BTO 2017.013 | maart 2017

BTO rapport

De reductie van het infectierisico met behulp van online *E.coli* sensoren in het distributienet; op basis van het QMRA-model.

BTO Rapport

De reductie van het infectierisico met behulp van van online *E.coli* sensoren in het distributienet; op basis van het QMRA-model

BTO 2017.013 | Maart 2017

Opdrachtnummer
400554-154

Projectmanager
L. Hornstra

Opdrachtgever
BTO

Kwaliteitsborger(s)
Prof. dr. G.J. (Gertjan) Medema

Auteur(s)
dr.ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker, dr.ir. K. (Karel) van Laarhoven

Verzonden aan
Dit rapport is verspreid onder medewerkers van BTO-participanten en is openbaar.

Jaar van publicatie
2017

Meer informatie
dr. ir. E.J.M. Blokker
T 533
E mirjam.blokker@kwrwater.nl

Keywords
QMRA, distributie

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

Watercycle Research Institute

BTO 2017.014 | Maart 2017 © KWR

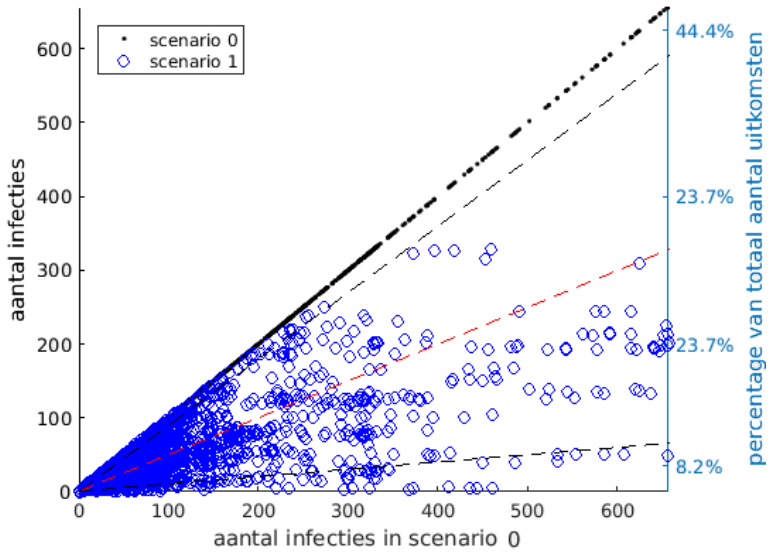
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming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

BTO *Managementsamenvatting*

QMRA-model laat zien dat inzet online E. coli sensoren en snel afgeven van kookadvies infectierisico met 25% kan reduceren

Auteur(s) dr.ir. Mirjam Blokker, dr.ir. Karel van Laarhoven

De kans op detectie van een fecale verontreiniging kan sterk worden verhoogd door strategische plaatsing van online *E. coli* sensoren in het distributienet. Door vervolgens snel een kookadvies te geven, kan het infectierisico met gemiddeld 25% afnemen. Dit blijkt uit een studie waarbij een kwantitatieve risicoanalyse volgens het QMRA-model is gebruikt om de meerwaarde van online sensoren te onderbouwen. Daarvoor zijn de specificaties gebruikt van BACTcontrol sensoren, die zorgen voor automatische monstername en binnen 4 uur een uitslag geven. Er is gerekend aan een model van het distributienet in Zandvoort. Bij detectie van *E. coli* in zowel een eerste als een herhalingsmonster kunnen waterbedrijven de consumenten in het betreffende gebied waarschuwen dat ze hun water voor consumptie moeten koken. De praktische beperkingen van de online sensoren leiden ertoe dat besmettingen niet in alle gevallen zullen worden gedetecteerd en wanneer besmettingen korter duren dan de benodigde responstijd, zullen ze eveneens onopgemerkt voorbijgaan.



Aantal infecties per besmettingsscenario zonder sensoren (scenario 0) op de horizontale as versus die in sensorscenario 0 (geen sensoren) en 1 (sensoren met een meettijd van 4 uur, één bevestiging nodig en 1 uur tijd voor kookadvies) op de verticale as. De zwarte stippellijnen geven de 10% (bovenste) en 90% (onderste) reductie weer, de rode stippellijn de 50% reductie. Op de rechter y-as wordt weergegeven hoeveel van de scenario's in deze reductie vallen, bijvoorbeeld 8.2% van de scenario's heeft 90% reductie of meer.

Belang: afweging mogelijk maken van nut installatie online *E.coli* sensoren dankzij kwantificering

Nieuwe sensoren komen op de markt die automatisch snel en vaak monsters kunnen nemen en deze vervolgens snel analyseren op *E.coli*, zoals BACTcontrol sensoren. Eerder onderzoek toonde aan dat inzet van zulke sensoren de detectiekans van een besmetting sterk verhoogt: van 5 naar 65%. Tot nu toe was onbekend in hoeverre een verhoogde detectiekans ook helpt om de bevolking tegen een infectie te beschermen. Kwantificeren van de bijdragen van sensoren is nodig zodat waterbedrijven kunnen afwegen of zij dergelijke sensoren in het leidingnet willen installeren.

Aanpak: simulatie besmetting en detectie door verbeterd QMRA-model van het distributienet

Met een eerder ontwikkeld QMRA-model is een modelstudie opgezet om de bijdragen van sensoren te kwantificeren. Met dit model van het distributienet is eerder het infectierisico van besmettingen bij werkzaamheden aan het net gekwantificeerd, evenals de invloed van maatregelen zoals kookadvies en sectie-isolatie. In dit onderzoek is het model uitgebreid om ook los van werkzaamheden besmettingen te kunnen doorrekenen, inclusief het effect van detectie door sensoren en het daarop volgend kookadvies. De gesimuleerde besmettingsscenario's variëren wat betreft plaats van de besmetting, duur, tijdstip, concentratie en consumptiegedrag van klanten. Daarbij is uitgegaan van willekeurige besmettingen in het net. Ook zijn verscheidene sensorscenario's doorgerekend met variaties in sensorlocatie, meetduur, aantal benodigde bevestigingen die aan een kookadvies voorafgaan en de tijdsduur voor het afgeven van zo'n advies. Voor een realistisch scenario voor nu en de toekomst is uitgegaan van de karakteristieken van de BACTcontrol, afgegeven door de leverancier. De simulaties resulteren in het aantal geïnfecteerde personen in het modelgebied Zandvoort.

Resultaten: goed geplaatste sensoren vooral voordelig bij besmettingsscenario's met veel infecties

Niet alle besmettingsscenario's leiden tot even grote aantallen infecties. Afhankelijk van de besmettingslocatie zijn er veel of weinig potentiële slachtoffers benedenstrooms. De kans dat mensen op het moment dat de besmetting langs stroomt een glas water tappen, hangt af van het tijdstip en de tijdsduur. Daarnaast bepaalt de concentratie van de besmetting hoe groot de kans is op infectie na consumptie. De sensorscenario's verschillen in de mate waarmee zij het aantal infecties terugdringen. Door een combinatie van locatie en duur wordt niet elke besmetting gedetecteerd. Ook de locatie van de sensor zelf speelt een rol. Daarnaast zorgt een tweede meting niet altijd voor bevestiging van een besmetting die eerder is opgemerkt. En vanwege de tijd die nodig is om een besmetting op te sporen, te bevestigen en een kookadvies uit te geven, worden niet alle potentiële slachtoffers op tijd bereikt. In de praktijk blijkt bovendien slechts 80% van de mensen gehoor te geven aan een kookadvies. Volgens het model hebben vooral besmettingsscenario's die uitmonden in veel infecties baat bij sensoren die zo zijn geplaatst dat zij optimaal kunnen detecteren. In het modelgebied is een gemiddelde meetduur van 4 uur gesimuleerd, gevolgd door een even lange periode voor bevestiging en een uur voor het afgeven van een kookadvies. Uiteindelijk leidt dit tot een reductie van het infectierisico met 25%. In de toekomst zullen er naar verwachting nog snellere systemen komen die leiden tot een nog grotere afname.

Implementatie: grotere bescherming met sensoren dan met maatregelen hygiënecode drinkwater

Inzet van een beperkte set sensoren kan bijdragen aan een grotere bescherming tegen infecties via drinkwater dan alleen het toepassen van maatregelen volgens de Hygiënecode Drinkwater.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *De reductie van het infectierisico met behulp van online E. coli sensoren in het distributienet; op basis van het QMRA-model* (BTO 2017.013).
De kosten en baten van automatische snelle detectie van fecale verontreiniging in het distributienet zijn beschreven in BTO-rapport *Toegevoegde waarde online E. coli sensor in het distributienet* (BTO 2017.014).

Inhoudsopgave

1 Introductie 5

2 QMRA-model – conceptueel model 6

2.1 Inleiding 6

2.2 Stap 1: Pathogeen komt het distributienet in 6

2.3 Stap 2: Pathogeen wordt verspreid in het distributienet 7

2.4 Stap 3: Pathogeen verlaat het distributienet 7

2.5 Stap 4: Pathogeen infecteert iemand 8

2.6 Interventie 1: Een sensor detecteert een besmetting 8

2.7 Interventie 2: Kookadvies beperkt het aantal infecties 8

3 QMRA – numeriek model 10

3.1 Inleiding 10

3.2 Leidingnetmodel 10

3.3 Modelstappen 11

Inleiding 11

Stap 1: locatie van vervuiling 11

Stap 2a: vervuilingslocatie in het leidingnet 11

Stap 2b: concentratie van de besmetting in het leidingnet 11

Stap 2c: begintijd en duur van de besmetting in het leidingnet 12

Stap 3: verspreiding van de vervuiling over het leidingnet 12

Stap 4: sensordetectie 13

Stap 5a: consumptie 13

Stap 5b: dosis-respons-relatie 15

Stap 5c: Infectierisico 15

3.4 Interpretatie van resultaten 15

3.5 Aanpak gevoeligheidsanalyse en doorrekenen effect sensoren + kookadvies 16

4 Optimalisatie van sensorlocaties 19

4.1 Inleiding 19

4.2 Het gebruik van CST 19

4.3 Resultaten 21

5 Resultaten QMRA-model 22

5.1 Aanpak berekening van het infectierisico 22

5.2 Infectieaantallen met en zonder sensoren 22

5.3 Gevoeligheidsanalyse besmettingsscenario 24
Besmettingstijdstip 24
Besmettingsduur 25
Besmettingslocatie 26
Concentratie van de besmetting 27

5.4 Gevoeligheidsanalyse sensorconfiguraties 27
Reactietijd 27
Aantal bevestigingen 28
Aantal sensoren 29
Sensorlocaties 29

6 Samenvatting en discussie 31
7 Conclusies 33
8 Literatuur 34

1 Introductie

In het project “automatische snelle detectie van fecale verontreinigingen in het distributienet” worden de kosten en baten van online *E.coli* sensoren, zoals de BACTcontrol, op een rijtje gezet. In eerder onderzoek is met behulp van een QMRA-model bepaald wat het infectierisico is van besmettingen tijdens werkzaamheden en welke reductie van het infectierisico behaald kan worden met maatregelen als kookadvies, het openen van één afsluiter en de rest van de afsluiters nadat monstername negatief was en de invloed van vertakt ontwerpen (Blokker et al. 2016). Dat QMRA-model is aangepast om ook het infectierisico van willekeurige besmettingen (niet na werkzaamheden, maar onder “operationele omstandigheden”) te modelleren en te bepalen welke reductie van het infectierisico behaald kan worden met detectie door online sensoren en het afgeven van een kookadvies. De resultaten van deze modelstudie zijn beschreven in voorliggend rapport. Het totale overzicht van kosten en baten wordt beschreven in (Blokker en Smeets 2017).

In deze studie hebben we hetzelfde testgebied als vorige keer gebruikt (boulevard van Zandvoort). Het voordeel is dat het een bekend gebied en model is, en het is voldoende klein zodat het mogelijk is om voor iedere locatie veel verschillende tijdstippen en besmettingsduren door te rekenen. Het nadeel is dat het minder representatief is voor een groter gebied. Doordat het gebied klein is, is de dichtheid van sensoren al snel relatief hoog. Ook met dit relatief hoge aantal sensoren, zullen nooit alle mogelijke besmettingsscenario’s worden gedetecteerd. Met een klein gebied is de (relatieve) invloed op het infectierisico van het tijdstip en duur van de besmetting, de besmettingslocatie, de sensorlocatie(s), en de responstijd na detectie goed te bepalen.

2 QMRA-model – conceptueel model

2.1 Inleiding

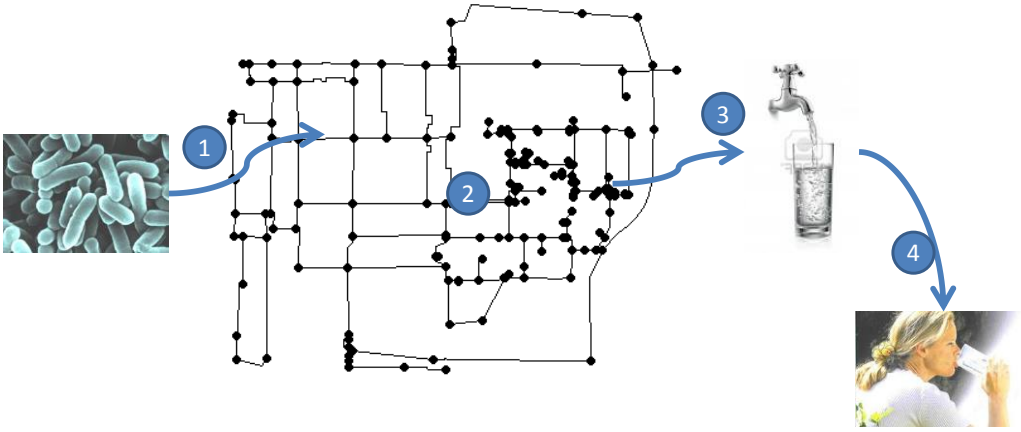
In grote lijnen kan het infectierisico van het distributienet in vier stappen worden opgedeeld (Figuur 2-1):

1. Een pathogeen treedt het distributienet binnen.
2. Het pathogeen wordt door het distributienet getransporteerd.
3. Het pathogeen verlaat het distributienet via een kraan van een klant.
4. Het pathogeen wordt opgedronken en infecteert iemand.

