



KWR 2019.115 | December 2019

**Druksensoren in de
watermeter om lekken
en dichte afsluiters te
vinden**

Druksensoren in de watermeter om lekken en dichte afsluiters te vinden

KWR 2019.115 | December 2019

Opdrachtnummer

402635/006

Projectmanager

ir. A. (Andreas) Moerman

Opdrachtgever

DPWE

Auteurs

dr.ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker

ing. G.A.M. (George) Mesman

B. (Bram) Hillebrand MSc

Kwaliteitsborger

dr. P. (Peter) van Thienen

Verzonden naar

DPWE Stuurgroep

Dit rapport is een jaar na publicatie openbaar.

Keywords

Watermeter, Druk, lekdetectie, afsluiters

Jaar van publicatie
2019

Meer informatie

dr. ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker
T 030 6069 533
E mirjam.blokker@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



December 2019 ©

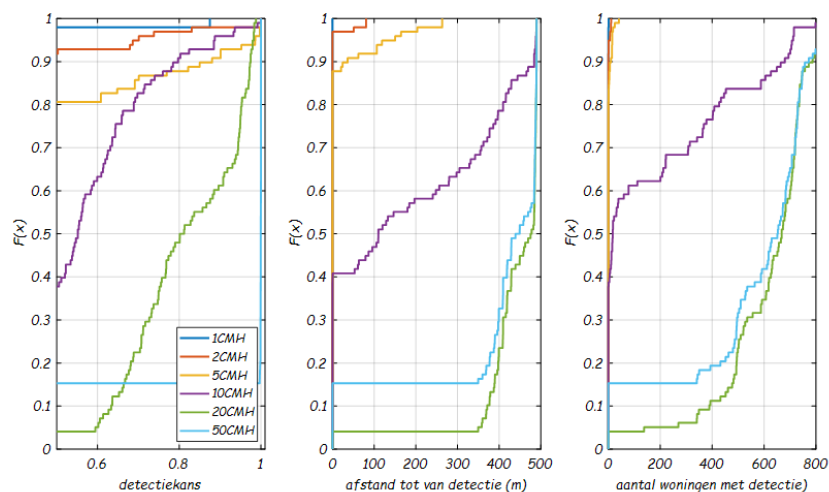
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder

Managementsamenvatting

Watermeters worden nauwelijks intelligenter met druksensoren

Auteurs: dr.ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker, ing. G.A.M. (George) Mesman en B. (Bram) Hillebrand MSc

Digitale watermeters worden ook wel “intelligente watermeters” genoemd, zonder dat direct duidelijk is wat ze dan intelligent maakt. Een manier om intelligentie toe te voegen zou kunnen zijn dat watermeters met extra sensoren en data-analyse in staat zijn om lekken in het leidingnet te detecteren. In dit project is onderzocht of druksensoren op de watermeter kunnen helpen om lekken en foutieve afsluiterstanden te detecteren en te lokaliseren. Dit is gedaan met een modelaanpak waarin rekening is gehouden met een realistische variatie in drukken en onnauwkeurigheid in drukmetingen. De resultaten laten zien dat het (vrijwel) niet mogelijk is om gegarandeerd op deze manier kleine lekken ($< 5 \text{ m}^3/\text{u}$) of foutieve afsluiterstanden te vinden met een groot aantal druksensoren die één maal per dag de druk registreren.



Cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling van de gemiddelde detectiekans voor 98 gesimuleerde lekken (links), de maximale afstand waarop het lek nog te detecteren is (midden) en aantal woningen waarop detectie mogelijk is (rechts). Alleen detectie > 50% is getoond, kleuren geven de grootte van het lek aan.

Belang: gebruik de digitale watermeter om lekken in het leidingnet te detecteren

Afwijkingen in het leidingnet zoals (kleine) lekken of afsluiters die dicht staan terwijl ze open zouden moeten staan, zijn in de praktijk niet eenvoudig te vinden. De huidige praktijk is dat er niet veel gemeten wordt in het leidingnet en dat de klant als detectiemiddel wordt gebruikt om te melden als de druk te laag is, of als er water op straat ligt. Waterbedrijven zouden graag voordat de klant een melding maakt weten dat er iets aan de hand is. Het is mogelijk dat sensoren in het leidingnet daarbij kunnen helpen. Een praktijkproef bij Oasen heeft laten zien dat druksensoren in een leidingnet een bepaalde volumestroom uit een brandkraan (gesimuleerd lek) konden helpen te detecteren. Er zijn verschillende sensorstrategieën

denkbaar, waarbij een keuze kan worden gemaakt in het aantal sensoren, de nauwkeurigheid van een sensor (samenhangend met de aanschafprijs), hoe vaak een sensor wordt uitgelezen en de data wordt verzonden (samenhangend met communicatiekosten). Er kan bijvoorbeeld worden gekozen voor een groot aantal goedkope sensoren bij iedere klant. Dat laatste zou kunnen door iedere watermeter te voorzien van een extra sensor, specifiek van een druksensor. De waterbedrijven proberen de toegevoegde waarde van digitale watermeters in kaart te brengen. Een digitale watermeter met extra sensoren heeft mogelijk nog extra meerwaarde. De belangrijkste onderzoeksvraag is wat de toegevoegde waarde is van druksensoren op de watermeter: welke afwijkingen kunnen worden gevonden in het net?

Aanpak: leidingnetmodel met realistische variatie en onzekerheid als virtueel lab

In het project is gewerkt met “metingen in een virtueel netwerk” waarbij zo realistisch mogelijke simulaties worden uitgevoerd: 1) ieder huishouden in het netwerk heeft een uniek verbruikspatroon, en iedere dag is dat patroon ook anders (SIMDEUM wordt hiervoor ingezet); 2) de tijdstap waarmee gerekend wordt is heel kort, namelijk 10 seconden, dus er worden minder vereenvoudigingen door afrondingen en middelingen geïntroduceerd; 3) er wordt vanuit gegaan dat de druksensoren een bepaalde nauwkeurigheid hebben (specifiek de juistheid en de precisie, ofwel de herhaalbaarheid) en dat de drukmetingen slechts eens per dag worden gedaan. Vervolgens kunnen in dit virtuele netwerk afwijkingen worden geïntroduceerd zoals lekken (op alle mogelijke plekken en van allerlei afmetingen) en afwijkende afsluiterstanden.

Er is al veel ervaring met druksensoren in het leidingnet. Een proof of concept om grote lekken te vinden is geleverd. Een literatuurstudie is gedaan naar de mogelijke toegevoegde waarde van andere sensoren. Ook is ervaring opgehaald in het buitenland.

Resultaten: lekken groter dan 5 m³/u zijn te vinden, gesloten afsluiters niet

Met één (of enkele) meting(en) per dag (tijdens het piek uur) en een precisie van 0,05 mwk, en een variatie van 14 dagen aan verbruikspatronen geldt voor lekdetectie het volgende. Grote lekken van 20 en 50 m³/u kunnen worden gedetecteerd met een relatief lage dichtheid van druksensoren. Lekken van 5 en 10 m³/u kunnen in 20-60% van de gevallen worden gedetecteerd, en daarvoor is een fijnmazig netwerk van druksensoren nodig; hier heeft de watermeter met druksensor een meerwaarde als deze in een groot aantal woningen geïnstalleerd wordt (iedere 50 m). Lekken van 1 en 2 m³/u zijn te klein om gedetecteerd te kunnen worden met alleen drukmetingen. Een centrale data-analyse is nodig om lekken te detecteren, en zeker om lekken te lokaliseren.

Met één meting per dag (piek uur), en een juistheid van 0,5 mwk zonder variatie van verbruik (d.w.z. een perfect referentiemodel met open afsluiters) geldt voor de detectie van gesloten afsluiters het volgende.

