

BTO 2014.018 | Februari 2014

BTO rapport

Numerieke validatie van
backtracing-
berekeningen voor het
bepalen van
verontreinigings-
bronnen in drinkwater-
distributiesystemen

BTO

Numerieke validatie van backtracing-berekeningen
voor de identificatie van
verontreinigingsbronnen in
drinkwaterdistributiesystemen

BTO 2014.018 | Februari 2014

Opdrachtnummer
400354/001/002

Projectmanager
Nellie Slaats

Opdrachtgever
BTO- Speerpuntonderzoek Vitens

Kwaliteitsborger(s)
Mirjam Blokker

Auteur(s)
Joost van Summeren

Verzonden aan
Dit rapport is selectief verspreid onder medewerkers
van BTO-participanten en is verder niet openbaar.

Jaar van publicatie
2014

Meer informatie

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

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



BTO 2014.018 | Februari 2014 © 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.

Samenvatting

In het Speerpuntonderzoek voor Vitens is de door KWR ontwikkelde numerieke backtracing-tool voor het lokaliseren van eventuele waterkwaliteitsverontreinigingen in het drinkwaterdistributienet gevalideerd. Specifiek werd de toepasbaarheid in de Vitens Innovation Playground (VIP)-**getoetst door de analyse toe te passen op virtuele verontreinigingsscenario's en** virtuele sensorgegevens van dit gebied. De backtracing-methodiek blijkt geschikt voor toepassing in de praktijk als aan twee voorwaarden wordt voldaan: de onzekerheden in de stromingspatronen waarop de methodiek is gebaseerd mogen niet te groot zijn (cruciaal zijn hierbij de afsluiterstanden) én het sensornetwerk moet op een juiste manier zijn ingericht.

Belang: Waterkwaliteitsverontreinigingen in het drinkwaterdistributienet kunnen een gevaar vormen voor de gezondheid van consumenten en een schadepost betekenen voor het drinkwaterbedrijf. Om de oorzaak snel aan te kunnen pakken en consequenties van potentiële calamiteiten te beperken is het belangrijk om verontreinigingsbronnen accuraat te kunnen bepalen. In de VIP proeftuin heeft Vitens een aantal Optiqua waterkwaliteitssensoren geïnstalleerd; de meetgegevens van deze sensoren kunnen in principe worden gebruikt voor het lokaliseren van een eventuele vervuillingsbron met numerieke backtracing.

Aanpak: De toepasbaarheid van een door KWR ontwikkeld backtracing-algoritme (zie rapport BTO 2013.030) is onderzocht met door Vitens aangeleverde virtuele **sensorgegevens voor virtuele verontreinigingsscenario's in het VIP-gebied**. Met de **numerieke backtracingtechniek zijn voor 11 scenario's (met 3 verschillende bronlocaties)** de potentiële brongebieden bepaald. Dat gebeurde blind: de lokaties van de bronnen waren onbekend tijdens de backtracing-analyse en werden pas achteraf vergeleken met de feitelijke bronlocaties.

Resultaten: De numerieke modelleringsresultaten tonen dat —met 20 sensoren in het netwerk— verontreinigingsbronnen in veel gevallen correct en voldoende nauwkeurig worden bepaald, waarbij het succes van de bronbepaling afhangt van het sensornetwerk én van afwijkingen in stromingspatronen in het model. Omdat het potentiële brongebied in het algemeen veel kleiner is dan het bovenstroomse gebied, zal het vinden en aanpakken van een bron sneller en makkelijker gaan. Onnauwkeurigheden in de stromingspatronen kunnen echter leiden tot een incorrecte bepaling van de locatie of het tijdstip van verontreinigingen. Tevens benadrukken de resultaten het belang van optimale sensorplaatsing: naarmate een verontreiniging door meer sensoren wordt gedetecteerd kan het brongebied beter worden ingeperkt.

Implementatie: Op basis van dit onderzoek wordt de methode voor numerieke backtracing geschikt bevonden voor toepassing in de praktijk, mits de stromingspatronen waarop de methodiek is gebaseerd voldoende accuraat zijn bepaald en mits het sensornetwerk op een juiste manier is ingericht. Vóór toepassing van backtracing in de praktijk is het aan te bevelen om het sensornetwerk met zorg in te richten. Stromingspatronen hangen af van verbruiken en van de sturing. Omdat afsluiters een permanent effect hebben op de stromingspatronen is het van groot belang om de afsluiterstanden goed te kennen. Zo ontstaat een zo accuraat mogelijk hydraulisch model. In een vervolgonderzoek kunnen de gevoeligheden voor onzekerheden in afsluiterstanden, verbruikspatronen en sensormetingen preciezer worden bepaald.

Inhoud

Samenvatting	2
Inhoud	4
1 Introductie	5
2 Beschrijving backtracing-methodiek	6
3 Hydraulisch model	7
3.1 Leidingnetmodel	7
3.2 Conversie van het hydraulische model van InfoWorks naar EPANET	7
4 Verontreinigingsscenario's	9
5 Resultaten: Backtracen van een onbekende verontreinigingsbron	10
5.1 Bronbepaling van verontreinigingslocatie 1	10
5.2 Vergelijking met origineel gedefinieerde verontreinigingslocatie 1	13
5.3 Bronbepaling van verontreinigingslocatie 2	14
5.4 Vergelijking met origineel gedefinieerde verontreinigingslocatie 2	17
5.5 Bronbepaling van verontreinigingslocatie 3	17
5.6 Vergelijking met origineel gedefinieerde verontreinigingslocatie 3	20
6 Conclusies en aanbevelingen	21
6.1 Conclusies	21
6.2 Aanbevelingen	21
7 Literatuur	23
Bijlage I Validatie van het backtracing-algoritme met behulp van een bekende bron	24
Bijlage II Virtuele sensorgegevens voor 11 verontreinigingsscenario's	27

1 Introductie

Verontreinigingen in het drinkwaterdistributienet kunnen een gevaar vormen voor de gezondheid van consumenten, leiden tot leveringsonderbreking en het bedrijfsimago van een waterleidingbedrijf schaden. Nadat het brongebied van een verontreiniging is vastgesteld, kunnen maatregelen worden getroffen om de oorzaak aan te pakken en verdere verspreiding te beperken. Om consequenties van potentiële calamiteiten te beperken is het daarom belangrijk om verontreinigingsbronnen snel en accuraat te kunnen bepalen. **In principe is zo'n bronbepaling mogelijk op basis van betrouwbare en voldoende waterkwaliteitsmetingen in combinatie met een accurate beschrijving van stromingspatronen in het distributienet.**

Voor de bronbepaling is door **KWR** op basis van hydraulische modellen een methodiek ontwikkeld in het BTO-onderzoek (***BTO 2013.030 Backtracing van verontreinigingen in het distributienet –Methoden en bronbepaling met stochastische watervraag***). In de ***Vitens Innovation Playground (VIP)*** proeftuin heeft **Vitens** een aantal Optiqua sensoren geïnstalleerd om waterkwaliteitsverontreinigingen te detecteren. Deze meetgegevens kunnen mogelijk gebruikt worden voor toepassing in de praktijk van de genoemde backtracing-methodiek.

Het doel van dit onderzoek is om de ontwikkelde backtracing-methodiek te valideren door op basis van **virtuele** sensorgegevens voor mogelijke waterkwaliteitsverontreinigingen de brongebieden te bepalen. De virtuele sensordata is gegenereerd op basis van 20 virtuele Optiqua sensoren in de VIP proeftuin en voor 11 mogelijke besmettingsscenario's in hun eigen hydraulische model (InfoWorks). De locaties van de verontreinigingsbronnen blijven onbekend tot na het bepalen van de brongebieden, om een onbevooroordeelde analyse te garanderen. De berekende brongebieden worden pas achteraf vergeleken met de oorspronkelijk gedefinieerde brongebieden. Op basis van **deze "blinde toets" wordt** de kwaliteit van de backtracing-methodiek geëvalueerd en worden aanbevelingen gedaan voor eventuele praktijk-toepassing in het VIP gebied of andere bestaande drinkwaterdistributiesystemen.

2 Beschrijving backtracing-methodiek

De gebruikte backtracing-methodiek beschrijven we hier slechts beknopt; voor een gedetailleerde beschrijving wordt de lezer verwezen naar een recent BTO-rapport [Van Thienen, 2013]. De backtracing werkt op basis van het volgende principe: Stel dat we een merkstof aan het water toevoegen op een bepaalde locatie, p , in het distributienet. Deze merkstof verspreidt zich door het net en wanneer er elders (locatie q) een verontreiniging wordt gedetecteerd kan door de aanwezigheid van de merkstof worden bepaald of het water op locatie q langs locatie p heeft gereisd en locatie p daarmee een mogelijke bron van de geconstateerde verontreiniging is. Door op elk tijdstip en voor ieder knooppunt in het netwerk een merkstof toe te voegen is het mogelijk om een volledig beeld te krijgen van alle potentiële bronlocaties.

Door de potentiële brongebieden van alle sensoren met een positieve detectie te combineren (middels binaire vermenigvuldiging), wordt het volledige potentiële brongebied bepaald en gevisualiseerd met een zogenaamde **herkomstkaart**: het hoofdresultaat van de bronbepaling. Locaties waar vanaf het water niet alle sensoren op tijdstippen van positieve meting bereikt, worden uitgesloten als mogelijke verontreinigingsbron. Het totale potentiële brongebied wordt op deze wijze ingeperkt. In dit onderzoek wordt geen gebruik gemaakt van negatieve metingen (over de gehele modeltijd) van de sensoren.

Aanvullend inzicht wordt verkregen door te berekenen welke **fracties** van het water de sensoren met positieve meting bereikt. Deze fracties (gesommeerd over de meetintervallen voor alle sensoren met positieve meting) worden representatief geacht voor de herkomstkans van de verontreiniging. Door de herkomstkans voor alle netwerklocaties te berekenen, wordt een zogenaamde **herkomstkanskaart** verkregen. Bij het berekenen van herkomstkansgebieden vindt geen inperking plaats en daarom zijn de gebieden in het algemeen groter dan de herkomstgebieden waarbij dit wel gebeurt.

Verder wordt in de analyse gebruikt gemaakt van de **oorsprongstijd**: het tijdstip waarop het water een bepaalde locatie heeft moeten verlaten om een gekozen evaluatielocatie op een evaluatietijdstip te bereiken. Het evaluatietijdstip kan bijvoorbeeld worden gekozen als de eerste positieve sensordetectie welke representatief is voor het starttijdstip van verontreiniging, mits (i) het beginfront van de verontreiniging de sensor bereikt met een concentratie boven de detectielimiet, (ii) oorsprongstijden niet worden beïnvloed doordat water via verschillende wegen de sensor bereikt.

We berekenen het stoftransport door het distributienet m.b.v. hydraulisch pakket EPANET-MSX. Vanwege de rekentijd (~2 weken) en opslagruimte (1.2TB) voor dit specifieke probleem is gekozen om de modeltijd te beperken tot 24 uur, i.p.v. 72 uur voor de **verontreinigingsscenario's**.

3 Hydraulisch model

3.1 Leidingnetmodel

De netwerkconfiguratie en verbruiks- en voedingspatronen voor het VIP gebied zijn gedefinieerd in een InfoWorks model met meer dan 25.000 verbruiksknooppunten. Het hydraulische model omvat het gebied rondom Leeuwarden en Noardburgum (Figuur 1). Hierin bevinden zich 20 sensoren, waarvan 11 aanwezig in het fysieke netwerk en 9 toegevoegd om een meer uniforme en hogere dekkingsgraad te bereiken. De sensorlocaties zijn *niet* bepaald met een plaatsingsoptimalisatieroutine (Van Thienen, 2014) en zijn daarom niet gegarandeerd geschikt voor backtracing-doeleinden.

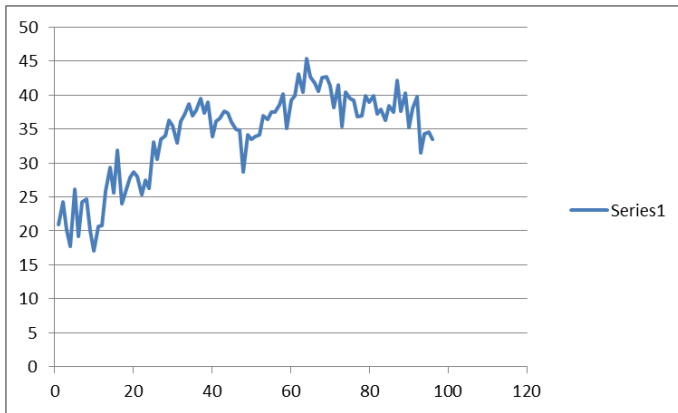


Figuur 1. Leidingnetmodel rond Leeuwarden en Noardburgum, Friesland. Rode punten met labels tonen de locaties van 20 Optiqua-sensoren. Zwarte punten geven de ruim 25.000 verbruiksknoopen weer.

