnen 5 dagen wordt gedetecteerd.

De belangrijkste keuzes die moeten worden gemaakt bij het uitvoeren van een optimalisatie van sensorplaatsing met behulp van TEVA-SPOT zijn die van een representatieve set besmettingsmodellen en een geschikte mate van verdunning van het netwerkmodel. De bevindingen van dit rapport bieden een handvat voor drinkwaterbedrijven die zelf een optimalisatie willen uitvoeren.

Advies: toepassen met gezond verstand

Drinkwaterbedrijven kunnen TEVA-SPOT toepassen wanneer zij groepen waterkwaliteitssensoren in hun netwerken willen plaatsen. Er zal geen unieke optimale plaatsing worden gevonden, maar wel een collectie van configuraties die alle min of meer gelijkwaardig presteren. Belangrijker is echter dat hiermee een beeld wordt verkregen van de factoren die bepalen hoe goed in het betreffende netwerk besmettingen kunnen worden gedetecteerd.

Inhoud

Samenvatting	6
Inhoud	8
1 Inleiding	10
1.1 Sensoren in het leidingnet	10
1.2 Doel	10
1.3 Andere onderzoeksprojecten op het gebied van plaatsing van sensoren in het leidingnet	11
2 Optimalisatiemethoden voor de plaatsing van sensoren in een leidingnet	14
2.1 Inleiding	14
2.2 Strategieën voor de plaatsing van sensoren	14
2.3 Optimalisatie	14
2.3.1 Doelstellingen	15
2.3.2 Methoden	16
2.4 Vergelijking van methoden in de praktijk	18
2.5 Software	20
3 TEVA-SPOT	22
3.1 Inleiding	22
3.2 Benadering	22
3.3 Gebruik	22
3.3.1 Basis	22
3.3.2 Analysemodi	22
3.3.3 Bedreigingsscenario's	23
3.3.4 Gezondheidseffecten	23
3.3.5 Optimalisatie van sensorplaatsing	24
3.4 Vereisten aan model en invoer	25
3.4.1 Hydraulisch/netwerkmodel	25
3.4.2 Sensorkarakteristieken	25
3.5 Uitvoer	25
4 Toepassing van TEVA-SPOT op het distributienetwerk van Hoogeveen met gevoeligheidsanalyse	28
4.1 Inleiding	28
4.2 Simulaties	28
4.3 Basismodel	29
4.4 Besmettingsscenario's in het basismodel	29
4.5 Effecten van verdunning van het netwerkmodel	32

4.6	Omvang, dekkingsgraad en niet-gedecteerd besmettingen	34
4.7	Effecten van verschillende verbruikspatronen	36
4.8	Effecten van besmettingsduur	38
4.9	Effecten van tijdstip van besmetting	39
4.10	Effecten van de statistische benadering oftewel de keuze van een representatief besmettingsscenario	40
4.11	Effecten van reactietijd	41
4.12	Effecten van detectiegrenzen	42
5	Conclusies en aanbevelingen	44
5.1	Algemene conclusies	44
5.2	Conclusies m.b.t. het netwerk van Hoogeveen	44
5.3	Detailconclusies m.b.t. de optimalisatie	44
5.3.1	Hydraulisch model	44
5.3.2	Besmettingsscenario's	44
5.3.3	Detectie van besmettingen	45
5.3.4	Optimale sensorplaatsing	45
5.4	Implementatie: toepassing van TEVA-SPOT bij de bedrijven	45
5.5	Aanbevelingen	46
6	Literatuur	48
I	Leidingnetmodellen	52
II	Detailbeschrijvingen van simulaties	56

1 Inleiding

1.1 Sensoren in het leidingnet

Bij een groeiende behoefte aan snelle en/of instantane methoden om al dan niet opzettelijke verontreiniging (of besmetting; in dit rapport worden deze woorden als synoniemen beschouwd) van drinkwater in het leidingnet te detecteren, zijn in-situ sensoren beter in staat dan de traditionele laboratoriummethoden om in deze behoefte te voorzien (Storey et al., 2011). Het is echter praktisch en budgettair gezien ondoenlijk iedere meter leiding van sensoren te voorzien (en tevens de zo gegenereerde datastroom te analyseren). De drinkwaterbedrijven zullen het vooralsnog moeten stellen met een beperkt aantal sensoren in hun distributienet. Om deze zo effectief mogelijk in te zetten (hetgeen vaak wordt gedefinieerd als het minimaliseren van de gevolgen van een besmetting) is een onderbouwde keuze van de locaties van deze sensoren essentieel. De mogelijkheden van sensoren om een real-time beeld van de toestand van het leidingnet of het drinkwater te verkrijgen, hangen sterk af van de mate waarin het sensorsysteem goed werkt. Dit staat of valt met het juiste ontwerp, correcte installatie en goed beheer van de sensoren (Ediriweera en Marshall, 2010).

Verschillende universitaire onderzoeksgroepen hebben zich afgelopen jaren gestort om allerlei optimalisatiemethoden te ontwikkelen voor het bepalen van de juiste locatie van sensoren, rekening houdend met allerlei randvoorwaarden (voor een overzicht, zie Murray et al., 2010). Ook is gekeken naar de interpretatie van de sensordata: kan worden geconcludeerd waar in het net de besmetting plaatsvond en waar het zich naar toe verspreidt? Het zijn echter veelal theoretische studies die nog zeer beperkt in de praktijk worden toegepast.

1.2 Doel

Het doel van dit project is tweeledig: Ten eerste wordt de optimale plaatsing van sensoren in het net bepaald op basis van bestaande optimalisatiemethoden. Let op dat het hierbij om de plaatsingsmethodiek gaat; de specifieke sensoren bestaan wellicht (nog) niet eens. Ten tweede wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Bij de gevoeligheidsanalyse moet duidelijk worden wat het effect is van diverse factoren op kwaliteit en bruikbaarheid van de verkregen gegevens en hun interpretatie. Hierbij wordt naar de volgende effecten gekeken:

- aantallen sensoren;
- positionering van sensoren;
- verbruikspatronen.

Om de kwaliteit en bruikbaarheid van de verkregen gegevens te kwantificeren wordt gebruik gemaakt van een leidingnetmodel van een Nederlands waterbedrijf. Drie Nederlandse drinkwaterbedrijven hebben deelgenomen aan het project: WMD, WML en Brabant Water.

Om genoemde doelen te bereiken zijn drie fasen doorlopen:

1. Literatuurstudie

Om de bestaande optimalisatiemethoden voor de plaatsing van sensoren te inventariseren en beoordelen op hun geschiktheid voor dit project is een literatuurstudie uitgevoerd. Hierbij heeft de focus gelegen op de enkelvoudige detectie van stoffen. Gelijktijdige meervoudige detectie met verschillende sensoren die ieder hun eigen karakteristieken hebben compliceert de situatie zodanig dat dit vooralsnog buiten beschouwing is gelaten.

2. Toepassing van een optimalisatiemethode op een proefgebied

De naar aanleiding van de literatuurstudie geselecteerde optimalisatiemethode (TEVA-SPOT) is gebruikt om te bepalen hoe het zichtveld van een populatie sensoren in het distributienet varieert als functie van het aantal geplaatste sensoren en daarnaast waar deze sensoren het best geplaatst kunnen worden. Dit is gebeurd voor een testgebied, namelijk het leidingnet van Hoogeveen (WMD), waar ook daadwerkelijk sensorplaatsing is voorzien.

3. Bepaling van gevoeligheid van kwaliteit en bruikbaarheid van verkregen gegevens

Voor in onderdeel 2 vastgestelde sensorconfiguraties is met behulp van het toegepaste numerieke model bepaald hoe de kwaliteit en bruikbaarheid van de verkregen gegevens varieert voor variaties van diverse besmettingsscenario's parameters en verbruikspatronen binnen de onzekerheidsmarges (een gevoeligheidsanalyse). Ook is bepaald hoe de kwaliteit en bruikbaarheid van de verkregen gegevens wijzigen bij het verplaatsen of toevoegen van sensoren.

1.3 Andere onderzoeksprojecten op het gebied van plaatsing van sensoren in het leidingnet

Er is veel gaande in de Nederlandse drinkwatersector op het gebied van onderzoek naar sensoren en de plaatsing hiervan in het drinkwaterdistributienet. Tabel 1 geeft een overzicht van geselecteerde relevante lopende en geplande projecten. In de tabel is eveneens weergegeven wat de aandachtsgebieden van de respectievelijke onderzoeksprojecten zijn.

Tabel 1: Overzicht van geselecteerde lopende en geplande projecten in Nederland op het gebied van sensoren in het drinkwaterdistributienet (mei 2012, bronnen: DisConTo projectplan, SAWA projectplan, Prepared: final draft proposal december 2009, projectvoorstel TTIW, website Wetsus, projectplan BTO MNS Sensoren, projectvoorstellen BTO Sensoring, dataverwerking en integratie en BTO Strategie bij calamiteiten in het leidingnet).

	DisConTo	SAWA	Prepared	TTIW	BTO MNS sensoren	BTO Sensoring, dataverwerking en integratie 1	BTO Sensoring, dataverwerking en integratie 2	BTO Strategie bij calamiteiten in het leidingnet
	2009- 2012	2010 -2013	2010- 2013		2011- 2012	2012	2012	2012
<i>Aandachtsgebieden</i>								
<i>voorwaarts model voor voorspelling waterkwaliteit – conservatieve stoffen (stroomafwaarts)</i>			x					
<i>voorwaarts model voor voorspelling waterkwaliteit – niet-conservatieve stoffen (stroomafwaarts)</i>	x		x					
<i>achterwaarts model (inversie) tbv beeld van waterkwaliteitsparameters in volledig net stroomopwaarts van sensoren</i>	x						x	
<i>methode optimale sensorplaatsing</i>	x (ontwikkeling)		x					x (evaluatie)
<i>toepassing optimale sensorplaatsing</i>			x		x			
<i>“distributiemonitor” (concrete invulling niet gespecificeerd)</i>	x	x						
<i>terugrekenen naar verontreinigingsbron</i>							x	
<i>dimensionering sensornetwerk</i>	x				x	x	x	
<i>gevoeligheidsanalyse verbruikspatronen en parameters hydraulisch model</i>			x		x			
<i>hydraulisch model waterkwantiteit tbv veiligheid en beveiliging</i>	x							
<i>inventariseren internationale ontwikkelingen</i>								
<i>ontwikkeling sensoren</i>		x		x				
<i>responsstrategie bij calamiteiten + beoordeling hiervan</i>								x
<i>wat te meten?</i>						x		x
<i>meetfrequentie</i>						x		

2 Optimalisatiemethoden voor de plaatsing van sensoren in een leidingnet

2.1 Inleiding

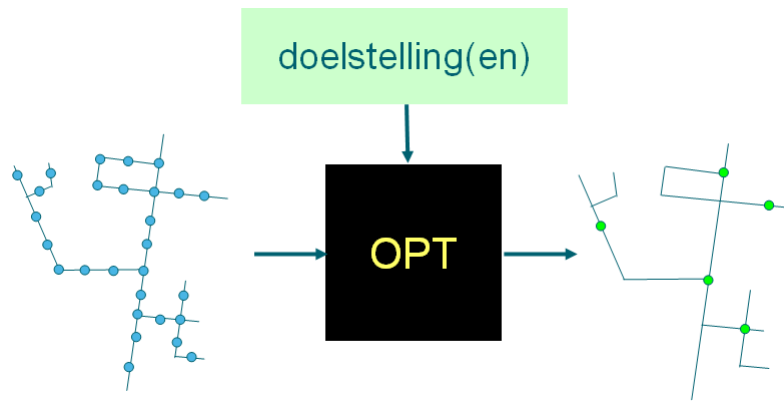
Er zijn vele tientallen wetenschappelijke publicaties geschreven over de optimale plaatsing van sensoren in een leidingnet en over methoden om deze optimale plaatsing te bepalen. In het afgelopen decennium is daarbij de nadruk komen te liggen op het gebruik van sensoren om (al dan niet doelbewuste) verontreiniging van het drinkwater vroegtijdig op te sporen, de zogenaamde *Contamination Warning Systems*, om de gevolgen hiervan te minimaliseren (Murray et al., 2010). Een recent overzicht van Hart en Murray (2010) geeft de huidige stand van zaken op het gebied van CWS goed weer. Dit artikel is dan ook gebruikt als startpunt voor de verkenningen die in dit hoofdstuk worden gepresenteerd. CWS vormen echter slechts een beperkte toepassing van sensoren. Een andere doelstelling van het plaatsen van sensoren in het leidingnet, die in het kader van dit project belangrijk is, is het in de gaten houden van parameters als druk, temperatuur en eventueel waterkwaliteitsparameters, waarbij metingen van een beperkt aantal sensoren tot een actueel beeld van de toestand van het volledige net moeten leiden. De optimalisatie-doelstelling is hier niet het minimaliseren van gevolgen van een door de sensoren waargenomen situatie, maar bijvoorbeeld het verkrijgen van een zo representatief mogelijk beeld. Dit vergt een andere benadering van de optimalisatie, welke in de literatuur weinig aandacht krijgt. Bovendien kunnen parameters sterk interacteren met de omgeving (temperatuur) of zich niet-lineair gedragen in geval van mengen (pH), waardoor parameter-specifieke modellen noodzakelijk zijn voor de optimalisatie van de plaatsing van deze sensoren.

2.2 Strategieën voor de plaatsing van sensoren

Hart en Murray (2010) en Murray et al. (2010) onderscheiden drie strategieën voor het plaatsen van sensoren. In de eerste strategie, *expertise*, worden de sensorlocaties door experts 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 expert-informatie om een reeks potentiële sensorlocaties te scoren op een aantal relevante aspecten en vervolgens te rangschikken. Hierbij kunnen gewenste locaties, bijvoorbeeld nabij een kritische gebruiker, hogere scores toegewezen krijgen. In de derde strategie, *optimalisatie*, wordt een numerieke optimalisatiemethode toegepast waarbij een gekozen parameter (zoals besmettingsrisico) wordt geminimaliseerd. Bij deze strategie wordt een numeriek model van het distributie- en sensornetwerk gebruikt om het functioneren van een sensornetwerk te beoordelen. In dit rapport wordt de derde strategie verder onder de loep genomen.

2.3 Optimalisatie

Het principe van optimalisatie is weergegeven in Figuur 1. Uitgaande van een hydraulisch netwerkmodel met daarin een grote hoeveelheid potentiële locaties voor de plaatsing van sensoren en een of meer doelstellingen waarop de optimalisatie moet worden uitgevoerd levert de optimalisatiemethode de deelverzameling van sensorlocaties die de doelstelling het best benaderen.



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

2.3.1 Doelstellingen

De plaatsing van sensoren kan geoptimaliseerd worden op diverse doelstellingen. Veelgebruikte voorbeelden zijn in de context van moedwillige of incidentele besmetting van het drinkwater zijn (Murray et al., 2010):

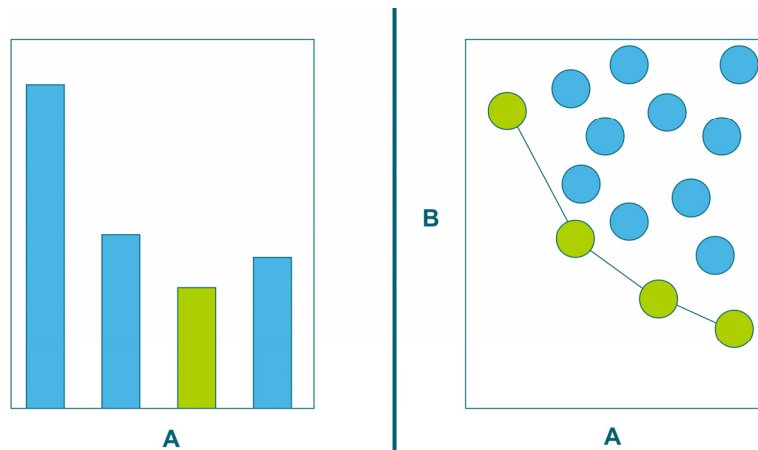
- minimalisatie van het aantal mensen dat wordt blootgesteld aan de besmetting;
- minimalisatie van het aantal mensen dat wordt blootgesteld aan een bepaalde dosis;
- minimalisatie van het aantal mensen dat ziek wordt;
- minimalisatie van het aantal mensen dat sterft.

Verder kan worden gewerkt met:

- minimalisatie van de omvang van besmetting;
- minimalisatie van de massa stof/pathogeen geleverd aan de consument;
- maximalisatie van het percentage gedetecteerde incidenten;
- minimalisatie van de detectietijd;
- minimalisatie van het volume besmet water geleverd aan de consument.

Naast deze impact-gerelateerde criteria kan ook worden geoptimaliseerd voor bijvoorbeeld technische criteria van het sensornetwerk zelf, zoals bijvoorbeeld het benodigde aantal sensoren, en vormen de kosten (aantal sensoren) een doelstelling of randvoorwaarde op zichzelf.

Gekozen kan worden om te optimaliseren op een enkel criterium, of om op meerdere criteria tegelijkertijd te optimaliseren. In het eerste geval wordt voor een reeks scenario's de waarde van het betreffende criterium uitgerekend en het scenario met de beste (hoogste of laagste, afhankelijk van de doelstelling) als optimaal uitgekozen (zie Figuur 2a). Wanneer men optimaliseert op twee parameters, wordt voor een serie combinaties van waarden voor deze parameters een optimaal scenario bepaald. Deze kunnen worden weergegeven als een zogenaamd Pareto-front (zie Figuur 2b). Hierbij kiest men zelf de optimale afweging tussen de verschillende parameters waarop wordt geoptimaliseerd. Wanneer men op meer dan twee parameters optimaliseert, nemen de dimensionaliteit van het Pareto-front en daarmee de complexiteit van interpretatie en positiebepaling navenant toe.



Figuur 2: a) Optimalisatie op een enkel criterium A, waarbij het scenario met de beste waarde voor de doelstelling wordt gekozen. b) Optimalisatie op twee criteria A en B, waarbij optimale scenario's voor een aantal combinaties van de twee optimalisatieparameters worden weergegeven in een zogenaamd Pareto-front. Optimale oplossingen zijn steeds in groen weergegeven; suboptimale oplossingen zijn blauw.

2.3.2 Methoden

In de literatuur worden diverse optimalisatiemethoden gepresenteerd. In een recent reviewartikel van Hart en Murray (2010) worden deze besproken en geclassificeerd. Tabel 2 geeft een overzicht van een selectie van artikelen uit hun overzicht met de gebruikte optimalisatiemethode en het gebruikte hydraulisch model. De meeste auteurs gebruiken hetzij Mixed Integer Programming hetzij een heuristische methode, waarvan de Genetische Algoritmen een belangrijke deelverzameling vormen. De belangrijkste kenmerken van de meestgebruikte methoden zijn weergegeven in Tabel 3. Zij worden hieronder in meer detail beschreven.

MIP (Mixed Integer linear Programming) behelst de optimalisatie (minimalisatie of maximalisatie) van een lineaire doelstellingsfunctie onderworpen aan lineaire randvoorwaarden (Murray et al., 2010). Het kan mathematisch worden bewezen dat de methode tot de beste (optimale) oplossing leidt (Figuur 3, punt b). Door de rekenintensiviteit van de methode is hij echter met name praktische toepasbaar op kleinere problemen.