Een tijdige detectie van de besmetting van het leidingwater en een beheersmaatregel zoals een kookadvies na de detectie zal het aantal potentiële infecties doen afnemen.

De stappen worden aan de hand van voorbeelden in meer detail beschreven in de volgende subparagrafen. In de hoofdstukken 3 en 4 wordt het werkelijke model en de resultaten besproken.

N.B. In deze specifieke beschouwing gaat het bij stap 1 om iedere denkbare besmettingsroute, niet noodzakelijkerwijze na werkzaamheden. De detectie vindt plaats door sensoren die op een vast plaats in het distributienet zijn geplaatst, en niet door monstername na werkzaamheden.



Figuur 2-1. Conceptueel model infectierisico distributie.

2.2 Stap 1: Pathogeen komt het distributienet in

Er zijn verschillende scenario's denkbaar waarbij pathogenen het leidingnet kunnen binnentreden. In eerder onderzoek zijn verschillende scenario's geïdentificeerd en is in de uitwerking gefocust op een besmetting bij werkzaamheden (Blokker et al. 2016). In dit onderzoek gaan we uit van een besmetting met onbekende oorzaak op een willekeurige plek in het leidingnet.

Om de besmetting van het leidingnet kwantitatief te kunnen modelleren moeten de volgende zaken worden bepaald:

a) Wat is de kans dat dit optreedt? Hoe vaak treedt het op? Om een jaarrisico te kunnen bepalen is het van belang te weten hoe vaak per jaar het voorkomt.

b) Waar treedt het op? Op sommige locaties in het leidingnet is de kans van optreden mogelijk hoger dan op andere locaties. Bijvoorbeeld door de nabijheid van riolering.
c) Welk materiaal komt er het distributienet binnen? Welke pathogenen komen daar in voor en met welke concentratie?
d) Hoeveel materiaal komt er binnen? Dit hangt vaak samen met de duur van een potentiële besmetting, en met de concentratie pathogenen. Dit hangt samen met de effectiviteit van beheersmaatregelen na werk zoals spuien.
e) Wanneer op de dag gebeurt dit? Dit is ook van belang voor de verdere verspreiding in het distributienet; dit zal anders zijn om 7.00 uur 's morgens dan om 23.00 uur 's avonds.

2.3 Stap 2: Pathogeen wordt verspreid in het distributienet

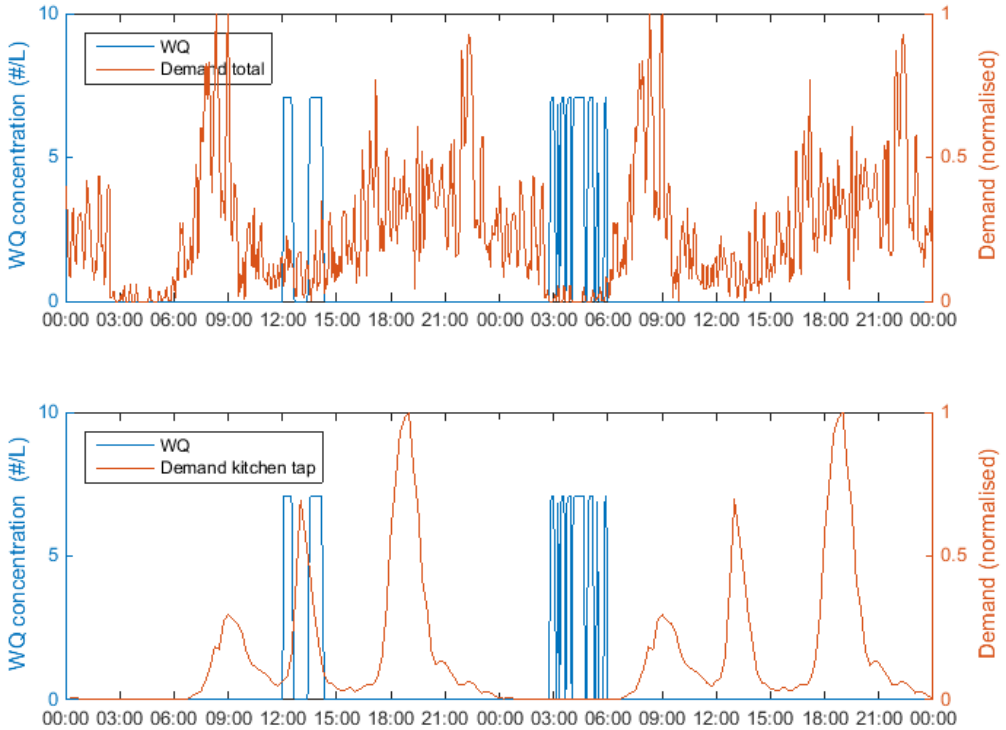
De verspreiding van pathogenen door het distributienet kan worden berekend met een hydraulisch leidingnetmodel. Daarbij kunnen verschillende aannames worden gedaan voor de besmetting, die ook anders kunnen zijn afhankelijk van het gekozen scenario, en voor de hydraulische omstandigheden. Een casestudie op een bestaand leidingnetmodel is daarbij onontbeerlijk. Wederom zal het netwerkmodel van Zandvoort worden gebruikt.

2.4 Stap 3: Pathogeen verlaat het distributienet

Na verspreiding door het distributienet verlaten de pathogenen het distributienet door een tapkraan. Het hydraulisch model heeft als uitkomst een concentratie en een volumestroom op iedere locatie op ieder tijdstip van de simulatie.

Niet iedere druppel water die het distributienet verlaat wordt opgedronken. Een groot deel verlaat het net via toilet, douche of wasmachine. Het deel dat voor consumptie wordt gebruikt, wordt deels eerst gekookt. In Nederland wordt gemiddeld slechts 0,177 liter ongekookt kraanwater per dag gedronken (Mons et al. 2007). Uit het vorige onderzoek (Blokker et al. 2016) bleek dat de exacte consumptie een klein effect had op de uitkomst van het QMRA-model (infectierisico). We gebruiken zo goed mogelijk de info die we hebben over consumptie (Blokker et al. 2016), en doen niet opnieuw een gevoeligheidsanalyse.

Figuur 2-2 laat zien dat op een bepaald punt in het hydraulisch model een bepaalde concentratie langskomt. In de eerste pluim (rond 12.00 u 's middags) vindt beperkt verbruik plaats, maar wel wat op de keukenkraan (waar waarschijnlijk ook water voor consumptie wordt getapt); tijdens de tweede pluim (in de nacht) vindt nauwelijks verbruik plaats, en ook heel weinig aan de keukenkraan. De kans dat deze besmetting geconsumeerd wordt is heel klein.



Figuur 2-2. De concentratie die langskomt op een knoop en het verbruik op die knoop (genormaliseerd op 1). De bovenste figuur geeft het totale verbruik weer (douche, toiletspoeling, etc.); de onderste figuur alleen het verbruik op de keukenkraan.

2.5 Stap 4: Pathogeen infecteert iemand

Wanneer iemand verontreinigd water heeft geconsumeerd, is er nog niet automatisch sprake van infectie. De concentratie pathogenen en het geconsumeerde volume bepalen de dosis pathogenen. Met de dosis-respons-relatie van het betreffende pathogeen kan de kans op infectie worden bepaald Naarmate de dosis toeneemt is het waarschijnlijker dat de persoon geïnfecteerd raakt. Niet iedereen die geïnfecteerd wordt, wordt ook ziek.

2.6 Interventie 1: Een sensor detecteert een besmetting

Wanneer sensoren in het net geplaatst zijn kunnen deze een langskomende besmetting detecteren. Van belang is de locatie van de sensor, de detectielimiet en de tijdsduur van een meting (ten opzichte van de tijdsduur dat de besmetting de sensor passeert). Een respons (in dit geval afgifte van een kookadvies) wordt pas gegeven na bevestiging van de meting. Bij monstername na werkzaamheden wordt direct na een enkele detectie een kookadvies afgegeven, maar onder de reguliere omstandigheden die hier worden beschouwd gebeurt dat pas na bevestiging door een tweede detectie.

De detectiekans is in ander onderzoek bestudeerd (van Vossen-Van Den Berg et al. 2015). Voor het huidige onderzoek willen we weten wat de potentiële bijdrage is van de BACTcontrol.

2.7 Interventie 2: Kookadvies beperkt het aantal infecties

Een respons wordt gegeven na bevestiging van de eerste meting, dus na een positief herhaalmonster. Dat betekent dat er na de eerste detectie nog enkele uren voor de herhaling voor de communicatie nodig zijn, voordat mensen een kookadvies krijgen. Eerder is uitgegaan van 80% opvolging van kookadvies. In een studie naar optimale sensorlocaties (van Thienen en Vogelaar 2012) is de snelheid van respons meegenomen in het bepalen van

de dekkingsgraad. Voor de responsstrategie in relatie tot het verlagen van het infectierisico is nog geen modelstudie gedaan.

Het doel is te bepalen hoeveel minder infecties optreden in het scenario met sensoren (inclusief kookadvies na een bepaalde responstijd) ten opzichte van de situatie zonder sensoren. De reductie wordt beperkt doordat 1) niet alle besmettingen worden gedetecteerd (50-60% volgens (Blokker en Vogelaar 2009; van Vossen-Van Den Berg et al. 2015)) en nog minder zullen ook worden bevestigd; 2) de tijd totdat kookadvies wordt gegeven is zodanig lang (bijvoorbeeld 4 uur voor eerste meting, nog eens 4 uur voor bevestiging, 1 uur voor communicatie) dat al mensen zijn geïnfecteerd; 3) niet iedereen volgt het kookadvies op (80%). De invloed van de 1e reden wordt bepaald door de sensorlocaties en duur van de meting (stap 5) en locatie en duur van de besmetting (stap 1); de invloed van de 2e reden wordt mede bepaald door het tijdstip en de locatie van de besmetting (stap 1). In een gevoeligheidsanalyse is getoetst wat de invloed is van de verschillende aspecten.

Een besmetting kan een groot infectierisico met zich meebrengen doordat de besmetting zich sterk door het DWDS kan verspreiden en/of lang aanhoudt, in dat geval is de kans dat deze besmetting wordt gedetecteerd met een sensor ook groter dan bij een besmetting die achter in het DWDS optreedt of maar kort duurt. Een besmetting kan ook een groot infectierisico met zich meebrengen doordat de besmetting op een ongunstig tijdstip plaatsvindt of een hoge concentratie heeft, in dat geval is de kans dat deze besmetting wordt gedetecteerd met een sensor niet groter dan bij een besmetting met een lager infectierisico. Wanneer een besmetting langs de sensor komt die nog vele uren aanhoudt, kan een langere responstijd voor een kookadvies nog wel effectief zijn, dan kan mogelijk ook de bron worden opgespoord.

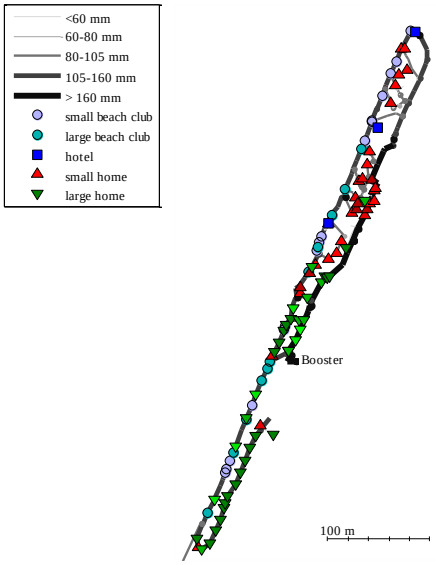
3 QMRA – numeriek model

3.1 Inleiding

Het numerieke model wordt ingevuld aan de hand van een voorbeeldleidingnet van de boulevard van Zandvoort (§3.2). Het numerieke model dat is ontwikkeld gaat specifiek over het scenario waarin vervuiling in het leidingnet intreedt, willekeurig in het net. De modelstappen worden beschreven in §3.3.

3.2 Leidingnetmodel

Als voorbeeld wordt het leidingnetmodel (in EPANET) van de boulevard van Zandvoort gebruikt. Hier bevinden zich ca. 1000 woningen (incl. B&B's), 3 grotere hotels en 30 strandtenten. Voor dit model zijn 10 sets van SIMDEUM-patronen gegenereerd. Het model is gevalideerd met behulp van een tracertest met zoutdosering waar de gemeten en gesimuleerde verblijftijden zijn vergeleken. Het model met SIMDEUM-patronen kwam hier zeer goed uit de bus (Blokker et al. 2010), en is uitgebreid beschreven in eerdere publicaties. Figuur 3-1 geeft een overzicht. In het voorgaande onderzoek (§3.2 in Blokker et al. 2016) is het hydraulisch model verder toegelicht. In deze studie wordt een besmetting gesimuleerd op een knoop. Alle knopen in het net zijn een potentiële bron, maar uitgegaan wordt alleen van de knopen waar verbruik op zit.



