

Sensoring van waterkwaliteit in het distributienet: een rationele benadering

Peter van Thienen (KWR), Bendert de Graaf (Vitens), Maurice van de Roer (Dunea), Peter Schaap (PWN) en Veerle Sperber (Brabant Water)

Het gebruik van waterkwaliteitssensoren in het drinkwaterdistributienet kan voordelen bieden voor klantbescherming en procesbeheersing, maar om dat goed te kunnen beoordelen moeten ze op grote schaal worden ingezet. Zolang die voordelen echter niet zijn bewezen, gaan waterbedrijven er niet op grote schaal in investeren. Inmiddels zijn er gereedschappen ontwikkeld waarmee de bedrijven vooraf kunnen inschatten wat de prestaties en kosten van sensoren zullen zijn, zodat ze de beslissing om sensoren te gaan inzetten daarop kunnen baseren.

De kwaliteit van ons drinkwater wordt gemeten door steekproefsgewijs monsters te nemen van het uitgaande reine water bij productielocaties en bij de klant aan de tap. Deze monsters worden in een laboratorium geanalyseerd. In het traject tussen de productielocatie en de klant vindt (meestal) geen bewaking plaats, terwijl ook hier relevante veranderingen van de waterkwaliteit kunnen optreden. Monitoring op strategische punten in het leidingnet met behulp van sensoren geeft online zicht op de waterkwaliteit tijdens distributie en nabij de tap, en niet, zoals nu het geval is, pas enkele dagen na levering en/of op slechts enkele locaties. Sensoren kunnen daarnaast ook in het net worden geplaatst ter controle en beheersing van de bedrijfsvoering.

Internationaal gezien hebben waterbedrijven uiteenlopende redenen om sensoren in hun netwerken te willen toepassen. Een Australisch overzicht is weergegeven in tabel 1. In de VS en Europa wordt relatief veel belang gehecht aan de detectie van afwijkingen, vanwege respectievelijk angst voor terrorisme en het veelvuldig gebruik van rivierwater. Niet in dit overzicht genoemde, maar voor Nederlandse drinkwaterbedrijven eveneens relevante redenen zijn de wens om klanten te informeren, vooruitstrevendheid van een drinkwaterbedrijf (kwaliteit en imago) en het verkrijgen van meer inzicht in de processen die optreden in het netwerk.

Tabel 1. Belangrijkste redenen voor sensing in de productie en distributie van drinkwater voor Australische waterbedrijven [1]

<i>Driver</i>	<i>Respondenten (%)</i>
Procesbeheersing en -optimalisatie	100
Regelgeving/toezicht	77
Detectie van anomalieën	60
Veiligheid (van medewerkers)	34
Bescherming van infrastructuur	25
Planning	15
Onderhoud	2

Enkele Nederlandse drinkwaterbedrijven experimenteren met waterkwaliteitssensoren in hun distributienetten, maar de meeste hebben er vooralsnog geen in hun netwerken geplaatst. Een belangrijke reden hiervoor is dat het hen nog onduidelijk is wat deze sensoren nou echt gaan opleveren. Zo is er sprake van een kip-en-ei-situatie: de werkelijke opbrengsten zullen pas echt duidelijk worden bij grootschalige implementatie, maar zonder duidelijk beeld van deze opbrengsten gaan waterbedrijven niet over tot investeringen. Ook zijn de waterbedrijven onzeker over de kosten en inspanningen (installatie, beheer, datamanagement, respons op geconstateerde anomalieën, etc.) die een netwerk van waterkwaliteitssensoren met zich meebrengt. In dit artikel zetten wij uiteen hoe de opbrengsten van een sensornetwerk kunnen worden voorspeld, en geven hiermee handvatten voor het ontwikkelen van een visie op sensing voor drinkwaterbedrijven.

Externe en interne ontwikkelingen

De in tabel 1 genoemde redenen voor sensing gelden voor de huidige situatie. Diverse externe en interne ontwikkelingen zullen voor aanvullingen en verschuivingen in deze lijst zorgen.