De heuristische methoden maken gebruik van basiskennis of ervaring om gestructureerd op zoek te gaan naar een optimale oplossing. Zij bieden geen garantie op het vinden van het globale optimum maar vinden mogelijk een lokaal optimum (Figuur 3, punt a of c).

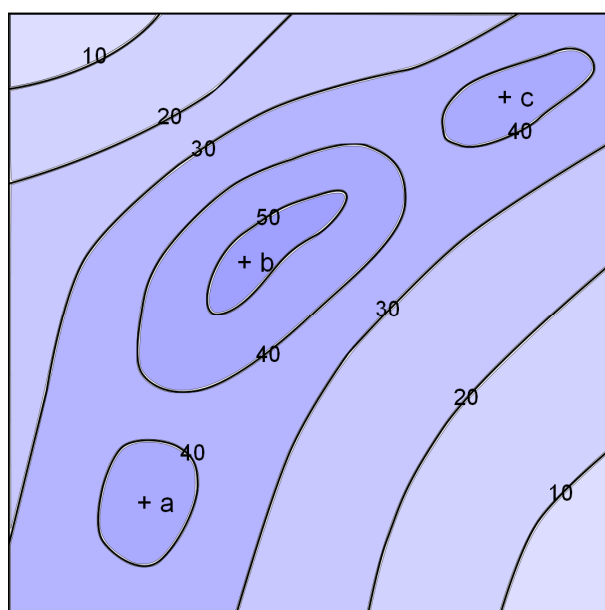
Binnen de heuristische methoden vormen de genetische algoritmen een aparte groep. Zij werken op basis van het principe van evolutie door selectie. Uitgaande van een startpopulatie oplossingen wordt steeds een subgroep geselecteerd die bovengemiddeld voldoet aan de gestelde criteria. Van deze subgroep wordt door willekeurige mutaties een nieuwe populatie gegenereerd, waarop weer een selectieronde volgt. Door voldoende iteraties van dit proces uit te voeren, kan men bij een lokaal of mogelijk het globale optimum uitkomen.

Tabel 2: Overzicht van publicaties op het gebied van sensorplaatsingsoptimalisatie met gebruikte methode en hydraulisch model. Gebruikte afkortingen: GA=genetisch algoritme, MIP=Mixed Integer (linear) Programming.

Referentie	Methode / type optimalisatie	Hydraulisch model
Al-Zahrani en Moied, 2003	GA	QUDIS
Berry et al., 2005	MIP	EPANET
Berry et al., 2006	MIP	EPANET
Carr et al., 2004	MIP	?
Kessler et al., 1998	set covering	"a hydraulic simulator"
Krause en Guestrin, 2009	heuristisch+submodulariteit	EPANET 2.0
Krause et al., 2008	submodulariteit	EPANET
Ostfeld en Salomons, 2005	GA	optiMQ-S (EPANET)
Preis en Ostfeld, 2008	GA	EPANET
Propato, 2006	MIP	EPANET?
Rico-Ramirez et al., 2007	MIP+	EPANET 1.0
Shastri en Diwekar, 2006	L-shaped sampling met BONUS	EPANET
Watson et al., 2006	MIP	EPANET

Tabel 3: Overzicht van meestgebruikte optimalisatiemethoden met belangrijkste kenmerken, zijnde of de methode altijd naar de optimale oplossing leidt en wat de relatieve kosten in termen van rekentijd zijn.

Methode		Optimaal	Kosten
MIP	Mixed Integer (linear) Programming	ja, bewijsbaar	hoog
heuristisch		nee	veel lager dan MIP
GA	Genetisch Algoritme	nee	lager



Figuur 3: Lokale optima (a,c) en het globale optimum (b). De contouren geven een prestatieparameter weer. De horizontale en verticale as representeren twee parameters die deze prestatieparameter beïnvloeden.

2.4 Vergelijking van methoden in de praktijk

Vanwege de veelheid aan methoden en benaderingen van optimale sensorplaatsing in leidingnetten hebben Ostfeld et al. (2008) een vergelijking van deze verschillende benaderingen gemaakt in enkele strak omschreven gevallen in de zogenaamde "Battle of the Water Sensor Networks". Zij hebben de ontwikkelaars van de verschillende methoden gevraagd voor deze strak omschreven gevallen met hun methodiek een optimale sensorplaatsing te bepalen en vervolgens als deze resultaten onderling met elkaar te vergelijken.

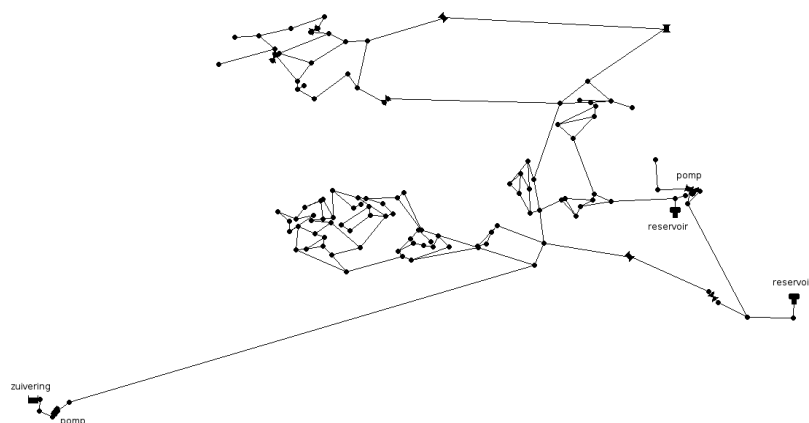
De ontwikkelaars werd gevraagd om, gebruik makend van EPANET 2.00.10 een optimaal ontwerp met 5 sensoren en een met 20 sensoren te maken voor vier gevallen (Ostfeld et al., 2008), die van elkaar verschillen in injectieduur van de besmettingsstof, reactietijd en het aantal simultane injectiepunten (1 of 2). Er werden twee netwerkmodellen, een met 126 knooppunten en een met 12.523 knooppunten, geleverd waarop deze gevallen konden worden toegepast.

Het eerste netwerk is weergegeven in Figuur 4. In het onderstaande worden geselecteerde resultaten van Ostfeld et al. (2008) weergegeven.

Tabel 4 geeft een overzicht van de toegepaste methoden en hun resultaten bij de optimale plaatsing van 5 sensoren in Netwerk 1 (Figuur 4). Opgenomen zijn:

- de tijd tot detectie, oftewel de tijdsduur vanaf de besmetting tot de eerste waarneming door een van de geplaatste sensoren;
- het aantal getroffen mensen, waarbij een dosis-responsmodel is gebruikt om de waarschijnlijkheid uit te drukken dat een persoon die een bepaalde hoeveelheid besmettingsmateriaal heeft binnengekregen als *getroffen* moet worden beschouwd (zie Ostfeld et al., 2008, voor details);
- het totale volume aan besmet water dat wordt geconsumeerd voordat detectie van de besmetting plaatsvindt;
- de detectiekans, oftewel de kans dat een besmetting wordt opgemerkt door een sensor (aantal scenario's waarin een besmetting wordt gedetecteerd gedeeld door het totaal aantal besmettingsscenario's).

Uit Tabel 4 blijkt dat geen van de algoritmen duidelijk het beste is. Afhankelijk van het gekozen optimalisatiecriterium worden er door verschillende methoden betere resultaten bereikt. In alle gevallen ligt de detectiekans onder 0,801; in veel gevallen ver hieronder. Wanneer 20 sensoren worden geplaatst (zie Tabel 5), zien we enige verschuivingen, hoewel de methode van Berry et al. opnieuw het beste scoort op het gebied van aantal getroffen mensen en geconsumeerd volume. Ook met 20 sensoren wordt minimaal een op de tien besmettingen in het geheel niet opgemerkt.

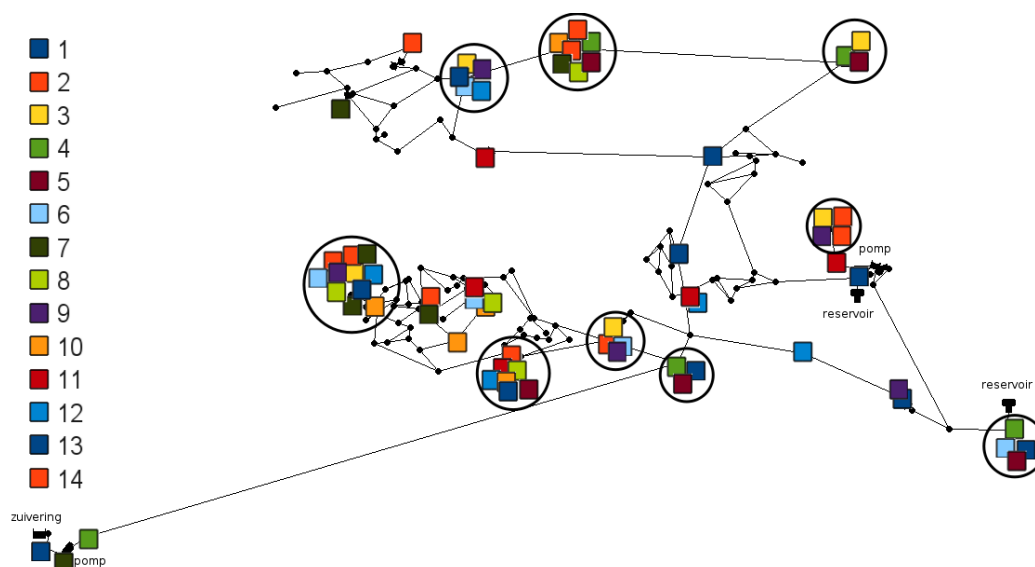


Figuur 4: Weergave van Netwerk 1 uit Ostfeld et al. (2008). Het netwerk bevat 126 knooppunten, 1 bron, 2 reservoirs, 168 leidingen, 2 pompen en 8 afsluiters.

Tabel 4: Overzicht van deelnemers aan de Battle of the Water Sensor Networks en hun prestaties voor Netwerk 1 met 5 sensoren (Ostfeld et al., 2008). Beste waarden zijn dikgedrukt, slechtste waarden zijn onderstreept. Data uit Ostfeld et al. (2008).

	Referentie	optimalisatiemethode	tijd tot detectie	aantal getroffen mensen	geconsumeerd volume	detectiekans
1	Berry et al. (2006)	heuristisch	542	140	2459	0,609
2	Dorini et al. (2006)	cross-entropy (multiobjective)	<u>1068</u>	258	7983	0,801
3	Eliades en Polycarpou (2006)	“iterative deepening of Patero-solutions” (multiobjective)	912	221	7862	0,763
4	Ghimire en Barkdoll (2006a)	heuristisch	432	357	4287	0,367
5	Ghimire en Barkdoll (2006b)	heuristisch	424	331	3995	0,402
6	Guan et al. (2006)	genetisch algoritme	642	159	2811	0,663
7	Gueli (2006)	predator-prooi model met evolutie	794	<u>403</u>	<u>10309</u>	0,699
8	Huang et al. (2006)	genetisch algoritme met datamining (multiobjective)	541	280	4465	0,676
9	Krause et al. (2006)	“a greedy algorithm”	842	181	3992	0,756
10	Ostfeld en Salomons (2006)	genetisch algoritme (multiobjective)	461	250	4499	0,622
11	Preis en Ostfeld (2006)	genetisch algoritme (multiobjective)	439	151	7109	0,477
12	Propato en Piller (2006)	MIP	711	164	3148	0,725
13	Trachtman (2006)	heuristisch	391	142	2504	<u>0,237</u>
14	Wu en Walski (2006)	genetisch algoritme (multiobjective)	704	303	8406	0,787

Figuur 5: Sensorlocaties van de optimalisaties in Tabel 4. Data uit Ostfeld et al. (2008). De nummers in de legenda verwijzen naar Tabel 4.



Tabel 5: Overzicht van deelnemers aan de Battle of the Water Sensor Networks en hun prestaties voor Netwerk 1 met 20 sensoren (Ostfeld et al., 2008). Beste waarden zijn dikgedrukt, slechtste waarden zijn onderstreept. Data uit Ostfeld et al. (2008).

Referentie	optimalisatiemethode	tijd tot detectie	aantal getroffen mensen	geconsumeerd volume	detectiekans
Berry et al. (2006)	heuristisch	287	68	408	0,770
Dorini et al. (2006)	cross-entropy (multiobjective)	408	72	642	0,855
Eliades en Polycarpou (2006)	“iterative deepening of Patero-solutions” (multiobjective)	368	96	969	0,893
Ghimire en Barkdoll (2006a)	heuristisch	377	104	750	0,792
Ghimire en Barkdoll (2006b)	heuristisch	370	106	787	0,769
Guan et al. (2006)	genetisch algoritme	337	78	503	0,854
Gueli (2006)	predator-prooi-model met evolutie	226	88	1181	0,577
Huang et al. (2006)	genetisch algoritme met datamining (multiobjective)	375	<u>148</u>	<u>1799</u>	0,849
Krause et al. (2006)	“a greedy algorithm” (heuristisch?)	401	93	865	0,900
Ostfeld en Salomons (2006)	genetisch algoritme (multiobjective)	198	115	1039	<u>0,647</u>
Propato en Piller (2006)	MIP	<u>433</u>	106	934	0,879
Trachtman (2006)	heuristisch	325	99	862	0,739
Wu en Walski (2006)	genetisch algoritme (multiobjective)	370	142	1158	0,901

2.5 Software

De hierboven beschreven benaderingen zijn veelal opgenomen in academische codes. Er zijn hiernaast verschillende softwarepakketten beschikbaar waarmee een optimalisatie van sensorplaatsing kan worden uitgevoerd. Voorbeelden zijn:

- INFOWater Suite (: een uitgebreid commercieel pakket t.b.v. netwerkanalyse en -beheer, waarin ook een module is opgenomen voor optimalisatie van sensorplaatsing;
- TEVA-SPOT: een vrij beschikbaar programma specifiek ontwikkeld voor de bepaling van de optimale plaatsing van sensoren en voor het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses hiervan.

Vanwege de vele analysemogelijkheden en vrije beschikbaarheid van het programma is gekozen om het praktische gedeelte van dit project uit voeren met TEVA-SPOT. Dit programma is bovendien door zijn grafische interface relatief gebruiksvriendelijk en praktisch toepasbaar. In Tabel 4 en Tabel 5 presteert de methodiek van de auteurs van TEVA-SPOT (Berry et al., 2006) in beide gevallen het beste op twee van de vier optimalisatiecriteria (aantal getroffen mensen en geconsumeerd volume).

3 TEVA-SPOT

3.1 Inleiding

TEVA-SPOT staat voor Threat Ensemble Vulnerability Analysis – Sensor Placement Optimization Tool, oftewel de analyse van kwetsbaarheid voor combinaties van mogelijke bedreigingen met een gereedschap voor de optimalisatie van sensorplaatsing. Het is ontwikkeld door het United States Environmental Protection Agency (US EPA) in samenwerking met Sandia Laboratories, Argonne National Laboratory en de Universiteit van Cincinnati (Berry et al., 2010). TEVA-SPOT is een stuk software dat door drinkwaterbedrijven kan worden gebruikt om een op sensoren gebaseerd *waarschuwingssysteem voor besmettingen* (WSB, internationaal bekendstaand als *Contamination Warning System, CWS*) te ontwerpen. Als basis hiervoor wordt een combinatie van mogelijke (besmettings-) bedreigingen gebruikt.

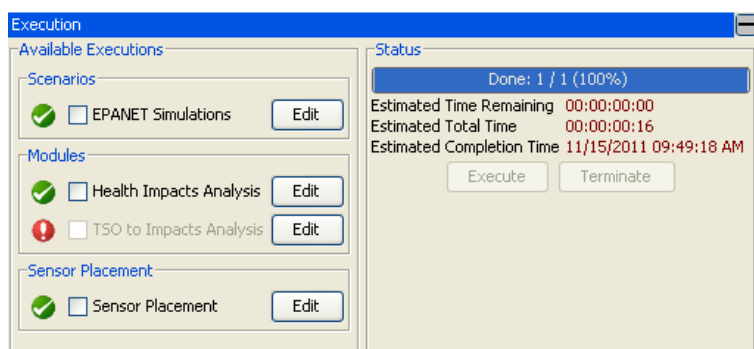
3.2 Benadering

De basis voor de analyse en optimalisatie die TEVA-SPOT uitvoert, is een hydraulisch model. Op basis van een netwerkmodel en verbruiks- of bevolkingsgegevens berekent TEVA-SPOT een model voor de stromingen in het leidingnet gedurende de hele dag. Een combinatie van mogelijke bedreigingen (besmettingen) wordt gevormd door een besmettingsscenario te definiëren (bijvoorbeeld de toediening van X gram besmettingsmateriaal per minuut gedurende Y minuten) en alle 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 verschafte 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. Ook zijn deze data de basis voor een reeks aan kaarten, grafieken en tabellen die kunnen worden gegenereerd om het netwerk, de plaatsing en de gezondheidseffecten van besmettingen te analyseren.

3.3 Gebruik

3.3.1 Basis

TEVA-SPOT is modulaair van opbouw (Figuur 6). De risico-evaluatie vindt plaats op basis van een enkel leidingnetmodel met bijbehorende bevolkingsgegevens dan wel verbruiksgegevens. Diverse parameters van het hydraulische model kunnen door de gebruiker worden ingesteld.



Figuur 6: Het executiescherm van TEVA-SPOT illustreert duidelijk de modulaire opzet van het programma.

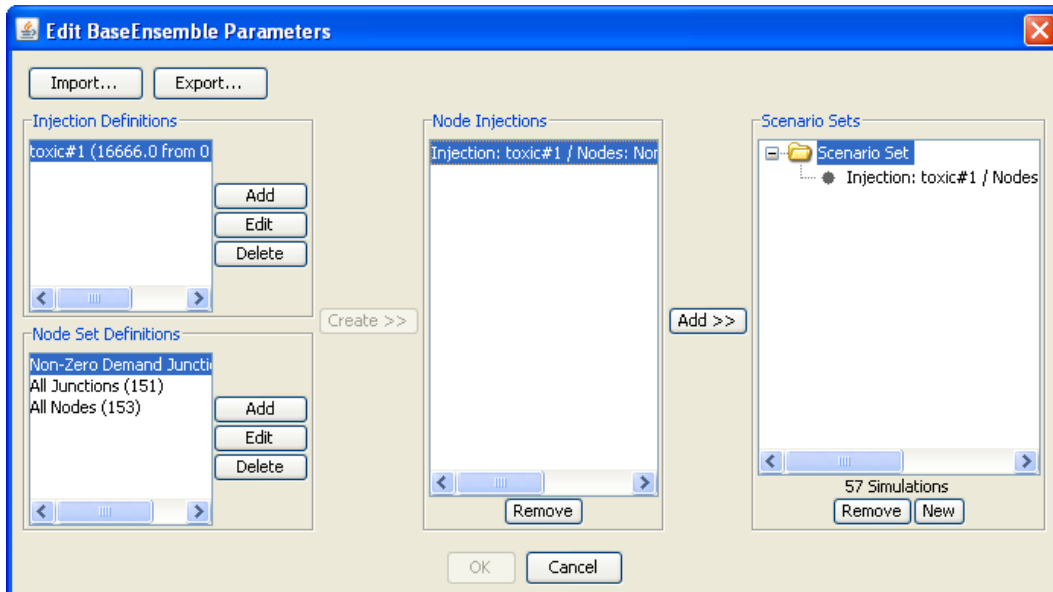
3.3.2 Analysemodi

Op het hydraulische model kunnen twee verschillende analysemodi worden toegepast. In de eerste, *ensemble analysis*, worden een analyse van de kwetsbaarheden voor bedreigingen en optimalisatie van

sensorplaatsing uitgevoerd. In de tweede modus, *regret analysis*, wordt onderzocht hoe een bepaalde sensorplaatsing voldoet aan andere doelstellingen dan die waarop de sensorplaatsing is gebaseerd.