Diameter (mm)	Lengte(km)		Volume (m3)
	GGIJ	PVC	
< 100		1.4	7.8
100	1.3	0.6	14.8
150	3.4	1.1	79.1
180		0.4	12.9
225	0.9		35.0
totaal	5.6	3.5	149.7

Figuur 3-1. Leidingnetmodel van de boulevard van Zandvoort. Het net wordt gevoed door een boosterpomp. De dikte van de lijnen geeft de diameter aan, de kleuren en symbolen geven aan welke soort verbruikers op de knopen van het model zitten met in het zuiden de luxere grote woningen, in het noorden flats en aan de kust strandtenten en hotels. Rechts staan materiaal en diameter opgesomd.

Voordeel van het model van Zandvoort: we kennen het model, het is niet te groot zodat het mogelijk is om voor iedere locatie ook veel verschillende tijdstippen en besmettingsduren door te rekenen. Nadeel: nog niet in Gondwana optimale sensorlocaties bepaald (binnen dit project gedaan) en het is mogelijk niet zo representatief als Leeuwarden. Doordat het klein is zouden er misschien maar een of twee sensoren maximaal worden geplaatst.

3.3 Modelstappen

Inleiding
Het conceptuele model is vertaald in een numeriek model. De te onderscheiden stappen voegen zich daardoor iets anders, afhankelijk van in welk model wat wordt bepaald.

1. Locatie van vervuiling. In het hydraulisch model worden alle knopen waarachter zich nog andere knopen bevinden (dus niet de eindknopen) als potentiële bronlocatie aangemerkt.
2. Modelleren van de bron van de vervuiling. In een hydraulisch leidingnetmodel kan een besmettingsbron worden gemodelleerd, waarvoor een aantal parameters moeten worden gedefinieerd:
    a. Locatie: knoopnaam;
    b. Concentratie;
    c. Starttijd en duur van de besmetting.
3. Doorrekenen van verspreiding van de vervuiling. Een waterkwaliteitsberekening in het hydraulische rekenpakket EPANET.
4. Bepalen van detectie met sensor: De uitkomst van de leidingnetberekening is een concentratie op elk moment van de dag op alle locaties in het leidingnet. Op die locaties waar zich een sensor bevindt, leidt dat tot detectie.
5. Risicobepaling. De uitkomst van de leidingnetberekening is een concentratie op elk moment van de dag op alle locaties in het leidingnet. Deze concentraties moeten worden vertaald naar een infectierisico. Dit gebeurt in een rekenprogramma, bijvoorbeeld Matlab®. Hiervoor zijn verschillende stappen nodig:
    a. Vertalen concentratie naar consumptie. Hierbij wordt rekening gehouden met het aantal consumpties, de hoeveelheid drinkwater per consumptie en het tijdstip waarop de consumptie plaatsvindt. Wanneer na aanleiding van een sensordetectie een kookadvies wordt gegeven, verloopt de vertaling van concentratie naar consumptie uiteraard anders.
    b. Vertalen van dosis naar infectie. De dosis-respons-relatie is afhankelijk van het type pathogeen.
    c. Vertalen naar infectierisico door rekening te houden met hoe vaak een dergelijk vervuilingsscenario optreedt in Nederland.

In de subparagrafen worden bovenstaande stappen nader uitgewerkt. De uitwerking vindt plaats aan de hand van een specifieke casestudie, namelijk het leidingnet van de boulevard van Zandvoort.

Stap 1: locatie van vervuiling
Deze hangt één op één samen met de locatie van de knopen in het hydraulisch model, zie stap 2a.

Stap 2a: vervuilingslocatie in het leidingnet
Omdat onbekend is op welke locaties vaker een besmetting optreedt, wordt verondersteld dat de kans van een besmetting overal even groot is. De vervuilingslocaties worden willekeurig gekozen op de knopen waar nog andere knopen achter zitten. Met behulp van Matlab® is bepaald welke knopen aan minstens twee leidingen zijn verbonden, en uit deze knopen wordt vervolgens random een besmettingslocatie geselecteerd.

Stap 2b: concentratie van de besmetting in het leidingnet
Afhankelijk van de bron van de besmetting treedt een bepaalde type en bepaalde hoeveelheid pathogenen in. Voor de willekeurige besmetting die we hier aannemen, is de concentratie onbekend. Er zal daarom met een aantal scenario's worden gewerkt waarin

deze gevarieerd wordt. Uit het vorige onderzoek (Blokker et al. 2016) bleek dat de concentratie een heel groot effect heeft. Dit is ook de grote onbekende. We doen geen gevoeligheidsanalyse, maar laten de range zien en richten ons minder op de absolute aantallen maar meer op de (relatieve) effecten van maatregelen (sensor + respons);

De besmetting wordt in EPANET gemodelleerd als een vaste concentratie, en in het transport als een conservatieve stof. De uitkomsten van het model schalen lineair met de meegegeven concentratie. Voor het numerieke model betekent dit dat een standaardwaarde wordt opgegeven; er wordt niet gewerkt met een probabilistische verdeling van de concentratie in het EPANET model. In stap 4 kan met schaalfactoren worden gewerkt en kan de concentratie eventueel ook probabilistisch worden meegenomen.

Stap 2c: begintijd en duur van de besmetting in het leidingnet
Voor de willekeurige besmetting die we hier aannemen, zijn begintijd en duur van de besmetting onbekend. Er zal daarom met een aantal scenario's worden gewerkt waarin deze zaken gevarieerd worden. In het vorige onderzoek (Blokker et al. 2016) is voor reguliere bemonstering en besmettingen niet ten gevolge van werkzaamheden is nog geen gevoeligheidsanalyse gedaan voor locatie, tijdstip en duur van de besmetting. Naar verwachting zullen de uitkomsten qua locatie en tijdstip vergelijkbaar zijn met de conclusies van de gevoeligheidsanalyse van gemodelleerde besmettingen na werkzaamheden, en de duur van de besmetting zal van grote invloed zijn. E zijn daarom veel meer scenario's nodig dan bij "besmetting na werkzaamheden". De volgende scenario's worden gehanteerd:

- Tijdstip: niet puur willekeurig, maar random verdeeld over 0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00
- Duur: maximaal 24 uur, verder willekeurig verdeeld.

Stap 3: verspreiding van de vervuiling over het leidingnet
De verspreiding door het leidingnet hangt sterk samen met het waterverbruik van klanten. Met behulp van SIMDEUM kan een realistische set met verschillende manifestaties van waterverbruik worden doorgerekend. Uit het vorige onderzoek (Blokker et al. 2016) bleek dat de exacte watervraag een beperkt effect heeft op de uitkomst. We gebruiken zo goed mogelijk de info die we hebben over de watervraag (SIMDEUM), en doen niet opnieuw een gevoeligheidsanalyse; we gaan uit van een bekende topologie van het net (welke afsluiters open en dicht staan) van de boulevard van Zandvoort.

Verondersteld wordt een conservatieve stof. Deze wordt verspreid met een beperkte dispersie, dus als een propstroom. Volledige menging wordt verondersteld op knopen in het leidingnetmodel. Dit is de standaardmethodiek in EPANET. Er wordt dus geen afsterving, of verdwijning naar de biofilm, noch groei meegenomen in het model. In werkelijkheid kan er wel afname (geen groei) plaatshebben in het net, waardoor het model een overschatting geeft. De keuze is gemaakt, omdat niet bekend is hoe snel de afname kan plaatsvinden.

In dit rapport wordt een voorbeeld uitgewerkt voor het leidingnetmodel van Zandvoort. Ieder leidingnetmodel kan andere uitkomsten geven doordat er een andere netstructuur is, en er minder flats en meer grote woningen inzitten. Het is niet direct duidelijk of conclusies in de casestudie van Zandvoort algemeen geldig zijn. Vermoedelijk zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse wel algemeen geldig, maar de absolute waardes van de berekende infectierisico's kunnen verschillen tussen leidingnetten.

Stap 4: sensordetectie
Voor het huidige onderzoek willen we weten wat de potentiële bijdrage is van de BACTcontrol. Van belang zijn de locatie van de sensor, de detectielimiet en de tijdsduur van een meting (ten opzichte van de tijdsduur dat de besmetting de sensor passeert).

- Aantal meetlocaties: hoe meer sensoren geplaatst worden (hoe meer monsters genomen worden), hoe groter het effect (grotere detectiekans, of kortere tijd tot detectie, etc.), maar de meerwaarde per sensor neemt niet lineair toe, maar vlakt af bij een groter aantal sensoren. De kosten nemen wel (bijna) lineair toe. Voor een netwerk als Zandvoort is uitgegaan van maximaal 2 of 3 sensoren.
- Sensorlocaties: gebruik is gemaakt van een algoritme om optimale sensorlocaties te bepalen voor een zo'n groot mogelijke detectiekans. Voor het beperken van het infectierisico is een ander optimalisatiecriterium relevant, namelijk een zo groot mogelijke "dekkingsgraad". We kijken naar de invloed van het optimalisatiedoel op de locaties en de reductie van het infectierisico.
- Meetmoment: de BACTcontrol kan niet continu meten, maar neemt in wezen elke 3 uur een monster, waarvan na 1 uur een uitslag is.
- Aantal metingen op een dag: dit volgt uit de duur van een enkele meting. Voor de BACTcontrol dus 6 op een dag.
- Meetnauwkeurigheid: er wordt een detectielimiet van '0'gehanteerd, d.w.z. alle concentraties > 0 worden gedetecteerd. De reden is dat we niet weten wat de oorspronkelijke concentratie is van de besmetting, en dus het afstemmen van startconcentratie en detectielimiet ook niet zinvol is.

In het QMRA-model is dit als volgt gemodelleerd:
- Er worden 2-3 sensorlocaties opgegeven. Op deze locaties wordt de concentratie op ieder meetmoment (volgend uit stap 3), geaccumuleerd over de meettijd (4 uur).
- Wanneer de totale concentratie in de meetstap groter dan '0' is, is er sprake van een detectie. De sensorlocatie waar de detectie het eerst plaatsvindt, bepaalt de eerste detectie.
- De sensorlocatie waar na de eerste detectie (dus op zijn vroegst in de volgende meetstap) een tweede detectie plaatsvindt, bepaalt de bevestiging van de detectie.
- Er is vervolgens een bepaalde responstijd nodig om een kookadvies af te geven (1 u). In de QMRA-aanpak gaan we niet op zoek naar de bron, nog het verdere verspreidingsgebied van de besmetting. Dat betekent dat niet een specifieke groep, maar alle mensen in het gemodelleerde netwerk van Zandvoort een kookadvies krijgen.
- In het model wordt vervolgens een correctie toegepast op de uitkomst van de vorige stap. De concentratie op alle knopen wordt vanaf tijdstip bevestiging + responstijd op 0 gezet. We veronderstellen dat 100% van de mensen het kookadvies ter harte neemt.

Stap 5a: consumptie
De hoeveelheid geconsumeerde pathogenen hangt samen met:
- Aantal mensen in het gebied;
- Hoeveelheid geconsumeerd ongekookt drinkwater per persoon per dag;
- Samenvallen van moment van drinkwater tappen en het voorbijkomen van besmet drinkwater.

Uit het vorige onderzoek (Blokker et al. 2016) bleek dat de exacte consumptie een klein effect had op de uitkomst van het QMRA-model (infectierisico). We gebruiken zo goed mogelijk de info die we hebben over consumptie (Blokker et al. 2016), en doen niet opnieuw een gevoeligheidsanalyse.

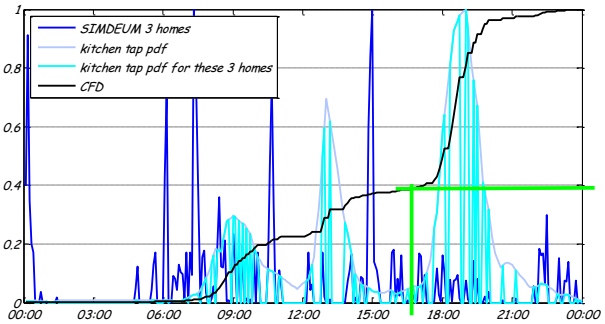
Aantal mensen
Het EPANET-model heeft als uitkomst een concentratie op alle verbruiksknopen. Het aantal personen op een verbruiksknoop wordt bepaald door het totale verbruik per dag op een knoop te delen door het basisverbruik van 120 liter. Voor elke persoon kan vervolgens het aantal consumpties per dag met de hoeveelheid consumptie worden bepaald.

Consumptiehoeveelheid
Niet iedere druppel water die het distributienet verlaat wordt opgedronken. Een groot deel verlaat het net via toilet, douche of wasmachine. Het deel dat voor consumptie wordt gebruikt, wordt deels eerst gekookt. In Nederland wordt gemiddeld slechts 0,1238 liter kraanwater per dag gedronken. Dit wordt (per persoon) gemodelleerd als een combinatie van een Poissonverdeling voor het aantal glazen (of flesjes, karaffen) met een gemiddelde van 2,5 per dag en een lognormale verdeling voor de hoeveelheid per keer met μ = -3.19 en σ = 1,485 (gemiddelde = variantie = 0,1238 liter, volgend uit het consumptie-onderzoek), en een randvoorwaarde van maximaal 4,2 liter per dag (Blokker et al. 2016).

