

Backtracing helpt waterkwaliteitssensoren slim te plaatsen en calamiteiten op te sporen

Peter van Thienen en Dirk Vries (KWR), Egbert Zaadstra (Brabant Water)

Waterkwaliteitssensoren geven een lokaal beeld van waterkwaliteitsparameters in het distributienet. Met behulp van hydraulische modellen kunnen ze ook belangrijke informatie over andere delen van het netwerk opleveren. In dit artikel laten wij zien hoe hydraulische modellen kunnen worden ingezet om met behulp van *backtracing*-algoritmes de effectiviteit van sensornetwerken te bepalen en om het mogelijke brongebied bij een verontreinigingscalamiteit in te perken.

Waterkwaliteitssensoren en verontreinigingen

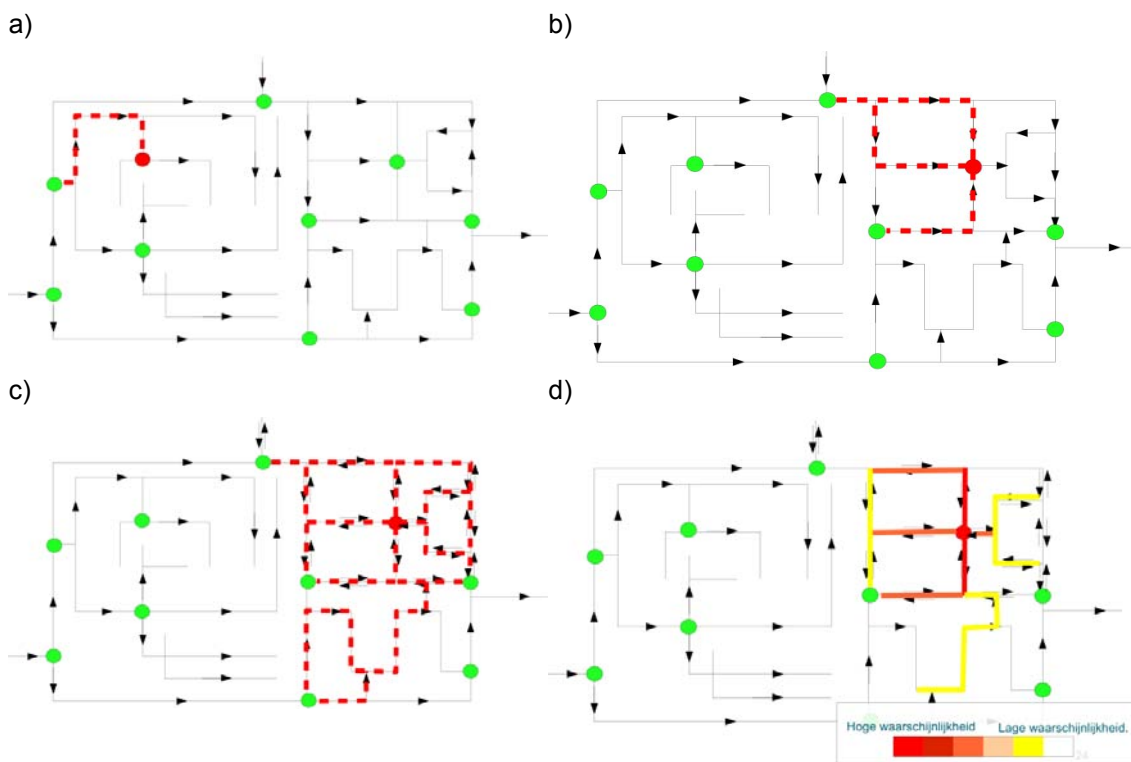
Bij het constateren van een verontreiniging in het leidingnet is het zaak snel te handelen om de mogelijke gevolgen te minimaliseren. Wanneer een waterkwaliteitssensor een verontreiniging meet, is een van de hoofdvragen waar deze verontreiniging vandaan komt. Als dit is vastgesteld, kunnen maatregelen worden getroffen om de verdere verspreiding te beperken en om de oorzaak aan te pakken. In een leidingnet kunnen verschillende sensoren voorkomen: niet alleen fysieke sondes die waarden van chemische of fysische grootheden constateren en communiceren, maar ook monsternamen-analysetrajecten en zelfs meldingen van klanten kunnen als sensoren worden beschouwd. Door vooraf te bepalen welk gebied een cluster sensoren kan bestrijken, kan een optimale plaatsing van sensoren (sensorconfiguratie) worden ontworpen.

