

BTO 2019.027 | December 2019

## **BTO** rapport

Verkenning van  
identificatie van  
afsluiterstanden met  
toepassing van  
geleidbaarheidsensoren  
in het distributienet van  
Groningen



# BTO 2019.027

## Verkenning van identificatie van afsluiterstanden met toepassing van geleidbaarheidsensoren in het distributienet van Groningen

BTO 2019.027 | December 2019

### Opdrachtnummer

402045-010

### Projectmanager

drs. P.G.G. (Nellie) Slaats

### Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

### Kwaliteitsborger(s)

dr. P. (Peter) van Thienen

### Auteur(s)

dr. J.R.G. (Joost) van Summeren, B. (Bram) Hillebrand MSc

### Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.  
Een jaar na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie  
2019

#### Meer informatie

dr. Joost van Summeren  
T +31 (0)6 54294828  
E [Joost.van.summeren@kwrwater.nl](mailto:Joost.van.summeren@kwrwater.nl)

Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)



BTO 2019.027 | Mei 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

**Jaar van publicatie**  
2019

**Meer informatie**

dr. Joost van Summeren

T +31 (0)6 54294828

E [Joost.van.summeren@kwrwater.nl](mailto:Joost.van.summeren@kwrwater.nl)

Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

F +31 (0)30 60 61 165

E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)

I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

**BTO 2019.027 | Mei 2019 © KWR**

*Alle rechten voorbehouden.*

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



## BTO Managementsamenvatting

### *EGV-meters in het distributienet geven inzicht in kwaliteit van leidingnetmodellen en potentie tot opsporen van foutieve afsluiterstanden*

**Auteurs:** dr. J.R.G. (Joost) van Summeren, B. (Bram) Hillebrand MSc

Continue sensormetingen in het distributienet uitvoeren en verwerken, kan real-time inzicht in afgeleide waterkwaliteitsparameters en het verbeteren van numerieke modellen een stap dichterbij brengen. Sensoren worden in het distributienet nog niet op grote schaal toegepast in Nederlandse distributienetten. Het opdoen van meer praktische ervaring, kan helpen bij het identificeren van de kansen en uitdagingen en voor drinkwaterbedrijven in het gebruik van sensoren voor operationele doeleinden. In Groningen zijn daarom op zeven locaties in het distributienet sensoren geïnstalleerd voor het continu meten van het elektrisch geleidend vermogen. Een netwerkanalyse liet zien hoe een vergelijking tussen gemeten en numeriek berekende sensorsignalen is in te zetten voor netwerkkalibratie en welke vervolgstappen nodig zijn om de methodiek verder toepasbaar te maken.



*Waterbedrijf Groningen installeerde sensoren op zeven locaties in het drinkwaterdistributienet van de stad Groningen om continu het elektrisch geleidend vermogen te meten*

**Belang:** praktische ervaring geeft inzicht in potentie van continue metingen in leidingnet. Continue sensormetingen in het distributienet, en verwerking van de sensorgegevens kan een stap vooruit betekenen richting real-time inzicht in afgeleide waterkwaliteitsparameters, zoals biofilmvorming, deeltjesvervuiling, kalkafzettend vermogen en troebelheid in het leidingnet.

Continue meting van waterkwaliteitsparameters kan bovendien bijdragen aan het kalibreren van de hydraulische netwerkmodellen die bijvoorbeeld worden gebruikt als basis voor andere netwerkanalyses, zoals het voorspellen van de accumulatie van deeltjesmateriaal of van de verspreiding van mogelijke chemische verontreinigingen door een leidingnet. De

huidige technologische ontwikkelingen op sensorgebied brengen een (bijna) real-time inzicht in belangrijke waterkwaliteitsparameters binnen bereik. Toch worden continue sensormetingen in Nederland nog niet op grote schaal toegepast: er is nog veel onzekerheid over de kosten en opbrengsten van die toepassing. Door meer praktische ervaring op te doen, kan de drinkwatersector gemakkelijker kansen en uitdagingen identificeren en meer inzicht krijgen in de waarde van real-time inzicht in waterkwaliteitsparameters en in mogelijke toepassingen voor nuttige, operationele doeleinden.

#### Aanpak: installatie van geleidbaarheidsensoren en toetsing van modellen aan metingen

Acht sensoren voor het elektrisch geleidend vermogen (EGV) zijn aangeschaft en hun meetprestaties zijn getoetst in een laboratoriumopstelling. Aan de hand van een leidingnetanalyse zijn meest geschikte locaties voor deze sensoren in de stad Groningen bepaald, waarna samen met het waterbedrijf de uiteindelijke, praktisch haalbare locaties voor de sensoren zijn vastgesteld. Waterbedrijf Groningen heeft op zeven locaties sensoren geïnstalleerd.

Om inzicht te krijgen in de mogelijkheden voor het kalibreren van afsluiterstanden is een netwerkanalyse uitgevoerd. Hierin zijn de gemodelleerde en gemeten EGV-metingen met elkaar vergeleken en is onderzocht in hoeverre tijdelijke (bewuste) sluiting van een afsluiter een herkenbaar EGV-signaal oplevert.

#### Resultaten: installatie sensoren succesvol; potentie voor kalibratie gedemonstreerd

De belangrijkste factoren voor het succesvol installeren van sensoren bleken te zijn:

- evaluatie van sensorprestaties in het laboratorium voor de installatie in het leidingnet;
- de gewenste meetlocaties bepalen met een netwerkanalyse;
- overleg met Waterbedrijf Groningen over praktisch haalbare locaties.

Het onderzoek heeft in totaal 4 maanden aan nuttige sensordata opgeleverd.

De leidingnetmodellen zijn aangepast aan de werkelijke operationele omstandigheden met gebruik van online meetgegevens van twee leveringslocaties –een vorm van data-assimilatie. Op deze manier zijn gemodelleerde EGV-waardes berekend op de sensorlocaties en vergeleken met de gemeten waarden.

Uit een beperkte data-analyse bleek een aangepaste afsluiterstand niet herkenbaar in de signalen. Wel tonen de resultaten de potentie om met EGV-metingen leidingnetten te kalibreren. Verschillen tussen gemodelleerde en gemeten EGV-waarden suggereren een verschil in verblijftijden en mengverhoudingen. Dit onderstreept het belang van het uitvoeren van referentiemetingen in het distributienet met EGV-metingen voor een betrouwbaar inzicht in de waterkwaliteit in het distributienet.

#### Toepassing: handvatten voor sensorinstallatie en vervolgstappen voor modelkalibratie

Het uitgevoerde onderzoek geeft handvatten voor de praktische voorbereiding en inrichting van een netwerk van sensoren. De data-analyse geeft een eerste illustratie van hoe verschillen en overeenkomsten tussen modeluitkomsten en sensormeting zijn te gebruiken om de kwaliteit van leidingnetmodellen op waarde te schatten en te kalibreren. Vervolgstappen zijn echter nodig voor een beter inzicht in de vraag in hoeverre foutieve afsluiterstanden zijn te identificeren. Het is aan te bevelen inzichtelijk te maken wat de modelonzekerheden zijn, zoals stochastische verbruikspatronen, variatie in wandruwheden en leidingdiameters. Ook is inzet van optimalisatietechnieken nodig om leidingnetten systematisch te kalibreren.

#### Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *EGV-sensoren in het distributienet van Groningen voor het kalibreren van leidingnetmodellen* (BTO-2019.027).

#### Meer informatie

dr. Joost van Summeren  
T +31 (0)6 54294828  
E Joost.van.summeren@kwrwater.nl

KWR  
PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands





# Inhoud

<b>Inhoud</b>	<b>3</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1 Belang van metingen van waterkwaliteitsparameters in het distributienet	5
1.2 Projectdoel: een routekaart voor Smart Water Networks vanuit een casestudie	5
1.3 Leeswijzer	6
<b>2 Installeren van een sensornetwerk</b>	<b>7</b>
2.1 Selectie van sensoren voor elektrische geleidbaarheid en druk	7
2.2 Prepareren van sensoren	8
2.3 Toetsing van sensoren in het lab	8
2.4 Keuze voor casestudiegebied stad Groningen	9
2.5 Leidingnetmodel van Groningen	9
2.6 Bepalen van sensorlocaties met hydraulische modellering	11
2.7 Installatie in het distributienet	13
2.8 Verblijftijdmetingen	14
<b>3 Vergelijk van modeluitkomsten met meetgegevens van EGV-sensoren in de stad Groningen</b>	<b>17</b>
3.1 Aanpak voor onderzoek naar afsluiterstanden met EGV-metingen in het distributienet	17
3.2 Overzicht van meetgegevens van Waterbedrijf Groningen	17
3.3 Afsluitermanipulaties in het distributienet	19
3.4 Actualiseren van het leidingnetmodel met meetgegevens van pompstations	20
3.5 Vergelijking van modeluitkomsten en sensorgegevens	23
<b>4 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>33</b>
4.1 Conclusies	33
4.2 Aanbevelingen	34
<b>5 Literatuur</b>	<b>35</b>
<b>Bijlage I –Testen van de functionnalité van CTD DIVER conductiviteitsensoren</b>	<b>36</b>
<b>Bijlage II –Bepalen van sensorlocaties in Groningen</b>	<b>42</b>
<b>Bijlage III –Bepalen van meetlocaties in Assen</b>	<b>50</b>





# 1 Inleiding

## 1.1 Belang van metingen van waterkwaliteitsparameters in het distributienet

De huidige hydraulische modellen worden weinig toegepast op waterkwaliteitsvraagstukken in het distributienet en zijn hier ook slechts in beperkte mate voor toegerust. Niettemin zijn er wel belangrijke vragen op dit gebied: bijvoorbeeld hoe hard is het water bij de klant, welk dekkingsgebied wordt getroffen bij een (fecale) contaminatie, of hoe presteren (zelfreinigende) netten op deeltjesvervuiling of biofilmvorming? Met technologische ontwikkelingen op sensorgebied gaat een (bijna) real-time inzicht in belangrijke waterkwaliteitsparameters tot de mogelijkheden behoren.

De toepassing van continue sensormetingen in het distributienet en het (real-time) verwerken van de sensorgegevens kan een stap vooruit betekenen richting real-time inzicht in afgeleide waterkwaliteitsparameters zoals biofilmvorming, deeltjesvervuiling, kalkafzettend vermogen en kleur in het leidingnet. Dit is bijvoorbeeld van belang als met aanvullende bronnen met een afwijkende waterkwaliteit wordt geleverd, wat vanwege veranderingen in klimaat en bodemgebruik in de toekomst wellicht vaker zal voorkomen. Het beter duiden van klachten of problemen waarvan (afwijkende) mengpatronen de oorzaak vormen, kan de handelingsmogelijkheden vergroten om de effecten van problemen te beperken en de informatievoorziening aan klanten over de toedracht van de problemen verbeteren.

Dat een real-time waterkwaliteitsbeeld nog niet is gerealiseerd, hangt samen met enkele knelpunten:

- (i) de aanleg en het onderhoud van een sensornetwerk vergt een substantiële investering voor een waterbedrijf, terwijl de opbrengsten nog onduidelijk of te beperkt zijn (Van Thienen e.a., 2014; Van Summeren e.a., 2016);
- (ii) de werking van waterkwaliteitssensoren is in de praktijk verre van probleemloos;
- (iii) voor het correct bepalen van het waterkwaliteitsbeeld is een goed gevalideerd hydraulisch model essentieel, terwijl modellen in werkelijkheid fouten bevatten als gevolg van modelaanname en incomplete informatie (verbruik, afsluiterstanden, e.d.).

Hoewel een aantal Nederlandse waterbedrijven al experimenteren met real-time waterkwaliteitssensoren in het distributienet, is de inzet van dergelijke sensoren nog niet gebruikelijk in Nederland. Het opdoen van praktische ervaring kan helpen bij het identificeren van de kansen en uitdagingen en voor drinkwaterbedrijven nieuwe inzichten bieden in het toewerken naar een real-time inzicht in waterkwaliteitsparameters en mogelijke toepassingen voor nuttige, operationele doeleinden.

## 1.2 Projectdoel: een routekaart voor Smart Water Networks vanuit een casestudie

Het voorliggende rapport beschrijft onderzoek naar de mogelijkheden voor Nederlandse drinkwaterbedrijven voor het toepassen van real-time sensoren in het

distributienet voor een verbeterd waterkwaliteitsbeeld en kalibratie van hydraulische netwerkmodellen. Om voorbij een theoretische beschouwing te gaan, is gekozen voor een praktische insteek en toepassing op een casestudie, nl. de stad Groningen in het gebied van Waterbedrijf Groningen. De gevolgde aanpak bestaat uit de volgende stappen:

- evaluatie en selectie van een pilotgebied;
- selectie, aanschaf, technische voorbereiding, toetsing in het lab en installatie in een distributiegebied van continue sensoren voor de elektrische geleidbaarheid en druk;
- selectie van sensorlocaties in het pilotgebied op basis van een hydraulische netwerkanalyse en praktische overwegingen;
- installatie van sensoren in het distributiegebied en het verzamelen van de sensor- en omgevingsdata;
- uitwerking van een dataverwerkingsmethodiek;
- verwerking en analyse van de meetgegevens gericht op een verbeterd inzicht in de mengverhoudingen van twee watertypes in het distributiegebied en kalibratie van hydraulische modellen (specifiek: het herkennen van foutieve afsluiterstanden).

Het toepassen in een casestudie vergroot de kennis van praktische aspecten rond continue metingen van waterkwaliteitsparameters in het distributienet. Op een abstracter, strategisch niveau is het onderzoek te beschouwen als een routekaart richting Smart Water Networks, waarin ook praktische aspecten en de optiek van het waterbedrijf aan bod komen.

### 1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de aspecten rond de installatie van continue sensoren in het besproken casestudiegebied. Dit omvat de selectie en aanschaf van sensoren, het bepalen van geschikte sensorlocaties, toetsing van meetprestaties in het lab, installatie op drinkwaterleidingen en het uitlezen van gegevens.

In Hoofdstuk 3 is uiteengezet hoe online gegevens zijn gebruikt om de leidingnetmodellen te actualiseren. Hiermee wordt een vergelijking gemaakt van gemodelleerde EGV-waarden op de sensorlocaties en de daadwerkelijke metingen. Hiermee is onderzocht in hoeverre een afwijkende afsluiterstand is te herkennen, met als achterliggend doel het kalibreren van leidingnetmodellen. De inzichten zijn mogelijke vervolgstappen zijn besproken in Sectie 0.

Hoofdstuk 4 bevat de conclusies en aanbevelingen voor vervolgonderzoek volgend uit dit onderzoek.

## 2 Installeren van een sensornetwerk

### 2.1 Selectie van sensoren voor elektrische geleidbaarheid en druk

Eerder onderzoek heeft aannemelijk gemaakt dat de elektrische conductiviteit (hierna ook aangeduid als EGV voor elektrisch geleidend vermogen) van drinkwater in het distributienet in veel gevallen voldoende onderscheidend is om de productiebron van het water (i.e. de pompstations) te kunnen bepalen (Van der Marel & Van der Woerd, 2014). Ook is EGV een relatief stabiele, makkelijk te meten parameter. Voorgaand bedrijfstakonderzoek wees uit dat de EGV bruikbaar is om in het distributienet mengverhoudingen van verschillende watertypes en de waterherkomst te herleiden (Vries & Van Summeren, 2018). Om deze redenen is de EGV geselecteerd als meetparameter in dit onderzoek.

Bij het selecteren van het type sensor is rekening gehouden met de volgende aspecten:

- robuustheid van sensoren en levensduur van batterij ten behoeve van sensormetingen over een langere periode (meerdere jaren);
- grootte van de sensoren en gemak van installatie in drinkwaterleidingen;
- gemak van uitlezen van sensorgegeven;
- nauwkeurigheid van EGV-metingen -hierbij is rekening gehouden met de gangbare EGV-verschillen tussen watertypes in de stad Groningen (De Punt en Ruischerbrug);
- kosten /aantal sensoren -er is uitgegaan van een vaststaand budget (€12.000,-).

Er is gekozen voor aanschaf van acht CTD-DIVER sensoren (Figuur 1), met de volgende specificaties:

- De sensoren meten EGV, druk en temperatuur. Hiermee is met één sensor zowel een waterkwaliteits- (EGV) als waterkwantiteitsparameter (druk) te meten en dit vergroot de mogelijkheden voor modelkalibratie. De temperatuur wordt gebruikt voor ijking van de EGV naar een referentietemperatuur van 25°C).
- Volgens de specificaties van de producent is de meetnauwkeurigheid voldoende voor het beoogde doel:
  - o meetbereik: 0-120.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
  - o nauwkeurigheid:  $\pm 1\%$  van aflezing met een minimum van 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
  - o resolutie: 0,1% van aflezing met een minimum van 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (voor een ingesteld meetbereik van 0-30.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (voor een ingesteld meetbereik van 0-120.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).
- De keramische behuizing van de sensor draagt bij aan de robuustheid van de sensor.
- De dimensies van de sensor ( $\varnothing$  2,2 cm doorsnee; 13,5 cm lengte) maken de sensor geschikt voor installatie in drinkwaterleidingen.
- De data-opslagcapaciteit van de sensor volstaat om een maand lang data te verzamelen bij een meetinterval van 1 minuut.
- De sensoren zijn via een datakabel bovengronds uit te lezen met een USB-stick, wat bijdraagt aan de praktische toepasbaarheid.
- De sensoren zijn in te stellen met bijgeleverde software.