Het kookadvies zal ervoor zorgen dat mensen minder ongekookt drinkwater consumeren. In geval van sensordetectie wordt vanwege de rekentijd en complexiteit van het QMRA-model niet de consumptiehoeveelheid aangepast, maar wordt de concentratie op ‘0’ gezet vanaf het meetmoment van bevestiging plus de tijd die nodig is voor het afgeven / ontvangen van het kookadvies (zie stap 4). Zuiverder is om de concentratie te laten voor wat deze is, en het aantal consumpties met 80% te verminderen, zoals ook in het vorige onderzoek is gedaan (Blokker et al. 2016).

Moment van consumptie
Daarnaast is belangrijk wanneer op dag consumptie plaatsvindt, en of dat gelijktijdig is met een verhoogde concentratie. Het gaat hier in feite om het tijdstip waarop een glas of waterflesje gevuld wordt, de consumptie kan ook op een later tijdstip plaatsvinden. Op ieder moment van de dag kan iemand de kraan opendraaien, dit is een stochastisch proces. Om daarmee rekening te houden in het QMRA-model wordt er uitgegaan van een kansverdeling over de dag. Door deze kansverdeling naar een cumulatieve frequentieverdeling (tussen 0 en 1) te converteren en een random getal tussen 0 en 1 te trekken kan een willekeurig tijdstip op de dag worden bepaald.

De kansverdeling over de dag voor het vullen van een glas ($P_{glas}(t)$) wordt op de volgende manier ingevuld: $P_{glas}(t)$ wordt gelijk gesteld aan de kansverdeling over de dag van het gebruik van de keukenkraan, zoals deze ook in SIMDEUM wordt gehanteerd. Daarbij wordt er wel rekening mee gehouden of op dat moment het verbruik in het hydraulisch model groter dan 0 is, zie Figuur 3-2 (Blokker et al. 2016).



Figuur 3-2. Kansverdeling over de dag van waterverbruik aan de keukenkraan, gecorrigeerd voor totale verbruik voor een voorbeeld van 3 woningen op een verbruiksknoop. De groene lijn illustreert hoe een random getal tussen 0 en 1 (ca. 0.37) wordt omgezet naar een tijd op de dag (ca. 16.30 u).

Stap 5b: dosis-respons-relatie

Bij QMRA wordt in Nederland altijd gesproken over de pathogene micro-organismen *Campylobacter, Cryptosporidium, Giardia, en* (Entero)virussen. Per besmettingsroute zijn specifieke pathogenen in beeld, met een specifieke concentratie (stap 2b) en dosis-respons-relatie.

Uit het vorige onderzoek (Blokker et al. 2016) bleek dat het pathogeen een groot effect en de exacte (gemiddelde of maximale) dosis-respons-relatie (DR) een beperkt effect heeft op de uitkomst. We gebruiken zo goed mogelijk de info die we hebben over DR en gebruiken *Campylobacter* als meest infectieuze pathogeen, en doen niet opnieuw een gevoeligheidsanalyse.

Het RIVM heeft dosis-effectrelaties onderzocht. Wij gebruiken de dosis-respons relatie die ook in QMRA spot wordt toegepast (Schijven et al. 2014). Voor *Campylobacter* zijn statistische (α,β)-paren bepaald (met frequentie van voorkomen) voor het beta-poisson-model. Voor ons QMRA-model zijn voor een hele range aan doses deze paren met hun frequentie van voorkomen toegepast. Vervolgens zijn de maximale en mediane responses uitgerekend en in een opzoektabel opgeslagen. In het QMRA-model wordt gerekend met de opzoektabel, en interpolatie daarin voor doses die niet standaard waren uitgerekend (Blokker et al. 2016).

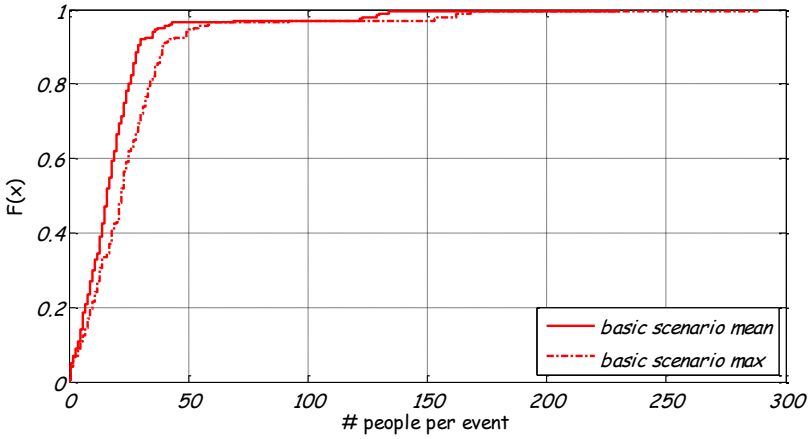
Stap 5c: Infectierisico

We bekijken alleen het infectierisico per event. Dat wil zeggen dat wanneer er een besmetting optreedt, hoe veel mensen raken dan per event geïnfecteerd? Daarbij geldt als uitgangspunt dat voor een individueel event het ongewenst is dat het infectierisico heel hoog is.

Voor het risico per event wordt eerst voor iedere persoon in het gebied bepaald wat het infectierisico is (getal tussen 0 en 1). Daarna wordt voor elk van de 200 events het infectierisico gesommeerd voor alle 4368 personen. Wanneer er bijvoorbeeld 40 personen zijn met een infectierisico van 50%, 20 personen zijn met een infectierisico van 80% en de overige 4287 personen hebben een infectierisico van 0, dan worden er gemiddeld 36 personen geïnfecteerd (40*0.5 + 20 * 0.8).

3.4 Interpretatie van resultaten

Na de berekening zijn de resultaten in grafieken geplot als aantal infecties per event. Dit kan apart voor elk scenario, of als resultaat van alle scenario's samen (Figuur 3-3), zie ook (Blokker et al. 2016).



Figuur 3-3 Aantal geïnfecteerde personen per event, dosis-respons relatie is die van Campylobacter, de mediaan (niet het gemiddelde) en max.

Voor ieder besmettingsscenario (met gegeven concentratie, locatie, starttijd en besmettingsduur) worden 100 consumptiescenario's (met gegeven tijdstippen van consumptie en hoeveelheid) doorgerekend, waaruit dan ook 100 infectierisico's worden berekend. Door vervolgens de mediane waarde hiervan te nemen, krijgt elk besmettingsscenario een kenmerkende waarde voor het aantal infecties. Voor het bepalen van het effect van sensoren wordt voor elk besmettingsscenario een "sensor+kookadvies"-scenario doorgerekend, waarbij één "sensor+kookadvies"-scenario bestaat uit 2-3 sensorlocaties, een sensormeettijd, aantal benodigde bevestigingen en responstijd. Hierna worden dan ook weer voor elk scenario 100 consumptiescenario's doorgerekend. Ook dit leidt dan tot één infectiegetal (mediane waarde van aantal geïnfecteerde personen) per besmettingsscenario. Het infectiegetal zonder en met sensoren kan dan vergeleken worden. Stel dat het infectiegetal zonder sensoren 120 is, en met sensoren 20, en dat in het totale gebied 650 mensen wonen, dan kan de bijdrage van de sensoren plus kookadvies op verschillende manieren worden uitgedrukt:

a) Absolute reductie: sensoren met kookadvies leiden tot een reductie van het infectiegetal met 100 personen (120 - 20);
b) Relatieve reductie: sensoren met kookadvies leiden tot 83% (100/120) reductie van het infectiegetal;
c) Relatieve bescherming: sensoren met kookadvies leiden tot een extra bescherming van 81,5% naar 96,9% van de populatie (650-120/650 naar 650-20/650);

Omdat we alleen naar scenario's in één voorbeeldnetwerk kijken zijn manier a en c gelijkwaardig, en zeggen het meeste over het effect van sensoren voor het gehele gebied. Manier b zegt alleen iets over de lokale bijdrage van een sensor, waarbij de bijdrage relatief heel hoog kan zijn, terwijl er toch maar weinig mensen mee beschermd worden. Daarom zal in dit rapport manier a worden gehanteerd; er wordt dus gekeken naar de absolute reductie. De wijze waarop dat wordt gevisualiseerd is dat voor elk besmettingsscenario een infectierisico wordt berekend, en per besmettingsscenario worden de resultaten voor de verscheidene sensorconfiguraties tegen elkaar uitgezet.

3.5 Aanpak gevoeligheidsanalyse en doorrekenen effect sensoren + kookadvies

Het numerieke model is gevoed met zoveel mogelijk realistische getallen, waarbij waar mogelijk ook rekening wordt gehouden met een variatie in de getallen. Een gevoeligheidsanalyse betekent dat nog extra variatie wordt toegevoegd. Omdat in het voorgaande onderzoek al een uitgebreide gevoeligheidsanalyse is gedaan (Blokker et al. 2016), zijn niet alle variabelen opnieuw in de gevoeligheidsanalyse meegenomen. In de tabellen hieronder staat per modelparameter wat de waarde in het referentiemodel is en hoe

deze gevarieerd wordt, en met welk doel. Alle parameters worden individueel gevarieerd, er is geen analyse van een variatie in meer dan één parameter tegelijk.

Door het reductiepotentieel per besmettingsscenario te analyseren bepaald worden of besmettingen op bepaalde locaties, op een bepaald tijdstip of van een bepaalde minimale duur tot meer of minder effect van sensoren leiden. Naar verwachting zullen de besmettingslocaties die achter de sensoren liggen en besmettingen die korter duren dan de tijd voor detectie en bevestiging geen positief effect van de sensoren ondervinden. Een gevoeligheidsanalyse van het reductiepotentieel onder verschillende sensorscenario's (sensorlocaties, een sensormeettijd, aantal benodigde bevestigingen en responstijd) kan inzicht geven in de invloed van de sensorlocatie, van de duur van een meting, en van de responstijd.

* G: Gevoeligheidsanalyse; O: Onzekerheidsanalyse; x: niet van toepassing.

De besmetting	Modelwaarde	Variatie	Info*
1. **Besmettingslocatie**	Wordt willekeurig verdeeld over bovenstroomse knopen.		O
2. **Starttijd van de besmetting**	Wordt willekeurig verdeeld over 0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00		O
3. **Duur van de besmetting**	Willekeurig aantal kwartieren, met max van 24 uur		O
4. **De concentratie van de besmetting**	Vaste waarde	Concentratie wordt gevarieerd in onderdeel 16.	X
5. **Verspreiding van de besmetting**	Geen gesloten afsluiters, geen actie na sensordetectie, anders dan kookadvies.		X

De sensordetectie	Modelwaarde	Variatie	Info
6. **Aantal locaties**	2-3		G
7. **Locatie sensoren**	Geoptimaliseerd voor detectiekans	Geoptimaliseerd voordekkingsgraad, en voor een combi van detectiekans en dekkingsgraad	G
8. **Meettijd**	4 uur		G
9. **Aantal bevestigingen voor kookadvies**	1 (2 metingen positief – totale meettijd minstens 8 uur)		G
10. **Responstijd tussen bevestiging en kookadvies**	1 uur		G
11. **Effect van kookadvies**	100% opvolging kookadvies na meettijd × (1 + aantal bevestigingen) + responstijd		X

De consumptie	Modelwaarde	Variatie	Info
12. **Aantal consumpties**	Een Poissonverdeling, met gemiddelde 2,5.		X
13. **Volume per consumptie**	Een lognormale verdeling, gemiddeld 124 ml.		x
14. **Moment op de dag van consumptie**	Rekening houdend met de waarschijnlijkheid van tappen aan de keukenkraan		x

Het infectierisico	Modelwaarde	Variatie	Info
15. **Dosis-respons-relatie**	Beta—Poisson model, mediaan en maximum		X
16. **Concentratie**	10^4	Met stappen van een factor 10 variëren	O

Modelparameters	Modelwaarde	Variatie	Info
17. Aantal besmettings-scenario's	5000	Is voldoende om voor dit model alle knopen met een variatie aan besmettingstijd en –duur door te rekenen	X
18. Aantal dagen dat wordt doorgerekend	3	Is voldoende om de verspreiding door het hele net te garanderen. Korter is niet nodig, wordt rekening mee gehouden in het bepalen van de frequente van het optreden van de besmetting.	X
19. Aantal consumptie-scenario's	100	Het infectierisico wordt sterk bepaald door de gelijktijdigheid van passerende concentratie en consumptie. Daarom ook nog een grote hoeveelheid consumptie-scenario's. Dit was in het vorige model niet nodig, omdat daar minder per event en meer naar het gemiddelde van alle events werd gekeken	X

4 Optimalisatie van sensorlocaties

4.1 Inleiding

Wanneer men een beperkt aantal sensoren inzet voor besmettingsdetectie, speelt de keuze van de sensorlocaties een belangrijke rol in het succes van het sensornetwerk. De mate waarin een locatie geschikt is hangt af van veel factoren, zoals bijvoorbeeld de grootte van het bovenstroomse gebied vanuit waar besmettingen langs de sensorlocatie gevoerd worden, of het aantal aansluitingen/bewoners in het benedenstroomse gebied dat door de sensor op die locatie 'beschermd' wordt. Deze twee voorbeelden illustreren ook dat succes criteria tegenstrijdig kunnen zijn: wanneer men een sensor verplaatst om het bovenstroomse gebied te vergroten, verkleint men het benedenstroomse gebied. De vereiste afweging tussen een groot aantal succescriteria plus het grote aantal mogelijke verschillende configuraties in een groot drinkwater distributienetwerk maakt de keuze van optimale sensorlocaties complex.