Hydraulische simulaties zijn een krachtig hulpmiddel om de verspreiding van een stof door een netwerk te berekenen en zijn daarmee het uitgangspunt van dit onderzoek. Hiermee is het mogelijk water (met opgeloste verontreinigingen) in een netwerkmodel terug in de tijd te volgen: backtracing.

Methodiek

Wanneer een sensor een afwijkende concentratie voor een bepaalde stof meet en andere sensoren in de omgeving deze afwijking niet constateren, is het in sommige gevallen gemakkelijk om te achterhalen waar deze stof het netwerk binnen is gekomen. Dit is vooral het geval in vertakte netten (afbeelding 1a): daar is simpelweg de stroming in tegenovergestelde richting te volgen, totdat men een sensor tegenkomt die niet de betreffende verontreiniging meet. De afgelegde weg komt overeen met het mogelijke brongebied. In vermaasde netten werkt het minder recht-toe-recht-aan (afbeelding 1b), aangezien een willekeurig punt in het netwerk vaak (al dan niet tegelijkertijd) via meerdere paden gevoed kan worden. Het mogelijke brongebied omvat alle wegen naar de sensor toe. Wanneer we ons realiseren dat stroomsnelheden en soms ook -richtingen gedurende de dag en ook van dag tot dag kunnen veranderen, wordt het potentiële herkomstgebied van een geconstateerde verontreiniging vele malen groter (afbeelding 1c).

Op basis hiervan is een methodiek uitgewerkt voor het combineren van observaties op meerdere punten in een netwerk: het al dan niet constateren van een verontreiniging op meerdere plaatsen in het netwerk kan leiden tot een snelle en eenvoudige inperking van het mogelijke brongebied.



Afbeelding 1. Het reconstrueren van een besmettingsbron op basis van afwijkende (rood) en niet-afwijkende (groen) sensormetingen in een vertakt net (a), een vermaasd net met constante stroomrichting (b), en een vermaasd net met variërende stroomrichting

In het laatste geval kan een herkomstkanskaart (d) helpen bij het prioriteren van zoekacties naar de besmettingsbron.

De stroming (het 'stromingsveld') in een drinkwaterdistributienet kan sterk variëren, zowel in de ruimte als in de tijd. Variaties in stroomsnelheid en -richting kunnen een gevolg zijn van:

- reguliere variaties in watervraag door de dag heen (bijvoorbeeld de ochtend- en avondpieken);
- tochastische variaties in de watervraag (gesommeerde afwijkingen in waterverbruik van dag tot dag ten gevolge van variërende tijdstippen van douchen, toiletbezoek, etc.);
- veranderingen in de bedrijfsvoering;
- afsluitermanipulaties.

Met name in de periferie van het net komen stagnatie en omkering van de stromingsrichting vaak voor [1]. Deze variabiliteit wordt tot dusver nauwelijks in hydraulische modellen meegenomen. In de praktijk betekent dit dat er een onzekerheidsmarge zit op iedere schatting die wordt gedaan van een stromingsveld in een distributienet (met name tertiair, dus op wijk-