Figuur 1. CTD-Diver sensor voor continue metingen van het elektrisch geleidend vermogen (EGV), temperatuur en druk. Bron: Handleiding Diver, Van Essen Instruments.

## 2.2 Prepareren van sensoren

Ter voorbereiding op installatie in het leidingnet heeft KWR de sensoren gereedgemaakt voor drukloze installatie op drukhoudende drinkwaterleidingen. In de gekozen uitvoering omsluit een kraagbuis met O-ring de sensor. Het geheel wordt in een aanboorzadel gebracht en afgesloten met een wartel (Figuur 2). Deze uitvoering voorkomt lekkage of losschieten bij montage op een drukhoudende waterleiding. Alleen de (brede) kop van de sensor steekt in het drinkwaterhoudende deel van de leiding; de (smalle) behuizing bevindt zich buiten de waterleiding. Daarmee kan het een belemmering vormen bij bijvoorbeeld het proppen van een leiding, maar het water kan vrij langs de sensor stromen.

Het systeem is in achtvoud uitgevoerd en afgestemd op montage op Ø110 mm en Ø160 mm leidingen.



Figuur 2. Voorbereiding van sensoren voor installatie op drinkwaterleidingen. (Links) CT-DIVER sensor, kraagbus, O-ring en wartel, (rechts) montage van de sensor met een aanboorzadel op een PVC Ø110 mm leiding.

## 2.3 Toetsing van sensoren in het lab

Om de meetspecificaties van de leverancier te verifiëren en praktische ervaring op te doen met de sensoren heeft Waterbedrijf Groningen twee sensoren getoetst in een lab-opstelling. KWR heeft de meetgegevens geanalyseerd. De tests zijn beschreven in Bijlage I.

De testresultaten geven voldoende vertrouwen in het functioneren van de sensoren om deze in te zetten voor realtime metingen in het leidingnet. In het algemeen meten de sensoren met een juistheid en precisie die overeenstemt met de specificaties van de leverancier. Metingen van de twee geteste sensoren zijn onderling consistent en er is geen substantiële invloed gemeten van de watersnelheid op de sensormetingen – een mogelijkheid die werd gesuggereerd door leverancier. Bij één sensor werden bij hoge watersnelheden (20 cm/s) kortstondige uitbijters in EGV-waarden waargenomen. De oorzaak hiervan is onduidelijk. Dit is aangemerkt als aandachtspunt, maar omdat dergelijke uitbijters makkelijk zijn weg te filteren is dit geen reden geweest om installatie in het veld niet door te laten gaan.

#### 2.4 Keuze voor casestudiegebied stad Groningen

Het distributienet van de stad Groningen (Waterbedrijf Groningen) is geselecteerd als primair casestudie-gebied en er is gekozen om alle sensoren in dit gebied te plaatsen. Als potentieel tweede casestudiegebied is het distributiegebied van Assen (Watermaatschappij Drenthe, WMD) beschouwd. WMD heeft daartoe onderzocht hoe metingen uitgevoerd door Waterlaboratorium Noord zouden kunnen bijdragen aan het onderzoek.

Eén optie was om bij brandkranen of aansluitleidingen continue metingen van de EGV uit te voeren. Een nadeel hierbij is echter dat de metingen in sterke mate afhangen van het verbruik in de leidingen: een EGV-puls kan bijvoorbeeld ongezien passeren, of met een vertraging de meetlocatie bereiken. Daarnaast zou het vragen van toestemming van klanten de nodige tijd en moeite vergen. Een andere optie was om momentane metingen uit te voeren: driemaal daags op zes locaties, gedurende vijf dagen. Momentane metingen zouden echter weinig bijdragen aan inzichten om met continue metingen modellen te kalibreren.

Vanwege de nadelen bij beide opties is besloten om in Assen geen tweede casestudiegebied in te richten. In de rest van dit rapport gaat de aandacht daarom uit naar het studiegebied Groningen.

#### 2.5 Leidingnetmodel van Groningen

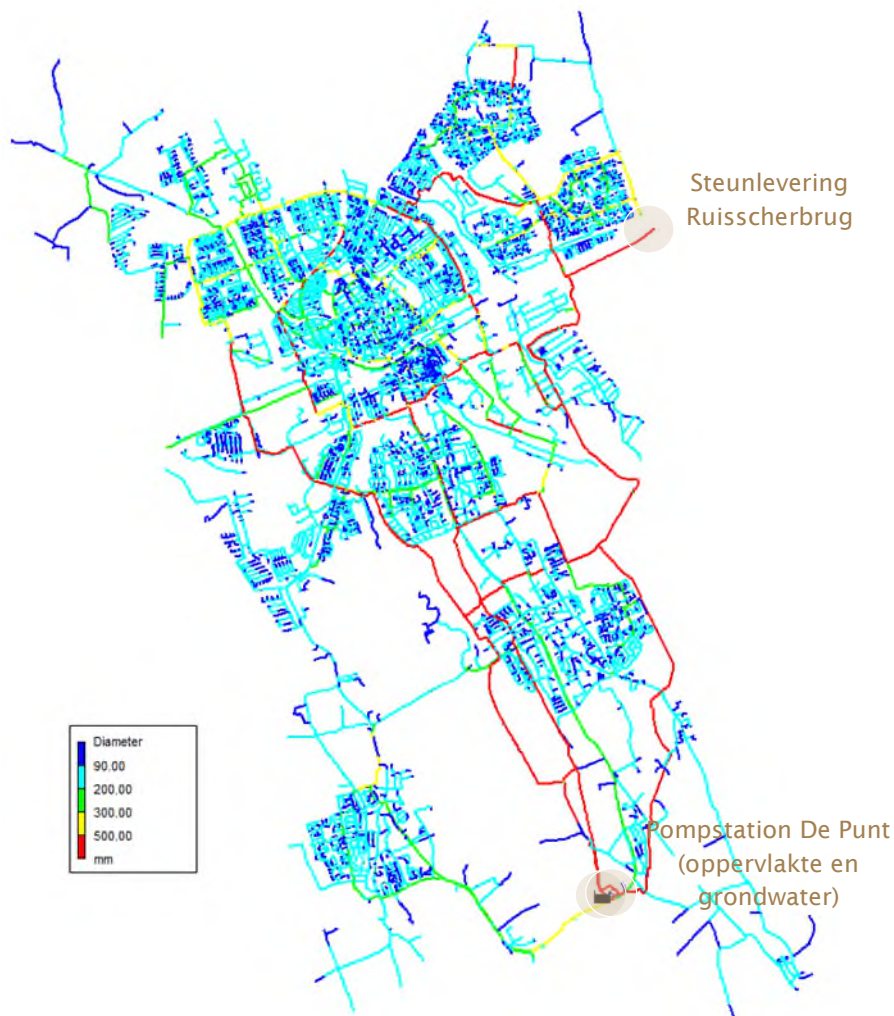
Het distributiegebied van de stad Groningen (Figuur 3) heeft een open structuur en wordt gekarakteriseerd door levering vanuit twee pompstations:

- Hoofdlevering vindt plaats vanuit P.S. De Punt. De werkelijke situatie met meerdere reservoirs en pompunits is in een EPANET-model gemodelleerd als een enkel reservoir met constante druk en voorgeschreven levering.
- Doorleverpunt Ruisscherbrug voorziet in steunlevering tijdens periodes dat dit gewenst is. Dit punt is gemodelleerd als een negatief verbruikspunt.

Algemene leidingnetspecificaties zijn samengevat in

Tabel 1. Er is gebruikt gemaakt van een onverdund leidingnetmodel.





Figuur 3. Networkstructuur van het distributieggebied van de stad Groningen. Leveringspunten De Punt en Ruisscherbrug zijn aangegeven met lichtgrijze cirkels. Leidingdiameters zijn aangegeven volgens de kleurcodering in de legenda.

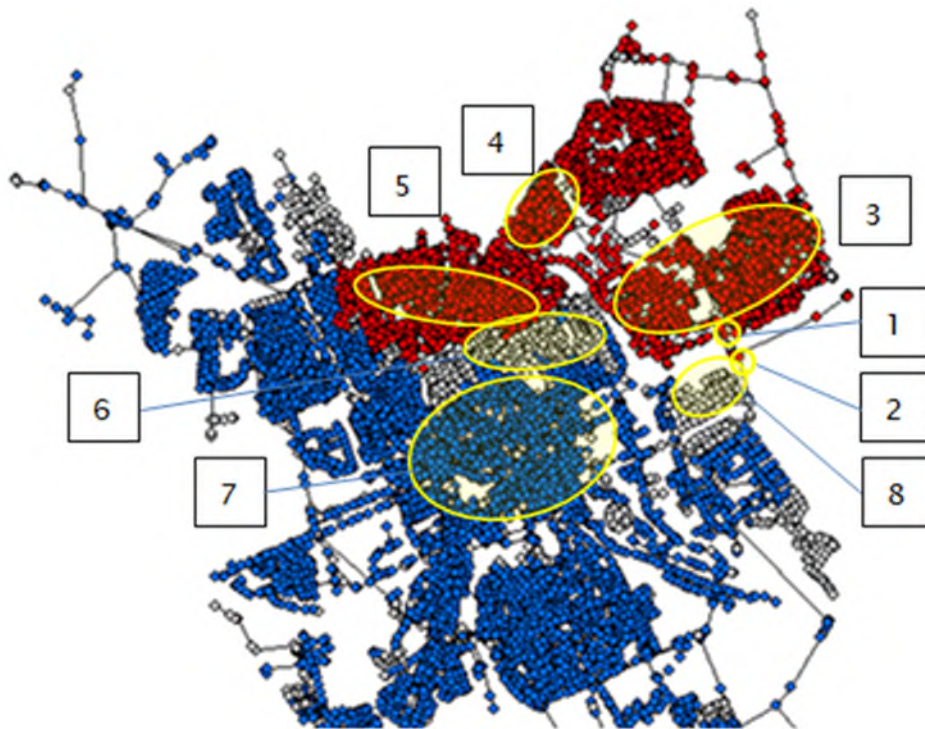
Tabel 1. Specificaties van het leidingnetmodel voor de stad Groningen.

<b>Aantal knooppunten</b>	<b>36255</b>
Aantal verbruiksknooppunten (deelverzameling van bovengenoemde knooppunten)	3068
Aantal leidingen	37492
Aantal afsluiters	3813
Tijdstap hydraulische berekening	15 minuten
Tijdstap waterkwaliteitsberekening	1 minuut

## 2.6 Bepalen van sensorlocaties met hydraulische modellering

Het bepalen van optimale sensorlocaties is uitgevoerd met een hydraulische netwerkanalyse, voor (de stad) Groningen en Assen. Een gedetailleerde beschrijving is te vinden in Bijlage II en Bijlage III. Hieronder volgt een beknopte beschrijving van de aanpak en belangrijkste uitkomsten voor het casestudiegebied Groningen.

Voor verschillende scenario's van waterverbruik en -levering is berekend waar mengzones ontstaan en hoe deze in de tijd variëren. Op basis van deskundige beoordeling zijn voorkeursgebieden voor acht sensorlocaties geïdentificeerd, met als criterium het gehele menggebied te dekken (Figuur 4). Er is bewust uitgegaan van voorkeursgebieden (in plaats van precieze locaties) om Waterbedrijf Groningen ruimte te bieden in het kiezen van praktische locaties.



Figuur 4. Acht voorkeursgebieden voor sensorlocaties in casestudiegebied Groningen.

Bij het kiezen van definitieve sensorlocaties moest Waterbedrijf Groningen rekening houden met een aantal praktische overwegingen. De belangrijkste algemene overweging betreft de keuze voor leidingdiameter. Voor de toepassing (modelkalibratie) is het enerzijds gewenst om te monitoren op grote leidingen (transport- of doorvoerleidingen). Anderzijds plaatst Waterbedrijf Groningen de sensoren bij voorkeur op 100 á 200 mm leidingen om leveringsonderbreking te beperken. Met deze tegengestelde argumenten is op twee manieren omgegaan:

- Plaatsing van sensoren op 200 mm leidingen met (deels) een transportfunctie, als compromis tussen bovengenoemde argumenten.
- Plaatsing van sensoren op een aftakkende leiding van een transportleiding. Het is te verwachten dat daar dezelfde druk als in de transportleiding heerst, zolang er tussen de sensorlocatie en de transportleiding geen grote leidingafstand zit en geen verbruikspunten. Voor de EGV zal een tijdsvertraging

optreden die afhangt van de watervraag op de aftakkende leiding. Om tijdsvertragingen zoveel mogelijk te beperken, is het belangrijk om de sensorlocatie zo dicht mogelijk bij de transportleiding te plaatsen. Er moet met grote zekerheid kunnen worden gesteld dat de aftakkende leiding daadwerkelijk vanuit de transportleiding wordt gevoed (en niet van elders) en dat er in de aftakkende leiding geen grote, plotse fluctuaties in verblijftijd optreden die de EGV-patronen van de transportleiding kunnen vertekenen.

De uiteindelijke zeven meetlocaties, S3 t/m S9, zijn weergegeven in Figuur 5:

- De dekking van het onderzoeksgebied met de 7 sensoren komt redelijk overeen met de beoogde dekking (vergelijk Figuur 5 met Figuur 4). De grootste discrepantie is dat geen sensoren waren te installeren op of nabij de transportleidingen stroomafwaarts van Ruisscherbrug (locaties 1 en 2 in Figuur 4).
- Alle locaties behalve S7 bevinden zich op een distributieleiding nabij een doorvoerleiding (om installatie op een Ø110 mm of Ø160 mm leiding mogelijk te maken). Het is te verwachten dat sensormetingen de staat op de nabijgelegen doorvoerleiding met een kleine tijdsvertraging goed benaderen. Locatie S8 is geïnstalleerd in een vermaasd deel van het leidingnet en is geen aftakking van een nabijgelegen grotere leiding.
- De beoogde voorziening voor een achtste sensor omvatte het afkoppelen van een 300 mm diameter zijtak van een doorgaande leiding en het realiseren van een constante volumestroom van 1 m<sup>3</sup>/u op het einde van de afgekoppelde leiding. Dit bleek echter zo bewerkelijk dat hier uiteindelijk van is afgezien. Met deze sensor zijn in dit project geen metingen uitgevoerd.



Figuur 5. Zeven locaties waarop sensoren zijn geïnstalleerd in casestudiegebied Groningen.

Tabel 2. Specificaties van sensorlocaties in casestudiegebied Groningen.

Locatienummer	Definitieve sensorlocatie	Doel monitoring	Leidingdiameter (mm)
S3	Stuurboordswal	Mengzone (opm. 2).	110
S4	Bakemastraat	Mengzone	110
S5	Virulystraat	Mengzone	160
S6	Vrydemalaan	Mengzone	110
S7	Herestraat	Ongemengd water vanuit P.S. De Punt.	160
S8	Osloweg	Mengzone	160
S9	Hooghoudstraat	Mengzone ten zuiden van steunlevering Ruisscherbrug	160

## 2.7 Installatie in het distributienet

Op zeven locaties zijn sensoren geïnstalleerd door Waterbedrijf Groningen. De foto's in Figuur 6 geven een impressie van de uitgevoerde werkzaamheden. Tijdens de werkzaamheden zijn de leidingen afgesloten om drukloos te kunnen installeren. Een controle van Waterbedrijf Groningen in de weken na installatie bevestigde dat de



sensoren consistente waarden registreerden. In de periode mei 2019 – juli 2019 heeft Waterbedrijf Groningen maandelijks de sensorgegevens uitgelezen.



Figuur 6. Installatie door Waterbedrijf Groningen van conductiviteitssensoren in distributieleidingen van het casestudiegebied.

## 2.8 Verbliftijdmetingen

### 2.8.1 Ervaringen uit eerder bedrijfstakonderzoek

In dit project is geïnventariseerd of verblijftijdsbepalingen met een tracerstof in het leidingnet kunnen bijdragen aan modelkalibratie. Uit de bevindingen is geconcludeerd om in dit project geen verblijftijdsmetingen uit te voeren. Hieronder worden de redenen en geleerde lessen uiteengezet.