Numerieke methoden kunnen gebruikt worden om de keuze van optimale sensorlocaties te ondersteunen. In een eerder rapport gaven van Thienen en Vogelaar (2012) een overzicht van de meest recent ontwikkelde benaderingen. In dit onderzoek gebruiken we hiervoor de Contamination Source Toolkit (CST), dat eerder werd ontwikkeld om sensorconfiguraties in drinkwater distributiesystemen te evalueren (van Thienen 2014). Het gebruik van CST en de resulterende sensorconfiguraties die in dit onderzoek zijn gebruikt worden in dit hoofdstuk kort toegelicht.

4.2 Het gebruik van CST

CST optimaliseert de locaties van een gekozen aantal sensoren via een genetisch algoritme, op basis van een ingevoerd hydraulisch EPANET-MSX model en een gekozen optimalisatie criterium. De algemene toepassing van het genetisch algoritme is als volgt:

1. Het algoritme kiest willekeurig een subset van het totaal aantal mogelijke sensorconfiguraties binnen het netwerk.
2. Het algoritme simuleert met het hydraulisch model voor iedere configuratie in de subset de blootstelling van het netwerk aan een bepaald besmettingsscenario. Daarbij noteert het algoritme hoe goed iedere configuratie presteert met het oog op het ingegeven optimalisatiecriterium (bijvoorbeeld: de tijd die verstreek tussen het optreden van de besmetting en het detecteren van de besmetting).
3. Het algoritme kiest een aantal van de best presterende configuraties uit de subset, en genereert een set nieuwe configuraties die op deze meest succesvolle configuraties lijken.
4. Met deze nieuwe set configuraties gaat het algoritme terug naar stap 2. Stappen 2 en 3 worden zo een aantal keer herhaald, met steeds beter presterende configuraties in de subset. Na een gedefinieerd aantal iteraties geeft het algoritme de best presterende configuratie terug aan de gebruiker. Er is geen garantie dat dit het "echte" (globale) optimum is, er kan sprake zijn van convergentie naar een zogenaamd lokaal optimum.

De parameters die aan het genetisch algoritme zijn meegegeven voor dit onderzoek staan in Tabel 4-1. We verwijzen naar (van Thienen, 2014) voor een uitgebreide beschrijving van deze parameters en de werking van CST.

Tabel 4-1. Algemene parameters gebruikt in CST

Parameter	Waarde
Algorythm	Inspyred_GA
Population size	50
Mutator	Network local
Network local mutation rate	50%
Network local mutation range	48
N point crossover rate	50%
Generational elitism rate	20%
Selector	Rank
Terminator	Change
Change terminator tolerance	10^{-5}
Change term consecutive count	8
Acceptable observation window	72 h
Simulation duration (in EPANET file)	72 h
Contamination duration	12 h
Contamination start	0 h

In dit onderzoek is CST gebruikt om een aantal geoptimaliseerde configuraties in het distributienetwerk van Zandvoort te genereren voor een aantal verschillende situaties die steeds gedefinieerd worden door een combinatie van de volgende keuzes:

- De configuratie bestaat uit 2 of 3 sensoren.
- Het optimalisatie criterium is pakkans of detectie tijd.
- (Indien het optimalisatie criterium detectietijd is) er wordt een straftijd van 3 h of 12 h aangehouden.

Bij optimalisatie van de pakkans gaat het algoritme als volgt te werk bij het beoordelen van de verschillende configuraties: voor iedere mogelijke oorsprong van een besmetting in het netwerk wordt berekend of een besmetting beginnend op deze locatie langs een van de sensoren in de configuratie wordt gevoerd en dus kan worden gedetecteerd. De fractie van besmettingsstartlocaties die gedetecteerd kan worden wordt beschouwd als de gemiddelde pakkans van de configuratie. Een hogere pakkans wordt beschouwd als een betere prestatie bij dit criterium.

Bij optimalisatie van de detectietijd wordt eveneens voor iedere mogelijke oorsprong van een besmetting in het netwerk wordt berekend of een besmetting beginnend op deze locatie langs een van de sensoren in de configuratie wordt gevoerd. Het algoritme noteert daarbij per besmettingsstartlocatie hoeveel tijd er verstreek tussen besmettingsstart en detectie door één van de sensoren. Bij een besmettingsstartlocatie vanwaar de besmetting niet wordt gedetecteerd noteert het algoritme een vooraf gekozen straftijd. Het gemiddelde van detectietijden en straftijden over alle besmettingsstartlocaties wordt genoteerd als de gemiddelde detectietijd van de configuratie. Een lagere gemiddelde detectietijd wordt beschouwd als een betere prestatie bij dit criterium.

Het is goed om op te merken dat er bij optimalisatie op het criterium detectietijd altijd sprake is van een afweging tussen pakkans en gemiddelde detectietijd, waarbij het gewicht van de afweging wordt bepaald door de gekozen straftijd. Dit wordt duidelijk wanneer men het extreme geval van een oneindige straftijd beschouwd. In dat geval is de configuratie met het laagste gemiddelde van straftijden en detectietijden die configuratie met de minste straftijden, omdat de detectietijden verwaarloosbaar zijn ten opzichte van oneindig grote straftijden. Met andere woorden: in dat geval is de configuratie met de hoogste pakkans de configuratie met de laagste gemiddelde detectietijd. Initiële testen toonde aan dat resultaten van optimalisatie op detectietijd met een straftijd van 72 h dicht bij resultaten van optimalisatie op pakkans lagen. Daarom is in dit onderzoek gekozen om te werken met

optimalisatie op detectietijd met straftijden van 3 h en 12 h, en met optimalisatie op pakkans.

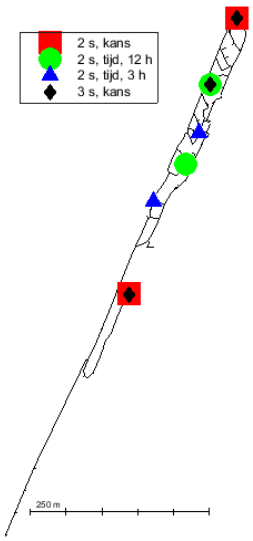
Het moet nogmaals opgemerkt worden dat pakkans en detectietijd slechts enkele van de mogelijke optimalisatiecriteria zijn. Idealiter zou er voor dit project geoptimaliseerd worden op infectieaantallen, waarbij per configuratie wordt geëvalueerd tot hoeveel infecties een bepaald besmettingsscenario leidt, en dit getal vervolgens wordt geminimaliseerd. Het ontwikkelen van dit optimalisatiecriterium voor CST gaat echter voorbij aan het kader van dit project. Bovendien hangt het aantal infecties ten gevolge van een bepaald besmettingsscenario af van meer factoren dan alleen de sensorlocaties en het hydraulische gedrag van het netwerk, zoals de responstijd van noodmaatregelen na detectie, de aard van de sensoren en de aard van de besmettingen. Eerder is laten zien dat aannames rond deze factoren de optimalisatie snel gaan domineren (van Thienen en Vogelaar, 2012; van Thienen, 2014), waardoor het effect van de locaties overstemd wordt. Door ons te beperken tot de gebruikte optimalisatie criteria kunnen we wel bepalen of de keuze voor snelle detectie versus hoge detectiekans de invloed op het infectierisico verhoogt of verlaagt.

4.3 Resultaten

Tabel 4-2 geeft per beschouwde situatie de prestaties van de geoptimaliseerde configuraties weer. Om meer inzicht te geven in de prestatie van de configuratie, gaat het bij de vermelde detectietijden om de gemiddelde detectietijden van daadwerkelijke detecties (dus de straftijden zijn niet in deze gemiddelden meegenomen). De gemiddelde detectietijden bij optimalisatie op pakkans zijn geschat op basis van eerdere testen. In Figuur 4-1 zijn de verschillende configuraties binnen het distributienetwerk van Zandvoort getekend.

Tabel 4-2. Prestaties van verschillend geoptimaliseerde sensorconfiguraties.

Criterium	Pakkans		Detectietijd, straftijd 12 h		Detectietijd, straftijd 3 h	
# sensoren	Pakkans	Tijd	Pakkans	Detectietijd	Pakkans	Detectietijd
2	67%	~31 h	46%	8,3 h	16%	2,6 h
3	69%	~31 h	51%	7,9 h	19%	2,6 h



Figuur 4-1. Optimale sensorlocaties volgens CST, met het aantal sensoren (2 s, 3 s) en optimalisatiedoel (detectiekans of detectietijd).

5 Resultaten QMRA-model

5.1 Aanpak berekening van het infectierisico

De volgende stappen zijn doorlopen om resultaten uit het model te kunnen vergelijken:

- Er zijn eerst 5000 besmettingsscenario's gedefinieerd, waarbij de besmetting steeds wordt beschreven door drie parameters die willekeurig en onafhankelijk van elkaar worden gekozen, te weten: de startlocatie (1 uit 316 mogelijke knopen in het netwerk), de starttijd (op 0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00) en de duur (tussen 0 en 24 uur). Alle besmettingen hadden een concentratie van 1 *Campylobacter* per liter. Voor de gevoeligheidsanalyse is ook een berekening gemaakt met een tienmaal zo lage en tienmaal zo hoge concentratie.
- Vervolgens is voor elk van de 5000 besmettingsscenario's 100 maal een consumptiescenario berekend, waarbij telkens het bijbehorende aantal infecties is bepaald. Uit deze 100 infectiegetallen is de mediaan genomen om aan te houden als het karakteristieke aantal infecties bij dit besmettingsscenario.
- Tenslotte is ieder van de 5000 besmettingsscenario's nogmaals 100 maal op dezelfde wijze doorgerekend, maar nu met een aantal sensoren in het netwerk aanwezig. Infecties die optreden ná het moment van waarschuwen - gebaseerd op het moment van detectie van de besmetting door de sensoren plus de benodigde responstijd - worden nu niet meegenomen in de berekening van het karakteristieke aantal infecties. Verschillende sensorconfiguraties zijn op deze manier geëvalueerd.

Tabel 5-1 toont de verschillende sensorconfiguraties die zijn doorgerekend.

Tabel 5-1. Overzicht van de verschillende sensorconfiguraties.

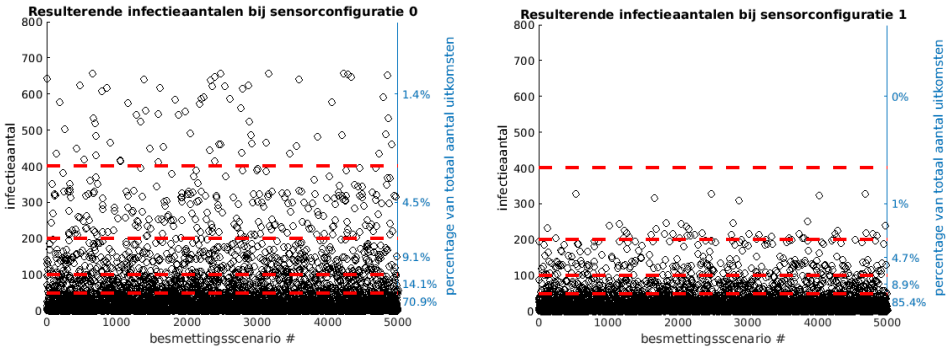
Configuratie	Aantal sensoren	Sensor-locaties	Sensorlocatie geoptimaliseerd op	Meettijd (h)	Aantal bevestigingen	Responstijd (h)
0 (basis)	0	x	x	x	x	x
1	2	264154	Detectiekans	4	1	1
2		207802		4	2	1
3				1	1	0
4	3	264154	Detectiekans	4	1	1
5		263927		4	2	1
6		264147		1	1	0
7	2	264147 252536	Detectietijd, 12 h straftijd	4	1	1
8	2	N0193775 N0193902	Detectietijd, 3 h straftijd	4	1	1

Een vergelijking van de karakteristieke aantallen infecties voor een bepaald besmettingsscenario met en zonder sensoren wordt gezien als indicatie van de reductie van het infectierisico door het gebruik van sensoren in dat scenario (gevoeligheidsanalyse van besmettingsscenario's, §5.3). Een analyse van de reducties in de 5000 verschillende besmettingsscenario's geeft inzicht in het type scenario's waarin het gebruik van sensoren meerwaarde heeft (gevoeligheidsanalyse van sensorconfiguraties, §5.4).

5.2 Infectieaantallen met en zonder sensoren

Om een gevoel te krijgen voor de verdeling in mogelijke uitkomsten van de verschillende besmettingsscenario's, zijn in Figuur 5-1(links) de resulterende infectieaantallen weergegeven voor alle besmettingsscenario's, zonder toepassing van sensoren (configuratie 0), en ook zonder kookadvies. De percentages rechts (in blauw) vertellen welk percentage

van het totaal aantal besmettingsscenario's resulteerde in een infectieaantal binnen het met de rode stippellijnen aangegeven interval. Hieruit blijkt hoe hoger het infectieaantal, hoe zeldzamer die uitkomst is: In 70.9% van de scenario's treden minder dan 50 infecties op terwijl in slechts 1.4% van de scenario's meer dan 400 infecties voorkomen, met een maximum aantal infecties van 657. De hier weergegeven datapunten stammen ieder uit een andere besmettingsscenario, met verschillende besmettingslocaties, begintijden en duren[1].