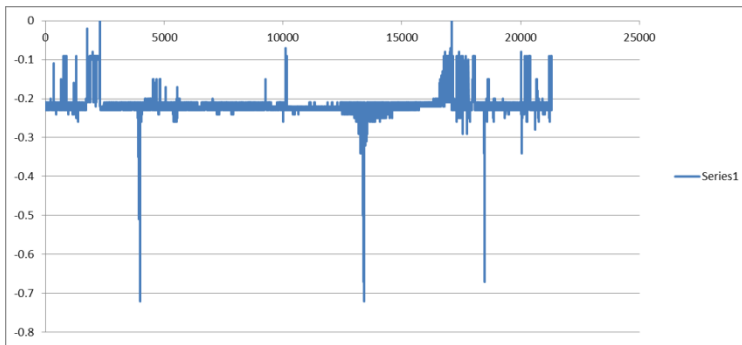
3.2 Conversie van het hydraulische model van InfoWorks naar EPANET

Om het InfoWorks hydraulische model geschikt te maken voor de stoftransport-berekeningen met EPANET-MSX is het geconverteerd naar het EPANET data formaat. We hebben de conversie gecontroleerd met drie berekeningen. Ten eerste hebben we voor het EPANET-model het verschil tussen het totaal van voeding en verbruik (de sluitfout) berekend (Figuur 2): Er wordt iets meer water verbruikt dan geproduceerd, maar dit verschil is klein t.o.v. het totale verbruik. Ten tweede hebben we verschillen berekend tussen de twee modellen in de druk op alle knooppunten (Figuur 3). Dit toont een structurele maar kleine (~ -0.2 mwk) afwijking tussen de modellen, waarbij uitschieters naar beneden corresponderen met drie grootverbruikers die op eenzelfde knooppunt in het EPANET-model zijn terecht gekomen. Ten derde tonen de verschillen in verbruik per leidingsectie (Figuur 4) slechts kleine afwijkingen die middelen rond ~ 0 m³/uur. De kleine verschillen worden wellicht veroorzaakt door een verschil in afbreekcriterium of in de formule van Darcy-Weissbach (λ -parameter). De uitschieters naar +40 en -40 m³/uur liggen op korte (afsluiter)leidingen met een relatief grote diameter. Bovenstaande resultaten tonen dat er slechts kleine afwijkingen bestaan tussen het geconverteerde en originele model en de

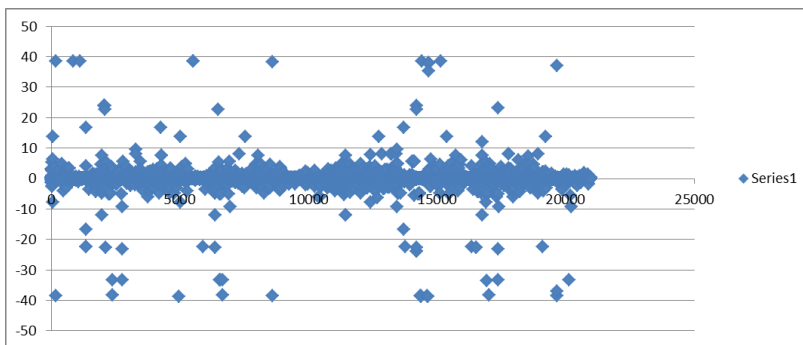
hydraulica van het EPANET-model wordt voldoende nauwkeurig geacht voor verdere berekeningen.



Figuur 2. Sluitfout op de voeding in het EPANET-model berekend voor de eerste dag. Horizontale as: modeltijd (kwartieren), verticale as: verbruiken (m³/uur).



Figuur 3. Verschillen (EPANET minus InfoWorks model) in druk op de knooppunten op 18:00 uur. Horizontale as: knooppuntnummer, verticale as: druk (mwc).



Figuur 4. Verschillen (EPANET minus InfoWorks model) in verbruik op de leidingsecties op 18:00 uur. Horizontale as: knooppuntnummer, verticale as: verbruik (m³/uur).

4 Verontreinigingsscenario's

Elf virtuele verontreinigingsscenario's (Tabel 1) zijn door Vitens berekend voor 3 verschillende locaties (Tabel 1, een 12^e scenario's 3CH is niet gebruikt in de backtracing vanwege een vermoedde fout en achterwege gelaten in de tabel). De bronlocaties zijn weergegeven in Figuur 17, maar deze waren onbekend tijdens het uitvoeren van de backtracing. Per locatie zijn er 4 scenario's waarvan 2 met een continue verontreiniging (continu vanaf starttijd 6:30 uur) en 2 met een puls-signaal (van 6:30 tot 8:30 uur). Elk paar bevat verder scenario's met hoge (500 mg/l) en lage (100 mg/l) concentratie, waarbij alle resp. een deel van de bereikte sensoren de verontreiniging registreren. Vooraf is wel bekend welke vier scenario's tot een (onbekende) verontreinigingslocatie horen (aangegeven met de nummers in de scenario-namen, Tabel 1). Voor de backtracing berekeningen gebruiken we een detectielimiet van 5 mg/l, conform huidige sensorgevoeligheden [Van Wijlen e.a.; Tangema e.a. (2011)]. Tijdreeksen van gesimuleerde metingen van de 20 sensoren zijn voor alle 11 scenario's weergegeven in Appendix 1 (Figuur 22-Figuur 31).

Scenario	Locatie	Type dosering	Duur (uur)	Concentratie	Succesvolle bronbepaling?
1CH	1	Continu	24	Hoog (500 mg/l)	Ja
1CL	1	Continu	24	Laag (100 mg/l)	Ja
1PH	1	Puls	2	Hoog (500 mg/l)	Nee*
1PL	1	Puls	2	Laag (100 mg/l)	Nee*
2CH	2	Continu	24	Hoog (500 mg/l)	Ja
2CL	2	Continu	24	Laag (100 mg/l)	Ja
2PH	2	Puls	2	Hoog (500 mg/l)	Ja
2PL	2	Puls	2	Laag (100 mg/l)	Ja
3CL	3	Continu	24	Laag (100 mg/l)	Nee
3PH	3	Puls	2	Hoog (500 mg/l)	Nee
3PL	3	Puls	2	Laag (100 mg/l)	Nee
	1**	Continu	24	Hoog (500 mg/l)	Ja
	2**	Continu	24	Hoog (500 mg/l)	Ja

Tabel 1. Overzicht van 11 verontreinigingsscenario's voor 3 vooraf onbekende bronlocaties en 2 vooraf bekende bronlocaties (aangegeven met "**"). Starttijdstip van de verontreiniging voor alle scenario's is 6:30 uur. In de rechterkolom staat aangegeven of de vooraf onbekende bronlocatie succesvol is bepaald. Voor scenario's aangegeven met "Nee*" is de bronbepaling succesvol zonder gebruik van een detectielimiet, maar niet succesvol met een detectielimiet van 5 mg/l (vanwege negatieve detectie voor alle sensoren). De onsuccesvolle bronbepalingen zijn mogelijk een gevolg van kleine onnauwkeurigheden in het hydraulisch model of meetgegevens die onder de detectielimiet of buiten de modeltijd blijven.

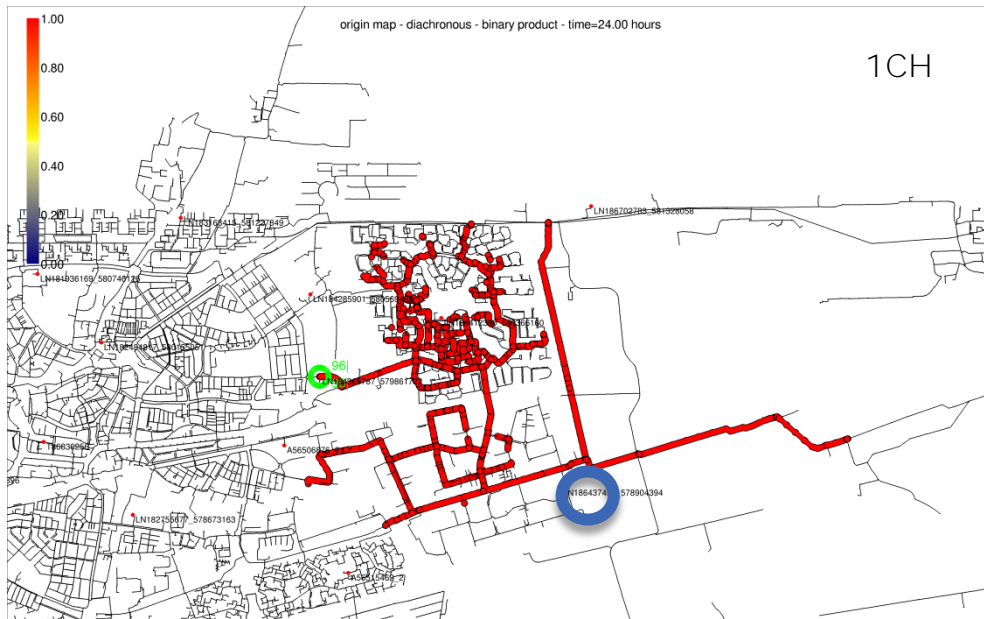
5 Resultaten: Backtracen van een onbekende verontreinigingbron

5.1 Bronbepaling van verontreinigingslocatie 1

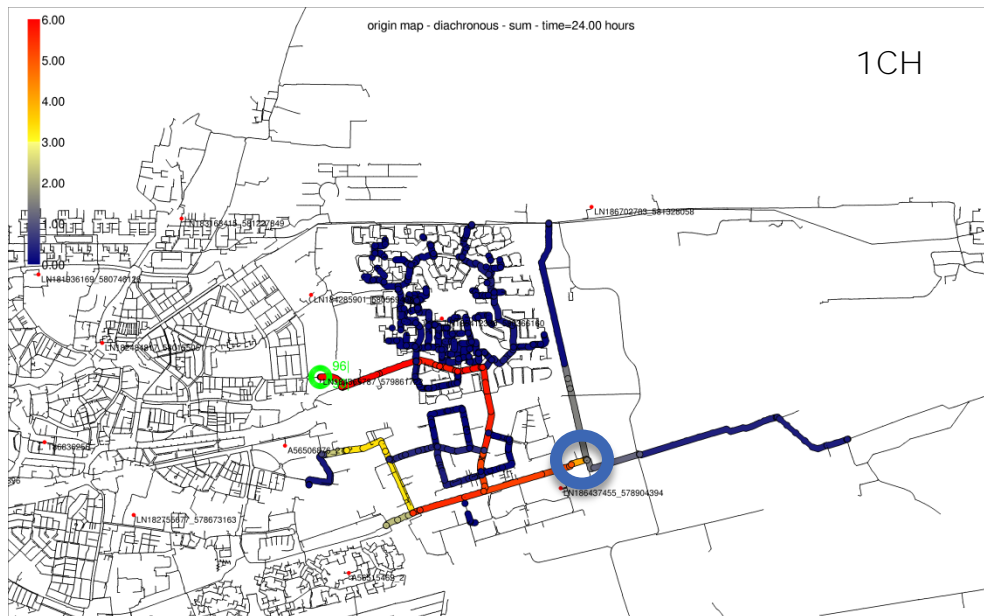
1CH: Voor de continue vervuiling met hoge concentratie (scenario 1CH) wordt de verontreiniging gedetecteerd door slechts een enkele sensor met een detectielimiet van 5 mg/l (Figuur 5, groene cirkel). Vanwege deze beperkte bemonstering is het berekende potentiële brongebied relatief groot (Figuur 5, rood gebied). Binnen dit brongebied zijn nog wel gebieden met verhoogde herkomstkans te onderscheiden: vanaf de sensorlocatie breiden deze zich achtereenvolgend uit in oostelijke, zuidelijke en oost-westelijke richting (Figuur 6, rood en roze gebieden).

Voor 3 sensoren blijft de concentratie net onder de detectielimiet van 5 mg/l (Figuur 7, de twee meest westelijk gelegen sensoren LN180696743_579887543 en LN180696377_579885171 liggen dicht bij elkaar en zijn in de figuur niet te onderscheiden). Om de toegevoegde waarde van deze sensormetingen te bepalen, hebben we de bronbepaling herhaald met een detectielimiet van 0 mg/l (waarbij deze 3 sensoren ook positief detecteren). Dit resulteert in een sterk ingeperkt potentieel brongebied: de locatie waar een noord-zuidelijke georiënteerde transportleiding aan het noordeinde uitkomt op een transportleiding in oost-westelijke richting (Figuur 7, rood gebied aangewezen door rode pijl).

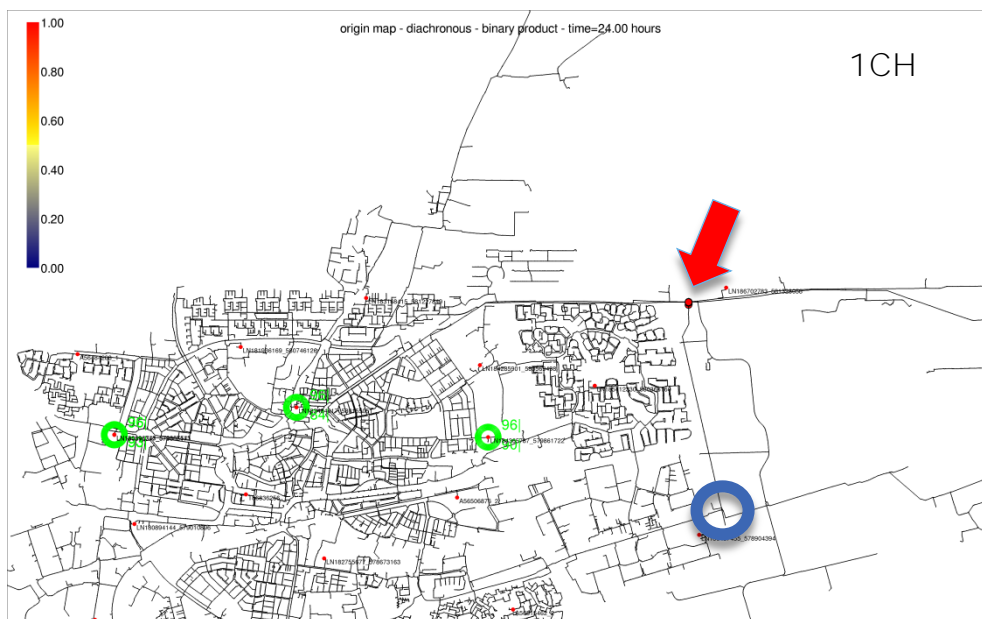
1CL: De resultaten voor het scenario met continue vervuiling en lage (100 mg/l) concentratie (scenario 1CL) zijn gelijk aan scenario 1CH en daarom niet getoond. (Hier wordt nogmaals **opgemerkt dat vooraf bekend is dat scenario's die beginnen met hetzelfde nummer** dezelfde bronlocatie hebben.) De gelijke resultaten zijn een gevolg van de identieke tijdstippen van positieve sensormetingen, in overeenstemming met vergelijkbare sensorgegevens (afgezien van verschillende absolute concentraties, zie Bijlage II, Figuur 22 en Figuur 23).