Externe ontwikkelingen

Externe ontwikkelingen zijn dat er meer en betere sensoren zullen komen, die specifiek en juist breder (zogenaamde combinatiesensoren) kunnen zijn. Deze ontwikkeling is volop gaande. Bovendien zullen sensoren naar verwachting goedkoper worden. De opkomst van mobiele systemen stelt drinkwaterbedrijven in staat om veel gerichtere informatie te vergaren, bijvoorbeeld bij incidenten of in een roulatiesysteem (regelmatige wisseling van sensorlocaties). Wat betreft regelgeving en toezicht is het te verwachten dat de groei van mogelijkheden om te meten op de middellange tot lange termijn ook zal leiden tot een bijstelling of zelfs toename van normen. Wanneer online-sensoren dure en tijdrovende bemonsteringen en labanalyses kunnen vervangen, zullen het Drinkwaterbesluit en gerelateerde ministeriële regelingen moeten worden aangepast om dit wettelijk ook mogelijk te maken. Onze toenemende kennis over nieuwe stoffen in het ruwwater en hun mogelijke gezondheidseffecten zullen op termijn wellicht ook leiden tot nieuwe normen en meetverplichtingen. Op dit moment is het nog onduidelijk of er veel van dergelijke specifieke stoffen met sensoren kosteneffectief te meten zijn.

Interne ontwikkelingen

Ook binnen de drinkwaterbedrijven zijn relevante ontwikkelingen gaande. Doordat het distributienet veroudert, neemt de kans op het binnendringen van ongewenste stoffen toe. Waterbedrijven gaan jaarlijks steeds grotere delen van het net saneren, maar vooralsnog resulteert dit niet in een gemiddelde verjonging van de netwerken. Bovendien leidt die snellere sanering zelf ook weer tot een toename van het besmettingsrisico, doordat het netwerk vaker open wordt gemaakt. Dit gegeven kan aanleiding zijn voor intensivering van de monitoring van zowel de conditie van leidingen als de waterkwaliteit tijdens transport en distributie. Veel drinkwaterbedrijven zijn bovendien bezig om hun besluitvormingsprocessen meer op data en minder op ervaring en inzicht te baseren ('van ambacht naar datagestuurd'). Het beleid met betrekking tot alles wat zich in het netwerk afspeelt, verandert zo van reactief naar pro-actief. Hiervoor zijn meer data nodig, en sensing kan die bieden.

Ontwerp en evaluatie van prestatie

Om de prestatie van een sensornetwerk in harde getallen te kunnen uitdrukken, kan gebruik worden gemaakt van (numerieke) modellen. Deze beschouwen achtereenvolgens:

1. introductie van besmettingen volgens realistische scenario's: combinaties van mogelijke locaties, aanvangstijdstippen en tijdsduren van toediening;
2. transport van besmettingen door het distributienetwerk: hydraulische modellen;
3. detectie door modelsensoren: concentratie-sensorrespons;

en eventueel ook nog:

4. model voor respons van waterbedrijf: tijdsduur van eerste detectie tot stilleggen van de consumptie;
5. model voor effect van besmetting op consumenten: consumptie- en dosisberekening, dosis-effectberekening.

Met de eerste drie stappen kan worden voorspeld welk deel van een besmettingsscenario door een sensornetwerk zal worden opgepikt, hoe lang dat duurt, en welk deel van de bevolking mogelijk in aanraking komt met de besmetting. Met de twee laatste kan worden ingeschat hoe groot de blootstelling aan de besmetting is, en wat de mogelijke gezondheidseffecten zijn. In alle stappen worden aannames en onzekerheden geïntroduceerd.

Op deze manier is het goed mogelijk om de prestatie van een sensornetwerk te evalueren vóórdat het daadwerkelijk wordt geïnstalleerd, en te bepalen wat de optimale configuratie is (zie kader 1). Door de verschillende aspecten van een sensornetwerk tegen elkaar af te wegen, krijgt men een realistisch verwachting van de opbrengsten ervan.