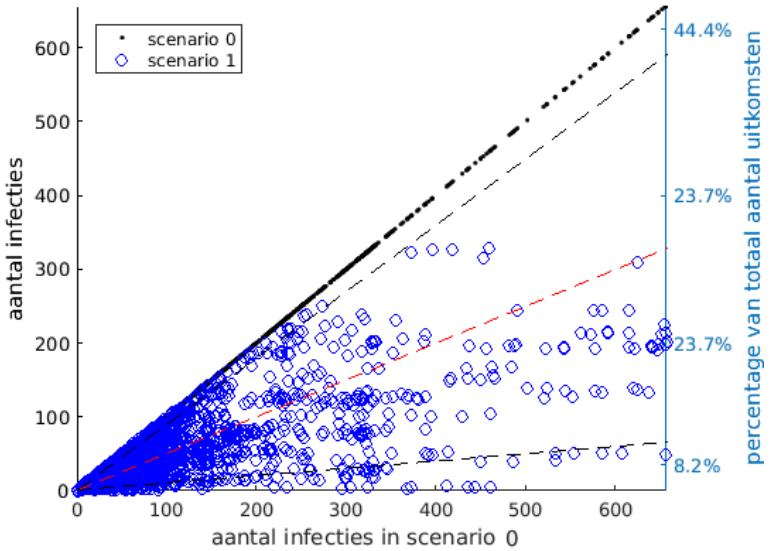
Figuur 5-1. Infectieaantallen bij 5000 besmettingsscenario's bij (links) geen sensoren en (rechts) sensorconfiguratie 1. OP de linker y-as het aantal infecties, op de rechter y-as het percentage dat tussen de stippellijnen valt.

Om een gevoel te krijgen voor de mogelijke impact van het toepassen van sensoren (plus kookadvies) op de resulterende infectieaantallen, zijn de infectieaantallen die resulteren uit de besmettingsscenario's bij sensorconfiguratie 1 weergegeven in Figuur 5-1 (rechts). Te zien is dat het toepassen van de sensoren én kookadvies na aantreffen van positieve monsters met deze configuratie een sterke reductie in het aantal infecties tot gevolg heeft. Hogere infectieaantallen worden nog zeldzamer: infectieaantallen van 400 of meer zijn compleet uitgebannen, en van 280 de scenario's die bij configuratie 0 nog meer dan 100 infecties veroorzaakten (5,6%), zijn er bij configuratie 1 nog maar 50 over (1%).

Om de resultaten van sensorconfiguratie 0 en 1 beter te vergelijken, zijn in Figuur 5-2 per besmettingsscenario de infectieaantallen bij sensorconfiguratie 0 (horizontale as) uitgezet tegen de infectieaantallen bij sensorconfiguratie 0 en 1 (verticale as, respectievelijk de zwarte x en blauwe cirkels), zodat een grafiek ontstaat waarbij op ieder punt op de x-as de infectieaantallen met en zonder sensoren in hetzelfde scenario boven elkaar staan. De stippellijnen geven respectievelijk 10% (bovenste lijn), 50% (middelste lijn) en 90% (onderste lijn) reductie in het infectieaantal aan. De percentages naast de rechter y-as geven aan welk percentage van de scenario's binnen ieder interval ligt. Op deze manier wordt een aantal dingen zichtbaar:

- Bij een klein percentage van de scenario's (8.2%) wordt het aantal infecties met meer dan een factor 10 gereduceerd, terwijl bij een groot percentage van de scenario's (44.4%) de infectieaantallen met slechts een tiende afnemen.
- Bij de ernstigste scenario's (infectieaantal > 500) worden de infectieaantallen vrijwel altijd met minstens 50% verminderd. De scenario's waarin de sensoren minimaal effect hebben (bovengenoemde 44.4%) zijn vrijwel altijd de mildere scenario's waarbij het infectieaantal zonder sensoren al onder de 200 lag.

[1] en met verschillende consumptiescenario's, maar door de mediaan van 100 consumptiescenario's te nemen zou het effect daarvan minimaal moeten zijn.



Figuur 5-2. Aantal infecties per besmettingsscenario in sensorconfiguratie 0 op de horizontale as versus die in sensorconfiguratie 0 (zwarte stippen) en 1 (blauwe cirkels) op de verticale as. De zwarte stippellijnen geven de 10% (bovenste) en 90% (onderste) reductie weer, de rode stippellijn de 50% reductie. Op de rechter y-as wordt weergegeven hoeveel van de scenario's in deze reductie vallen, bijvoorbeeld 8.2% van de scenario's heeft 90% reductie of meer.

5.3 Gevoeligheidsanalyse besmettingsscenario

In deze paragraaf worden de resultaten van configuratie 0 (zonder sensoren) en configuratie 1 (met twee BACTcontrol sensoren) met elkaar vergeleken, en wordt ingezoomd op de eigenschappen van de 5000 verschillende besmettingsscenario's. Dit geeft ten eerste een eerste indicatie van de meerwaarde van het toepassen van sensoren om het infectierisico te verminderen. Ten tweede geeft dit een eerste inzicht onder welke omstandigheden van besmettingsscenario's het gebruik van sensoren meer of juist minder effect heeft op het aantal infecties. Daarmee wordt duidelijk of de toepassing van sensoren vooral zinvol is bij besmettingen op bepaalde locaties, op bepaalde starttijden of van korte of juist lange duur.

Besmettingstijdstip

Voor ieder van de 5000 besmettingsscenario's werd het besmettingstijdstip willekeurig geselecteerd uit 8 mogelijke tijdstippen (tussen 00:00 en 21:00 met intervallen van 3 uur). Tabel 5-2 toont per besmettingstijdstip het percentage van de 5000 besmettingsscenario's dat dit tijdstip gebruikte (kolom A). Hieruit blijkt dat ieder besmettingstijdstip ongeveer even vaak is gebruikt. De tabel toont ook hoe de 50 ernstigste scenario's, d.w.z. de scenario's die tot het hoogste aantal (461 of meer) infecties leidden, over de dag zijn verdeeld (kolom B). Te zien is dat deze ernstige besmettingen relatief vaak om 6:00 u beginnen en zelden om 9:00, 12:00 of 18:00u. Dit schept het beeld dat besmettingen meer infecties zullen veroorzaken wanneer ze dichter voor de ochtendpiek of middag piek beginnen. De 50 scenario's waarin de infectieaantallen in absolute zin het meeste terugvielen (338 of meer voorkomen infecties) door toepassen van sensorconfiguratie 1 (kolom C) volgen de trend in (B). Dit is in lijn met de observatie in de vorige paragraaf dat de ernstigste infectieaantallen over het algemeen het meest gereduceerd worden door het toepassen van sensorconfiguratie 1. De scenario's waarin de infectieaantallen in absolute zin het minst terugvielen (geen reductie) volgen veel meer het beeld van kolom A.

Tabel 5-2. Percentage van de scenario's per tijdstip van de besmetting.

	A: 5000 scenario's	B: 50 ernstigste scenario's zonder sensoren	C: 50 maximale reducties met sensorconfiguratie 1
00:00	12.8%	16.0%	14.0%
03:00	13.2%	18.0%	14.0%
06:00	12.8%	32.0%	22.0%
09:00	12.3%	2.0%	2.0%
12:00	12.2%	6.0%	4.0%
15:00	12.4%	12.0%	12.0%
18:00	12.1%	4.0%	6.0%
21:00	12.1%	10.0%	26.0%

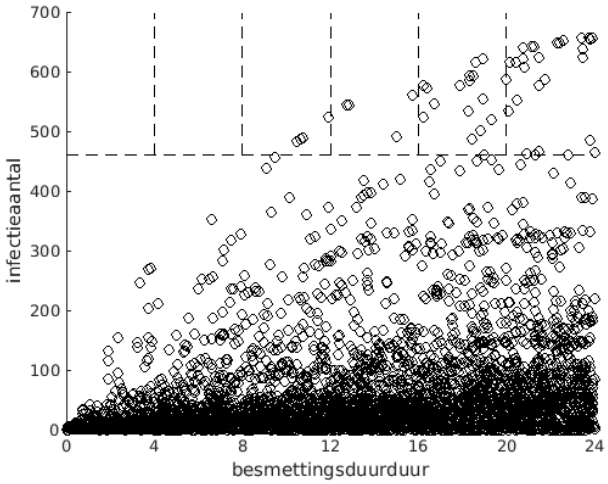
Besmettingsduur

Voor ieder van de 5000 besmettingsscenario's is een willekeurige besmettingsduur tussen de 5 minuten en 24 uur gekozen. De besmettingsduur werd op de 5 minuten nauwkeurig gekozen, zodat er 288 besmettingsduren mogelijk waren. Tabel 5-3 toont per besmettingsduur, verdeeld in groepen met intervallen van 4 uur, het percentage van de 5000 besmettingsscenario's dat die besmettingsduur gebruikte (kolom A). Hieruit blijkt dat ieder besmettingstijdstip ongeveer even vaak is gebruikt. De 50 ernstigste scenario's (kolom B) komen duidelijk voort uit de langer durende besmettingen. Hetzelfde geldt voor de besmettingsscenario's die in absolute infectieaantallen het meest gereduceerd worden (kolom C).

Om meer inzicht te krijgen in de invloed van de besmettingsduur op het infectieaantal, is in Figuur 5-3 per besmettingsscenario het infectieaantal als functie van de besmettingsduur weergegeven. De stippellijn komen hierin overeen met de selectie die is opgenomen in kolom (B) in Tabel 5-3. Te zien is dat het maximaal haalbare infectieaantal inderdaad toeneemt met de besmettingsduur. Wel moet ook benadrukt worden dat veel van de langdurende besmettingen toch slechts een klein infectieaantal teweeg brengen. Hierbij gaat het waarschijnlijk om langdurige besmettingen die vroeg gedetecteerd worden of die optreden in een klein, geïsoleerd gebiedje stroomafwaarts in het netwerk.

Tabel 5-3. Percentage van de scenario's per duur van de besmetting,

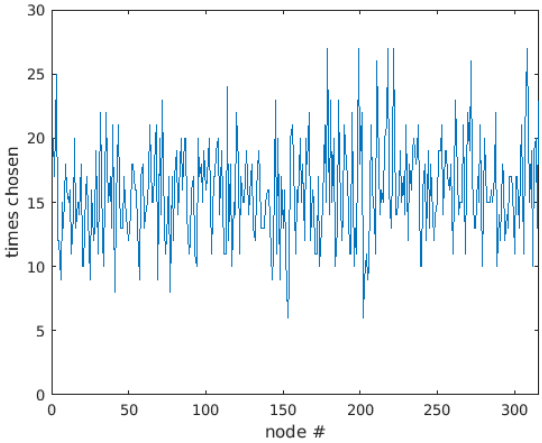
	A: 5000 scenario's	B: 50 ernstigste scenario's zonder sensoren	C: 50 maximale reducties met sensorconfiguratie 1
0 – 4 uur	16.9%	0.0%	0.0%
4 – 8 uur	16.1%	0.0%	0.0%
8 – 12 uur	16.0%	8.0%	0.0%
12 – 16 uur	17.6%	8.0%	14.0%
16 – 20 uur	16.5%	30.0%	32.0%
20 – 24 uur	16.9%	54.0%	54.0%



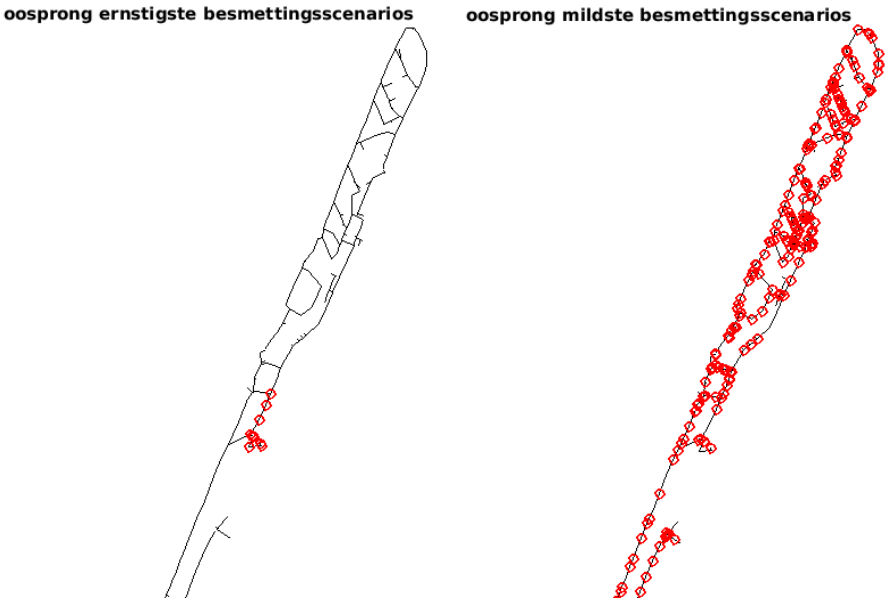
Figuur 5-3. Infectieaantallen zonder sensoren (configuratie 0) versus de duur van de besmetting.