Detectie van gesloten afsluiters onder normale operationele omstandigheden waarbij er geen sectie-afsluiting plaatsvindt is niet mogelijk. Detectie van gesloten afsluiters ten tijde van een groot lek is wellicht mogelijk, maar kon in de geselecteerde case studie niet worden getoetst. Detectie van gesloten afsluiters tijdens een sectie-isolatie t.b.v. reparatie is getoetst met een set van 10 gesloten afsluiters in combinatie met 30 verschillende sectie-isolaties. In slechts één van de 30 simulaties bleek een aanwijzing voor afwijkingen van het model, mogelijk gesloten afsluiters. Een generieke conclusie kan hier niet worden getrokken.

Toepassing: vestig niet de hoop op druksensoren in de watermeter; onderzoeksmethode biedt kansen

In Nederland is het vinden van grote lekken (> 5 m³/u) meestal geen probleem, doordat deze tot water op straat leiden. Kleine of sluipende lekken zijn met drukmetingen met een hoge meetdichtheid en een lage meetfrequentie nauwelijks te vinden. Andere meetmethodes zullen uitkomst moeten bieden.

De gebruikte methode met “metingen in een virtueel netwerk” is zeer geschikt om ook de waarde van andere sensoren in te schatten zonder dat veel dure metingen nodig zijn. Er is een meerwaarde om hoopgevende resultaten vervolgens in de praktijk te toetsen met metingen.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Druksensoren in de watermeter om lekken en dichte afsluiters te vinden* (KWR 2019.115). De begeleidingsgroep bij dit onderzoek bestond uit Rob Geers (Dunea), Edwin van den Brink (PWN), Ralf de Groot (Waternet) en Bas Dilven (Evides).

Inhoud

Managementsamenvatting **3**

Inhoud5

1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel	8
1.3	Projectgroep	8
1.4	Aanpak en leeswijzer	8
2	Literatuuronderzoek	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Literatuur over lekdetectie	10
2.2.1	Overzicht	10
2.2.2	Modelgebaseerde lekdetectie	11
2.2.3	Differential Evolution Algorithm	11
2.3	Literatuur over watermeters en waterkwaliteit	12
2.4	Informatie via persoonlijke contacten	12
3	Potentie voor lekdetectie	14
3.1	Aanpak	14
3.1.1	Casestudie	14
3.1.2	Referentiescenario	15
3.1.3	Lekscenario's	16
3.1.4	Sensorstrategie	16
3.2	Eerste resultaten en definitie van de methode	17
3.2.1	Referentieprofiel	17
3.2.2	Sensorstrategie: hoe vaak per dag meten en wanneer?	20
3.2.3	Sensorstrategie: op hoe veel plekken meten?	22
3.2.4	Kader voor de beoordeling van sensorstrategieën	24
3.3	Resultaten simulaties	24
4	Potentie voor detectie van gesloten afsluiters	26
4.1	Aanpak	26
4.1.1	Casestudie	26
4.1.2	Referentiescenario	26
4.1.3	Scenario's met gesloten afsluiters.	26
4.1.4	Sensorstrategie	27
4.2	Eerste resultaten en definitie van de methode	27
4.2.1	Dag met normale drinkwatervraag	27
4.2.2	Dag met een groot lek	29
4.2.3	Dag met normale drinkwatervraag en sectie-isolatie	29
4.2.4	Kader voor de beoordeling van sensorstrategieën	31
4.3	Resultaten simulaties	31

5	Discussie	33
5.1	Praktische aspecten van drukmetingen in huishoudens	33
5.2	Toepasbaarheid van drukmetingen voor leklocalisatie in een DMA-aanpak	34
5.3	Business case	34
5.4	Optimalisatie	35
5.5	Ervaring met IWM in het buitenland	35
6	Conclusies en aanbevelingen	36
6.1	Conclusies	36
6.2	Aanbevelingen	37
7	Referenties	38
I	Informatie via persoonlijke contacten	39

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De DPWE-bedrijven zijn zich net als de overige Nederlandse drinkwaterbedrijven aan het oriënteren op digitale watermeters bij zakelijke en huishoudelijke klanten door op individuele basis businesscases op te stellen en kleine pilots uit te voeren. Uit een inventarisatie op een bijeenkomst bij Evides d.d. 29 oktober 2019 blijkt dat de verwachting is dat in 2025 15% (Dunea) tot 100% (PWN) van de zakelijke klanten een digitale watermeter heeft, en vrijwel geen (Dunea, PWN) tot 30% (Waternet) van de huishoudelijke klanten. Daarbij kijken alle waterbedrijven naar “aanvullende hardware in combinatie met slimme watermeters (bijvoorbeeld op afstand bedienbare afsluiters zoals van fabrikant 3S bij Oasen, op afstand bedienbare hoofdkranen van Kamstrup bij Water-link in Antwerpen, of drukopnemers)”.

In 2017 is binnen het DPWE-onderzoek (Blokker en Albert 2017) een tabel opgesteld met mogelijke voordelen van extra functionaliteit in watermeters (zoals op afstand uitleesbaar, verhoogde logfrequentie, tweewegcommunicatie, toevoegen van druk- en waterkwaliteitssensoren, etc.). Deze tabel geeft een kwalitatief beeld van de voordelen die deze extra functionaliteit in potentie kan bieden aan het waterbedrijf (zowel voor klantcontactcentrum als voor infra), de klant, de maatschappij en onderzoek aan drinkwaterleidingnetten. Daarmee kan de watermeter onderdeel gaan uitmaken van een intelligent netwerk.

In dit vervolgproject is kwantitatief onderzocht in hoeverre “intelligente” watermeters (IWM) bij kunnen dragen aan het assetmanagement van het leidingnet en detectie van lekverliezen bij de klant (in de hierboven genoemde tabel benoemd als “bedrijfsvoering” en “klant”). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van modellen en/of metingen van reeds geïnstalleerde IWM’s; dit leidt tot bruikbare aanbevelingen voor pilots met IWM’s bij Waternet en mogelijk Evides. Er lijkt een grote potentie te liggen in het toevoegen van laagfrequentie druksensoren op een deel van de watermeters om lekken (in huis, en bovenstrooms van een woning) te ontdekken en tevens de locatie van lekken te kunnen bepalen.

Bij Waternet was een voorval met een leidingbreuk waardoor in theorie maar een klein deel van het voorzieningsgebied een lage druk zou ervaren, terwijl in de praktijk (door afsluiters die per ongeluk dicht stonden) een groot aantal mensen in de wijk de Pijp drukproblemen ervoeren. Een extra vraag in dit project is of druksensoren in de watermeter soelaas kunnen bieden bij het bepalen van de grootte van het gebied met “OLM-te lage druk” en het vinden van dichte afsluiters, die volgens het waterbedrijf en het door het waterbedrijf gehanteerde model open zouden moeten staan.

Door de combinatie van verschillende modellen (nauwkeurige verbruiksmodellering, drukafhankelijke hydraulische modellering, optimaliseroutines) kan een optimale sensorstrategie voor IWM’s bepaald worden voor lekdetectie: hoeveel sensoren zijn er nodig, waar, hoe vaak moeten ze meten, hoe nauwkeurig moeten ze meten, etc.

Intelligente watermeters worden ook slimme watermeters genoemd. Ook wordt gesproken over op afstand afleesbare watermeters (AMR, *automatic meter reading*) of digitale watermeters. De definities zijn niet helder. In dit rapport wordt meestal de term IWM (intelligente watermeter) gehanteerd, of digitale watermeter, hier gedefinieerd als een (of meer) sensor(en) op de plek van de watermeter die op afstand afgelezen kan worden en extra functionaliteit heeft waarmee deze ook extra informatie kan toevoegen. Het meetprincipe van de sensor is niet beperkt tot volumestroommetingen, er kan ook druk worden gemeten, of een waterkwaliteitsparameters.

1.2 Doel

Kwantificeer de bijdrage van extra functionaliteit (in casu drukopnemers) op de watermeter voor de bedrijfsvoering van drinkwaterdistributie (gericht op detectie van lekken in het leidingnet).

Specifiek waren de beoogde opbrengsten in dit project:

- 1 Bepaling van de toegevoegde waarde van druksensoren bij de watermeter, d.w.z. bepaling welke lekken (hoe groot, waar) te detecteren zijn;
- 2 een strategie voor de uitvoering van druksensoren op basis van een casestudy, d.w.z. waar in het net, hoeveel zijn er nodig, wat is een goede meetfrequentie.