Figuur 5. Potentieel brongebied (binair product) berekend voor scenario 1CH (detectielimiet 5 mg/l). De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.



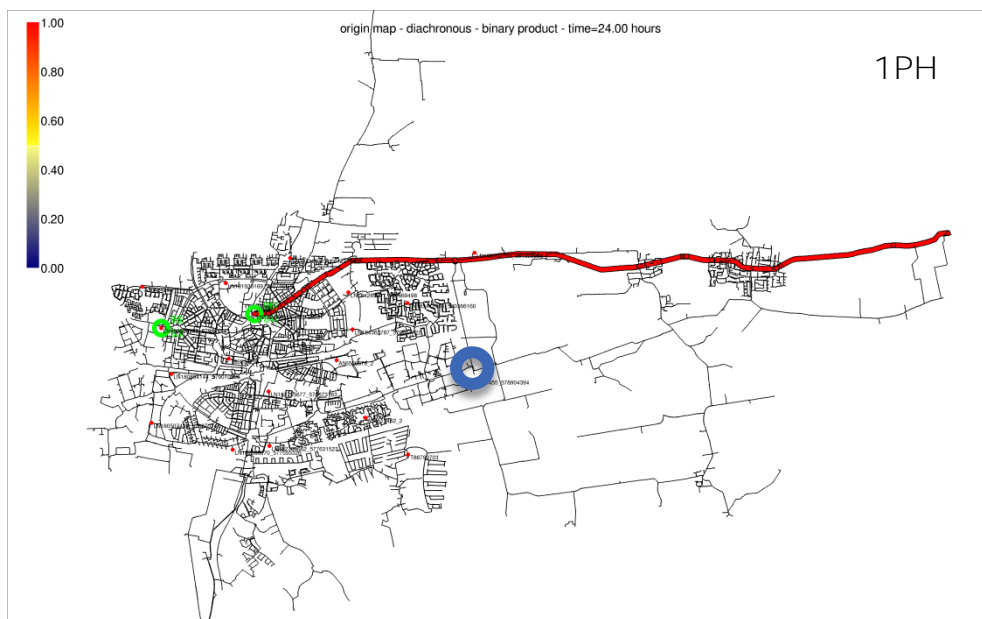
Figuur 6. Herkomstkanskaart voor verontreinigingsscenario 1CH. De kleurschaal geeft de fracties van waterherkomst weer, gesommeerd over een detectietijd van 6 uur voor de sensor met positieve meting en detectielimiet 5 mg/l (groene cirkel). De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.



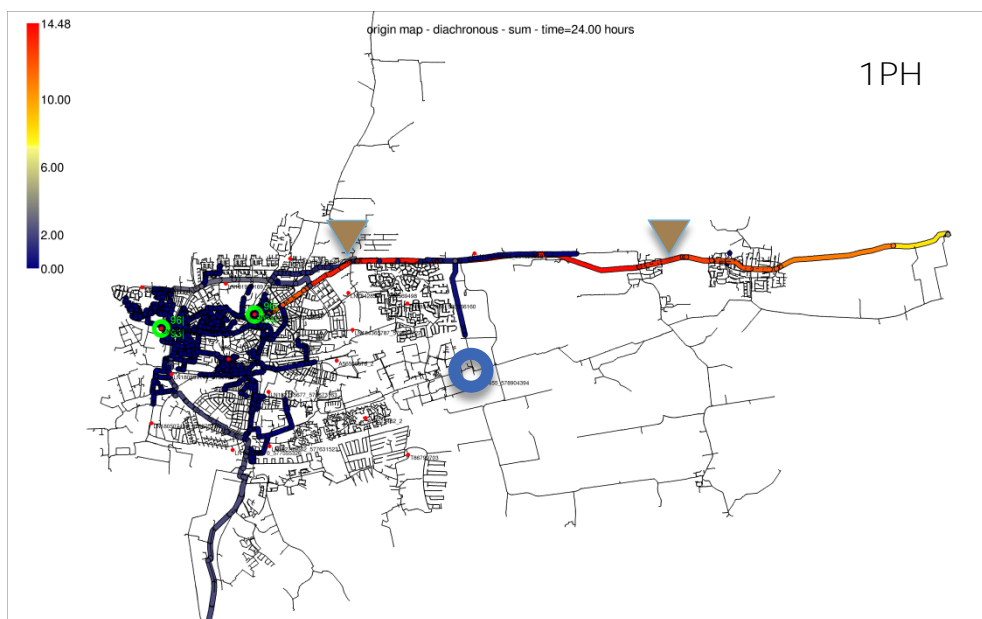
Figuur 7. Potentieel brongebied (binair product) berekend voor scenario 1CH (detectielimiet 0 mg/l). De pijl geeft het brongebied (in rood) aan. De groene cirkels geven de sensoren met positieve meting aan. De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.

1PH: Voor het scenario met puls en hoge concentratie (1PH) liggen de concentraties gemeten op dag 1 beneden de detectielimiet van 5 mg/l (Figuur 27, Bijlage II) en een brongebied is daarom niet te bepalen. Er zijn echter wel 2 positieve sensormetingen met concentraties beneden de detectielimiet en om de informatie-inhoud hiervan te onderzoeken, voeren we de backtracing uit met **alle** positieve signalen (door een detectielimiet van 0 mg/l te gebruiken). Het berekende potentiële brongebied beslaat dan een transportleiding in oost-westelijk richting (Figuur 8, rood-gekleurd gebied). Binnen dit gebied is de herkomstkans het grootst op een transportleiding langs de Groningerstraat, ruwweg tussen de Bonkevaart en Hurdegaryp (Figuur 9, aangegeven met bruine markers), hoewel we de overige brongebieden (Figuur 8, rood gebied) niet uitsluiten.

1PL: Voor het scenario met puls-sigitaal met lage concentratie (1PL, niet getoond) is het berekende potentiële brongebied identiek aan dat van scenario 1PH. Dit is vanwege de slechts kleine verschillen in sensor-detecties (vgl. Figuur 23 en Figuur 24, Bijlage II).



Figuur 8. Potentieel brongebied berekend voor scenario 1PH (detectielimiet 0 mg/l). De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.



Figuur 9. Fracties van waterherkomst, gesommeerd over een modeltijd van 24 uur en over sensoren met positieve meting voor scenario 1PH (detectielimiet 0 mg/l). De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.

5.2 Vergelijking met origineel gedefinieerde verontreinigingslocatie 1

De origineel gedefinieerde verontreinigingslocatie 1 (Figuur 17) wordt succesvol gelokaliseerd in scenario 1CH en 1CL (Tabel 1). Echter, omdat de verontreiniging slechts door een enkele sensor is gemeten, is het berekende potentiële brongebied relatief omvangrijk. Dit benadrukt het belang van een hoge dekkingsgraad en voldoende redundantie bij het plaatsen van sensoren in een distributiesysteem. De berekende herkomstkans voor bronlocatie 1 is hoog (Figuur 6, waarde 4 bij een maximum van 6, roze kleur), en bevat daarmee relevante toegevoegde informatie.

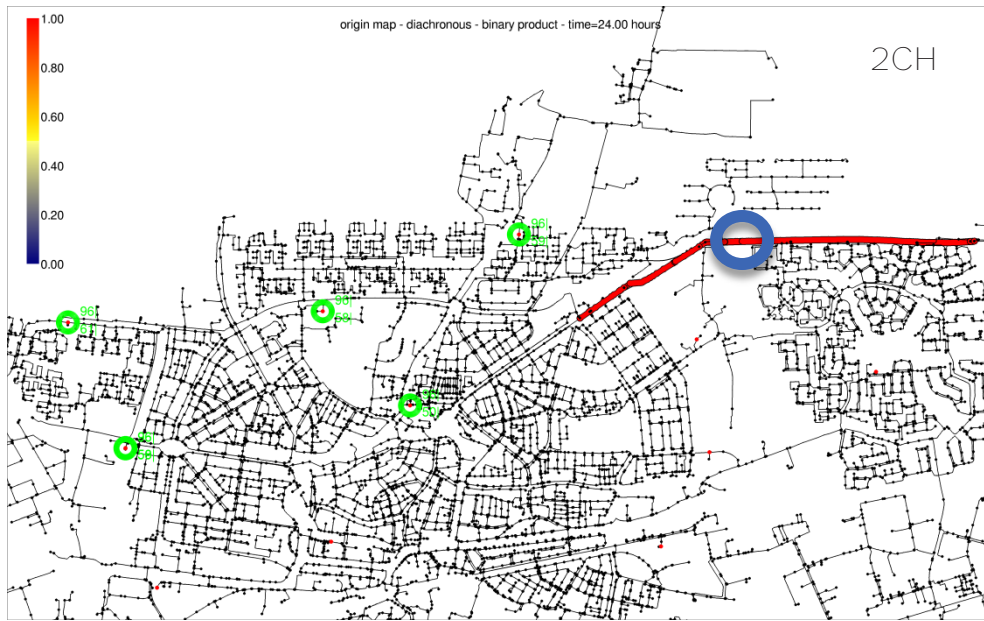
Door de detectielimiet in scenario 1CH te verlagen tot 0 mg/l wordt de verontreiniging door 4 sensoren gedetecteerd en daarmee het brongebied ingeperkt tot een zeer klein gebied (Figuur 7). Hoewel dit gebied geografisch afwijkt van de origineel gedefinieerde bronlocatie (Figuur 17), raakt het brongebied wel de noordzijde van leidingsectie waarin verder zuidwaarts ook de verontreiniging zich bevindt. In deze noord-zuidelijk georiënteerde leidingsectie vindt echter 4 keer per etmaal een omkering in de stroomrichting plaats. Vanwege deze complexe hydraulica is het mogelijk dat het origineel gedefinieerde brongebied wordt uitgesloten, bv. omdat de verontreiniging niet tijdig alle sensoren met positieve detectie bereikt. Dit resultaat benadrukt het belang van een nauwkeurig model van de hydraulica van het distributiegebied. De omkeringen in stroomrichting in deze noord-zuid leidingsectie **beïnvloeden waarschijnlijk ook de bronbepaling voor scenario's 1PH en 1PL**, waarbij deze leiding opnieuw niet als mogelijk brongebied wordt geïdentificeerd. Bovendien leidt de negatieve detectie van de meest oostelijk gelegen sensor in scenario 1CH (Figuur 7) tot een minder effectieve inperking van het brongebied in oost-westelijke richting.

5.3 Bronbepaling van verontreinigingslocatie 2

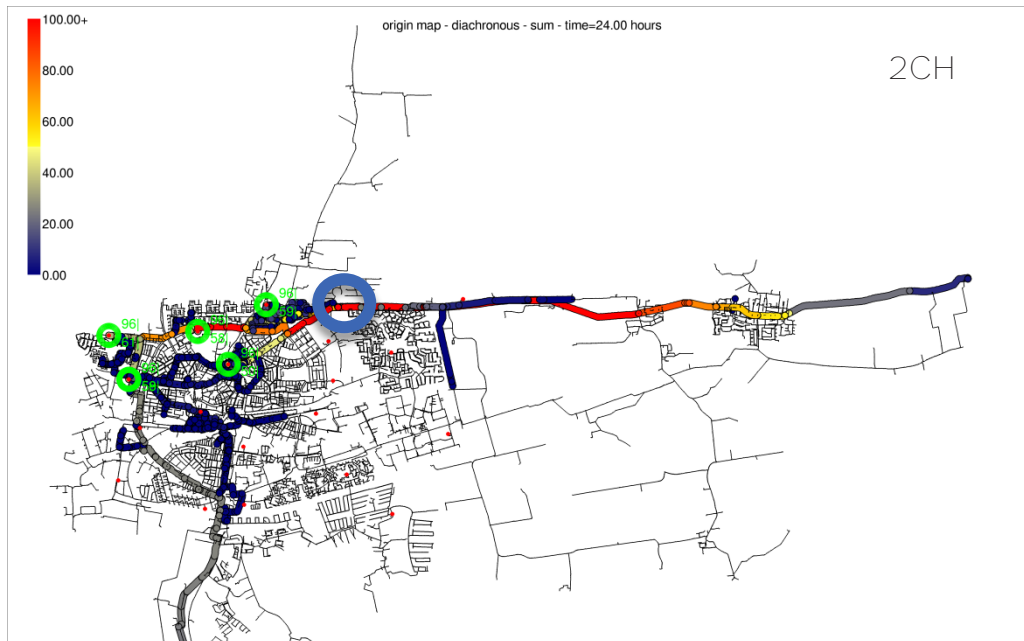
2CH: Voor locatie 2 en het scenario met een hoge continu signaal (2CH) wordt de verontreiniging gedetecteerd door 6 sensoren met een detectielimiet van 5 mg/l (Figuur 10, groene cirkels, 2 sensoren zijn niet onderling te herkennen vanwege de beperkte onderlinge afstand). Het potentiële brongebied beperkt zich tot een deel van een enkele transportleiding met hoge transportsnelheid en is om die reden langgerekt (Figuur 10, rood-gekleurd gebied). Consistentie van dit resultaat wordt versterkt door maximale waarden van de berekende herkomstkans binnen het potentiële brongebied (Figuur 11, het volledige brongebied is beperkt zichtbaar vanwege overlappende leidingsecties, maar heeft de maximale waarde voor de herkomstkans). Helaas maakt de uniforme geografische verdeling van de herkomstkans een verdere onderverdeling in **regio's van hoge** en lage waarschijnlijkheid onmogelijk.