Besmettingslocatie

Voor ieder van de 5000 besmettingsscenario's werd de besmettingslocatie willekeurig geselecteerd uit 316 mogelijke knopen in het netwerk. Figuur 5-4 toont hoe vaak ieder van de knopen is geselecteerd. In verband met de willekeurige selectie per besmettingsscenario is niet iedere knoop even vaak gekozen. Knopen zijn tussen de 6 en de 27 keer gebruikt in een besmettingsscenario. Er zijn dus besmettingen vanuit iedere mogelijke locatie doorgerekend, maar per knoop is slechts een deel van de mogelijke combinaties van besmettingsduren (289 mogelijkheden) en besmettingstijdstippen (8 mogelijkheden) berekend. Deze limitatie is noodzakelijk om het aantal berekeningen binnen afzienbare tijd uitvoerbaar te houden, maar moet in het achterhoofd gehouden worden wanneer wordt gekeken naar de invloed van de besmettingslocatie op het aantal infecties. Desalniettemin blijkt uit een analyse van de oorsprong van de 50 besmettingen met de hoogste infectieaantallen (weergegeven in Figuur 5-5 (links)) dat deze allen op een beperkt aantal locaties dicht bij de opjager ("begin van het netwerk") liggen. Dit valt in de lijn der verwachting, aangezien besmettingen dichter bij de bron over een groter gebied verspreid worden, waardoor meer mensen er aan blootgesteld worden. De mildste besmettingen (uit scenario's met minder dan 10 infecties) beginnen daarentegen vaker aan de rand van het netwerk, dicht bij enkele verbruikspunten, in de rest van het netwerk, zoals te zien is in Figuur 5-5 (rechts).



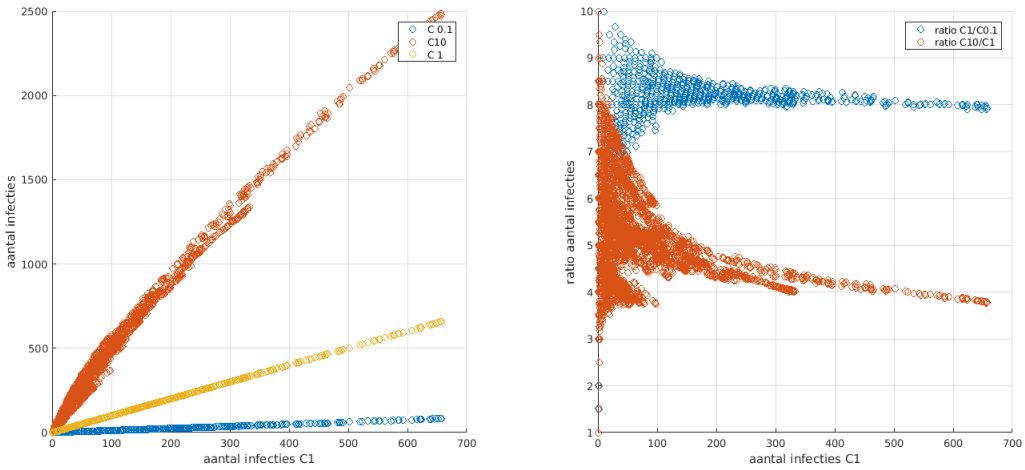
Figuur 5-4. Het aantal maal dat een leidingknoop is geselecteerd als besmettingslocatie.



Figuur 5-5. De besmettingslocaties die leiden tot de (links) hoogste en (rechts) laagste aantallen infecties.

Concentratie van de besmetting

Er is een grote onzekerheid over de exacte concentratie van een besmetting. In bovenstaande is uitgegaan van 1 *Campylobacter* per liter. Om te zien wat de invloed is van de concentratie op het aantal infecties, is het scenario zonder sensoren ook doorgerekend met een 10 maal zo lage en 10 maal zo hoge concentratie, respectievelijk 0,1 en 10 *Campylobacter* per liter. Figuur 5-6 laat zien dat een 10 maal zo lage concentratie tot een ca. 8 maal lager aantal infecties leidt, en een 10 maal hogere concentratie tot een ca. 4,5 maal hoger aantal infecties leidt. Wanneer de concentratie nog hoger wordt, wordt de invloed op het aantal infecties steeds minder, omdat er per persoon maximaal 1 infectie kan optreden. In die besmettingsscenario's die in het basisscenario tot minder dan 100 infecties leiden is de invloed van de concentratie minder voorspelbaar dan bij de besmettingsscenario's die tot een hoger aantal infecties leiden. Voor de ergste besmettingsscenario's, waartegen sensorconfiguratie 1 helpt in de beperking van het aantal infecties, is de invloed van de concentratie een (vaste) factor. De invloed van de sensoren zal relatief nog steeds evenveel bijdragen aan de afname van het aantal infecties, maar in absolute zin (het absolute aantal infecties) wordt de bijdrage voor een belangrijk deel bepaald door de te verwachten concentratie.



Figuur 5-6. Aantal infecties in het scenario zonder sensoren met een concentratie van 1/liter versus een 10 maal zo hoge (rood) en 10 maal zo lage (blauw) concentratie. In de rechter figuur is de ratio tussen het aantal infecties met 10 maal zo hoge concentratie en basisconcentratie van 1 uitgezet (rood), respectievelijk de ratio tussen het aantal infecties in de basisconcentratie en met 10 maal zo lage concentratie uitgezet (blauw).

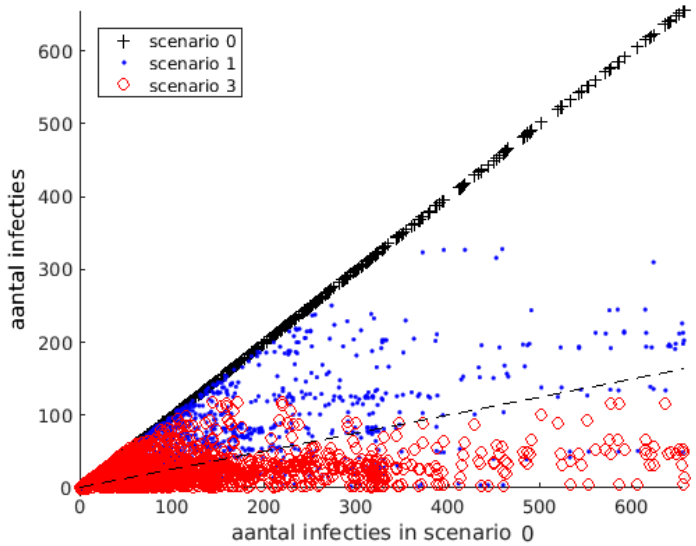
5.4 Gevoeligheidsanalyse sensorconfiguraties

In deze paragraaf wordt de impact van de verschillende sensorconfiguraties op de mogelijke reductie van infectieaantallen nader onderzocht door de hierboven besproken resultaten van basisconfiguratie 0 en sensorconfiguratie 1 te vergelijken met de resultaten van sensorconfiguraties 3 tot en met 6.

Reactietijd

De sensoren hebben een zekere meettijd nodig voor monstername, om daarna tot een meetresultaat te komen. Als een besmetting de sensor aan het begin van monstername (die 4 uur duurt) passeert, wordt dit dus pas na het verstrijken van de meettijd gesignaleerd. Als een besmetting de sensor aan het eind van de monstername passeert, wordt dit wel relatief snel gesignaleerd. In scenario 1 wordt een bevestiging afgewacht voordat een kookadvies wordt afgegeven. Er kan een bepaalde responstijd nodig zijn tussen signalering van de besmetting en het daadwerkelijke verstrekken van een waarschuwing naar de bevolking. De

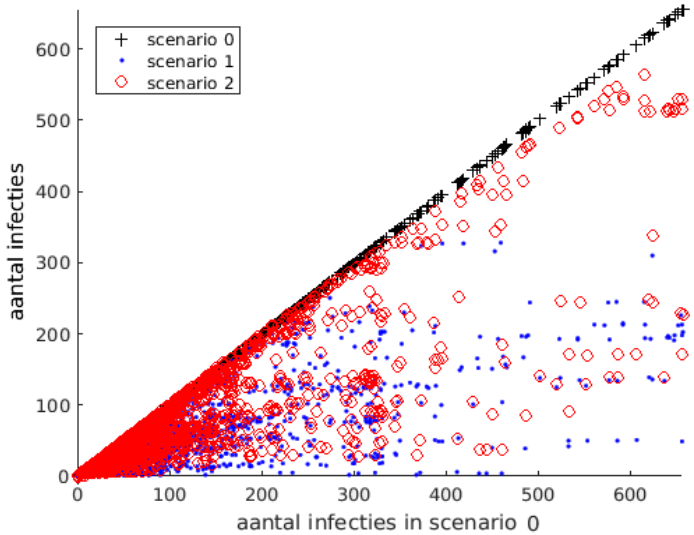
som van meettijd (voor eerste detectie en bevestiging) en responstijd is dus de maximale tijd die kan verstrijken tussen het passeren van een besmetting langs een sensor – dit noemen we de reactietijd. Om het belang van de reactietijd te demonstreren, vergelijken we in Figuur 5-7 de resultaten van sensorconfiguratie 0 (basis), sensorconfiguratie 1 (reactietijd is minimaal 5-9 uur), en sensorconfiguratie 3 (reactietijd is minimaal 1-2 uur) op dezelfde wijze als in Figuur 5-2. Het is duidelijk dat de afname van de reactietijd in configuratie 3 leidt tot een sterk verhoogde reductie van de infectieaantallen per scenario (de zwarte stippellijn geeft een reductie van 75% aan). Dit is in lijn met eerdere bevindingen van van Thienen en Vogelaar (2012), die in een vergelijkbaar model zagen dat reactietijd zeer dominant is in het bepalen van het aantal infecties tijdens een scenario.



Figuur 5-7. Aantal infecties per besmettingsscenario in sensorconfiguratie 0 op de horizontale as versus die in sensorconfiguratie 0 (zwarte kruisjes), 1 (blauwe stippen) en 3 (rode cirkels) op de verticale as.

Aantal bevestigingen

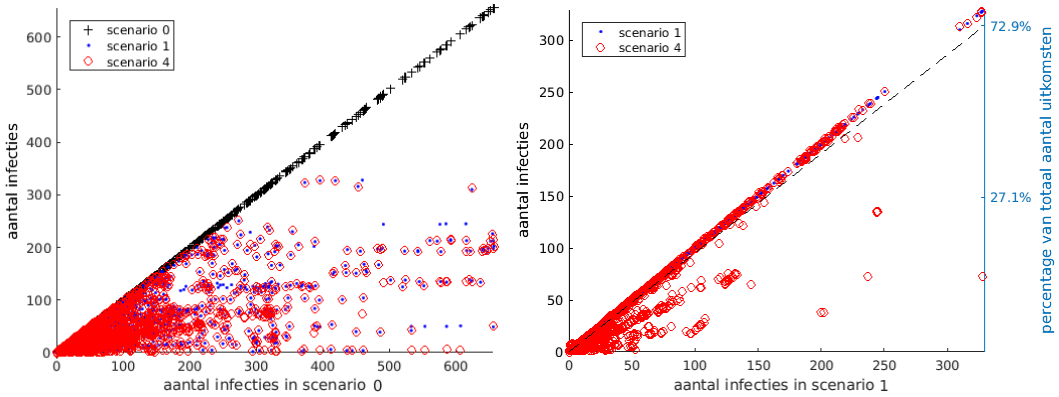
In scenario 1 wordt uitgegaan van minimaal een bevestiging door een tweede meting. In scenario 2 wordt uitgegaan van minimaal een bevestiging door een tweede en een derde meting. Figuur 5-8 laat zien dat in scenario 2 de reductie nog maar heel beperkt is. Snel handelen, en niet te lang wachten op een extra bevestiging is dus noodzakelijk.



Figuur 5-8. Aantal infecties per besmettingsscenario in sensorconfiguratie 0 op de horizontale as versus die in sensorconfiguratie 0 (zwarte kruisjes), 1 (blauwe stippen) en 2 (rode cirkels) op de verticale as.

Aantal sensoren

In scenario 1 wordt uitgegaan van 2 sensoren, in scenario 4 wordt uitgegaan van 3 sensoren. Figuur 5-9 laat zien dat voor Zandvoort de meerwaarde van een extra sensor (waarbij 1 sensor op dezelfde plaats is als bij scenario 1, een andere sensor op bijna dezelfde plaats, maar net niet en de derde extra is, zie Figuur 4-1) een beperkte meerwaarde heeft. In 72,9% van de besmettingsscenario's is er geen meerwaarde (< 5% verbetering) van de 3e sensor. In 27,1% is er wel een verbetering, maar dit lijkt vaker in de minder ernstige scenario's te gebeuren waar niet het grootste aantal infecties optreden. Wanneer scenario's 2 en 5, en 3 en 6 worden vergeleken is de conclusie niet anders.