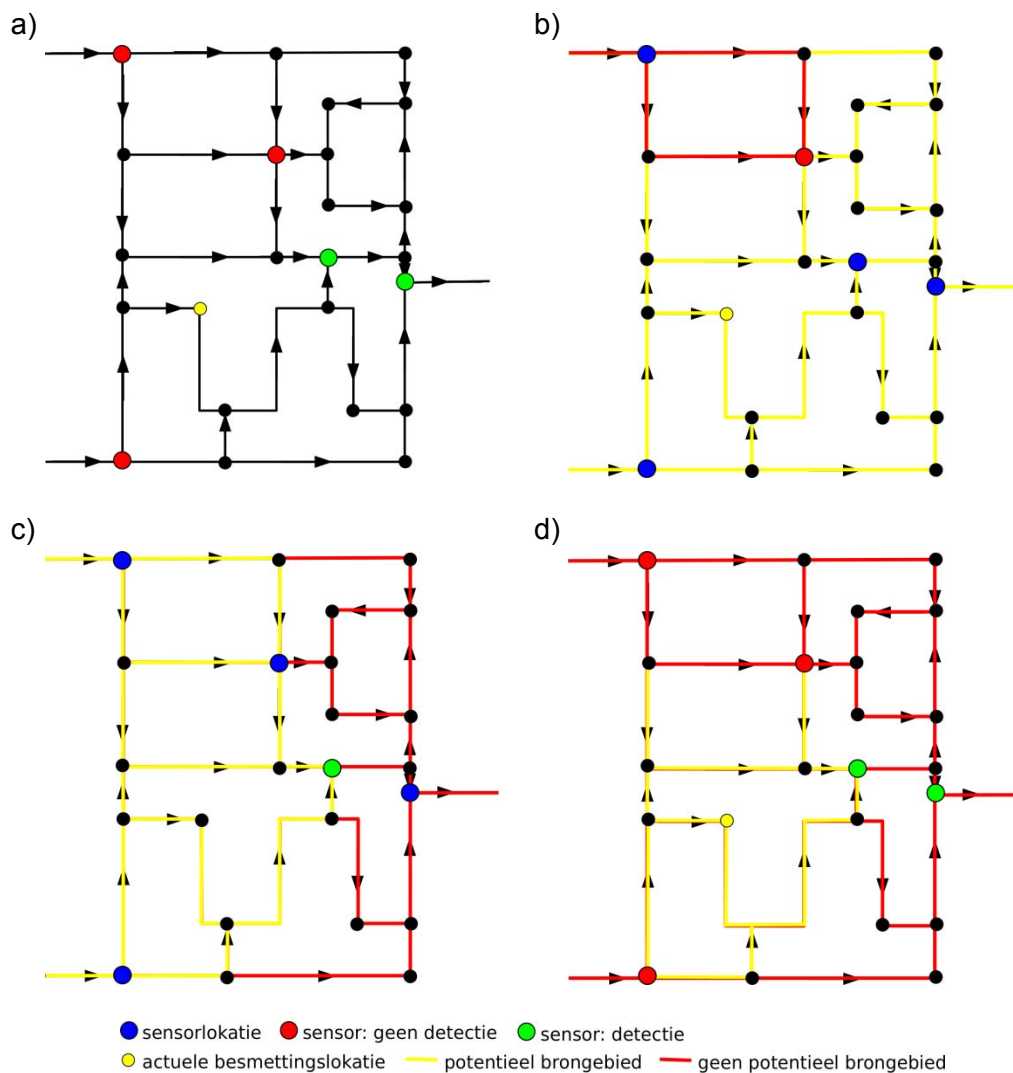
niveau) op een bepaald moment. Het programma SIMDEUM® [1] kan in een reeks van simulaties de stochastische aard (variantie) van de watervraag goed kwantificeren. Hiermee kan een kansverdeling van snelheidsvelden worden berekend. Deze kan worden gebruikt om in te schatten hoe waarschijnlijk het is dat een geconstateerde verontreiniging van een bepaalde plaats in het netwerk afkomstig is. Dergelijke inschattingen kunnen worden gecombineerd in een herkomstkansenkaart, zoals schematisch weergegeven in afbeelding 1d.

Met behulp van het leidingnetberekenningsprogramma EPANET-MSX [2] en een originele behandeling van de resultaten daarvan [3,4], kan eenvoudig worden bepaald waar het water dat op een bepaald punt in het netwerkmodel wordt 'bemonsterd' allemaal is geweest, en in welke mengverhouding het daar aankomt. Als we veronderstellen dat de a priori kans op een besmetting overal in het netwerk even groot is, representeren de verhoudingen van volumestroomfracties de kansverhoudingen van de besmettingsbronlocatie. Zo kan er uit de concentratieverhoudingen direct een (relatieve) herkomstkansenkaart worden gemaakt.

