



## De inzet van sensorgegevens en modellen voor waterkwaliteitsvraagstukken

door Joost van Summeren, Dirk Vries, Peter van Thienen (KWR)

### SAMENVATTING

Veilig en schoon drinkwater, 24 uur per dag, het hele jaar door, op elke plek. Dat is waar drinkwaterbedrijven voor staan. Maar hoe garandeer je die kwaliteit? Sensoren en modellen bieden een flinke meerwaarde boven conventionele metingen door zowel sneller als op meer plekken de waterkwaliteit vast te stellen. De zogenaamde softsensoren kunnen zelfs in de toekomst 'kijken'. Als opstap naar het toepassen van een softsensor, zijn in de stad Groningen meetgegevens en modellen gebruikt om het kalkafzettend vermogen in het drinkwater te bepalen. Dit artikel beschrijft de praktijkervaringen én kijkt vooruit naar de mogelijkheden van softsensoren.

### Inzicht in drinkwaterprocessen

De drinkwatersector zet steeds vaker metingen van (real-time) sensoren en modellen in bij de productie en distributie van veilig en schoon drinkwater. Sensorgegevens bevatten een schat aan informatie. In combinatie met modellen vergroot deze informatie het inzicht in drinkwaterprocessen. Dit kan worden ingezet voor operationele doeleinden of bij het ondersteunen of automatiseren van complexe beslissingen. Omdat de hoeveelheid sensorgegevens vaak te groot is voor handmatige verwerking zijn toegespitste data-analysetechnieken noodzakelijk.

Met een *softsensor* wordt een software-algoritme bedoeld waarmee verschillende (typen) metingen worden gecombineerd om de toestand van een systeem in kaart te brengen. Met de gegevens van een beperkt aantal sensoren wordt het mogelijk om voor het *hele* distributienetwerk interessante waterkwaliteitsparameters te bepalen. De verwerking gebeurt real-time. Dit biedt een actueel beeld en de mogelijkheid om voorspellingen te doen voor de nabije toekomst. Direct gemeten waarden zijn zo in kaart te brengen, evenals parameters die zijn te berekenen uit de metingen. De softsensor kan zo allerlei parameters in kaart te brengen, zoals kleur, geur, zuurstofgehalten, microbiologische parameters of organische microverontreinigingen. Een onderzoek uit 2015 beschrijft een prototype van een softsensor [1].

Als voorbereiding op het werken met softsensoren is tijdens een casus in de stad Groningen berekend wat er in een distributiegebied gebeurt met het kalkafzettend vermogen van het water. Door gebruik te maken van 'gangbaar' verkregen metingen van de watersamenstelling en computersimulaties, is berekend waar in het leidingnet veranderingen in het kalkafzettend vermogen zijn te verwachten. De casus biedt een doorkijkje naar wat er op den duur mogelijk is als real-time sensoren in een gebied worden geïnstalleerd.

### Het belang van het kalkafzettend vermogen

Het afzetten van calciumcarbonaat ("kalk" in de volksmond) uit drinkwater is niet schadelijk voor de volksgezondheid, maar leidt soms tot overlast. Daarbij moet gedacht worden aan afzetting op serviesgoed en sanitaire oppervlakken, en problemen door kalkafzetting in huishoudelijke apparaten. Warmwaterapparatuur zoals waterkokers en wasmachines zijn extra gevoelig, omdat bij hogere

temperaturen meer kalk wordt afgezet. Dit verkort de levensduur van de apparaten. En in wasmachines is bij veel kalk voor hetzelfde wasresultaat meer wasmiddel nodig, met als gevolg meer kosten voor de consument en een hogere milieubelasting.

Het is dus zaak de kans op problemen door kalkafzetting te beperken. De waterbedrijven in Nederland passen daarom de drinkwatersamenstelling aan tijdens de zuivering (“conditioneren”). Zo handhaven ze o.a. een acceptabel niveau van het kalkafzettend vermogen. De waterbedrijven volgen daarbij de normstellingen uit het Drinkwaterbesluit 2011 [2] (in 2013 herzien door KWR in samenspraak met de drinkwaterbedrijven [3]). De aanbevelingen richten zich niet uitsluitend op kalkafzetting, maar bijvoorbeeld ook op het voorkómen van de aantasting van leidingen.