Brongebieden zijn met grotere precisie te lokaliseren als het starttijdstip van de verontreiniging bekend is (denk bv. aan een calamiteit n.a.v. tijdelijke stroomuitval). In dat geval wijzen de oorsprongstijden de bronlocatie aan (met inachtneming van de beperkingen **m.b.t. menging via verschillende paden en het "missen" van verontreinigingsfronten**, zie opmerkingen Hoofdstuk 2). Voor de 6 **"positieve"** sensoren zijn de oorsprongstijden (corresponderend met de eerst-gemeten detectie boven de detectielimiet) binnen het potentiële brongebied ruwweg intern consistent (Figuur 12). De oorsprongstijden nemen geleidelijk af (worden vroeger) in oostelijke richting. Opvallend is dat binnen het brongebied oorsprongstijden zijn berekend tussen 0.00 en -6.00 uur: dus vóór het starttijdstip van de verontreiniging (6:30 uur). Deze te vroege oorsprongstijd kan duiden op het bijmengen van water via een route met langere reistijd of een niet geheel accurate bronbepaling vanwege complexe hydraulica.

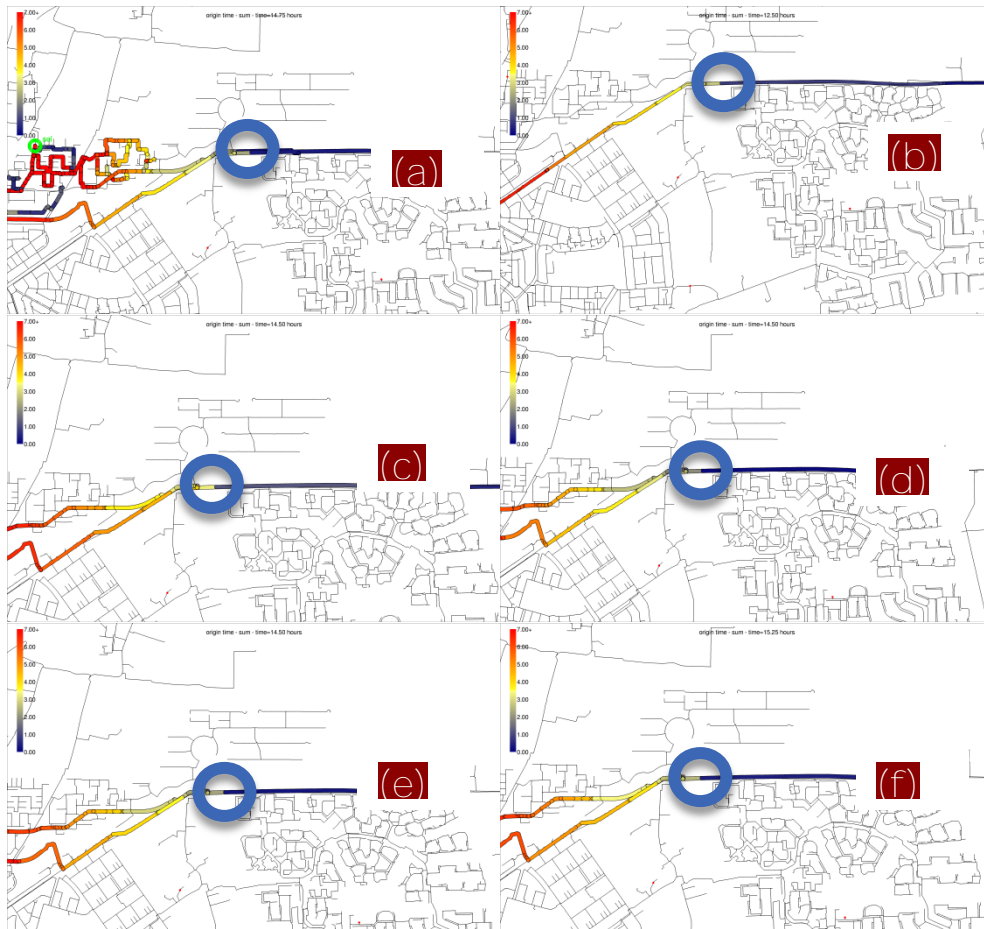
De backtracing resultaten voor scenario's 2CL, 2PH en 2PL (Tabel 1 en Figuur 10) zijn vergelijkbaar met die voor scenario 2CH (en daarom niet getoond). Deze overeenkomsten in resultaten **zijn te verwachten omdat in elk van de 4 scenario's dezelfde** sensoren de verontreiniging detecteren (Bijlage I, Figuur 25-Figuur 28).



Figuur 10. Potentieel brongebied (rood) berekend voor scenario 2CH (detectielimiet 5 mg/l). Groene cirkels geven sensoren met positieve detectie weer. Resultaten voor scenario's 2CL, 2PH en 3PL zijn identiek aan die voor 2CH. De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.



Figuur 11. Fracties van waterherkomst, gesommeerd over een modeltijd van 24 uur en over sensoren met positieve meting voor scenario 2CH (detectielimiet 5 mg/l). De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.



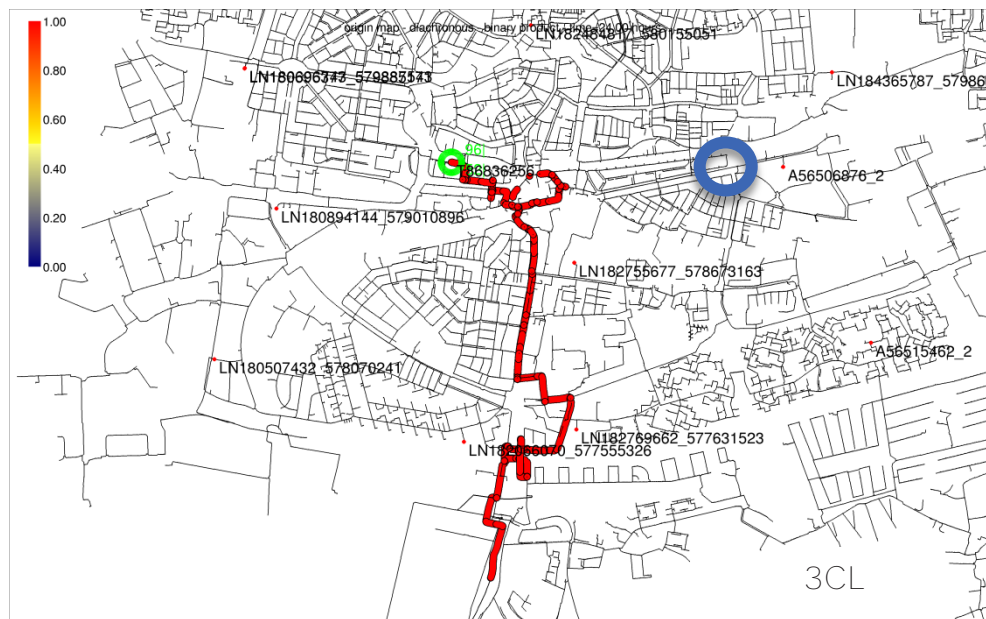
Figuur 12. Oorsprongstijden voor verontreinigingsscenario 2CH voor 6 sensoren met positieve detectie. (a) LN183168415_581227849, (b) LN182484817_580155051, (c) LN181936169_580746126, (d) LN18069377_579885171, (e) LN1806969743_579887543 en (f) A56484288_1. Er is ingezoomd op het potentiële brongebied zoals weergegeven in Figuur 10. Blauwe cirkels geven de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.

5.4 Vergelijking met origineel gedefinieerde verontreinigingslocatie 2

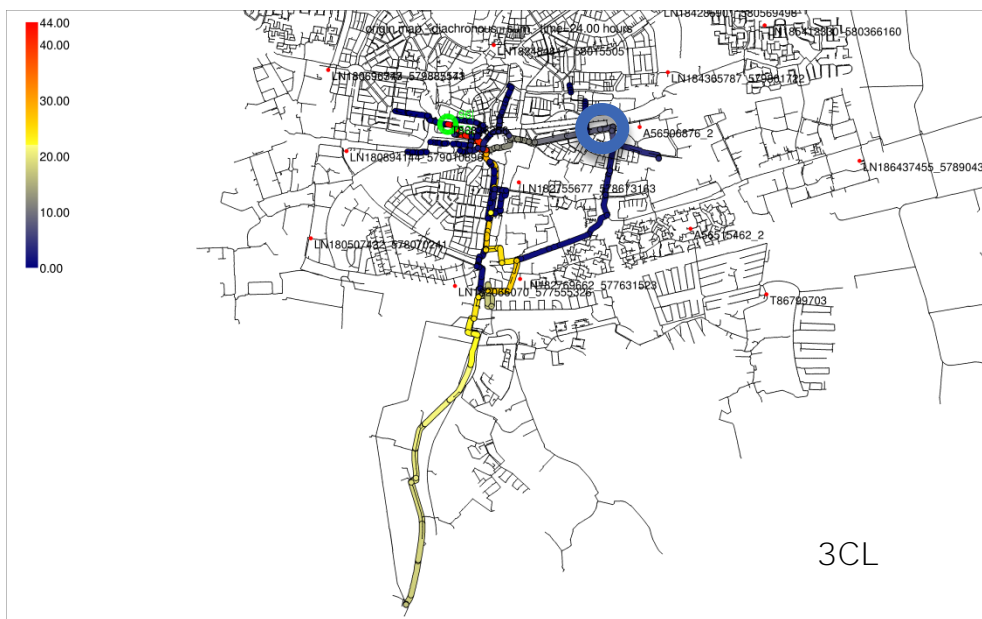
Verontreinigingslocatie 2 is succesvol gelokaliseerd voor alle 4 de scenario's (Tabel 1): het berekende potentiële brongebied omvat de origineel gedefinieerde bron (Figuur 17) en beslaat slechts een enkele transportleiding. Dit resultaat is bemoedigend omdat ook deze leiding omkeringen in stroomrichting bevat en de bron is bovendien is geplaatst net vóór (gezien vanaf de sensoren) een splitsing van waterleidingen. Deze zaken kunnen de backtracing bemoeilijken en vormen een mogelijke oorzaak voor het bereken van een te vroege oorsprongstijd (ca. 3:00 uur i.p.v. 6:30 uur).

5.5 Bronbepaling van verontreinigingslocatie 3

3CL: Voor locatie 3 is voor de continue besmetting alleen het scenario met lage (100 mg/l) concentratie beschikbaar (3CL). De verontreiniging wordt door slechts één sensor gemeten en het potentiële brongebied strekt zich met name in zuidelijke richting uit (Figuur 13). Voor het (niet-beschikbare) scenario 3CH met hoge (500 mg/l) concentratie is een betere bronbepaling te verwachten omdat voor sensorsignalen boven de detectielimiet komt, waar dat voor scenario 3CL niet het geval was (Appendix I, Figuur 30). Bovendien tonen de tijdreeksen dat sommige sensoren net na dag 1 (modeltijd 24 uur) detecteren en de modeltijd van 24 uur hier dus het backtracing resultaat negatief beïnvloedt. Figuur 14 toont dat de herkomstkans binnen het potentiële brongebied afneemt met de afstand tot de sensor met positieve detectie.

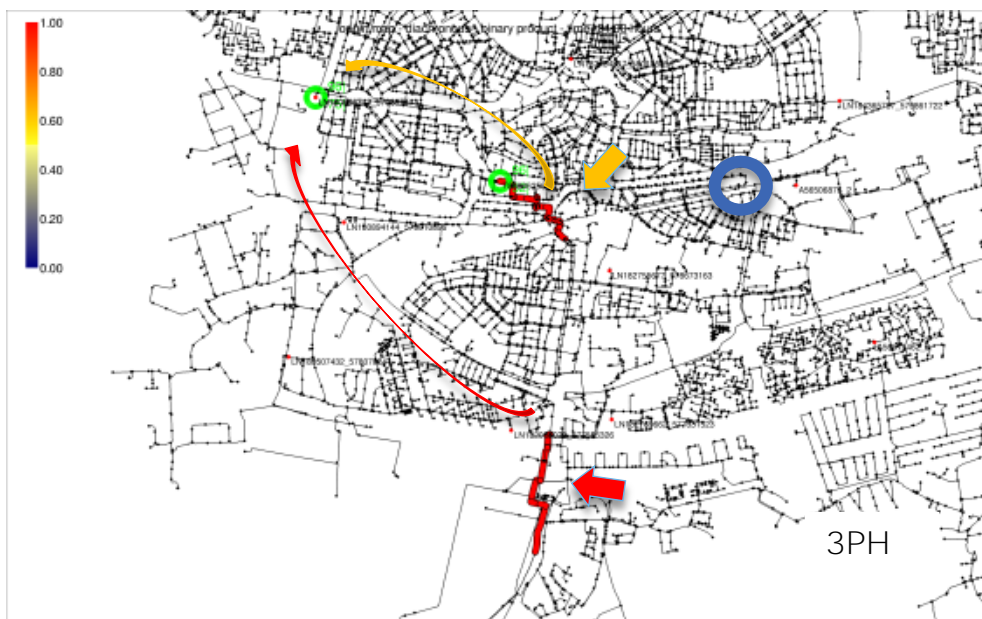


Figuur 13. Berekende potentiële brongebieden voor verontreinigingsscenario 3CL. De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.



