KWR 2016.052 | juli 2016

Investeringen en prestaties van sensornetwerken in het drinkwater-distributienet

KWR
Watercycle
Research
Institute

Investeringen en prestaties van sensornetwerken in het drinkwaterdistributienet

KWR 2016.052 | juli 2016

Opdrachtnummer
400973

Projectmanager
Ing. J.A. (Ton) van Leerdam

Opdrachtgever
TKI onderzoek (INTEREST: Investeringen en rendementen van sensornetwerken)

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

Auteur(s)
dr. Joost (J.R.G.) van Summeren

Verzonden aan
Dunea, Evides, Optiqua Technologies, Vitens, Waterleidingmaatschappij Drenthe (WMD)

Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Dunea, Evides, Optiqua Technologies, Vitens en Waterleidingmaatschappij Drenthe (WMD) en mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken.

Jaar van publicatie
2016

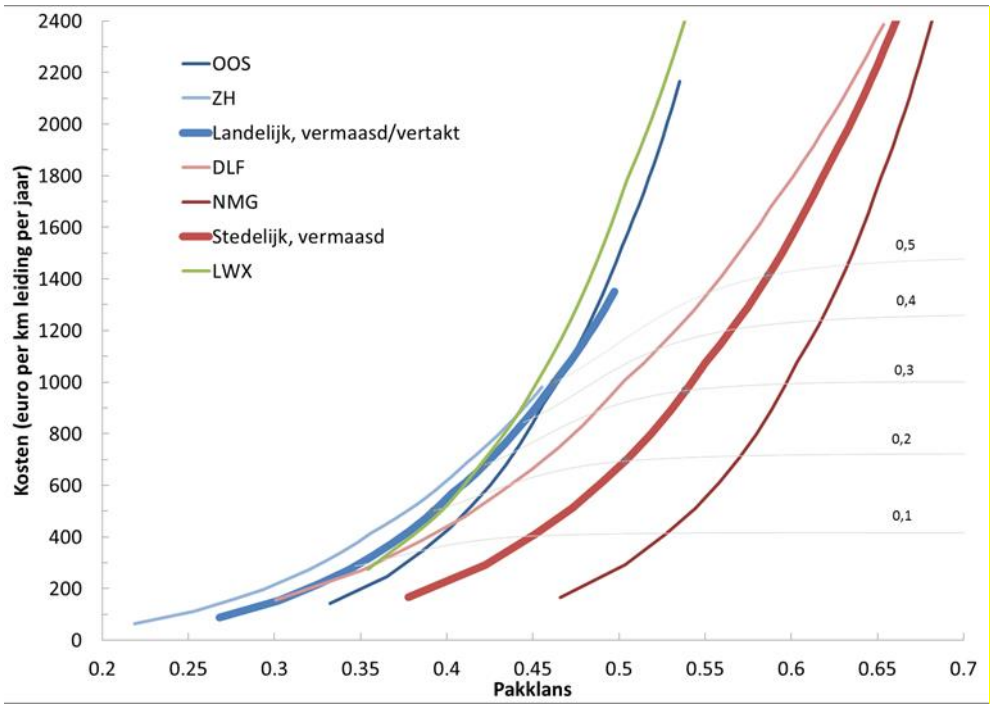
Meer informatie
dr. Joost van Summeren
T 030-6069667
E Joost.van.Summeren@kwrwater.nl

Samenvatting

Belang: De huidige bewaking van de drinkwaterwaterkwaliteit vindt plaats op het uitgaande water bij de productielocaties en bij de klant aan de tap met een steekproefsgewijze bemonstering en laboratoriumanalyse van een beperkt volume. Monitoring van de waterkwaliteit op strategische punten in het leidingnet met behulp van sensoren heeft de potentie om online inzicht te geven in de waterkwaliteit tijdens distributie op een groot aantal locaties in het leidingnet. Dit mag als een kansrijke aanvulling worden gezien op monitoring op basis van monstername en laboratoriumanalyse. Enkele Nederlandse drinkwaterbedrijven experimenteren met de inzet van netwerken van real-time waterkwaliteitssensoren. Echter, vanwege onzekerheden in te verwachten prestaties en investeringen van sensornetwerken zijn andere bedrijven terughoudend met installatie van sensornetwerken, en zonder nieuwe investeringen blijft het inzicht uit praktijkervaringen beperkt. Dit kan een impasse veroorzaken die mogelijk waardevolle investeringen in technologische vernieuwing ophoudt. Om de onzekerheden te verkleinen zijn in het huidige onderzoek investeringsvuistregels opgesteld die het mogelijk maken om onderbouwd beslissingen te nemen over investeringen in netwerken van sensoren ten behoeve van waterkwaliteitsmonitoring in drinkwaterdistributienetwerken.

Aanpak: Voor het opstellen van investeringsvuistregels zijn kosten en opbrengsten van een netwerk van sensoren bepaald. Voor het bepalen van kosten is in samenwerking met sensorleverancier Optiqua een kostenmodel voor waterkwaliteitssensoren opgesteld. In samenspraak met de waterbedrijven is gekozen om de pakkans van waterkwaliteitsafwijkingen te definiëren als opbrengst van het sensornetwerk. Pakkansen zijn berekend voor zes leidingnetmodellen (Delft, Leeuwarden (landelijk gebied), Nijmegen, Oostburg, Ypenburg en Zuidwolde-Hoogeveen) en sensornetwerken van verschillende grootte (10-160 sensoren). Om pakkansen te bepalen, is gebruik gemaakt van een in het BTO ontwikkelde optimalisatietool (CST) (P. Van Thienen, 2014). Hiermee is het transport van gemodelleerde verontreinigingen door het leidingnet berekend en detectie door modelsensoren bepaald. Sensorlocaties zijn daarbij geoptimaliseerd voor maximale gemiddelde pakkans. Door de berekende kosten en opbrengsten te koppelen zijn algemeen toepasbare investeringsvuistregels opgesteld. De vuistregels zijn door de waterbedrijven en sensorleverancier geëvalueerd voor toepassing in de praktijk.

Resultaten: De resultaten geven een gedetailleerd inzicht in te verwachten opbrengsten en investeringen (Figuur S.1). Leidingnetwerken in stedelijke gebieden resulteren in een hogere pakkans dan in landelijke gebieden, wat samenhangt met een grote hoeveelheid geleverd water per kilometer leiding en een hoge vermazingsgraad van de stedelijke gebieden. Het kostenmodel maakt inzichtelijk dat een waterbedrijf bij de inrichting van een sensornetwerk, naast de kosten voor de sensor-hardware ook aan andere kostenposten moet denken. Zo kan het inrichten van nieuwe meetstations substantiële kosten met zich meebrengen en zijn er terugkerende kosten voor operatie, onderhoud en vervanging van sensoren. Schaalvergroting, het gebruik van meetstations voor meerdere doeleinden en innovaties in sensortechnologie kunnen leiden tot een (toekomstige) beperking van de kosten. De investeringsvuistregels leveren een kwantitatieve basis voor een business case-benadering voor sensorleveranciers en waterbedrijven. Er moet rekening worden gehouden met enige onzekerheid in de vuistregels vanwege modelaannames en variatie in de bemeetbaarheid van verschillende leidingnetwerken. Echter in afwezigheid van voldoende praktijkgegevens, geven de vuistregels een nuttig houvast om toekomstige investeringen zo betrouwbaar mogelijk te onderbouwen.



Figuur S.1. Prestatie-investeringsrelaties. De horizontale as toont de berekende gemiddelde pakkans van waterkwaliteitsverontreinigingen door een sensornetwerk. De verticale as toont de genormaliseerde kosten per jaar per kilometer leiding. De netwerken zijn Oostburg ("OOS"), Zuidwolde-Hoogeveen ("ZH"), Delft ("DLF"), Nijmegen ("NMG") en Leeuwarden-landelijk ("LWX"). Vetgedrukte curves geven de gemiddelden voor landelijke (blauw) en stedelijke gebieden (rood). Grijze contourlijnen verbinden investeringsniveaus met gelijke sensordichtheid, oplopend van 0,1 tot 0,5 sensoren per kilometer leiding. Er is uitgegaan van sensorplaatsing op reeds bestaande locaties.

Implementatie: De investeringsvuistregels zijn door waterbedrijven te gebruiken als hulpmiddel bij beslissingen over investeringen in sensornetwerken en voor sensorleveranciers levert het een marketing- en adviestool. Dit biedt nieuwe mogelijkheden voor het beoordelen van investeringen in innovatieve sensortechnologie ten behoeve van het leveren van schoon en veilig drinkwater aan de klant. Mogelijk helpt dit om terughoudendheid rond mogelijk waardevolle investeringen in technologische vernieuwing te doorbreken (of juist beter onderbouwd te versterken). Bij toepassing van de vuistregels, moet het waterbedrijf doelstellingen, gewenste opbrengsten en financiële randvoorwaarden bepalen, mogelijkheden inventariseren voor sensorplaatsing op bestaande of nieuwe meetlocaties en leidingneteigenschappen bepalen (zoals stedelijk/landelijk gebied, leidinglengte en vermazingsgraad).

Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Dunea, Evides, Optiqua Technologies, Vitens en Waterleidingmaatschappij Drenthe (WMD) en mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken.

Inhoud

1	**Inleiding**	**3**
1.1	Aanleiding	3
1.2	Doelstelling	3
1.3	Aanpak en leeswijzer	4
1.4	Projectgroep en samenwerking	4
2	**Sensornetwerken en leidingnetmodellen**	**6**
2.1	Selectie van doelstellingen voor netwerken van waterkwaliteitssensoren	6
2.2	Selectie waterkwaliteitssensor	7
2.3	Selectie relevante netwerkstructuren en hydraulische modellen	8
2.4	Formulering van dichtheid van sensornetwerk	9
3	**Berekenen van prestaties voor geoptimaliseerde sensornetwerken**	**10**
3.1	Contamination Source Toolkit	10
3.2	Verontreinigingsscenario's en sensornetwerkspecificaties	10
4	**Prestaties van geoptimaliseerde sensornetwerken**	**13**
5	**Kostenmodel**	**16**
5.1	Inleiding	16
5.2	Beschrijving kostenmodel	16
5.3	Resultaten	21
6	**Implementatie van prestatie-investeringsrelaties van een sensornetwerk in de praktijk**	**23**
6.1	Investeringsvuistregels	23
6.2	Toepassing van de prestatie-investeringsrelaties	25
6.3	Voorbeeldtoepassing van investeringsvuistregels	26
7	**Evaluatie van investeringsvuistregels voor gebruik in de praktijk**	**28**
7.1	Evaluatie waterbedrijf	28
7.2	Evaluatie sensorleverancier	29
8	**Discussie**	**31**
8.1	Aandachtspunten bij toepassing van de prestatie-investeringsvuistregels	31
8.2	Mogelijkheden voor toekomstige verbeteringen van investeringsvuistregels	32

9 Conclusies en aanbevelingen 33
9.1 Conclusies 33
9.2 Aanbevelingen voor implementatie van investeringsvuistregels 33

Literatuur 35

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De huidige bewaking van de drinkwaterwaterkwaliteit vindt plaats op het uitgaande water bij de productielocaties en bij de klant aan de tap met een steekproefsgewijze bemonstering en laboratoriumanalyse van een beperkt volume. In het tussenliggende traject vindt (meestal) geen bewaking plaats, terwijl ook hier relevante veranderingen van de waterkwaliteit kunnen optreden. Monitoring van de waterkwaliteit op strategische punten in het leidingnet met behulp van sensoren heeft de potentie om online inzicht te geven in de waterkwaliteit tijdens distributie op een groot aantal locaties in het leidingnet en niet, zoals nu het geval is, pas enkele dagen na levering op een beperkt aantal locaties.

Er komen steeds meer waterkwaliteitssensoren op de markt die de dekking van monitoring in ruimte en tijd sterk kunnen verbeteren. In combinatie met geschikte data-analysemethoden kan snel informatie worden gewonnen uit grote hoeveelheden meetgegevens. Hiermee is in principe toe te werken naar continue, real-time bewaking van de drinkwaterkwaliteit tijdens distributie. Dat betekent dat het drinkwaterbedrijf sneller dan voorheen (en eventueel geautomatiseerd) actie kan ondernemen om negatieve gevolgen van mogelijke calamiteiten te beperken. Dit mag als een kansrijke aanvulling worden gezien op monitoring op basis van monstername en laboratoriumanalyse.

Het inrichten van een sensornetwerk brengt wel substantiële investeringen met zich mee, samenhangend met kosten voor sensorinstallatie en -onderhoud en expertise en voorzieningen op het gebied van ICT en datamanagement. Alvorens tot investeringen over te gaan, is het voor Nederlandse drinkwaterbedrijven dan ook van belang om te weten met welk doel zij investeren in een sensornetwerk en wat de bijbehorende investeringen en opbrengsten zijn. Echter, omdat sensornetwerken niet veel worden toegepast in de praktijk, is de kosten-opbrengst-verhouding onduidelijk. Dit kan een impasse veroorzaken die mogelijk waardevolle investeringen in technologische vernieuwing ophoudt.

1.2 Doelstelling

Het doel van het huidige onderzoek is om investering en prestaties van een netwerk van waterkwaliteitssensoren tegen elkaar af te zetten. Om generieke investeringsvuistregels op te stellen zijn voor verschillende (soorten) distributienetwerken de prestatie-investeringsrelaties bepaald. Om de investeringen te kwantificeren, is een kostenmodel opgesteld voor netwerken van algemene waterkwaliteitssensoren. Prestaties uitgedrukt als de pakkans van verontreinigingen bepaald voor geoptimaliseerde sensornetwerken, berekend met behulp van numerieke simulaties voor zes Nederlandse leidingnetwerken. Hierbij is samengewerkt met vier Nederlandse drinkwaterbedrijven (Dunea, Evides, Vitens, WMD) en één sensorleverancier (Optiqua).

Het beoogde doel van dit onderzoek is het opleveren van een kwantitatieve basis voor een business cases. Voor drinkwaterbedrijven kan dit een hulpmiddel bieden bij investeringsbeslissingen over netwerken van waterkwaliteitssensoren. Voor sensorleveranciers levert dit een kwantitatief en wetenschappelijk onderbouwd marketinginstrument op waarmee zij realistische en verwachtingen bij hun klanten kunnen wekken.

1.3 Aanpak en leeswijzer

In deze paragraaf wordt op hoofdlijnen de aanpak van het onderzoek beschreven. Het hoofddoel van het project is om investeringsvuistregels op te stellen op basis van prestatie-kostenrelaties voor een netwerk van waterkwaliteitssensoren. Voor een beschrijving van de methodiek in meer detail wordt verwezen naar de betreffende hoofdstukken.

De onderzoeksstrategie is mede bepaald op basis van antwoorden van een door KWR opgestelde en door de samenwerkingspartners ingevulde vragenlijst en een bijeenkomst met de betrokken partijen. Daarbij is een prioritering van doelstellingen van een sensornetwerk gemaakt, een selectie van leidingnetwerken gekozen en zijn keuzes gemaakt over het type waterkwaliteitssensor en het kostenmodel. Resultaten van deze inventarisatie zijn nader beschreven in Hoofdstuk 2 en Bijlage I en Bijlage II.

De waterbedrijven hebben zes hydraulische modellen aangeleverd van delen van hun distributiesystemen: Delft (Evides), Leeuwarden en omgeving (Vitens), Nijmegen (Vitens), Oostburg (Evides), Ypenburg (Dunea) en Zuidwolde-Hoogeveen (WMD). De leidingnetmodellen zijn nader beschreven in Hoofdstuk 2. De modellen zijn gebruikt voor de berekening van prestaties van netwerken van waterkwaliteitssensoren middels numerieke modellering. Daarbij zijn prestaties (pakkansen van verontreinigingen) gekwantificeerd door het transport van gemodelleerde verontreinigingen door het leidingnet te berekenen en detectie door modelsensoren te bepalen. De sensorlocaties zijn daarbij geoptimaliseerd voor dit specifieke doel (maximaliseren van de pakkans). Op vergelijkbare wijze is de detectietijd sinds het optreden van een verontreiniging beschouwd. Voor de optimalisatie- en prestatie-berekeningen is gebruik gemaakt van de, door KWR binnen het BTO ontwikkelde, Contamination Source Toolikt (CST) (P. Van Thienen, 2014). Achtergrond en resultaten van de optimalisatieberekeningen zijn beschreven in Hoofdstuk 3 , 4 en Bijlage III.