Door informatie van meerdere sensoren te combineren, ontstaat een beter beeld van de mogelijke bronlocatie van een verontreiniging. Op twee manieren kunnen sensoren hieraan bijdragen:

- Positief: als twee of meer sensoren (afbeelding 2a) elk dezelfde verontreiniging meten, moet de bronlocatie zich logischerwijs bevinden in de doorsnede (overlap) van de herkomstkaarten van de sensoren.
- Negatief: als een of meer sensoren (afbeelding 2c) een bepaalde verontreiniging meten maar een andere sensor (afbeelding 2b) niet, dan moet de bronlocatie zich bevinden in de doorsnede van de herkomstkaarten van de positieve en de complementen van de herkomstkaarten van de negatieve sensor(en) (afbeelding 2d).

Let op dat we hierbij steeds veronderstellen dat de benodigde meetwaarden op hetzelfde tijdstip (synchroon) verkregen zijn. Deze benadering leent zich echter eveneens voor de combinatie van metingen die niet op hetzelfde tijdstip zijn uitgevoerd (diachroon), maar dit concept wordt hier niet verder uitgewerkt. Bij het gebruik van negatieve bepalingen is aangenomen dat er voldoende tijd is verstreken sinds de aanvang van de (doorlopende) besmetting om de betreffende sensoren te bereiken.



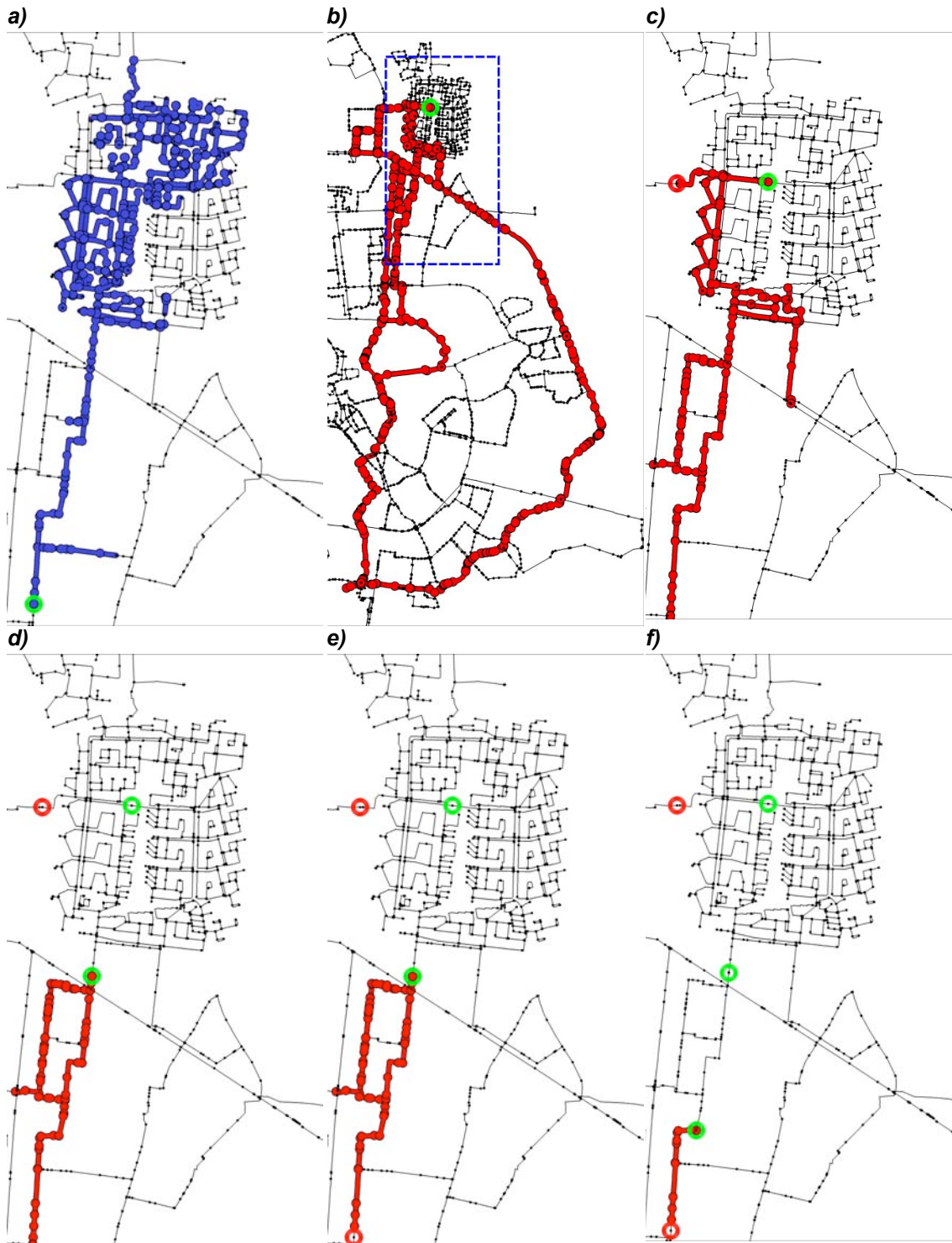
Afbeelding 2. Bepaling van potentieel brongebied van een besmetting, uitsluitend op basis van hydraulica en netwerk