In voorgaand bedrijfstakonderzoek hebben KWR en de BTO-drinkwaterbedrijven ervaring opgedaan met verblijftijdsbepalingen middels zoutdoseringen die stroomafwaarts detecteerbaar zijn, maar de waterkwaliteit niet negatief beïnvloeden. De aanpak is succesvol toegepast op kleine schaal (wijken in Benthuizen en Scheveningen,



Blokker e.a., 2006; Blokker e.a., 2008; Blokker & Beverloo, 2009). De belangrijke leringen hieruit zijn:

- *Doseerstof*. Een geschikte doseervloeistof is een oplossing gebruikt van ATA-goedgekeurd natriumchloride (NaCl, hierna: "zout" genoemd) in drinkwater. De voordelen van NaCl zijn de afwezigheid van gezondheidsrisico's en een merkbare invloed op geur of smaak (mits in lage concentraties gedoseerd). Zout is bovendien inert en niet duur.
- *Wijze van dosering*. Dosering bij het pompstation of kelder (vóór de booster-pomp) heeft als voordeel dat de zoutoplossing goed mengt met het drinkwater. Dit voorkomt lensvorming, waarbij het zoute water onderin de leiding blijft. Een alternatief is dosering vanuit een vat met een pomp in het distributienet. Dit heeft als voordeel dat de bepaling is te richten op een specifiek onderzoeksgebied. Bij beide doseerwijzen is het wenselijk om de EGV- direct ná de pomp te meten om de gedoseerde concentratie te controleren en overschrijding van vastgestelde of bedrijfsnormen van de geleidbaarheid te voorkomen.
- *Detecteerbaarheid*. Na dosering zal een EGV-puls tijdens distributie door het leidingnet van amplitude en vorm veranderen door mengeffecten en de invloed van turbulente diffusie en dispersie. Om detecteerbaar te zijn op een meetlocatie moet een EGV-puls bij de bron voldoende groot van amplitude en lang van duur zijn. In Zandvoort nam de amplitude van gedoseerde EGV-pulsen af met een factor 2 over een afstand van honderden meters. Natuurlijke EGV-variëaties zijn doorgaans ongeschikt voor verblijftijdsbepalingen: amplitudes zijn te laag en het verloop in de tijd is grillig en onvoorspelbaar.
- *Concentratie van zoutdosering*. In Zandvoort werd gedoseerd met een oplossing van 220 g/l NaCl (beneden de saturatiegrens, 360 g/l bij 25°C) in een verhouding van 1:3000 met drinkwater, wat resulteerde in een oplossing van 73,3 mg/l. Dit kwam overeen met een gemeten EGV-verhoging van 110 µS/cm. Het zout dient volumeproportioneel met de volumestroom te worden gedoseerd, zodat de ingaande zoutconcentratie constant in de tijd is. In Zandvoort nam de amplitude van EGV-pulsen af met een factor 2 over een afstand van honderden meters.
- *Duur van dosering*. Een doseerperiode van 2 uur is een goede compromis tussen stabiliteit enerzijds (een lange dosering is minder gevoelig voor versturende effecten), en specificiteit (een lange puls is gevoeliger voor de dagelijkse verbruiksvariatie) en praktische overwegingen (een lange puls vergt meer doseerstof).

### 2.8.2 Verkenning van toepassing in Groningen

Met bovenstaande lessen in gedachten zijn de mogelijkheden voor verblijftijdsmetingen in de stad Groningen verder verkend. Zoals hierboven opgemerkt, nam in Zandvoort de amplitude van gedoseerde EGV-pulsen af met een factor 2 over een afstand van honderden meters. In Groningen is de afstand van P.S. De Punt tot het onderzoeksgebied ruwweg 10 km. Om meetbare pulsen te genereren, zijn hogere zoutconcentraties nodig. Uitgaande van een volumestroom bij P.S. De Punt van 750 m<sup>3</sup>/u is nagegaan dat een zoutdosering van 250 l/u nodig is voor een detecteerbare puls. Voor een doseerexperiment van 2 uur is een doseervolume van minimaal 0,5 m<sup>3</sup> nodig met daarin opgelost 110 kg NaCl. Vooraf is niet met zekerheid in te schatten of dit resulteert in meetbare EGV-signalen. Zou dit niet volstaan, dan moet nog zwaarder worden gedoseerd zonder dat daarbij normen worden overschreden of ongewenste effecten voor klanten ontstaan. Na deze inventarisatie is afgezien van dosering bij het

pompstation omdat (i) dosering van dergelijke hoeveelheden zout in drinkwater ingaat tegen de bedrijfsethiek en (ii) dergelijke doseringen een serieuze inspanning vergen, maar succesvolle verblijftijdsbepalingen niet zijn te garanderen.

Een alternatief voor doseringen op transportleidingen is om te doseren op een distributieleiding (bijv. 100 mm). Dit betekent echter een ingewikkelder en kostbaar (orde: €10.000,-) doseersysteem, inclusief een omleiding van de hoofdwaterstroom langs de doseerpomp, een additionele pomp om drukverlies tegen te gaan en een additionele online volumestroommeter voor het afstemmen van een volumeproportionele zoutdosering. Daarnaast is de reikwijdte van dosering op een 100 mm leiding beperkt wat het lastig maakt om meerdere sensorlocaties in één experiment te bereiken. Ook van deze aanpak (zoutdosering op een distributieleiding) is in overleg met Waterbedrijf Groningen afgezien.

## 3 Vergelijk van modeluitkomsten met meetgegevens van EGV-sensoren in de stad Groningen

### 3.1 Aanpak voor onderzoek naar afsluiterstanden met EGV-metingen in het distributienet

De gevolgde aanpak is gericht op het kalibreren van het leidingnet (specifiek: het identificeren van foutief geregistreerde afsluiterstanden) met behulp van EGV-metingen in het distributienet en online metingen bij pompstations. Kalibratie is het proces waarbij een aantal systeemp parameters wordt veranderd, opdat het model het gedrag van een werkelijk waterdistributiesysteem zo goed mogelijk benadert (Kapelan, 2002). De centrale vraag is of een beperkt aantal (zeven) EGV-meters voldoende informatie leveren om onjuiste afsluiterstanden te identificeren.

Op hoofdlijnen bestaat de aanpak uit onderstaande stappen:

- Verzamelen van sensorgegevens (EGV) en online gegevens (EGV, volumestroom). De meetperiode omvat periodes van normale operatie en vier periodes van afwijkende operatie waarin Waterbedrijf Groningen bewust afsluiters heeft gemanipuleerd.
- Actualiseren van het leidingnetmodel door de online EGV en volumestroomgegevens van de pompstations te gebruiken als randvoorwaarden van de modelberekeningen
- Onderzoeken van de invloed van afsluitermanipulatie op (gemodelleerde) EGV-signalen in het distributienet, ter vergelijking met de werkelijke sensorsignalen. De overeenkomst tussen gemodelleerde en gemeten EGV-signalen wordt gebruikt als maat voor een representatief model. Door zowel een model mét en zonder afsluitermanipulatie door te rekenen, is onderzocht of afsluiterstanden zijn te identificeren.

### 3.2 Overzicht van meetgegevens van Waterbedrijf Groningen

Tabel 3 geeft een overzicht van de beschikbare meetgegevens. De metingen zijn uitgevoerd in de periode 13 mei t/m 30 september 2019. Dagen binnen deze periode waarop niet alle gegevens beschikbaar waren, zijn aangegeven in de tabel. De reden van de onderbreking van sensorgegevens in juli en augustus was het uitlezen van de sensoren nadat het geheugen was volgeraakt.



### 3.3 Afsluitermanipulaties in het distributienet

Om afwijkende operationele omstandigheden te creëren, sloot Waterbedrijf Groningen op vier momenten in juli 2019 gedurende twee dagen steeds een andere afsluiter. Als voorbereidende stap selecteerde KWR vier potentiële afsluiterlocaties (A1 t/m A4, Tabel 4, Figuur 7). Met modellering is nagegaan dat dit op ten minste één sensorlocatie resulteert in een meetbare EGV-afwijking (Figuur 8). De geselecteerde afsluiter bevinden zich daarom in de nabijheid van één van de sensorlocaties.

Tabel 4. Door KWR voorgestelde locaties voor afsluitermanipulatie.

Afsluiter-locatie	Afsluiter	Nabijgelegen sensorlocatie	Leiding-diameter (mm)
A1	5162X.5162Y.1	S3 (5032X)	300
A2	16623X.16623Y.1	S4 (705X)	300
A3	16409X.16409Y.1	S5 (XXXX021194)	150
A4	7288X.7288Y.1	S7 (8546X)	150

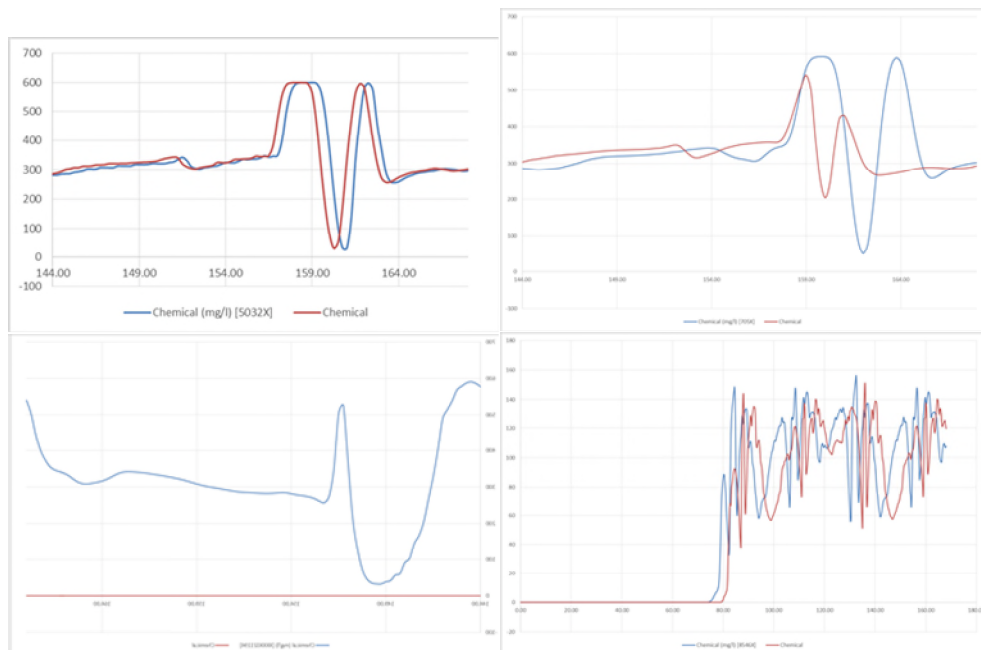


Figuur 7. Door KWR voorgestelde locaties voor afsluitermanipulatie.

Waterbedrijf Groningen sloot afsluiteren in de volgende perioden:

- P1: 8-10 juli;
- P2: 15-17 juli;
- P3: 22-24 juli;
- P4: 29-31 juli.

Het moment van manipulatie was rond het middaguur op de eerste en laatste dag van elke periode. De vier momenten zijn in Tabel 3 zwarte omlijnd.



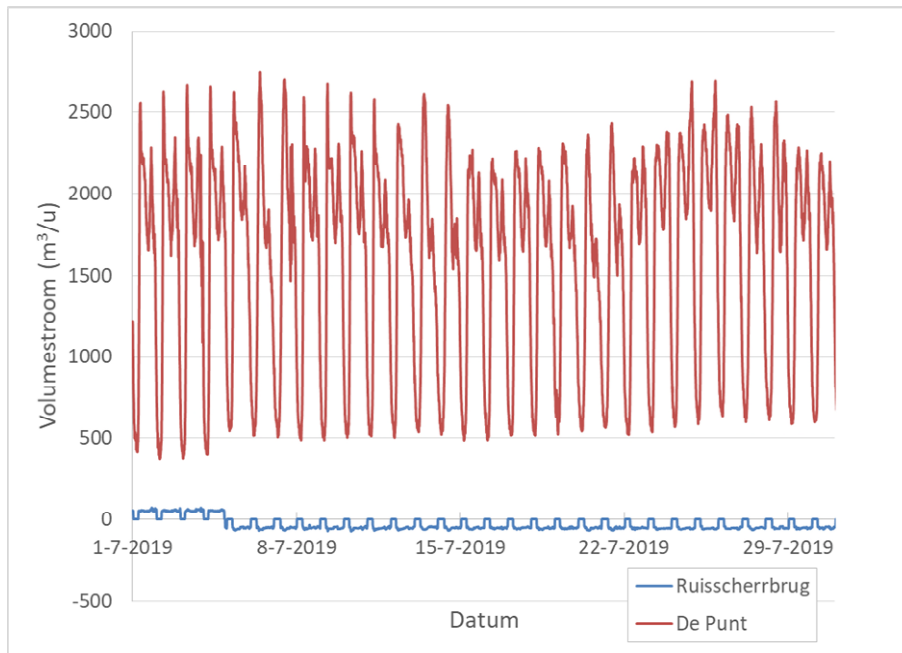
Figuur 8. Gemodelleerde EGV-signalen mét (blauwe curves) en zonder (rode curves) afsluitermanipulaties. (Linksboven) scenario A1, gemeten op sensorlocatie S3; (rechtsboven) scenario A2, locatie S4; (linksonder) scenario S3, locatie S5; (rechtsonder) scenario A4, locatie S7.

Een leidingnetanalyse is uitgevoerd voor periode P1 (beschreven in Sectie 3.5), omdat in deze periode de meetgegevens het meest volledig waren. In periode P2 zijn de online EGV-gegevens incompleet; in periode P3 zijn sensorgegevens incompleet (tot 14 uur aan gegevens zijn niet beschikbaar). In periode P4 zijn zowel sensorgegevens als onlinegegevens incompleet.

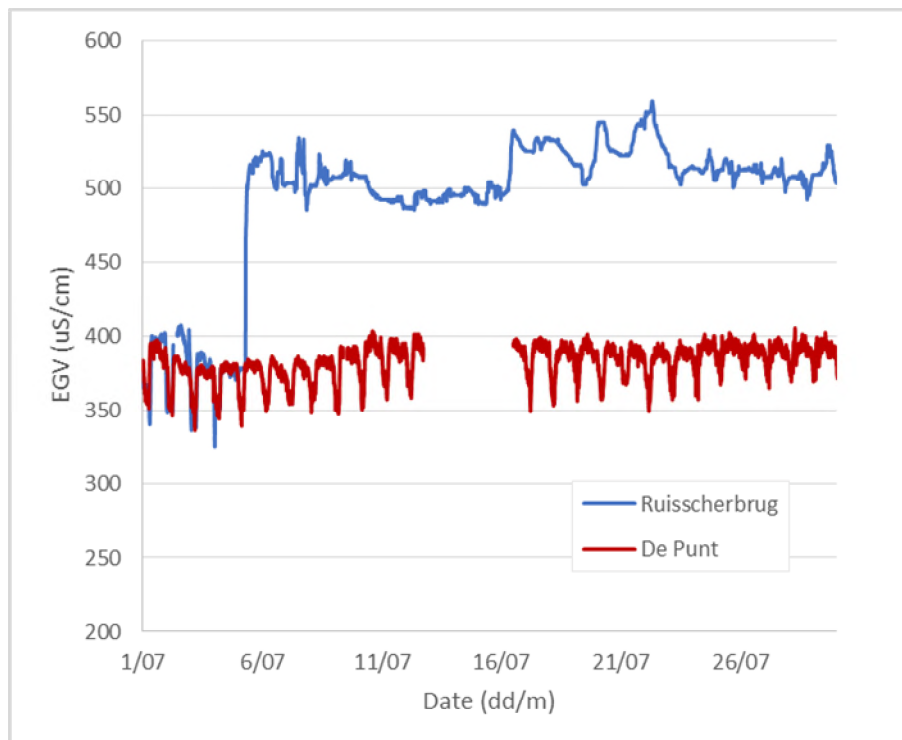
### 3.4 Actualiseren van het leidingnetmodel met meetgegevens van pompstations

Voor een waarheidsgetrouwe modelvoorspelling is het nodig om het leidingnetmodel aan te passen aan de operatie tijdens de meetperiode. Daarom zijn online gegevens van de pompstations toegevoegd als randvoorwaarde. De gemeten volumestromen en EGV-waarden in de maand juli zijn getoond in Figuur 9 en Figuur 10.

P.S. De Punt levert met een gecombineerde stroom van oppervlaktewater en grondwater. Deze twee watertypes hebben verschillende EGV-waarden, maar mengen direct na levering in het distributienet. Het is het gemengde water dat bij P.S. De Punt wordt gemeten. Er zijn geen gegevens beschikbaar van de EGV van de afzonderlijke bronnen. De EGV-meting voor het gemengde water wordt representatief geacht voor de totale waterstroom vanuit De Punt. Als zodanig is dit in het model gesimuleerd: de online EGV-waarden zijn toegekend aan de oppervlakte- en grondwaterbron.



Figuur 9. Online volumestroommetingen (juli 2019) bij P.S. de Punt en leveringslocatie Ruisscherbrug. De negatieve volumestroom bij Ruisscherbrug betekent een ingaande stroom (van de provincie naar de stad) en vice versa.



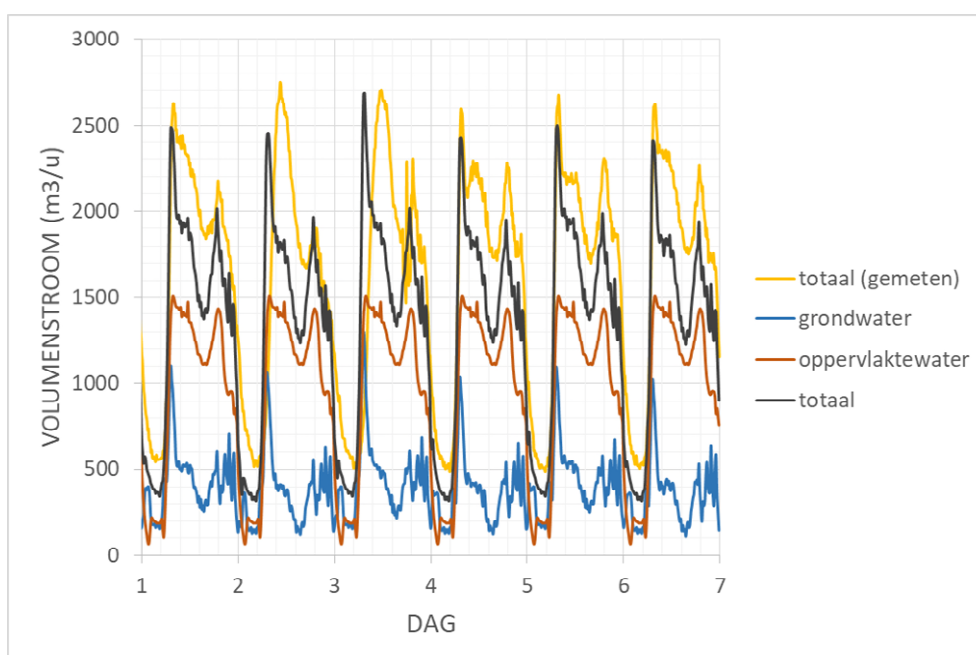
Figuur 10. Online EGV-metingen (juli 2019) bij P.S. de Punt en leveringslocatie Ruisscherbrug.