Op basis van aangeleverde informatie van Optiqua is een kostenmodel opgesteld voor een netwerk van algemene waterkwaliteitssensoren. Het kostenmodel is uitgewerkt in Hoofdstuk 5. De berekende prestaties en investeringen van sensornetwerken van verschillende grootte en voor verschillende leidingnetwerken zijn gecombineerd om prestatie-investeringsrelaties te bepalen. Hiermee zijn algemeen toepasbare investeringsvuistregels opgesteld, zoals beschreven in Hoofdstuk 6. De vuistregels zijn door de waterbedrijven en sensorleverancier geëvalueerd voor toepassing in de praktijk (Hoofdstuk 7).

In de Discussie (Hoofdstuk 8) worden aandachtspunten en mogelijkheden voor toekomstige verbeteringen besproken. In Hoofdstuk 9 worden conclusies en aanbevelingen voor implementatie van de vuistregels gegeven.

1.4 Projectgroep en samenwerking

Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met waterbedrijven Dunea, Evides,Vitens en WMD en sensorleverancier Optiqua en is mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken. De projectgroep bestond uit:

- Joep van den Broeke (Optiqua)
- Petra Holzhaus (WMD)
- Maurice van de Roer (Dunea)
- Jan Urbanus (Evides)
- Marije IJszenga (Vitens)

Sensorleverancier Interline Systems is betrokken geweest aan het begin van het project, maar heeft zich in een vroeg stadium terug moeten trekken uit het project vanwege faillissement.

De projectleden hebben meegedacht over uitwerking van het project en evaluatie van investeringsvuistregels. Sensorleverancier Optiqua heeft gegevens beschikbaar gesteld en geadviseerd bij het opstellen van een kostenmodel voor sensornetwerken. De waterbedrijven hebben kosteninschattingen gemaakt voor de inrichting van sensorlocaties en reis- en vervangingskosten en hydraulische modellen voorbereid en beschikbaar gesteld. Ad Vogelaar en Hendrik Beverloo (KWR) hebben de hydraulische modellen beoordeeld en voorbereid voor optimalisatieberekeningen.

2 Sensornetwerken en leidingnetmodellen

2.1 Selectie van doelstellingen voor netwerken van waterkwaliteitssensoren

De beweegredenen om te investeren in een netwerk van waterkwaliteitssensoren verschillen per drinkwaterbedrijf, maar zijn deels overlappend (P. Van Thienen, De Graaf, B., Van de Roer, M., Schaap, P., Sperber, V., 2014). Uit reacties van Dunea, Evides, Vitens en WMD zijn hoofdmotivaties voor de waterbedrijven om (mogelijk) in een sensornetwerk te investeren uiteengezet. Ook zijn bijbehorende doelstellingen en kwantificeerbare prestatie-indicatoren om zo'n netwerk optimaal in te richten bepaald (Tabel 1). Er is alleen rekening gehouden met antwoorden met betrekking tot waterkwaliteitsproblemen. Die voor waterkwantiteitsproblemen of bedrijfsvoering zijn buiten beschouwing gelaten. Het belang van de prestatie-indicatoren is als volgt geprioriteerd:

1. Pakkans maximaliseren
2. Detectietijd minimaliseren
3. Brongebied bepalen

De prestatie-indicatoren zijn beschreven in het kader op pagina 7.

TABEL 1. MOTIVATIES, DOELSTELLINGEN EN PRESTATIE-INDICATOREN VOOR HET INVESTEREN IN EEN NETWERK VAN WATERKWALITEITSSENSOREN NA INVENTARISATIE MET 4 NEDERLANDSE DRINKWATERBEDRIJVEN (DUNEA, EVIDES, VITENS, WMD).

Motivatie	Doelstelling	Prestatie-indicator
• Inzicht drinkwaterprocessen in distributienet en zuivering (Dunea, Evides) • Inzicht in bruinwaterincidenten (Evides) • Inzicht in nagroei (Evides)	(Goedkoper) monitoren van waterkwaliteit en microbiologische stabiliteit	Maximale pakkans
• Signaleren vervuiling in leidingnet (WMD) • Beheersing van incidenten (besmettingen) (Vitens)	Continu bewaken van waterkwaliteit en microbiologische stabiliteit	Maximale pakkans
• Beheersing van incidenten (besmettingen) in distributienet (Vitens)	Verkorten detectietijd	Minimale detectietijd
• Beheersing van incidenten (besmettingen) in distributienet (Vitens)	Bepaling oorzaak of bron van besmetting	Minimaal brongebied

In het bepalen van de prestaties van een sensornetwerk (Hoofdstuk 3 en 6) ligt de nadruk in dit onderzoek op (1) maximaliseren van de pakkans en in mindere mate op (2) minimaliseren van de detectietijd. Het bepalen van brongebieden (3) is rekenintensief en bleek niet mogelijk binnen dit project. Prestaties samenhangend met bronbepaling zijn in principe te onderzoeken met de methode en tools die worden gebruikt in dit project (P. Van Thienen, 2014), (Van Summeren, 2014).

Bij de doelstelling *maximale pakkans* wordt het sensornetwerk geoptimaliseerd voor een maximale gemiddelde kans op detectie van een willekeurige besmetting door ten minste één sensor[1] binnen een opgegeven observatievenster. De prestatie van het kandidaat-sensornetwerk is gedefinieerd als de fractie van het aantal besmettingen dat is gedetecteerd, gemiddeld over het aantal berekende verontreinigingsscenario's.

Bij de doelstelling *minimale detectietijd* wordt het sensornetwerk geoptimaliseerd voor minimale tijd vanaf het begin van een willekeurige besmetting tot eerste sensordetectie. In geval van een non-detectie, (binnen het voorgeschreven tijdsvenster vanaf het begin van de besmetting) is een straftijd toegekend. Deze straftijd voorkomt (onwenselijke) optimalisatie van een sensornetwerk voor het *niet* detecteren van verontreinigingen. De gekozen straftijd is in dit onderzoek gelijk gesteld aan de maximale verblijftijd in het netwerk van het water op de betreffende besmettingslocatie en het betreffende tijdstip van besmetting, met een maximum waarde gelijk aan de maximum modeltijd.

Bij de doelstelling *minimaliseren van brongebieden* wordt het sensornetwerk geoptimaliseerd om op basis van sensorsignalen de bronlocatie van een verontreiniging te herleiden en de gemiddelde omvang van het potentiële brongebied te minimaliseren.

In de keuze van de prestatie-indicatoren ligt de nadruk op detectie van een mogelijke waterkwaliteitsafwijking. Het maximaliseren van de dekkingsgraad (het sensornetwerk ontvangt een zo groot mogelijk deel van het water) is niet als prestatie-indicator geprioriteerd. Uit eerder onderzoek is bekend dat optimalisatie van een sensornetwerk voor maximale pakkans en minimale detectietijd goed samengaan en optimalisatie voor dekkingsgraad en detectietijd niet goed samengaan (P. Van Thienen, 2014).

2.2 Selectie waterkwaliteitssensor

Er is een groot aantal sensoren op de markt voor het on-line meten van de drinkwaterkwaliteit. Sommige sensoren zijn generiek van aard: deze zijn gevoelig voor meerdere waterkwaliteitsparameters, maar een afwijking is niet aan een specifieke waterkwaliteitsparameter te relateren. Andere waterkwaliteitssensoren zijn ontwikkeld voor het detecteren van één specifieke stof of stofgroep, maar hebben daarmee ook een beperkt gezichtsveld. In dit project is de onderzoekanalyse gebaseerd op generieke waterkwaliteitssensoren, omdat dit het best aansluit bij de doelstelling om een breed spectrum aan waterkwaliteitsverontreinigingen te kunnen detecteren. Dit is in veel gevallen wenselijker dan een alarm voor één specifieke stof.

[1] Optimalisatie voor redundante detectie door meerdere sensoren is mogelijk, maar in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Voor het bepalen van prestaties en kosten is in dit onderzoek is uitgegaan van de Optiqua EventLab sensor. De EventLab sensor is een optische sensor die veranderingen in de brekingsindex meet en een alarmwaarde afgeeft bij sterke fluctuaties. Deze sensoren reageren op een breed spectrum van mogelijke chemische verontreinigingen op het ppm niveau. De EventLab sensor is geschikt als onderdeel van een sensornetwerk en wordt op verschillende plekken ingezet ten behoeve van intelligente distributiesystemen, ook in Nederland (Vitens, (De Graaf, 2012)). Er zijn meerdere algemene waterkwaliteitssensoren op de markt. Echter, omdat er geen gegevens voorhanden waren voor het opstellen van een kostenmodel van andere sensoren, is geen vergelijking tussen verschillende algemene waterkwaliteitssensoren uitgevoerd in dit project.

2.3 Selectie relevante netwerkstructuren en hydraulische modellen

Om een zo volledig mogelijk beeld te verkrijgen, zijn de prestaties berekend voor zes verschillende Nederlandse leidingnetwerken, beschikbaar gesteld door de waterbedrijven (zie Tabel 2 voor specificaties). De modellen zijn uitgekozen zodat vier verschillende typen leidingnetwerken worden afgedekt. Het gebruik van meerdere netwerken en netwerktypes maakt het mogelijk om te onderzoeken in hoeverre prestaties algemeen toepasbaar zijn of variëren tussen, of binnen, vier soorten leidingnetwerken:

- Stedelijk-vertakt
- Stedelijk-vermaasd
- Landelijk-vertakt
- Landelijk-vermaasd

TABEL 2. EIGENSCHAPPEN VAN LEIDINGNETMODELLEN BESCHIKBAAR GESTELD DOOR DE WATERBEDRIJVEN. VOOR HET MODEL LEEUWARDEN ZIJN DE GEGEVENS VOOR HET LANDELIJK GEBIED WEERGEGEVEN. *: NIET BESCHIKBAAR. "AANTAL AANSLUITINGEN" IS BEREKEND UIT DE TOTALE HOEVEELHEID GELEVERD WATER, UITGAANDE VAN 125 M^3 PER JAAR PER AANSLUITING.

Leiding-netwerk	Geo-grafische omgeving / Netwerk topologie	Aantal knoop-punten	Aantal aan-sluitingen (berekend uit geleverde heoveel-heid water)	Totale leiding-lengte (km)	Totaal leiding-volume (10^3 m^3)	Aanslui-tingen per leiding-lengte (km^{-1})	Aanslui-tingen per leiding-volume (10^{-3} m^{-3})	Leiding-lengte per leiding-volume (m^{-2})	Ver-mazings-graad
Nijmegen (Vitens)	Stedelijk, vermaasd	10730	113281	274	6,12	413	18510	45	2,5
Delft (Evides)	Stedelijk, vermaasd	9332	64295	314	15,20	204	4230	21	2,8
Ypenburg (Dunea)	Stedelijk, vertakt	5849	24246	237	9.48	102	2558	25	0,67
Oostburg (Evides)	Landelijk, vermaasd	4111	27387	346	6,31	79	4340	55	0,45
Zuidwolde & Hoogeveen (WMD)	Landelijk, vermaasd	9508	53602	764	8,39	70	6389	91	0,59
Leeuwarden (randgebied) (Vitens)	Landelijk, vertakt	4013	*	178	3,26	*	*	55	0,50

De leidingmodellen zijn onverdund en geselecteerd op de aanwezigheid van enkele duizenden aansluitingen en voldoende netwerkcomplexiteit om op representatieve wijze prestaties van een sensornetwerk te kunnen berekenen. In werkelijkheid is het onderscheid tussen vertakt/vermaasd en stedelijk/landelijk niet altijd duidelijk en zullen de meeste gebieden een mengvorm zijn. Toch is de indeling relevant om een zo groot mogelijke variatie aan leidingnetwerken te beslaan.

Kentallen in kolom 3-6 weerspiegelen de grootte van leidingnetwerken en genormaliseerde kentallen in kolom 7-10 maken een vergelijking tussen de modellen mogelijk, ongeacht de groottes. Het aantal (huishoudelijke) aansluitingen is berekend uit de totale hoeveelheid geleverd water, uitgaande van 125 m^3 per jaar per aansluiting, waarbij grootverbruikers zijn verdisconteerd als meerdere aansluitingen. De vermazingsgraad is berekend als $G = L\text{-}K\text{+}1$ met L het aantal leidingstukken en K het aantal leidingknopen in het netwerk.

2.4 Formulering van dichtheid van sensornetwerk

Aangezien de gebruikte leidingnetwerken van elkaar verschillen in grootte zijn de opbrengsten van een sensornetwerk van een gegeven aantal sensoren niet direct met elkaar te vergelijken. Dit belemmert het opstellen van algemeen toepasbare investeringsvuistregels. Ten behoeve van een eenduidige vergelijking is daarom het aantal sensoren vertaald naar een sensordichtheid. Bij de berekening van een sensordichtheid zijn verschillende keuzes te maken. Daarom is gekozen om drie normalisaties te gebruiken, namelijk het aantal sensoren per:

- totale leidinglengte van het leidingnet (km)
- totaal aantal aansluitingen. (Berekend uit het totale geleverde water uitgaande van een gemiddeld verbruik van 125 m^3/jaar/huishouden.)
- totale leidingvolume (m^3)

Waarden van deze parameters zijn te vinden in Tabel 2.

3 Berekenen van prestaties voor geoptimaliseerde sensornetwerken

3.1 Contamination Source Toolkit

Om prestaties van een sensornetwerk voor een bepaalde doelstelling met numerieke modellering te optimaliseren is gebruik gemaakt van de Contamination Source Toolkit (CST – versie 140715) (P. Van Thienen, 2014). De CST tool maakt gebruik van EPANET-MSX (Shang, 2008) voor het hydraulisch transport van gemodelleerde verontreinigingen door leidingnetwerken. Het vinden van de meest geschikte locaties van sensoren is gebaseerd op een wiskundige methode (genetisch algoritme) om uit een verzameling oplossingen voor een probleem *die* oplossing te vinden die het best beantwoord aan één of meerdere voorgeschreven doelstellingen. Van een aantal willekeurig gekozen sensornetwerkconfiguraties (eerste generatie) worden de prestaties berekend. De best presterende configuraties worden behouden en aangevuld met variaties (verkregen door mutatie en combinatie) op deze configuraties. Dit vormt een tweede generatie waarvan opnieuw de prestaties worden berekend. Dit proces wordt herhaald totdat verschillen tussen de generaties onder een opgegeven minimum komen (waarna de berekening wordt afgebroken). Het convergentiegedrag geeft vertrouwen in het vinden van een betrouwbare uitkomst: De best gevonden oplossing wordt verondersteld het optimum te zijn of het optimum voldoende nauwkeurig te benaderen. Voor een meer uitgebreide beschrijving van de optimalisatiemethodiek wordt verwezen naar (P. Van Thienen, 2014).

3.2 Verontreinigingsscenario's en sensornetwerkspecificaties

De berekeningen zijn uitgevoerd voor zes hydraulische leidingnetmodellen (Tabel 2) waarbij sensorlocaties zijn geoptimaliseerd voor maximale pakkans (en, voor een beperkt aantal berekeningen, minimale detectietijd) van een verontreiniging door het sensornetwerk.

Er is uitgegaan van een besmettingen in de vroege ochtend (06:00 uur) en een besmettingsduur van 2 uur. Het ochtendtijdstip is gekozen zodat het piekverbruik in de ochtend in een weide verspreiding van verontreinigingen resulteert. Er is gekozen voor een observatievenster van 24 uur (na het begin van de besmetting). Latere detecties tellen niet mee voor de opbrengst: een waterbedrijf kan in zo'n geval niet meer snel reageren op een incident. Een *detectielimiet* van $1x10^{-6}$ is gekozen op basis van de detectielimiet in de ppm-range voor de EventLab sensor. Uitgaande van een besmetting van 1 g/l komt de detectielimiet overeen met 1 µg/l.