3.3.3 Bedreigingsscenario's

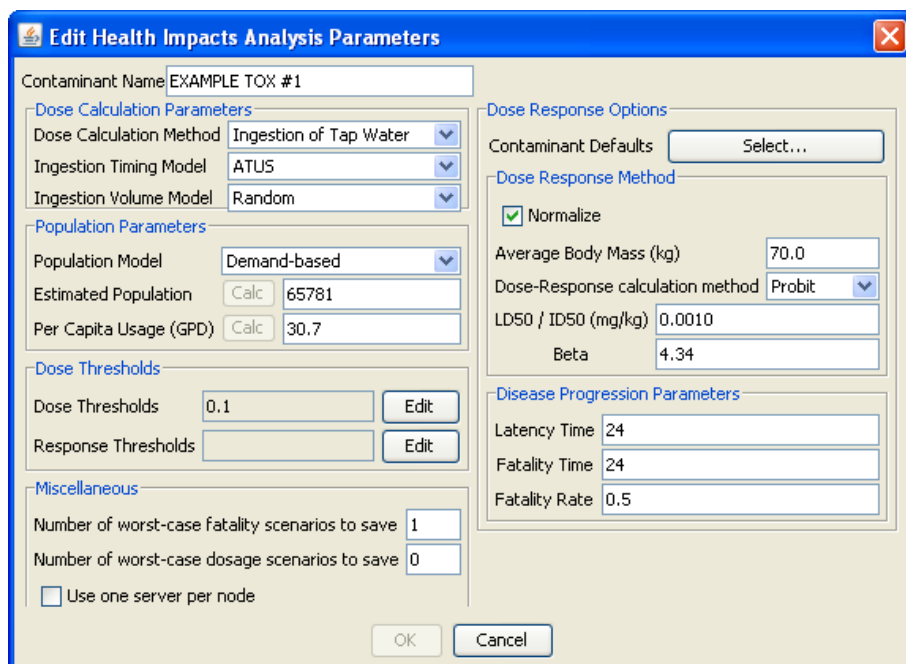
Een *ensemble analysis* op een leidingnetmodel wordt begonnen met de definitie van een of meer bedreigingsscenario's. Deze bestaan ieder uit de toediening van een bepaalde hoeveelheid van een verontreinigende stof gedurende een voorgeschreven periode aan één van een geselecteerde verzameling knooppunten, bijvoorbeeld alle knooppunten met een watervraag groter dan 0, van het leidingnetmodel. Diverse van deze scenario's kunnen worden toegevoegd aan een *scenarioverzameling* (Figuur 7). In de analyse wordt vervolgens voor ieder van deze scenario's voor ieder van deze toedieningspunten een simulatie uitgevoerd.



Figuur 7: definitie van de scenarioverzameling.

3.3.4 Gezondheidseffecten

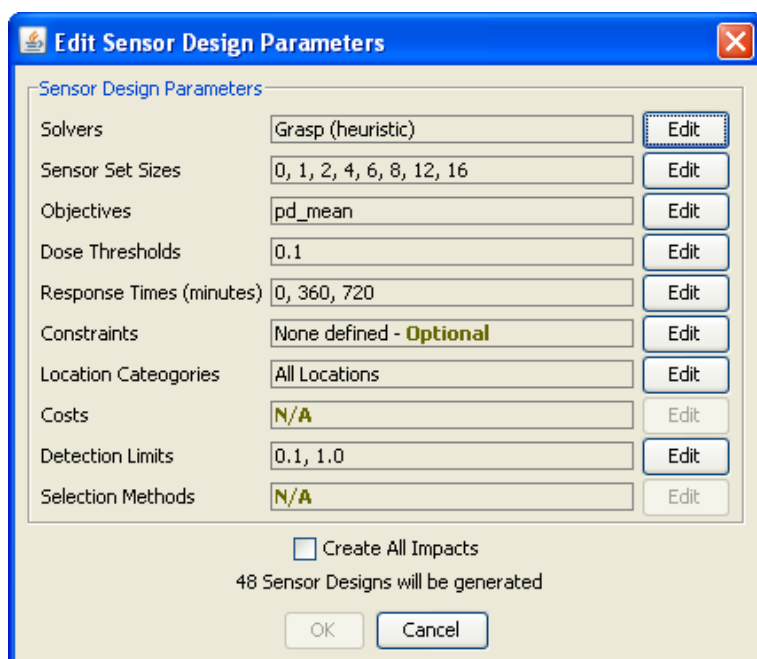
Op de resultaten van deze hydraulische simulaties kan vervolgens een analyse van de gezondheidseffecten worden uitgevoerd (Figuur 8). Door de gebruiker wordt voorgeschreven op welke manier (via welk model) het besmette drinkwater door consumenten wordt ingenomen, de samenhang tussen bevolking en waterconsumptie, drempelwaarden die tot negatieve gezondheidseffecten leiden, en een eventuele dosis-responsrelatie. Vervolgens wordt de analyse van de gezondheidseffecten uitgevoerd.



Figuur 8: Definitie van het model voor de gezondheidseffecten van een besmetting.

3.3.5 Optimalisatie van sensorplaatsing

Gebruik makend van methodieken zoals die zijn beschreven in Hoofdstuk 2 kan voor het voorgeschreven leidingnetmodel en de gekozen scenarioverzameling een optimale plaatsing voor een gekozen aantal sensoren en optimalisatiedoelstelling worden bepaald. Hierbij kan tegelijkertijd een optimalisatie voor verschillende aantallen sensoren worden uitgevoerd, zodat een vergelijking eenvoudig wordt. Er kan worden gekozen voor twee verschillende (beide heuristische) oplossingsmethoden (zie ook Tabel 3), die met wisselende waarschijnlijkheid in de buurt van het globale optimum uitkomen en meer of minder rekentijd vergen. Hier wordt ook gedefinieerd wat de doelstelling is waarop het ontwerp van het sensornetwerk wordt geoptimaliseerd.



Figuur 9: Parameters voor de optimalisatie van sensorplaatsing.

3.4 Vereisten aan model en invoer

Een reeks vereisten aan invoer en model en diverse overwegingen zijn van belang bij de toepassing van TEVA-SPOT. De onderstaande paragrafen geven hiervan een overzicht op basis van Murray et al. (2010).

3.4.1 Hydraulisch/netwerkmodel

TEVA-SPOT leest netwerkmodellen in het EPANET-formaat. De gebruiker dient daarom een bestaand netwerkmodel te converteren. Als alternatief kunnen hydraulische simulaties buiten TEVA-SPOT worden uitgevoerd, waarna de resultaten moeten worden geconverteerd naar een zogenaamde Threat Ensemble Database in EPANET-formaat. Deze database kan vervolgens door TEVA-SPOT worden gebruikt bij de verdere analyse. Voor goede resultaten moet het model in alle gevallen gecalibreerd, gevalideerd en getest zijn.

De aanbevolen duur van de simulaties is de langste verblijftijd in het netwerk. Wij voegen hieraan toe dat deze duur vermeerderd dient te worden met de reactietijd op een geconstateerde besmetting (oftewel de tijdsduur vanaf de eerste constatering tot aan het nemen van correctieve maatregelen). In de optimale situatie worden hieraan verschillende verbruikspatronen gekoppeld die representatief zijn voor het verbruik door het jaar heen, dus zowel een typische maximale dag als een typische minimale dag. Het wordt afgeraden om een beschouwing uitsluitend te baseren op een extreme verbruikssituatie. Idealiter worden per verbruiksknooppunt realistische patronen opgelegd, gekoppeld aan het daadwerkelijke (gemeten) jaarverbruik. Een geschikte benadering vormt het opleggen van een standaard huishoudelijk dan wel een standaard niet-huishoudelijk verbruikspatroon aan individuele verbruikspunten.

Het netwerkmodel moet over een voldoende mate van detail beschikken om de verspreiding van een stof door het systeem goed te kunnen modelleren en alle onderdelen die als kritisch worden beschouwd moeten in het model zijn opgenomen. Als ondergrens van de mate van detail wordt door Murray et al. (2010) de volgende verzameling vuistregels voorgesteld:

- tenminste 50% van de totale buislengte in het systeem;
- tenminste 75% van het totale buisvolume in het systeem;
- alle leidingen ≥ 300 mm;
- alle leidingen ≥ 200 mm die een verbinding vormen tussen drukzones, mengzones, opslag, belangrijke vraaggebieden, of die anderszins belangrijke waterdragers zijn;
- alle leidingen ≥ 150 mm die afgelegen delen van het distributiesysteem met de kern verbinden of die anderszins belangrijke waterdragers zijn;
- alle opslagbassins (met instellingen representatief voor normale situatie);
- alle pompstations (met instellingen representatief voor normale situatie);
- alle actieve beheersafsluiters en andere onderdelen die de stroming van water in het systeem significant kunnen beïnvloeden.

Het is van belang een geschikt mengmodel (volledige menging, *last in first out*, *first in first out*) voor de opslagtanks in het systeem te kiezen.

3.4.2 Sensor karakteristieken

Belangrijke karakteristieken van sensoren die de optimalisatie van hun plaatsing beïnvloeden zijn:

- type sensor;
- detectielimiet;
- nauwkeurigheid.

In de praktijk wordt in TEVA-SPOT alleen de detectielimiet gedefinieerd. Hiernaast kunnen potentiële sensorlocaties worden opgegeven, bijvoorbeeld gebaseerd op reeds bestaande sensorlocaties, kosten, etc.

3.5 Uitvoer

De resultaten van de uitgevoerde analyse kunnen op diverse manieren worden weergegeven. Zo kunnen kaarten worden geproduceerd van geschatte bevolkingsomvang per knooppunt, het aantal slachtoffers van een besmetting per injectielocatie, aantal slachtoffers per knooppunt voor besmettingsscenario's behorende bij het 10^e, 25^e, 50^e, 75^e, en 90^e percentiel van het aantal slachtoffers van het worst case scenario, sensorlocaties, etc.. Grafieken kunnen worden gemaakt van het aantal slachtoffers als functie van de tijd, aantal besmette personen als functie van het besmettingsscenario, etc.. Tabellen kunnen

worden gegenereerd over o.a. diverse aspecten van de analyse van gezondheidseffecten, sensoren en detectietijden.

4 Toepassing van TEVA-SPOT op het distributienetwerk van Hoogeveen met gevoeligheidsanalyse

4.1 Inleiding

Om het gebruik en de resultaten van TEVA-SPOT te testen is gekozen om het programma toe te passen op het distributienet van Hoogeveen. Dit netwerk wordt gekenmerkt door

- 20598 aansluitingen;
- 414 km leidingen.

In dit hoofdstuk worden diverse scenario's doorgerekend met dit distributienet om verschillende gevoeligheden te analyseren.

4.2 Simulaties

Hieronder wordt een aantal simulaties besproken. De simulaties zijn uitgevoerd op twee versies van een netwerkmodel van Hoogeveen, een detailmodel (*detail*) en een verdund model (*verdund*, zie Tabel 6), waarin veel knopen zijn samengevoegd om de grootte van het netwerk in termen van opslagruimte en daarmee de rekentijd aanzienlijk te verminderen. Meer details over de netwerkmodellen zijn opgenomen in Appendix I.

Tabel 6: Karakteristieken van de toegepaste leidingnetmodellen voor het distributienet van Hoogeveen.

model	<i>detail</i>	<i>verdund</i>
aantal knooppunten	4027	151
aantal verbruiksknooppunten	3040	146
typische rekentijd TEVA-SPOT	200 min.	7 min.

Er is gekozen om uit te gaan van besmetting met een onbenoemde stof (of bacterie) waarvoor wordt verondersteld dat er een sensor voor bestaat. Voor de evaluatie van de gezondheidseffecten en de optimale plaatsing van de sensoren op basis hiervan wordt uitgegaan van een bepaalde dosis waarin individuen maximaal mogen worden blootgesteld, namelijk 0,1 mg. Dit, evenals de toedieningssnelheid van de besmetting, is een enigszins willekeurige waarde, die als representatief wordt verondersteld. Let op dat de behaalde resultaten eveneens geldig zijn als de toedieningssnelheid en limietdosis met dezelfde factor worden vermenigvuldigd, mits de detectielimiet van de sensoren voldoende laag is.

Het feit dat uit wordt gegaan van een conservatieve stof, zal vermoedelijk leiden tot een andere sensorconfiguratie dan wanneer processen die leiden tot niet-conservatief gedrag zouden worden beschouwd, zoals bacteriegroei of -afsterving, adhesie aan de wand, uitzinken of chemische reacties. Als bacteriegroei wordt meegenomen, gaan temperatuur en verblijftijd een belangrijke rol spelen en worden sensoren naar verwachting meer naar de periferie van het netwerk geplaatst dan het geval is voor conservatieve stoffen. Dit is echter niet onderzocht.

In alle gevallen wordt een periode van 120 uur (5 dagen) gesimuleerd. Hiermee wordt voldaan aan de eis dat de simulatieduur minimaal gelijk is aan de langste verblijftijd (3 dagen) plus de reactietijd (in de uitgevoerde simulaties maximaal 2 dagen). Er wordt gewerkt met een injectie van 167 gram of 1,67 kg besmettingsmateriaal per minuut, oftewel 10 respectievelijk 100 kg besmettingsmateriaal per uur. Het tijdstip van begin van toediening en de duur van de toediening worden gevarieerd. Hierbij wordt ieder knooppunt van het netwerkmodel waaraan een watervraag groter dan nul wordt toegeschreven (Non Zero Demand Junctions oftewel NZDJ) beschouwd als mogelijk toedieningspunt, en is het aantal

simulaties dat moet worden uitgevoerd voor een scenario gelijk aan het aantal NZDJ (voor het gekozen netwerkmodel met gekozen verdunningsgraad).

Hoewel de grenswaarden voor de evaluatie van de gezondheidseffecten en voor de optimale sensorplaatsing onafhankelijk van elkaar kunnen worden gekozen, hebben wij deze in alle gevallen gelijk gesteld; het gezondheidseffect is dus direct leidend voor de sensorplaatsing.

In alle gevallen wordt een nulsituatie zonder sensoren vergeleken met situaties waarin 2, 4, en 8 sensoren in het netwerk worden geplaatst. Hiermee kan in vergelijkingen steeds het effect van de verdubbeling van het aantal sensoren worden bekeken. Voor de optimalisatie wordt gebruik gemaakt van het heuristische Grasp-algoritme. De doelstelling voor de optimalisatie van de sensorplaatsing wordt op verschillende manieren geformuleerd. De volgende aantallen worden geminimaliseerd:

<i>pd_mean</i>	aantal individuen dat aan een dosis hoger dan de voorgeschreven drempelwaarde wordt blootgesteld; uitgaande van de gemiddelde impact van alle besmettingsscenario's
<i>pd_worst</i>	aantal individuen dat aan een dosis hoger dan de voorgeschreven drempelwaarde wordt blootgesteld; uitgaande van het besmettingsscenario met het grootste aantal getroffen (worst case scenario)

Verskillende reactietijden (de tijd tussen de eerste signalering van de besmetting en het nemen van correctieve maatregelen) zijn gesimuleerd, variërend van 6 uur tot 48 uur. Er is met een reeks verschillende waarden voor de detectielimiet (van 0.1 mg/l tot 10 g/l) van de sensoren gewerkt.

Tabel 8 (Appendix II) geeft een overzicht van de uitgevoerde simulaties met de belangrijkste onderscheidende kenmerken en resultaten voor verschillende aantallen sensoren. In alle gevallen is het aantal getroffen personen weergegeven.

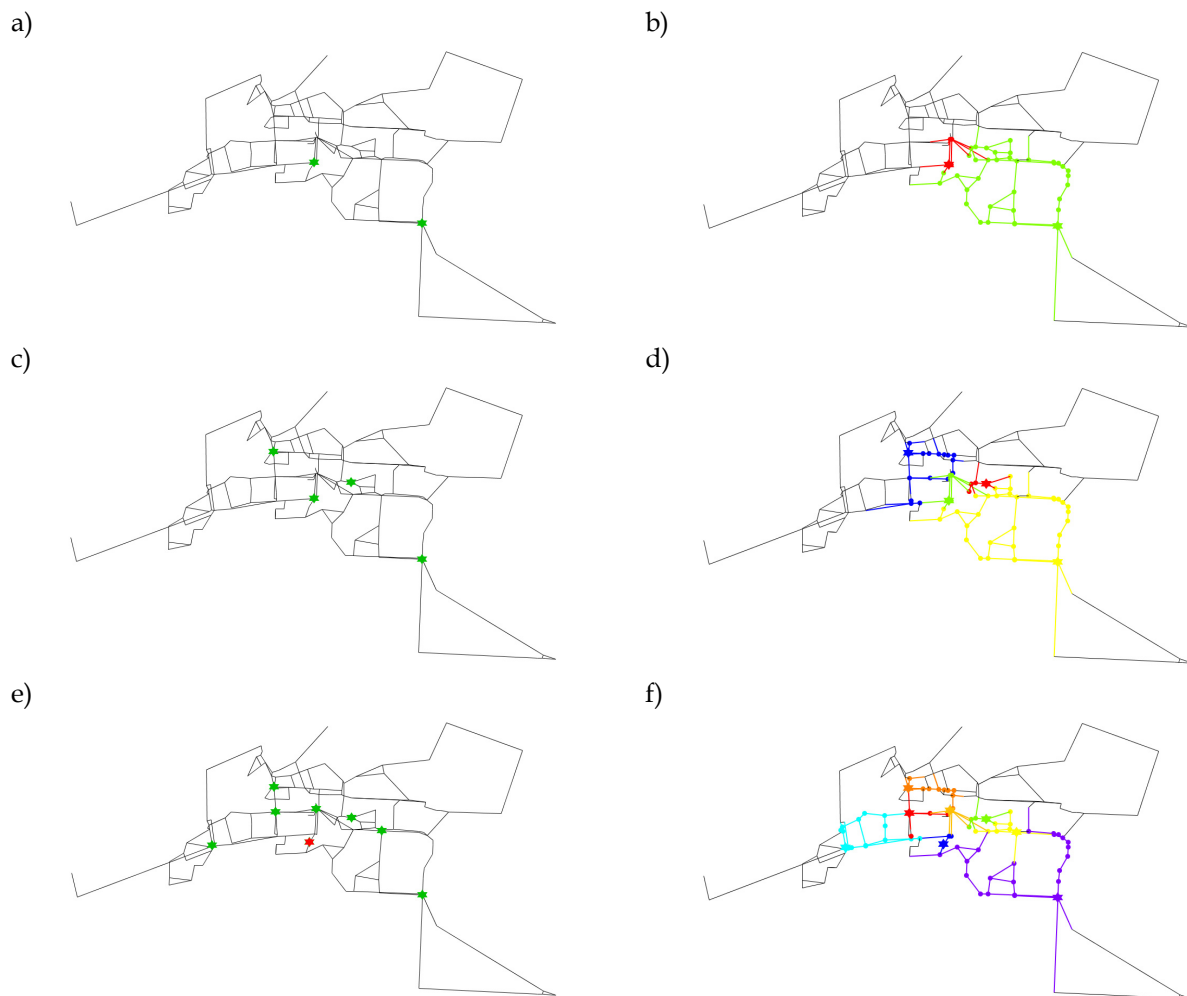
4.3 Basismodel

We gaan uit van een basismodel (*run01*), waarvan vele varianten worden gegenereerd om gevoeligheden voor bepaalde modelaspecten te onderzoeken. Het basismodel is een verdund model, waarin om middernacht gedurende een uur 1,67 kg/minuut besmettingsmateriaal wordt geïnjecteerd. Optimale sensorlocaties voor dit model zijn weergegeven in Figuur 10a,c,e. Het toevoegen van extra sensoren ten opzicht van de situaties met 2 en 4 sensoren levert meestal een uitbreiding van de bestaande verzameling op. Bij de uitbreiding van 4 naar 8 sensoren wordt een sensor een klein stukje verplaatst (rood weergegeven Figuur 10e). Figuur 10b,d,f laat voor de verschillende sensorconfiguraties zien uit welke delen van het leidingnetmodel besmettingen door de verschillende sensoren worden geregistreerd. Zoals te verwachten kan naarmate er meer sensoren worden geplaatst een groter deel van het leidingnet in de gaten worden gehouden. Bij 8 sensoren blijkt de dekking nog verre van compleet voor de gekozen simulatieparameters. Let op dat de dekking van een sensor niet gelijkgesteld kan worden aan het aantal personen dat wordt beschermd door een sensor (zie §4.6).