Succescriteria

Er zijn ook andere factoren die de waarde en het succes van een sensornetwerk in de praktijk bepalen. Kroll en King [2] beschouwen sensorsystemen voor de detectie van anomalieën in de waterkwaliteit in het distributienetwerk (EDS: event detection systems) in brede zin. Zij doen dit vanuit een militaire achtergrond, maar met de drinkwatervoorziening als toepassing in gedachten. Zij hebben een lijst van succescriteria voor EDS opgesteld, die samengevat is weergegeven in tabel 2. Deze zijn onder te verdelen in vijf categorieën:

1. *Toegevoegde waarde op twee fronten*: door naast de detectie van (zeldzame) serieuze anomalieën ook voor dagelijks gebruik nuttige informatie te leveren (bijvoorbeeld voor procesoptimalisatie of het opbouwen/versterken van het consumentenvertrouwen) kan de investering eerder worden terugverdiend. Een sensornetwerk moet meerdere opbrengsten tegelijkertijd leveren om rendabel te zijn.
2. *Vereisten voor gewenste detectieklasse*: er zijn drie detectieklassen voor waterkwaliteitssensorsystemen, namelijk *behandeling*, *bescherming* en *waarschuwing*. De eerste klasse omvat zeer betrouwbare systemen, waarop direct behandeling van blootgestelde personen kan worden gebaseerd. De tweede klasse omvat betrouwbare systemen, op basis waarvan maatregelen kunnen worden genomen om verdere blootstelling van de bevolking te beperken. De derde klasse omvat minder betrouwbare systemen, die worden gebruikt om blootstelling van de bevolking te beperken terwijl aanvullende tests worden uitgevoerd. Op het ogenblik vallen alle systemen in deze klasse, vanwege technische redenen en bestaande wettelijke kaders.

3. *Dekkingskarakteristieken*: de mate waarin informatie over het gehele netwerk beschikbaar komt.
4. *Operationele karakteristieken*: de mate waarin het systeem effectief door mensen kan worden gebruikt.
5. *Prestatiekarakteristieken*: er zijn diverse deelaspecten die het uiteindelijke succes van het systeem mede beïnvloeden.

Tabel 2. Succescriteria voor sensorsystemen in distributienetwerken volgens Kroll en King [2]

1. Toegevoegde waarde op twee fronten		
2. Vereisten voor gewenste detectieklasse		Van de derde naar de eerste klasse nemen in de regel de kosten toe en neemt de reactietijd af.
3. Dekkingskarakteristieken	<i>Kosten</i>	onvolledige dekking door budgettaire beperkingen
	<i>Beschermingsgebied</i>	onvolledige bescherming t.g.v. hydraulica en logistiek
	<i>Communicatie</i>	betrouwbare informatieoverdracht van meetpunten richting controlecentrum
4. Operationele karakteristieken	<i>Gebruiksgemak</i>	goed bruikbaar voor operationeel personeel in crisissituaties
	<i>Mate van automatisering</i>	Menselijk ingrijpen is alleen wenselijk ten behoeve van onderhoud en reparatie.
	<i>Continuïteit van werking</i>	geen onderbrekingen waar besmettingen doorheen kunnen glijpen
	<i>Betrouwbaarheid</i>	
	<i>Kosteneffectiviteit</i>	kosten vergelijkbaar of minder dan die van het reguliere monsterprogramma.
5. Prestatiekarakteristieken	<i>Breed spectrum</i>	idealiter alle essentiële categorieën van stoffen
	<i>Snelle reactietijd</i>	in relatie tot levering schadelijke dosis bij de klant
	<i>Specificiteit</i>	onderscheid tussen stofklassen o.b.v. verschillende sensoren
	<i>Reproduceerbaarheid</i>	
	<i>Weinig fout-positieven en fout-negatieven</i>	definitie acceptabele frequentie van fout-positieve metingen; aantal fout-positieve metingen > aantal daadwerkelijke besmettingen
	<i>Kwalitatieve indicatie</i>	algemene classificatie van detectie door systeem
	<i>Kwantitatieve indicatie</i>	idealiter bepaalt het systeem ook concentraties
	<i>Gevoeligheid</i>	gevoelig genoeg om schadelijke hoeveelheden van stoffen te kunnen detecteren - sterk afhankelijk van lokale ruisniveau

Beschouwing van een operationeel sensornetwerk

Het drinkwaterdistributienetwerk in een deel van de provincie Friesland is door Vitens ingesteld als Proeftuin (Vitens Innovation Playground) voor het in de praktijk beproeven van nieuwe technologieën [3]. In dit netwerk zijn enkele tientallen sensoren (Eventlab-stations van Optiqua) geïnstalleerd, die generieke waterkwaliteitsveranderingen meten. Dit sensornetwerk is sinds 2012 operationeel en Vitens heeft hier inmiddels veel ervaring mee opgedaan.