Figuur 14. Herkomstkaart voor verontreinigingsscenario 3CH. De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.

3PH: Vanwege de hogere concentraties dan in scenario 3CL, wordt de verontreiniging voor scenario 3PH door 2 sensoren gemeten en is het potentiële brongebied nauwkeuriger bepaald (Figuur 15). Het brongebied is opgedeeld in 2 gebieden (Figuur 15, rode gebieden aangegeven met rode en oranje pijl) en dit wordt veroorzaakt doordat de meest westelijke sensor vanuit het noordelijke en zuidelijke brongebied wordt bereikt via verschillende paden (aangegeven met resp. de oranje en rode pijl), maar in het gebied tussen de brongebieden niet de meest westelijke sensor kan bereiken. De herkomstkans (niet getoond) neemt opnieuw af in zuidelijke richting vergelijkbaar met scenario 3CL (Figuur 14), maar het zuidelijke gebied is niet uit te sluiten als mogelijke brongebied.



Figuur 15. Berekend potentieel brongebied voor verontreinigingsscenario 3PH. De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan. Rechte rode en oranje pijlen geven twee potentiële brongebieden weer, en gebogen pijlen met corresponderende kleuren de stromingspaden door het leidingnet waarmee de sensoren worden bereikt.

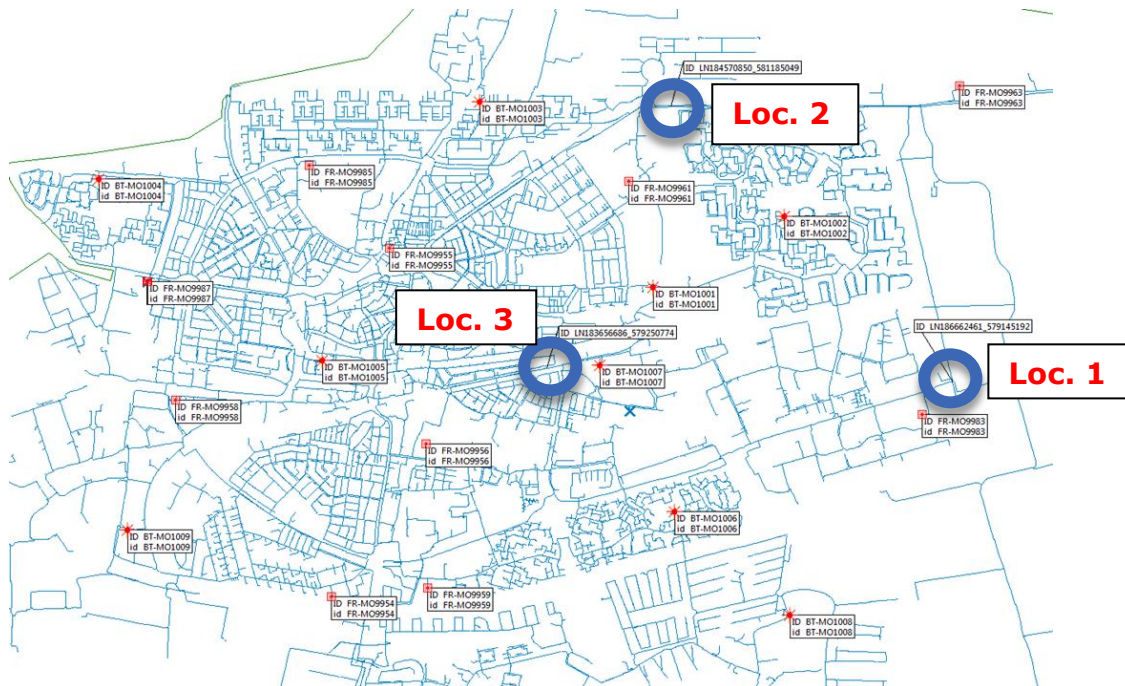
3PL: De verontreiniging in scenario 3PL wordt gemeten door dezelfde (enkele) sensor als in scenario 3CL. Als gevolg hiervan toont ook het berekende potentiële brongebied grote onderlinge overeenkomsten (Figuur 16), waarbij de verschillen worden veroorzaakt door verschillen in perioden van de positieve detectie.



Figuur 16. Potentieel brongebied (rood) berekend voor scenario 3PL (detectielimiet 5 mg/l). De groene cirkel toont sensoren met positieve detectie. Het gele kruis toont het reservoir Greunsweg dat lokaal een grote invloed heeft op de stromingspatronen in het leidingnet. De blauwe cirkel geeft de (vooraf onbekende) bronlocatie van de door Vitens gedefinieerde verontreiniging aan.

5.6 Vergelijking met origineel gedefinieerde verontreinigingslocatie 3

De origineel gedefinieerde bronlocatie 3 (Figuur 17) wordt in **geen van de scenario's correct** bepaald (Tabel 1). De precieze oorzaak voor deze discrepantie is op dit moment niet verklaard. Het reservoir Greunsweg dat zich in dit gebied bevindt (Figuur 16, geel kruis), heeft lokaal een grote invloed op de stroming door het leidingnet. Het verbruikspatroon van InfoWorks en EPANET van dit reservoir komen echter goed overeen en hetzelfde geldt voor de transportleiding tussen de verontreinigingsbron en de sensoren met positieve detectie. Daarmee is geen duidelijke oorzaak gevonden voor het misbepaalde brongebied, hoewel een hydraulische oorzaak niet is uit te sluiten.



Figuur 17. Origineel gedefinieerde bronlocaties voor 3 door Vitens gekozen verontreinigingen. De bronlocaties liggen in het midden van de gelabelde blauwe cirkels.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In dit onderzoek zijn brongebieden bepaald van virtuele waterkwaliteitsverontreinigingen in het Vitens Innovation Playground gebied met als doel om een door KWR ontwikkelde backtracing-methodiek (Van Thienen, 2013) te testen voor gebruik in de praktijk. Op basis van 11 blinde toetsen (bron vooraf onbekend) en 2 open experimenten (bron vooraf bekend) wordt het volgende geconcludeerd:

- De toegepaste backtracing-methodiek wordt bruikbaar geacht voor toepassing in de praktijk: vooraf onbekende verontreinigingsbronnen worden succesvol bepaald in 6 van de 11 geteste **scenario's en in beide open experimenten**, hoewel het brongebied soms uitgestrekt is.
- Voor een correcte bronbepaling is een nauwkeurig hydraulisch model van groot belang: Als gevolg van de conversie van het hydraulisch model worden zeer kleine afwijkingen in stroompatronen geïntroduceerd die vanwege de complexe hydraulica grote gevolgen kunnen hebben voor het berekende brongebied, waardoor sommige **brongebieden (scenario's 1PH, 1PL, en locatie 3)** en oorsprongstijden (scenario 2CH) incorrect bepaald worden.
- Om een brongebied tot een klein gebied in te perken is het noodzakelijk dat een verontreiniging door voldoende waterkwaliteitssensoren wordt gemeten. Dit benadrukt het belang van het plaatsen van voldoende **sensoren op "slimme" plaatsen** in het leidingnet.
- De toegevoegde waarde van het ontwikkelde backtracing-algoritme is opnieuw gedemonstreerd door een accurate bepaling van vooraf bekende bronnen (waarbij eventuele onnauwkeurigheden in stromingspatronen samenhangend met conversie van het hydraulisch model zijn uit te sluiten, omdat de verontreinigingsbronnen in het EPANET stromingsmodel zijn gedefinieerd).
- In principe zijn berekeningen van oorsprongstijden te gebruiken voor een zeer nauwkeurige bepaling van de bronlocatie van verontreinigingen waarvan de oorsprongstijd bekend is, of voor een nauwkeurige bepaling van oorsprongstijden van verontreinigingen met bekende bronlocatie.

6.2 Aanbevelingen

Met betrekking tot eventuele implementatie van de backtracing-methodiek in de praktijk wordt aanbevolen de volgende zaken te overwegen:

- Een succesvolle bronbepaling lijkt sterk afhankelijk van een accuraat stromingsmodel (wat weer afhangt van o.a. afsluiter- en verbruikspatronen). De invloed van onzekerheden in stromingspatronen zijn in dit rapport niet in detail onderzocht. Een betere bepaling van deze invloed wordt aanbevolen voor evt. vervolgonderzoek, bv. met een gevoeligheidsanalyse van onzekerheden van afsluiters en verbruikspatronen.
- Verontreinigingsbronnen worden preciezer ingeperkt als de verontreiniging door een groot aantal sensoren wordt gemeten. Daarom zijn betere resultaten te verwachten indien meer sensoren in het leidingnet worden geplaatst of de plaatsing van huidige sensoren wordt geoptimaliseerd. Voor een optimale sensorplaatsing (waarbij bv. de omvang van gereconstrueerde brongebieden wordt geminimaliseerd) zijn aanbevelingen te hanteren zoals beschreven in Van Thienen (2014).

- Mogelijkheden voor real-time implementatie van de backtracing-methodiek kunnen in een vervolgonderzoek nader onderzocht worden. Hierbij wordt implementatie in de bij Vitens bestaande hydraulische pakketten aanbevolen: Hiermee wordt een conversie vermeden waarmee rekentijd wordt uitgespaard en eventuele afrondingsfouten in de hydraulica die de bronbepaling negatief beïnvloeden worden vermeden. Desalniettemin zal een model van stromingspatronen i.h.a. afwijken van de werkelijke situatie. Daarnaast kan een stromingsmodel afwijken van de realiteit omdat een deel van de afsluiterstanden verkeerd is bepaald. Aanbevolen vervolgonderzoek om de invloed van onzekere verbruiken en afsluiterstanden op de bronbepaling beter te bepalen is daarom van belang en maakt het mogelijk deze invloeden af te zetten tegen die van de inrichting van het sensornetwerk.

7 Literatuur

Van Thienen, P. (2013) BTO 2013.030 Backtracing van verontreinigingen in het distributienet -Methoden en bronbepaling met stochastische watervraag.

Van Thienen, P. (2014) BTO 2014.XXX Strategieën voor optimale plaatskeuze van waterkwaliteitssensoren (in wording).

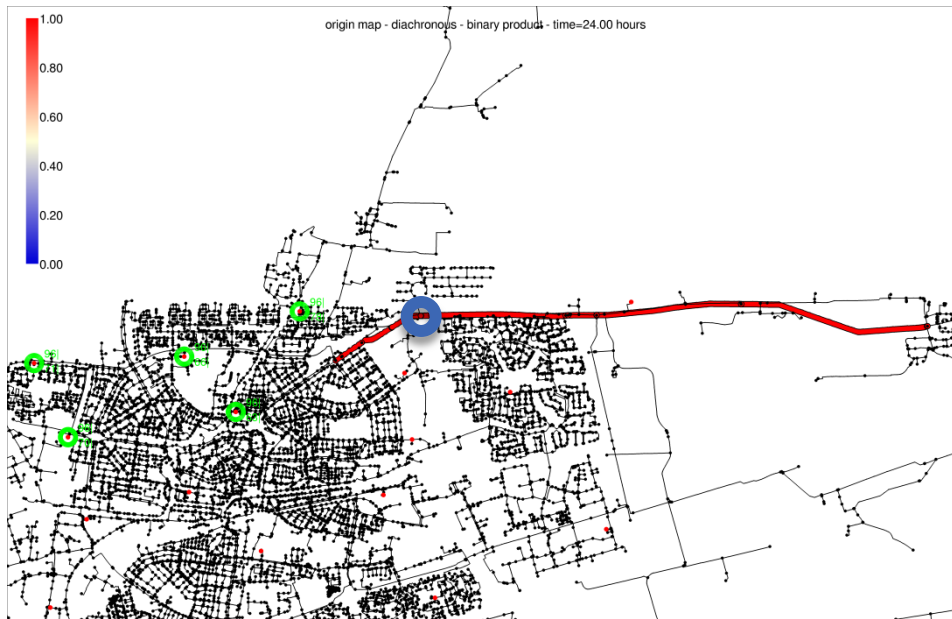
Van Wijlen, M. A. B., Klein Koerkamp, M., Xie, R. J., Puah, A. N., Van Delft, W., Bajema, B., Verhoef, J. W. Innovative sensor technology for effective online water quality monitoring. (IWA full paper)

Tangema, B. H., Janssen, P. J. C. M., Tiesjema, G., Van den Brandhof, E. J., Klein Koerkamp, M., Verhoef, J. W., Fillippi, A., Van Delft, W. (2011). A novel approach for early warning of drinking water contamination events. Proceedings of the Water Contamination Emergencies Conference (11/13/2010, Mullheim, Germany).