Aangezien een verontreiniging in principe overal in het netwerk kan optreden, is het bij het berekenen van de pakkans en detectietijd van belang om een voldoende groot aantal besmettingslocaties te definiëren. Om onpraktisch lange rekentijden te voorkomen (bijvoorbeeld bij een ensemble met bronlocaties op elk knooppunt in het leidingnet) is het aantal potentiële bronlocaties in dit onderzoek beperkt tot 100, verdeeld op basis van maximalisatie van de onderlinge leidinglengte tussen bronlocaties (zie Figuur 1). Daarmee worden dichtbij elkaar gelegen locaties een gelijk effect toegekend. Voor elk leidingnet is een serie berekeningen uitgevoerd met steeds een ander aantal sensoren (10, 20, 40, 80 en 160). In de berekeningen zijn 300 *potentiële sensorlocaties* gebruikt. Ook hiervoor is de Het

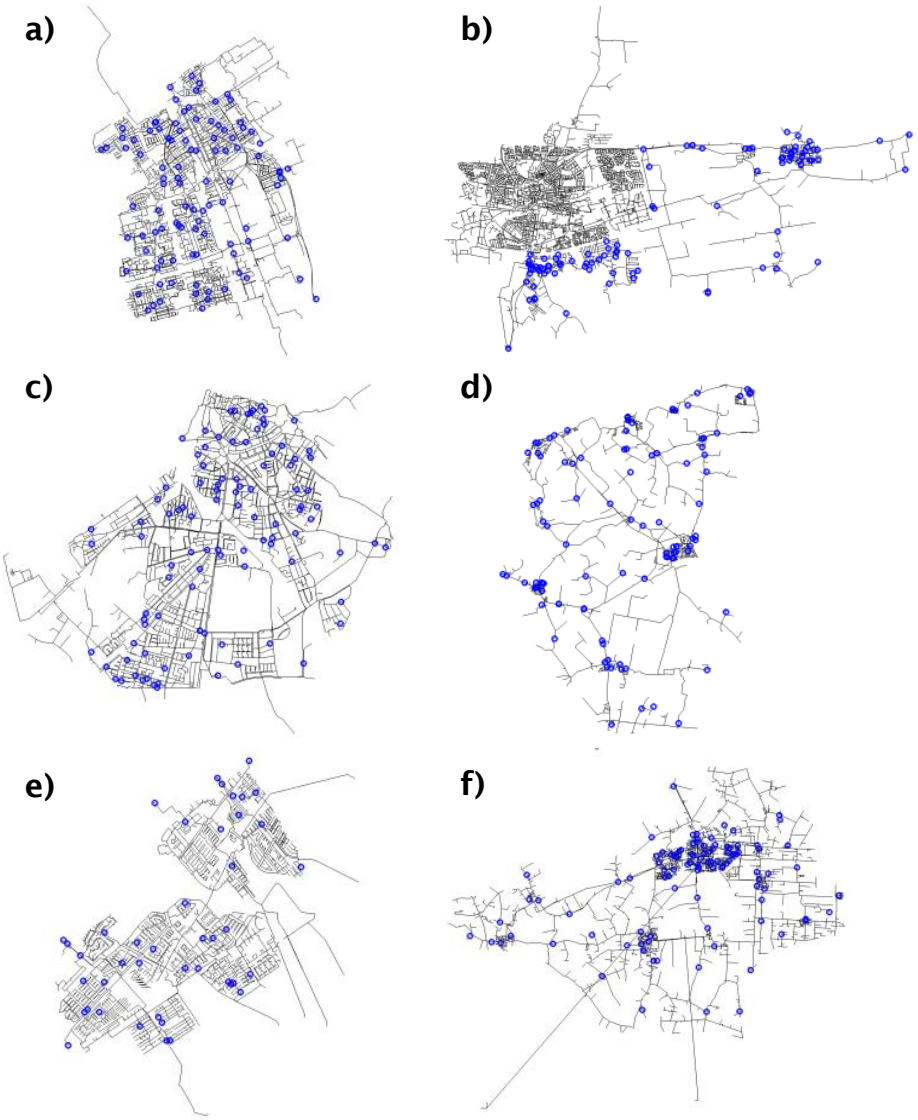
aantal van 100 potentiële bronlocatie en 300 potentiële sensorlocaties is een compromis tussen behapbare rekentijden en voldoende betrouwbare resultaten. Bij de afweging is gebruik gemaakt van voorgaand onderzoek waaruit bleek dat een relatief kleine sample uit alle knooppunten voldoende besmettingsscenario's biedt om een representatief beeld te vormen, maar dat een te grote beperking van potentiële sensorlocaties ten koste kan gaan van waardevolle locaties in de beschouwing (P. Van Thienen, 2014).

In dit project is dit nagegaan of de gekozen standaardwaarden inderdaad een goed keuze zijn. Daarvoor is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor het model van Oostburg (Bijlage III). De resultaten van de gevoeligheidsanalyse tonen dat de keuzes voor aantal potentiële bron – en sensorlocaties en detectielimiet geen substantiële invloed op de resultaten hebben (Bijlage III).

Tevens is voor het model Oostburg aangetoond dat de *maximale pakkans* bij benadering lineair afhangt van de *minimale detectietijd* vanaf het starttijdstip van verontreiniging. Deze uitkomst is van belang omdat opgestelde investeringsvuistregels voor een netwerk geoptimaliseerd voor maximale pakkansen (Hoofdstuk 6) direct zijn te vertalen naar vuistregels voor detectietijden. Deze verbanden zijn mogelijk verschillend voor verschillende netwerken en niet zonder meer toe te passen op andere (typen) leidingnetwerken of andere doelstellingen.

Van het leidingnet voor Leeuwarden is alleen het landelijk gebied gebruikt voor potentiële bron- en sensorlocaties. Water en verontreinigingen kunnen ook buiten dit gebied bewegen, maar omdat de stroomrichting over het algemeen van de pompstations richting landelijk gebied doorstroomt naar de stad Leeuwarden, is het risico op een in de stad optredend incident dat het landelijk gebied besmet klein, en deze mogelijkheid is in dit onderzoek niet beschouwd.

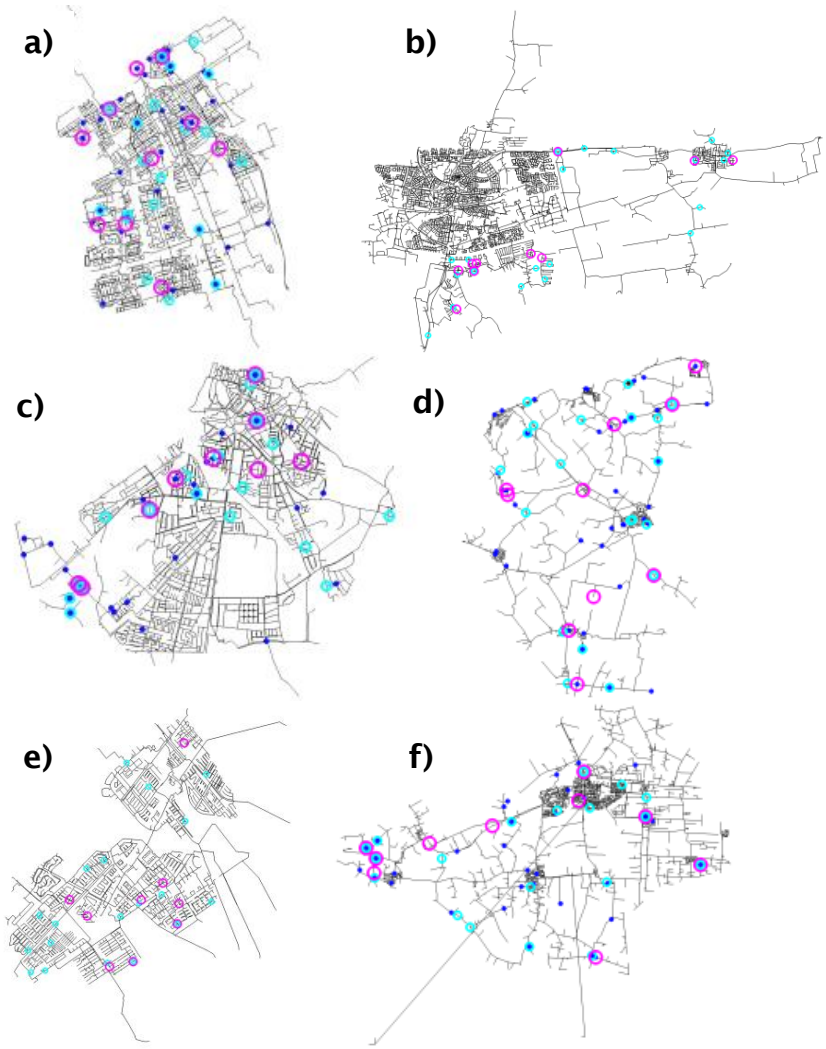
Het model Ypenburg is een uitsnede van een groter stedelijk gebied waarvan het hydraulisch model beschikbaar was. Er is in de berekeningen rekening gehouden met de mogelijkheid dat verontreinigingen een oorsprong buiten Ypenburg hebben. Voor elk van 8 voedende leidingen is berekend hoe groot het bovenstroomse gebied is (in kilometer leiding op het tijdstip 08.00 uur). Vervolgens zijn naar verhouding van leidinglengte 36 bronnen in het leidingnetwerk en 64 bronnen op de toevoerende leidingen geplaatst. Vanwege de overlap in de bronlocaties op de toevoerende leidingen, lijkt het aantal bronnen kleiner dan 100 (Figuur 1e).



FIGUUR 1. 100 BRONLOCATIES VAN VERONTREINIGINGEN VOOR LEIDINGNETMODELLEN VAN A) DELFT (EVIDES), B) LEEUWARDEN(LANDELIJK GEBIED, VITENS), C) NIJMEGEN (VITENS), D) OOSTBURG (EVIDES), E) YPENBURG (DUNEA) EN F) ZUIDWOLDE-HOOGEVEEN (WMD).

4 Prestaties van geoptimaliseerde sensornetwerken

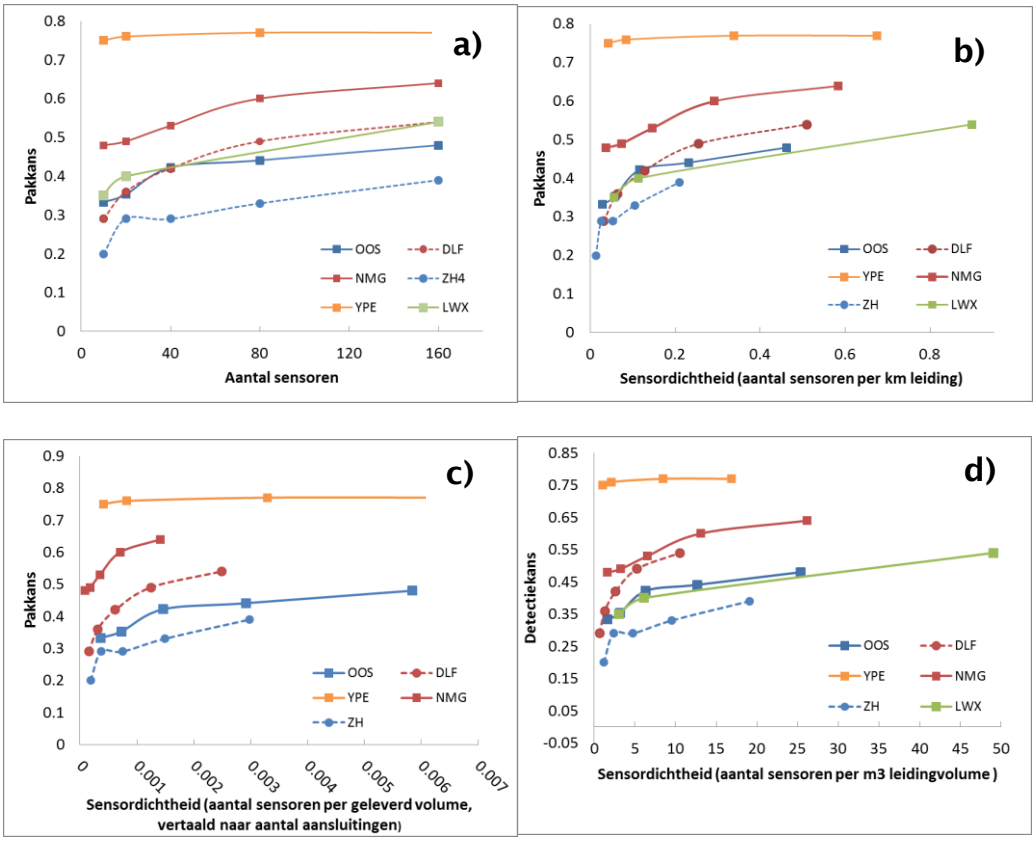
Voor verschillende leidingnetwerken toont Figuur 2 sensornetwerkconfiguraties, geoptimaliseerd voor (enkelvoudige) pakkans van een verontreiniging. De resultaten tonen dat voor alle onderzochte gebieden de verdeling van sensoren over de leidingnetwerken bij benadering homogeen is verdeeld, met zowel sensoren in de woonkernen (herkenbaar aan de hoge leidingdichtheid) en het landelijk gebied (lage leidingdichtheid).



FIGUUR 2. BEREKENDE SENSORNETWERKCONFIGURATIES GEOPTIMALISEERD VOOR MAXIMALE PAKKANS VOOR A) DELFT, B) LEEUWARDEN (LANDELIJK GEBIED), C) NIJMEGEN, D) OOSTBURG, E) YPENBURG EN F) ZUIDWOLDE-HOOGEVEEN . HET AANTAL SENSOREN IS 10 (PAARSE CIRKELS), 20 (LICHTBLAUW) EN 40 (DONKERBLAUW, MET UITZONDERING VAN LEEUWARDEN EN YPERNBURG).

In Figuur 3 staan de opbrengsten voor verschillende netwerken uitgezet tegen het aantal sensoren en sensordichtheden zoals gedefinieerd in paragraaf 2.4. In Figuur 3a is voor alle

netwerkmodellen een convergentiegedrag te zien waarbij de pakkans steeds minder snel toeneemt bij een toename van het aantal sensoren. Het is te verwachten dat de pakkans naar de waarde 1 convergeert, omdat voor een oneindig aantal sensoren elke verontreiniging zal worden geregistreerd.



FIGUUR 3. PAKKANS BEREKEND VOOR SENSORNETWERKEN ALS FUNCTIE VAN AANTAL SENSOREN (A), SENSORDICHTHEID OP BASIS VAN LEIDINGLENGTE (B), AANSLUITINGEN (C) EN LEIDINGVOLUME (D). DE LEGENDA REFEREREERT NAAR LEIDINGNETWERKEN VOOR OOSTBURG (OOS), DELFT (DLF), YPENBURG (YPE), NIJMEGEN (NMG), ZUIDWOLDE-HOOGEVEEN (ZH) EN LEEUWARDEN-LANDELIJK (LWX). GELIJKE KLEUREN CORRESPONDEREN MET NETWERKTYPE :STEDELIJK-VERMAASD (ROOD), STEDELIJK-VERTAKT (ORANJE), LANDELIJK-VERMAASD (BLAUW) EN LANDELIJK-VERTAKT (GROEN).

De patronen in Figuur 3b, c en d zijn erg vergelijkbaar ongeacht of pakkansen worden berekend als functie van sensordichtheid op basis van leidinglengte, aantal aansluitingen (berekend uit de geleverde hoeveelheid water, zie §2.3) of leidingvolume. De onderlinge opeenvolging van de curves is gelijk, hoewel de onderlinge afstand tussen de curves enigszins kan verschillen afhankelijk van de gekozen maat en de leidingnetkarakteristieken (Tabel 2).

Het stedelijk vertakte leidingmodel Ypenburg heeft een bovengemiddeld hoge opbrengst. Dit is een gevolg van de plaatsing van externe verontreinigingen stroomafwaarts van de voedende pompstations in leidingen die het (deelgebied) Ypenburg uiteindelijk bereiken via 8 toevoerende leidingen. Omdat de toevoerende leidingen met een klein aantal sensoren zijn te monitoren, is gemakkelijk een hoge pakkans te verwezenlijken. Hoewel dit een interessant gegeven is, wijkt de opzet van dit model zodanig af dat resultaten voor Ypenburg zijn weggelaten uit de verdere analyse.