4.4 Besmettingsscenario's in het basismodel

Aangezien voor ieder netwerkmodel een combinatie van besmettingsscenario's wordt voorgeschreven, maar de optimalisatie van de sensorconfiguratie slechts plaats vindt op basis van de impact van een van deze scenario's (bijvoorbeeld het mediane scenario of het scenario met de grootste impact) of een afgeleide van de gehele populatie (gemiddelde impact), is het interessant om de variatie binnen de combinatie van besmettingsscenario's onder de loep te nemen. In deze paragraaf wordt dit gedaan voor het basismodel, *run01*.

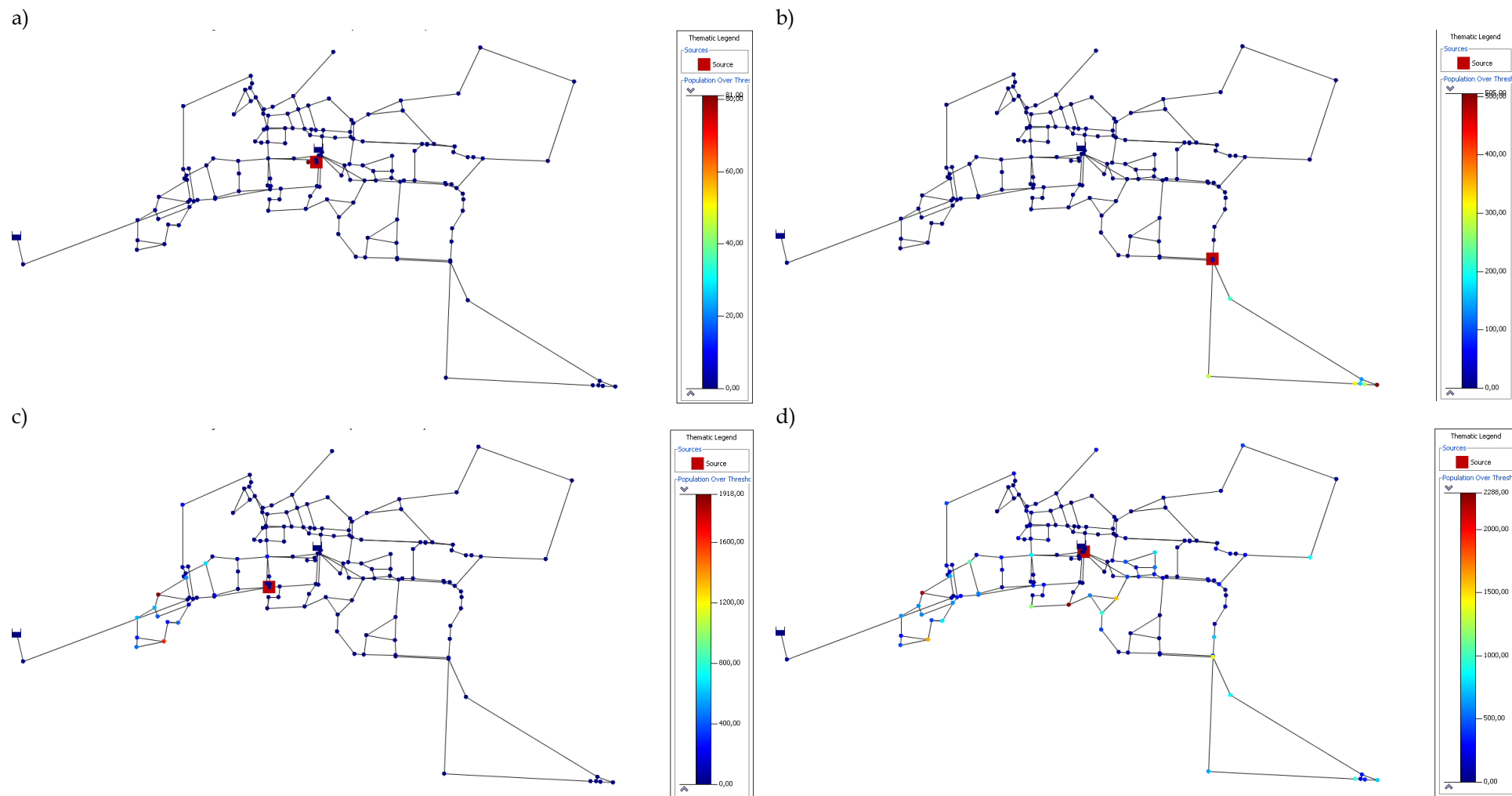
Figuur 11 toont voor ieder knooppunt van het verdunde netwerkmodel voor drie verschillende besmettingsscenario's hoeveel mensen meer dan de voorgeschreven limietdosis binnenkrijgen. In het eerste geval (Figuur 11a) gaat het om het 10-percentielscenario, oftewel het scenario dat, wanneer alle scenario's uit de combinatie worden gerangschikt op het totaal aantal mensen dat meer dan de voorgeschreven limietdosis ontvangt, 10% van de scenario's voor zich laat en 90% achter zich. Het betreft hier dus een van de mildste scenario's in termen van aantal getroffen. In dit geval bevindt de



Figuur 10: Verdund netwerkmode met a) optimale locaties van 2 sensoren; c) optimale locaties van 4 sensoren; e) optimale locaties van 8 sensoren. De ene sensor die in e) verplaatst is ten opzicht van a) en c) is in rood weergegeven. b,d,f) Delen van het netwerkmodel waarin door de individuele sensoren verontreinigingen worden vastgesteld.

besmettingsbron zich aan het eind van een tak, waardoor alleen de aan dit eindpunt aangesloten consumenten blootgesteld kunnen worden aan de besmetting en de gevolgen dus (geografisch) beperkt zijn.

Figuur 11b toont eenzelfde kaartje voor het 50-percentielscenario. Hier bevindt de besmettingsbron zich op een doorvoerknooppunt naar een deelgebied van het netwerk, waardoor mensen aan alle knooppunten van dit deelnetwerk worden blootgesteld aan de besmetting. Het 90-percentielscenario is weergegeven in Figuur 11c. Hier voedt het besmette knooppunt een nog wat groter deel van het netwerk (in ieder geval in termen van aangesloten consumenten), waardoor ook de impact nog groter is. Het worst-case of 100-percentielscenario is weergegeven in Figuur 11d. Hier bevindt de besmettingsbron zich bij een centraal gelegen voedingspunt, waardoor consumenten bijna tot in alle uithoeken van het netwerk aan de besmetting kunnen worden blootgesteld.



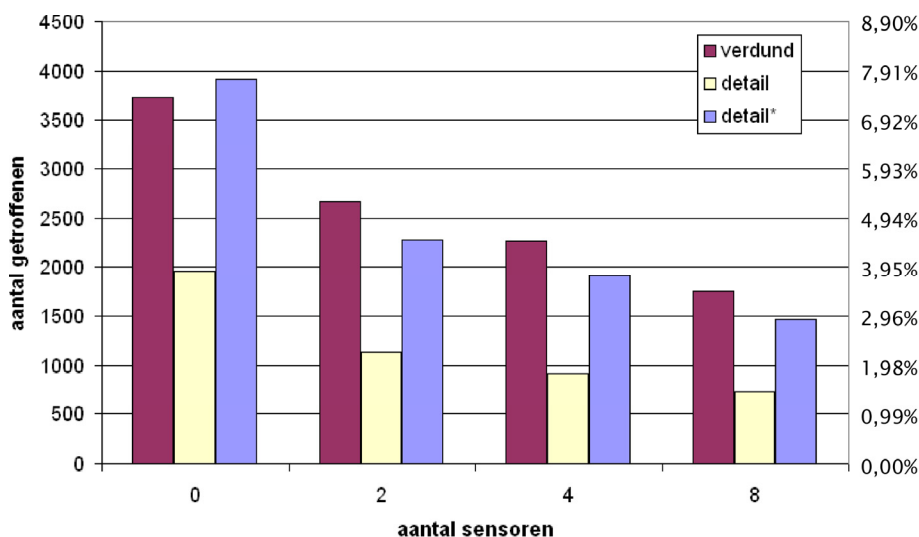
Figuur 11: Aantal mensen dat meer dan de voorgeschreven limietdosis binnenkrijgt in de 10-, 50-, 90- en 100-percentielscenario's (a,b,c, d, respectievelijk). Let op dat de kleurenschaal anders is voor ieder subfiguur. De besmettingsbron is steeds weergegeven met een rood vierkant.

4.5 Effecten van verdunning van het netwerkmodel

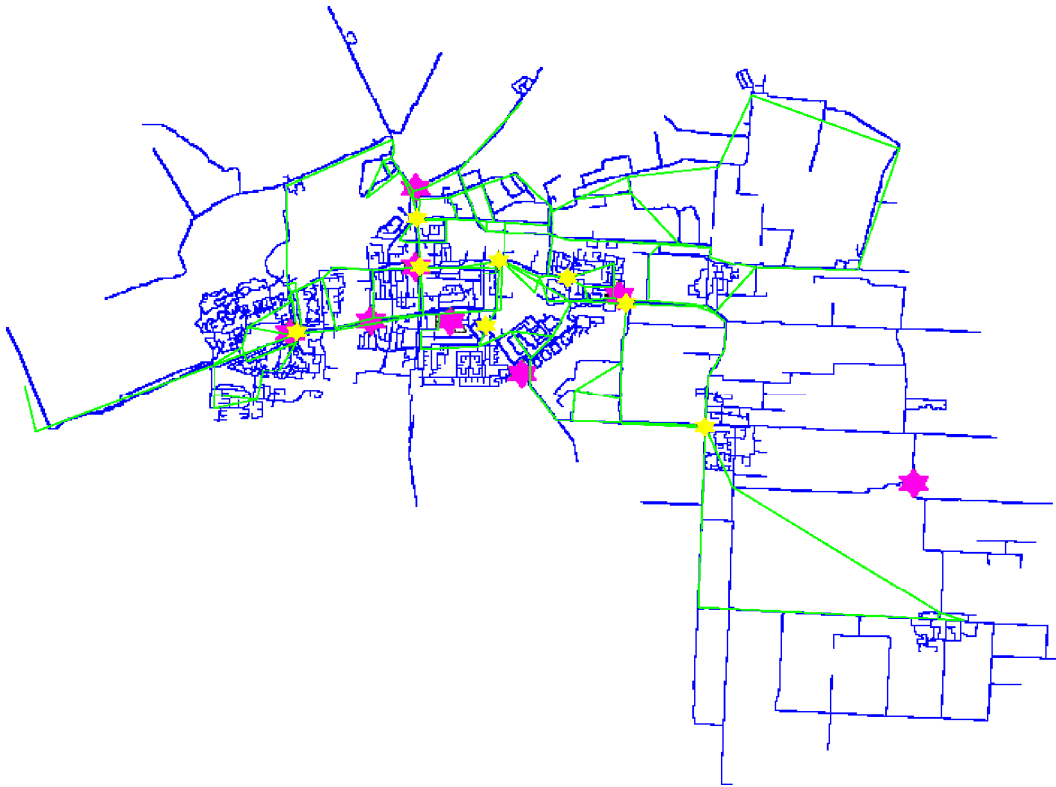
Simulaties *run01* en *run02* beschouwen dezelfde situatie op het verdunde en het detailmodel. Figuur 12 laat de aantallen getroffenenen voor optimale sensorlocaties bij verschillende aantallen sensoren zien voor deze twee netwerkmodellen. Opvallend is dat het verdunde model ongeveer een factor 2 meer getroffenenen voorspelt dan het detailmodel (in het basismodel met 0 sensoren is de verhouding ongeveer 1:2; in de modellen met sensoren is de verhouding ongeveer 1:2,5). Dit hangt samen met het feit dat in het verdunde model besmettingen alleen op de grotere leidingen die in dit model zijn opgenomen plaatsvinden, terwijl in het detailmodel besmettingen ook op veel kleinere leidingen, met minder aansluitingen, voorkomen. Dit betekent dat het gemiddelde besmettingsmodel in het verdunde model niet vergelijkbaar is met het gemiddelde besmettingsmodel van het detailmodel. Daarom is een derde model (*run26*) opgenomen in Figuur 12, hetgeen een detailmodel is maar waarin de toediening van de besmetting alleen op knooppunten op leidingen ≥ 150 mm plaatsvindt. Dit model toont vergelijkbare aantallen getroffenenen als het verdunde model.

De gevonden optimale locaties voor 8 sensoren zijn weergegeven voor beide netwerkmodellen (*run01* en *run02*) in Figuur 13. Hieruit blijkt dat slechts 3 van de 8 sensorlocaties in beide modellen (min of meer) overeenkomen. Hoewel dit moeilijk te vergelijken is, lijkt de omvang van de gebieden waarin detectie van besmettingen plaatsvindt wel vergelijkbaar (Figuur 14).

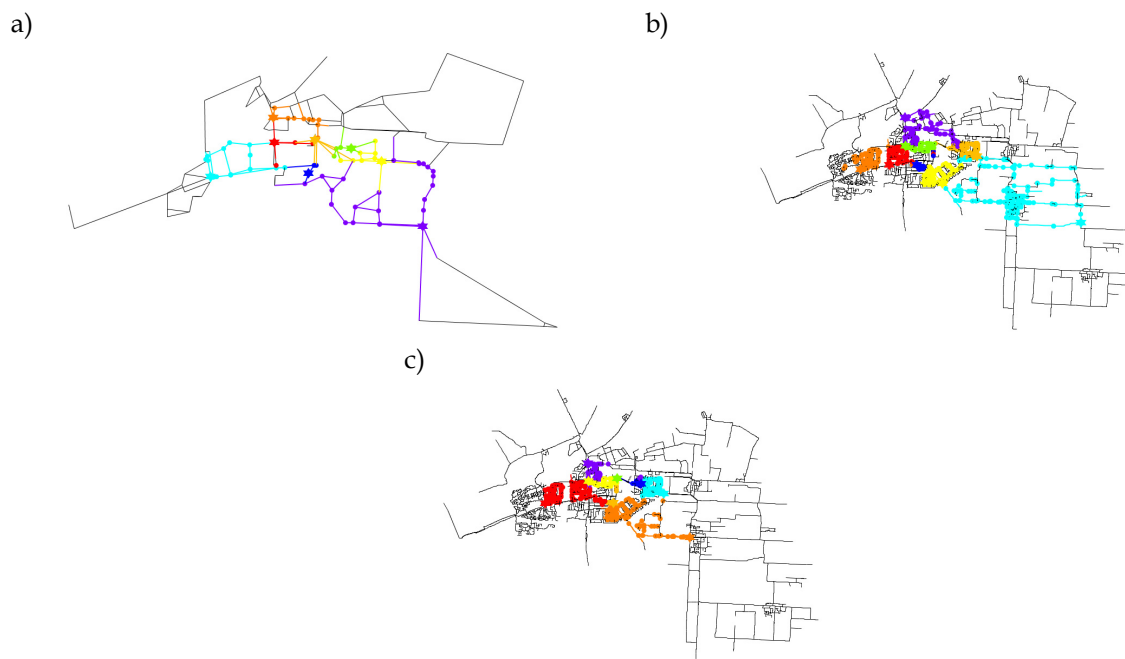
Wanneer een analyse wordt uitgevoerd in het detailnetwerkmodel met de optimale sensorlocaties bepaald in het verdunde netwerkmodel (*run24*, sensorlocaties benaderd op basis van *run01*) en de resultaten hiervan worden vergeleken met de analyse van het detailnetwerkmodel met voor dat model optimale locaties (*run02*), dan neemt de impact (*pd_mean*) toe van 734 getroffenenen naar 1014 getroffenenen voor 8 sensoren. Ook wordt het gebied waaruit besmettingen worden opgepikt kleiner (vergelijk Figuur 14b en c). Let op dat de toewijzing van sensorlocaties in het detailmodel op basis van locaties in het verdunde model slechts bij benadering gedaan kan worden.



Figuur 12: Vergelijking van resultaten op een verdund model (*run01*) met die op een detailmodel (*run02*) met dezelfde simulatieparameters en een detailmodel waarin alleen besmetting op leidingen ≥ 150 mm plaatsvindt (*run26*, *detail**). Het aantal getroffenenen als fractie van het totale aantal consumenten in het model is weergegeven op de rechter y-as.



Figuur 13: Vergelijking van optimale sensorlocaties voor 8 sensoren in een verdund model (run01, groene verbindingen, gele locaties) en een detailmodel (run02, blauwe verbindingen, magenta locaties) met dezelfde simulatieparameters.