Van 5 tot 31 juli 2019 was de EGV van water vanuit De Punt substantieel lager dan van Ruisscherbrug (Figuur 10). Het EGV-patroon van De Punt vertoont bovendien een duidelijke dagelijkse variatie die ontbreekt bij Ruisscherbrug. Beide (het verschil in



sterkte en de dagelijkse variatie) zijn mogelijk nuttige onderscheidende aspecten m.b.t. modelkalibratie.

Het actualiseren van het leidingnetmodel met online metingen is een vorm van data-assimilatie. Aan het model zijn toegevoegd: (i) online volumestroommetingen bij P.S. Ruisscherbrug en (ii) online EGV-metingen bij leveringspunten De Punt en Ruisscherbrug. In het model is levering vanuit P.S. De Punt gelijk aan het totaalverbruik van het gebied minus de gemeten volumestroom die is voorgeschreven op Ruisscherbrug. In Figuur 11 zijn de gemodelleerde en gemeten volumestroom bij pompstation De Punt met elkaar vergeleken (Figuur 9). In dit project is afgezien van een verdere nuancering van de volumestroom vanuit P.S. De Punt. Dit is in principe mogelijk door de gesimuleerde collectieve verbruik in het gebied af te stemmen op de totale levering.



Figuur 11. Gemodelleerde volumestroom bij P.S. De Punt (blauw, oranje en zwarte curve) vergeleken met de gemeten volumestroom (geel, zelfde als rode curve in Figuur 9).

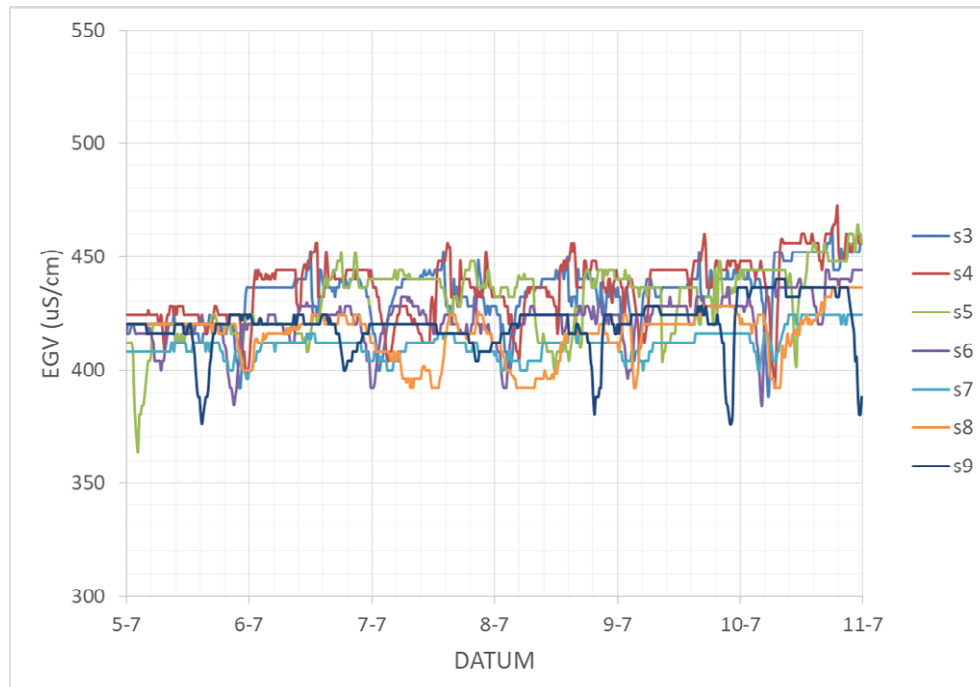
Hoewel online drukmetingen bij de pompstations beschikbaar zijn, zijn deze niet gebruikt in de actualisatie van het leidingnetmodel. De reden is dat het leidingnetmodel uitgaat van levering bij constante druk bij P.S. De Punt en een voorgeschreven volumestroom bij Ruisscherbrug. Binnen deze opzet is de voorgeschreven druk bij P.S. De Punt bepalend voor het hele gebied, terwijl in werkelijkheid de drukniveaus van beide leveringslocaties bepalend zijn; het is daarom niet te verwachten dat een vergelijking van drukniveaus op de sensorlocaties veel zeggingskracht heeft. Het is mogelijk om de volumestroom-gestuurde levering van het huidige model aan te passen naar een volumestroom-druk sturing. Dit maakt het model echter gevoeliger voor kleine aanpassingen zoals afsluitermanipulaties. Het verdient nader onderzoek of een representatieve druk kan worden gemodelleerd en de drukmetingen van de sensoren zijn te gebruiken als extra kalibratie-gegevens.

### 3.5 Vergelijking van modeluitkomsten en sensorgegevens

#### 3.5.1 EGV-sensorgegevens

Figuur 12 toont de EGV-waarden gemeten door de zeven sensoren S3-S9 (zie Figuur 5 voor sensorlocaties); Tabel 5 toont daggemiddelden van de EGV-signalen. De belangrijkste kenmerken zijn:

- EGV-waarden van verschillende sensoren beslaan min of meer hetzelfde bereik (ruwweg tussen de 375 en 475  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): de dagelijkse variatie is groter dan de verschillen tussen individuele sensoren.
- Dit bereik is kleiner dan dat van de EGV-waarden gemeten bij de leveringspunten (Figuur 6). Dit suggereert enige mate van menging van de twee watertypes op alle sensorlocaties.
- EGV-waarden van S3 t/m S5 zijn in het algemeen hoger dan de EGV-waarden van S6 t/m S9. Dit duidt op een grotere bijdrage van water vanuit Ruisscherbrug op locaties S3 t/m S5.
- In alle EGV-patronen is een dagelijkse variatie zichtbaar, vergelijkbaar met de EGV-variatie van water geleverd vanuit De Punt. Deze signatuur is sterker voor locaties S6 t/m S9 dan voor S3 t/m S5. Dit suggereert bijmenging van water vanuit De Punt op alle locaties en de sterkste bijmenging op locaties S6 t/m S9.
- De periode van afsluitermanipulatie (8-10 juli) is niet te herkennen aan duidelijk afwijkende EGV-waarden. De daggemiddelden voor bijna alle sensoren stijgen op 9 en 10 juli in vergelijking tot de dagen ervoor (Tabel 5), maar dit is ook te verklaren met een stijging van de EGV bij De Punt tijdens dezelfde periode (Figuur 10).



Figuur 12. EGV-waarden gemeten door 7 sensoren (S3 t/m S9, zie Figuur 5).

Tabel 5. Gemiddelde van EGV-waarde per dag voor sensoren S3 t/m S9.

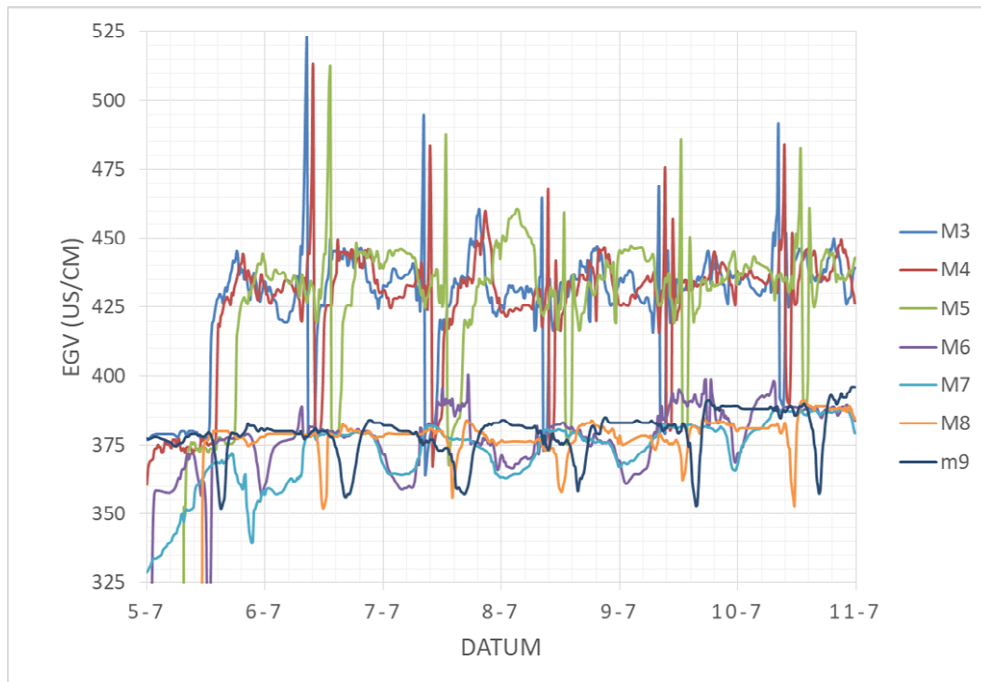
GEM	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
6-jul	432.9	439.0	431.0	419.9	410.4	418.0	417.7
7-jul	432.4	430.8	437.6	419.5	409.8	407.5	415.9
8-jul	434.4	436.4	429.0	421.7	409.6	407.3	418.4
9-jul	437.2	442.0	433.2	426.6	412.5	422.1	422.9
10-jul	446.5	450.3	446.0	434.5	420.4	421.9	431.6

### 3.5.2 Referentiemodel zonder afsluitermanipulatie

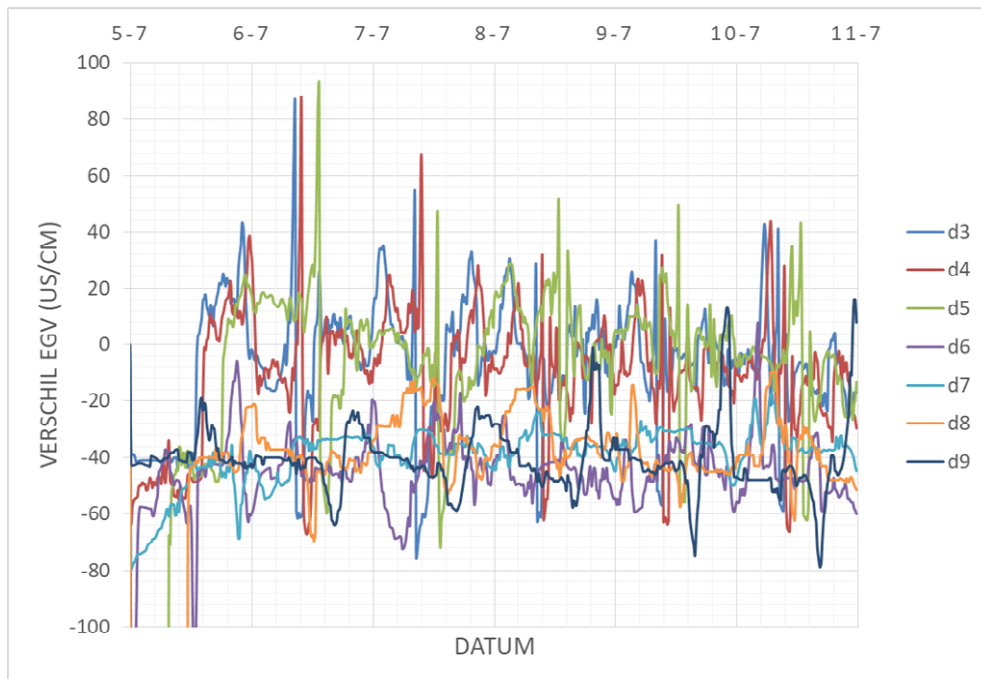
Gemodelleerde EGV-waarden zijn berekend voor een referentiemodel zonder afsluitermanipulatie. De rationale hiervoor is dat een discrepantie van gemodelleerde EGV-signalen t.o.v. de metingen aanwijzingen kunnen bevatten over gemanipuleerde afsluiters. De resultaten van het referentiemodel zijn getoond in Figuur 13 (tijdreeksen van EGV-signalen), Figuur 14 (tijdreeksen van EGV-verschil met metingen), Tabel 6 (EGV daggemiddelden), Tabel 7 (daggemiddelden van de afwijking t.o.v. de metingen) en Figuur 15 (leidingnetkaart met EGV-waarden). Uit deze resultaten wordt geconcludeerd:

- Het verschil tussen EGV-waarden van S3 t/m S5 enerzijds en S6 t/m S9 anderzijds is groter in de modeluitkomsten dan voor de metingen (Figuur 13, Tabel 6). Gemodelleerde EGV-signalen van S6 t/m S9 zijn structureel ca. 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  lager dan de gemeten waarden; de EGV-waarden van S3 t/m S7 vertonen nauwelijks een structurele afwijking. Dit suggereert dat op locaties S6 t/m S9 minder menging optreedt met water uit Ruisscherbrug dan in werkelijkheid het geval is. Een scherp mengfront is geïllustreerd in het modelresultaat in Figuur 15.
- Dagelijkse EGV-variëaties (typerend voor water uit De Punt) zijn duidelijker herkenbaar voor de gemodelleerde signalen S6 t/m S9 dan voor S3 t/m S5. Dit sluit aan bij bovenstaande opmerking dat water in werkelijkheid sterker mengt dan de in modelberekening.
- De patronen van de gemodelleerde dagelijkse variatie lopen niet synchroon met de metingen; dit impliceert dat gemodelleerde reistijden (van bron tot sensorlocatie) afwijken van de werkelijke reistijden en de modellen dus nog niet geheel representatief zijn.
- De resultaten tonen geen plotselinge verandering in de discrepantie tussen modelresultaten en metingen tijdens of na het begin van de afsluitermanipulatie. M.a.w. de modelresultaten geven geen aanwijzing voor welke afsluiter wanneer is dichtgezet.

De veronderstelde afwijkingen t.o.v. werkelijke mengverhoudingen en reistijden in een deel van het gemodelleerde gebied (1<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> punt hierboven) geeft aan dat het gebruikte (onverdunde) leidingnetmodel niet volledig representatief is.



Figuur 13. EGV-waarden op 7 sensorlocaties volgens het referentiemodel (zonder afsluitermanipualtie. Labels M3 t/m M9 verwijzen naar sensorlocaties S3 t/m S9 S9 (“M” modeluitkomst).



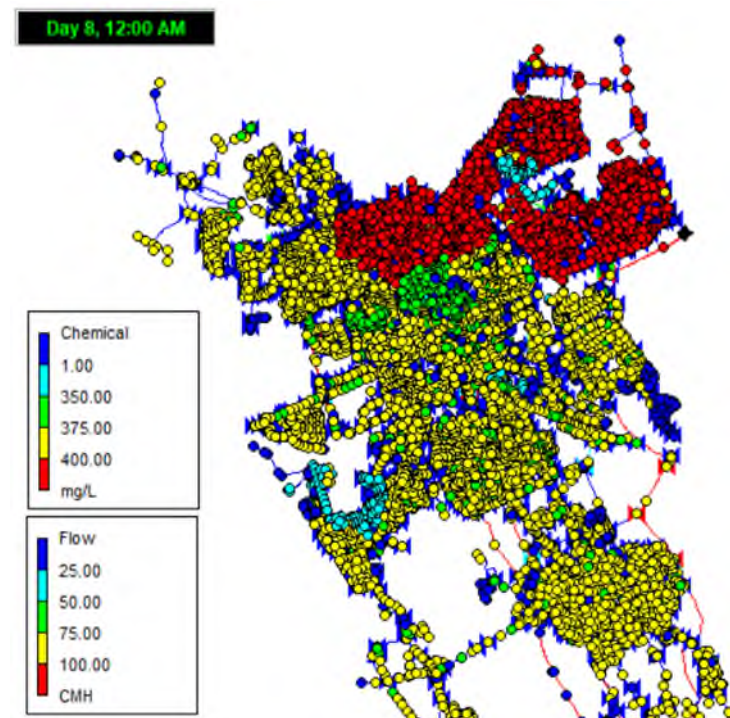
Figuur 14. Verschil tussen gemeten EGV-waarden en gemodelleerde uitkomsten volgens het referentiemodel. Labels d3 t/m d9 verwijzen naar sensorlocaties S3 t/m S9 (“d” voor discrepantie).

Tabel 6. Daggemiddelden van gemodelleerde EGV-signalen berekend op 7 sensorlocaties met het referentiemodel.