a) besmettingslocatie (geel) en bijbehorende sensormetingen, b) potentiële herkomstkaart voor sensor x c) potentiële herkomstkaart voor sensor y d) gecombineerde potentiële herkomstkaart voor alle sensoren in dit gebied.

Resultaten: inperking van mogelijk brongebied

Numerieke experimenten tonen dat met een beperkt aantal bepalingen op verschillende locaties het potentiële herkomstgebied van een verontreiniging kan worden teruggebracht naar slechts enkele segmenten van een leidingnetmodel. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in afbeelding 3, waarin het netwerkmodel van een willekeurige Nederlandse stad is gebruikt. Hierin wordt getoond hoe een besmetting zich vanaf de bron verspreidt door het netwerk (afbeelding 3a). Bij een eerste constatering van de besmetting (afbeelding 3b, groene cirkel) kan worden bepaald wat het potentiële herkomstgebied hiervan is (rood gekleurde leidingsegmenten). Door vervolgens meerdere metingen in de omgeving te verrichten wordt het potentiële herkomstgebied steeds verder ingeperkt (afbeelding 3c-f). De combinatie van

sensoren met hydraulische modellen (inclusief *backtracing* en bronzoekmethoden) verkleint hiermee de onzekerheid over wat er in het netwerk gebeurt.



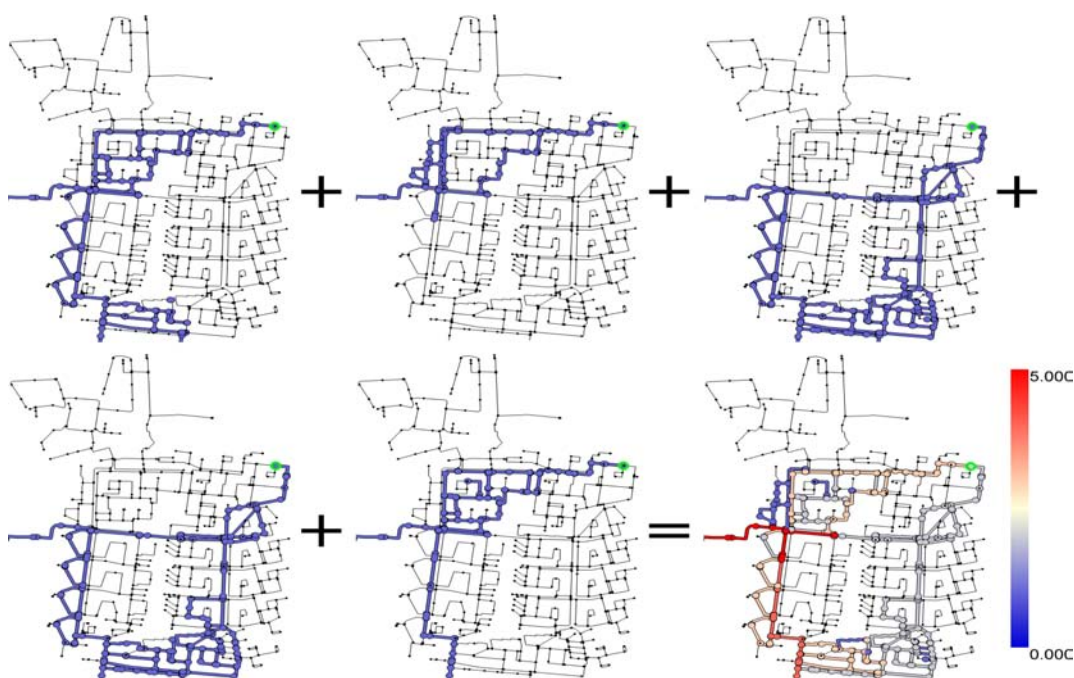
Afbeelding 3. Inperking van een potentieel brongebied met meerdere sensormetingen