1.3 Projectgroep

De projectgroep bestond uit de volgende personen:

Dunea: Rob Geers

PWN: Edwin van den Brink

Waternet: Ralf de Groot

Evides: Bas Dilven

KWR: Mirjam Blokker (verantwoordelijk onderzoeker), George Mesman, Bram Hillebrand

1.4 Aanpak en leeswijzer

De eerder genoemde tabel die binnen het DPWE project in 2017 is opgesteld, diende als leidraad voor een beperkte literatuurstudie (hoofdstuk 2). Met name is ingezoomd op de potentie van druksensoren voor lekdetectie. Er zijn enkele studies geweest waarbij met behulp van druksensoren in een leidingnet en het simuleren van een lek met behulp van een brandkraan een proof of principle is gegeven dat laat zien dat druksensoren kunnen helpen om lekken te detecteren. Echter, voor het verder uitwerken van een proof of principle tot een gevalideerde meetstrategie heeft het meten in een echt netwerk zo zijn beperkingen: in verband met beperkte middelen kan niet op iedere locatie een druksensor worden geïnstalleerd, in verband met beperkte tijd en mogelijke overlast voor aanwonenden kan niet op iedere locatie een lek worden geïntroduceerd en het simuleren van heel kleine lekken tot aan heel grote lekken is ook een uitdaging. Het voordeel van meten in een echt netwerk is dat alle ogenschijnlijke zekerheden van een model worden vermeden; in een echt netwerk is er een grote variatie van waterverbruik over alle verbruikers, en de druksensoren zijn niet perfect.

Het alternatief is een theoretische beschouwing met behulp van een hydraulisch netwerkmodel. Ook deze aanpak is in de literatuur beschreven (hoofdstuk 2). Het voordeel is dat op ieder moment en op iedere locatie de druk bekend is (met een zeer grote nauwkeurigheid), en alle soorten lekken kunnen worden geïntroduceerd. Het nadeel is dat gerekend wordt met een schijnzekerheid die er in de werkelijkheid niet is, waardoor niet direct duidelijk is hoe goed de modelresultaten zijn te vertalen naar de werkelijkheid.

Om de nadelen van meten in een echt netwerk te vermijden en de voordelen zoveel mogelijk te behouden is in dit project gewerkt met "metingen in een virtueel netwerk" waarbij zo realistisch mogelijke simulaties worden uitgevoerd: 1) ieder huishouden in het netwerk heeft een uniek verbruikspatroon, en iedere dag is dat patroon ook anders (SIMDEUM is hiervoor ingezet); 2) de tijdstap waarmee gerekend is, is heel kort, namelijk 10 seconden; 3) er wordt vanuit gegaan dat de druksensoren een bepaalde onnauwkeurigheid (meer specifiek gaat het om de precisie) hebben. Vervolgens zijn in dit virtuele netwerk nog andere afwijkingen geïntroduceerd, zoals lekken (op alle mogelijke knopen in het leidingnetmodel en van allerlei afmetingen), en afwijkende afsluiterstanden. Op deze manier kan ook een uitspraak worden gedaan over op hoeveel plaatsen gemeten moeten worden (dichtheid van het meetnet) en hoe vaak gemeten moet worden (frequentie van meten en loggen van de data) om bepaalde

afwijkingen te kunnen detecteren. Specifiek is met deze aanpak gekeken naar de potentie van druksensoren voor lekdetectie (hoofdstuk 3) en voor de detectie van gesloten afsluiters (hoofdstuk 4).

In hoofdstuk 5 worden conclusies en aanbevelingen gegeven voor de toepassing van intelligente watermeters.

2 Literatuuronderzoek

2.1 Inleiding

Er is een beperkte literatuurstudie uitgevoerd naar wat er reeds op praktijkschaal is onderzocht aan druksensoren in watermeters in relatie tot lekdetectie. Dit geeft inzicht in praktische mogelijkheden en beperkingen van druksensoren en het soort lekken waar men naar op zoek is. Ook geeft het inzicht in welke modelaanpakken al geprobeerd zijn en welke wel of niet kansrijk zijn. Tevens is gekeken naar de toepassing van waterkwaliteitssensoren in watermeters.

Geraadpleegd zijn wetenschappelijke papers uit peer reviewed journals en congressen; ook is relevante informatie uit gesprekken met experts bij verschillende bijeenkomsten (congressen, workshops, bedrijfsbezoeken) opgeschreven.

2.2 Literatuur over lekdetectie

2.2.1 Overzicht

Dit literatuuroverzicht over lekdetectie beperkt zich tot drukopnemers bij slimme meters. Eventuele andere lekdetectie methodes zijn niet meegenomen. Er zijn redelijk wat internationale studies uitgevoerd naar lekdetectie met behulp van drukopnemers. Tabel 2-1 geeft een overzicht van een selectie van deze studies met enkele kerneigenschappen. Dit overzicht is niet compleet. Meer informatie over lekdetectie methodes met behulp van sensoren is onder andere te vinden in Mesman & van Thienen (2015) en van Vossen- van den Berg (2017).

Tabel 2-1. Overzicht van een selectie van studies naar lekdetectie met behulp van druksensoren (BK = brandkranen).

Studie	Groote netwerk	sensoren (locatie)	Praktijk of Simulatie	Lek (m ³ /u)	Methode
Quevedo et al. (2011)	1996 knopen	3, 15, 100 (knopen)	Simulaties	22,7	Model based leak detection
Moors (2016)	1932 aansluitingen	7 (BK) + 6 (IWM's)	Praktijk	5,2; 7,5; 15	Model based leak detection (gebaseerd op bovenstaande studie)
Steffelbauer et al. (2017)	213 knopen (35 BK)	5 (BK)	Simulaties	3,6	Differential evolution algorithm met model based leak detection
Ferrandez-Gamot et al. (2015)	31 knopen	2 (knopen)	Simulaties	72 <-> 216	Data-Driven using classifiers

Zoals te zien is in Tabel 2-1 zijn er zowel simulaties als praktijkstudies uitgevoerd. De meeste studies beschrijven detectie van numeriek gesimuleerde lekken. In de studie van Moors (2016) gaat het echter om een praktijksituatie waar de lekken gesimuleerd zijn met het open zetten van een brandkraan. Er zijn verschillende methodes beschreven waarvan er hier drie zijn geselecteerd. Twee methodes zijn gebaseerd op modelgebaseerde lekdetectie, een waarbij er een database is met de resultaten van de hydraulische berekeningen (de gesimuleerde lekken en de resulterende drukken op verschillende knooppunten) en een waarbij deze hydraulische berekeningen tijdens een optimalisatie algoritme plaatsvinden. De onderzochte netwerken variëren in grootte (31 – 1996 knopen) en in lekgrootte (3,6 – 216 m³/u). De sensordichtheid varieert van 0,67 – 6% van het aantal knopen. De

simulatie met drie sensoren in de studie van (Quevedo et al. 2011) (0,15%) geeft geen goede resultaten, en wordt niet verder besproken.