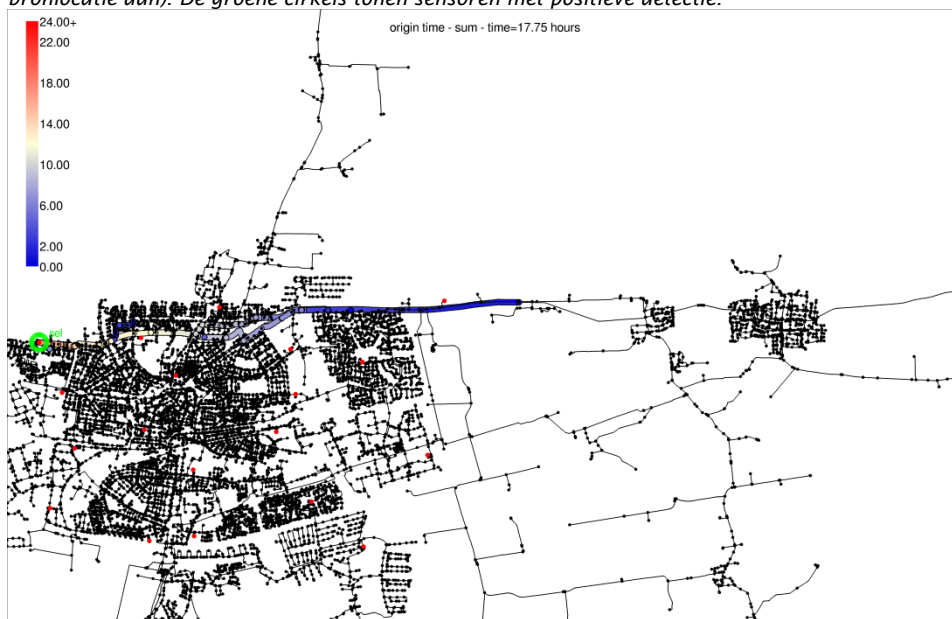
Bijlage I Validatie van het backtracing-algoritme met behulp van een bekende bron

Hier testen we het backtracing-algoritme a.d.h.v. twee open experimenten waarin de **bronnlocaties vooraf bekend zijn. Een belangrijk verschil met de “blinde” experimenten** (bronnlocaties vooraf onbekend, zie Hfd. 5) is dat verontreinigingen worden gedefinieerd in het EPANET hydraulisch model, waarop ook de backtracing is gebaseerd. Hiermee worden eventuele afwijkingen die samenhangen met onzekerheden in hydraulica in principe uitgesloten en daarmee vormen de experimenten een schone test voor het presteren van het backtracing-algoritme. Verontreinigingen zijn gedefinieerd voor een periode van 6.30-24.00 uur en we voeren de bronbepaling uit met voor een modeltijd van 0:00-24:00 uur, naar **analogie van de scenario's met** een continue verontreiniging (Tabel 1).

Bronlocatie 1 (*Figuur 18*, blauwe cirkel) wordt door 6 sensoren gedetecteerd (*Figuur 18*, groene cirkels). Het berekende potentiële brongebied (*Figuur 18*, rode leidingsecties) bestaat uit een onvertakt deel van de transportleiding en omvat de verontreinigingsbron waarmee de bronbepaling succesvol is uitgevoerd. Voor de 6 sensoren zijn de oorsprongstijden berekend op het tijdstip van eerste positieve meting (variërend van 15:45 tot 19:30 uur). De eerste positieve meting zal in veel gevallen de beste schatting zal geven voor het starttijdstip van een verontreiniging, hoewel menging en complexe stromingspatronen deze directe relatie kunnen verstoren. De oorsprongstijd voor de bronlocatie (*Figuur 19*) wordt correct bepaald op 6:30 uur (*Tabel 1*). Hoewel het resultaat slechts voor 1 sensor is weergegeven, tonen de oorsprongstijden een onderling consistent patroon (kleine verschillen tussen berekeningen voor verschillende sensoren). Dit demonstreert dat de oorsprongstijd nuttig kan zijn voor het bepalen van een onbekende timing van een bekende bronlocatie en, vice versa, een onbekende bronlocatie is te bepalen indien de timing bekend is. Deze toegevoegde waarde van de oorsprongstijd ontbreekt echter indien zowel de locatie als het tijdstip van een verontreiniging onbekend zijn.



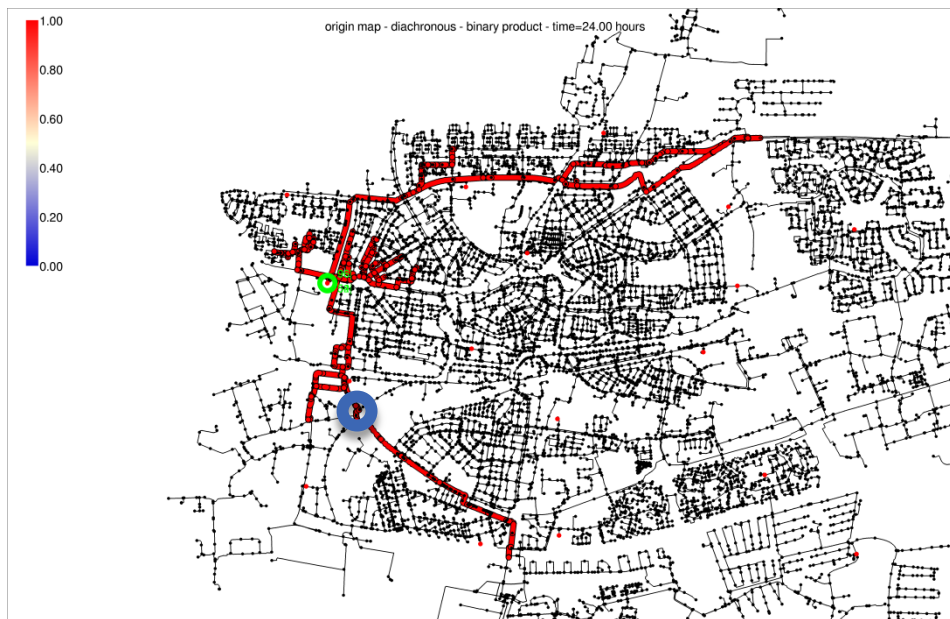
Figuur 18. Berekend potentieel brongebied (rood-gekleurd gebied) voor een waterkwaliteitsverontreiniging op de blauwomcirkelde locatie. De blauwe cirkel geeft de (vooraf bekende) bronlocatie aan). De groene cirkels tonen sensoren met positieve detectie.



Figuur 19. Oorsprongstijden voor de groen omcirkelde sensor op een tijdstip overeenkomstig met eerste positieve detectie. De oorsprongstijd op de bronlocatie (Figuur 18) komt overeen met het starttijdstip van de verontreiniging (6:30 uur).

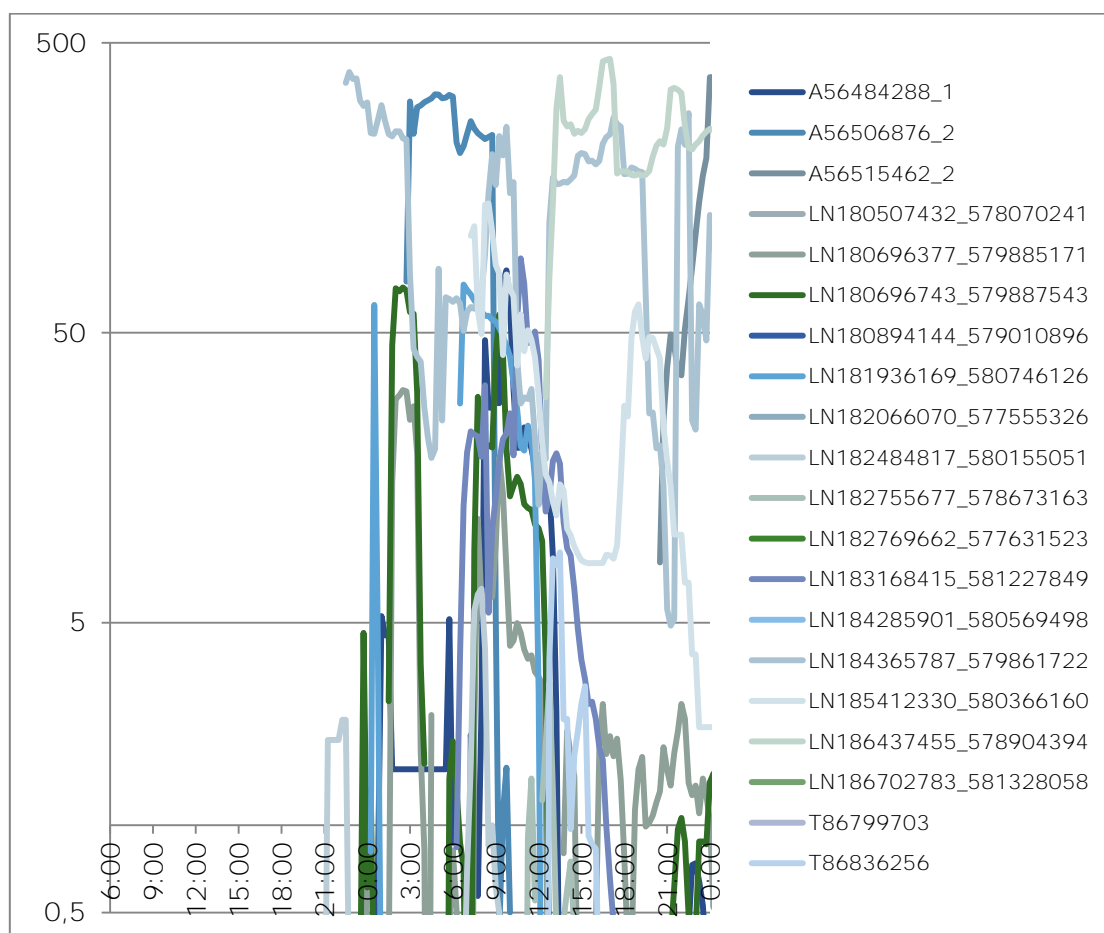
Voor een tweede bronlocatie (Figuur 20, blauwe cirkel) wordt de verontreiniging gemeten door slechts 2 sensoren die ook nog dicht bij elkaar liggen (Figuur 20, groene cirkels). Hoewel accuraat, is het brongebied niet met grote precisie bepaald (Figuur 20, rood gebied).

Dit benadrukt het belang van een voldoende redundante sensor-dekkingsgraad van het leidingnet, middels het plaatsen van een voldoende groot aantal sensoren op slimme locaties in het net. Tevens kan met het toevoegen van sensoren de detectietijd worden verkort (Van Thienen, 2014).

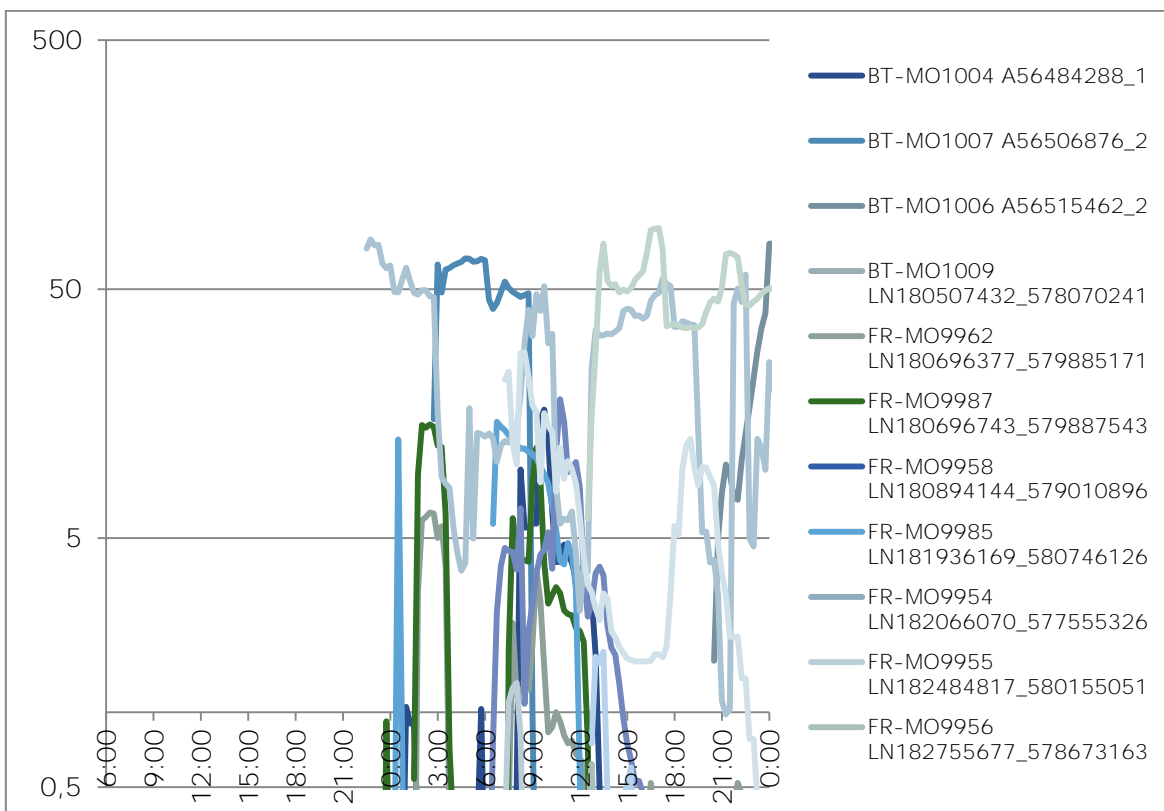


Figuur 20. Open experiment 2. Blauwe cirkel geeft de (vooraf bekende) bronlocatie aan. Groene cirkels tonen 2 vrijwel overlappende sensoren met positieve detectie. Het rode gebied toont het berekende potentiële brongebied.