a) besmettingslocatie (groene cirkel) met in blauw de verspreiding van de verontreiniging; b) detectie van de besmetting (groene cirkel) en bijbehorende potentiële herkomstgebied in rood; c) inperking van dit gebied bij toevoeging van een negatieve bepaling (rode cirkel); d,e,f) verdere inperking door succesievelijke toevoeging van positieve en een negatieve bepalingen. Deelfiguren a,c,d,e,f tonen het in deelfiguur b met een blauwe rechthoek omsloten gebied.

Effect van stochastische watervraag

Zoals eerder aangegeven kan het stromingsveld in een drinkwaterdistributienet sterk variëren, zowel in de ruimte als in de tijd. Deels zijn dit stochastische variaties in de watervraag: gesommeerde afwijkingen in waterverbruik van dag tot dag ten gevolge van variërende tijdstippen van douchen, toiletbezoek, gebruik van wasmachines, et cetera van alle gebruikers in een straat, wijk of stad. Op het niveau van een stad of (grote) wijk middelen deze variaties uit, maar op een kleinere schaal kunnen deze een merkbare invloed hebben, en bijvoorbeeld voor lokale omkeringen in de stroomrichting of voor andere aanvoerroutes zorgen. Deze stochastische variaties zijn uitstekend te modelleren met SIMDEUM [1].

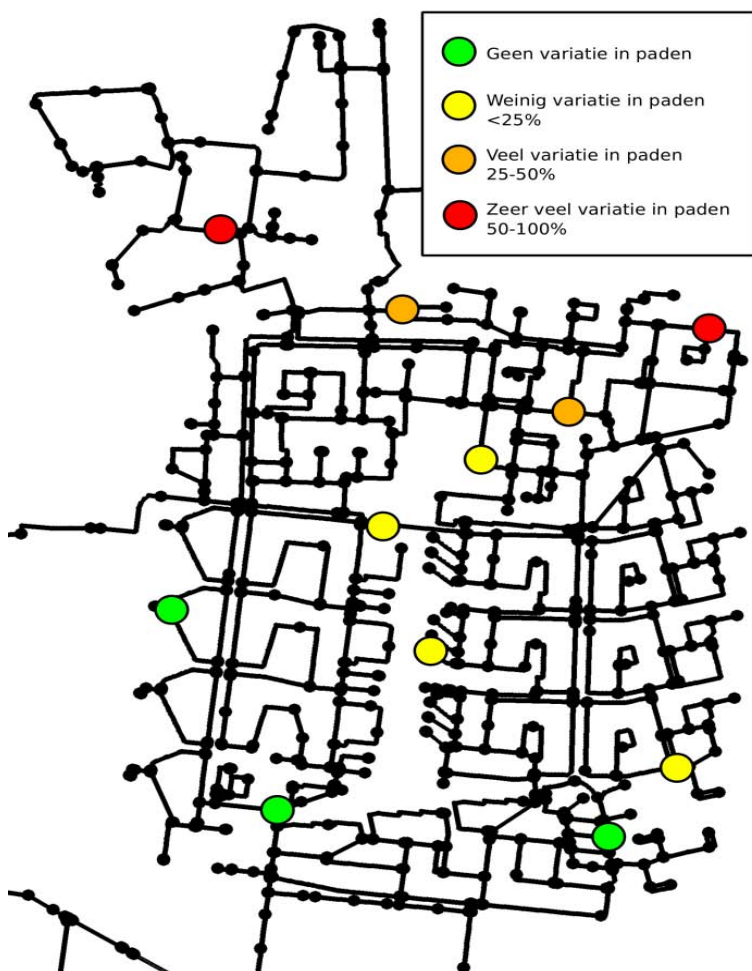
Wanneer voor verschillende, even waarschijnlijke watervraagpatronensets de backtrace-berekening wordt gedaan, kan hieruit door deze omkeringen en andere aanvoerroutes steeds een iets ander resultaat volgen [3,4]. Hiervan wordt een beeld geschapen door de verschillende resultaten over elkaar heen te leggen, zie afbeelding 4. Hierin zijn backtraces voor steeds een andere set vraagpatronen op hetzelfde tijdstip te zien, met variërende aanvoerroutes naar het groen gemarkeerde punt. Let op dat deze wijk wordt gevoed van beneden (twee leidingen) en van links (één leiding). De somkaart (afbeelding 4, rechtsonder) laat zien welke delen van het leidingnet vaker (rood) en welke delen minder vaak (blauw) voorkomen in deze verschillende backtraces. In de zin van de onzekerheid m.b.t. de werkelijke vraagpatronen geeft dit een indicatie van de waarschijnlijkheid van herkomst van het water dat op het groen gemarkeerde punt 'bemonsterd' wordt.