De stedelijke netwerken (Delft, Nijmegen en Ypenburg) hebben een significant hogere opbrengst dan de landelijke (Oostburg, Zuidwolde-Hoogeveen en Leeuwarden). De resultaten tonen geen duidelijk onderscheid tussen prestaties van netwerken die zijn gelabeld als *vermaasd* en *vertakt*. Opvallend is dat de naamgeving “vermaasd”-“vertakt” niet duidelijk tot uitdrukking komt in de berekende vermazingsgraad (zieTabel 2). Leeuwarden-landelijk (vertakt netwerk) heeft bijvoorbeeld een vergelijkbare vermazingsgraad als Oostburg en Zuidwolde-Hoogeveen (beide vermaasd). De labeling is dus misleidend, en voor classificatie van de leidingnetwerken lijkt de vermazingsgraad beter geschikt. De pakkans is sterk positief gerelateerd aan zowel het aantal aansluitingen per km leiding en de vermazingsgraad (vergelijk Figuur 3 en Tabel 2, resultaten van Ypenburg zijn niet meegenomen in de analyse). (Kentallen aansluitingen/volume en leidinglengte/volume zijn niet sterk gerelateerd aan de prestaties.) Een mogelijke verklaring voor deze resultaten is dat netwerken makkelijker zijn te monitoren als leidingen onderling goed zijn verbonden. Dit is over het algemeen het geval in stedelijke gebieden waar het verbruik per kilometer leiding en de vermazingsgraad hoog zijn, ten opzichte van landelijke gebieden met enigszins geïsoleerde woonkernen verbonden met transportleidingen.

5 Kostenmodel

5.1 Inleiding

Om generieke investeringsvuistregels op te kunnen stellen zijn de kosten voor een sensornetwerk in kaart gebracht voor netwerken van 10 tot 1000 sensoren. Relevante kostenposten (vanuit het oogpunt van het waterbedrijf) zijn hieronder beschreven. Er is hierbij uitgegaan van Optiqua EventLab sensoren voor algemene waterkwaliteitsparameters.

5.2 Beschrijving kostenmodel

Op basis van overleg met sensorleverancier Optiqua is het volgende kostenmodel opgesteld

$$K_{tot} = K_{aanschaf} + K_{project} + K_{locatie} + K_{energie} + K_{vervang} + K_{licentie} + K_{data} + K_{onderhoud}$$

De totale kosten K_{tot} worden berekend als jaargemiddelde van een investering over 10 jaar (alle kosten zijn exclusief BTW). De vaste kosten bestaan uit aanschaf van de sensoren ($K_{aanschaf}$) projectkosten ($K_{project}$) en inrchting van de sensorlocaties ($K_{locatie}$). De operationele (jaarlijks terugkerende) kosten bestaan uit energiekosten ($K_{energie}$), het vervangen van niet-functionerende sensoren ($K_{vervang}$), licentiekosten voor software ($K_{licentie}$), kosten voor data transfer (K_{data}) en onderhoudskosten gemaakt door de leverancier of het waterbedrijf ($K_{onderhoud}$). Voor veel posten dalen de kosten per sensor met het aantal te installeren sensoren, n. De kosten per sensor, k, zijn dus n-afhankelijk: $K = n.k(n)$.

Bij het berekenen van de kosten, K (in € per jaar), is uitgegaan van een gemiddelde over een installatieperiode van 10 jaar (T_{10}). Er is uitgegaan van een gefaseerde installatie over meerdere jaren. Het aantal daadwerkelijk geïnstalleerd sensoren (m) is dan gemiddeld genomen kleiner dan het totaal aantal geïnstalleerde sensoren (n). Voor de posten energie, vervanging, data transfer en onderhoud wordt de fasering over 10 jaar benaderd met een correctiefactor c_n:

$$c_n = \frac{\sum_{i=1}^{10} m_i/n}{10}$$

De keuze voor de correctiefactor (zie Tabel 3) is gebaseerd op realistische praktijksituaties en neemt af met het totaal aantal sensoren, maar is enigszins arbitrair.

Eenmalige kosten

Aanschafkosten:

$$K_{aanschaf} = n_i \, k_{aanschaf,i}(n)$$

Projectkosten: Projectkosten zijn eenmalige kosten voor ontwerp van de monitoringsoplossing (waar zijn sensoren te installeren, welke aanpassing zijn eventueel nodig voor de klant, kosten voor het opzetten/configureren van software/SCADA/centrale database.

$$K_{project} = n \, k_{project}(n)$$

TABEL 3. INVOERGEGEVEN VOOR OPSTELLEN KOSTENMODEL. *DE REISTIJDEN VOOR EEN LANDELIJK GEBIED ZIJN APART BESCHOUWD, WAARBIJ DE REISTIJDEN ZIJN VERDUBBELD.

Omschrijving	Symbool	Waarde (fictief)	Eenheid
Projectkosten (per sensor)	$k_{project}$	4500 (n=1-10)	€
		1300 (n>10)	
Kosten voor installeren op locatie (bestaande infrastructuur)	$k_{locatie}$	2000	€ sensor^{-1}
Kosten voor installeren op locatie (nieuwe infrastructuur)	$k_{locatie}$	12000	€ sensor^{-1}
Data transfer kosten (per sensor per jaar)	k_{data}	120	€ jr^{-1}sensor^{-1}
Energiekosten (per sensor per jaar)	$k_{energie}$	100	€ jr^{-1}sensor^{-1}
Materiaalkosten voor onderhoud (per sensor per jaar)	k_{mat}	700	€ jr^{-1}sensor^{-1}
Gemiddelde vervangingsfrequentie (per jaar)	$f_{vervang}$	0.1	jr^{-1}
Gemiddelde onderhoudsfrequentie (per jaar)	$f_{onderhoud}$	3	jr^{-1}
Gemiddelde reistijd per sensor voor onderhoud (stedelijk gebied*)	t_{reis}	40 (n=10)	min
		37.5 (n=15)	
		35 (n=20)	
		32.5 (n=30)	
		30 (n=50)	
		25 (n=100)	
		20 (n=200)	
		15 (n=500)	
		10 (n=1000)	
Gemiddelde werktijd per sensor voor onderhoud	t_{werk}	15	min
Uurtarief onderhoudsmonteur	u	70	€ uur^{-1}
Correctiefactor voor gefaseerde installatie	c_n	1 (n=10)	-
		0.95 (n>10, n<50)	
		0.9 (n=50)	
		0.85 (n=100)	
		0.8 (n=200)	
		0.75 (n=500)	
		0.7 (n=1000)	

Kosten voor het inrichten van sensorlocaties:

Voor het inrichten van meetlocaties worden de kosten per sensor ($k_{locatie}$) vermenigvuldigd met het aantal sensoren (*n*):

$$K_{locatie} = n\, k_{locatie}$$

In het kostenmodel wordt onderscheid gemaakt tussen sensorplaatsing bij bestaande meetinfrastructuur (zwembaden, fabrieken, etc.) of op nieuwe aanleg en inrichting van meetlocaties. Bij gebruik van bestaande infrastructuur is de locatievrijheid en het aantal

locaties beperkt, maar kunnen sensoren relatief goedkoop worden geïnstalleerd. Kosten zijn afhankelijk van de specifieke situatie. Op basis van praktijkgegevens van Evides is in het kostenmodel $k_{locatie}$=€2.000 aangenomen voor dit type locatie. Hierbij is rekening gehouden met kosten voor voorbereiding, vergunning, veiligheidsmaatregelen, plaatsing van sensoren, aansluiten van datakoppeling en opnemen van de nieuwe sensor in assetmanagement- en datasystemen (zoals PI).

In het geval er nieuwe infrastructuur aangelegd en ingericht wordt om meetvoorzieningen in te plaatsen, zijn de kosten hoger dan wanneer er gebruik gemaakt kan worden van bestaande infrastructuur. Het inrichten van nieuwe infrastructuur verhoogt echter het aantal mogelijke locaties en kan ook de mogelijkheid bieden om gunstigere meetlocaties te ontsluiten. Het kan daarom noodzakelijk zijn om nieuwe infrastructuur in te richten om de gewenste prestaties mogelijk te maken. Verder zullen er bij grotere sensornetwerken mogelijk niet voldoende locaties met bestaande infrastructuur beschikbaar zijn om nieuwe locaties in te richten. De kosten voor het inrichten van nieuwe infrastructuur zijn vastgesteld op gemiddeld €12.000 op basis van inschattingen door Dunea en Evides.

Dunea baseert de kosten op plaatsing van een clamp-on volumestroommeter. Bijbehorende kosten, exclusief kosten voor het meetmiddel, worden geschat op ca. €8.000 en zijn als volgt samengesteld:

- elektrokast (€2300)
- montage/installatie meetmiddel (€800)
- inrichten elektrokast (€500)
- aansluiting elektriciteit (€500)
- aardpennen (€400)
- vergunning (€150)
- proefsleuf (€3000)
- meetput (€100-€2000)

Evides baseert de kosten op installatie van nieuwe meetlocaties met clamp-on volumestroommeter, druksensor en netgevoede datalogger, deels ondergronds, deels in een bovengrondse kast. De kosten worden geschat op ca. €16.000 en zijn als volgt samengesteld:

- kosten voor voorbereiding en verwerking in assetmanagement- en dataverwerkende systemen (eigen uren) (€2380)
- onderaanneming, inclusief graafwerkzaamheden en aanboring (€6000)
- aansluiting 230V elektra (€1000)
- bovengrondse kast, afsluiter, mogelijk verwarmingselement (ca. €5000)
- datalogger[2] (€700)
- vergunningen (€600)
- nazorg (€68)

In het algemeen zal het goedkoper zijn om in landelijke gebieden meetlocaties in te richten (relatief goedkope, bovengrondse aanleg) dan in stedelijke gebieden (vanwege ondergrondse plaatsing en vergunningen).

[2] Hoewel de EventLab sensor een datalogger bevat, moet nog worden voorzien in een datalogger voor communicatie tussen de sensor en datasysteem (PI server).

Er zijn aannemelijke redenen waarom de kosten in de praktijk (op termijn) lager uit zullen vallen:

- Opschaling van sensornetwerken resulteert mogelijke in een kostenbeperking, indien grote aantallen nieuwe locaties kunnen worden ingericht tegen een gunstigere prijs, bijvoorbeeld door een grote opdracht aan één aannemer te gunnen.
- Het is aannemelijk dat waterbedrijven in de praktijk nieuwe meetlocaties zullen aanleggen voor gecombineerd gebruik van meerdere sensoren. Hiermee zijn de aanlegkosten in principe te verdelen over meerdere sensoren. De bijbehorende kostenreductie is afhankelijk van de specifieke situatie. In het huidige model is uitgegaan van de (minst voordelige) situatie: het aanleggen en inrichten van één meetlocatie voor één enkele sensor.

Naast eenmalige kosten zijn aan de operatie van sensoren jaarlijks terugkerende energiekosten verbonden, ongeacht de manier van installeren (beschreven in onderstaande).

Vervangingskosten: Het aantal per jaar te vervangen sensoren wordt berekend als een vaste fractie ($f_{vervang}$=0.1) van het totaal aantal geïnstalleerde sensoren.

$$K_{vervang} = k_{aanschaf}(n) f_{vervang} c_n n$$

Jaarlijks terugkerende kosten

Energiekosten van sensoren:

Kosten voor energiegebruik van sensoren zijn door Dunea en Evides geschat op ongeveer 50 tot 200 euro per jaar per sensor. In het kostenmodel is een bedrag van 100 euro per sensor per jaar gebruikt. Omdat dit bedrag wordt alleen meegerekend voor de daadwerkelijk geïnstalleerde sensoren wordt gecorrigeerd voor gefaseerde installatie met de factor c_n:

$$K_{energie} = c_n \mathrm{n}\, k_{energie}(n)$$

Licentiekosten voor software:

$$K_{licentie} = \mathrm{n}\, k_{licentie}(n)$$

Kosten voor dataverzending :

Het verzenden van sensorgegevens gebeurt via een modem en is in het algemeen afhankelijk van de hoeveelheid data en dus van het aantal sensoren:

$$K_{data} = c_n n k_{data}(n)$$

Onderhoudskosten:

Het aantal te onderhouden sensoren is berekend als de storingsfrequentie per sensor ($f_{onderhoud}$) maal het totaal aantal geïnstalleerde sensoren ($c_n.n$). Onderhoudskosten per sensor bestaan uit een post voor de sensorleverancier (j=1) en voor het waterbedrijf (j=2). Beide zijn opgebouwd uit materiaalkosten (k_{mat}) en onderhoudskosten (reis- en werktijd maal uurtarief, u_j):

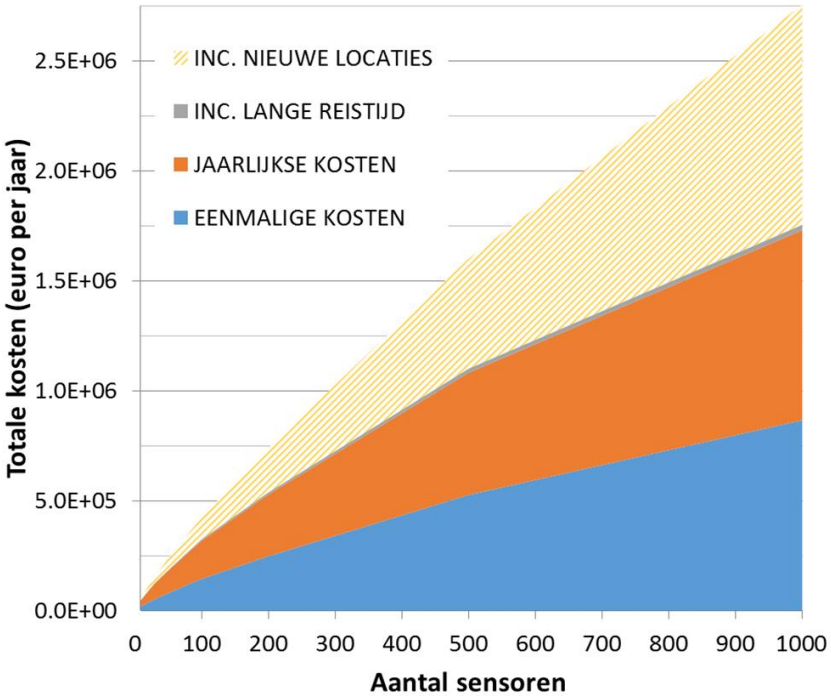
$$K_{onderhoud} = n\, c_n f_{onderhoud} \left(k_{mat} + \sum_{j=1}^{2} \left(t_{reis,j} + t_{werk,j} \right)\, u_j \right)$$

De materiaalkosten omvatten het vervangen van 1 probe per jaar en kleine kosten zoals vervangen van fluïdische componenten (slangen, filter, etc.) en schoonmaakmiddelen.

Voor het onderhoud wordt 15 minuten werktijd per sensor gerekend. Daarnaast is voor reistijd uitgegaan dat er elke maand éénmaal door het waterbedrijf wordt uitgereden voor de sensoren die op dat moment onderhoud nodig hebben. Soms zal de sensorleverancier ter plaatse zijn maar dit is niet opgenomen in het model omdat dit relatief weinig zal voorkomen (alleen bij groter onderhoud). Er is een ruwe schatting gemaakt, waarbij de reistijd afneemt met het aantal sensoren (Tabel 3), aangezien onderhoudswerkzaamheden dan efficiënter geclusterd kunnen worden. De schattingen zijn gemaakt voor een stedelijk gebied met relatief korte reistijden. Voor landelijke gebieden is uitgegaan van een verdubbeling van de reistijden. In werkelijkheid zijn ook een aantal andere zaken van invloed op de reistijd zoals de infrastructuur van wegen, sensordichtheid, leidingdichtheid, etc., maar dit is niet expliciet verdisconteerd. Er is gerekend met een uurtarief van €70 voor een onderhoudsmonteur. Indien minder gekwalificeerd personeel kan worden ingezet voor (een deel van) de onderhoudstaken, zal het uurtarief lager uitvallen. Onderhoudskosten vormen een klein deel van de totale kosten (2 tot 7% in de beschouwde scenario's) en het aandeel neemt af met een toenemend aantal sensoren.