GEM	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
6-jul	433.5	432.4	434.0	376.8	373.4	377.5	377.1
7-jul	433.6	432.4	434.0	376.6	373.5	377.5	377.1
8-jul	433.8	432.3	434.2	376.4	373.5	377.5	377.1
9-jul	434.0	432.3	434.3	376.3	373.6	377.5	377.1
10-jul	434.1	432.3	434.4	376.1	373.6	377.5	377.1

Tabel 7. Afwijking tussen gemodelleerde en gemeten EGV-waarden voor sensorlocaties S3 t/m S9, uitgesplitst naar dag. De afwijking is gedefinieerd als de genormaliseerde root-mean-squared-error (NRMSE, "0.05" betekent 5% afwijking).

NRMSE	3	4	5	6	7	8	9
6-jul	0.05	0.05	0.06	0.10	0.10	0.10	0.10
7-jul	0.06	0.05	0.05	0.11	0.09	0.08	0.10
8-jul	0.04	0.04	0.04	0.11	0.09	0.08	0.10
9-jul	0.04	0.04	0.04	0.11	0.08	0.10	0.10
10-jul	0.04	0.05	0.04	0.11	0.08	0.09	0.11



Figuur 15. Berekende EGV-waarden ("Chemical") en volumestromen ("Flow") voor het referentiemodel op 10 juli, 24:00 uur (7 dagen na start van het model). Eindtakken zonder verbruik ontvangen geen water en behouden de initiële EGV-waarde (0  $\mu$ S/cm, knooppunten in blauw).

### 3.5.3 Model met afsluitermanipulatie

Ten tijde van de analyse was voor KWR niet bekend welke afsluiters waren gemanipuleerd door Waterbedrijf Groningen. Wel was bekend dat het waarschijnlijk om de voorgestelde afsluiters A1 t/m A4 zou gaan. Hierbij aansluitend zijn vier EPANET-modellen doorgerekend waarin achtereenvolgens de afsluiters A1 t/m A4 zijn gesloten.

Hoewel (bij een eerdere analyse) de afsluiterscenario's onder standaard operationele condities hydraulische correcte uitkomsten gaven, bleek dit niet altijd het geval voor de geactualiseerde modellen. Slechts één variant (scenario A3) gaf een werkbaar resultaat. De analyse is daarom uitgevoerd voor dit A3-scenario. De gemodelleerde periode is 4 t/m 10 juli. Dit omvat de periode van afsluitermanipulatie P1 (8 t/m 10 juli) en de vier dagen ervoor. In het model is afsluiter A3 gedurende de gehele simulatie gesloten om een hydraulische evenwichtssituatie te bereiken en eventuele verschillen met het referentiemodel te benadrukken.

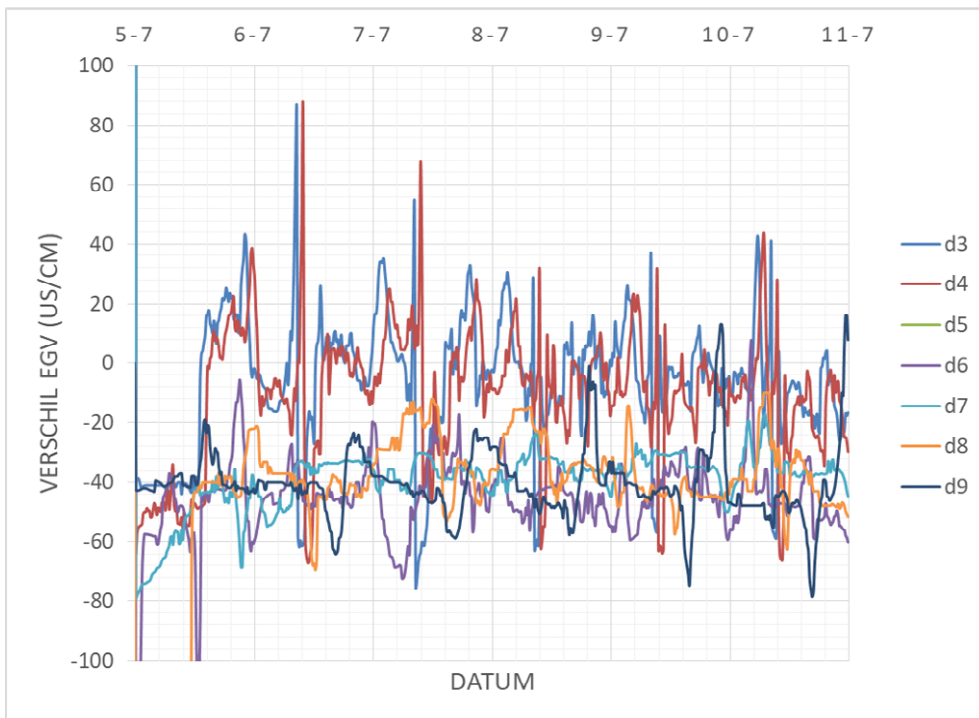
De resultaten van model A3 staan in Figuur 16, Figuur 17, Tabel 8 en Tabel 9. Het belangrijkste verschil met het referentiemodel is dat op locatie S5 de EGV (signaal M5) gelijk aan nul is voor de gehele periode. De reden is dat na afsluitermanipulatie de sensor deel uitmaakt van een eindtak zonder doorstroming (Figuur 18). In de werkelijke situatie zal het EGV-signaal niet uit nulwaarden bestaan, maar de waarde van het aanwezige water aannemen. Om dit correct te simuleren moet een tijdafhankelijk afsluiterpatroon worden gemodelleerd. Een dergelijk "flatliner" is niet geregistreerd in signaal S5 (Figuur 12). Dit is een aanwijzing dat afsluiter in A3 in periode P1 niet gesloten was, maar uitsluitel op basis van een directe vergelijking is niet te geven.

De zes andere gemodelleerde sensorsignalen zijn vrijwel gelijk aan het referentiemodel (Figuur 16, Figuur 17, Tabel 8 en Tabel 9). Het afsluiten van A3 heeft dus geen merkbare invloed op de verder weg gelegen locaties. Dit is begrijpelijk, want door manipulatie bij A3 verandert de waterstroom slechts in een klein gebied met weinig waterverbruik en dat niet in contact staat met andere gebieden (Figuur 18).





Figuur 16. Als Figuur 13, maar voor model A3. Signaal M5 bestaat uit EGV-waarden gelijk aan nul en valt buiten het bereik van de figuur.



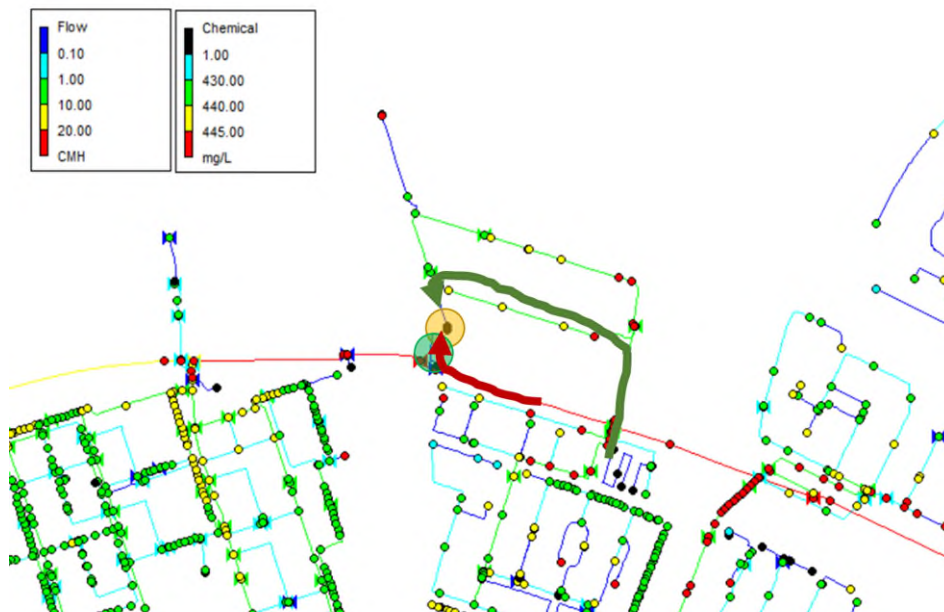
Figuur 17. Als Figuur 14 maar voor model A3. Signaal d5 valt buiten de schaal van het figuur.

Tabel 8. Als Tabel 6, maar voor model A3. Tabel 5. Gemiddelde van EGV-waarde per dag voor sensoren S3 t/m S9.

GEM	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
6-jul	433.4	432.4	0.0	376.8	373.4	377.5	377.1
7-jul	433.6	432.4	0.0	376.6	373.5	377.5	377.1
8-jul	433.8	432.3	0.0	376.4	373.5	377.5	377.1
9-jul	434.0	432.3	0.0	376.2	373.6	377.5	377.1
10-jul	434.1	432.3	0.0	376.1	373.6	377.5	377.1

Tabel 9. Als Tabel 7, maar voor model A3.

NRMSE	3	4	5	6	7	8	9
6-jul	0.05	0.05	1.00	0.10	0.10	0.10	0.10
7-jul	0.06	0.05	1.00	0.11	0.09	0.08	0.10
8-jul	0.04	0.04	1.00	0.11	0.09	0.08	0.10
9-jul	0.04	0.04	1.00	0.11	0.08	0.10	0.10
10-jul	0.04	0.05	1.00	0.11	0.08	0.09	0.11



Figuur 18. Volumestromen (op leidingen) en EGV-waarden (op knoppunten) voor model A3 na een modeltijd van 7 dagen. De gele cirkel is sensorlocatie S5; de groene cirkel is afsluiter A3. De directe waterstroom uit een doorvoerleiding (rode pijl) wordt onderbroken. Het gebied ontvangt water via een andere route (groene pijl) en de sensor bevindt zich op een eindtak zonder doorstroming.

### 3.5.4 Invloed van lek en doorlevering

Na afronding van bovenstaande analyse werd bekend dat er twee substantiële afwijkende leveringsomstandigheden hebben plaatsgevonden in de evaluatieperiode (juli 2019). Er is geïnventariseerd wat de mogelijke invloed is op de mengverhoudingen

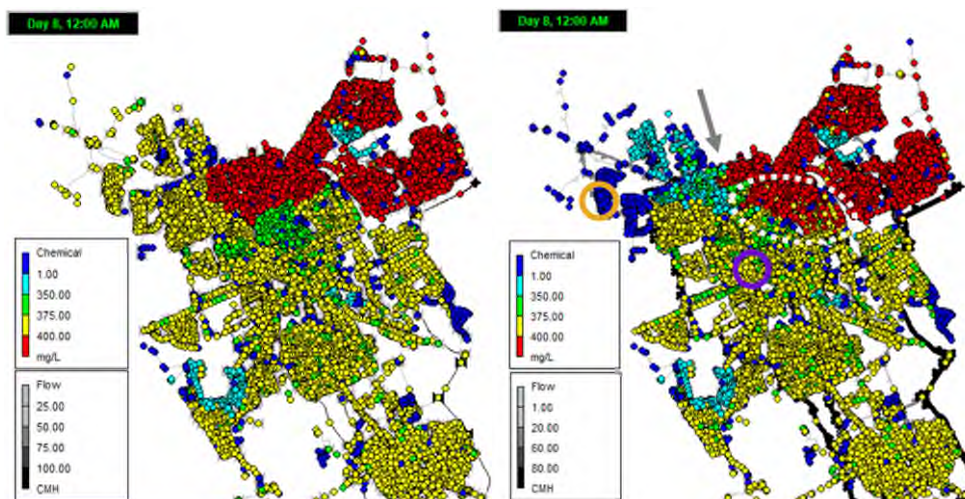
in het gebied, door de afwijkende situatie te modelleren ter vergelijking met de referentiesituatie. Omdat er geen gegevens beschikbaar zijn van de EGV van het water vanuit Hoogkerk, is niet geprobeerd de EGV-signalen op de sensorlocaties te berekenen.

De afwijkende omstandigheden betreffen (bron: Waterbedrijf Groningen):

1. een zinkerlek in het centrum van Groningen, ten zuiden van het Noorderplantsoen. Het lek is waarschijnlijk ontstaan op 1 juli 2019 en dichtgezet op 21 november. Het geschatte lekverlies is ca. 170 m<sup>3</sup>/u bij aanvang en ca. 300 m<sup>3</sup>/u bij het afsluiten van het lek;
2. doorlevering met ca. 70 m<sup>3</sup>/u vanuit Hoogkerk richting de stad Groningen tot 4 juli 2019, vanwege een defecte calamiteitenafsluiter. Onder normale operatie is Hoogkerk hydraulisch afgesloten van de stad –het maakt onderdeel uit van de provincie. Van 4 juli tot 30 oktober 2019 ontving Hoogkerk water vanuit De Punt. Na 30 oktober 2019 is de normale situatie hersteld.

De situatie waarin beide omstandigheden optraden (tussen 1 en 4 juli 2019) is nagebootst. Hiervoor is het referentiemodel aangepast met:

- het zinkerlek, gemodelleerd als constant verbruik van 200 m<sup>3</sup>/u (paarse cirkel in Figuur 19, rechts);
- de doorlevering vanuit Hoogkerk, als een constante continue levering van 70 m<sup>3</sup>/u (oranje cirkel in Figuur 19, rechts). Omdat er geen EGV-metingen beschikbaar zijn, is aan deze bron geen EGV-waarde toegekend (d.w.z. de EGV van dit water is 0 µS/cm).



Figuur 19. Mengverhoudingen na 7 dagen modeltijd in het referentiemodel (links) *zonder* en (rechts) *met* de invloed van een zinkerlek (paarse cirkel) en doorlevering vanuit Hoogkerk (oranje cirkel).

De modelresultaten in Figuur 19 tonen hoe de locatie van de mengzone verandert vanwege de afwijkende omstandigheden. In het noorden (onder de grijze pijl in Figuur 19, rechts) is de mengzone opgeschoven naar het oosten, vanwege indringing van water vanuit Hoogkerk. Dichter bij het centrum (lichtgrijze ovaal in Figuur 19, rechts) is de mengzone veranderd en deels verschoven in de richting van het zinkerlek.

Hoewel EGV-signalen op sensorlocaties niet zijn geanalyseerd, is het aannemelijk dat sommige hiervan gevoelig zullen zijn voor dergelijke substantiële afwijkingen, zoals bijvoorbeeld sensorlocatie s6, die zich in de witte ovaal van Figuur 19 (rechts) bevindt. Aanvullend onderzoek is nodig om deze gevoeligheid te bepalen en te evalueren of substantiële lekken of afwijkende levering zijn te identificeren op basis van gemeten en gemodelleerde EGV-signalen.

### 3.5.5 Inzichten en stappen voor vervolg

Met de beperkte leidingnetanalyse is het niet mogelijk gebleken afsluitermanipulaties te identificeren. Hieronder wordt ingegaan op de inzichten en stappen tot verbetering.

#### *Identificatie van afsluiterstanden met uitbreiding van de leidingnetanalyse.*

In dit project is één periode van afsluitermanipulatie (P1) onderzocht. Voor een beter inzicht in de mogelijkheden voor de identificatie van afsluiterstanden is nodig om langere perioden met meer manipulaties te analyseren.

De analyse is uitgevoerd voor één afsluiter scenario (A3). Voor drie andere scenario's waren de hydraulische berekeningen instabiel. Om dit te verbeteren is het nodig om de hydraulische stabiliteit te toetsen bij uiteenlopende operationele omstandigheden (in dit geval: de actuele leveringssituatie vanuit De Punt en Ruisscherbrug).

In dit onderzoek zijn de gemodelleerde EGV-signalen voornamelijk beoordeeld op basis van de afwijking (NRMSE) tot de sensormetingen. Toevoeging van aanvullende parameters zal het inzicht verbeteren:

- Dagelijkse patronen van de EGV gemeten bij de twee leveringspunten zijn van elkaar te onderscheiden en herkenbaar in de gemeten en gemodelleerde EGV-signalen op de sensorlocaties. Het is te verwachten dat een correlatie-analyse (tussen EGV-signatuur bij de bron en op sensorlocaties) relevante aanvullende informatie oplevert over de mengverhoudingen en reistijden, waarmee de scenario's scherper zijn te beoordelen.
- De gebruikte maat voor afwijkende EGV-signalen (NRMSE) is gevoelig voor kleine fouten in de gemodelleerde reistijd: aan een gemodelleerd EGV-signaal dat goed op de meting lijkt maar "uit de pas loopt" wordt een grote afwijking toegekend. Voor een genuanceerder beeld is het nuttig om een maat toe te voegen voor variaties die minder gevoelig zijn voor tijdvariaties, bijvoorbeeld de (dag)gemiddelde standaarddeviatie.

#### *Optimalisatietechnieken voor het analyseren van een groot aantal mogelijke scenario's*

Het uiteindelijke doel is om zonder afsluitermanipulaties in het werkelijke net foutief geregistreerde afsluiterstanden te identificeren. Dit vergt inzicht in hoe EGV-signalen worden beïnvloed door een groot aantal afsluiters, combinaties van afsluiters en afsluittijden. Voor een gebied met duizenden afsluiters is het te bewerkelijk om handmatig leidingnetanalyses voor elk mogelijk scenario uit te voeren. Voor dergelijke analyses is de inzet van numerieke optimalisatietechnieken nodig om systematisch na te gaan welke scenario's het best de werkelijkheid representeren.