### **Watersamenstelling en chemisch evenwicht**

Afzetting van calciumcarbonaat uit water wordt beschreven met chemische evenwichtsrelaties [4; 5]. Meerdere factoren beïnvloeden het chemisch evenwicht, waaronder de concentratie calcium en waterstofcarbonaat, temperatuur, zuurgraad en de aanwezigheid van fosfaat en opgelost organisch materiaal. De thermodynamische drijvende kracht achter kalkafzetting is de verzadigingsindex (hierna aangeduid als SI, voor saturatie-index) en het theoretisch afzetbaar calciumcarbonaat (TACC). De SI is een maat voor oververzadigd water met de *mogelijkheid* tot neerslag van kalk ( $SI > 0$ ), of kalk-agressief water met de mogelijkheid om kalk juist op te lossen ( $SI < 0$ ). De TACC-waarde geeft aan hoeveel calciumcarbonaat uit het water er maximaal *afgezet kan worden*.

Hoeveel calciumcarbonaat er *daadwerkelijk* wordt afgezet, wordt uitgedrukt in de parameter “praktisch afzetbaar calciumcarbonaat” (PACC, [6]). Verschillen tussen theorie (TACC) en praktijk (PACC) zijn mogelijk, bijvoorbeeld vanwege de aanwezigheid van kiemdeeltjes, de lokale hydraulische omstandigheden, en het transport en de hechting van ionen aan een oppervlak. Deze aspecten zijn meestal niet echt kritisch en worden hierna buiten beschouwing gelaten. In de literatuur worden voor SI- en TACC-waarden voor drinkwater in leidingen vaak de waarden bij een temperatuur van 10°C aangenomen (aangeduid als  $SI_{10}$  en  $TACC_{10}$ ), en de waarden bij 90°C voor warmwaterapparaten ( $SI_{90}$  en  $TACC_{90}$ ). Andere temperaturen aan de tap en in apparaten zijn niet ongebruikelijk, maar deze beide temperaturen geven het te verwachten bereik goed weer.

Uit eerder onderzoek [6] blijkt dat bij  $TACC_{90}$  waarden lager dan 0,6 mmol/l en  $SI_{90}$ -waarden lager dan 1,0 (Tabel 1) geen overmatige kalkafzetting in warmwaterapparaten wordt aangetroffen. Kalkafzettingen komen vooral voor bij een  $TACC_{90}$  hoger dan 1,2 mmol/l. Omdat bij een te lage SI-waarde uitloging van cementshoudende leidingen kan optreden, houden waterbedrijven een SI-waarde aan boven de -0,2 (Tabel 1). De hardheid – een maat voor de concentratie van calcium en magnesium in het water – is een veelgebruikte indicator, maar niet direct maatgevend voor het afzettend vermogen van calciumcarbonaat.

Tabel 1. Aanbevolen waterkwaliteitsparameters ([3] en [6]) en berekende waterkwaliteitsparameters voor gemengd water in de stad Groningen en omgeving. EGV staat voor elektrisch geleidend vermogen.