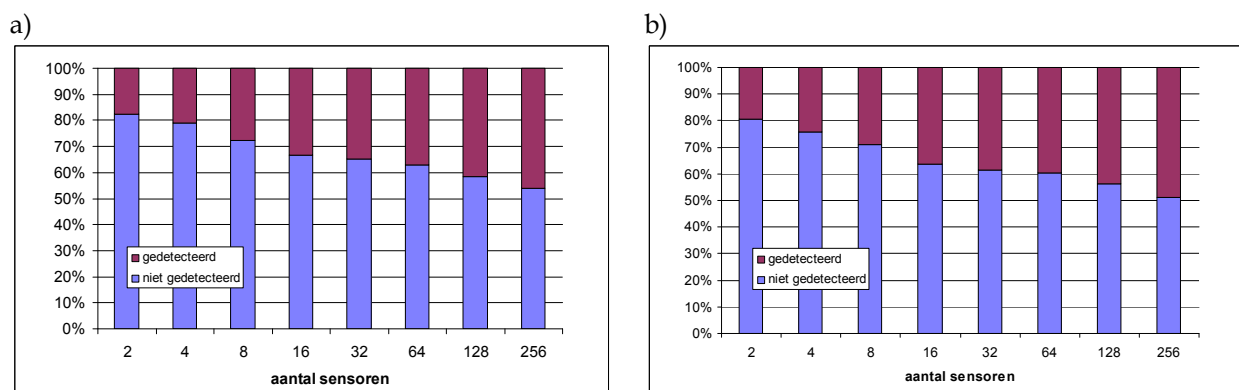
Figuur 14: Besmettingsdetectie in het verdunde model (a, run01), het geoptimaliseerde detailmodel (b, run02) en het detailmodel met optimale sensorlocaties van het verdunde model (c, run24).

4.6 Omvang, dekkinggraad en niet-gedetecteerde besmettingen

Wat uit het voorgaande niet heel duidelijk naar voren komt, maar wel van groot belang is, is dat in veel getoonde modellen slechts een minderheid van de opgetreden besmettingen ook daadwerkelijk wordt gedetecteerd. Figuur 15 illustreert dit voor het detailmodel *run02/run34*, zowel in termen van het aantal toedieningspunten waarvoor detectie optreedt (a) als voor het aantal consumenten dat direct gekoppeld is aan de toedieningspunten waarvoor een besmetting wordt gedetecteerd (b). Zoals te verwachten omvat het dekkinggebied van een optimale sensorlocatie een fractie van de bevolking die groter is dan de fractie van het aantal toedieningspunten; dit vanwege het feit dat de optimalisatie van de sensorplaatsing als doel heeft het aantal getroffen van een besmetting te minimaliseren. Het verschil blijkt echter klein te zijn, in de orde van enkele procentpunten. Dit lijkt samen te hangen met het ogenschijnlijk redelijk evenredige verspreiding van de verbruikers over de verbruikspunten (Figuur 16). Met andere woorden, het gebied waar de sensorplaatsing is geconcentreerd bevat maar weinig knooppunten met een afwijkend hoog aantal gekoppelde verbruikers.

Figuur 17 geeft de gemiddelde omvang van de gebieden (in termen van aangesloten personen) van individuele sensoren waarin optredende besmettingen worden gedetecteerd weer als functie van het aantal geplaatste sensoren. De grafiek illustreert heel duidelijk dat de omvang van het zichtveld van een enkele sensor steeds kleiner wordt bij een groter aantal geplaatste sensoren, oftewel de sensoren worden steeds dichter op elkaar gezet. Figuur 15b geeft echter aan dat zelfs bij 256 sensoren slechts de helft van de consumenten aangesloten is op een leiding waarin besmettingen worden gedetecteerd. De kleinere zichtvelden zorgen echter wel voor een kortere detectietijd.

Let op dat het aantal personen binnen het zichtveld van een sensor niet gelijk is aan het aantal personen dat wordt beschermd door een sensor. Benedenstreams van een sensor bevinden zich namelijk aansluitingen die wel worden beschermd door een sensor tegen een besmetting bovenstreams van de sensor, maar die niet in het zichtveld van de sensor liggen. Bovendien kunnen bovenstreams van een sensor gebieden liggen die wel door de betreffende sensor worden gezien, maar ook door een of meer andere sensoren. Aangezien besmettingspunten slechts aan één sensor worden toegewezen, kan hiermee de omvang van het zichtveld van een sensor worden onderschat. Dit beeld wordt onderschreven door de constatering dat het aantal getroffen wel aanzienlijk afneemt met toenemend aantal sensoren (Figuur 18).

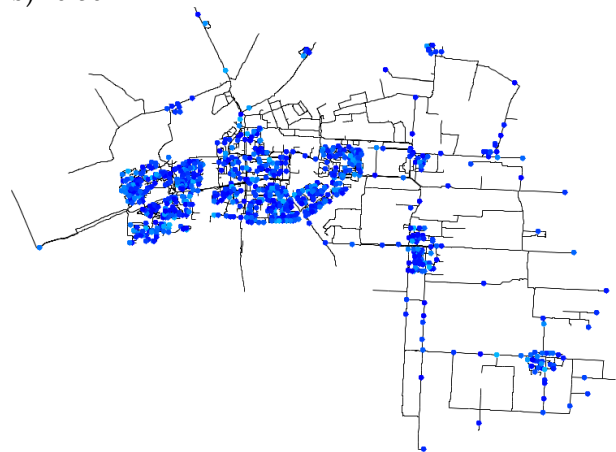


Figuur 15: Onderverdeling van aantal besmettingen (a) en aantal aan besmettingspunt gekoppelde consumenten (aantal getroffen, b) in gedetecteerde en niet-gedetecteerde incidenten voor 2-256 sensoren in het detailmodel (*run02/run34*).

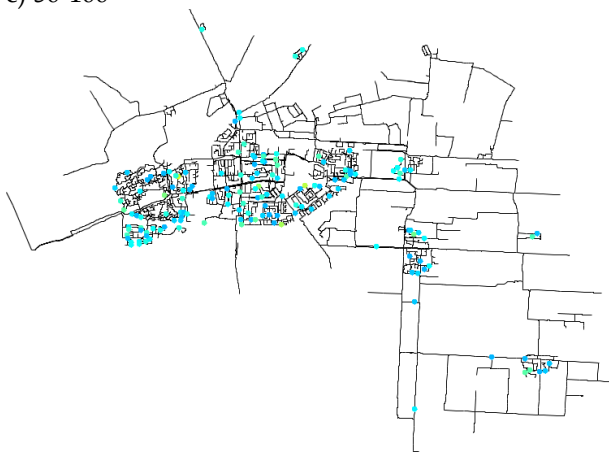
a) 0-20



b) 20-50



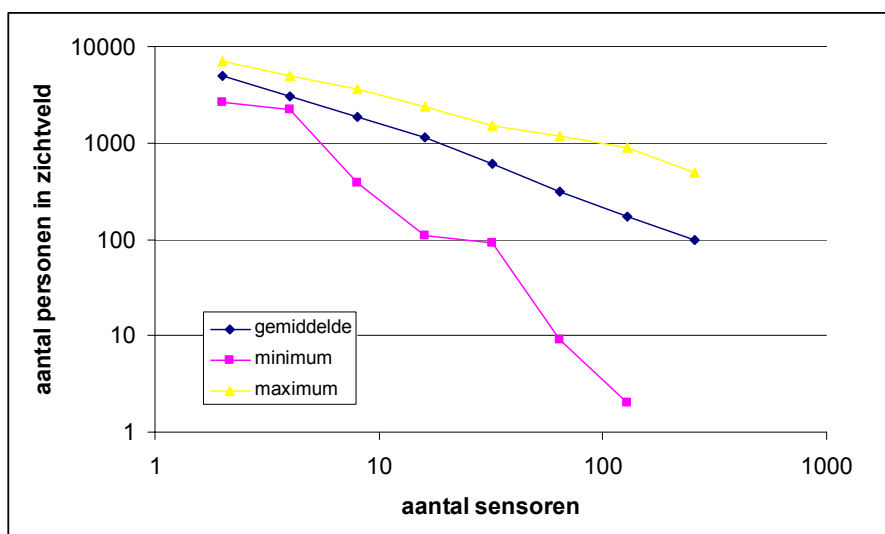
c) 50-100



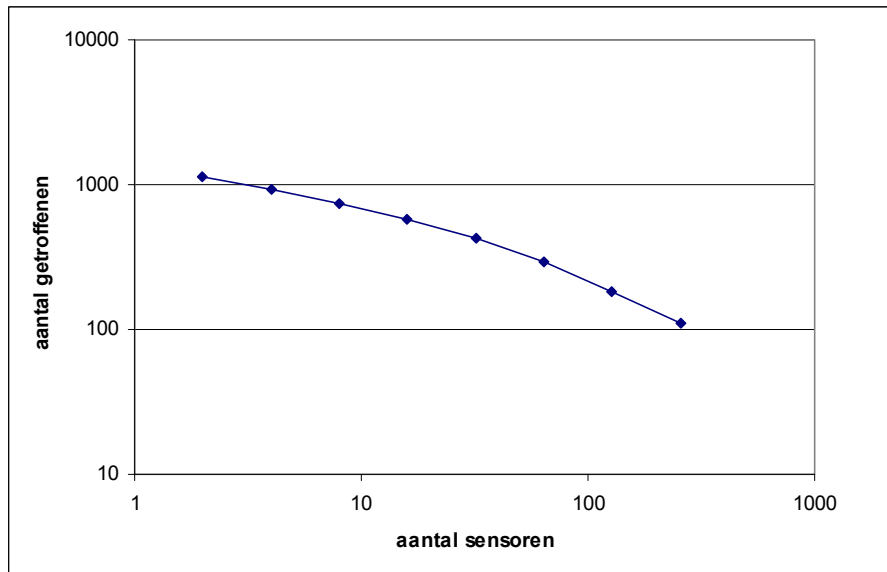
d) 100-165



Figuur 16: Aantal consumenten per verbruiksknooppunt in het detailmodel (run02/run34).



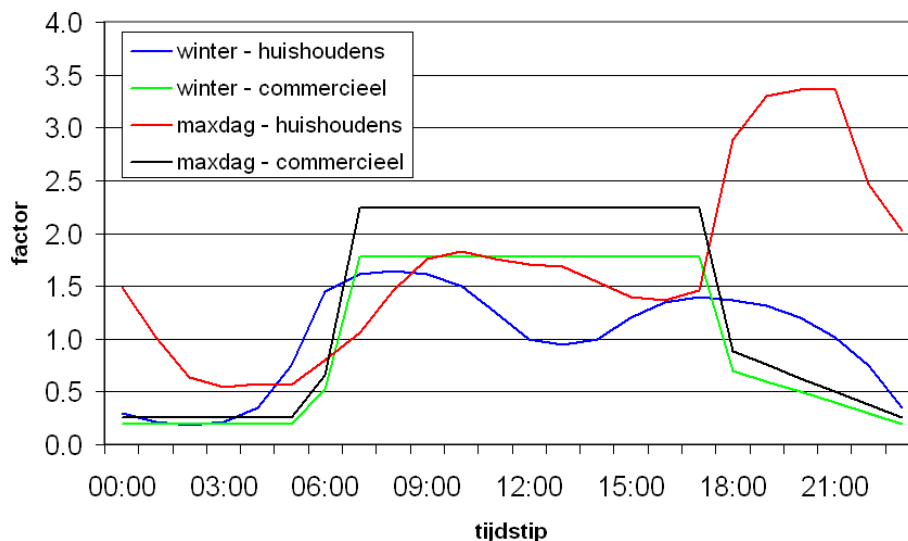
Figuur 17: Aantal personen in het zichtveld van een sensor als functie van het aantal sensoren dat is geplaatst (run34).



Figuur 18: Aantal getroffen als functie van het aantal sensoren voor run34.

4.7 Effecten van verschillende verbruikspatronen

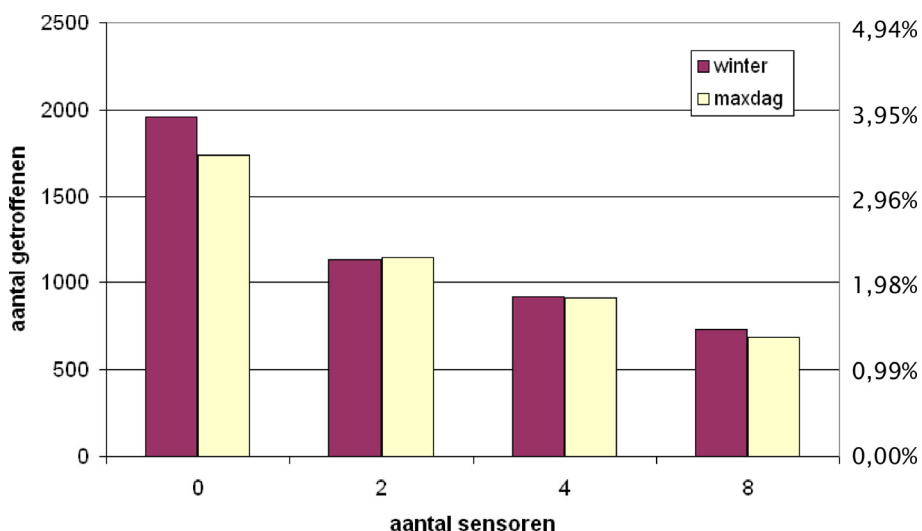
Aangezien verbruikspatronen aanzienlijk uiteen kunnen lopen naar gelang de omstandigheden, zijn simulaties uitgevoerd voor zowel winterdagpatronen als maxdagpatronen (zie Figuur 19).



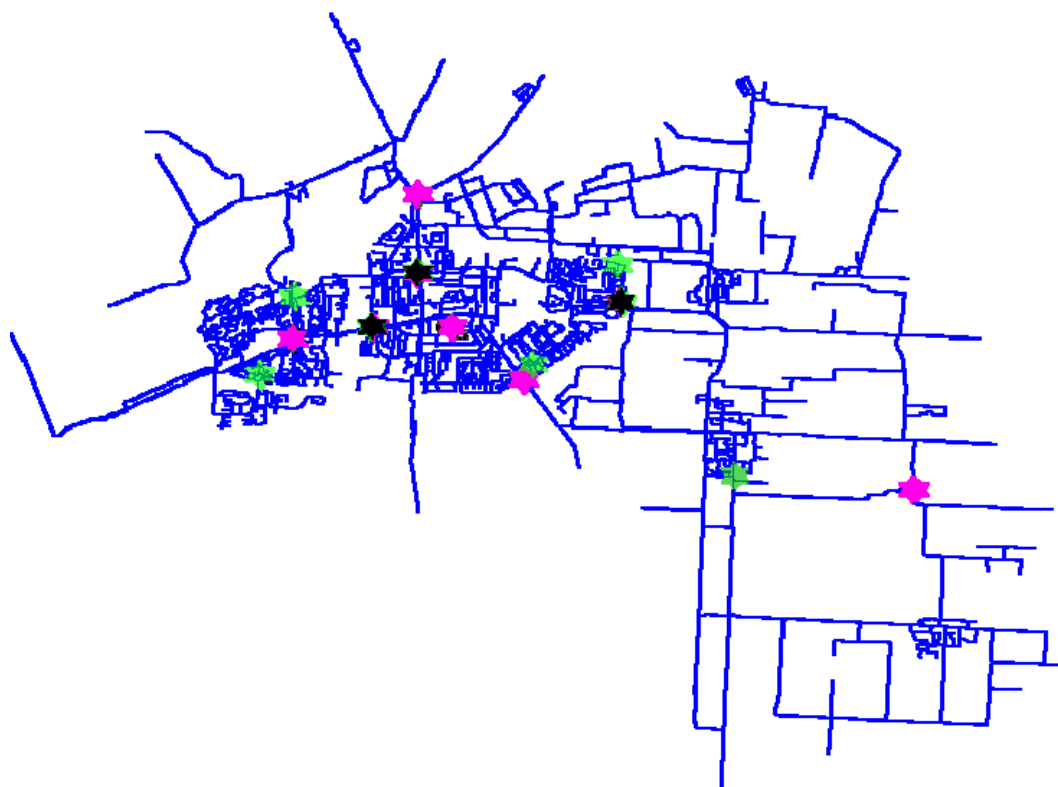
Figuur 19: Verschillende toegepaste verbruikspatronen voor huishoudelijke en commerciële verbruikers.

In Figuur 20 wordt het effect van verschillende verbruikspatronen op de sensorplaatsing geïllustreerd aan de hand van het aantal getroffen bij verschillende aantallen sensoren. De verschillen zijn klein.

De bijbehorende sensorlocaties zijn weergegeven in Figuur 21. Hier zien we dat drie optimale sensorlocaties overeenkomen voor beide vraagpatronen, maar dat de optimale verzamelingen tevens 5 andere locaties bevatten. De effectiviteit van de twee sensorconfiguraties is echter voor hun respectievelijke vraagpatronen nagenoeg gelijk.



Figuur 20: Vergelijking van resultaten op het detailmodel met een wintervraagpatroon (run02) en een maximaal vraagpatroon (run03). Het aantal getroffen enen als fractie van het totale aantal consumenten in het model is weergegeven op de rechter y-as.



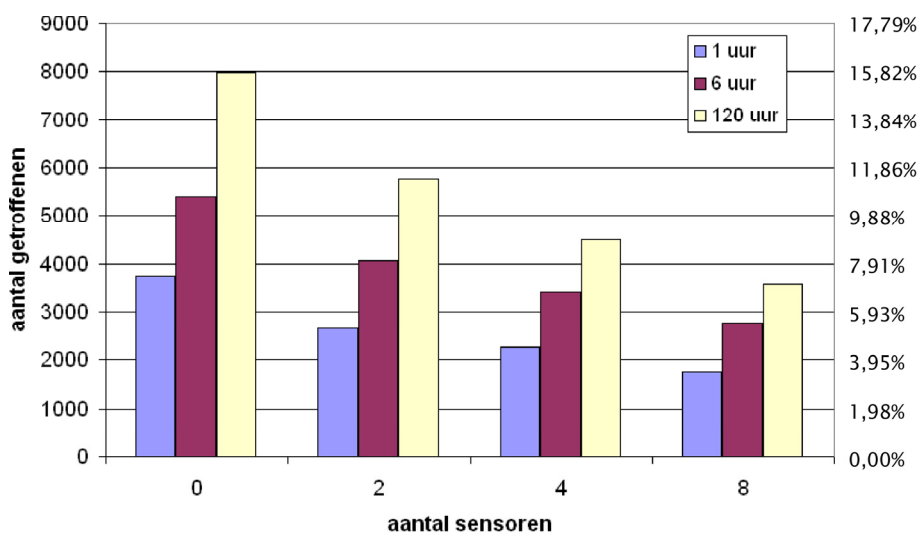
Figuur 21 Vergelijking van optimale sensorlocaties voor 8 sensoren in het detailmodel met een winterpatroon (run02, magenta en zwarte locaties) en een maxdagpatroon (run03, groene en zwarte locaties) met dezelfde simulatieparameters.

Interessanter is de vraag hoe een sensornetwerk dat geoptimaliseerd is voor het ene vraagpatroon presteert als het andere vraagpatroon wordt opgelegd. Dit is bestudeerd in een serie simulaties met het verdunde netwerkmodel (run01, run15, run16, run17). Gebruik van het maxdagpatroon in een wintergeoptimaliseerd sensornetwerk (4 sensoren, run) resulteert in een toename van het aantal getroffen enen

van 2269 naar 2289, hetgeen minimaal genoemd kan worden. Toepassing van een winterdagpatroon in een maxdag-geoptimaliseerd sensor netwerk (opnieuw 4 sensoren) resulteert echter in een wat grotere toename van het aantal getroffen en van 1945 naar 2364. Het is dus beter om een winterdagpatroon te gebruiken voor de optimalisatie dan een maxdagpatroon, omdat de resulterende configuratie beter presteert bij een alternatief verbruikspatroon. Bovendien lijkt het verbruikspatroon van de meeste dagen in een jaar meer op een winterpatroon dan op een maxdagpatroon.