2.2.2 Modelgebaseerde lekdetectie

In essentie werkt modelgebaseerde lekdetectie (zoals onder andere beschreven door Quevedo et al. (2011) en Moors (2016)) als volgt. Het netwerk wordt gerepresenteerd in een hydraulische simulator (bijvoorbeeld Epanet). Er worden druksensoren geplaatst op een aantal knopen en vervolgens wordt er een referentiemodel berekend. Dit is de druk in de sensoren in een situatie zonder lekken (ω).

$$\omega = \begin{bmatrix} \hat{p}_1 \\ \vdots \\ \hat{p}_{ns} \end{bmatrix}$$

Hier is ns het aantal druksensoren. Vervolgens worden er lekken gesimuleerd op alle knopen (een voor een) en de drukmetingen minus de referentie drukmetingen opgeslagen in een matrix (FSM). Hier is nn het totaal aantal knopen (nodes). Iedere kolom representeert dus de drukmetingen op de sensoren (ns) voor 1 lekscenario.

$$FSM = \begin{bmatrix} \hat{p}_{1_1} - \hat{p}_1 & \cdots & \hat{p}_{nn_1} - \hat{p}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{p}_{1_{ns}} - \hat{p}_{ns} & \cdots & \hat{p}_{nn_{ns}} - \hat{p}_{ns} \end{bmatrix}$$

Vervolgens wordt er in een scenario met een echt lek de drukmetingen minus de referentiedrukmetingen genomen (\emptyset).

$$\emptyset = \begin{bmatrix} p_1 - \hat{p}_1 \\ \vdots \\ p_{ns} - \hat{p}_{ns} \end{bmatrix}$$

Van deze vector wordt de correlatie genomen met de kolommen van de matrix. De kolom met de grootste correlatie is de meest waarschijnlijke lekkende knoop.

Voor Quevedo et al. (2011) zijn er resultaten berekend voor verschillende scenario's met een toenemende mate van complexiteit. De resultaten zijn nog steeds goed voor 15 en 100 sensoren waar er rekening is gehouden met 0,25 m ruis op de drukmetingen, de matrix berekend is met een lekgrootte van 6,3 l/s (23 m³/u) terwijl het daadwerkelijke (gesimuleerde) lek 16 l/s (58 m³/u) is. Er worden 2 verbruikspatronen gebruikt. Elke knoop heeft een w verhouding tussen deze twee verbruikspatronen waarbij het totale verbruik gelijk blijft aan het bemeterde verbruik. Hier bovenop is 10% ruis toegevoegd (Perez et al. 2011). In dit scenario is de gemiddelde afstandsfout 96,6 m en een correlatiecoëfficiënt met de daadwerkelijke lekkende knoop van 0,952. De resultaten voor Moors (2016) zijn sterk afhankelijk van de locatie en de timing, maar over het algemeen bestaat 's nachts de grootste kans op een correcte lokalisatie.

2.2.3 Differential Evolution Algorithm

In essentie combineren Steffelbauer, Gunther, & Fuchs-Hanusch (2017) de bovenstaande methode met een stochastisch algoritme namelijk het differential evolution algorithm (DE). Een groot verschil is dat in deze methode de FSM tijdens de berekeningen wordt uitgerekend. Vervolgens wordt er door middel van een optimalisatie (het DE algoritme) de beste oplossing gevonden. Hier is voor gekozen omdat dit beter is in het oplossen van problemen waar zich lokale minima voordoen en om een oplossing te vinden voor zowel leklocatie als lekgrootte. De studie laat ook zien dat de ordening van de knopen in de vectoren en de keuze voor de methode voor het bepalen van de grootste correlatie invloed hebben op de prestaties van hun methode. In hun studie vinden ze dat de Pearson's correlatie (zoals ook gebruikt door Quevedo, et al., (2011) en Moors, (2016)) in combinatie met een Cuthill-McKee (Cuthill & McKee, 1969) ordening van de knopen de beste resultaten geeft.

Na ongeveer 500 iteraties wordt door het algoritme in 70% van de gevallen een lek gevonden dat dicht bij het echte lek ligt en in 90% van de gevallen binnen 400 m.

2.3 Literatuur over watermeters en waterkwaliteit

Een korte zoektocht op het internet laat zien dat er geen watermeters met druksensoren op de markt zijn (d.d. december 2019). Er zijn wel enkele specificaties te vinden van drukopnemers. Typisch wordt de juistheid opgegeven als percentage van het bereik. Voor het bereik van 0 tot 50 mwk komt dat uit op ca. 0,5 mwk voor de goede (duurdere) drukopnemers; de precisie (herhaalbaarheid) wordt niet opgegeven.

Er zijn verschillende waterkwaliteitsensoren beschreven in de literatuur. Lambrou et al. (2014) presenteren bijvoorbeeld een low cost sensoropstelling die verschillende waterkwaliteitsparameters meet (temperatuur, geleidbaarheid, pH, ORP (Oxidation Reduction Potential) en troebelheid) en is gecombineerd met een algoritme dat besmettingen (*Escherichia Coli* bacterie en zware metalen (arsen)) detecteert. Het gaat hier echter niet om sensoren in de watermeter. Mits de sensoren klein en goedkoop genoeg zijn is dit uiteraard wel mogelijk. Watermeters zouden dan met de boven beschreven sensoren kunnen worden uitgebreid en met backtracingmethodes (Thienen en Vries 2013) zijn deze dan te gebruiken voor een eventuele lokalisatie van de besmetting. Andere toepassingen van een grote dichtheid van waterkwaliteitssensoren zijn nog niet beschreven in de literatuur.

2.4 Informatie via persoonlijke contacten

Op congressen en bij bedrijfsbezoeken is informatie m.b.t. toepassing van IWM vergaard. De informatie uit de contacten die daar zijn opgedaan is (nog) niet in de literatuur te vinden. Een uitgebreidere toelichting is te vinden in bijlage I. Hieronder een korte samenvatting.

Huidige toepassingen van AMR zijn bijv.:

- Verbeterde service: geen handmatige meteruitlezing, potentie voor consumenten om geld, energie en water te besparen, alarmen bij lekkage, alarmen bij onverwacht geen verbruik (granny alert). Alle info ook aan de klant beschikbaar stellen.
- Optimalisatie van administratie en operationele taken: gemakkelijker opvolging van wanbetalers, facturatiefrequentie kan hoger, klachten van klanten (m.b.t. de facturatie) kunnen gemakkelijker en sneller worden afgehandeld. Detectie van fraude met watermeters. Minder gevallen van terugbetaling aan consumenten met lekken
- Meer inkomsten: Doordat verbruik in het lage bereik nauwkeuriger wordt gemeten, kan dat ook worden afgerekend.
- Waterbesparing: bewaking van lekverlies per uur.
- Voeding voor de digital twin (Valencia).

Data-analyse van digitale watermeters kan informatie geven over degradatie van watermeters. De miswijzing van watermeters kan afhangen van de lokale waterkwaliteit of door het totale doorstroomde volume dat is geregistreerd. Een verbeterd watermeterbeheer kan worden vormgegeven voor digitale watermeters.

Jonas Kirstein presenteerde op CCWI de toepassing van temperatuursensoren op watermeters, in combinatie met een model dat het verloop van de temperatuur over de lengte van het leidingnet beschrijft, met als doel het vinden van gesloten afsluiters. Hier wordt de temperatuur als een niet-conservatieve tracer gebruikt om het pad dat het drinkwater door het leidingnet aflegt te bepalen. In de presentatie werd duidelijk dat er eigenlijk onvoldoende data verzameld werd voor de beoogde toepassing.

Een extra functionaliteit op de digitale watermeter is een noise logger t.b.v. lekdetectie. Kamstrup heeft deze onlangs inderdaad op de markt gebracht. Toepassingen door waterbedrijven zijn nog niet gerapporteerd en de mogelijkheid van de noise logger in lekdetectie is alleen theoretisch (en beperkt) beschreven.

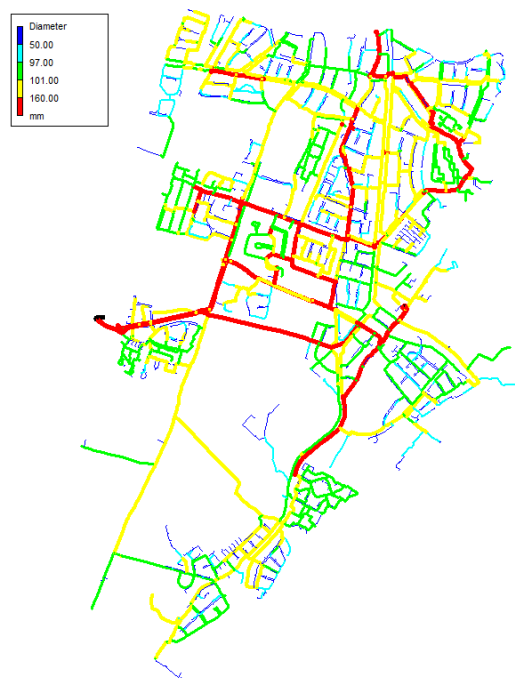
Het TU Delft project DASH of water integreert metingen van IWM's en SIMDEUM. De data van de IWM's kunnen worden gebruikt om de inputparameters van SIMDEUM te bepalen; vervolgens kan SIMDEUM worden ingezet om ontbrekende metingen te simuleren. Een digitale tweeling van een hydraulisch model dat gevoed wordt met verbruiksmetingen waar gaten in zitten (ofwel omdat niet overal een IWM is geïnstalleerd, ofwel omdat data verloren is gegaan in de transmissie, ofwel omdat data op een te grove resolutie wordt gemeten), kan op deze manier worden verbeterd met virtuele metingen die door SIMDEUM worden geleverd.