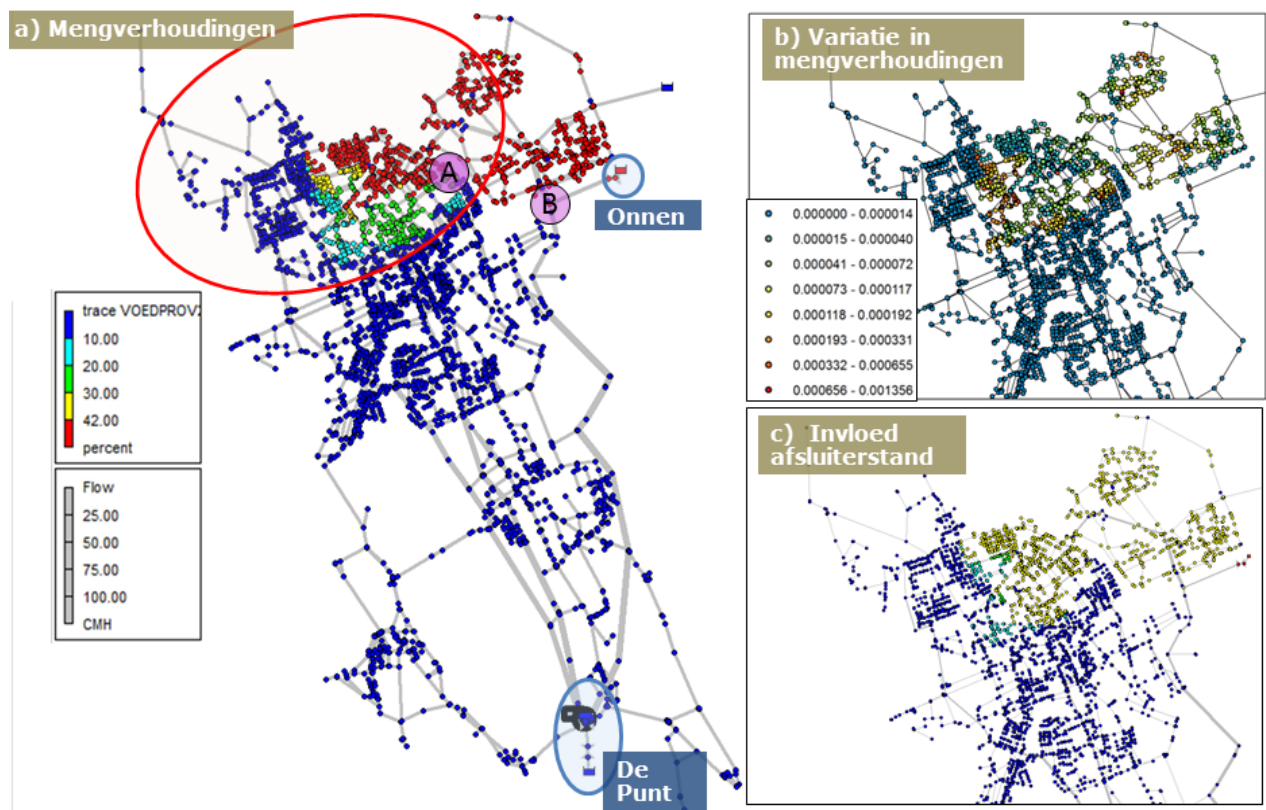
| Maat                              | Grenswaarden m.b.t. gebruikerservaring |  |                              | Mengverhouding in Groningen         |      |                                   |
|-----------------------------------|--|--|------------------------------|-------------------------------------|------|-----------------------------------|
|                                   | Geen problemen met kalk-afzetting      | Aanbeveling optimale samen-stelling 2013 | Problemen met kalk-afzetting | 0 (100% levering vanuit PS De Punt) | 0.5  | 1 (100% levering vanuit PS Onnen) |
| TACC 10°C (mmol/l)                |  |  |                              | 0,01                                | 0,04 | 0,07                              |
| TACC 90°C (mmol/l)                | <0,6 <sup>6</sup>                      | <0,6 <sup>3</sup>                        | >1,2 <sup>6</sup>            | 0,36                                | 0,47 | 0,62                              |
| SI 10°C                           |  | >0,2 <sup>3</sup>                        |                              | 0,06                                | 0,13 | 0,20                              |
| SI 90°C                           | <1,0 <sup>6</sup>                      |  |                              |                                     |      |                                   |
| Hardheid (mmol/l) (na ontharding) |  | >1,0 <sup>3</sup>                        |                              | 1,6                                 | 1,9  | 2,1                               |
| EGV 10°C (µS/cm)                  |  |  |                              | 190                                 | 210  | 225                               |
| EGV 90°C (µS/cm)                  |  |  |                              | 585                                 | 615  | 690                               |