### *Nader onderzoek naar de representativiteit van leidingnetmodellen*

Uit de vergelijking van EGV-signalen blijkt dat de mengverhoudingen en verblijftijden van het model afwijken van de werkelijkheid. Het is belangrijk om het model zo representatief mogelijk te maken, voor het duidelijk onderscheiden van effecten van afsluitermanipulaties. Mogelijke redenen voor afwijkingen tussen model en werkelijkheid zijn:

- *Afwijkend totaalverbruik in het gebied.* Aanpassing van het totaalverbruik van de verbruikspunten op de actuele levering zal tot een representatiever model leiden.
- *Stochastische verbruiken.* Stochastische verbruiken zijn toe te kennen met verbruiksmodel SIMDEUM (Blokker, 2010).
- *Onzekerheden in leidingdiameters en wandruwheden.* In werkelijkheid zal een fractie van de aangelegde leidingdiameters afwijken van de geregistreerde waarden. De effectieve leidingdiameter kan bovendien afnemen door deeltjesafzetting of biofilmvorming. Ook wandruwheden kunnen veranderen door afzettingen en leidingdegradatie. De betrouwbaarheden van leidingdiameters en wandruwheden werken door in onzekerheden in de hydraulica en EGV-signalen. Het is wenselijk om deze onzekerheden te bepalen door iteratief variaties van elk scenario's te bepalen met inachtneming van de betrouwbaarheidsintervallen. De onzekerheidsmarges moeten worden afgezet tegen de effecten van afsluitermanipulaties.

### *Onderzoek naar relatie sensordichtheid en effectiviteit van afsluiteridentificatie*

De resultaten van model A3 tonen dat de EGV in de directe omgeving van een afsluiter gevoelig is voor afsluitermanipulatie terwijl op ver gelegen locaties effecten niet merkbaar zijn. Ook maken de resultaten aannemelijk dat substantiële leidinglekken of afwijkende levering van invloed zijn op de EGV-signalen van (een deel van) de geïnstalleerde sensoren. Dit geeft nog geen antwoord op de vraag hoeveel sensoren nodig zouden zijn om in het gehele gebied gesloten afsluiters (of lekken of afwijkende levering) te kunnen identificeren. Of andersom: hoeveel afsluiters zich binnen het "gezichtsveld" van een sensor bevinden. Voor een volledig beeld dient een uitgebreide gevoeligheidsanalyse te worden uitgevoerd. Idealiter wordt hiermee een relatie opgesteld tussen sensordichtheid en het percentage afsluiters waarvoor een succesvolle statusidentificatie mogelijk is.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Conclusies

Uit het uitgevoerde onderzoek worden onderstaande conclusies getrokken:

1. Er zijn succesvol op zeven locaties sensoren geïnstalleerd in het distributienet van de stad Groningen (Waterbedrijf Groningen). Factoren die hieraan positief hebben bijgedragen zijn:
  - a. het aanschaffen van sensoren met oog voor robuustheid, praktische gebruiksvriendelijkheid, afstemming van de meetnauwkeurigheid op de verwachte EGV-verschillen in het leidingnet;
  - b. het bepalen van geschikte sensorlocaties met een leidingnetanalyse;
  - c. het nauw samenwerken van onderzoekers en technisch specialisten (KWR), leverancier (Van Essen) en eindgebruiker (Waterbedrijf Groningen) tijdens de aanschaf, voorbereidingen en installatie van sensoren;
  - d. het vooraf toetsen in een labopstelling van twee sensoren om de meetprestaties te evalueren;
2. Praktische overwegingen kunnen zwaar meewegen in de uiteindelijke plaatsing van sensoren. Ontoegankelijkheid van de locatie, overlast van de bovengrond en vooral leveringsonderbreking zijn redenen gebleken om de sensoren op alternatieve locatie te plaatsen, ten opzichte van de oorspronkelijke wens. In de praktijk betekent dit dat er op 110 mm en 160 mm leidingen sensoren zijn geïnstalleerd, vaak direct na een aftakking van de beoogde hoofdleiding.
3. Op basis van een inventarisatie van verwachte inspanningen en opbrengsten zijn verblijftijdsmetingen met zoutdosering buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. Opschaling naar de schaal van de stad Groningen vergt dosering van honderden kilo's zout om een meetbare puls in het distributienet te genereren. Dit sluit niet aan bij bedrijfswaarde om schoon en veilig drinkwater te leveren en is praktisch lastig uitvoerbaar. Dosering met kleinere doseervolumes in het distributienet is mogelijk voor een kleiner deelgebied, maar dit vergt een grote financiële investering in een pompsysteem en online volumestroommetingen om de juiste hoeveelheden te doseren.
4. De in dit project uitgevoerde leidingnetanalyse was te beperkt om afwijkende afsluiterstanden te identificeren. De factoren die dit in de weg staan zijn uiteengezet en mogelijke vervolgstappen zijn uiteengezet (Sectie 0) en vormen de basis voor de aanbevelingen van dit onderzoek.



## 4.2 Aanbevelingen

Op basis van het in dit rapport gepresenteerde onderzoek worden de volgende aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan:

1. Breidt de leidingnetanalyse uit met meer afsluitersscenario's en langere simulatieperioden.
2. Voeg een criteria toe aan de vergelijking tussen gemodelleerde en gemeten EGV-waarden die:
  - a. gevoelig zijn voor de tijdafhankelijke signatuur (dagelijkse variatie) van EGV-signalen (bijvoorbeeld de correlatie tussen de EGV bij de bronnen en op de meetlocatie);
  - b. minder gevoelig zijn voor faseverschillen van EGV-signalen voortkomend uit niet perfect gemodelleerde verblijftijden (bijvoorbeeld de daggemiddelde standaarddeviatie).

Dergelijke toevoegingen zullen bijdragen aan een scherpere evaluatie van afsluitersscenario's,

3. Bij opschaling van de methodiek: gebruik optimalisatietechnieken om voor een groot aantal mogelijke scenario's (van afsluiterstanden, combinaties van afsluiterstanden en tijdsafhankelijke schakelingen van afsluiterstanden) systematisch na te gaan voor welke scenario's de resultaten het best overeenkomen met de sensormetingen.
4. Onderzoek de mogelijkheden om de representativiteit van het leidingnetmodel te verbeteren:
  - a. pas het totaalverbruik aan op de actuele levering;
  - b. onderzoek of sturing op druk- en volumestroom tot verbeteringen leidt t.o.v. de huidige levering op volumestroom;
5. Inventariseer verbruikspatronen en betrouwbaarheidsmarges van leidingdiameters en wandruwheden.
6. Onderzoek de relatie tussen sensordichtheid en de fractie van afsluiters waarvan de status naar verwachting succesvol is te identificeren. Voer hiervoor een gevoeligheidsanalyse uit waarmee de invloed van afsluiters op EGV-signalen in het netwerk in kaart wordt gebracht.

## 5 Literatuur

Blokker, E.J.M. (2010). *Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks*. Ph.D. thesis, TU Delft.

Blokker, E.J.M. & Beverloo, H. (2009). *Verblijftijden leidingnet Zandvoort –Metingen boulevard Zandvoort zomer 2008*. KWR 09.010, KWR Watercycle Research Institute.

Blokker, E.J.M., Beverloo, H., Schaap, P.G. (2008). *Metten verblijftijden in distributienet – fase 3*. KWR 08.002, Kiwa Water Research.

Blokker, E.J.M., Schaap, P.H., Kivit, C.F.T. (2006). *Bepalen van verblijftijden in het leidingnet*. KWR 06.097, KWR Watercycle Research Institute.

Kapelan, Z. (2002). *Calibration of water distribution system hydraulic models*. Ph.D. Thesis, University of Exeter.

Pieterse-Quirijns, I. & Van de Roer, M. (2013). *Verbruikspatronenbibliotheek*. BTO 2013.058, KWR Watercycle Research Institute.

Van Summeren, J., Van den Broeke, J., Holzhaus, P., Schaap, P., Urbanus, I., Ijzenga, M., (2016). *Investerings en prestaties van sensornetwerken in het drinkwaterdistributienet*. KWR 2016.052, KWR Watercycle Research Institute.

Van Thienen, P., De Graaf, B., Van de Roer, M., Schaap, P., Sperber, V., (2014). *Sensing van waterkwaliteit in het distributienet: een rationele benadering*. H2O vakartikel 5 november 2014.

Vries, D. & Van Summeren, J. (2018). *Sensornetwerken in het distributienet dragen bij aan het vergroten van de systeembekendheid*. BTO 2018.019, KWR Watercycle Research Institute.

# Bijlage I – Testen van de functionnalité van CTD DIVER conductiviteitsensoren

## Achtergrond en doel

Voor het project zijn 8 CT-Diver sensoren aangeschaft, met de volgende specificaties van de fabrikant:

- meetbereik: 0-120.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- nauwkeurigheid:  $\pm 1\%$  van aflezing met een minimum van 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- resolutie: 0,1% van aflezing met een minimum van 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (voor een ingesteld meetbereik van 0-30.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (voor een ingesteld meetbereik van 0-120.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Volgens sensorleverancier Van Essen heeft de watersnelheid een meetbare invloed op de EGV-metingen. Deze invloed kon men echter niet kwantificeren. De EGV-metingen worden automatisch gecorrigeerd voor temperatuurvariaties.

Het doel van de hier beschreven functionaliteitstest is :

1. verifiëren van de fabrieksspecificaties voor meetnauwkeurigheid en precisie;
2. bepalen van de invloed van de watersnelheid op de EGV-metingen;
3. nagaan of de metingen correct worden gecorrigeerd voor temperatuur.

## Aanpak

Waterbedrijf Groningen heeft 2 CT Diver-sensoren geplaatst in het lab in Hoogezand. De meetopstelling bestaat uit een 100 mm leiding aangesloten op het leidingnet met instelbare snelheid van het water. Hierop zijn 2 sensoren geïnstalleerd die in contact staan met het water. De Diver-Office software van Van Essen is gebruikt voor het instellen van de sensoren en loggen van de gegevens.

De functionaliteitstests zijn opgedeeld in twee onderdelen (serie F1 en F2), waarbij de uitkomsten van experimenten F1 dienden als invoer voor de aanpak van serie F2.

Voor experimenten F1 is de volgende meetopzet toegepast:

- Gebruik van twee vergelijkbare CT Diver sensoren (hierna aangeduid als sensor 'A' en 'B'). Sensor B heeft tijdens dit experiment niet gelogd en de reden is niet achterhaald.
- Meetinterval van de sensoren: 1 seconde;
- Stapsgewijze toename van de watersnelheid: 0; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 m/s. Tabel 10 geeft een overzicht van instellingen en meettijden van de experimenten.
- Meetperiode van 10 minuten per periode van gelijke watersnelheid.

- Druk in de leiding is afhankelijk van de afsluiterstand: om een hogere snelheid te realiseren wordt de afsluiter aan het eind van de testleiding verder geopend, wat resulteert in een lager druk in de leiding.
- De EGV is gecorrigeerd voor de temperatuurinvloed (correctie naar 25 °C).
- Gebruik van lokaal tapwater. De bedoeling was de waterkwaliteit (EGV-waarde) zo constant mogelijk te houden. De EGV van het ingaande water is niet onafhankelijk gemeten. Wel kan vanuit worden gegaan dat in het lab in Hoogezand *alleen* water ontvangt van P.S. Onnen. In het algemeen wordt dit water gekenmerkt door kleine variaties in de geleidbaarheid: de EGV in het voorgaande derde kwartaal waren: gemiddeld 510  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; minimum 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; maximum 515  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). De eigenschappen voor het betreffende 4<sup>e</sup> kwartaal van 2018 en 1<sup>e</sup> kwartaal van 2019 waren echter niet bekend op het moment van schrijven.

Tabel 10. Snelheden en volumestromen tijdens de functionaliteitstest (sensor A).

Volumestroom (m <sup>3</sup> /u)	Snelheid (cm/s)	Begintijd	eindtijd
0	0	13:25	13:35
0,31	1,01	13:37	13:47
0,61	1,99	13:48	13:58
1,53	5,00	14:00	14:10
3,06	10,00	14:12	14:22
5,5	17,98	14:23	14:33

Omdat de resterende vragen na analyse van de F1-experimenten te beantwoorden, is een tweede serie metingen verricht (F2) met de volgende aanpassingen in de meetopzet (zie Tabel 11):

- gelijktijdig meten met sensor 'A' en 'B' in de testopstelling;
- stapsgewijze verandering van de watersnelheid van ca. 0; 5; 20; 5 en 0 m/s;
- meetperiode van 30 minuten per periode van gelijke watersnelheid;
- EGV-bereik: 0-120.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- De EGV is niet gecorrigeerd voor temperatuurinvloeden (waar dit wel de bedoeling was).
- meten van de omgevingstemperatuur.

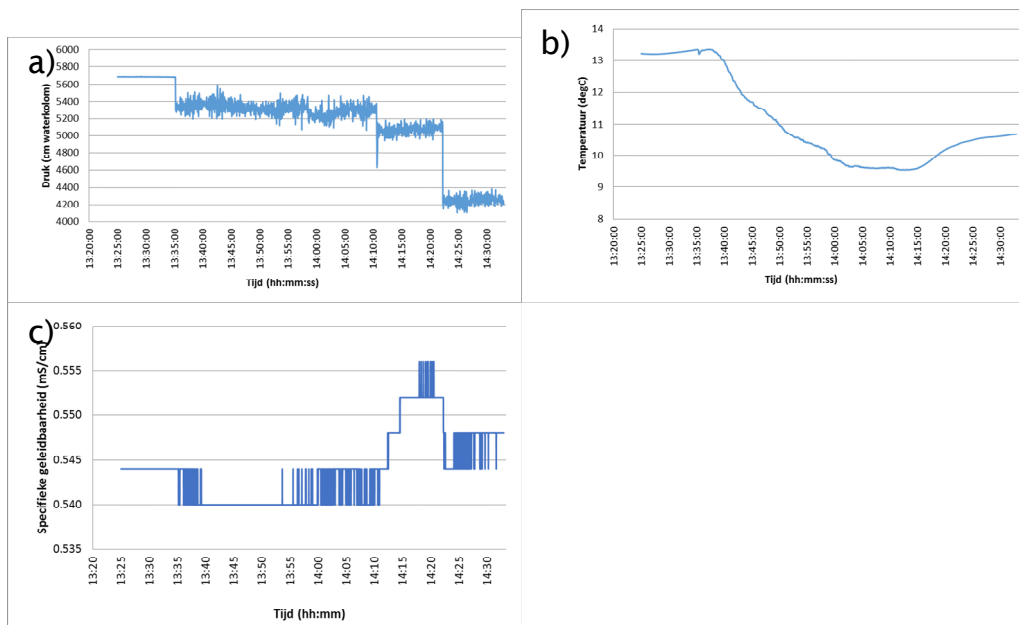
Tabel 11. Snelheden en meetperiodes van experimenten F2 (sensor A en B).

Volumestroom (m <sup>3</sup> /u)	Snelheid (cm/s)	begintijd	eindtijd
0	0	13:20	13:50
1,4	4,58	13:50	13:50
5,65	18,48	14:20	14:20
1,41	4,61	14:50	14:50
0	0	15:20	15:50

## Resultaten (Experimenten F1)

Uit de resultaten van experimenten F1 (Figuur 20) wordt het volgende afgeleid:

- *Druk.* De gemeten precisie van de drukmetingen is 0,01 MWK. Het zeer constante drukverloop tijdens stilstand van het water suggereert een erg nauwkeurige drukmeting (standaarddeviatie van 0,015 meter waterkolom, MWK in de periode 13:25 tot 13:35 uur). Bij snelheden boven nul is de variatie groter (standaarddeviatie 0,4 tot 0,6 MWK), maar niet onrealistisch. **Het drukverloop is plausibel: de druk neemt af bij hogere snelheden, vanwege het openen van de afsluiter.**
- *Temperatuur.* De precisie van de temperatuurmetingen is 0,003°C. De meetonnauwkeurigheid is niet te achterhalen, omdat referentiemetingen niet beschikbaar waren. Een aannemelijke verklaring voor het temperatuursverloop is dat het stilstaande water (vóór 13:37 uur) de omgevingstemperatuur van ca. 13°C heeft aangenomen en na doorstroming afneemt vanwege het koudere instromende water uit het leidingnet.
- *Geleidbaarheid.* De EGV-metingen hebben een precisie van 1  $\mu\text{S/cm}$ , conform de productinformatie. De variatie in EGV-waarden is laag (<50  $\mu\text{S/cm}$ ). Er zijn geen duidelijke afhankelijkheden met de veranderende temperatuur, watersnelheid of drukniveaus. Hoewel de juistheid van de EGV-meting niet eenduidig is vast te stellen (verschillende effecten werken mogelijk tegen elkaar in en een onafhankelijke EGV-meting ontbreekt), wekt dit de suggestie van een nauwkeurige EGV-meting die goed wordt gecorrigeerd voor temperatuureffecten en niet sterk wordt beïnvloed door de watersnelheid of drukniveaus.