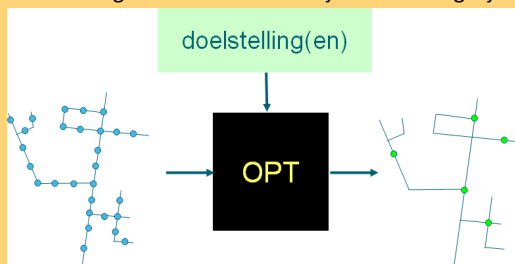
De prestatie van een tiental sensoren in dit sensornetwerk, in het deelgebied Leeuwarden-Bergum van de Proeftuin, is voor verschillende doelstellingen weergegeven in kader 1. Naast de harde prestatie-indicatoren worden hier ook mogelijke verbeteringen door het wijzigen van

Kader 1. Prestatie en optimalisatie van sensornetwerken

De uiteindelijke doelstelling van netwerken van waterkwaliteitssensoren is meestal het minimaliseren van de gevolgen van besmetting van het drinkwater in het leidingnet. In optimalisatiemodellen worden vaak de volgende doelstellingen gehanteerd:

1. minimaliseren van tijd tussen besmetting en detectie;
2. minimaliseren van het aantal blootgestelde mensen;
3. minimaliseren van het geconsumeerde volume besmet water;
4. maximaliseren van de kans op detectie;
5. maximaliseren van de omvang van het gemonitorde netwerkdeel;
6. maximaliseren van de vindbaarheid van een besmettingsbron;
7. maximaliseren van de robuustheid van het sensorsysteem.

Optimalisatie betekent het vinden van de beste oplossing (afbeelding K1). Stel dat we een netwerk hebben waarin 5 sensoren worden geplaatst, om een besmetting op een willekeurige plaats in het netwerk zo snel mogelijk te kunnen detecteren (doelstelling). We hebben ongeveer 30 punten in het netwerk waar we deze sensoren om praktische redenen goed zouden kunnen installeren. Een optimalisatie-algoritme selecteert hieruit die 5 locaties waarmee de gemiddelde detectietijd zo kort mogelijk is (groene stippen).



Afbeelding K1. Aan de hand van een of meer doelstellingen kiest het optimalisatie-algoritme die set van locaties die het beste aan de doelstelling beantwoordt

Met behulp van numerieke optimalisatie wordt een duidelijk beter presterende configuratie verkregen dan op basis van een evenredige verspreiding of van gevoel en ervaring ([6], zie tabel K1). Zo kan de kans dat een willekeurige besmetting wordt opgemerkt met een netwerk van 10 sensoren bijvoorbeeld worden verhoogd van 22% naar 41% door de sensoren op optimale locaties te installeren. Zelfs op doelstellingen die in de optimalisatie niet zijn meegenomen worden betere prestaties verkregen. Let op dat dergelijke berekeningen wel altijd gepaard gaan met aannames en vereenvoudigingen. In dit geval is bijvoorbeeld uitgegaan van een inerte stof en onfeilbare sensoren. Het is zinvol om deze aannames terug te laten komen in het formuleren van realistische verwachtingen.

Tabel K1: Prestaties van geoptimaliseerde en bestaande sensornetwerken op verschillende doelstellingen in het deelgebied Leeuwarden-Bergum

De huidige configuratie (onderste rij) betreft 10 Eventlab-stations in het gebied. Pakkans en dekkingsgraad zijn weergegeven als fractie van het totaal, de detectietijd is in uren en bronbepaling geeft de gemiddelde omvang van het potentiële brongebied in kilometers leiding weer.