### Menging van watertypen in het distributienet van Groningen

De stad Groningen wordt normaliter voor het grootste deel gevoed door pompstation (PS) De Punt. Het drinkwater uit dit pompstation is geproduceerd uit oppervlaktewater en grondwater waarvan de onderlinge verhouding nauwelijks varieert. Om aan de watervraag te voldoen wordt soms een ander watertype bijgeleverd ("steunlevering") vanuit de provincie Groningen (pompstation Onnen, via overdrachtspunt Ruischerbrug). Om waterkwaliteitsvariaties in het gebied zoveel mogelijk te beperken, hanteert Waterbedrijf Groningen een constante verhouding van levering uit PS de Punt en PS Onnen. Waterbedrijf Groningen wil weten of en hoe (tijdelijke) aanpassingen in de levering leiden tot een verandering van kalkafzetting in de stad Groningen en omgeving.

Als eerste stap zijn de waterstroom en mengverhoudingen in het gebied berekend met het hydraulisch rekenpakket EPANET [7], weergegeven in Afbeelding 1a. Mengverhoudingen van 0% en 100% corresponderen met water vanuit respectievelijk de PS Punt en PS Onnen. Het water geleverd vanuit PS Onnen mengt op een aantal specifieke plekken in het distributiegebied met water uit PS De Punt, de paarse cirkels in Afbeelding 1a. De "invloedsfeer" van de steunlevering beperkt zich tot het noordoosten van het gebied (rode ovaal in Afbeelding 1a). In dit deelgebied is de bijdrage van water vanuit PS Onnen overall lager dan 44%.

In het model veranderen de berekende mengverhoudingen in het hele leidingnet nauwelijks in de tijd (Afbeelding 1b). Dit is te verwachten: in geval van steunlevering, levert PS Onnen immers een vaste fractie van het totale verbruik. In de werkelijkheid zijn veranderingen in mengverhoudingen wel mogelijk, bijvoorbeeld als het waterverbruik sterk afwijkt van de gemodelleerde situatie. Daarnaast kan het sluiten van afsluiters van grote invloed zijn op menging en mengverhoudingen, als gevolg van veranderingen in de stromingspatronen. Afbeelding 1c illustreert het verschil in mengverhoudingen (ten opzichte van Afbeelding 1a) als de afsluiter op locatie "A" wordt gesloten. Dit is een plek waar normaal gesproken veel menging plaatsvindt. Opvallend is dat de mengverhoudingen niet alleen plaatselijk bij de afsluiter veranderen, maar in het hele noordoostelijke gebied. Dit is vanwege de afwijkende stroompatronen in de nieuwe situatie met een dichte afsluiter.