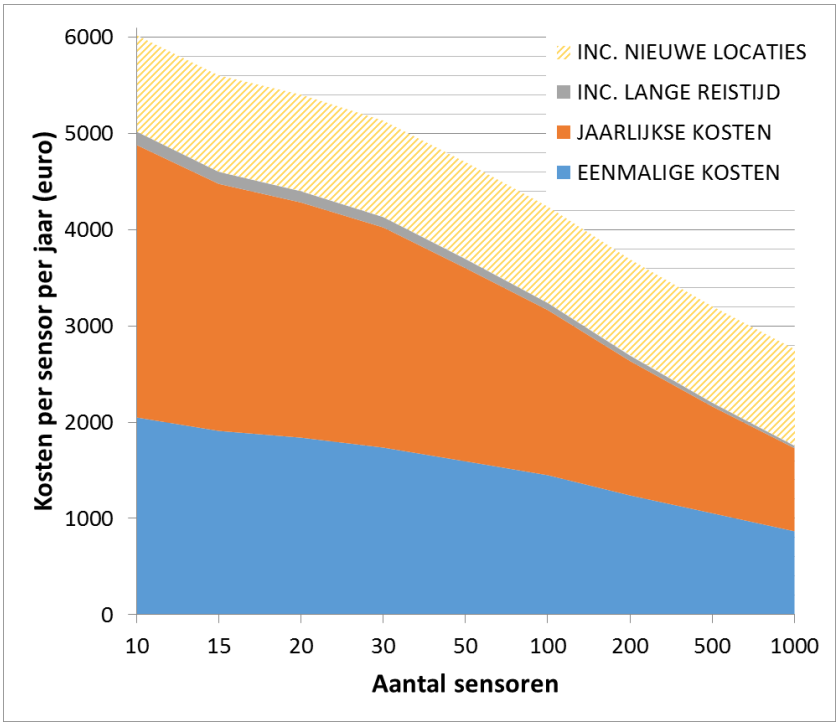
5.3 Resultaten

Investeringskosten zijn berekend voor sensornetwerken van 10 tot 1000 sensoren (Figuur 4). Totale kosten zijn uitgesplitst in de eenmalige kosten (blauw) en jaarlijks terugkerende kosten (oranje). De reistijd (stedelijk dan wel landelijk gebied) maakt een verwaarloosbaar verschil in het totale kostenplaatje (grijs). De manier van het inrichten van meetlocaties is wel substantieel: inrichten van nieuwe meetlocaties is 20% tot 60% duurder (oplopend van 10 tot 1000 sensoren) dan plaatsing bij bestaande meetlocaties. Lagere extra kosten zijn te verwachten als nieuwe meetlocaties gebruikt worden voor meerdere sensoren en als gevolg van schaalvoordelen bij installatie van grotere sensornetwerken (zie §5.2).



FIGUUR 4. KOSTEN VOOR SENSORENETWERKEN, UITGAANDE VAN HET IN DIT HOOFDSTUK BESCHREVEN KOSTENMODEL. TOTALE KOSTEN ZIJN OPGEBOUWD UIT EENMALIGE KOSTEN (BLAUW) EN JAARLIJKS TERUGKERENDE KOSTEN (ORANJE). ADDITIONELE ONDERHOUDSKOSTEN SAMENHANGEND MET LANGERE REISTIJDEN IN EEN LANDELIJK GEBIED (I.P.V. STEDELIJK) ZIJN AANGEGEVEN IN GRIJS. ADDITIONELE KOSTEN VOOR HET AANLEGGEN EN INRICHTEN VAN NIEUWE MEETLOCATIES (I.P.V. GEBRUIK VAN BESTAANDE MEETLOCATIES) IS AANGEGEVEN IN GEEL. ALLE KOSTEN ZIJN GEMIDDELD OVER EEN INSTALLATIEPERIODE VAN 10 JAAR.

In Figuur 5 is weergegeven hoe de totale kosten *per sensor* afnemen met het aantal te installeren sensoren. De totale kosten, *K*, nemen daardoor sublineair toe met het aantal sensoren zoals te zien in Figuur 4.

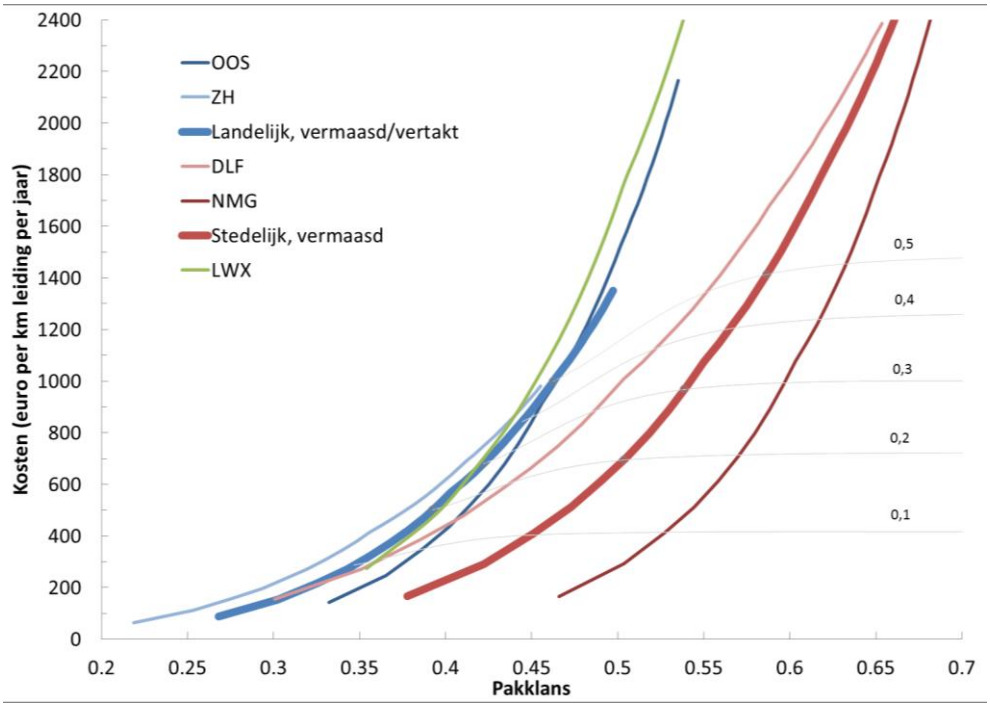


FIGUUR 5. ALS FIGUUR 4, MAAR WEERGEGEVEN ALS KOSTEN PER SENSOR PER JAAR ALS FUNCTIE VAN HET AANTAL SENSOREN IN HET NETWERK.

6 Implementatie van prestatie-investeringsrelaties van een sensornetwerk in de praktijk

6.1 Investeringsvuistregels

De berekende prestaties (pakkans van verontreinigingen, Hoofdstuk 3) en kosten van een netwerk van waterkwaliteitssensoren (Hoofdstuk 5) zijn gecombineerd om prestatie-investeringsrelaties te berekenen. Figuur 6 toont prestatie-investeringsrelaties voor vijf leidingnetwerken. Het gemiddelde van “stedelijke” (Delft en Nijmegen) en “landelijke” gebieden (Oostburg, Zuidwolde-Hoogeveen en Leeuwarden) zijn weergegeven met de rode resp. blauwe vetgedrukte curves.

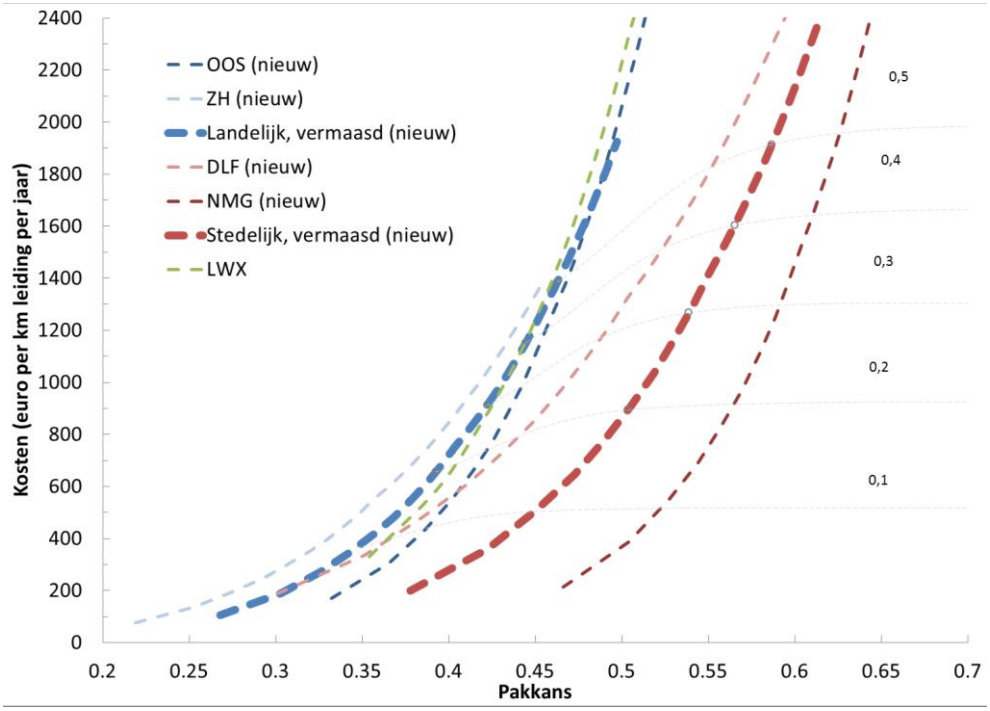


FIGUUR 6. PRESTATIE-INVESTERINGSRELATIES. DE HORIZONTALE AS GEEFT DE BEREKENDE GEMIDDELDE PAKKANS VAN WATERKWALITEITSVERONTREINIGINGEN DOOR EEN SENSORNETWERK. DE VERTICALE AS TOONT DE GENORMALISEERDE KOSTEN PER JAAR PER KILOMETER LEIDING. DE NETWERKEN ZIJN OOSTBURG (“OOS”), ZUIDWOLDE-HOOGEVEEN (“ZH”), DELFT (“DLF”), NIJMEGEN (“NMG”) EN LEEUWARDEN-LANDELIJK (“LWX”). VETGEDRUKTE CURVES GEVEN DE GEMIDDELDEN VOOR LANDELIJKE (BLAUW) EN STEDELIJKE GEBIEDEN (ROOD). GRIJZE CONTOURLIJNEN VERBINDEN INVESTERINGSNIVEAUS MET GELIJKE SENSORDICHTHEID, OPLOPEND VAN 0,1 TOT 0,5 SENSOREN PER KILOMETER LEIDING. ER IS UITGEGAAN VAN SENSORPLAATSING OP REEDS BESTAANDE LOCATIES (DE DUURDERE VARIANT MET PLAATSING OP NIEUW IN TE RICHTEN LOCATEI IS WEREGEGEVEN IN FIGUUR 7.)

Om de relaties algemeen toepasbaar te maken, zijn prestaties uitgezet tegen de sensordichtheid (aantal sensoren per km leiding) en kosten genormaliseerd (uitgedrukt in € per jaar per kilometer leiding). Gelijke sensordichtheden voor verschillende curves (stedelijk

en landelijk) zijn verbonden met grijze contourlijnen in Figuur 6, oplopend van 0,1 tot 0,5 sensoren/km leiding.

Figuur 7 geeft prestatie-investeringsrelaties weer waarbij voor *elke* sensor een nieuwe meetlocatie wordt aangelegd en ingericht. Dit leidt tot hogere kosten dan bij gebruik van bestaande meetlocaties. Bij gecombineerd gebruik van bestaande en nieuwe meetlocaties is een kostenniveau te verwachten dat inligt tussen de twee bijbehorende scenario's gepresenteerd in Figuur 6 en Figuur 7. Zoals besproken in §5.2 zullen de extra kosten minder hoog uitvallen in geval van schaalvoordelen en efficiënt gebruik van meetlocaties voor meerdere doeleinden.



FIGUUR 7. ALS FIGUUR 6 MAAR VOOR DE SITUATIE WAARIN VOOR ELKE SENSOR EEN NIEUWE MEETLOCATIE WORDT INGERICHT. DEZE VARIANT MAAKT OPTIMALE SENSORPLAATSING MOGELIJK, MAAR IS OOK DUURDER. SCHAALVOORDELEN EN EFFICIËNTE INRICHTING VAN MEETLOCATIES (VOOR MEERDERE DOELEINDEN) ZIJN DE EXTRA KOSTEN MOGELIJK TE REDUCEREN.

De berekende prestatie-investerings-curves hebben allen een vergelijkbare kromming (Figuur 6 en Figuur 7). Dit betekent dat voor de verschillende leidingnetwerken de opbrengsten op een gelijkvormige manier toenemen met de investeringen. De curves worden steeds steiler: voor grotere sensornetwerken zijn steeds grotere extra investeringen nodig om eenzelfde toename in opbrengst te bereiken. Dit komt doordat voor een toenemend aantal sensoren de prestaties sneller afvlakken dan de investeringen.

Zoals Figuur 6 en Figuur 7 tonen, presteren de onderzochte stedelijke (vermaasde) netwerken structureel beter dan de landelijke (vermaasde of vertakte) netwerken. Dit sluit aan bij bevindingen van Hoofdstuk 4 dat in stedelijke gebieden (leidingnetwerken met een hoge onderlinge verbindingsgraad) verontreinigingen makkelijker zijn te detecteren dan in landelijke gebieden.

Installatie van sensoren op optimale (nieuwe) meetlocaties is duurder dan op suboptimale (bestaande) meetlocaties (Hoofdstuk 5). Dit is te herkennen aan hogere investeringen bij

gelijkblijvende prestaties (vergelijk Figuur 6 en Figuur 7). In het model zijn kosten voor 10 (resp. 100) nieuwe locaties gelijk aan 12 (resp. 137) bestaande. Verrekend in deze vergelijking zijn ook de jaarlijks terugkerende kosten zoals energie en onderhoudskosten op een termijn van 10 jaar. Afhankelijk van de situatie kan een investering in bestaande in plaats van nieuwe meetlocaties meer rendabel zijn. (Er moeten dan uiteraard voldoende bestaande meetlocaties aanwezig zijn in het gebied.) Gebruik van bestaande meetlocaties beïnvloedt echter ook de prestaties op een manier die niet makkelijk is te voorspellen. Daarom zou voor specifieke gebieden moeten worden berekend of dit resulteert in een betere prestatie-kosten-verhouding.

6.2 Toepassing van de prestatie-investeringsrelaties

De prestatie-investeringsrelaties weergegeven in Figuur 6 zijn enerzijds bedoeld als hulpmiddel aan waterbedrijven om inzicht te krijgen in opbrengst-kosten-verhoudingen en beslissingen te nemen van investeringen in en inrichting van een sensornetwerk. Anderzijds kunnen sensorfabrikanten de relaties gebruiken om onderbouwd te adviseren over de inrichting van sensornetwerken. Voor waterbedrijven wordt aanbevolen om minimaal de onderstaande stappen te doorlopen:

1. Opstellen van (financiële en/of operationele) randvoorwaarden

- Bedrijven dienen hun operationele en financiële randvoorwaarden omtrent sensornetwerken in kaart te brengen. Een bedrijf kan bijvoorbeeld als operationele voorwaarde stellen dat een sensornetwerk ten minste 50% van mogelijke verontreinigingen detecteert binnen 24 uur. Een financiële randvoorwaarde kan zijn om maximaal k€200 per jaar te besteden aan het sensornetwerk, gemiddeld over een investeringsperiode van 10 jaar. (Door dit bedrag te delen door de totale leidinglengte is het totaalbudget te vertalen naar de in het figuur gebruikte budget per leidinglengte per jaar).

2. *Bepalen van installatiemogelijkheden*

- Het aantal locaties met bruikbare, bestaande infrastructuur voor sensorinstallatie dient te worden geïnventariseerd, aangezien gebruik van bestaande locaties (Figuur 6) aanzienlijk goedkoper is dan nieuw in te richten locaties (Figuur 7).

3. Bepalen van het type leidingnetwerk

- De berekende prestatie-investeringsrelaties tonen een onderscheid tussen stedelijke en landelijke leidingnetwerken (resp. de rode en blauwe vetgedrukte curves in Figuur 6 en Figuur 7). Daarom is het belangrijk om het type netwerk te bepalen en daarbij de juiste relatie te kiezen. De vetgedrukte curves hebben de volgende kleurcodering: blauwe curves voor een landelijk leidingnet (vermaasd of vertakt); rode curves voor een stedelijk vermaasd leidingnet[3].

4. Bepalen van investeringsmogelijkheden

- Bepaal investeringsmogelijkheden op basis van gestelde randvoorwaarden en bijpassende vuistregel. Een rekenvoorbeeld wordt hieronder gegeven (§6.3).

[3] Resultaten voor netwerk Ypenburg zijn buiten beschouwing gelaten vanwege een afwijkende modelopzet (veel verontreinigingen op voedende leidingen) en een bovengemiddelde hoge prestatie als gevolg daarvan).