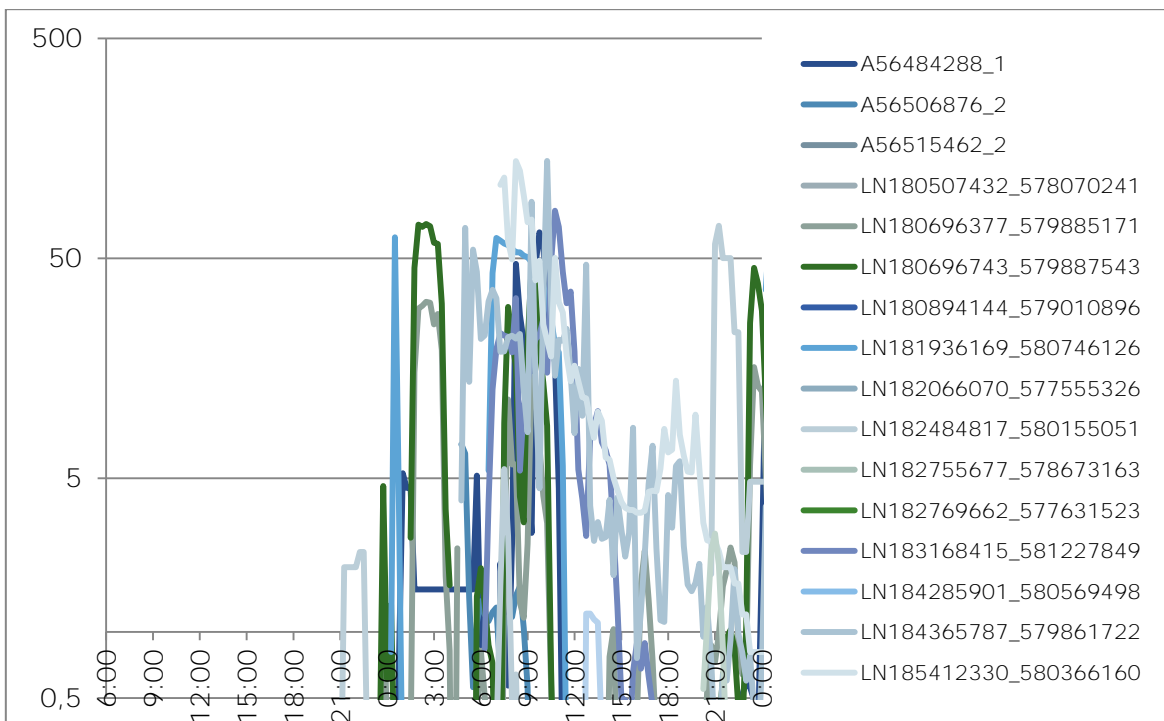
Bijlage II Virtuele sensorgegevens voor 11 verontreinigingsscenario's



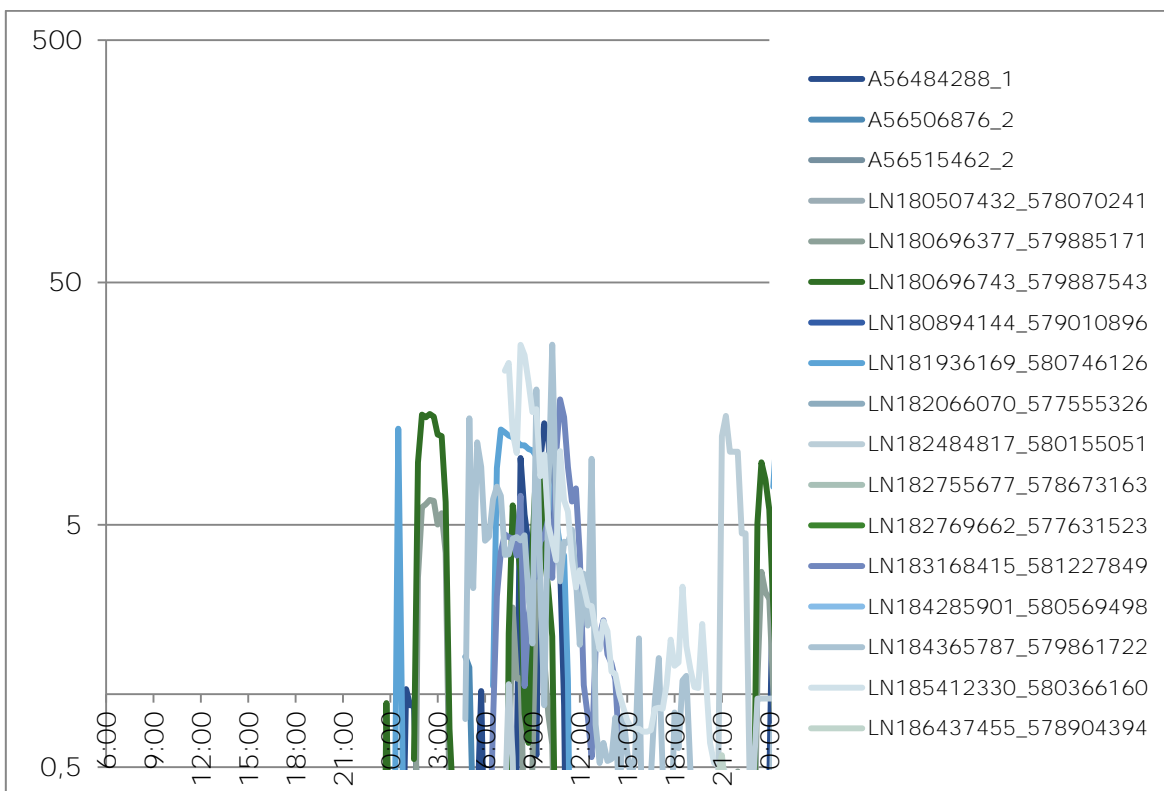
Figuur 21. Gedetecteerde concentraties voor verontreinigingsscenario 1CH. Horizontale as toont tijd in uren; verticale as toont de gemeten concentratie in mg/l. Specificaties van het scenario staan in Tabel 1. In de bronbepaling is een modeltijd van 24 uur gebruikt (linkerhelft van het figuur. De getoonde concentraties beslaan de eerste 48 uur. Detectielimiet van de sensoren is 5 mg/l.



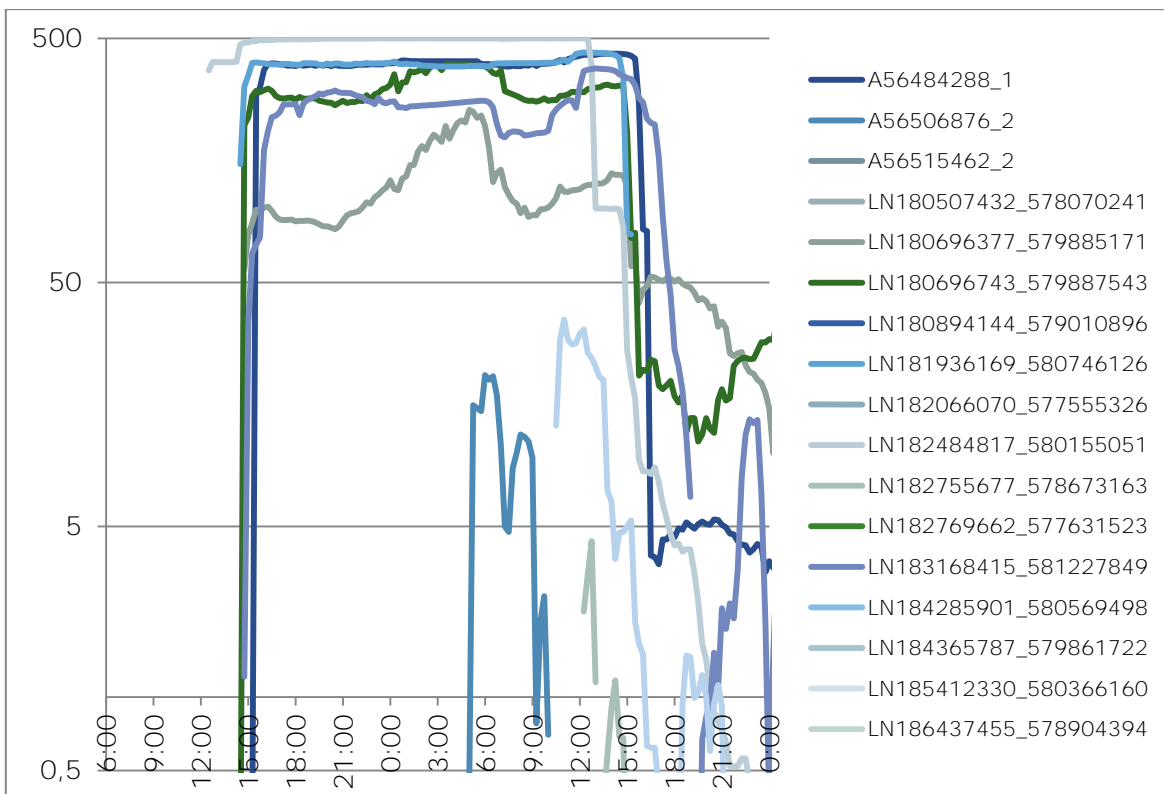
Figuur 22. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 1CL.



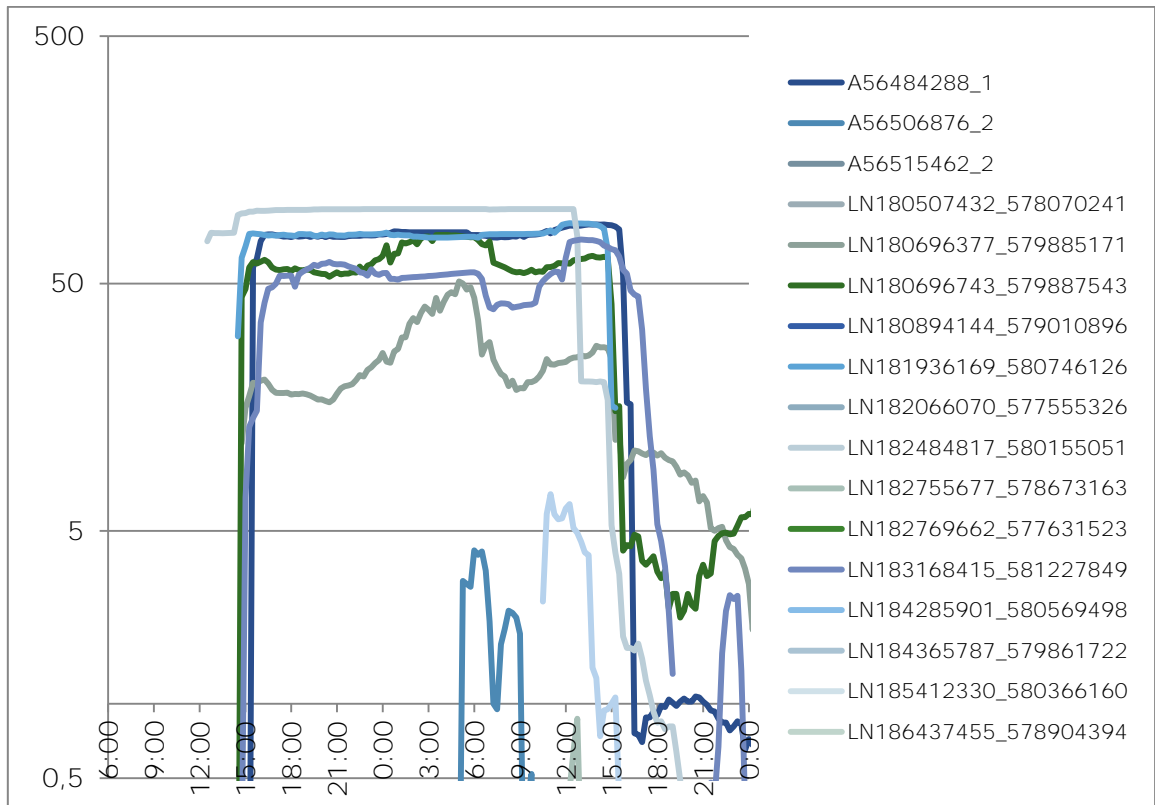
Figuur 23 Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 1PH.



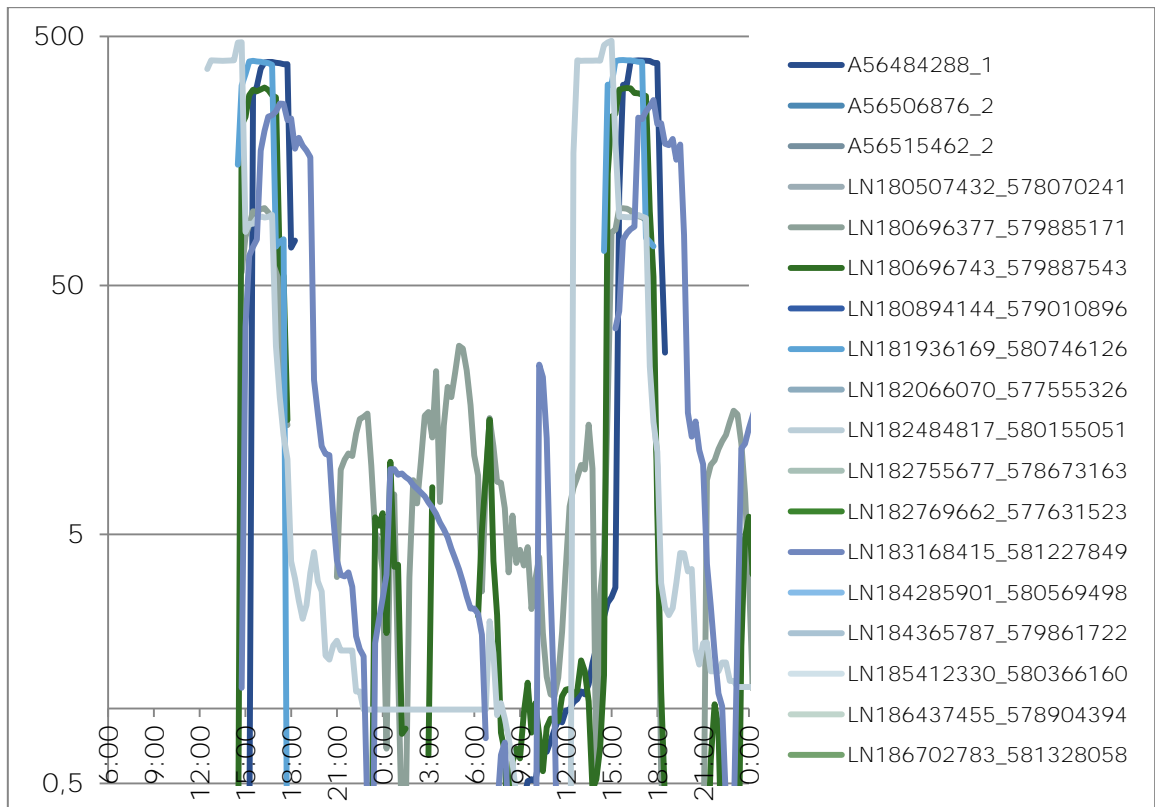
Figuur 24. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 1PL..