3 Potentie voor lekdetectie

3.1 Aanpak

3.1.1 Casestudie

In het startoverleg van het project is besloten te werken met het leidingnetmodel van Heemstede. Waternet heeft het EPANET-model al eerder aan KWR aangeleverd voor een BTO-project. Er zitten geen aansluitleidingen in het model; iedere knoop representeert een of meer aansluitingen. Van alle knopen is bekend hoeveel verbruikers erop zitten. Er zijn 2046 knopen met verbruik (en 1953 knopen zonder verbruik), met 7137 aansluitingen met verbruik. Het gaat vooral om huishoudelijk en klein-zakelijk verbruik. Heemstede meet ca. 2,9 x 4,3 km; het netwerk heeft een leidinglengte van ca. 343 km. Het netwerk bevat een watertoren en een reinwaterkelder met een drukregeling. Tijdens de simulaties houden we een vaste drukhoogte aan op de uitgang van de reinwaterkelder; er wordt dus niet op druk ergens in het net gestuurd. De drukken worden berekend op de knoop; er wordt dus geen rekening gehouden met drukverlies over aansluitleiding, hoofdkraan of de watermeter.



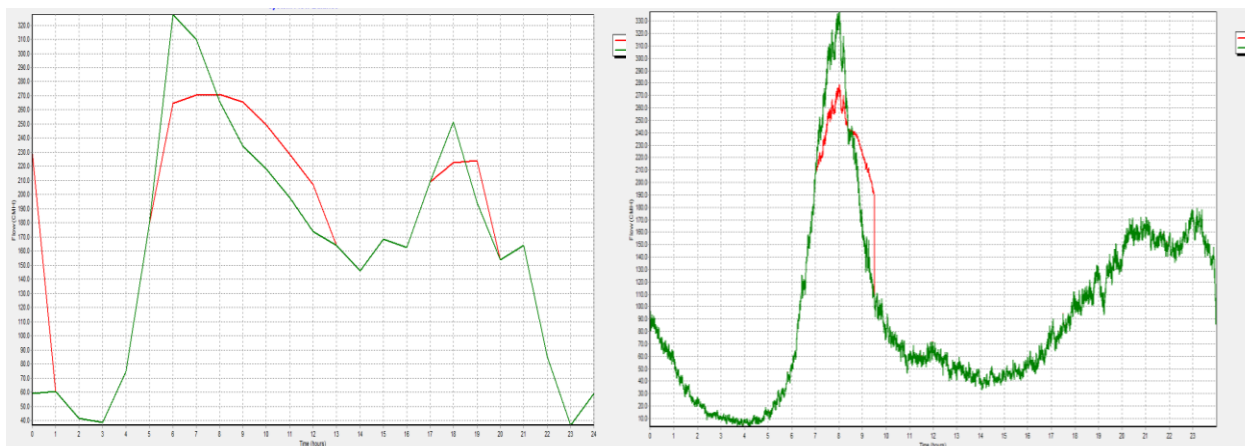
Figuur 3-1. Netwerk van Heemstede; kleuren geven leidingdiameter aan.

In dit project is gewerkt met “metingen in een virtueel netwerk” waarbij zo realistisch mogelijke simulaties worden uitgevoerd: 1) ieder huishouden in het netwerk heeft een uniek verbruikspatroon, en iedere dag is dat patroon ook anders; 2) er is gerekend met een kort tijdstap; 3) er wordt vanuit gegaan dat de druksensoren een bepaalde onnauwkeurigheid (meer specifiek gaat het om de precisie) hebben.

- Ad 1: SIMDEUM is hiervoor ingezet. Voor de toepassing hier is met name van belang dat de variatie van dag tot dag, door de week en in het weekend, realistisch is, en dat ook op kleine ruimtelijke en temporele schaal het model een realistische variatie vertoont. In verscheidene onderzoeken is al laten zien dat SIMDEUM realistische verbruikspatronen op huishoudniveau genereert, waarbij zowel de hoogte van het verbruik, het patroon over de dag als de variabiliteit van het verbruik over de dag een goede overeenkomst vertonen met gemeten

verbruiken. Ook is aangetoond dat de toepassing van SIMDEUM patronen in leidingnetmodellen leidt tot volumestromen en verblijftijden die goed overeenkomen met gemeten waardes.

- Er zijn alleen huishoudelijke patronen toegepast; ook voor de enkele klein-zakelijke verbruikers die zich in Heemstede bevinden. Figuur 3-2 laat zien dat de nacht en ochtendpiek tussen het Waternet-model en KWR-model goed overeenkomen. Er zijn geen metingen beschikbaar om de modellen aan te toetsen.
- In EPANET is als base demand telkens $1 \text{ m}^3/\text{u}$ opgegeven, en de waardes uit SIMDEUM zijn opgegeven als demand multiplier pattern (DMP). Het verschil in het verbruik in de middag tussen Waternet- en KWR-model (Figuur 3-2) komt deels door de aanname van alleen huishoudelijk verbruik.
- Ad 2: de keuze voor een tijdstap van 10 seconde is een balans tussen een zo hoog mogelijke resolutie (1 seconde is het minimum voor de simulaties met SIMDEUM en ca. 10 seconden voor laagfrequente drukmetingen), en rekentijd (deze schaalt lineair met de hydraulische tijdstap). Het verschil tussen maximale volumestroom per seconde en per 10 seconden is nog beperkt, dus 10 sec lijkt een acceptabele tijdstap.
- Ad 3: het model berekent drukken tot 3 cijfers achter de komma, maar in werkelijkheid is een drukopnemer niet zo betrouwbaar. Onnauwkeurigheid van drukopnemers kan voortkomen uit detectielimiet, precisie of juistheid. De toepassing in dit project vraagt om drukmetingen waarbij nog water wordt geleverd, waarbij geldt dat uit de praktijk duidelijk is dat de detectielimiet (de minimale druk die gemeten kan worden) geen probleem is. De juistheid (hoe goed komt de gemeten waarde overeen met de werkelijke waarde, uitgedrukt als de gemiddelde afwijking) is bij gangbare drukopnemers niet heel hoog, en zeker bij goedkopere drukopnemers is deze in de orde grootte van 0,5 mwk (door kalibratie kan deze fout gecorrigeerd worden, maar dat maakt een meter duurder). Omdat de toepassing hier uitgaat van een verschil in druk tussen een referentiescenario zonder lek en de situatie met een lek is de juistheid waarschijnlijk ook niet van heel groot belang. Het aspect precisie (de mate van herhaalbaarheid uitgedrukt in de standaardafwijking) is bij goedkope meters naar verwachting niet zo hoog, en dit is wel een aspect waar rekening mee moet worden gehouden. De afwijking hier wordt ingeschat op 0,5 mwk.



Figuur 3-2 Geleverde (rood) en gevraagde (groen) totale volumestroom (ingehend en uit watertoren) in het leidingnetmodel van Heemstede; (links) het model zoals Waternet dat gebruikt en (rechts) het door KWR gebruikte model met SIMDEUM-patronen.