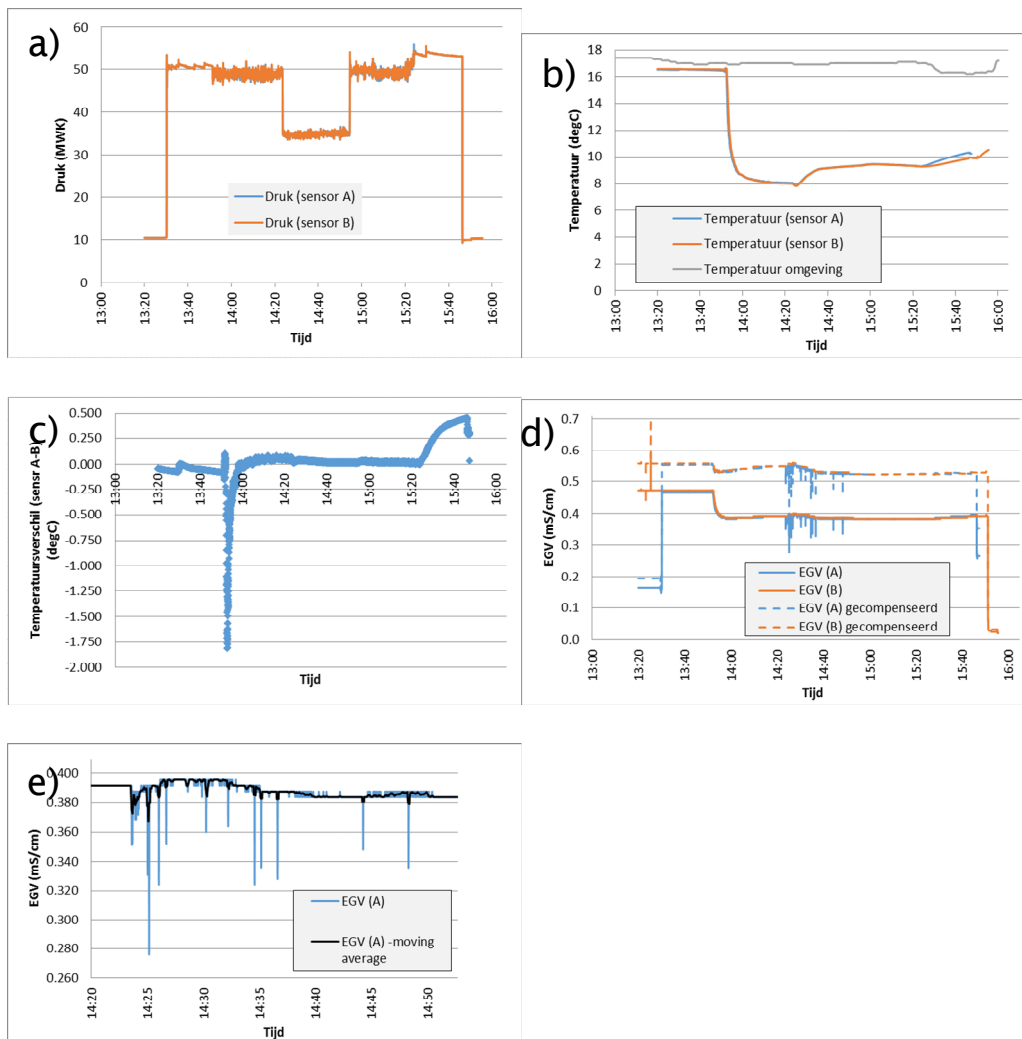
Figuur 20. Metingen van sensor A tijdens experiment F1: (a) druk, (b) temperatuur en (c) elektrische geleidbaarheid.

## Resultaten (experimenten F2)

Uit de resultaten van experimenten F2 (Figuur 21) wordt het volgende afgeleid:

- *Druk* (Figuur 21a). De suggestie uit de resultaten van experimenten F1 dat de druksensoren goed functioneren, wordt bevestigd: de precisie van de drukmetingen is 0,01 MWK (ook 0,01 in F1) en het drukverloop bij stilstaand water is constant (standaarddeviatie 0,017 MWK vs. 0,015 MWK in F1). Het correct functioneren wordt verder bevestigd door een goede overeenkomst van de drukmetingen van sensor A en B in F2: het gemiddelde en standaarddeviatie van het verschil tussen sensor A en B is 0,027 MWK en 0,76 MWK, respectievelijk.
- *Temperatuur* (Figuur 21b en Figuur 21c).
  - o De precisie van de temperatuurmetingen is 0,003 °C (gelijk aan experimenten F1).
  - o Het temperatuursverloop is ruwweg te relateren aan veranderingen in stroomsnelheid: bij stilstand neemt het water de omgevingstemperatuur aan (grijze curve in Figuur 21b) en bij doorstroming die van het koudere water uit het leidingnet.
  - o In stilstaand water is een uniforme temperatuur te verwachten. Het verschil tussen de gemeten van de twee sensoren geeft een indicatie van de onderlinge consistentie. De onderlinge verschillen van de twee temperatuurmetingen worden zichtbaar beïnvloed door veranderingen in de stroomsnelheid (Figuur 21c, bijvoorbeeld rond 13:50 uur). Tijdens stilstand (13:00-13:50 uur) zijn de verschillen klein: het gemiddelde verschil is 0,05 °C en de standaarddeviatie van de verschillen 0,02 °C. De twee onafhankelijke temperatuurmetingen komen onderling dus goed overeen.
- *EGV*.
  - o De conductiviteit (Figuur 21d) is niet gecompenseerd voor temperatuur. Om een beeld te krijgen van de gecompenseerde waarde is de EGV handmatig gecompenseerd (2% per °C). De EGV-variaties na compensatie zijn klein (Figuur 20d). Plausibele invloedsfactoren voor deze veranderingen zijn kleine waterkwaliteitsveranderingen en de invloed van de snelheid.
  - o EGV-waarden van sensor A en B komen in de meeste gevallen goed overeen, met uitzondering van de periode 14:20 – 14:50 uur, waarin sensor B soms lagere waarden logt. Dit komt alleen voor in de periode van hoge snelheden (18 cm/s). De oorzaak van deze uitbijters is onbekend: mogelijke oorzaken zijn luchtbellens die in deze opstelling langs de sensoren stromen of een fout in de sensorapparatuur. Het risico op het voorkomen van langs de sensor stromende luchtbellens wordt klein geacht voor de metingen in het veld. Dergelijke kortstondige uitbijters zijn effectief te verwijderen met een moving average filter, zoals getoond in (Figuur 21e, venster van 11 sec).





Figuur 21. Meetresultaten experiment F2.

## Conclusies

De druk wordt met een precisie van 0,01 MWK gemeten. In stilstaand water is de standaarddeviatie van afzonderlijke metingen 0,015 MWK. Het gemiddelde verschil tussen de drukmetingen van de twee sensoren is 0,027 MWK en de standaarddeviatie van deze verschillen is 0,76 MWK. Dit duidt op een precieze, juiste en onderling consistente drukmetingen.

De precisie van de temperatuurmetingen is 0,03 °C. Tijdens stilstand is het gemiddelde verschil tussen de temperatuurmetingen van de twee geteste sensoren 0,05 °C en de standaarddeviatie van de verschillen 0,02 °C.

De precisie van de EGV-metingen is 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , conform de specificaties van de fabrikant. De nauwkeurigheid is niet eenduidig vast te stellen, omdat meerdere parameter de EGV gelijktijdig kunnen beïnvloeden. Er zijn echter geen duidelijke invloeden van de temperatuur (na compensatie), druk of watersnelheid op de EGV gemeten, wat vertrouwen wekt in het functioneren van de sensor.

De EGV-waarden van één van de geteste sensoren bevat uitbijters bij de hoogste snelheid van het water (20 cm/s). De oorzaak is onduidelijk, evenals of dergelijke uitbijters in de praktijk zullen optreden.

Aangezien het mogelijk is om de uitbijters weg te filteren in een nabewerkingsstap, wordt aanbevolen om over te gaan tot installatie in het veld. Indien mogelijk, wordt aanbevolen om de oorzaak te achterhalen door in de labopstelling de installatie te controleren en de sensoren te verwisselen.

De temperatuurcompensatie wordt goed uitgevoerd. Er is geen merkbare invloed van de temperatuur na compensatie van de EGV (experimenten F1)).

**De eindconclusie is dat de er voldoende vertrouwen in het functioneren van de sensoren voor het uitvoeren van realtime metingen in het leidingnet. Het optreden van uitbijters en de onduidelijke oorzaak hiervan is een aandachtspunt, maar geen reden om de installatie niet door te laten gaan.**

# Bijlage II –Bepalen van sensorlocaties in Groningen



Memo

**Bestemd voor:** Wout Kompagnie, Eefko Aukes (Waterbedrijf Groningen)  
**Betreft:** Sensorlocaties Groningen  
**Van:** Bram Hillebrand, Joost van Summeren  
**Datum:** 22 maart 2019

## Doel

In het BTO "Realtime sensormetingen in het distributienet" worden realtime metingen van de elektrische geleidbaarheid uitgevoerd op 8 locaties in het distributienet van de stad Groningen. Het doel is om inzicht te krijgen in de actuele mengverhouding en daarmee het hydraulische model te valideren en mogelijke afwijkingen van normale operatie te herkennen. Voor een goed inzicht zijn de locaties van de sensoren van belang. Dit memo beschrijft de bepaling van deze locaties, aan de hand van modelberekeningen en praktische overwegingen.

## Mengzones Groningen

Met behulp van het aangeleverde EPANET model voor Groningen is 168 uur doorgerekend met als doel om voor ieder knooppunt de herkomstlocatie (en eventuele mengverhouding) te identificeren: P.S. De Punt (leveringslocaties 'ow\_in' & reservoir 'FH\_GW') en doorleveringslocatie Ruisscherbrug. Dit om tot een aantal goede meetlocaties te komen om de mengzones ook in het echt waar te nemen. Hiervoor zijn met enkele python scripts de laatste 24 uur geanalyseerd.

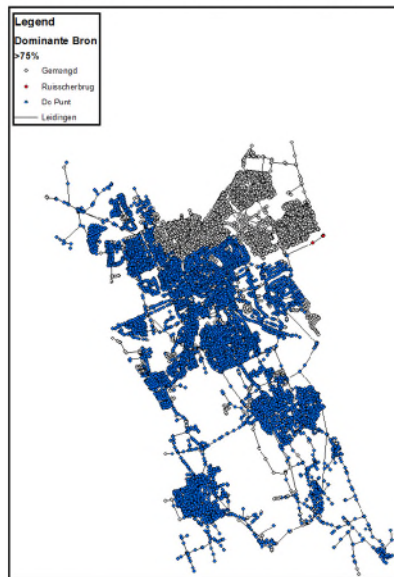
## Dominantie

Voor ieder punt is de gemiddelde mengverhouding over de laatste 24 uur berekend (Figuur 1). Vervolgens is er een gevoeligheidsanalyse gedaan door de levering van Ruisscherbrug met twee te vermengvuldigen (en 'ow\_in' correct te verminderen zodat de balans bewaard blijft, model Ruisscherbrug\_x2). Vervolgens zijn alle punten in categorieën ingedeeld. Wanneer het water op een punt gemiddeld de laatste 24 uur voor meer dan 75 % uit een van de twee bronnen afkomstig was dan krijgt dat punt deze bronkleur (blauw of rood). Anders wordt het punt als meng- of pendelzone aangewezen (knooppunten in wit).

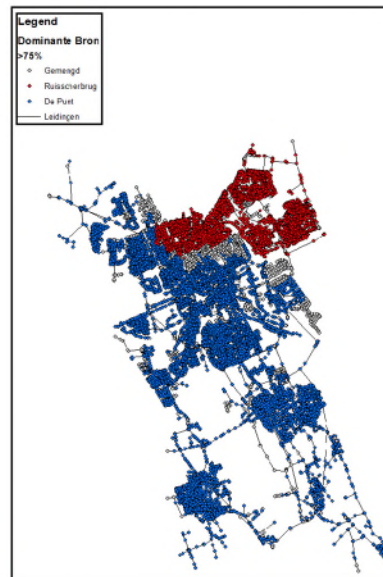
In een (stationaire) mengzone blijft de mengverhouding constant, waar deze verandert bij een pendelgebied (van ongemengd water). Pure meng- en pendelzones zijn met sensorgegevens van elkaar te onderscheiden, op voorwaarde dat de EGV-veranderingen van waterbronnen klein zijn ten opzichte van de EGV-verschillen *tussen* de bronnen. Het onderscheid tussen mengzones en pendelgebieden geeft informatie over de dynamiek van een leveringsgebied en is daarom nuttig voor modelvalidatie. In de praktijk zullen mengzones en pendelgebieden veelal overlappen.

Voor de normale leverings- en verbruiks-weekpatronen (Figuur 1) is P.S. De Punt ('ow\_in' & en reservoir 'FH\_GW') dominant in bijna het gehele gebied. Ruisscherbrug is enkel dominant in enkele knooppunten direct in de omgeving en er is een groot menggebied in het noordoosten van de stad. Voor het model Ruisscherbrug\_x2 (Figuur 2) wordt bijna de gehele noordoostelijke gebied gedomineerd door

Ruisscherbrug. Er is dan een kleine verandering in het gebied dat wordt gedomineerd door de Punt en daar tussenin bevindt zich een smalle mengzone.



Figuur 1. Dominante bron over de laatste 24 uur (standaard scenario).



Figuur 2. Dominante bron over de laatste 24 uur (2x leveringspatroon Ruisscherbrug).



*Figuur 3. De mate waarin de mengverhoudingen veranderen in de laatste 24 uur. Van blauw (niet/nauwelijks) tot rood (veel verandering) behorend bij het dominantiepatroon van figuur 1.*



*Figuur 4. Als figuur 3, maar behorend bij het dominantiepatroon van figuur 2.*

#### Veranderlijkheid

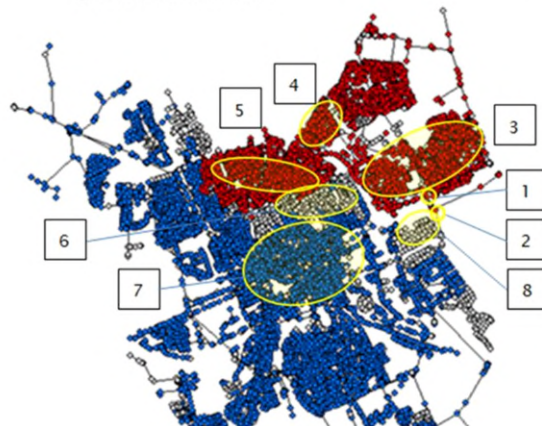
In figuur 3 en 4 is de mate van verandering in de watersamenstelling van de laatste 24 uur weergegeven voor respectievelijk het normale week leveringspatroon en Ruisscherbrug\_x2. De mate van verandering is dus een maat voor het pendelgebieden en zegt niets over de waterherkomst. Voor het normale week leveringspatroon veranderen de mengverhoudingen het sterkst in het noordoosten van de stad waar zich ook de mengzone bevindt. Voor Ruisscherbrug\_x2 (figuur 4) is de veranderlijkheid in het noordoosten van de stad geheel verdwenen en bevindt zich een zone van grote verandering in het midden van de stad.

De zones van hoge veranderlijkheid die overlappen met het gebied waar de Punt (ow\_in & reservoir FH\_GW) dominant is, geven gebieden aan waar deze twee bronnen onderling mengen. Deze zijn voor de huidige vraagstelling (omdat de Punt als een waterbron gezien wordt) niet relevant.

#### Voorgestelde sensorlocaties

Figuur 5 geeft een eerste ruwe indeling weer voor sensorlocaties, samen met diameters (Figuur 6) en volumestromen (Figuur 7). Deze locaties zijn in overleg met Waterbedrijf Groningen gekozen en gebruikt om specifieke locaties te vinden. Deze staan beschreven in Tabel 2 en Figuur 8-16. Bij de keuze is rekening gehouden met de volgende overwegingen:

- Het is raadzaam om enkele sensoren te plaatsen in de onveranderlijke gebieden en enkele in de mengzones, op toenemende (hydraulische) afstand van Ruischerbrug.
- Voor de uiteindelijke analyse is het enerzijds gewenst om te monitoren op grote leidingen (transport- of doorvoerleidingen). Anderzijds plaatst Waterbedrijf Groningen de sensoren bij voorkeur op 100 à 200 mm leidingen om leveringsonderbreking te beperken. Met deze tegengestelde argumenten is op twee manieren om te gaan:
  1. Plaats de sensoren op 200 mm leidingen met (deels) een transportfunctie, als compromis tussen bovengenoemde argumenten.
  2. Plaats de sensoren op een aftakkende leiding van een transportleiding. Het is te verwachten dat daar dezelfde druk als in de transportleiding heerst, zolang de afstand tot de transportleiding niet te groot is en er geen verbruikspunten tussen zitten. Voor de EGV zal een tijdsvertraging optreden die afhangt van de (tijdsafhankelijke) watervraag. Om tijdsvertragingen zoveel mogelijk te beperken, is het belangrijk om de sensorlocatie zo dicht mogelijk bij de transportleiding te plaatsen. Er moet met grote zekerheid kunnen worden gesteld dat het water vanuit de betreffende transportleiding wordt gevoerd en niet van elders.



Figuur 5. Ruwe indeling sensorlocaties.





Figuur 6. Leidingdiameters.



Figuur 7. Volumestromen om 8.00 uur.