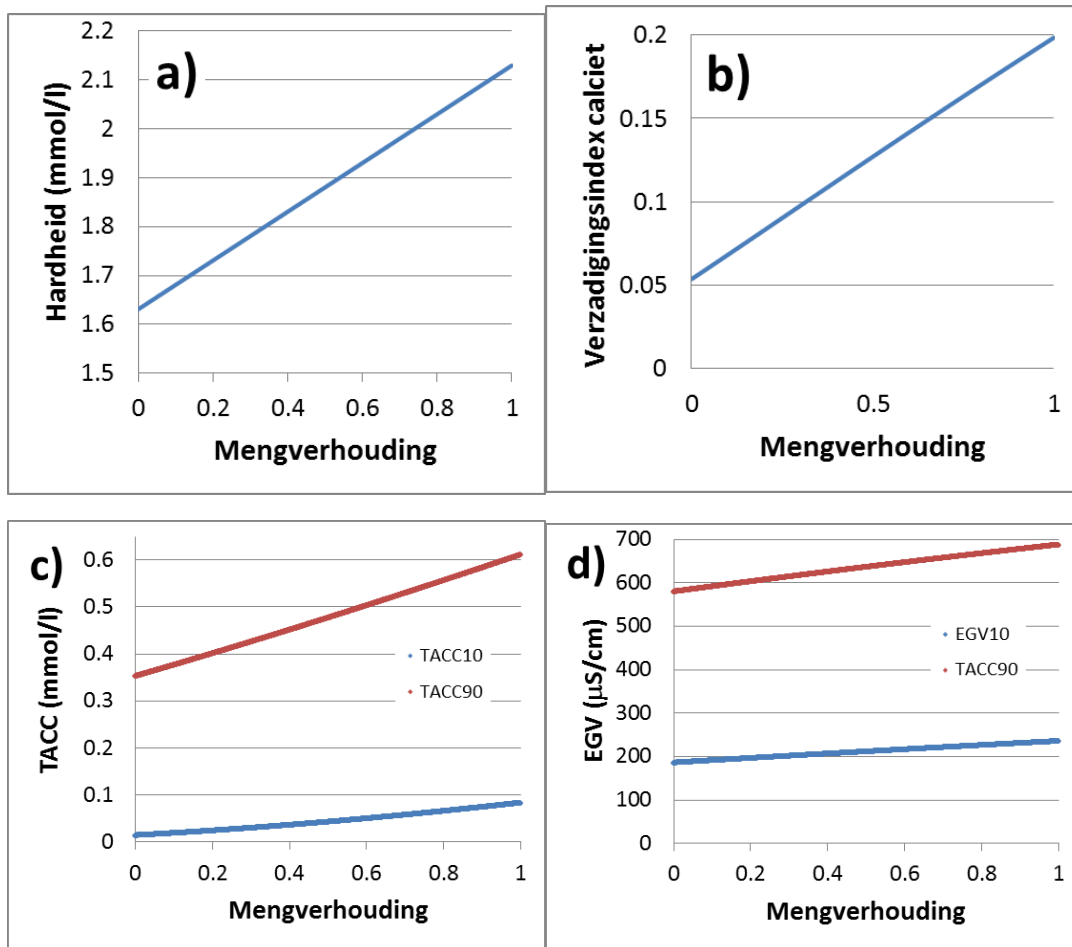


Afbeelding 1 a) Mengverhoudingen in het distributienet van Groningen met productie- en doorleverlocaties (blauw), de invloedssfeer van de steunlevering (ruwweg de knooppunten binnen de rode ovaal) en cruciale menglocaties (paarse cirkels). b) Verandering in de mengverhoudingen gemiddeld over één dag. Een warmere kleur betekent meer verandering van mengverhoudingen in de tijd. c) Mengverhoudingen bij het sluiten van een afsluiter (locatie "A") in paneel a.

### Kalkafzettend vermogen berekend voor Groningen

De chemische watersamenstelling bij de twee pompstations is door WLN gemeten. KWR heeft de kalkevenwichten berekend met de concentraties magnesium, calcium en waterstofcarbonaat, en zuurgraad en temperatuur. De waterkwaliteitsgegevens zijn constant verondersteld. Dit is een goed startpunt: het is zeer aannemelijk dat de verschillen tussen de twee watertypes veel groter zijn dan de fluctuaties binnen één watertype.

De  $SI_{10}$ ,  $SI_{90}$ ,  $TACC_{10}$ ,  $TACC_{90}$  en hardheid zijn berekend voor mengverhoudingen tussen 0 en 100%. Daarnaast is het elektrisch geleidingsvermogen (EGV) berekend, omdat het een gemakkelijk te meten indicator voor de waterkwaliteit is. De thermodynamische evenwichtsberekeningen zijn uitgevoerd met het modellerpakket PHREEQC [8]. Het idee om EPANET-resultaten te combineren met PHREEQC-berekeningen is eerder toegepast binnen het bedrijfstakonderzoek [1]. Ook waterbedrijven werken aan een koppeling [9]. De waarden van waterkwaliteitsparameters voor mengverhoudingen tussen 0 en 100% zijn berekend en gepresenteerd in Tabel 1 en Afbeelding 2. De hardheid, SI, TACC en EGV hangen bijna recht evenredig af van de mengverhouding.



Afbeelding 2. Berekende evenwichtparameters als functie van de mengverhouding: a) hardheid, b) verzadigingsindex, c) theoretische afzetbaarheid van calciumcarbonaat en d) elektrische geleidingscoëfficiënt. In paneel c) en d) zijn waarden voor 10°C (blauw) en 90°C (rood) weergegeven.