3.1.2 Referentiescenario

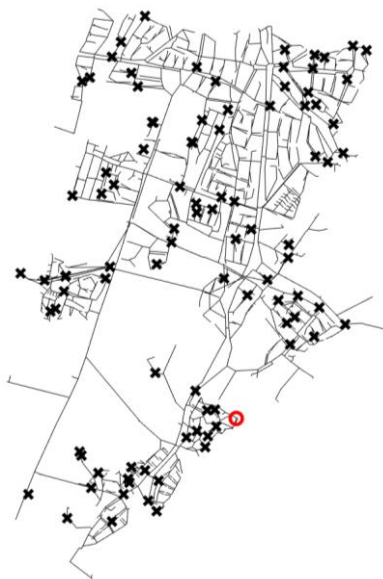
Een model met SIMDEUM-patronen is gegenereerd voor 10 werkdagen en 4 weekenddagen; in totaal zijn er 14 EPANET-modellen met hun eigen set aan verbruikspatronen. Deze leidingnetmodellen rekenen we door op drukken en volumestromen – en dat geeft een gemiddelde plus een variatie rond dat gemiddelde. Dit is de basis voor een referentiescenario. Dit kan op verschillende manieren worden vormgegeven, zie §3.2.1 voor de onderbouwing van de keuze voor het referentiescenario.

3.1.3 Lekscenario's

Vervolgens kunnen aan het model lekken worden toegevoegd. De lekken kunnen op allerlei locaties in het leidingnet of in de drinkwaterinstallatie zitten, ze kunnen verschillende groottes hebben en ze kunnen verschillende "vormen" hebben, d.w.z. dat ze ofwel de hele tijd aanwezig zijn, op een bepaald tijdstip ontstaan, een vaste grootte hebben, of klein beginnen en langzaam groeien. Dit levert heel veel verschillende lekscenario's op. Ook voor de modellen met lekken worden de drukken op alle knopen berekend.

Voor de lekscenario's zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Lekken worden in het model op de knopen toegevoegd en niet op de leidingen.
- Lekken van verschillende groottes worden gesimuleerd.
 - Lekken van $1 \text{ m}^3/\text{u}$, $2 \text{ m}^3/\text{u}$, $5 \text{ m}^3/\text{u}$, $10 \text{ m}^3/\text{u}$, $20 \text{ m}^3/\text{u}$ en $50 \text{ m}^3/\text{u}$.
- Er zijn alleen continue lekken gesimuleerd; die de hele dag dezelfde grootte hebben.
- Lekken worden aan willekeurige knopen met of zonder verbruik toegevoegd.
 - Er zijn een aantal knopen zonder verbruik die achter een gesloten afsluiter zitten; deze zijn uit de selectie gehouden.
 - 100 willekeurige knopen worden geselecteerd voor de simulaties (zie Figuur 3-3 voor de verspreiding voor de locaties over het leidingnet). Dit is ca. 3% van het totale aantal knopen in het leidingnet.
 - Iedere leklocatie wordt met alle zes lekgroottes doorgerekend.
- Er wordt niet drukafhankelijk gerekend; er wordt vanuit gegaan dat de lekken zodanig klein zijn dat er geen effect op het verbruik is. Bij heel grote lekken is er een ander mechanisme dat de lekken detecteert.
 - Wanneer een lek te groot is om de druk te kunnen leveren, is het resultaat van de simulatie dat er voor dat scenario geen uitkomst is. Het ontbreken van een resultaat is geïnterpreteerd als een zodanig groot lek dat klanten geen druk hebben en een melding bij het waterbedrijf zouden doen.
- De lekscenario's worden automatisch doorgerekend met de hydraulische simulatiebibliotheek van EPANET, zonder tussenkomst van de grafische schil. Het is technisch niet mogelijk om in de hydraulische simulatiebibliotheek van EPANET aan een knoop een extra verbruik toe te kennen als er al een verbruik op zit. In plaats daarvan wordt het bestaande (SIMDEUM)patroon aangepast door er een vast verbruik bij op te tellen. Dit is eenvoudig omdat het *base demand* gelijk aan 1 is gesteld.



Figuur 3-3. Locaties van de gesimuleerde lekken (zwarte kruis), en testleklocatie knoop 1421 (rode cirkel).

3.1.4 Sensorstrategie

De beoogde opbrengst van het project is de bepaling van een goede sensorstrategie. Een sensorstrategie wordt hier gedefinieerd door 1) de dichtheid van druksensoren (ieder adres, of bijv. 10% van de adressen), 2) de

meetfrequentie (eens per dag, per uur, etc.) en 3) het beste meetmoment (tijdens geen verbruik, tijdens piekverbruik, 7:00 u 's ochtends, etc.). Omdat het om drukmetingen bij huishoudelijke watermeters gaat waarbij levensduur van de batterij zo lang mogelijk moet zijn, is het uitgangspunt dat de meetfrequentie ca. eens per dag is.

Om te komen tot een aanbeveling voor een sensorstrategie is een aanpak in twee stappen gevolgd:

- 1 Met voorbeeldberekeningen van referentiescenario en lekscenario's is een inschatting gemaakt van wat een goed referentiescenario is en hoe de sensorstrategie beoordeeld kan worden, en is bepaald wat een goed meetmoment of tijdsvenster is (zie §3.2). Deze beoordeling vindt met name plaats op de afwijking die een individuele meters kan detecteren.
- 2 Voor 100 leklocaties en verschillende lekgroottes wordt de detectiekans bepaald tijdens het gekozen tijdsvenster, en op basis van afstand tussen leklocatie en detectielocatie kan worden bepaald hoe groot de meetdichtheid zou moeten zijn voor detectie (§3.3).

3.2 Eerste resultaten en definitie van de methode

3.2.1 Referentieprofiel

Netwerkberekeningen, rekening houdend met de onnauwkeurigheid van de drukopnemer, worden gebruikt om inzicht in te krijgen in een het effect van een bepaalde sensorstrategie. Gesimuleerd wordt wat een IWM zou registreren (voor referentie- en lekscenario's), rekening houdend met variatie en onnauwkeurigheid in de drukmeting. Er wordt rekening mee gehouden dat niet op alle knopen een drukmeting beschikbaar is, maar alleen op knopen met verbruik (waar een watermeter is geïnstalleerd).

Uitgangspunt is dat een sensor een vergelijking maakt tussen de verwachtingswaarde en de gemeten waarde. Wanneer de gemeten waarde afwijkt van de verwachtingswaarde duidt dit bijvoorbeeld op een lek. Een ander uitgangspunt is dat de drukopnemer slechts eenmaal (of enkele malen) per dag een meting doet, in verband met beperkte levensduur van de batterij. De vergelijking tussen verwachtingswaarde en gemeten waarde kan op ieder moment van de dag een andere uitkomst geven. Een optie is dat gekeken wordt naar de gemiddelde kans op een dag dat bij een lekscenario een afwijking wordt gevonden; een andere optie is dat gekeken wordt naar de gemiddelde kans tijdens een specifiek uur op de dag.

De verwachtingswaarde wordt bepaald door de waardes die de sensor in de twee voorafgaande weken (met week- en weekenddagen, en eventueel feestdagen) heeft gemeten plus een marge die compenseert voor de willekeurige variatie die optreedt in stochastische patronen, en zo niet te veel vals positieven gemeld worden. Daarnaast is ook de precisie van de drukopnemer beperkt, ook hiervoor moet gecompenseerd worden. Er zijn twee opties getoetst voor het bepalen van de verwachtingswaarde en twee voor de precisie van de drukopnemer, namelijk

- De verwachtingswaarde wordt bepaald door het gemiddelde (μ) +/- een aantal maal de standaarddeviatie (σ , 2σ betekent dat 95% van de waardes daarbinnen valt), waarbij de marge dus wordt bepaald door de verwachte variantie.

versus

- De verwachtingswaarde wordt bepaald door de minimale en maximale waarde van de afgelopen twee weken plus een factor van 25% op het verschil tussen het minimum en het gemiddelde ($\Delta_{\max} = \text{gemiddelde} - \text{minimum}$ of $\Delta_{\max} = \text{maximum} - \text{gemiddelde}$, de verwachte minimale waarde is $\text{gemiddelde} - 1,25 \times \Delta_{\max}$), waarbij de marge wordt bepaald door de gekozen factor.