#### Definitieve sensorlocaties

Met Waterbedrijf Groningen zijn praktisch uitvoerbare locaties afgestemd, zie hiervoor Tabel 1 (blauwe tekst) en Tabel 2. De belangrijkste wijzigingen ten opzichte van de voorgestelde locaties zijn:

- Locatie 1. Installeren op een 800 mm leiding is praktisch niet mogelijk, daarom is uitgeweken naar een locatie ten Noorden van de voorgestelde locatie. De uitvoering is op een afkoppeling van een 300 mm diameter zijtak van de doorgaande leiding. De afstand tot de hoofdleiding is 50 meter. Er wordt een constante volumestroom van 1 m<sup>3</sup>/u gerealiseerd op het einde van deze



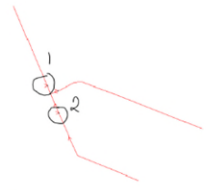

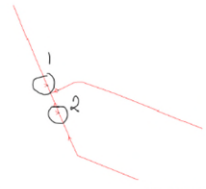
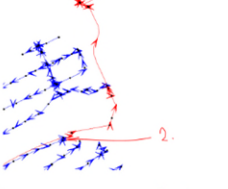

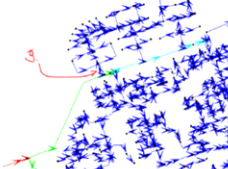
leiding. De tijdsvertraging is hiermee bekend (12723 s) en hiervoor kan gecompenseerd worden in de berekeningen.

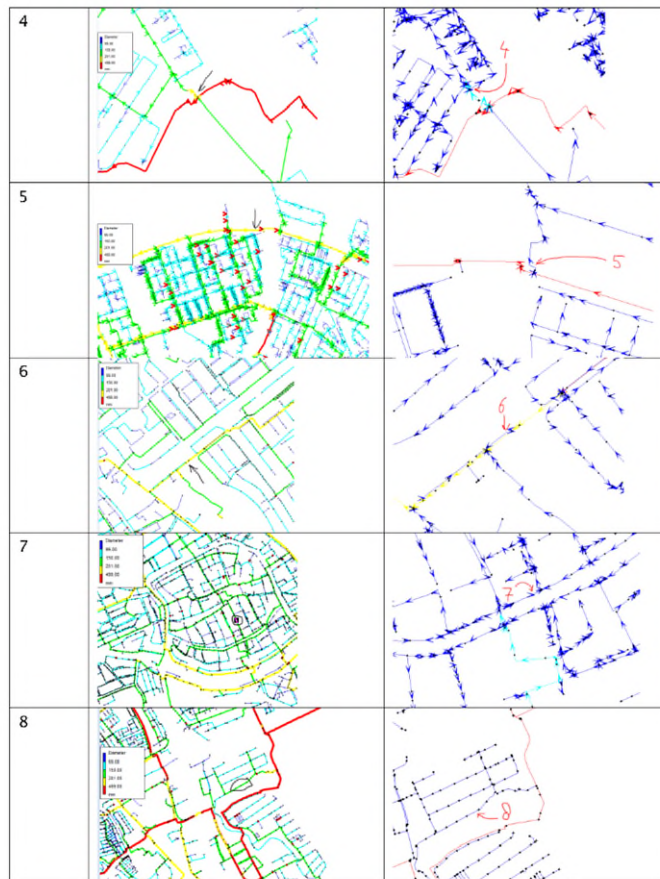
- Locatie 2. Installeren op een 800 mm leiding is niet mogelijk, daarom is uitgeweken naar de definitieve locatie. Het betreft een aansluitleiding (63 mm) op een PE-250 mm leiding. Het water is volgens WBG altijd direct afkomstig van de transportleiding, wat een eenduidige interpretatie zou garanderen. Dit is echter niet het geval in het model.
- Locatie 3 t/m 6. Deze leiding zijn verplaatst naar een nabijgelegen locatie om installatie op een 110 mm leiding mogelijk te maken. De sensormetingen zullen de staat op de nabijgelegen doorvoerleiding met een kleine tijdsvertraging goed benaderen.
- Locatie 7 en 8. De definitieve locaties zijn vergelijkbaar met de voorgestelde locaties.

*Tabel 1. Voorgestelde en definitieve sensorlocaties. Opmerkingen: (opm. 1) De mengdynamiek op deze T-splitting heeft een grote invloed op de mengverhoudingen in een groot gebied ten noorden en zuiden van ervan. Het is daarom raadzaam om de EGV op beide uitgaande leidingen te monitoren. (opm. 2) Voorkeur voor installatie op of nabij A). Indien niet mogelijk, zoeken naar een geschikt alternatief, zoals B).*

Sensorlocatie	Voorgestelde locatie (Knoop/ - leidingnaam en RD-coördinaten)	Definitieve locatie (RD-coördinaten en adres)	Doel	Leidingdiameter (definitieve locatie)
1	Knooppunt 16272X (236950,48; 582748,45)	(236459, 583973) Kluiverboom/Langszij	Monitoring van menglocatie bij Ruischerbrug (opm. 1).	800 110
2	Knooppunt 16273X (236951,72; 582745,57)	(236843, 581845) Kielerbocht 21	Monitoring van menglocatie bij Ruischerbrug (opm. 1).	800 110
3	A: Leiding XXXX005428.440X.1 (236511,46; 584026,48)	(237024, 584516) Stuurboordswal / Waterland	Monitoring van mengzone (opm. 2).	380 110
	B: Leiding XXXX004993.242.1			110
4	Leiding XXXX021286.16623Y.1 (234833,884; 584418,44)	(234768, 584478) Bakemastraat 1	Monitoring van mengzone	300 110
5	Leiding XXXX013238 XXXX012958.1 (233169,25; 584147,46)	(233301, 584145) Zuilen 351	Monitoring van mengzone	380 160
6	Leiding XXXX002938 XXXX021095.1 (234067,01; 582847,62)	(234048, 582838) Vrydemalaan 700	Monitoring van mengzone	380 110
7	Leiding 8645 XXXX003901.1 (233859,76; 581747,60)	(233913, 581601) Herestraat Ged. Zuiderdiep	Monitoring van ongemengd water vanuit P.S. De Punt.	152 160
8	Leiding 643 639.1 (236595,31; 581969,61)	(236595, 581969) Osloweg 130	Monitoring van mengzone	160

*Tabel 2. Voorgestelde en definitieve sensorlocaties.*

Locatie nr.	Voorgestelde locatie	Definitieve locatie
1		
2		
3		



#### Eindbeschouwing

Binnen de mogelijkheden van het project zijn de sensorlocaties geoptimaliseerd. Op basis van een hydraulische analyse is een voorstel gedaan voor sensorlocaties. Vervolgens heeft Waterbedrijf Groningen de praktische uitvoerbaarheid bekeken. Op basis daarvan zijn de definitieve locaties gekozen. In zes van de acht gevallen wordt een aftakking in de directe nabijheid van de beoogde transport- of doorvoerleiding bemonsterd. Voor het doel van dit project wordt dit beoordeeld als een werkbare aanpak.

# Bijlage III –Bepalen van meetlocaties in Assen



Memo

**Bestemd voor:** Aulia Galama-Tintamarina (WMD)  
**Betreft:** Meetlocaties Assen  
**Van:** Bram Hillebrand, Joost van Summeren  
**Datum:** 22 maart 2019

## Doel

In het BTO "Realtime sensormetingen in het distributienet" worden realtime metingen van de elektrische geleidbaarheid uitgevoerd op 8 locaties in het distributienet van de stad Groningen en monsterlocaties uitgevoerd in het distributienet van Assen. Het doel is om inzicht te krijgen in de actuele mengverhouding en daarmee hydraulische modellen te valideren en mogelijke afwijkingen van normale operatie te herkennen. Voor een goed inzicht zijn de locaties van de metingen van belang. Dit memo beschrijft de bepaling van meetlocaties in Assen, aan de hand van hydraulische modelberekeningen.

## Mengzones Assen

Met behulp van het aangeleverde EPANET model voor Assen is 168 uur doorgerekend met als doel om voor ieder knooppunt de herkomstlocatie (en eventuele mengverhouding) te identificeren (P.S. Annen (ANVoed), P.S. Assen (ASVoed), en kelder Pittelo (PIres)). Dit om tot een aantal goede monsterlocaties te komen om de mengzones ook in het echt waar te nemen.

Hiervoor zijn met enkele python scripts de laatste 24 uur geanalyseerd.

## Dominantie

Voor ieder punt is de gemiddelde mengverhouding over de laatste 24 uur berekend (Figuur 1), de laatste nacht (00:00 tot 07:00 uur, Figuur 2) en de laatste dag (07:00 tot 0:00, Figuur 3). Vervolgens zijn alle punten in categorieën ingedeeld. Wanneer het water op een punt gemiddeld de laatste 24 uur voor meer dan 75 % uit een van de drie bronnen afkomstig was dan krijgt dat punt deze bronkleur. Anders wordt het punt als mengzone aangewezen.

In een (stationaire) mengzone blijft de mengverhouding constant, waar deze verandert bij een pendelgebied (van ongemengd water). Pure meng- en pendelzones zijn met sensorgegevens van elkaar te onderscheiden, op voorwaarde dat de EGV-veranderingen van waterbronnen klein zijn ten opzichte van de EGV-verschillen *tussen* de bronnen. Het onderscheid tussen mengzones en pendelgebieden geeft informatie over de dynamiek van een leveringsgebied en is daarom nuttig voor modelvalidatie. In de praktijk zullen mengzones en pendelgebieden veelal overlappen.

Kijkend naar de 3 figuren zijn er enkele aspecten die opvallen. Het water van pompstation (P.S.) Annen komt van rechtsboven. In figuur 1 is overduidelijk de leiding te zien die dit naar het westen vervoert en daar in het westen de wijk van water voorziet. Deze wijk wordt dan ook geheel gedomineerd door water van Annen. In het zuidoosten van de stad is P.S. Assen als dominante bron te herkennen (Figuur 1). Omdat de kelder Pittelo 's nachts gevuld wordt is het interessant om te kijken naar het verschil tussen

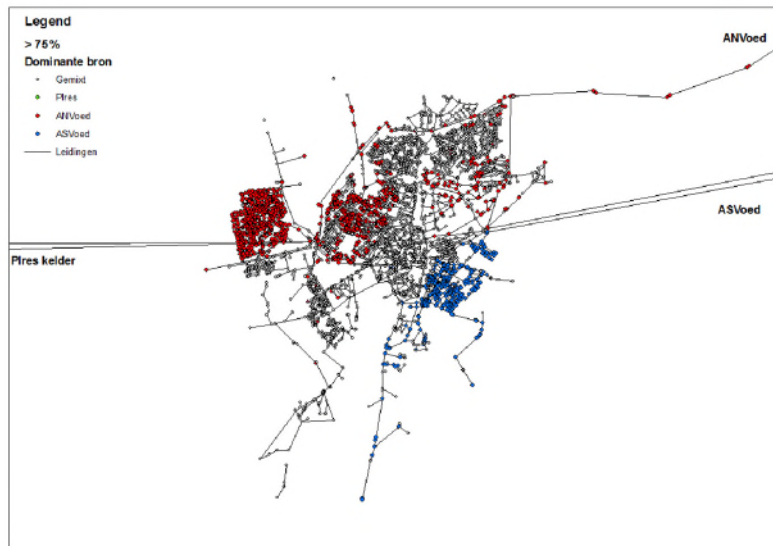
dag en nacht (Figuur 2 en 3). 's Nachts wordt een groot deel van het noorden van de stad gedomineerd door water van Annen terwijl dit overdag niet het geval is.

#### Veranderlijkheid

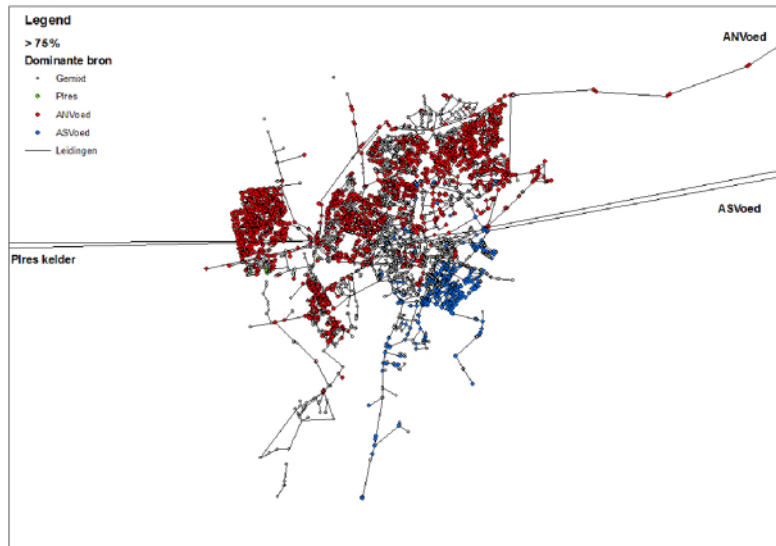
In figuur 4 is de mate van verandering in de watersamenstelling van de laatste 24 uur weergegeven. De verandering in watersamenstelling is het grootst net ten westen en noorden van het centrum van de stad en in de wijk in het noordwesten.

#### Voorgesteldemeetlocaties op basis van hydraulische modelberekeningen

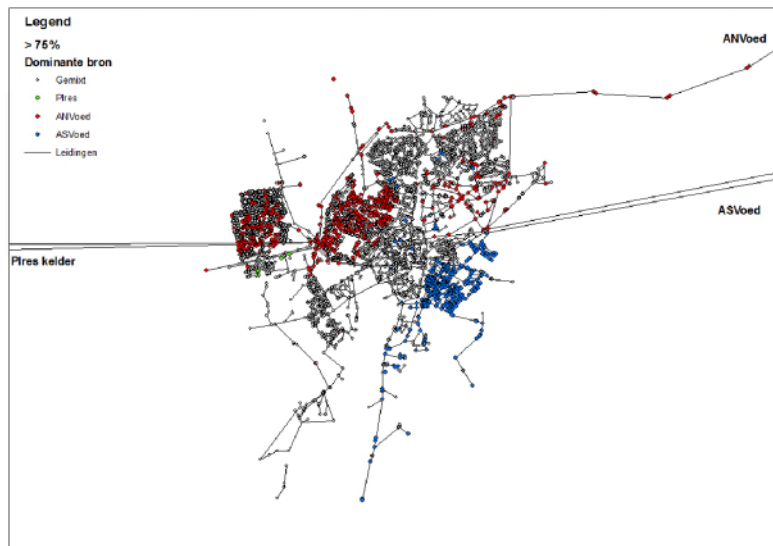
Er is met WMD afgestemd dat er 12 meetlocaties worden gebruikt in het gebied. De voorgestelde monsterlocaties zijn weergegeven in figuur 5. Zeven locaties (blauwe cirkels) zijn bedoeld om de mengzones te bemonsteren net ten westen en noorden van het centrum en in de wijk ten noordwesten van de stad. De overige 5 meetlocaties (paarse cirkels) zijn bedoeld om zones te bemonsteren waarvan de modelberekeningen aangeven dat een (bijna) constante mengverhouding is te verwachten. Deze locaties bevinden zich in het zuidoosten, oosten en noordoosten van het gebied.



Figuur 1: knooppunten zijn gekleurd wanneer het water de laatste 24 uur gemiddeld voor > 75% van 1 bron kwam

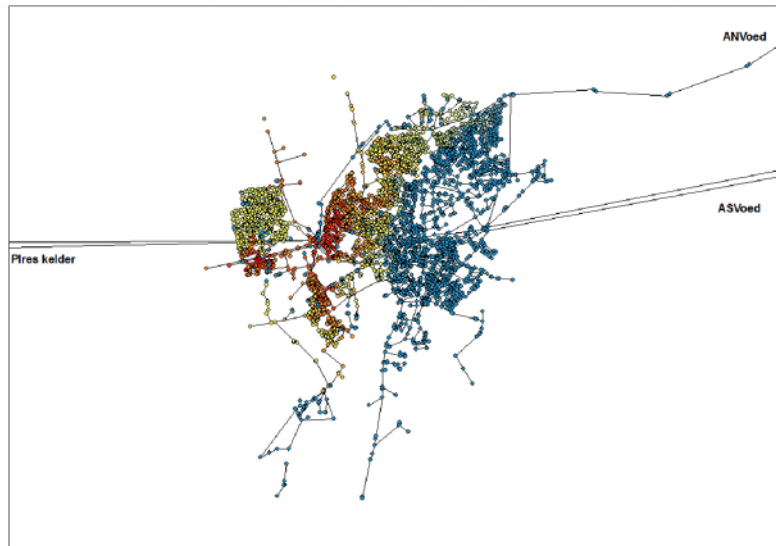


*Figuur 2: knooppunten zijn gekleurd wanneer het water de laatste nacht gemiddeld voor > 75% van 1 bron kwam.*



*Figuur 3: knooppunten zijn gekleurd wanneer het water de laatste dag gemiddeld voor > 75% van 1 bron kwam*





*Figuur 4: de mate waarin de mengverhoudingen veranderen in de laatste 24 uur, van blauw (niet/nauwelijks) tot rood (veel verandering)*



*Figuur 5. Als Figuur 4 met aanbevolen meetlocaties (blauwe en paarse cirkels) .*