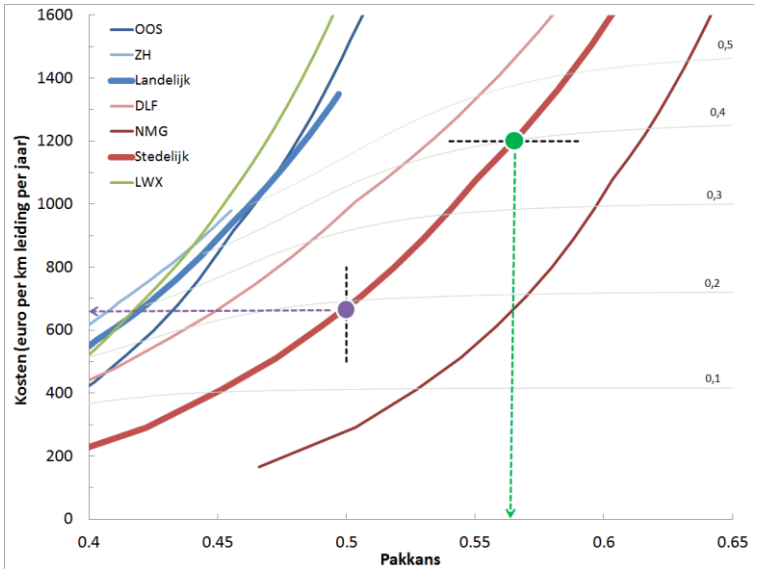
5. Bepaal de inrichting van het sensornetwerk

- Bepaal het aantal sensoren door de sensordichtheid te vermenigvuldigen met de totale leidinglengte van het leidingnet.
- Voor een zo hoog mogelijke opbrengst moeten locaties van de sensoren worden geoptimaliseerd met een optimalisatietool zoals gebruikt in dit project.

Op basis van bovenstaande afwegingen kan een bedrijf beslissen/ sensorfabrikant adviseren in het investeringsscenario dat het best past bij de bedrijfswensen.

6.3 Voorbeeldtoepassing van investeringsvuistregels

Voorbeeld a – financiële randvoorwaarde: Stel dat een bedrijf maximaal k€ 200 per jaar wil besteden om 167 km leidingnet te monitoren (stap 1). Stel verder dat sensoren geïnstalleerd kunnen worden op bestaande meetlocaties (stap 2) en we te maken hebben met een stedelijk gebied (stap 3). De bijbehorende prestatie-investeringscurve is de vetgedrukte rode curve uit Figuur 8 (kopie van Figuur 6). De maximaal te besteden kosten per kilometer leiding zijn k€ 200/167 km = 1198 €/km. Dit niveau is aangegeven in de figuur (horizontale zwarte onderbroken lijn in Figuur 8) en de doorsnijding met investeringscurve (groene punt, stap 4) is het aanbevolen investeringsscenario. Dit correspondeert met een te verwachte pakkans van 57%. De sensordichtheid is 0,4 sensoren per kilometer leiding, oftewel 0,4 x 167 = 67 sensoren á €2985 per stuk per jaar (stap 5).



FIGUUR 8. KOPIE VAN FIGUUR 6, TER ILLUSTRATIE VAN 3 REKENVOORBEELDEN UIT §6.3. DE HORIZONTALE ZWARTE LIJN GEEFT FINANCIËLE RANDVOORWAARDE AAN (MAXIMALE KOSTEN VAN €1200 PER SENSOR PER JAAR, REKENVOORBEELD A). DE GROENE STIP GEEFT DAN HET INVESTERINGSSCENARIO MET DE HOOGST MOGELIJKE OPBRENGST (PAKKANS VAN 57%, GROENE PIJL). DE SENSORDICHTHEID PER KILOMETER LEIDING IS 0,4 (ZIE GRIJZE CONTOURLIJNEN). DE VERTICALE ZWARTE LIJN GEEFT DE OPREATIONELE RANDVOORWAARDE WEER (PAKKANS VAN MINIMAAL 50%, REKENVOORBEELD B). DE PAARSE STIP TOONT HET FINANCIEEL MEEST VOORDELIGE INVESTERINGSSCENARIO (CA. €672 PER JAAR PER KILOMETER, PAARSE PIJL). DE CORRESPONDERENDE SENSORDICHTHEID IS 0,19 SENSOREN PER KILOMETER LEIDING (GRIJZE CONTOURLIJNEN). ALS BEIDE RANDVOORWAARDEN WORDEN GECOMBINEERD (REKENVOORBEELD C) ZIJN ALLE INVESTERINGSSCENARIO'S OP HET LIJNSTUK TUSSEN DE GROENE EN PAARSE STIPPEN VALIDE KEUZES.

Voorbeeld b. Operationele randvoorwaarde: In een ander voorbeeld is de randvoorwaarde een minimale pakkans van 50% (stap 1, zie de verticale zwart onderbroken lijn in Figuur 6). Opnieuw wordt uitgegaan van bestaande meetlocaties (stap 2) en een stedelijk gebied (stap 3). Het aanbevolen investeringsscenario (waarbij de kosten minimaal zijn) is aangegeven met de paarse stip (stap 4). De sensordichtheid is 0,19 sensoren per kilometer leiding, oftewel 0,19 x 167 = 32 sensoren. Kosten per sensor per jaar zijn €3509,-, kosten per jaar per kilometer €672 en de totale kosten per jaar k€112 (stap 5).

Voorbeeld c. Gecombineerde randvoorwaarde: Een bedrijf kan beide randvoorwaarden (50% pakkans, maximale investering van k€200) hebben. In dat geval zijn alle investeringsscenario's op de rode lijn tussen de groene en paarse stip valide mogelijkheden. Het bedrijf kan kiezen welk scenario het best past, afhankelijk van de weegfactor die wordt toegekend aan financiële of operationele eisen.

7 Evaluatie van investeringsvuistregels voor gebruik in de praktijk

7.1 Evaluatie waterbedrijf

De waterbedrijven hebben de investeringsvuistregels geëvalueerd in de context van de eigen bedrijfsvoering (perspectief sensorleverancier resp. drinkwaterbedrijf). Daarbij is gevraagd naar het nut en de toepasbaarheid van de vuistregels en of is te verwachten of het bedrijf de regels echt op zou volgen of toch een andere afweging zou maken.

De reactie van Dunea is de volgende:

> "De investeringsregels zijn goed bruikbaar als je weet wat je wilt bereiken. Bijv. je wilt de kans op detectie van besmettingen verhogen of sensoren toepassen binnen een specifiek financieel kader om ervaringen op te doen.
>
> De vraag die hieraan vooraf gaat, namelijk wat willen we bereiken, wat onze huidige prestatie is, of welke onacceptabele risico's we nu of in de toekomst lopen, is met de opbrengsten van dit project nog niet te beantwoorden. Dit is echter wel noodzakelijk als vertrekpunt om dergelijke investeringsafwegingen te maken.
>
> Kortom, de investeringsvuistregels zijn goed toe te passen mits de huidige en gewenste prestaties helder zijn. Deze uitgangspunten moeten ergens anders op gebaseerd worden."

De reactie van WMD is de volgende:

> De vuistregels geven– samen met de grafieken – een aardige indicatie van het te verwachten effect en kosten van sensorplaatsing anno 2016. De resultaten kunnen een bedrijf helpen met het nemen van beslissingen over het al dan niet onderzoeken van de mogelijkheid tot plaatsen van sensoren.
>
> Voor een betaalbare oplossing voor het gehele distributiegebied (ca. 5000 km leidingen) is WMD op zoek naar betaalbare oplossingen, zoals het gebruik van sensoren die door relatief eenvoudig meetbare parameters (geleidbaarheid, temperatuur, pH, etc.) toch zicht kunnen geven op uitzonderlijke veranderingen in het leidingnet. Daarom participeert WMD in project *DistriSense* (ontwikkeling van een sensor die eenvoudig via aanboring in een leiding kan worden geplaatst).
>
> Ieder bedrijf is anders. WMD heeft 12 pompstations, het leidingnet zit aan elkaar verknoopt. Verblijftijden, scheidingsgebieden tussen pompstations, het zijn allemaal zaken die effect hebben op meest optimale keuze van sensoren.

7.2 Evaluatie sensorleverancier

De sensorleverancier heeft de vuistregels geëvalueerd met betrekking tot metingen en opbrengsten van bestaande netwerken van waterkwaliteitssensoren. De impressie is de volgende:

- *Investeringsvuistregels als algemene instructie.* De opgestelde vuistregels zijn logisch en liggen in het verlengde van praktische ervaringen. Hoewel de regels heel erg algemeen zijn, en dus geen echte nawerkbare "handleiding" bieden voor het ontwerp van een sensor netwerk, worden wel de belangrijke aandachtspunten onder de aandacht gebracht. Aangezien de situatie voor ieder netwerk anders is, en voor ieder bedrijf, en voor iedere sensor, is een concretere instructie dan ook niet realistisch.
- *Bepalen van doelstellingen en randvoorwaarden*. Bij het aanleggen van een sensornetwerk is het van groot belang dat vooraf zeer duidelijke doelstellingen worden vastgesteld; wat is het vraagstuk dat opgelost dient te worden, wat is de behoefte. Dit aspect komt terug in stap 1 van Hoofdstuk 6. Dit is de cruciale stap. Als hier de verkeerde randvoorwaarden gekozen worden, zal dit tot een suboptimale oplossing leiden. De randvoorwaarden zoals ze in het rapport staan opgesomd richten zich heel erg op de netwerkoptimalisatie. Er spelen echter nog meer (strategische en technische) randvoorwaarden (Van den Broeke, 2015) die hierin meegenomen zouden moeten worden. De stappen zoals in hoofdstuk 6 van dit rapport gepresenteerd zullen in de praktijk in de genoemde volgorde van afnemend belang worden geacht.
    - In de regel is de belangrijkste randvoorwaarde het beschikbare budget. In deze gevallen zal de effectiviteit van het netwerk dus geoptimaliseerd moeten worden voor het beschikbare budget (wat het aantal sensoren definieert) in plaats van het aantal sensoren bepalen dat een gewenste pakkans of sensordichtheid biedt.
    - Verder is bij de plaatsing vaak van doorslaggevend belang waar reeds bestaande infrastructuur zich bevindt. Bestaande locaties bieden in de regel de meest kosteneffectieve installatiemogelijkheden voor nieuwe sensoren. Deze locaties bieden vaak ook nog toegang tot de grootste / belangrijkste leidingen, waardoor in eerste instantie vaak voor deze locaties gekozen zal worden. In een optimalisatie zou dit waarschijnlijk meegenomen moeten worden, ondanks dat dit met betrekking tot pakkans en detectietijd wellicht suboptimale resultaten oplevert.
- *Investeringsvuistregels als hulpmiddel bij advies aan klant*. Vanuit het perspectief van een sensorleverancier onderbouwd deze nieuwe studie wel het belang van een goed doordachte opzet van een sensornetwerk. Het scenario waarin geoptimaliseerd wordt voor de pakkans is bijvoorbeeld een goed vertrekpunt in de inleidende discussies met klanten over het inrichten van een sensornetwerk. Verder wordt goed duidelijk gemaakt dat de investering in de sensorhardware slechts een deel van de kosten vormt, iets wat door waterbedrijven vaak niet voldoende gerealiseerd wordt, en iets wat de kostprijs van de sensoren van minder belang maakt dan vaak wordt gedacht. Het kostenmodel uit Hoofdstuk 5 kan voorts zeer behulpzaam bij het doorrekenen van verschillende scenario's voor klanten.
- *Vergelijking met praktijkervaringen*. Optiqua heeft ervaring met twee grotere netwerken: Vitens en PUB Singapore.
    - Bij Vitens is plaatsing en netwerkgrootte bepaald door een combinatie van factoren. Het netwerk van Vitens is door de jaren heen dynamisch gegroeid en dus niet vooraf ontworpen door middel van een doelgerichte ontwerpfase. Sensorlocaties zijn in eerste instantie geselecteerd op basis

van netwerkkennis van het waterbedrijf. Wel is de plaatsing van de sensoren herzien na een modelleringsexercitie, en is bij de uitbreiding van het netwerk die in 2016 plaatsvindt gebruik van modellering om de geschikte locaties voor de nieuwe sensoren te bepalen.
    - Bij PUB is het netwerk (25 sensoren) de eerste fase de aanleg van een groter netwerk. De locaties waar de sensoren in de eerste fase geïnstalleerd zijn dekken een geografisch sub-gebied af waar hoge prioriteit aan toekend is door het waterbedrijf.
    - Van de budget gedreven benadering, waarbij de optimale locaties voor de beschikbare sensoren vervolgens middels modelstudies worden bepaald bestaan verschillende voorbeelden, zoals uit de VS waar in de jaren na 9/11 uitvoerig is gekeken naar waterkwaliteitsmonitoring en een aantal kleinere netwerken werd aangelegd. Daar was het aantal sensoren doorgaans ingegeven door het budget in combinatie met het aantal hoofdpunten in het watersysteem (bijvoorbeeld waterzuiveringen) die bewaakt moesten worden. De locaties in het net werden hierbij vaak met een op EPANET gebaseerd model geoptimaliseerd. Netwerken werden in veel gevallen in de opvolgende jaren langzaam uitgebreid, waarbij de toe te voegen locaties bepaald werden op basis van een optimalisatiestrategie.
- *Goed sensoronderhoud verbetert prestaties en verlaagt kosten.* Wanneer een netwerk eenmaal geïnstalleerd is, worden de prestaties vaak beoordeeld aan de hand van onderhoud (kosten, up-time, kwaliteit van ondersteuning/support door leverancier) en door het aantal alarmsignalen dat het systeem afgeeft. Beide zijn zeer subjectief.
    - Onderhoudskosten zijn te kwantificeren, maar ook sterk afhankelijk van de manier waarop een waterbedrijf het onderhoud inplant. Zo kan preventief onderhoud in eerste instantie duurder lijken maar er wel toe leiden dat sensoren langer mee gaan (en dus kosten besparen).
    - Correct onderhoud leidt er ook toe dat het sensornetwerk beter zal presteren. Onvoldoende onderhoud leidt vaak (onterecht) tot de impressie dat sensoren niet goed functioneren. Het opbouwen van ervaring in het gebruik van sensoren is dan ook van belang, , en het gefaseerd opbouwen van een sensornetwerk (bij een klant die nog geen ervaring heeft) kan hierbij behulpzaam zijn.
- *Expertise data-analyse en interpretatie van alarmsignalen*. Vaak is de analyse van sensordata een uitdaging voor de eindgebruiker. Waterbedrijven hebben vaak (nog) niet de nodige expertise in huis en zijn afhankelijk van sensor leveranciers en externe experts voor dit soort werk. Bij toenemende toepassing van sensoren zal dit een steeds groter thema worden. Deze situatie leidt er momenteel toe dat de interpretatie van de gedetecteerde alarmen niet altijd mogelijk is. Dit kan ten nadele van de sensor werken, omdat bij twijfel snel gedacht wordt dat een sensor een vals alarm geeft, bijvoorbeeld omdat een gedetecteerde verandering niet direct verklaarbaar is op basis van de ervaring van het waterbedrijf. Echter, in veel gevallen is bij nader onderzoek een gedetecteerde verandering wel degelijk te herleiden tot een waterkwaliteitsvariatie. Het vertrouwen in de informatie die sensoren leveren moet opgebouwd worden, en is essentieel voor het operationeel gebruik van de sensoren door het waterbedrijf.