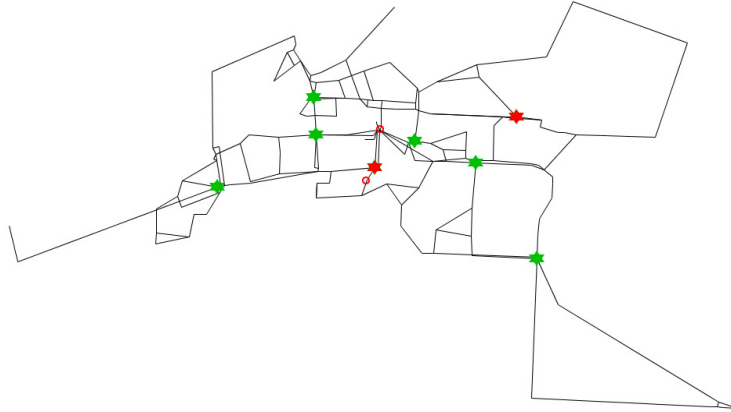
4.8 Effecten van besmettingsduur

Figuur 22 toont het aantal getroffen en voor verschillende toedieningsduren en verschillende aantallen sensoren. Opvallend is dat een langere toedieningsduur tot beduidend meer getroffen en leidt. Voor het grootste deel van de besmettingsscenario's uit de toegepaste collectie geldt dat de eerste detectie van de besmetting meerdere uren na aanvang plaatsvindt. Voor een aanzienlijk deel geldt zelfs dat deze nooit wordt gedetecteerd en dus tot het eind van de simulatie door kan gaan (wanneer een dergelijke lange toedieningsduur wordt voorgeschreven). In al deze scenario's waarin de detectie laat of niet plaatsvindt, betekent een langere toedieningsduur effectief een groter aantal mensen dat wordt blootgesteld.



Figuur 22: Aantal getroffen en als functie van het aantal geplaatste sensoren voor verschillende toedieningsduren (run01, run05 en run06). Het aantal getroffen en als fractie van het totale aantal consumenten in het model is weergegeven op de rechter y-as.

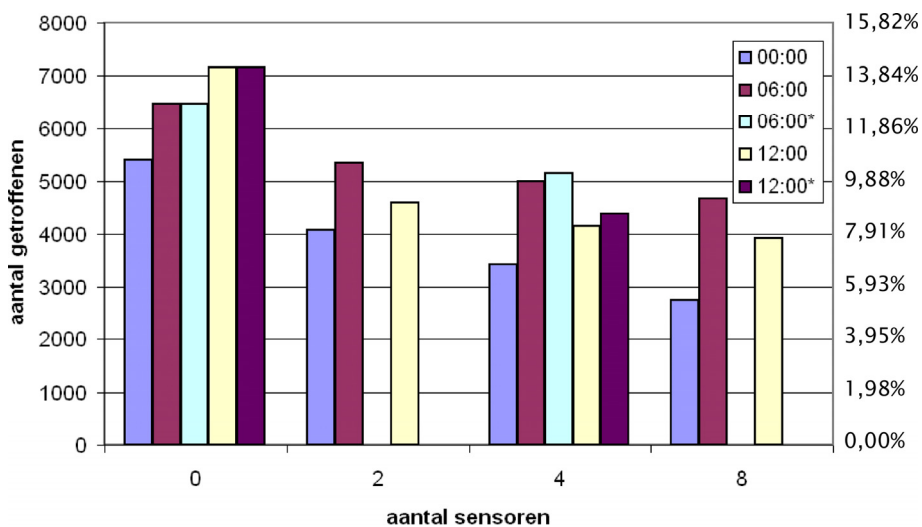
De sensorlocaties voor 8 sensoren zijn identiek voor run01 (toediening gedurende 1 uur) en run05 (toediening gedurende 6 uur). Bij run06 (toediening gedurende volledige simulatie) liggen twee sensoren op een andere plaats (Figuur 23).



Figuur 23: Optimale locaties voor 8 sensoren in run06. Wijzigingen ten opzichte van het optimale ontwerp voor run01 zijn in rood weergegeven (oude locatie met een cirkel, nieuwe locatie met een rode ster).

4.9 Effecten van tijdstip van besmetting

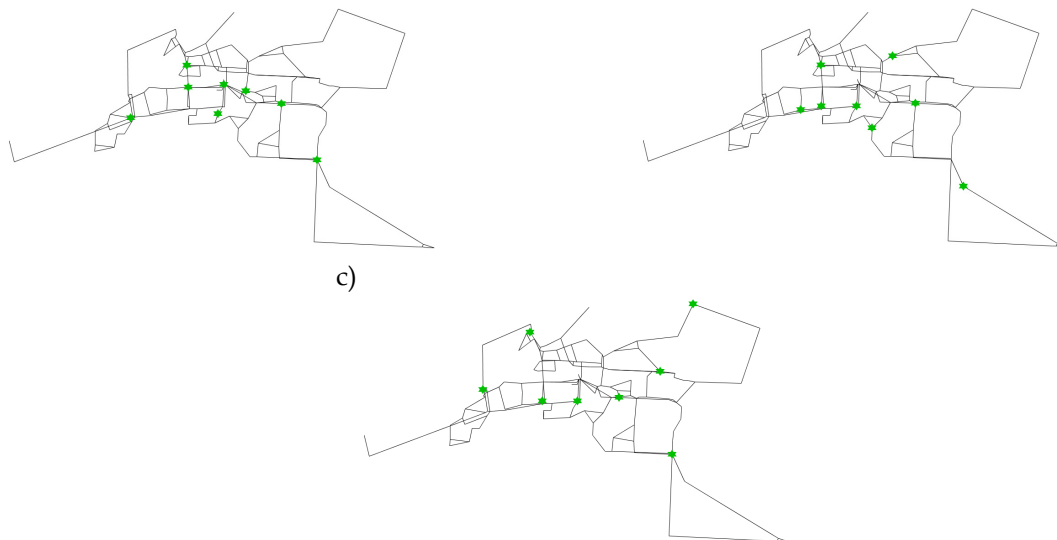
Verschillende aanvangstijdstippen van besmetting (bij gelijke duur) leiden tot verschillende patronen in aantallen getroffen. Dit is weergegeven in Figuur 24. Let op dat in enkele gevallen (*run05*, *run07*, *run08*) een optimale sensorplaatsing is bepaald voor het betreffende aanvangstijdstip. In andere gevallen (*run18*, *run19*) wordt uitgegaan van een enkele sensorplaatsing (geoptimaliseerd voor een aanvangstijdstip van 0:00, *run05*) voor de verschillende aanvangstijdstippen; hierbij is alleen het ontwerp met 4 sensoren doorgerekend. Figuur 24 illustreert dat het aantal getroffen in deze laatste gevallen licht toeneemt ten opzichte van de voor het betreffende aanvangstijdstip zelf geoptimaliseerde sensorconfiguratie, maar dat de verschillen slechts klein zijn.



Figuur 24: Effecten van het aanvangstijdstip van de besmetting (duur 6 uur; *run05*, *run07*, *run08*, *run18* en *run19*) op het aantal getroffen. In de eerste drie gevallen wordt de sensorplaatsing geoptimaliseerd voor het gekozen aanvangstijdstip; in de laatste twee gevallen (* in de legenda) is de sensorconfiguratie bepaald voor een aanvangstijdstip van 00:00 gebruikt. Het aantal getroffen als fractie van het totale aantal consumenten in het model is weergegeven op de rechter y-as.

De bijbehorende optimale sensorlocaties zijn weergegeven in Figuur 25. De drie gevallen hebben voor het grootste deel andere optimale sensorlocaties.

- a) b)

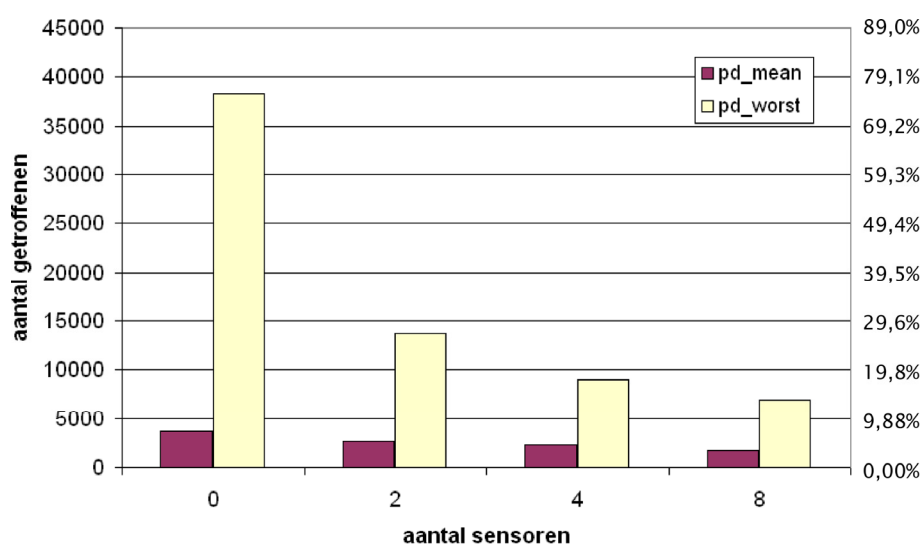


Figuur 25: Optimale locaties voor 8 sensoren in run05 (a), run07 (b) en run08(c) met aanvangstijdstippen van de besmettingen van respectievelijk 0:00, 6:00 en 12:00.

4.10 Effecten van de statistische benadering oftewel de keuze van een representatief besmettingsscenario

Een enkel toedieningsscenario toegepast op honderd potentiële toedieningspunten in een netwerk leidt reeds tot een combinatie van 100 besmettingsscenario's. De vraag hoe hieruit een keuze of een representatief afgeleid scenario geselecteerd kan worden, is reeds behandeld in §4.4. Hier bekijken we in hoeverre deze keuze de resultaten beïnvloedt.

Figuur 26 toont hoe het aantal mensen dat aan een dosis hoger dan de voorgeschreven limietdosis wordt blootgesteld varieert als functie van het aantal geplaatste sensoren voor twee verschillende scenariokeuzes. Het moge duidelijk zijn dat toepassing van een worst case scenario tot hogere aantallen getroffen leidt dan een scenariogemiddelde. Interessanter is dat deze keuze de plaatsing van de sensoren en de gebieden die effectief bewaakt worden door deze sensoren significant beïnvloedt (Figuur 27).

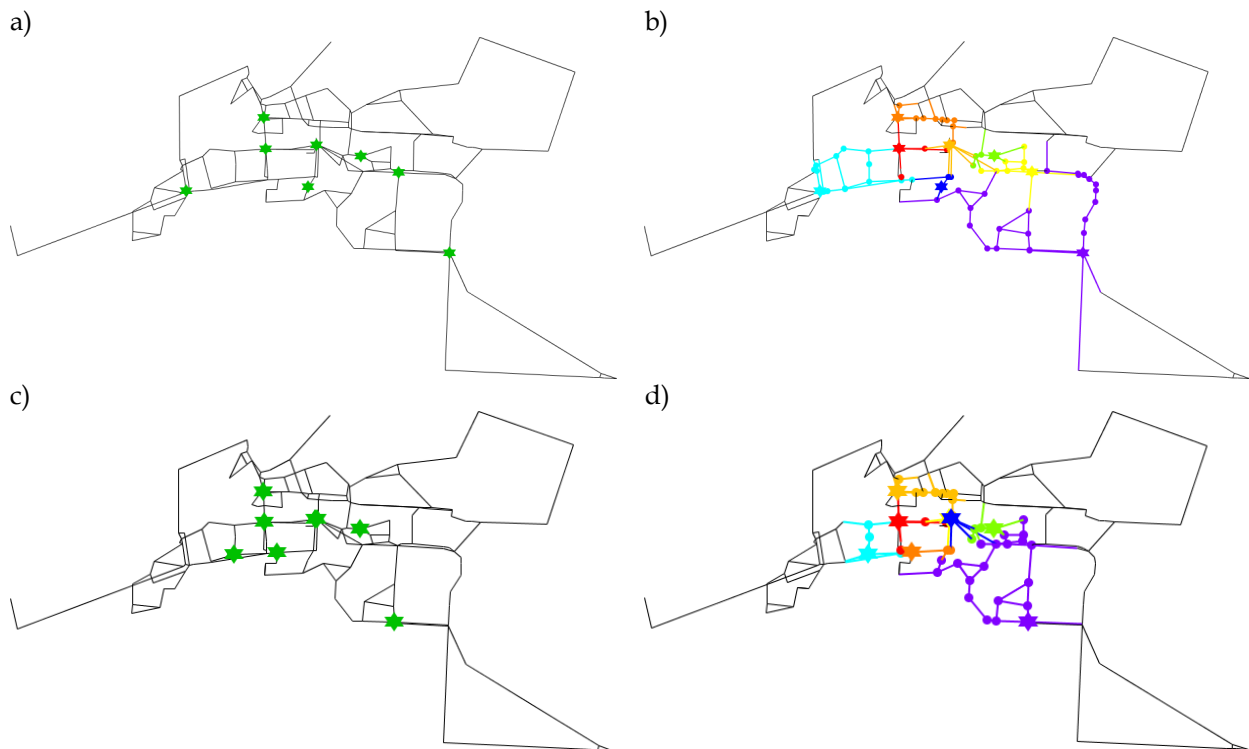


Figuur 26: Variatie van het aantal getroffen voor twee verschillende statistische benaderingen (scenariokeuzes) voor de optimalisatie van sensorlocaties; pd_mean:(run01): gemiddelde impact van alle besmettingsscenario's in de combinatie; pd_worst (run10): worst case scenario uit de combinatie (grootste impact). Het aantal getroffen als fractie van het totale aantal consumenten in het model is weergegeven op de rechter y-as.

4.11 Effecten van reactietijd

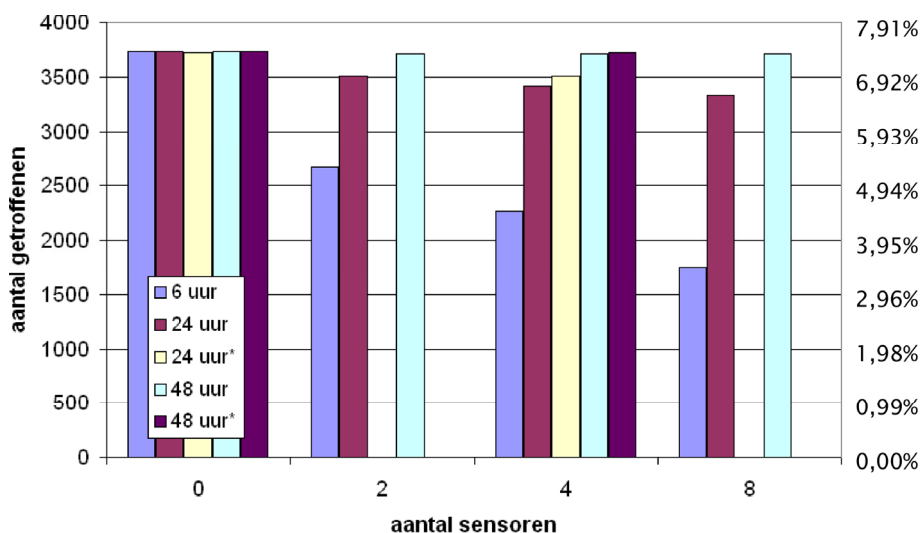
Figuur 28 geeft weer hoe het aantal getroffen personen verandert met toenemend aantal sensoren in het netwerk voor verschillende reactietijden. De bijbehorende sensorconfiguraties zijn weergegeven in Figuur 29. In enkele gevallen is de sensorconfiguratie steeds geoptimaliseerd voor de betreffende reactietijd en het aantal sensoren (*run01*, *run12*, *run13*). In twee andere gevallen met reactietijden van 24 uur (*run20*) en 48 uur (*run21*, beide weergegeven met een * in Figuur 28) is uitgegaan van de sensorconfiguratie berekend voor een reactietijd van 6 uur (*run01*).

Bij een relatief korte reactietijd leidt het plaatsen van extra sensoren tot een significante afname van het aantal getroffen personen. Als de reactietijd te lang wordt, is het effect echter veel geringer. Het gebruik van de voor een reactietijd van 6 uur geoptimaliseerde configuratie blijkt bijna even goed te presteren als de reactietijd veel langer is (24 of 48 uur); het aantal getroffen personen neemt nauwelijks toe, hoewel de sensorconfiguraties behoorlijk verschillen (vergelijk Figuur 29a met b en c).

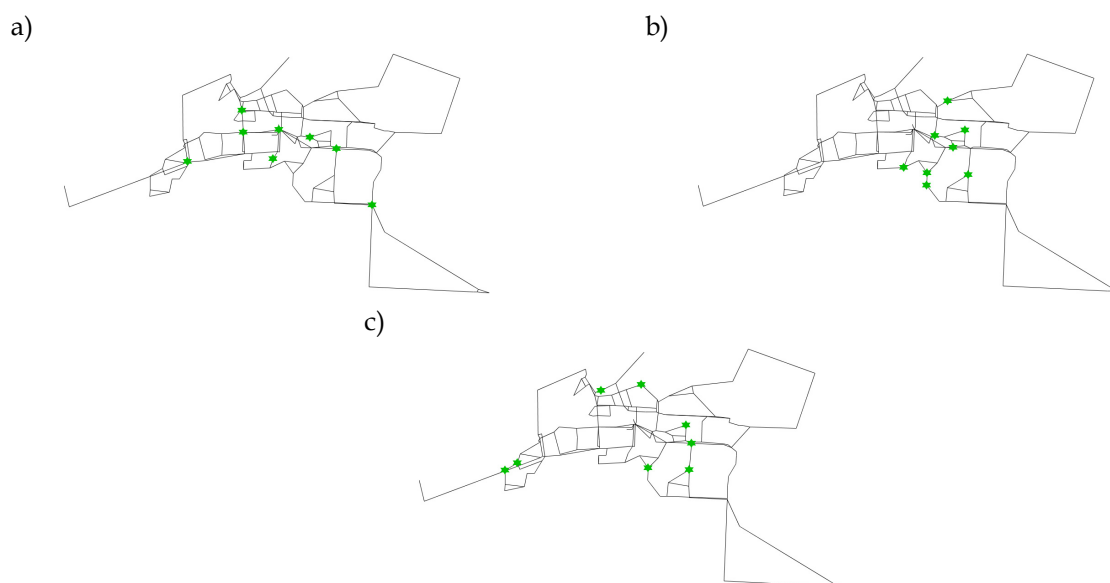


Figuur 27: a,c) Optimale sensorlocaties voor de *pd_mean*- (a, *run01*) en *pd_worstbenadering* (c, *run10*). b,d) Delen van het netwerkmodel waarin door de individuele sensoren verontreinigingen worden vastgesteld.