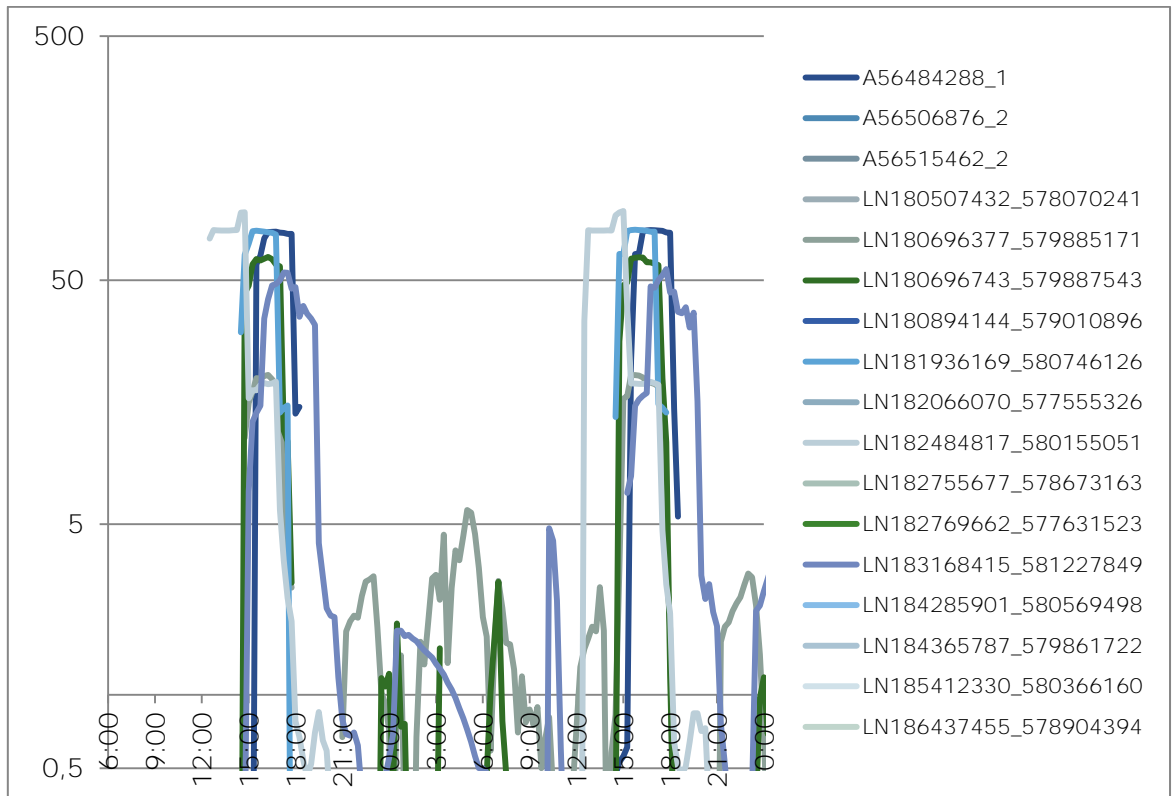
Figuur 25. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 2CH.



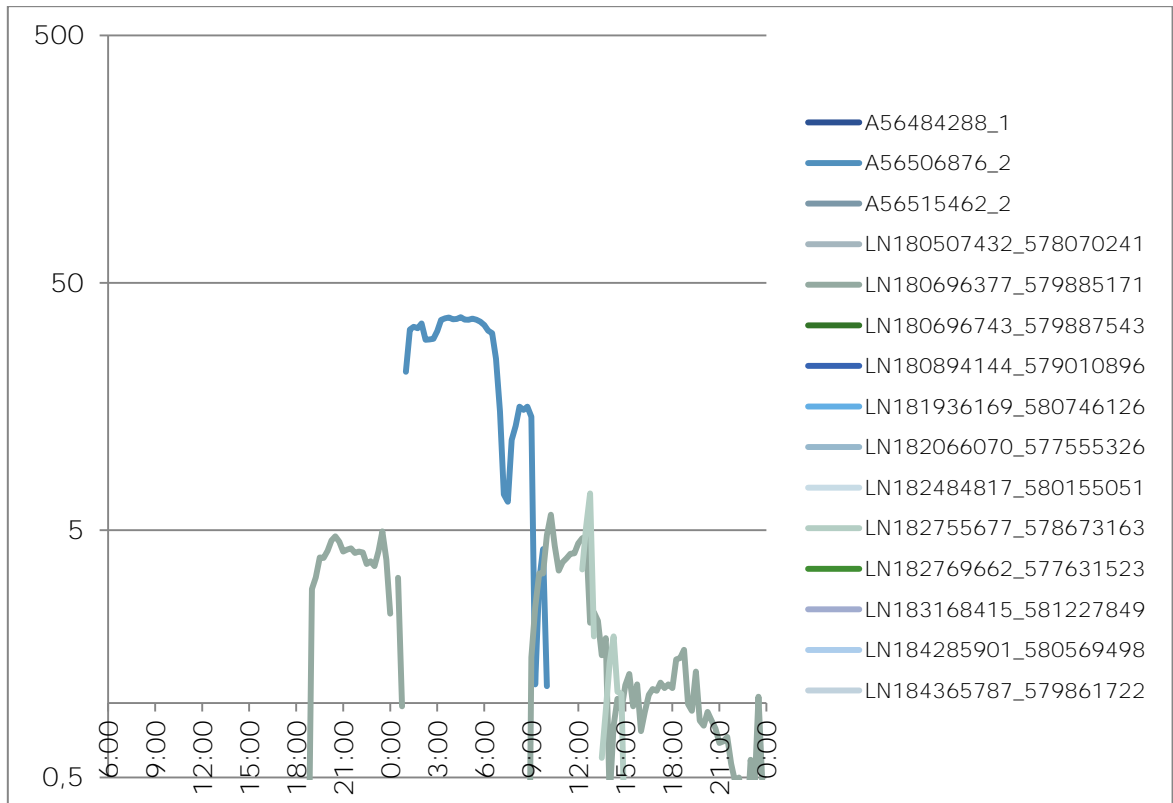
Figuur 26. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 2CL.



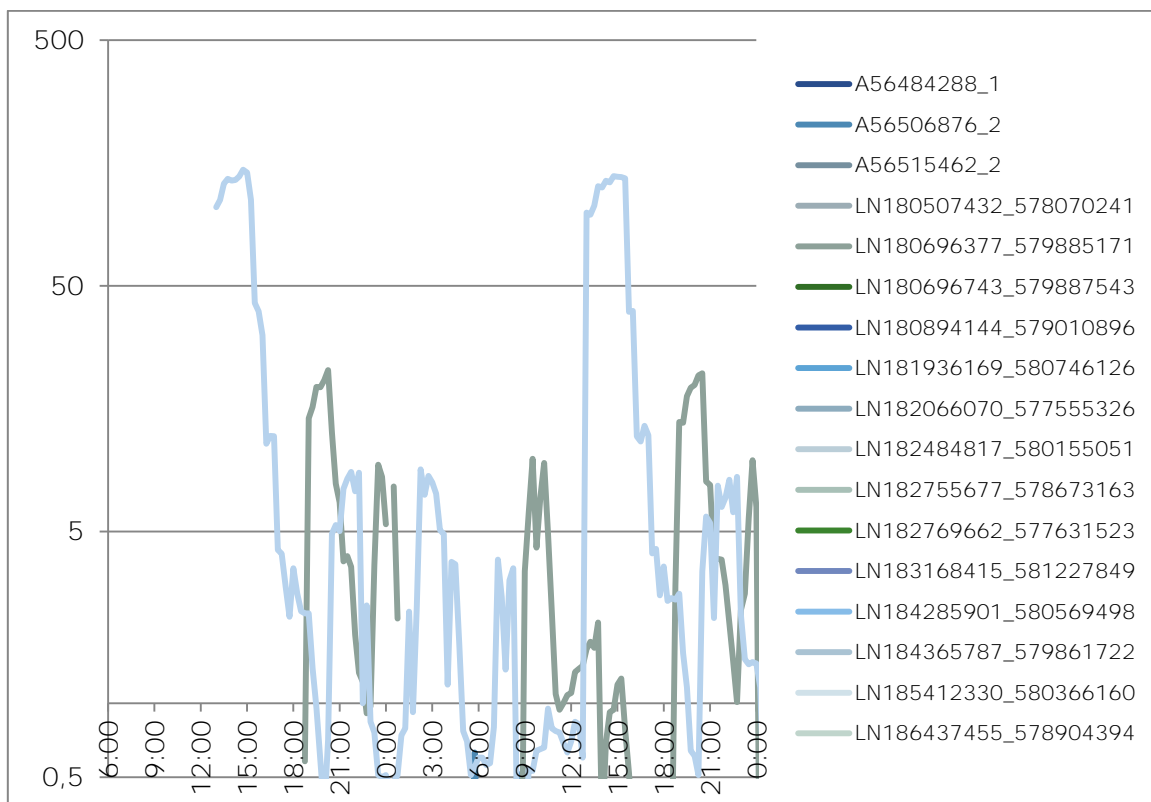
Figuur 27. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 2PH.



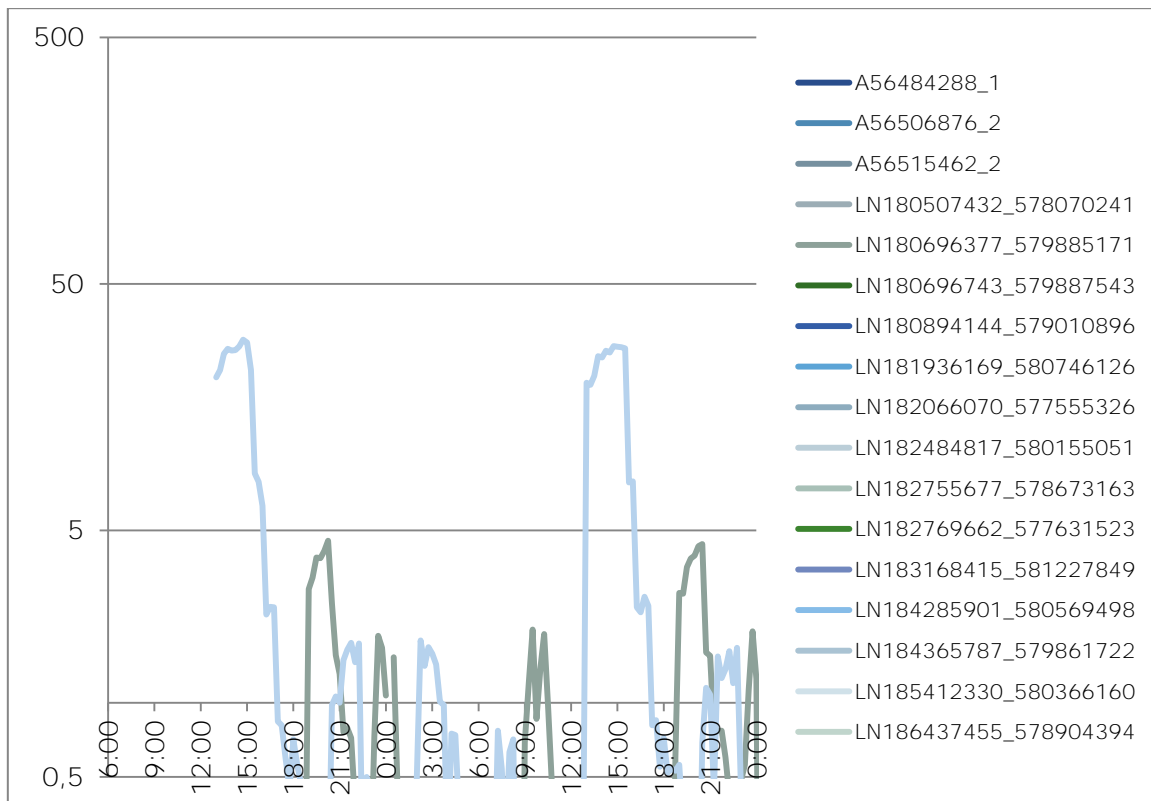
Figuur 28. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 2PL.



Figuur 29. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 3CL.



Figuur 30. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 3PH.



Figuur 31. Gelijk aan Figuur 21, maar voor scenario 3PL.