8 Discussie

8.1 Aandachtspunten bij toepassing van de prestatie-investeringsvuistregels

Het is van belang te beseffen dat de investeringsvuistregels voor sensornetwerken gepresenteerd in Hoofdstuk 6 benaderingen van de werkelijkheid zijn. Diverse aannames in de gevolgde methode kunnen tot afwijkingen van werkelijke prestaties en kosten leiden:

- Voor het nauwkeurig berekenen van prestaties moeten verontreinigingen op accurate manier door het leidingnet worden getransporteerd. Afwijkingen van de werkelijkheid kunnen het gevolg zijn van aannames in de hydraulische processen (verwaarlozing van diffusie, volledig mengen op leidingsplitsingen, inert stoftransport) en het netwerkmodel (afsluiterstanden, verbruikspatronen en leidingeigenschappen zoals wandruwheid, geografische ligging en diameter).
- Met de optimalisatieberekeningen is binnen de mogelijkheden een zo goed mogelijke benadering van alle mogelijke vervuilings- en sensornetwerkscenario's nagestreefd. Een aantal aannames zullen echter tot afwijkingen leiden: gebruik van 100 potentiële bron- en 300 potentiële sensorlocaties, 2 uur-durende vervuiling met begintijd 06:00 uur). De uitgevoerde gevoeligheidstest (Hoofdstuk 3) en eerdere onderzoeksresultaten (P. Van Thienen, 2014) maken het aannemelijk dat deze aannames niet tot onredelijke afspiegeling van de werkelijkheid leiden
- In de werkelijkheid kunnen sensoren driften, uitvallen en vals positieve of vals negatieve signalen afgeven. Deze zaken zijn niet meegenomen in de berekeningen, maar kunnen het presteren van een sensornetwerk negatief beïnvloeden.
- In het huidige onderzoek is uitgegaan van een leidingnet met een uniform verontreinigingsrisico. Het is aannemelijk dat sommige typen verontreinigingen zoals microbiologische nagroei zich zullen concentreren in specifieke deelgebieden, wat tot andere optimale sensorconfiguratie zal leiden. Voor een juiste bepaling van sensorlocaties is echter een goede inschatting nodig van risicogebieden.
- Indien gebruik wordt gemaakt van bestaande infrastructuur zal het aantal beschikbare sensorlocaties beperkt zijn. In werkelijkheid is dan een suboptimale prestatie te verwachten van het sensornetwerk, maar hierin is bij het opstellen van de prestatie-investeringscurves geen rekening gehouden. Deze invloed zou in kaart kunnen worden gebracht door de potentiële sensorlocaties voor te schrijven tijdens het optimaliseren.
- Zoals aangetoond in dit onderzoek, kunnen sensornetwerken van dezelfde sensordichtheid anders presteren, zelfs als de leidingnetwerken van hetzelfde type zijn (stedelijk/landelijk, vermazing, levering).
- De berekeningen voor het model Ypenburg zijn de behaalde prestaties bovengemiddeld hoog vanwege het grote aantal makkelijk detecteerbare verontreinigingen op aanvoerende leidingen.
- Kosten voor sensornetwerken zijn zo goed mogelijk ingeschat voor de huidige situatie. Mogelijkheden om (op termijn) gunstiger te investeren zijn o.a. opschaling van sensornetwerken (mogelijke kostenbesparing op bijvoorbeeld onderhoud of aanleg van meetlocaties), meervoudig gebruik van meetlocaties en technische innovaties die het goedkoper maken om meetlocaties in te richten.
- Kosten kunnen afwijken indien een ander type sensor dan de algemene waterkwaliteitssensor dan de Optiqua EventLab sensor wordt gebruikt. Er is

nagegaan dat de keuze van de gemodelleerde sensordetectielimiet ($1x10^{-6}$) geen substantiële invloed heeft op pakkansen.

8.2 Mogelijkheden voor toekomstige verbeteringen van investeringsvuistregels

De opgestelde investeringsvuistregels vormen een nuttig middel om zo concreet mogelijk verwachtingen te scheppen rond investeringen en prestaties van sensornetwerken. De vuistregels zijn onderhevig aan zekere mate van onnauwkeurigheid en toekomstige veranderingen, zoals in bovenstaande paragraaf beschreven. Om de vuistregels up-to-date te houden, te valideren en te verbeteren zijn de volgende mogelijkheden denkbaar:

De generieke toepasbaarheid van de vuistregels kan nader worden bepaald door aanvulling van de bestaande resultaten met berekeningen voor nog meer leidingnetmodellen en doelstellingen zoals detectietijd, bronbepaling, meervoudige pakkans, of het herkennen van het voedende pompstation. Naast het voorkómen van chemische verontreinigingen kunnen in principe ook investeringsrelaties kunnen worden berekend gericht op het beperken van microbiologische risico's.

In principe kunnen praktijkresultaten worden gebruikt om de vuistegels te toetsen aan de praktijk en waar nodig te herzien. Op dit moment wordt dit belemmerd door de afwezigheid van voldoende beschikbare praktijkgegevens. Ook blijven niet-gedetecteerde verontreinigingen in de praktijk onopgemerkt, waardoor praktijkprestaties niet één-op-één zijn te vergelijken met de berekende prestaties.

Toekomstige ontwikkelingen in sensortechnologie en schaalvoordelen kunnen resulteren in een kostenreductie ten opzichte van de huidige inschatting van kosten voor de inrichting van sensornetwerken. Deze ontwikkelingen dienen te worden verdisconteerd in toekomstige projecties.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

In dit onderzoek zijn investeringsvuistregels voor netwerken van waterkwaliteitssensoren ten behoeve van het bewaken van de waterkwaliteit in distributienetwerken opgesteld. Op basis van de resultaten is het volgende geconcludeerd:

- *Inzicht in prestaties*.
  - In de onderzochte gebieden zijn pakkansen in stedelijke gebieden hoger dan in landelijke gebieden. De hogere prestaties hangen samen met een hoog aantal aansluitingen per kilometer leiding en een hoge vermazingsgraad van het leidingnet.
  - Bovengemiddeld hoge pakkansen zijn berekend voor een scenario (model Ypenburg) waarin de hoogste verontreinigingskans op de voedende leidingen zijn gedefinieerd.
  - Onzekerheden in de berekende prestaties hangen samen met aannames in de gebruikte leidingnetmodellen, en aannames in het opstellen van verontreinigingsscenario's en stoftransport.
- *Inzicht in kosten*.
  - Het kostenmodel maakt inzichtelijk waar een waterbedrijf op moet letten bij het installeren van een sensornetwerk. Kosten voor sensor-hardware zijn daarbij niet de enige relevante kostenpost. Zo kan het inrichten van nieuwe meetstations substantiële kosten met zich meebrengen en zijn er terugkerende kosten voor operatie, onderhoud en vervanging van sensoren.
  - Schaalvergroting, het gebruik van meetstations voor meerdere doeleinden en toekomstige (sensortechnologische) innovaties kunnen leiden tot een voordeliger kostenplaatje dan voorgesteld in de gepresenteerde vuistregels.
- *Investeringsvuistregels*. De investeringsvuistregels leveren een kwantitatieve basis voor een business case-benadering voor sensorleveranciers (wetenschappelijk onderbouwd marketinginstrument) en waterbedrijven (beslissingsbasis voor investeringen in een sensornetwerk). Er moet rekening worden gehouden met enige onzekerheid in de vuistregels, maar in afwezigheid van voldoende praktijkgegevens, geven de vuistregels een houvast om toekomstige investeringen zo betrouwbaar mogelijk te onderbouwen.

9.2 Aanbevelingen voor implementatie van investeringsvuistregels

Voor het toepassen van de vuistregels ten behoeve van advies en beslissen in investeringen in netwerken van waterkwaliteitssensoren zijn de belangrijkste aanbevelingen:

- Toepassen van de investeringsvuistregels door sensorleveranciers en waterleidingbedrijven draagt bij aan een beter onderbouwde strategie rond investeringen en inrichting in netwerken van waterkwaliteitssensoren. Daarbij moet een waterbedrijf zich de volgende zaken afvragen: wat zijn de doelstellingen en gewenste opbrengsten van het sensornetwerk, wat zijn financiële randvoorwaarden, kan/wil het sensoren op bestaande (goedkoop, maar beperkt in aantal en plaatsingsvrijheid) of nieuwe (duur maar flexibel) locaties installeren en wat zijn de eigenschappen van het leidingnet (stedelijk/landelijk, totale leidinglengte).

- Het is van belang om de vuistregels up-to-date te houden en verder te generaliseren door middel van (i) aanvulling met nieuwe berekeningen (andere netwerken, meer doelstellingen), (ii) aanpassing van het kostenmodel naar aanleiding van relevante toekomstige ontwikkelingen en (iii) validatie met praktijkgegevens van geïnstalleerde sensornetwerken indien deze in de toekomst beschikbaar komen. Waterleidingbedrijven, sensorleveranciers en KWR kunnen van elkaar leren door kennis en ervaring uit te wisselen rond investeringen en prestaties van sensornetwerken en de vuistregels bieden hiervoor een hulpmiddel.
- Idealiter wordt de methode gepresenteerd in dit rapport voor elk sensornetwerk op maat gemaakt met een inventarisatie van prestaties en kosten. Zo'n analyse kost echter de nodige tijd en expertise: Een betrouwbaar hydraulisch model moet beschikbaar zijn en een aantal sensornetwerken van verschillende grootte moeten worden geoptimaliseerd middels rekenintensieve numerieke simulaties.
- Het huidige onderzoek toont dat de structuur van een leidingnet van invloed is op de opbrengst van een sensornetwerk, in dit geval de pakkans van waterkwaliteitsverontreinigingen. Opvallend is de hogere pakkans in stedelijke ten opzichte van landelijke gebieden, alsmede een hoge pakkans indien een beperkt aantal leidingen een relatief groot deel van het besmettingsgevaar vormen (model Ypenburg). In toekomstig werk kan worden onderzocht in hoeverre de opbrengsten van een sensornetwerk zijn te verhogen door het leidingnetwerk aan te passen (bijv. middels afsluiterstanden of de structuur van het leidingnetwerk). Nieuwe inzichten in het maximaliseren van de opbrengsten van een sensornetwerk zijn mogelijk relevant voor integratie in de bedrijfsvoering en in het ontwerp van streefstructuren.

Literatuur

De Graaf, B. R., Williamson, F., Klein Koerkamp, M., Vehoef, J.W., Wuestman, R., Bajema, B., Trietsch, E., Van Delft, W. (2012). Implementation of an innovative sensor technology for effective online water quality monitoring in the distribution network. *Water Practice & Technology, 7*(4).

Shang, F., Uber, J. G., Rossman, L. (2008). EPANET Multi Species Extension Software. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.

Van den Broeke, J. (2015). *Compendum of sensors and monitors and their use in the global water industry*: IWA Publishing.

Van Summeren, J. (2014). Numerieke valdatie van backtracingberekeningen voor het bepalen van verontreinigingsbronnen in drinkwaterdistributiesystemen: KWR Watercycle Research Institute.

Van Thienen, P. (2014). Strategieën voor optimale plaatskeuze van waterkwaliteitssensoren in het distributienet: KWR Watercycle Research Institute.

Van Thienen, P., De Graaf, B., Van de Roer, M., Schaap, P., Sperber, V. (2014). Sensoring van waterkwaliteit in het distributienet: een rationele benadering. *H2O-Online*(22 oktober 2014).

Bijlage I

Enquête waterbedrijven

Inleiding

In deze Bijlage zijn de vragen voor en antwoorden van de waterbedrijven opgenomen. Een interpretatie van de vragenlijsten zijn te vinden in Hoofdstuk 2.

Vragen aan waterbedrijven

Let op: Het is de bedoeling vraag 2 t/m 5 in de tabel te beantwoorden. Om een indruk te geven is één voorbeeldmogelijkheid in de tabel in rood ingevuld.

1. Geef kort aan wat de bedrijfsvisie is op het gebied van sensoring. Welke toekomstige sensortoepassing worden nagestreefd? Op welke gebieden kan beter gebruik van (netwerken van) sensoren meerwaarde bieden?

2. Zet in de tabel onder elkaar één of meerdere relevante doelstellingen waarbij het (toekomstig) gebruik van sensoren een rol speelt. Beperk u daarbij tot oplossingen voor waterkwaliteitsproblemen. Dit mag heel concreet, maar ook op een hoger abstractieniveau wanneer concrete ideeën nog niet voldoende zijn uitgekristalliseerd.

3. Geef voor elk van de genoemde doelstellingen uit vraag 2 aan

a) Of er op dit moment al sensoren en/of sensortechnieken worden ingezet. Zo ja, op welke manier?
b) Hoe kan sensoring worden in de toekomst ingezet (of verbeterd) om de doelstelling (beter) te verwezenlijken?
c) Wat zijn mogelijke nadelen of obstakels om deze verbeteringen te implementeren?

4. Geef voor elke doelstelling ook aan welke eisen dit stelt aan het sensornetwerk:

a) Welke typen (combinaties van) sensoren zijn nodig?
b) Wat is de benodigde meetfrequentie?
c) Wat is de benodigde meetnauwkeurigheid?

5. Mogelijk andere opmerkingen of overwegingen bij de doelstellingen?

6. Wat zijn voor het waterbedrijf relevante structuren van het leidingnetwerk om de prestaties van sensoren in te toetsen? Bij voorkeur kaarten van typische leidingnetwerken meesturen waarin het bedrijf sensoren wil toepassen.

7. Zijn er zaken die nog niet aan bod zijn geweest, maar mogelijk wel relevant zijn voor het doel van deze vragenlijst (selecteren van relevante sensoren, sensornetwerkstructuren en doelstellingen van netwerken van waterkwaliteitssensoren)?

Reactie Dunea

1. Steeds kleinere en slimmere online meetinstrumenten maken het mogelijk onze drinkwaterprocessen te monitoren en te optimaliseren. Dunea moet deze ontwikkelingen nauwlettend volgen en implementatie overwegen als de toepassing ervan aantoonbaar leidt tot een betere en effectievere bedrijfsvoering. (bron bedrijfsstrategie koers 2015 Dunea)

	Dunea
2. Doelstelling	De waterkwaliteit in het distributienet goedkoper monitoren (kosten)
	Meer inzicht te verkrijgen in de waterkwaliteit dan de reguliere steekmonsters. Een beter beeld te hebben van de waterkwaliteit in het distributienet , waardoor processen (zuivering en leidingnet) beter ingericht kunnen worden. (prestaties)
	De incidenten (besmettingen) in het distributienet beter te beheersen door (risico's): • De pakkans van besmettingen in het distributienet te vergroten door continue te monitoren • De detectietijd te verkorten door besmettingen eerder te ontdekken • De oorzaak of bron van de besmetting te herleiden • beter inzicht in de locatie en verspreiding van een verontreiniging
3a. Huidige sensoring	Troebelheidsmetingen, geleidbaarheid, temperatuur, zuurgraad (pH), hardheid en zuurstof van het gezuiverde water af pompstation. Troebelheidsmetingen in distributienet (tijdelijke OPM metingen) Druk- en debietmetingen in het distributienet.
3b. Mogelijke verbeteringen in toekomst	Vervanging van (of aanvulling op) wettelijk verplicht meetprogramma Introductie van goedkopere sensoren in aanschaf, installatie en onderhoud, bv • Compacter • Zelfvoorzienend in stroom • Weinig onderhoud • Eenvoudige aansluiting op het leidingnet Sensoren die 'alles' kunnen meten
3c. Obstakels voor toepassing	• Extra investering nodig • Extra capaciteit medewerkers nodig • beschikbaarheid adequate sensoren • onderhoud sensoren en calibratie • voldoende robuust, vandalisme proof
4a. Type sensoren	Besmettingen: microbiologische sensoren, hoge betrouwbaarheid. Sensoren met een breed spectrum aan (toxische) stoffen.
4b. Meet-frequentie	Afhankelijk van het debiet en het aantal aansluitingen in de leiding
4c. meetnauwkeurigheid	Vergelijkbaar met laboratoriummetingen (als dit een vervanger is voor de wettelijke metingen) Voldoende gevoelig om bedrijfsnormen en normen Drinkwaterbesluit te toetsen
5. Overige opmerkingen	Geen

6. -

7. -

Reactie Evides

1. Er is (nog) geen sprake van een concreet geformuleerde visie. Wel hebben we projecten lopen om beter inzicht te krijgen in wat er precies in het leidingnet gebeurt, zowel kwantitatief als kwalitatief. Directe aanleiding vormen de nagroeiproblemen die we ervaren. Ook spelen er bruin/zwart water problemen (blijkbaar beschrijven onze OPM-metingen onvoldoende de werkelijke vervuiling van het net).

We begrijpen de achterliggende mechanismen nog onvoldoende, laat staan dat we zicht hebben op adequate oplossingen. In dat kader is de behoefte aan meetgegevens sterk groeiende.

Overigens verwachten we dat een goed inzicht in de kwantitatieve kant van wat er in het leidingnet gebeurt (debiet en druk) helpt bij het begrijpen van wat er in kwalitatieve zin gebeurt.