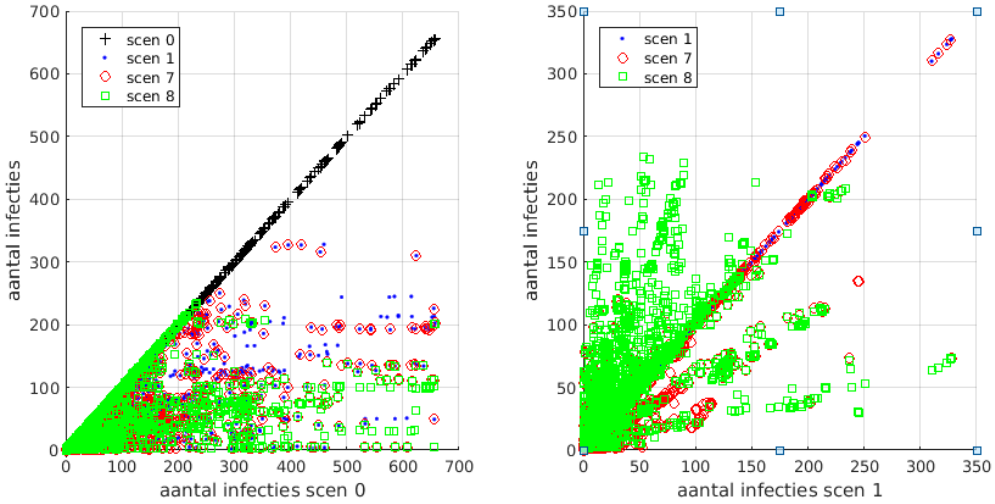


Figuur 5-9. (links) Aantal infecties per besmettingsscenario in sensorconfiguratie 0 op de horizontale as versus die in sensorconfiguratie 0 (zwarte kruisjes), 1 (blauwe stippen) en 4 (rode cirkels) op de verticale as; (rechts) aantal infecties per besmettingsscenario in sensorconfiguratie 1 op de horizontale as versus die in sensorconfiguratie 1 (blauwe stippen) en 4 (rode cirkels) op de verticale as. De stippellijn geeft een verbetering van 5% weer. Op de rechter y-as wordt weergegeven hoeveel van de scenario's in deze reductie vallen, bijvoorbeeld 27.1% van de scenario's heeft 5% reductie of meer.

Sensorlocaties

Er zijn verschillende sensorlocaties gesimuleerd. De locaties zijn met geselecteerd met behulp van een optimalisatieprogramma voor sensorlocaties, zie hoofdstuk 4. Figuur 4-1 laat zien waar zich deze locaties bevinden in het net: de rode vierkantjes zijn de 2 locaties die geoptimaliseerd zijn voor detectiekans (sensorscenario 1-3), de groene cirkels de 2 locaties die geoptimaliseerd zijn voor detectietijd waarbij rekening is gehouden met een straftijd van 12 uur (voor respons, bijvoorbeeld een bevestiging van de meting of het uitvaardigen van een kookadvies, sensorscenario 7), de blauwe driehoekjes de 2 locaties die geoptimaliseerd zijn voor detectietijd waarbij rekening is gehouden met een straftijd van 3 uur (sensorscenario 8). De zwarte wybertjes zijn de 3 locaties die geoptimaliseerd zijn voor detectiekans (sensorscenario 4-6). In dit eenvoudige, en kleine net (boulevard van Zandvoort) zijn een aantal van de optimale locaties gelijk.

Figuur 5-10 laat het effect zien van de verschillende sensorlocaties. De sensoren van sensorconfiguratie 8 missen een groot deel van de besmettingsscenario's, namelijk die waar de locaties "achter" de sensoren liggen. Kennelijk zijn dit dan wel de scenario's waar een beperkt aantal infecties optreedt in het scenario zonder sensoren (tot ongeveer 200), zoals te zien aan de overlap tussen de groene en zwarte "lijn". Voor de besmettingsscenario's met een groter aantal infecties, is sensorconfiguratie 8 wel effectiever: de reductie in infectierisico is hier wel groter dan bij sensorscenario 1 of 7. Voor sensorscenario 7 geldt een vergelijkbare redenatie, maar het verschil tussen scenario 1 en 7 is minder groot.



Figuur 5-10. (links) Aantal infecties per besmettingsscenario in sensorconfiguratie 0 op de horizontale as versus die in sensorconfiguratie 0 (zwarte kruisjes), 1 (blauwe stippen) , 7 (rode cirkels) en 8 (groene vierkantjes) op de verticale as; (rechts) aantal infecties per besmettingsscenario in sensorconfiguratie 1 op de horizontale as versus die in sensorconfiguratie 1 (blauwe stippen), 7 (rode cirkels) en 8 (groene vierkantjes) op de verticale as.

6 Samenvatting en discussie

In Tabel 6-1 worden de resultaten samengevat. Het moet sterk worden benadrukt dat deze analyse NIETS zegt over welke besmettingen daadwerkelijk optreden. Het zegt alleen iets over het type besmettingsscenario's dat met behulp van sensoren bestreden kan worden. Als er een reden is om te veronderstellen dat bepaalde besmettingsscenario's vaker optreden (op bekende locaties, van bepaalde concentratie, van bepaalde duur), dan kunnen sensorlocaties daarop worden afgestemd. Wanneer dat niet zo is, is een logischer strategie om met name de besmettingen met een hoog infectierisico af te vangen.

Tabel 6-1. Samenvatting van effect van aspecten van besmettingsscenario's en sensorconfiguraties (s.c.) op de reductie van het infectierisico in het testgebied van Zandvoort.

Aspect			Subgroep	Reductie, absoluut	Reductie, %
Besmettingsscenario	1.	Besmettingslocatie	50 bovenstrooms (Figuur 5-5 links)	405	70 %
			Overige locaties	22	24 %
	2.	Starttijd van de besmetting	00:00	29	27 %
			03:00	32	29 %
			06:00	43	32 %
			09:00	12	11 %
			12:00	10	10 %
			15:00	21	18 %
			18:00	26	31 %
			21:00	35	38 %
	3.	Duur van de besmetting	0-8 uur	3	6 %
			8-16 uur	21	24 %
			16-24 uur	54	43 %
Sensorconfiguratie	4.	Aantal sensoren	2 (s.c. 1)	26	25 %
			3 (s.c. 4)	29	30 %
	5.	Locatie sensoren	Detectiekans (s.c. 1)	26	25 %
			Detectietijd, straftijd 12 h (s.c. 7)	28	25%
			Detectietijd, straftijd 3 h (s.c. 8)	21	11%
	6.	Meettijd	4 uur (s.c. 1), 1 uur	26	25 %
			1 uur (s.c. 3), 0 uur	41	45 %
	7.	Aantal bevestigingen voor kookadvies	1 (s.c. 1)	26	25 %
			2 (s.c. 2)	15	13 %
	8.	Reactietijd tussen bevestiging en kookadvies	Zie 6. Meettijd		

Uit de tabel blijkt het volgende:

1. Besmettingslocatie: Besmettingen bovenstrooms leiden tot een hoger infectierisico én een groter effect van sensoren. De 50 ergste locaties geven een reductie van gemiddeld 405 geïnfecteerde mensen of 70%. Voor de overige 4950 locaties is dat 22 infecties of 24%.
2. Starttijd van de besmetting: Besmettingen vlak voor de ochtendpiek leiden tot een hoger infectierisico én een groter effect van sensoren. De starttijd is minder bepalend voor het aantal infecties dan de locatie.
3. Duur van de besmetting: Besmettingen die korter duren dan de tijd die nodig is voor 1e en bevestigingsmeting en het afgeven van een kookadvies (in sensorscenario 1 is dat 9 uur) leiden tot een infectierisico dat nauwelijks door sensoren gereduceerd kan worden (3 infecties of 6%). Besmettingen die langer duren (16 tot maximaal 24 uur in deze

studie) leiden vaak tot hogere infectierisico's, die met behulp van sensoren gereduceerd kunnen worden (gemiddeld 54 infecties of 43%).

4. De concentratie van de besmetting: Hogere concentraties leiden tot een groter infectierisico. Niet onderzocht is wat de relatie is tussen concentratie en detectiekans.
5. Aantal sensoren: Het geselecteerde testgebied (boulevard van Zandvoort) is relatief klein. Voor de modelstudie hebben we de invloed van twee en drie sensoren bestudeerd op besmettingen die in dit gebied ontstaan. De toegevoegde waarde van de derde sensor is heel beperkt (van gemiddeld 26 naar 29 infecties of van 25 naar 30% reductie). Uit eerder onderzoek is duidelijk dat de toegevoegde waarde van iedere extra sensor beperkt is. Per gebied kan met behulp van optimalisatiesoftware worden bepaald wat een optimaal aantal sensoren is.
6. Locatie sensoren: De locatie van de sensoren is heel bepalend voor het effect op het infectierisico. In deze modelstudie is ervoor gekozen om na detectie (1e meting én een bevestiging) alle bewoners (dus ook mensen bovenstrooms van de sensor) een kookadvies te geven. Dat betekent dat sensoren benedenstrooms een grotere detectiekans hebben en daarmee wel een effect hebben op de reductie van het infectierisico, waarbij de duur van de besmetting en de responstijd wel van belang zijn. Sensoren die meer bovenstrooms staat missen besmettingsscenario's, maar detecteren wel eerder die besmettingsscenario's die veel mensen treffen. Sensorconfiguratie 8 (geoptimaliseerd op detectietijd, met een straftijd van 3 uur) is gemiddeld minder goed in het beperken van het infectierisico (11% ten opzichte van 25% bij sensorconfiguratie 1), maar beperkt wel het infectierisico van ernstige besmettingen (met veel mensen benedenstrooms) veel meer. Het is daarmee niet evident wat de beste set van sensorlocaties is, en een optimalisatie-algoritme kan helpen om de juiste locaties te selecteren.
7. Meettijd, aantal bevestigingen en responstijd: De invloed van de som van de meettijd (1e meting + aantal bevestigingen) en de responstijd is geanalyseerd. Hoe korter deze totale tijd, hoe meer reductie op het infectierisico wordt gevonden. Bij de huidige beperkingen van 9 uur kan een reductie worden gerealiseerd van alle besmettingen die langer dan 9 uur duren. Een kortere meet- en responstijd betekent een extra reductie van 26 naar 41 infecties of 25% naar 45%. Een langere tijd als gevolg van een extra bevestiging betekent een daling van de reductie van 25 naar 15 infecties of van 25% naar 13%.

7 Conclusies

Een set van sensoren kan het infectierisico beperken. Het effect is groter wanneer de meettijd (inclusief het aantal bevestigingen) en de responstijd korter zijn. In het voorbeeldnet liep de effectiviteit op van 25% reductie tot 45% reductie. De reductie zal geen 100% zijn doordat 1) niet alle besmettingen worden gedetecteerd (50-60% afhankelijk van het aantal sensoren en de plaats van de sensoren) en nog minder zullen ook worden bevestigd; 2) de tijd totdat kookadvies wordt gegeven is zodanig lang (bijvoorbeeld 4 uur voor eerste meting, nog eens 4 uur voor bevestiging, 1 uur voor communicatie) dat al mensen zijn geïnfecteerd; 3) niet iedereen volgt het kookadvies op (80%).

Het aantal sensoren is van belang, maar in het voorbeeldnet was de meerwaarde van een extra sensor bij de inzet van twee sensoren beperkt. De sensorlocaties hebben een effect op de grootte van de reductie. Sensoren die meer bovenstrooms geplaatst worden zullen een besmetting die een groot aantal mensen kan treffen eerder detecteren, en zal een kookadvies een groter effect hebben; daarentegen zullen sensoren op de locaties de besmettingsscenario's die benedenstrooms van de sensoren optreden niet detecteren. Een goede locatiekeuze voor sensoren is daarmee niet evident, en vóór plaatsing is de inzet van een optimalisatie-algoritme aan te raden. Wanneer meer bekend is over de aard van mogelijke besmettingen ("voorkeur" voor bepaalde locaties), kan in de locatiekeuze van sensoren daar ook rekening mee worden gehouden.

8 Literatuur

Blokker, E. J. M., Moerman, A. en Smeets, P. W. M. H. (2016). "QMRA van het distributienet." *BTO 2016.017*, KWR, Nieuwegein.

Blokker, E. J. M. en Smeets, P. W. M. H. (2017). "Toegevoegde waarde online E. coli sensor in het distributienet." *BTO 2017.014*, KWR, Nieuwegein

Blokker, E. J. M. en Vogelaar, A. J. (2009). *Optimalisatie meetprogramma E.coli in distributienet*, KWR, Nieuwegein. BTO 2009.008.

Blokker, E. J. M., Vreeburg, J. H. G., Beverloo, H., Klein Arfman, M. en van Dijk, J. C. (2010). "A bottom-up approach of stochastic demand allocation in water quality modelling." *Drink. Water Eng. Sci.*, 3(1), 43-51.

Mons, M. N., van der Wielen, J. M. L., Blokker, E. J. M., Sinclair, M. I., Hulshof, K. F. A. M., Dangendorf, F., Hunter, P. R. en Medema, G. J. (2007). "Estimation of the consumption of cold tap water for microbiological risk assessment: an overview of studies and statistical analysis of data." *Journal of Water and Health*, 5(1), 151-170.

Schijven, J., Rutjes, S., Smeets, P. en Teunis, P. (2014). "QMRAspot: a tool for quantitative microbial risk assessment for drinking water: Manual QMRAspot version 2.0." *RIVM report 2014-0020*.

van Thienen, P. (2014). "Strategieën voor optimale plaatskeuze van waterkwaliteitssensoren in het distributienet." *BTO 2014.046*, KWR, Nieuwegein.

van Thienen, P. en Vogelaar, A. (2012). "Optimalisatie en gevoeligheid van sensorplaatsing in het leidingnet " *BTO 2012.017*, KWR, Nieuwegein.

van Vossen-Van Den Berg, J., Blokker, E. J. M. en De Graaf, B. (2015). "Evaluation of the ability of sensor networks to detect E.coli events compared to sampling programmes." *Procedia Engineering 13th Computing and Control for the Water Industry Conference, CCWI 2015*, 337-346.