- De precisie van de drukopnemer is (P_{acc}) is 0,5 mwk

versus

- P_{acc} is 0,05 mwk

Dit levert de volgende vier methodes op om een verwachtingswaarde op te stellen op (die in vier figuren zijn geïllustreerd). De verwachtingswaarde over de dag wordt in het vervolg een referentieprofiel genoemd.

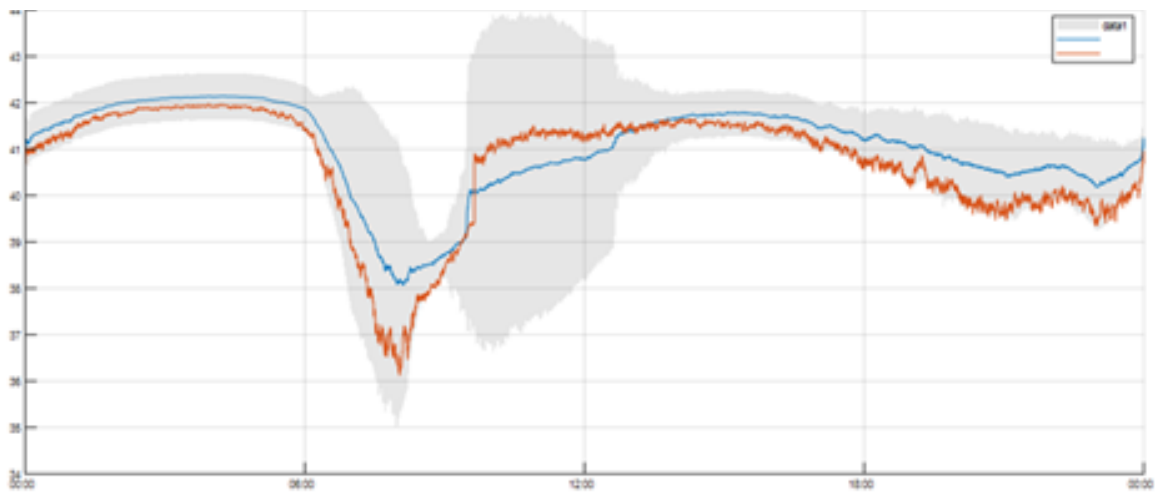
1. $\mu \pm 2\sigma$, met $P_{acc} = 0,5$ mwk (Figuur 3-4)
2. $\mu \pm 2\sigma$, met $P_{acc} = 0,05$ mwk (Figuur 3-5)
3. $\mu \pm \Delta_{max} \times 1,25$, met $P_{acc} = 0,5$ mwk (Figuur 3-6)
4. $\mu \pm \Delta_{max} \times 1,25$, met $P_{acc} = 0,05$ mwk (Figuur 3-7)

Om te kunnen beoordelen in hoeverre de verschillende referentieprofielen geschikt zijn om een lek te detecteren, is een lekscenario gesimuleerd, met een lek van $10 \text{ m}^3/\text{u}$ op knoop 1421 (rode cirkel in Figuur 3-3) op een weekdag; en is gekeken naar het effect op de druk op een knoop daar vlakbij (knoop 70070). De figuren hieronder geven de resultaten weer van de referentieprofielen, en het lekscenario.

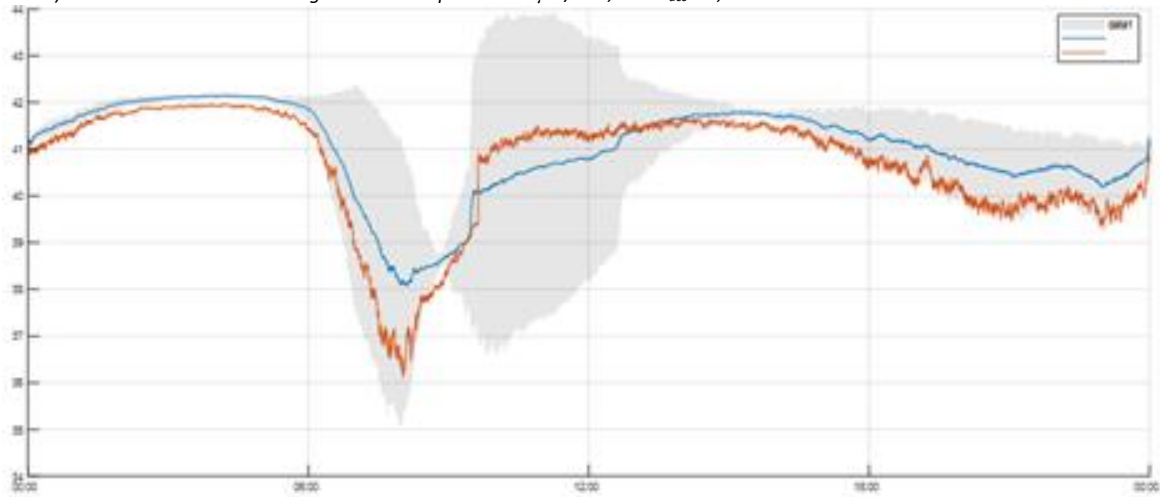
Als voorbeeld wordt gesteld dat er sprake is van detectie wanneer er tenminste een kwartier lang een drukwaarde onder de waarde van het referentieprofiel wordt gemeten. De figuren laten zien dat wanneer je slechts eens per dag zou willen meten, je bij referentieprofiel 4 (Figuur 3-7) zowel in de nacht als tijdens hoog verbruik zou kunnen meten, bij referentieprofiel 3 (Figuur 3-6) beter tijdens piekverbruik kunt meten, en bij referentieprofiel 2 (Figuur 3-5) juist alleen tijdens de nacht en laag verbruik in de middag. Bij referentieprofiel 1 (Figuur 3-4) is er op geen enkel moment van de dag een detectie.

Omdat gezocht wordt naar lekken, wordt er alleen gekeken naar drukmetingen die lager zijn dan het referentieprofiel. In dit geval is het gemiddelde minus een aantal maal de standaarddeviatie niet zo'n goede maat, omdat de variatie niet normaal verdeeld is rond het gemiddelde. Bijvoorbeeld geldt tussen 7:00 en 9:00 u 's ochtends dat de variatie aan de bovenkant vooral komt door het weekend. Het is dus logischer om de minimale waarde aan te houden voor het referentieprofiel (referentieprofiel 3 of 4).