(geoptimaliseerde) configuratie	Prestatie m.b.t. doelstelling				
	pakkans	detectietijd	dekking	redundante dekking	bronbepaling
pakkans	0,41				
detectietijd		10,4			
dekking			0,60		
redundante dekking				0,46	
bronbepaling					244
huidig	0,22	13,9	0,36	0,08	292

prestatie slechtst best

de locaties van de sensoren weergegeven. Bij een optimale plaatsing verbeteren de opbrengsten van het netwerk significant.

De mate waarin het netwerk voldoet aan de succesfactoren van Kroll en King, mede in relatie tot het ambitieniveau van Vitens, is weergegeven in tabel 3 en wordt hier nader toegelicht:


1. *Toegevoegde waarde op twee fronten:* 1) Early warning voor zowel procesanomalieën als besmettingen, 2) bijdrage aan detecteren/lokaliseren van lekken, 3) bijdrage aan verbetering van hydraulisch model, 4) snel en doelgericht informeren van de klant (op termijn).
2. *Vereisten voor gewenste detectieklasse:* op dit moment klasse 3.
3. *Dekkingskarakteristieken:* Vanwege de kosten is het aantal geïnstalleerde sensoren beperkt, waardoor het beschermingsgebied van de sensoren onvolledig is (zie kader 1), maar veel beter dan met alleen monsternames. Communicatie van metingen naar het controlecentrum vindt bijna real-time plaats.
4. *Operationele karakteristieken:* De sensormetingen zijn (bijna) real-time toegankelijk. Er zijn grote verschillen in hoe vaak een sensor gecontroleerd moet worden, maar liefst niet vaker dan eens per maand. De kosteneffectiviteit in vergelijking met het wettelijk verplichte monsterprogramma is moeilijk vast te stellen, aangezien er andere parameters worden gemeten.
5. *Prestatiekarakteristieken:* De geïnstalleerde sensoren reageren op een breed spectrum aan stoffen en hebben een korte reactietijd. Ze zijn niet specifiek, maar in combinatie met andere metingen (pH, geleidbaarheid) is in principe wel een grove classificatie van de gemeten besmetting te maken. Fout-negatieve bepalingen kunnen ernstiger zijn dan fout-positieve bepalingen, hoewel die laatste kunnen leiden tot het negeren van waarschuwingen van het systeem. Een waterbedrijf moet bepalen wat het acceptabel vindt. Er is nog onvoldoende bekend over het optreden van fout-positieven en fout-negatieven. Wel zijn alle bij Vitens bekende afwijkingen real-time of achteraf met de sensormetingen teruggevonden. Dat het netwerk nog geen kwantitatieve indicatie kan geven is voor een systeem van de derde klasse ook minder belangrijk. De sensoren kunnen wel diverse bestrijdingsmiddelen in voldoende lage concentraties detecteren [4].

Realiseren van de succescriteria

Uit tabel 3 blijkt dat in de Proeftuin aan veel criteria wordt voldaan. Een (verdere) inventarisering van mogelijke toepassingen en opbrengsten van sensoren binnen het bedrijf kan leiden tot een bredere toepassing en daarmee grotere rentabiliteit. Er kan een plan worden gemaakt voor opwaardering tot een systeem van de tweede of eerste klasse. Hiervoor moeten de vereiste dekkingskarakteristieken worden gedefinieerd, gebruik makend van berekeningen zoals weergegeven in kaders 1 en 2. Het is van belang de gebruikers van het systeem vanaf het begin te betrekken en mee te laten denken. Naarmate het systeem langer wordt gebruikt ontstaat een beter beeld van de continuïteit en de betrouwbaarheid. Het feit dat problemen bijna instantaan gesignaleerd kunnen worden in plaats van – zoals bij monsternames – pas na twee dagen, levert indirecte kostenvoordelen. De introductie van specificiteit of op zijn minst een kwalitatieve indicatie vergt de introductie of het gebruik van extra sensoren van andere types.

Tabel 3. Evaluatie van het operationele waterkwaliteitssensornetwerk in de Proeftuin op basis van de succescriteria van Kroll en King [2]

 voldoet,

 voldoet niet,

? onvoldoende gegevens,

* geen beoordeling (zoals door Kroll en King geformuleerd zijn dit eerder constatering dan criteria).