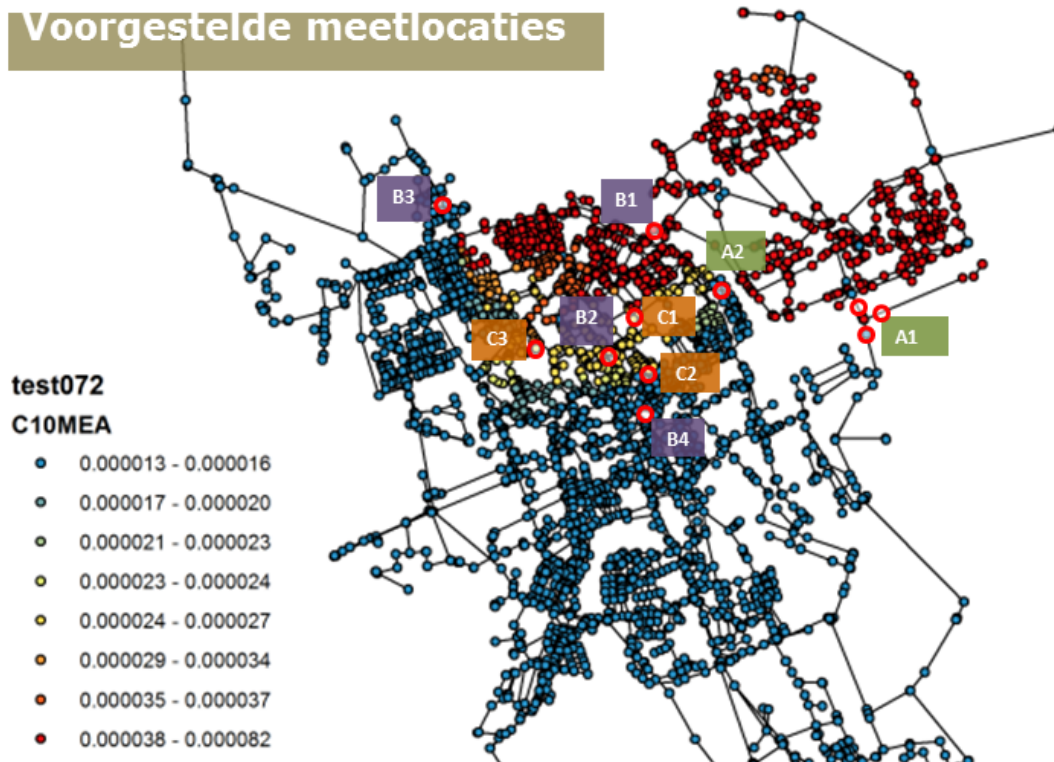
Het ruimtelijke patroon van SI-, TACC- en EGV-waarden in Groningen is bijna gelijk aan dat van de mengverhoudingen in het distributienet, zoals getoond in Afbeelding 1. Afbeelding 3 illustreert dit voor de parameter TACC<sub>10</sub>. Op basis van de berekeningen worden geen problemen met het kalkafzettend vermogen verwacht in het gebied. Wel is het mogelijk dat in de praktijk variaties merkbaar zijn voor de klant en tot klantmeldingen leiden.

### Een meetplan voor waterkwaliteitsmonitoring met sensoren

In de vorige paragraaf is beschreven hoe het sluiten van een afsluiter lokaal een grote invloed heeft op de menging en mengverhoudingen (Afbeelding 1c). Het is dan ook belangrijk om de uitkomsten te toetsen aan praktijkgegevens en waar nodig het model aan te passen aan de werkelijke situatie.

Voor deze toetsing is gekozen voor het meten van de elektrische geleidbaarheid (EGV), omdat deze onderscheidend is tussen de watertypes van PS De Punt en PS Onnen. De mengverhouding en het kalkafzettend vermogen zijn niet direct meetbaar, maar met de EGV-metingen wel goed in te schatten (Tabel 1). Door online (continu) te meten is bovendien na te gaan of de parameters in de tijd of veranderen of constant blijven, en of dit klopt met het model. In het verleden zijn EGV-metingen al gebruikt om in de provincie Groningen de herkomst van water vanaf verschillende pompstations te identificeren [10]. Op basis daarvan zijn ook relevante locaties voor online monitoring voorgesteld. Ook voor de situatie van steunlevering in de stad Groningen zijn online monitoring-locaties te bepalen. Op basis van de modeluitkomsten zijn 9 sensorlocaties voorgesteld (Afbeelding 3). De locaties zijn zo gekozen dat kan worden nagegaan of op bepaalde locaties het