Afbeelding 4. Backtraces vanaf het groen gemarkeerde knooppunt voor verschillende watervraagpatronensets worden gestapeld om waarschijnlijke en minder waarschijnlijke herkomstgebieden te identificeren

De kleurschaal geeft het aantal samenvallende sporen weer. De rode delen van het netwerk maken voor ieder van de vraagpatronensets deel uit van de backtrace, de blauwe slechts in een enkel geval.

In het voorbeeld van afbeelding 4 zien we veel variatie in de backtraces voor verschillende watervraagpatroonsets. Voor andere locaties is deze variatie aanzienlijk geringer. Een overzicht is weergegeven in afbeelding 5. Hierin is te zien dat met name in de periferie van het wijknetwerk, ver weg van de voedende leidingen waarmee de punten via verschillende lussen zijn verbonden, de variabiliteit groot is.



Afbeelding 5: Variatie in backtraces bij verschillende (stochastische) watervraagpatroonsets watervraagpatronen op verschillende locaties in het netwerkmodel

De kleurschaal geeft aan hoeveel variatie in backtraces er wordt gevonden voor de individuele monsterpunten, van geen (groen) tot zeer veel (rood).

Belang van goede data en modellen

Verschillende uitdagingen bij backtracing zijn [5]:

1. het enorme aantal potentiële locaties en tijdstippen van besmetting, waarmee rekening moet worden gehouden;
2. onzekerheden in de netwerkmodellen (materialen en diameters, wandruwheid, verbruikspatronen, lekken, afsluiterstanden, etc.);
3. de mate waarin sensoren daadwerkelijk in staat zijn om alle besmettingen op ieder concentratieniveau te meten;

4. de correctheid van sensormetingen en -interpretaties (vals-positieven en vals-negatieven).

Ook wordt in de regel uitgegaan van een conservatieve stof (d.w.z. een stof die niet reageert tijdens transport), terwijl deze aanname niet in alle gevallen terecht is.

Backtrace-berekeningen zijn alleen betekenisvol bij een correcte weergave van de werkelijkheid in het netwerkmodel. Wanneer bijvoorbeeld de netwerkconfiguratie verandert door het sluiten van een afsluiter, dan kan dit, afhankelijk van de locatie van de afsluiter, zorgen voor een andere aanvoerroute van water voor een straat of wijk. Backtrace-berekeningen die geen rekening houden met deze gesloten afsluiter zullen dus het verkeerde potentiële herkomstgebied opleveren.

Implementatie: de zin van sensing en ondersteuning bij calamiteiten

Vanuit de technologie bestaat er veel belangstelling voor het gebruik van sensing in het distributienet. Binnen waterbedrijven vindt er echter discussie plaats over de vragen waarvoor sensing precies nuttig is en wat een waterbedrijf er daadwerkelijk mee kan doen. Ontwikkelingen in kwaliteit en prijs van de sensoren, onderzoek naar methodieken om informatie uit sensordata te halen, maar ook vragen en enthousiasme vanuit de waterbedrijven om sensoren optimaal te gebruiken spelen hierin een rol.

Als de sensoren slim geplaatst zijn kan met behulp van deze methodiek in geval van calamiteiten worden bepaald op welk deel van het netwerk de aandacht geconcentreerd dient te worden. Zo kan de verspreiding van een verontreiniging sneller worden beperkt en worden de gevolgen geminimaliseerd. De methode maakt gebruik van EPANET-MSX [2]. Voor toepassing bij en door de waterbedrijven zelf is implementatie in daar gangbare hydraulische software mogelijk.