Aspect	Evaluatie	
1. Toegevoegde waarde op twee fronten	✓	
2. Vereisten voor gewenste detectieklasse	✓	
3. Dekkings- karakteristieken	Kosten	*
	Beschermingsgebied	*
	Communicatie	✓
4. Operationele karakteristieken	Gebruiksgemak	✓
	Mate van automatisering	✓
	Continuïteit van werking	✓
	Betrouwbaarheid	✓
	Kosteneffectiviteit	✗
5. Prestatie- karakteristieken	Breed spectrum	✓
	Snelle reactietijd	✓
	Specificiteit	✗
	Reproduceerbaarheid	✓
	Weinig fout-positieven en fout-negatieven	?
	Kwalitatieve indicatie	✗
	Kwantitatieve indicatie	✗
	Gevoeligheid	✓

Visie en businesscase

De opbrengsten van sensornetwerken voor waterkwaliteit kunnen goed worden gekwantificeerd met betrekking tot een gekozen doelstelling. Ook is duidelijk wat de succesfactoren zijn. Op basis hiervan kunnen drinkwaterbedrijven de mogelijkheden van sensing beoordelen. Eerst moet een visie worden ontwikkeld op monitoring en bewaking van de waterkwaliteit in het distributienet, en de doelstelling van het sensornetwerk. Dan kan de prestatie van beoogde sensornetwerken worden berekend. Op basis van de eigen financiële waardering kan dan een businesscase worden opgesteld. Hiermee kan een waterbedrijf besluiten of sensing van waterkwaliteit op dit moment zinvol is en welk prestatieniveau wordt gekozen. Beslissingen kunnen dan worden genomen op basis van realistische verwachtingen, die ook naar de toekomstige gebruikers van het systeem binnen het bedrijf en naar de klanten kunnen worden gecommuniceerd.

Uitdagingen en valkuilen

Verschillende belangen en procedures binnen een organisatie kunnen een hindernis vormen. Het opzetten van een doeltreffend sensornetwerk vereist samenwerking en een gezamenlijke visie. Het toepassen van real-time monitoringsystemen vergt een manier van werken met korte

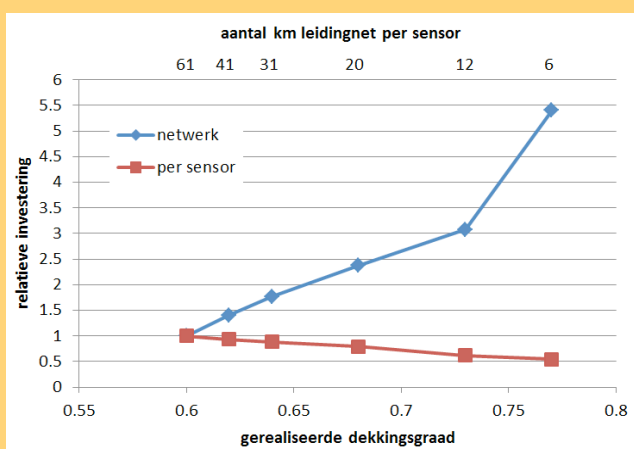
lijnen en snelle beslissingen. Zo is uit eerder onderzoek gebleken [5] dat de responstijd van een waterbedrijf op het vaststellen van een besmetting een doorslaggevende factor is in het effect dat de besmetting kan hebben op de bevolking. Wanneer de effectieve responstijd 2 dagen is, heeft een sensornetwerk weinig zin.

Kader 2.

Kosten en opbrengsten van continue monitoring van waterkwaliteit.

Er kan verband worden gelegd tussen de benodigde investering en de berekende prestaties van een sensornetwerk. Op basis hiervan kan een businesscase worden opgezet, waarbij alleen nog de prestatie moet worden omgezet in een financiële opbrengst. Dit laatste punt is aan de waterbedrijven; voor het eerste wordt hier een voorbeeld uitgewerkt op basis van de aanschaf-, installatie- en operationele kosten van Eventlab-stations van Optiqua.