Vermoedelijk heeft de reactietijd een invloed op de plaatsing van de sensoren, doordat een langere reactietijd resulteert in een groter besmet gebied stroomafwaarts van een sensor. Dit hebben we echter niet kunnen verifiëren.



Figuur 28: Effect van de reactietijd (run01: 6 uur, run12: 24 uur, run13: 48 uur, run20: 24 uur, run21: 48 uur) op het aantal getroffen voor verschillende aantallen sensoren. In de eerste drie gevallen wordt de sensorplaatsing geoptimaliseerd voor het gekozen aanvangstijdstip; in de laatste twee gevallen (gemarkeerd met een * in de legenda) is de sensorconfiguratie bepaald voor een reactietijd van 6 uur gebruikt. Het aantal getroffen als fractie van het totale aantal consumenten in het model is weergegeven op de rechter y-as.

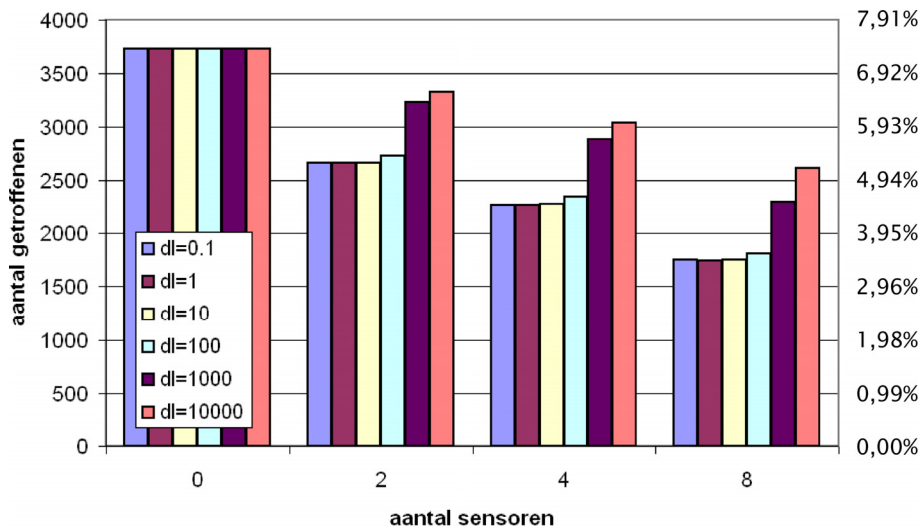


Figuur 29: Optimale locaties voor 8 sensoren in run01 (a), run12 (b) en run13 (c) met reactietijden van respectievelijk 6 uur, 24 uur en 48 uur.

4.12 Effecten van detectiegrenzen

Het effect van de detectielimiet van de sensoren op het aantal getroffen is weergegeven in Figuur 30 voor verschillende aantallen sensoren. Let op dat de kritieke dosis voor individuen steeds gelijk is gehouden (0,1 mg). Hoewel de exacte getallen van toegevoegde hoeveelheden verontreiniging en de detectielimiet enigszins willekeurig gekozen waarden zijn, illustreert de figuur zeer duidelijk dat bij een detectielimiet ergens tussen de 100 mg/l en 1000 mg/l de sensoren niet meer nauwkeurig genoeg zijn om belangrijke concentraties in het water te detecteren. Vermoedelijk bevindt de daadwerkelijke concentratie van de verontreiniging (functie van de toedieningssnelheid in de lokale stroomsnelheid in het hydraulisch model op de plaats en het tijdstip van toediening) zich in hetzelfde bereik. Het ligt voor

de hand te stellen dat toegepaste sensoren een detectielimiet moeten hebben die lager is dan een te verwachten concentratie die schadelijke effecten oplevert. Met TEVA-SPOT blijkt deze detectielimiet goed vast te stellen.



Figuur 30: Aantal getroffen als functie van het aantal geplaatste sensoren bij een variërende detectielimiet (run01, run29, run30, run31, run32, run33). Het aantal getroffen als fractie van het totale aantal consumenten in het model is weergegeven op de rechter y-as.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Algemene conclusies

TEVA-SPOT blijkt een zeer bruikbaar programma te zijn dat een ondersteunende rol kan spelen bij de bepaling van de optimale plaatsing van 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 gegevens en laat bovendien zien dat de berekende optimale sensorplaatsingen 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. Hiernaast levert toepassing van TEVA-SPOT veel inzicht in de gevoeligheden van de prestatie van sensorconfiguraties.

5.2 Conclusies m.b.t. het netwerk van Hoogeveen

Met betrekking tot het distributienetwerk van Hoogeveen concluderen wij het volgende:

- Diverse optimale ontwerpen (met verschillende parameters) plaatsen de bulk van de sensoren in het centrale gedeelte van het distributienet van Hoogeveen. De prestaties van deze verschillende configuraties ontlopen elkaar voor zover beschouwd niet heel veel (<5%).
- Met acht optimaal geplaatste sensoren blijven aan de randen van het netwerk grote gebieden bestaan waarin eventuele besmettingen door sensoren niet worden opgemerkt.

5.3 Detailconclusies m.b.t. de optimalisatie

Uit de verschillende gevoeligheidstests die zijn uitgevoerd trekken wij een aantal conclusies. Hierbij wordt aangetekend dat alle gebaseerd zijn op slechts een proefgebied en dat afwijkende netwerkmodellen (deels) tot andere resultaten kunnen leiden.

5.3.1 Hydraulisch model

- Verdunning van netwerkmodellen leidt tot besmettingsmodellen die uitsluitend op de grotere leidingen werken en zijn daarom niet zondermeer vergelijkbaar met onverdunde modellen. Dit komt doordat besmettingen op grotere leidingen tot hogere aantallen getroffensten leiden. Wanneer naar een gemiddeld besmettingsmodel, bijvoorbeeld met pd_{mean} , wordt gekeken, betekent dit dus dat het gemiddelde besmettingsmodel ook beduidend meer getroffensten 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 de vergelijkbare verzamelingen besmettingsscenario's te kiezen, bijvoorbeeld door in het detailmodel alleen besmettingen op grote leidingen die ook in het verdunde model zitten voor te schrijven. De keuze voor toepassing van een dergelijke meer beperkte set besmettingsmodellen kan worden onderbouwd vanuit de wens om primair naar besmettingen met grote gevolgen te kijken en met de veronderstelling dat de besmettingskans in kleinere leidingen wellicht kleiner is.
- Wanneer een ander verbruikspatroon aan het netwerkmodel wordt opgelegd dan dat waarvoor de sensorconfiguratie is geoptimaliseerd, resulteert dit in slechts een lichte toename van het aantal getroffensten. Hierbij wordt een kleinere toename vastgesteld wanneer een maxdagpatroon wordt opgelegd aan een voor een winterpatroon geoptimaliseerde sensorconfiguratie dan andersom. Oftewel: Het variëren van verbruikspatronen zonder de locatie van de sensoren aan te passen, leidt niet tot significant meer getroffensten in het model.

5.3.2 Besmettingsscenario's

- Een langere toedieningsduur bij gelijkblijvende toedieningsconcentratie en -snelheid leidt tot meer getroffensten. Dit komt doordat bij de gekozen reactietijden zelfs bij een eventuele snelle constatering van de besmetting consumptie van besmet water lang doorgaat.
- Het aantal getroffensten is afhankelijk van het tijdstip van toediening van de besmetting. Een besmetting rond middernacht leidt tot beduidend minder blootgestelde individuen dan een besmetting in de morgen of rond het middaguur. Een sensorconfiguratie die is geoptimaliseerd

voor besmettingen rond middernacht presteert bijna gelijkwaardig wanneer deze wordt toegepast op besmettingen in de morgen of rond het middaguur.

- De keuze van een representatief besmettingsscenario uit de volledige combinatie (bijvoorbeeld het mediaan-scenario wat betreft impact) of een representatieve weergave van de volledige combinatie (bijvoorbeeld gemiddelde impact) heeft sterke invloed op de optimale plaatsing van sensoren en ook op de omvang van het deelnetwerk dat met deze sensoren effectief wordt gemonitord.

5.3.3 Detectie van besmettingen

- De effectiviteit van een sensornetwerk is zeer gevoelig voor de reactietijd (de tijd tussen de eerste constatering van een besmetting en het nemen van correctieve maatregelen). Aan de ene kant is het terugbrengen van de reactietijd een effectieve manier om het aantal getroffen klanten significant terug te brengen. Aan de andere kant kan worden gesteld dat wanneer de reactietijd te lang is, het bijplaatsen van extra sensoren weinig effect heeft.
- De detectielimiet van de gebruikte sensoren moet voldoende laag zijn om verwachte besmettingsconcentraties die tot problemen kunnen leiden te detecteren. Dit is op zichzelf een open deur, maar TEVA-SPOT kan deze verwachte concentratie uitstekend vaststellen – het omslagpunt is erg duidelijk.

5.3.4 Optimale sensorplaatsing

- De optimale sensorplaatsing blijkt slechts in beperkte mate gevoelig voor het voorgeschreven verbruikspatroon.
- Bij de in de meeste modellen toegepaste aantallen sensoren worden besmettingen in een significant deel van het netwerk niet opgemerkt. Het optimalisatie-algoritme werkt zo dat bij toevoeging van een sensor deze zodanig wordt geplaatst dat het zichtveld van de nieuwe sensor deels overlapt met het zichtveld van reeds aanwezige sensoren (duidelijk geïllustreerd door Figuur 10). Hierdoor wordt het totale gebied waarin verontreinigingen worden opgemerkt slechts beperkt uitgebreid. De gemiddelde omvang van het zichtveld van individuele sensoren neemt hiermee sterk af, maar daarmee ook de detectietijd, aangezien de maximale reistijd van een verontreiniging binnen het zichtveld is afgenomen. Let echter op dat het zichtveld van een sensor zich slechts stroomopwaarts van de sensor bevindt, maar dat aansluitingen stroomafwaarts van de sensor ook baat kunnen hebben bij detectie door deze sensor.

5.4 Implementatie: toepassing van TEVA-SPOT bij de bedrijven

Een aantal vereisten en randvoorwaarden voor toepassing van TEVA-SPOT bij de bedrijven kan worden genoemd:

1. Een geschikt netwerkmodel in EPANET-formaat is nodig. Met geschikt wordt hier bedoeld dat het over een voldoende mate van detail beschikt om de verspreiding van een stof door het systeem goed te kunnen modelleren en alle onderdelen die als kritisch worden beschouwd bevat (zie §3.4.1 voor een gedetailleerde lijst van vereisten).
2. Van het sensortype waarvoor een optimalisatie moet worden uitgevoerd moet in ieder geval de detectielimiet bekend zijn. Hiernaast kan optioneel een aantal geschikte locaties voor de plaatsing van sensoren worden opgegeven.
3. Specifieke informatie over het functioneren van het distributiesysteem zoals verbruikspatronen en reactietijd in geval van detectie van een besmetting is vereist.
4. Men moet een duidelijk beeld hebben van het type besmetting waarvoor men een optimale sensorconfiguratie wil bepalen, zodat een geschikte keuze van de verzameling besmettingsscenario's kan worden gemaakt, en het bijbehorende model voor de gezondheidseffecten.
5. Men moet besluiten wat de doelstelling van de optimalisatie wordt (bijvoorbeeld minimalisatie van het aantal getroffen in het gemiddelde van de besmettingsscenario's).

Tabel 7 geeft een rangorde van belang van de verschillende keuzes die moeten worden gemaakt bij het uitvoeren van een optimalisatie van sensorplaatsing met behulp van TEVA-SPOT.

Tabel 7: Overzicht en prioritering van modelparameters bij de toepassing van TEVA-SPOT voor sensorplaatsing.

	belang	parameter	commentaar
model	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; gemiddelde impact (bijvoorbeeld <i>pd_mean</i> , zoals hier toegepast) biedt een bruikbare benadering waarin in ieder geval alle scenario's zijn meegenomen
	2	verdunding van hydraulisch model	heeft groot effect op schatting aantal getroffen, doordat verdunding zorgt voor een focus in de besmettingsscenario's op grotere leidingen
systeem	3	reactietijd	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 duidelijk te zien in de modellen.
model	5	verbruikspatroon	zorgt voor een iets andere sensorconfiguratie; beter om winterdagpatroon te gebruiken voor optimalisatie dan maxdagpatroon - configuratie o.b.v. winterdagpatroon presteert beter op maxdag dan andersom
	6	tijdstip van besmetting	
	7	duur van besmetting	

5.5 Aanbevelingen

- Aanbevolen wordt aan drinkwaterbedrijven om TEVA-SPOT toe te passen wanneer zij groepen waterkwaliteitssensoren in hun netwerken willen plaatsen. Er zal geen unieke optimale plaatsing worden gevonden, maar wel een collectie van configuraties die alle min of meer gelijkwaardig presteren. Belangrijker is echter dat hiermee een beeld van de gevoeligheden van het betreffende netwerk voor de detectie van besmettingen wordt verkregen. Hierbij verdienen de eerste drie punten van Tabel 7 speciale aandacht.
- Verder onderzoek naar gevoeligheden en robuustheid van geoptimaliseerde sensorconfiguraties wordt aanbevolen m.b.t. een aantal punten:
 - effecten van veranderingen in de netconfiguratie (bijvoorbeeld door afsluitermanipulatie) en/of veranderingen in de bedrijfsvoering van meerdere voedingspunten;
 - effecten van een niet-conservatief besmettingsmodel (bijvoorbeeld groeiende of afstervende bacteriën);
 - een gecombineerde analyse van verschillende typen besmettingsscenario's;
 - continu variërende (stochastische) verbruikspatronen m.b.v. SIMDEUM.

6 Literatuur

Al-Zahrani, M. A. en K. Moied (2003), *Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms*. Arabian Journal for Science and Engineering, 28(1B), 57-75.

Berry, J., L. Fleischer, W.E. Hart, C.A. Phillips en J.-P. Watson (2005), *Sensor placement in municipal water networks*. J. Water Resources Planning and Management, 131 (3), 237-243.

Berry, J. W., Hart, W. E., Phillips, C. A., and Watson, J. P. (2006). "A facility location approach to sensor placement optimization." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.*, Cincinnati.

Berry, J., W.E. Hart, C.E. Phillips, J.G. Uber en J.-P. Watson (2006), *Sensor placement in municipal water networks with temporal integer programming models*. J. Water Resour. Plann. Manage., 132_4_, 218-224.

Berry, J., E. Boman, L. A. Riesen, W. E. Hart, C. A. Phillips, J.P. Watson, 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.

Carr, R. D., H.J. Greenberg, W.E. Hart en C.A. Phillips (2004), *Addressing modeling uncertainties in sensor placement for community water systems*. Proc., World Water and Environment Resources Conf., ASCE, Reston, Virginia.

Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., di Pierro, F., Khu, S. T., and Savic, D. (2006). "An efficient algorithm for sensor placement in water distribution systems." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.*, Cincinnati.

Ediriweera, D. D. en I.W. Marshall (2010), *Monitoring water distribution systems: understanding and managing sensor networks*. Drinking Water Engineering and Science, 3, 107-113.

Eliades, D., and Polycarpou, M. (2006). "Iterative deepening of Pareto solutions in water sensor Networks." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.*, Cincinnati.

Ghimire, S. R., and Barkdoll, B. D. (2006a), "Heuristic method for the battle of the water network sensors: Demand-based approach." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.*, Cincinnati.

Ghimire, S. R., and Barkdoll, B. D. (2006b), "A heuristic method for water quality sensor location in a municipal water distribution system: Mass related based approach." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.*, Cincinnati.

Guan, J., Aral, M. M., Maslia, M. L., and Grayman, W. M. (2006). "Optimization model and algorithms for design of water sensor placement in water distribution systems." *Proc. 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.*, Cincinnati.

Gueli, R. (2006). "Predator-prey model for discrete sensor placement." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.*, Cincinnati.

Hart, W. E. 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, 611-619.

Huang, J. J., McBean, E. A., and James, W. (2006). "Multiobjective optimization for monitoring sensor placement in water distribution systems." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.*, Cincinnati.

INFOWater Suite. <http://www.innovyze.com/news/fullarticle.aspx?id=1082>, opgehaald op 27 maart 2012.

Kessler, A., A. Ostfeld en G. Sinai (1998) *Detecting accidental contaminations in municipal water networks*. J. Water Resour. Plann Manage., 124_4_, 192-198.

Krause, A., et al. (2006). "Optimizing sensor placements in water distribution systems using submodular function maximization." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp., Cincinnati*.

Krause, A. en C. Guestrin (2009), *Robust sensor placement for detecting adversarial contaminations in water distribution systems*. *Proc., World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, Reston, Virginia*.

Krause, A., J. Leskovec, C. Guestrin, J. VanBriesen en C. Faloutsos (2008), *Efficient sensor placement optimization for securing large water distribution networks*. J. Water Resour. Plann. Manage., 134 (6), 516-526.

Murray, R., T. Haxton, R. Janke, W. E. 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.

Ostfeld, A. en E. Salomons (2005) *Optimal early warning monitoring system layout for water networks security: Inclusion of sensors sensitivities and response delays*. Civ. Eng. Environ. Syst., 22(3), 151-169.

SAIC (2005), *Pipelinenet User's Guide*, version 1.0, september 2005

Ostfeld, A., and Salomons, E. (2006). "Sensor network design proposal for the battle of the water sensor networks _BWSN_." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp., Cincinnati*.

Ostfeld, A., James G. Uber, Elad Salomons, Jonathan W. Berry, William E. Hart, Cindy A. Phillips, Jean-Paul Watson, Gianluca Dorini, Philip Jonkergouw, Zoran Kapelan, Francesco di Pierro, Soon-Thiam Khu, Dragan Savic, Demetrios Eliades, Marios Polycarpou, Santosh R. Ghimire, Brian D. Barkdoll, Roberto Gueli, Jinhui J. Huang, Edward A. McBean, William James, Andreas Krause, Jure Leskovec, Shannon Isovitsch, Jianhua Xu, Carlos Guestrin, Jeanne VanBriesen, Mitchell Small, Paul Fischbeck, Ami Preis, Marco Propato, Olivier Piller, Gary B. Trachtman, Zheng Yi Wu en Tom Walski (2008) "The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms", J. Water Resour.Plann. Manage., 134(6), 556-568.

Preis, A., and Ostfeld, A. (2006). "Multiobjective sensor design for water distribution systems security." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp., Cincinnati*.

Preis, A., en A. Ostfeld (2008), *Multiobjective contaminant sensor network design for water distribution systems*. J. Water Resour.Plann. Manage., 134(4), 366-377.

Propato, M. (2006), *Contamination warning in water networks: General mixed-integer linear models for sensor location design*. J. Water Resour. Plann. Manage., 132(4), 225-233.

Propato, M., and Piller, O. (2006). "Battle of the water sensor networks." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp., Cincinnati*.

Rico-Ramirez, V., S. Frausto-Hernandez, U. M. Diwekar en S. Hernandez-Castro (2007), *Water networks security: A two-stage mixed-integer stochastic program for sensor placement under uncertainty*. Computers and Chemical Engineering, 31, 565-573.