Het goed kunnen *backtracen* is tevens relevant voor de vraag waar in het distributienetwerk men het beste waterkwaliteitssensoren kan plaatsen. Bestaande software voor optimale sensorlokatiekeuze, zoals TEVA-SPOT [6], gaat uit van de impact van een eventuele besmetting op de volksgezondheid [5,7]. Deze software kan niet worden gebruikt om de configuratie te optimaliseren om een zo nauwkeurig mogelijke bepaling van een besmettingsbron in de tijd en de ruimte (grootste pakkans) mogelijk te maken.

Vanuit het oogpunt van garanties voor een (nagenoeg) onberispelijke waterkwaliteit en betrouwbare levering voor alle aansluitingen, is het nodig om de risico's helder in kaart te kunnen brengen. Vanuit financieel oogpunt is het wenselijk dit met zo min mogelijk sensoren of metingen te doen.

Verdere stappen

Voor brede toepassing van deze methodiek is het wenselijk om er eerst ervaring in de praktijk mee op te doen. Hiermee ontstaat o.a. een beeld van de kwaliteit van de hydraulische modellen die in gebruik zijn voor bronbepaling. Voor snelle toepassing op een schaal groter

dan wijkniveau zijn snellere berekeningen nodig. Dit kan worden bereikt door meer rekenkracht in te zetten of alternatieve mathematische methoden. Het verder verbeteren van de beschikbaarheid van actuele informatie over het leidingnet (afsluiterstanden, real-time flowmetingen) vergroot de betrouwbaarheid van de resultaten. Het lopende onderzoek is gericht op het omgaan met en het visualiseren van (mogelijke) vals-positieve en vals-negatieve metingen. Hierdoor wordt de methodiek nog betrouwbaarder.

Conclusies

De resultaten uit dit onderzoek laten zien hoe een rekenmodel en slimme plaatsing van sensoren kunnen bijdragen aan het vinden van besmettingsbronnen. De methodiek om met behulp van backtracen een besmetting te herleiden naar de bron is waardevol, omdat hiermee sneller en effectiever ingegrepen kan worden wanneer een verontreiniging wordt geconstateerd (isolatie, informeren van de consument en verwijdering). Ook zonder het plaatsen van fysieke sensoren biedt de ontwikkelde methode een handvat om, in het geval van een geconstateerde verontreiniging (een meting en/of klachten van klanten) 'eenvoudig' en goedkoop te bepalen waar aanvullend gemeten moet worden om de bron te kunnen opsporen. Voor een waterbedrijf wordt het bovendien eenvoudiger om met inzet van zo min mogelijk sensoren zoveel mogelijk informatie te verzamelen, zodat de levering van onberispelijk drinkwater gegarandeerd kan worden.

Literatuur

1. Blokker, E., Vreeburg, J., van Dijk, J., 2010. Simulating residential water demand with a stochastic end-use model. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136, 19–26.
2. Shang, F., Uber, J., Rossman, L., 2008. EPANET Multi-Species Extension Software. Technical Report. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA/600/C-10/002.
3. Van Thienen, P. en Vries, D., 2013. *Backtracing van verontreinigingen in het distributienet - Methoden en bronbepaling met stochastische watervraag. BTO 2013.030.*
4. Van Thienen, P., Vries, D., De Graaf, B., Van de Roer, M., Schaap, P., 2013. Probabilistic backtracing of drinking water contamination events in a stochastic world. Ingestuurd voor publicatie in *Procedia Engineering*.
5. De Sanctis, A.E., Shang, F., Uber, J.G., 2010. Real-time identification of possible contamination sources using network backtracking methods. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136, 444–453.
6. Berry, J., Boman, E., Riesen, L., Hart, W.E., Phillips, C.A., Watson, J., Murray, R., 2010. Users Manual TEVA-SPOT Toolkit Version 2.4. Technical Report. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. EPA 600/R-08/041B.
7. Laird, C., Biegler, L., van Bloemen Waanders, B., Bartlett, R., 2005. Contamination source determination for water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 131, 125–134.