Afbeelding K2 toont het berekende verband tussen de benodigde investering en de bereikte dekking van het netwerk van het deelgebied Leeuwarden-Bergum van de Proeftuin Noordbergum [6]. Hierbij zijn de operationele kosten meegenomen op basis van een gebruiksduur van 10 jaar. De totale kosten zijn weergegeven als veelvoud van de kosten voor een netwerk van 10 sensoren. De curve toont in feite de competitie tussen enerzijds de afnemende kosten van de sensoren per stuk bij grotere aantallen (rode curve) en anderzijds het toenemende aantal extra sensoren dat nodig is om de dekking verder te verhogen. Dit resulteert in een knik in de berekende netwerkcurve bij een dekking van 0,73. Links van deze knik is het relatief gemakkelijk en goedkoop om extra dekking te realiseren; grotere dekkingen vereisen een groter aantal extra sensoren en worden daarmee duurder.



Afbeelding K2. Benodigde relatieve investering (t.o.v. geval met 10 sensoren en een dekking van 0,6) als functie van de gerealiseerde dekking en de bijbehorende sensordichtheid

Deze berekening is slechts een voorbeeld. Voor andere doelstellingen ziet zij er waarschijnlijk (enigszins) anders uit. Ook is de vorm voor een van de Proeftuin afwijkende netwerktopologie wellicht anders.

De eerder genoemde kip-en-ei-situatie kan worden doorbroken door een sensornetwerk op te zetten (zoals Vitens in de Proeftuin doet), of door via numerieke simulaties de te verwachten opbrengsten te bepalen.

Door vooraf de te verwachten opbrengsten te kwantificeren worden te hoge verwachtingen voorkomen. Dit geldt voor sensornetwerken, maar ook voor de verschillende typen sensoren zelf en de bijbehorende datasystemen. Een correcte inschatting van en omgang met fout-positieve en fout-negatieve sensorbepalingen is van groot belang. Een belangrijke factor is de kennis binnen het waterbedrijf over actuele waterstromen in het netwerk. Deze is afkomstig van een combinatie van metingen en hydraulische modellen. Verbeteringen zijn mogelijk door gebruik van accurate en actuele modellen en bijvoorbeeld goede registratie van afsluiterstanden. Waterkwaliteitssensoren kunnen hierbij helpen door de waterstromen exact in beeld te brengen.

Opbrengsten

Het installeren van een sensornetwerk stelt een waterbedrijf in staat besmettingen tijdig op te sporen en daarop te reageren. Hierdoor nemen de risico's voor de klant af en verbetert het imago van het bedrijf. Bovendien zal het waterbedrijf zijn productie- en distributieproces beter kennen en begrijpen, en daardoor strakker kunnen controleren. Of dit de investering waard is, zal ieder waterbedrijf voor zichzelf moeten bepalen, maar de instrumenten hiervoor zijn beschikbaar.

De auteurs danken Joep van den Broeke van Optiqua voor het beschikbaar stellen van informatie over kosten van aanschaf en operatie van hun sensoren.

Literatuur

1. Storey, M. V. (2013). *Advances in on-line monitoring in the global water industry*. Presentatie op Sensors 4 Water, Assen, 10 september 2013. Kroll, D. en King, K. (2010). *Methods for evaluating water distribution network early warning systems*. Journal: American Water Works Association, 102(1), 1-11.
2. De Graaf B.R. Williamson F., Klein Koerkamp M., Verhoef J.W., Wuestman R., Bajema B., Trietsch E. and Van Delft W (2012). Implementation of an innovative sensor technology for effective online water quality monitoring in the distribution network. *Water Practice & Technology*, vol. 7, no. 4, (2012).
3. M.A.B. van Wijlen, M. Klein Koerkamp, R.J. XIE, A.N. Pua, W. van Delft, B. Bajema, and
4. J.W. Verhoef. (2011). Innovative sensor technology for effective online water quality monitoring. Singapore International Water Week.
5. Van Thienen, P., A. Vogelaar en P. Holzhaus (2012). Optimale lokatiekeuze voor waterkwaliteitssensoren in het distributienet. *H2O*, 23.
6. Van Thienen, P. (2014). Strategieën voor optimale plaatskeuze van waterkwaliteitssensoren in het distributienet. BTO 2014 (manuscript).