2. Doelstelling	**Begrijpen nagroei mechanisme**	**Grip krijgen op bruin/zwart water**
3a. Huidige sensoring	Vooral online druk en debiet (ruim 100 meetpunten). Op beperkte schaal ook temperatuur en zuurstof (minder dan 10). Daarnaast geleverde hoeveelheden bij 600 grote klanten (24 uurwaarden die eens per dag binnenkomen)	OPM-metingen Maar: - we weten onvoldoende welke delen van het net vervuild zijn. - we begrijpen onvoldoende waarom vuil zich verzamelt op de plekken waar het ligt.
3b. Mogelijke verbeteringen in toekomst	Bij grote klanten ook druk en temperatuur gaan meten (op kwartierbasis, 1x per dag gegevens verzenden). Zuurstof blijkt uitstekende tracer te zijn. Gaan we mogelijk meer mee doen, ook met mobiele meetopstellingen. Nog weinig ervaring met andere kwaliteitsensoren.	OPM-nieuwe stijl? Werken we aan, samen met KWR.
3c. Obstakels voor toepassing	- nog onvoldoende inzicht in mechanismen om te kunnen aangeven of online meten nuttig/nodig is. - nog weinig kennis en kunde op gebied van kwaliteitssensoren in huis - onze insteek: inzicht krijgen in kwantitatief beeld loopt voor op inzicht in kwaliteit	Beschikbare capaciteit bij relevante afdelingen.
4a. Type sensoren	We hebben nu in het net: debiet/hoeveelheden, druk, temperatuur, zuurstof. Die zullen we behouden en verder uitbreiden. Het is nog niet duidelijk welke sensoren relevant zouden zijn in het kader van het gaan begrijpen van nagroei.	Op dit moment: - niets online - OPM-metingen - tijdens spuien troebelheid meten Als we weten wat de hotspots zijn (waar vuil zich verzamelt), is het de vraag of je nog veel moet meten. Weten we nu nog niet.
4b. Meet-frequentie	Huidige meetfrequentoe: elke 10 seconden voor online metingen, elk uur bij grote klanten. Voor toekomstige sensoren: nog niet bekend.	Nvt
4c. meetnauwkeurigheid	Met name qua debiet/hoeveelheden is dat een gevoelig punt. Vaak te grote meters, veel relatief onnauwkeurige clamp-on meters en lage stroomsnelheden.	Onbekend
5. Overige opmerkingen	De urgentie om nagroei beter te begrijpen en er grip op te krijgen is groot. Er gaat dus veel energie en geld heen.	-

6. He hebben 2 pilotgebieden: Delft en de wijk Hillegersberg in Rotterdam Noord. Als het zinvol is kan ik uiteraard leidingnetkaarten aanleveren.

7. Op dit moment niet.

Reactie Vitens

1. Het Vitens laboratorium wil zich de aankomende 5 jaar gaan profileren als "sensor hot spot" van de proeftuin. M.a.w. er is een traject van een proof of concept (POC) naar implementatie naar de proeftuin, hiertussen wil het lab zich profileren. Vitens gaat binnen het EU project Smart Water 4Europe meerdere sensoren uittesten in de proeftuin met als doel een online bewaking van de waterkwaliteit. Het TKI project helpt ons inzichtelijk te maken hoeveel en waar we de sensoren het beste kunnen plaatsen voor een optimale bewaking van de water kwaliteit tegen zo laag mogelijke kosten. Ook besparing op energiekosten speelt een rol, door een optimale flow/druk te realiseren voor minimale benodigde druk .Er is nu vaak overduk op de leidingen

Vitens				
2. Doelstelling	Proces bewaking	Bewaken microbiologische stabiliteit	lekdetectie	Bepalen Optimale flow die noodzakelijk is voor hoeveelheid water voor energiebesparing
3a. Huidige sensoring	Nvt, behalve in de proeftuin S::CAN Optiqua	Nvt Inzichtelijk maken welke sensoren goed zijn (bijvoorbeeld Aquascope/Zebra/bactiquant etc).	Nvt, behalve in de proeftuin	nvt
3b. Mogelijke verbetering en in toekomst	Verandering in het productie proces zullen snel opgemerkt worden, bijvoorbeeld het doorslaan van een filter etc	Resultaat aantal uur na monstername ipv 12-72 uur. Sterk verbeterde proces bewaking	Snelle opsporing van lek door veranderde druk meting	Energie besparing
3c. Obstakels voor toepassing	-Data handling (big data). -Driften van sensoren -Hoge investeringskosten	-Data interpretatie (wat zegt een verhoogd kiemgetal?) -	-Hoeveel sensoren moet je plaatsen om dit snel te kunnen detecteren.	Inzicht in noodzakelijk parameters (hoeveel flow nodig, nu vaak overdruk etc).

			-Spookleidingen	
4a. Type sensoren	-Brekingsindex -Druk -pH -geleiding -Flow -chemische componenten	-Enzymatische indicator (bactiquant) -Optisch (totaal kiemgetal of specifiek fecale besmetting)	-optiqua -S::CAN -Intellitect	S::CAN en/of Intellitect
4b. Meet-frequentie	online	Aantal keer per dag	online	online
4c. meetnauwkeurigheid	Wettelijke parameters	-1-100 ml meten voor totaal kiemgetal, -1 e.coli/100ml voor fecale indicator -1 keer per dag voor enzymatische activiteit	Wettelijke parameters	Bepalen wat de optimale waarde is.
5. Overige opmerkingen	geen	geen	geen	geen

6. -

7. -

Reactie WMD

1. WMD zet in op n ieder geval druk en debiet metingen in het leidingnet, voor optimale levering. Mogelijk (in later stadium?) ook temperatuur en troebelheid. De inzet van sensoren voor waterkwaliteitsmetingen of metingen aan leidingmateriaal (tbv leidingfalen) verwachten wij niet op korte termijn in te kunnen zetten,

2. Doelstelling	**Optimaliseren bedrijsvoering**	**Signaleren vervuiling leidingnet**	**“Hot”spots: waar zitten ze**
3a. Huidige sensoring	Enkele continue drukmetingen in het net	Klant	klant
3b. Mogelijke verbeteringen in toekomst	Inclusief debiet, temperatuur en troebelheid	Continue metingen op diverse plekken	Continue metingen op diverse plekken
3c. Obstakels voor toepassing	Investering Big data	Investering	investering
4a. Type sensoren		Troebelheid	Temp
4b. Meet-frequentie			
4c.			

meetnauwkeurigheid			
5. Overige opmerkingen			

6. -

7. -

Bijlage II

Enquête sensorleverancier

In deze Bijlage zijn de vragen voor en antwoorden van de sesnorleverancier opgenomen. Een interpretatie van de vragenlijsten zijn te vinden in Hoofdstuk 2.

Vragenlijst en antwoorden Optiqua

Type sensor	**Spectrometer**	**Spectrometer**	**Optische sensor**
Naam sensor	i::scan	Spectro::lyser	Optiqua EventLab
Grootheid	Troebelheid	Troebelheid / vaste stoffen	1. Brekingsindex 2. Alarm waarde (resultaat van algoritmen die veranderingen in de waterkwaliteit analyseren)
Eenheid			1. Zonder eenheid 2. Zonder eenheid
Meetbereik (minimum, maximum)		1:10000	1. - Oneindig tot + oneindig 2. 0 – 100
Meetnauwkeurigheid	0,001 NTU		1. 0.001 2. 0.001
Hoogst haalbare meetfrequentie			1 x per minuut
Kosten voor levering	vanaf € 3350 voor alleen de sensor	Vanaf € 14.000 voor alleen de sensor	Prijs is afhankelijk van het aantal sensoren in het geplaatste netwerk.
Kosten voor installatie	Afhankelijk van installatie	Afhankelijk van installatie	Variabel. Benodigde infrastructuur: water aansluiting, water afvoer (drain) en elektriciteit. Kosten hangen dus af van de aanwezigheid hiervan. Indien voorhanden, zijn er alleen kosten voor aansluiting aan elektriciteit en water (i.e. slang en stroomkabel), < 10 Euro.
Opmerkingen aangaande operatie, onderhoud en vervanging	- Eenvoudige installatie - Alleen te gebruiken icm een terminal/controller - Weinig / geen ondehoud	- Eenvoudige installatie - Alleen te gebruiken icm een terminal/controller - Weinig / geen ondehoud	- Systeem wordt geïnstalleerd in doorstroom-cel, voordruk min. 2 bar, max 15 bar, doorstroom 0.1 – 0.5 L/min - Robuuste sensor met ingebouwde temperatuur correctie, geen chemicaliën nodig, onderhoud alleen periodieke handmatig reiniging (eens in de 3 – 6 maanden afhankelijk van de watersamenstelling - Levensduur: sensor probe 1 jaar,

			control unit >5 jaar
Benodigde expertise voor gebruik en onderhoud	Basis training	Basis training	Personeel getraind door Optiqua, geen specifieke expertise nodig
Overige opmerkingen aangaande sensor	Deze sensor kan alleen gebruikt worden icm s::can terminals	Deze sensor kan alleen gebruikt worden icm s::can terminals	Zie bijgevoegd specificatieblad en informatieblad sensor plus recent gepubliceerde artikelen met resultaten, o.a. uit de Vitens Innovation Playground..
Leverancier	Interline Systems	Interline Systems	Optiqua

Bijlage III Gevoeligheidsanalyse

REPRODUCEERBAARHEID VAN OPTIMALISATIEBEREKENINGEN

Om te onderzoeken hoe gevoelig de berekeningen zijn voor bepaalde aannames zijn een aantal gevoeligheidstests uitgevoerd. Om de robuustheid van de oplossing na te gaan is een standaardberekening 5 maal nagerekend (doelstelling: pakkans, netwerk Oostburg, 10 sensoren, 300 potentiële sensorlocaties, 100 verontreinigingslocaties). Uit de resultaten blijkt dat geoptimaliseerde sensorconfiguraties onderling verschillen, hoewel de geoptimaliseerde sensorlocaties in alle gevallen gelijkmatig verspreid zijn over het leidingnetwerk. Berekende pakkansen komen goed overeen (pakkansen van 0,31-0,32,) en deze kleine verschillen maken het aannemelijk dat berekende prestaties robuust zijn en slechts in beperkte mate afhangen van de optimalisatieprocedure, onder de gekozen instellingen en randvoorwaarden van de berekeningen.

INVLOED VAN HET AANTAL BESMETTINGSBRONNEN EN POTENTIËLE SENSORLOCATIES

Om de invloed van het aantal potentiële besmettingslocaties en sensorlocaties (standaardwaarden c=100, s=300, zie paragraaf 3.2 voor motivatie) te onderzoeken, zijn twee gevoeligheidstests uitgevoerd. Voor de test waarbij het aantal potentiële besmettingslocaties is verdubbeld (c=200), is de berekende pakkans (0,31) vergelijkbaar met de referentie-berekeningen met c=100 (pakkans 0,314, gemiddeld over 5 berekeningen). Een lagere pakkans is te verklaren omdat het met meer bronnen gemiddeld genomen moeilijker zal zijn om met een eindig aantal sensoren alle besmettingen te detecteren. In een andere gevoeligheidstest is het aantal potentiële sensorlocaties gereduceerd van s=300 tot s=100. De berekende pakkans is 0,32.

De berekende waarden vallen binnen de variatie van de 5 referentiemetingen. Dit wijst erop dat de keuze van het aantal potentiële bron- en sensorlocaties geen substantiële invloed heeft op de berekende prestaties.

TABEL 4. BEREKENDE PAKKANSEN VOOR GEOPTIMALISEERDE NETWERK VAN 10 SENSOREN VOOR HET LEIDINGNET VAN OOSTBURG. AFWIJKENDE WAARDEN VAN MODELPARAMETERS TEN OPZICHT VAN DE REFERENTIEWAARDEN ZIJN VERGEDRUKT.

	Aantal besmettings-locaties	Aantal potentiële sensorlocaties	Detectielimiet (referentie-waarde: $1x10^{-6}$)	Pak-kans
Referentieberekening a	100	300	$1x10^{-6}$	0,31
Referentieberekening b	100	300	$1x10^{-6}$	0,31
Referentieberekening c	100	300	$1x10^{-6}$	0,32
Referentieberekening d	100	300	$1x10^{-6}$	0,32
Referentieberekening e	100	300	$1x10^{-6}$	0,31
Lage detectielimiet	100	300	**0**	0,31
Hoge detectielimiet	100	300	**$1x10^{-3}$**	0,32
Hoger aantal besmettingslocaties	**200**	300	$1x10^{-6}$	0,31
Lager aantal potentiële sensorlocaties	100	**100**	$1x10^{-6}$	0,32

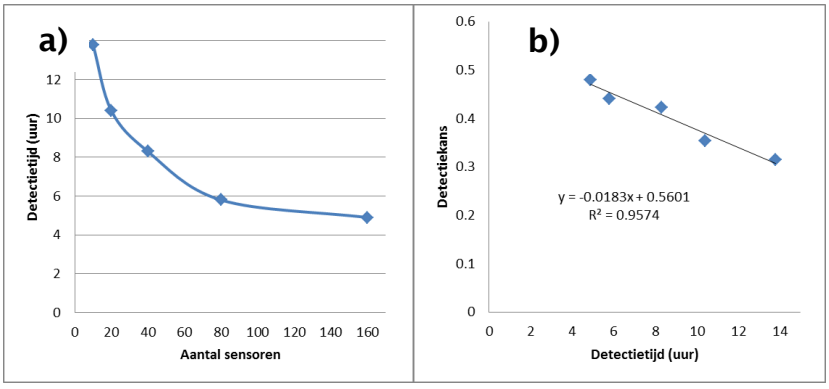
DETECTIELIIMET VAN SENSOREN

De standaard sensordetectielimiet is gesteld op $1x10^{-6}$, oftewel een concentratie van 1 mg/l, gebaseerd op de detectielimiet van Optiqua EventLab sensoren. Omdat verschillende typen sensoren een andere detectielimiet zullen hebben, is het van belang te bepalen welke invloed de detectielimiet heeft. Daarom zijn twee berekeningen uitgevoerd met hogere ($1x10^{-3}$) en lagere (0) detectielimiet. Voor oplopende detectielimiet zijn de resultaten 0,314; 0,314 en 0,324 (). De variatie in pakkans valt binnen de variatie die is waargenomen bij herhaalde, identieke berekeningen (zie kopje “Reproduceerbaarheid van optimalisatieberekeningen” hierboven). De keuze voor de waarde van de detectielimiet lijkt geen substantiële invloed op de berekeningen te hebben.

VERGLIJKING PAKKANS EN DETECTIETIJD

Hoewel de nadruk in dit onderzoek op de pakkans van verontreinigingen ligt, is een sensornetwerk te optimaliseren voor ook andere doeleinden. Voor het leidingnetmodel van Oostburg is onderzocht hoe gemaximaliseerde pakkansen zich verhouden tot geminimaliseerde tijd tot eerste sensorrdetectie vanaf het moment van begin van de verontreiniging. Ook de detectietijden tonen een convergent gedrag (a): een toename van het aantal sensoren resulteert in een steeds kleinere afname van de minimale detectietijd. In b is te zien dat er in het onderzochte gebied een bij benadering lineair verband is tussen detectietijd en pakkans. (NB. Het is te verwachten dat de lineariteit ophoudt te bestaan bij erg hoge of erg lage aantallen sensoren[4]).

Deze lineaire afhankelijkheid tussen prestaties is van belang omdat opgestelde investeringsvuistregels voor een netwerk dat is geoptimaliseerd voor maximale pakkansen (Hoofdstuk 6) direct zijn te vertalen naar vuistregels voor detectietijden. Deze verbanden zijn mogelijk verschillend voor verschillende netwerken en niet zonder meer toe te passen op andere (typen) leidingnetwerken of andere doelstellingen.



FIGUUR 9. PRESTATIES VOOR LEIDINGNETMODEL OOSTBURG. A) TIJD TOT EERSTE DETECTIE NA START VAN VERONTREINIGING. B) VERBAND TUSSEN DETECTIETIJD EN DETECTCIEKANS. PARAMETERWAARDEN VOOR LINEAIRE FIT ZIJN AANGEGEVEN.

[4] In de limiet naar een oneindig aantal sensoren is een pakkans gelijk aan 1 en de detectietijd aan 0 te verwachten. In de limiet naar nul sensoren is te verwachten dat de pakkans naar 0 gaat en de pakkans naar de maximale verblijftijd (96 uur). Beide limietgevallen wijken af van het voorgestelde lineaire verband.