water ongemengd blijft of juist mengt in de berekende verhoudingen. De TACC10-waarden in Afbeelding 3 zijn in hetzelfde bereik als de waarden in Afbeelding 2c. Uit Tabel 1 is af te lezen dat er geen problemen met het kalkafzettend vermogen worden verwacht in het gebied.



Afbeelding 3. Aanbevolen meetlocaties (labels) voor waterkwaliteitsmonitoring met geleidbaarheidssensoren. In het leidingnet zijn de berekende TACC<sub>10</sub>-waarden (mol/l) aangegeven.

### Perspectief - het gebruik van sensornetwerken en modellen voor waterkwaliteitsmonitoring

De casus van de stad Groningen laat zien hoe afgeleide waterkwaliteitsparameters zijn te bepalen met behulp van modelberekeningen. Real-time waterkwaliteitssensoren worden in Nederland nog niet op grote schaal toegepast in het leidingnet. Ook voor het huidige onderzoek waren dergelijke gegevens nog niet beschikbaar. Wel is aan te geven wat de mogelijkheden zijn indien realtime gegevens in de toekomst beschikbaar komen. Door de meetgegevens direct te verwerken wordt een actueel inzicht mogelijk, zoals beschreven in [1]. De softsensor is niet alleen in te zetten voor de berekening van kalkafzetting maar voor elke parameter waarvoor relevante meetgegevens beschikbaar zijn. Het combineren van meerdere typen karakteristieken en dynamieken, ook wel datafusie genoemd, zal het inzicht in de waterkwaliteit vergroten.

De handmatige analyse van real-time meetgegevens wordt al snel ondoenlijk: het automatisch herkennen van patronen met dataminingtechnieken biedt dan uitkomst. Recent zijn de mogelijkheden en aandachtspunten voor stappen richting een data-gedreven bedrijfsvoering beschreven [11]. Ook wordt onderzocht hoe signalen van verschillende sensoren zijn te analyseren voor het herkennen van afwijkingen van normale operatie, bijvoorbeeld om foutief geadmistrateerde afsluiters op te sporen [12]. Ook zijn de eerste stappen gezet om kunstmatige intelligentie in te zetten om sensorgegevens om te zetten in nuttige informatie over waterkwaliteitsparameters [13].

Het inrichten van een netwerk van sensoren en de juiste infrastructuur voor datamanagement en -analyse én het opbouwen van de benodigde expertise vergen een substantiële investering. Om de keuze voor sensorinstallaties degelijk te onderbouwen moet goed worden nagedacht over de drijfveren van waterbedrijven, de doelstellingen, en de verwachte opbrengsten en investeringen van sensornetwerken. De kosten-opbrengsten-verhouding van een sensornetwerk zal bijvoorbeeld positiever uitpakken indien het voor meerdere doeleinden wordt ingericht [14, 15]. KWR heeft via een aantal applicaties en onderzoeksprojecten een veelomvattende aanpak uitgewerkt voor het ontwikkelen van een sensornetwerk [16]. Daarbij wordt aandacht besteed aan de selectie van de juiste sensoren, een kosten-baten analyse [17], een ontwerpproces met geavanceerde optimalisatietechnieken, en een goed inzicht in het niveau waarop het sensorsysteem ingrijpt. Dit maakt het mogelijk om waterbedrijven van onderbouwd advies te voorzien rond oplossingen voor drinkwaterdistributievraagstukken met sensoren en modellen.