Shastri, Y. en U. Diwekar (2006), *Sensor placement in water networks: A stochastic programming approach*. J. Water Resour. Plann. Manage., 132(3), 192-203.

Storey, V, B. van der Gaag en B.P. Burns (2011), *Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems*. Water Research 45, 741-747.

TEVA-SPOT. <https://software.sandia.gov/trac/spot>, opgehaald op 27 maart 2012.

Trachtman, G. B. (2006). "A 'strawman' common sense approach for water quality sensor site selection." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp., Cincinnati*.

Watson, J.-P., W.E. Hart en R. Murray (2006), *Formulation and optimization of robust sensor placement problems for contaminant warning systems*. Proc., Water Distribution System Symp., ASCE, Reston, Virginia.

Wu, Z. Y., and Walski, T. (2006). "Multiobjective optimization of sensor placement in water distribution systems." *Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp., Cincinnati*.

I Leidingnetmodellen

Deze appendix beschrijft (de totstandkoming van) de gebruikte netwerkmodellen en de bijbehorende verbruiksgegevens.

Verdund model

Het verdunde netwerkmodel is als volgt tot stand gekomen:

- leidingen overgenomen vanuit Aleid-transportmodel Drenthe 2008;
- verbruikspunten uit Infoworks-model Drenthe 2010; categorie huishoudelijk en commercieel;
- verbruikstoewijzing via dichtstbijzijnde leiding naar knopen. Vanwege het beperkte aantal leidingen en knopen kunnen uiteraard grove afwijkingen ten opzichte van werkelijk verbruik optreden.

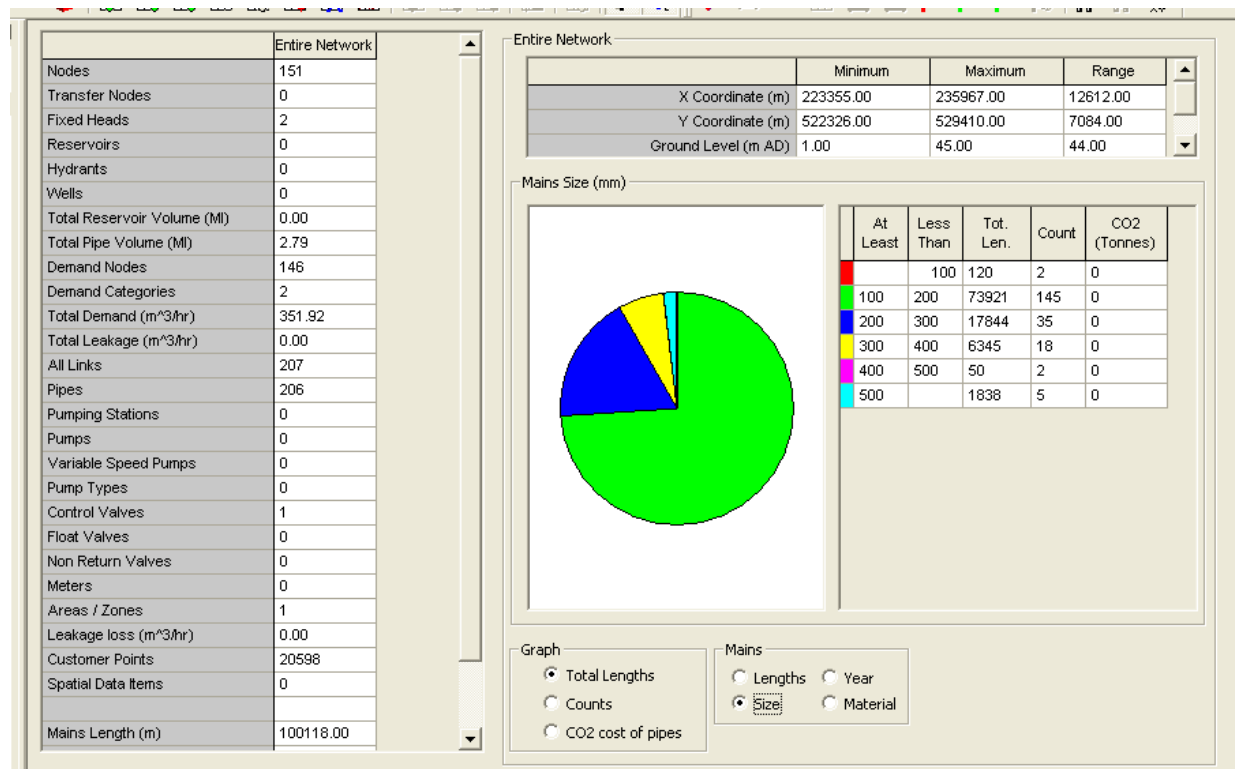
Kenmerken van dit netwerkmodel zijn weergegeven in Figuur 31; Figuur 32 geeft een overzicht van leidingen en verbruikspunten op een kaart.

Detailmodel

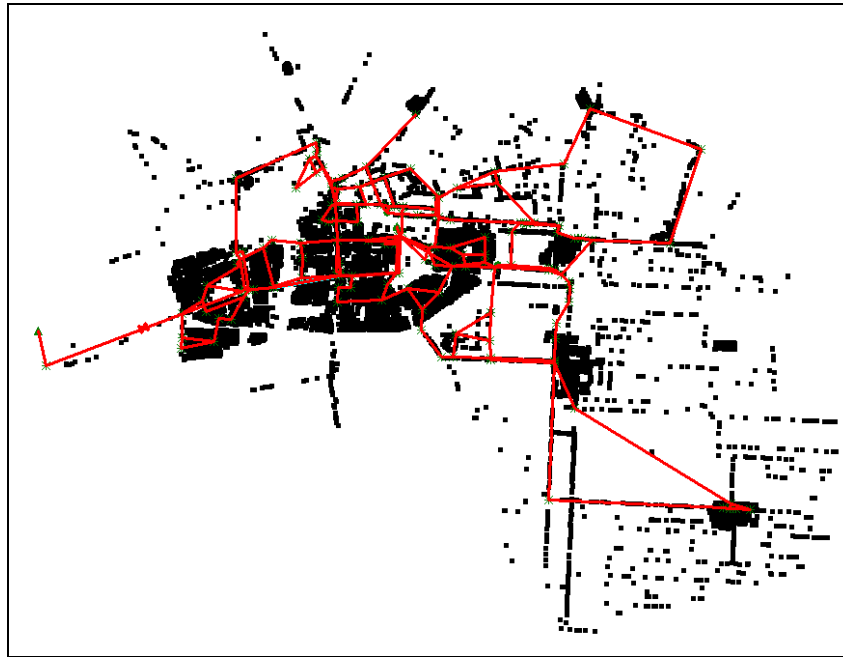
Het detailmodel van het netwerk van Hoogeveen is als volgt tot stand gekomen:

- leidingen, knopen en verbruikspunten overgenomen uit Infoworks-model Drenthe 2010; categorie huishoudelijk en commercieel
- leidingen met diameter < 50 mm verwijderd
- verbruikstoewijzing via dichtstbijzijnde leiding naar knopen
- berekening van reistijd en knopen met reistijd > 72 uur verwijderd; opnieuw verbruik toegewezen;
- customerpoints verwijderd en verbruik op knopen ongewijzigd
- in EPANET aangepast PRV> FCV instelling 100 m³/h

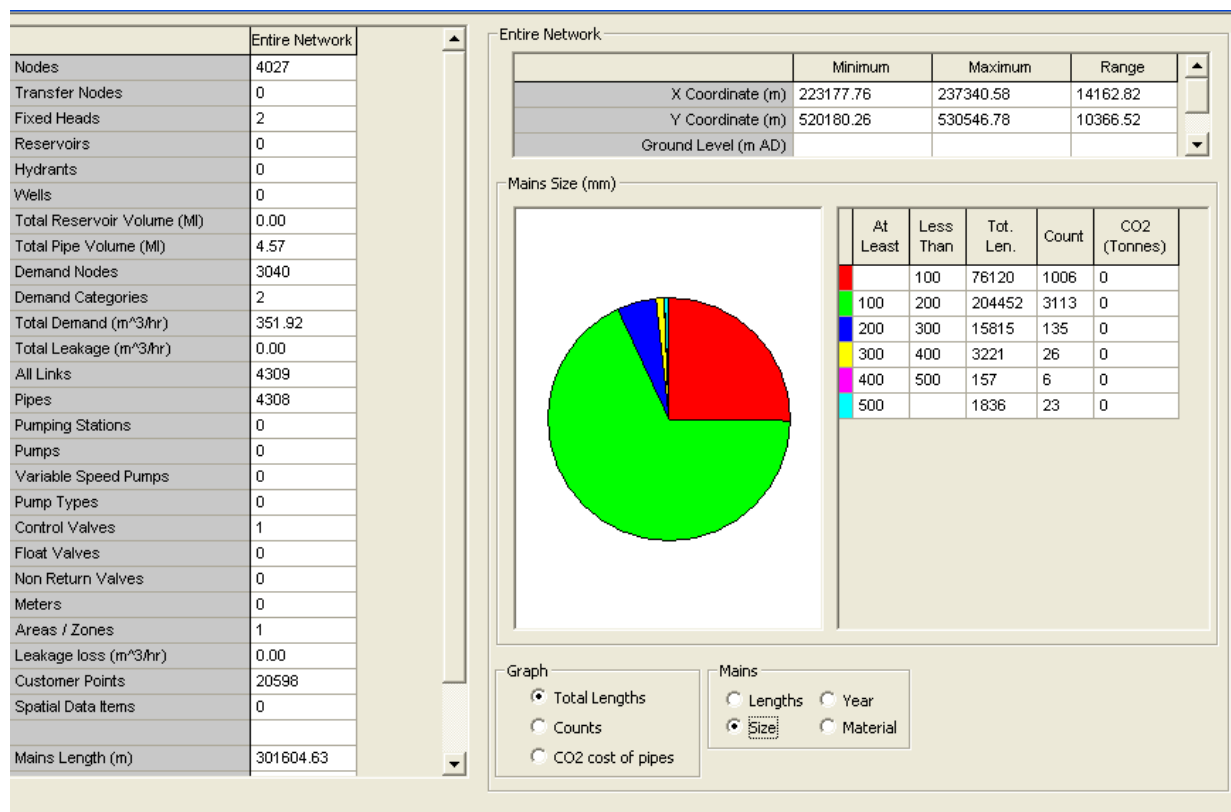
Kenmerken van dit netwerkmodel zijn weergegeven in Figuur 33; Figuur 34 geeft een overzicht van leidingen en verbruikspunten op een kaart.



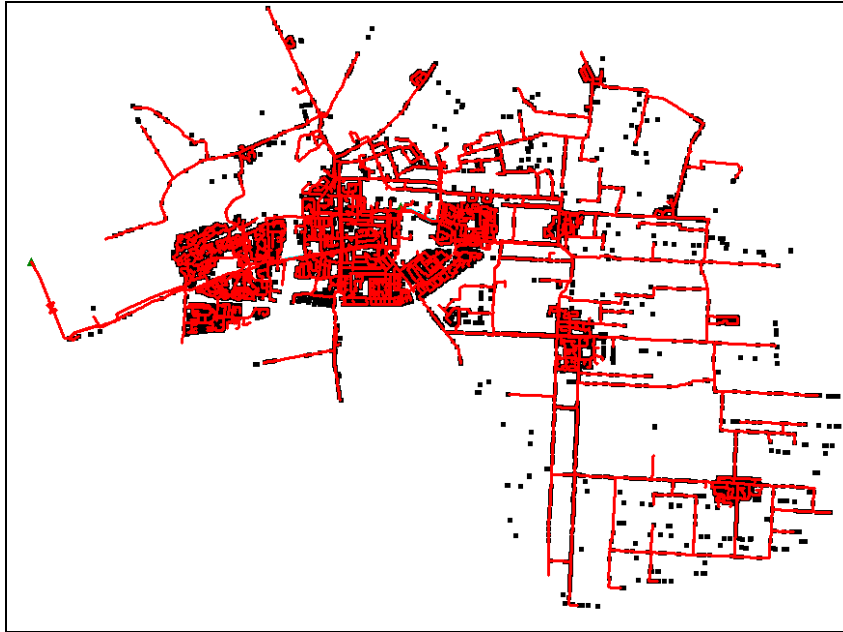
Figuur 31: Overzicht van kenmerken van het verdunde netwerkmodel voor het net van Hoogeveen.



Figuur 32: Leidingen en verbruikspunten van het verdunde model van het distributienetwerk van Hoogeveen.



Figuur 33: Overzicht van kenmerken van het detailmodel voor het net van Hoogeveen.



Figuur 34: Leidingen en verbruikspunten van het detailmodel van het distributienetwerk van Hogeveen.

Verbruikstoekenning

Op basis van verbruiksadministratie op jaarbasis 2009/2010:

Basisverbruik	commercieel	huishoudelijk	totaal
m3/h	98.994	252.926	351.920

Het rekenmodel omvat circa 90% van de gemeente Hogeveen. Bij een gemiddeld verbruik van 120 l pppd bedraagt het geschat aantal inwoners voor het rekenmodel 50.583.

II Detailbeschrijvingen van simulaties

Tabel 8: Overzicht van uitgevoerde simulaties met belangrijkste onderscheidende kenmerken en resultaten voor verschillende aantallen sensoren in termen van het aantal getroffen individuen. NZDJ: Non-zero demand junctions (knooppunten in het netwerkmodel met een wateroraag groter dan 0). Discontinuïteiten in de reeks van modelnummers betreffen bewust weggelaten numerieke experimenten die voor het hier gepresenteerde als niet relevant worden beschouwd.

	<i>simulatie</i>	run01	run02	run03	run05	run06	run07	run08	run10
	<i>netwerk-model</i>	verdund	detail	detail	verdund	verdund	verdund	verdund	verdund
	<i>vraagmodel</i>	winter	winter	max	winter	winter	winter	winter	winter
EPA-net-simulatie	<i>toedienings-snelheid (mg/min)</i>	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06
	<i>starttijd (uur)</i>	0	0	0	0	0	6	12	0
	<i>stoptijd (uur)</i>	1	1	1	6	120	12	18	1
	<i>toedieningspunten</i>	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ
	<i>totaal toe-gediend (kg)</i>	100	100	100	600	12000	600	600	100
	<i># simulaties</i>	146	3034	3034	146	146	146	146	146
sensor-plaatsing	<i>doelstelling</i>	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ worst
	<i>respons-tijd (min)</i>	360	360	360	360	360	360	360	360
	<i>sensorlocaties</i>	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ
	<i>detectielimiet (mg/l)</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	<i># sensoront-werpen</i>	4	4	4	4	4	4	4	4
	<i>simulatietijd (min)</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
resul-taat	<i>0 sensoren</i>	3735	1963	1738	5402	7994	6479	7157	38324
	<i>2 sensoren</i>	2664	1138	1152	4072	5777	5354	4609	13742
	<i>4 sensoren</i>	2269	920	913	3414	4502	5005	4137	8951
	<i>8 sensoren</i>	1751	734	690	2758	3583	4686	3920	6883

	<i>simulatie</i>	run12	run13	run15	run16	run17	run18	run19	run20
	<i>netwerk-model</i>	verdund	verdund	verdund	verdund	verdund	verdund	verdund	verdund
	<i>vraagmodel</i>	winter	winter	max	winter	max	winter	winter	winter
EPA-net-simulatie	<i>toedienings-snelheid (mg/min)</i>	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06
	<i>starttijd (uur)</i>	0	0	0	0	0	6	12	0
	<i>stoptijd (uur)</i>	1	1	1	1	1	12	18	1
	<i>toedieningspunten</i>	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ
	<i>totaal toe-gediend (kg)</i>	100	100	100	100	100	600	600	100
	<i># simulaties</i>	146	146	146	146	146	146	146	146
sensor-plaatsing	<i>doelstelling</i>	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean
	<i>respons-tijd (min)</i>	1440	2880	360	360	360	360	360	1440
	<i>sensorlocaties</i>	NZDJ	NZDJ	NZDJ	run15	run01	run05	run05	run01
	<i>detectielimiet (mg/l)</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	<i># sensoront-werpen</i>	4	4	4	2	2	2	2	2
	<i>simulatietijd (min)</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
resul-taat	<i>0 sensoren</i>	3738	3736	3648	3728	3653	6478	7164	3728
	<i>2 sensoren</i>	3503	3715	2531					
	<i>4 sensoren</i>	3410	3715	1945	2364	2289	5163	4388	3510
	<i>8 sensoren</i>	3338	3715	1504					

Tabel 8 (vervolg):

	<i>simulatie</i>	run21	run24	run26	run29	run30	run31	run32	run33
	<i>netwerk-model</i>	verdund	detail	detail	verdund	verdund	verdund	verdund	verdund
	<i>vraagmodel</i>	winter	winter	winter	winter	winter	winter	winter	winter
EPAnet-simulatie	<i>toedienings-snelheid (mg/min)</i>	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06	1.67 E+06
	<i>starttijd (uur)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>stoptijd (uur)</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
	<i>toedieningspunten</i>	NZDJ	NZDJ	NZDJ op leid. ≥ 150 mm	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ
	<i>totaal toe-gediend (kg)</i>	100	100	100	100	100	100	100	100
	<i># simulaties</i>	146	3034	752	146	146	146	146	146
	<i>doelstelling</i>	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean	pd_ mean
sensor-plaatsing	<i>responstijd (min)</i>	2880	360	360	360	360	360	360	360
	<i>sensorlocaties</i>	run01	run01a	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ	NZDJ
	<i>detectielimiet (mg/l)</i>	0.1	0.1	0.1	1	10	100	1000	10000
	<i># sensoront-werpen</i>	2	2	4	4	4	4	4	4
	<i>simulatietijd (min)</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
	resultaat	<i>0 sensoren</i>	3736	1964	3915	3730	3734	3730	3730
<i>2 sensoren</i>				2279	2662	2665	2725	3234	3326
<i>4 sensoren</i>		3726		1908	2270	2275	2344	2880	3030
<i>8 sensoren</i>			1014	1464	1744	1755	1809	2300	2610

	<i>simulatie</i>	run34
	<i>netwerk-model</i>	detail
	<i>vraagmodel</i>	winter
EPAnet-simulatie	<i>toedienings-snelheid (mg/min)</i>	1.67 E+06
	<i>starttijd (uur)</i>	0
	<i>stoptijd (uur)</i>	1
	<i>toedieningspunten</i>	NZDJ
	<i>totaal toe-gediend (kg)</i>	100
	<i># simulaties</i>	3034
	<i>doelstelling</i>	pd_ mean
sensor-plaatsing	<i>responstijd (min)</i>	360
	<i>sensorlocaties</i>	NZDJ
	<i>detectielimiet (mg/l)</i>	0.1
	<i># sensoront-werpen</i>	6
	<i>simulatietijd (min)</i>	1
	resultaat	<i>0 sensoren</i>
<i>2 sensoren</i>		1138
<i>4 sensoren</i>		920
<i>8 sensoren</i>		734
<i>16 sensoren</i>		572
<i>32 sensoren</i>		424
<i>64 sensoren</i>		293
<i>128 sensoren</i>		183
<i>256 sensoren</i>		109