## **Conclusie**

In de Nederlandse drinkwatersector worden steeds vaker modellen en sensoren gebruikt ter ondersteuning van operationele beslissingen. In een recent onderzoek voor Waterbedrijf Groningen is de afgeleide waterkwaliteitsparameter “kalkafzettend vermogen” voor de stad Groningen met behulp van een model bepaald. Met de softsensor-methodiek is het mogelijk om (real-time) sensorgegevens te integreren om zo een actueel beeld te geven van de waterkwaliteit, niet alleen op de gemeten locatie, maar ook op de locaties waar metingen ontbreken. Ook is het mogelijk om de situatie in de nabije toekomst te voorspellen. En het kan gaan om direct gemeten of afgeleide parameters. Een voorwaarde is wel dat grote hoeveelheden data beschikbaar zijn. De softsensor is een flexibele, breed-inzetbare methodiek met de potentie om de ondersteuning van operationele beslissingen verder te verbeteren. Een volgende stap is om de softsensor toe te passen op een groot distributienet.

## **Referenties**

- [1] Vries, D., Van den Akker, B., Van Summeren, J. (2015). Prototype softsensor voor het kalkafzettend vermogen van leidingwater. Rapport BTO 2015.030.
- [2] Drinkwaterbesluit 23 mei 2011. Staatsblad nummer 293, 21 juni 2011.
- [3] Slaats, N., Meerkerk, M., Palmen, L., Brink, H. (2015). Conditionering van drinkwater: de aanbevelingen voor optimale samenstelling in 2014. H2O-online 9 januari 2015.
- [4] Brink, H., Van Eekeren, M. W. M., Feij, L. A., Van Rosmalen, G. M. (1997). TACC90 en SI90 nuttige hulpmiddelen bij voorspellen van kalkafzetting en noodzaak ontharding. H2O nr.3 1997.
- [5] De Moel, P. J., Van der Helm, A. W. C., Van Rijn, J. C., Van der Meer, G. J. (2013). Assessment of calculation methods for calcium carbonate saturation in drinking water for DIN 38404-10 compliance. Drinking Water Engineering and Science Discussions 6 (2), pp. 167-198.
- [6] Projectbegeleidingsgroep Kalkafzetting (1997). Nieuwe parameters voor het kalkafzettend vermogen van water –Samenhang met problemen in de praktijk. Rapport SWE 97.008. ISBN 90-74741-43-6.
- [7] Rossman, L. (2000). EPANET 2 Users manual. U.S. Environmental Protection Agency, APA/600/R-00/057.
- [8] Parkhurst, D. L., C. A. J. Appelo (2013). Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods book 6, chap. A43. Denver, Colorado, U.S. Geological Survey: 487.
- [9] Heinsbroek, A.R., Wolthek, N.B.A., Wuestman, R. (2017). Integrated treatment plant and distribution network models to predict the drinking water quality from source to tap. CCWI 2017 (F82).
- [10] Eén eenvoudige parameter (EGV) geeft inzicht in drinkwaterdistributie –Perry van der Marel en Dirk van der Woerdt (WLN). H2O vakartikel, 5 augustus 2014.
- [11] Vonk, E., Vries, D. (2016). Datamining voor assetmanagement –inventarisaie en voorbeelden uit de watersector. KWR Watercycle Research Institute, Rapport BTO 2016.007.
- [12] Vries, D., Van Summeren, J. (2017). Valve status verification and sensor error detection via causal inference from sensor data. CCWI2017 (F94).
- [13] Van Summeren, J., Kronemeijer (2015). Algoritme voor real-time concentratie-bepaling van nutriënten met de Liqum fingerprint-sensor. Rapport KWR 2015.041.
- [14] Sensing 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). H2O vakartikel 5 november 2014.

[15] Van Summeren, J., Van Thienen, P., Vries, D., Vertommen, I., Korevaar, M. (2016). Inzet van meervoudig toepasbare sensornetwerken ten behoeve van kostenefficiënte monitoring van het drinkwaterdistributienet. Rapport BTO 2016.048.

[16] Urioc S., Van Thienen, P., Kools, S., Van Summeren, J. A comprehensive approach to sensor network valorization. (Ingediend als conferentiepapier voor Amsterdam International Water Week, 2017).

[17] Van Summeren, J. (2016). Investerings en rendementen van sensornetwerken ten behoeve van waterkwaliteitsbewaking - TKI INTEREST. KWR Watercycle Research Institute, Rapport KWR 2016.052.