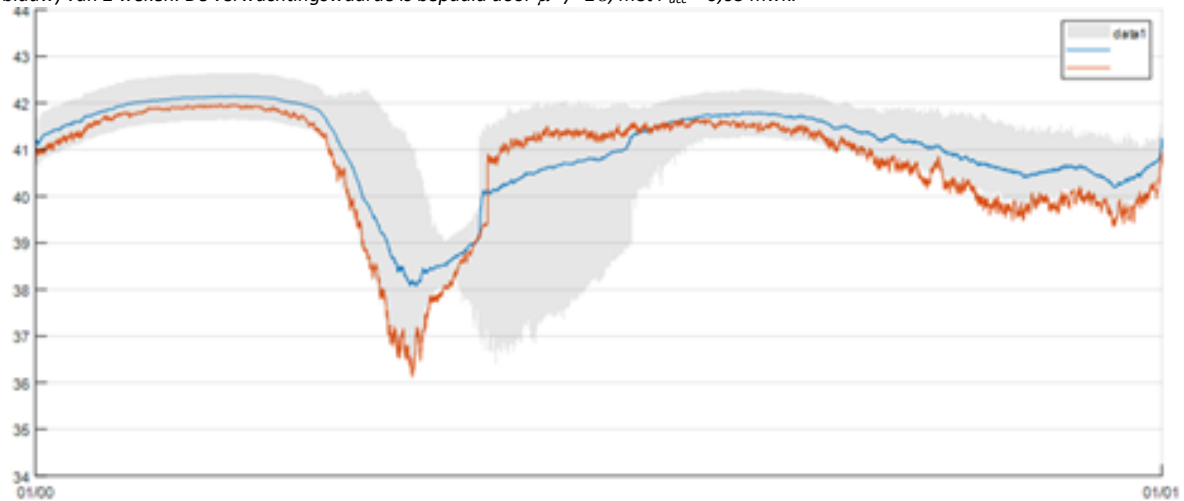
De nauwkeurigheid van de drukopnemer hangt af van de specificaties die de gebruiker eist. Voor drukopnemers geldt een aantal stappen waarin het meetbereik wordt opgedeeld. Wanneer je een meetbereik wilt hebben van 50 mwk (wat in het model van Heemstede een goed bereik lijkt te zijn) en een nauwkeurigheid van 0,05 mwk heb je een systeem nodig dat het bereik in 1000 stappen opdeelt. Hoe meer stappen je wilt, hoe duurder de opnemer. Als je watermeters gaat uitrusten met drukopnemers, dan zullen er waarschijnlijk niet al te dure opnemers in gemonteerd worden en deze zullen dus een beperkte precisie hebben. Een precisie van 0,05 mwk lijkt wel haalbaar (maar duur), en 0,5 mwk is in elk geval haalbaar (een korte zoektocht op het internet bij een aantal leveranciers liet zien dat vaak een nauwkeurigheid wordt gerapporteerd van 0,5%). In de simulaties wordt 0,05 mwk aangehouden; in de resultaten wordt ook de maximale afwijking gerapporteerd, zodat kan worden bepaald of het met een minder nauwkeurige sensor ook nog meetbaar is.



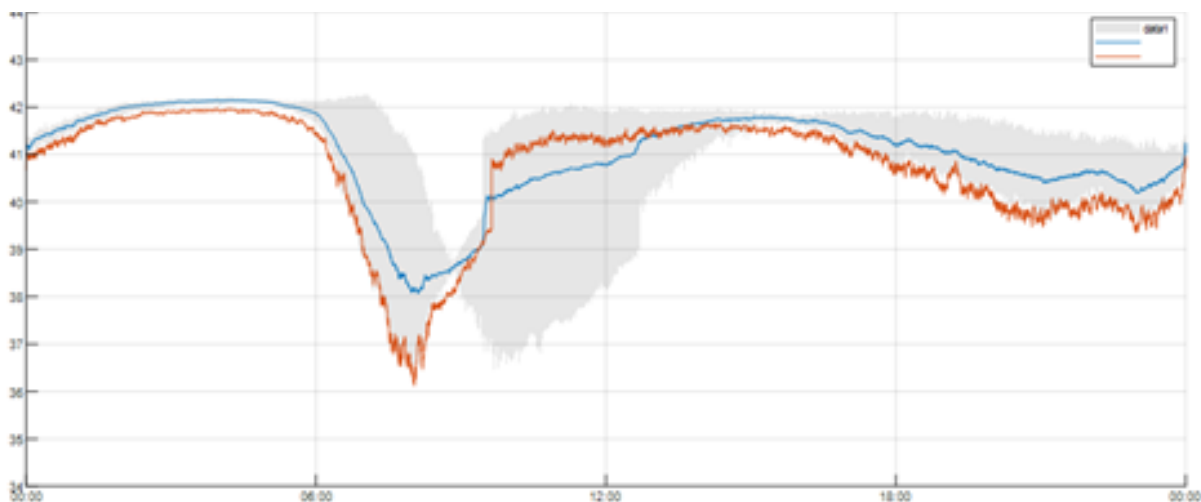
Figuur 3-4. Druk op knoop 70070 tijdens een lek van $10 \text{ m}^3/\text{u}$ op knoop 1421 (rode lijn) en de verwachtingswaarde (in grijs) en gemiddelde (in blauw) van 2 weken. De verwachtingswaarde is bepaald door $\mu \pm 2\sigma$, met $P_{acc} = 0,5 \text{ mwk}$.



Figuur 3-5. Druk op knoop 70070 tijdens een lek van $10 \text{ m}^3/\text{u}$ op knoop 1421 (rode lijn) en de verwachtingswaarde (in grijs) en gemiddelde (in blauw) van 2 weken. De verwachtingswaarde is bepaald door $\mu \pm 2\sigma$, met $P_{acc} = 0,05 \text{ mwk}$.



Figuur 3-6 Druk op knoop 70070 tijdens een lek van $10 \text{ m}^3/\text{u}$ op knoop 1421 (rode lijn) en de verwachtingswaarde (in grijs) en gemiddelde (in blauw) van 2 weken. De verwachtingswaarde is bepaald door $\mu \pm \Delta_{max} \times 1,25$ met $P_{acc} = 0,5 \text{ mwk}$.

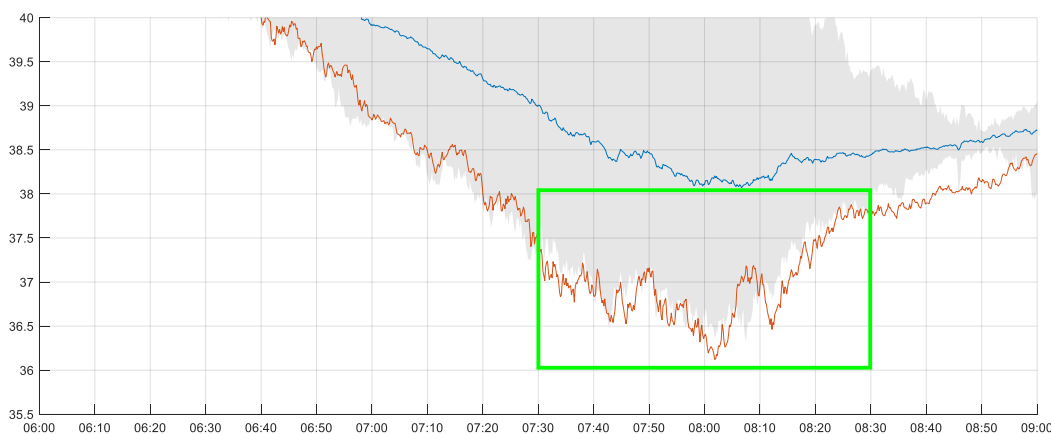


Figuur 3-7. Druk op knoop 70070 tijdens een lek van $10 \text{ m}^3/\text{u}$ op knoop 1421 (rode lijn) en de verwachtingswaarde (in grijs) en gemiddelde (in blauw) van 2 weken. De verwachtingswaarde is bepaald door $\mu \pm \Delta_{\text{max}} \times 1,25$, met $P_{\text{acc}} = 0,05 \text{ mwk}$.

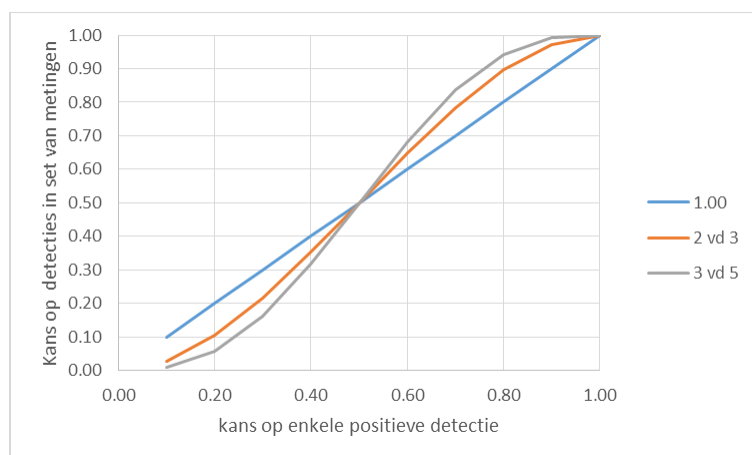
3.2.2 Sensorstrategie: hoe vaak per dag meten en wanneer?

Wanneer we verder inzoomen op referentieprofiel 3 of 4 volgt dat de detectiekans het grootst is tijdens de normale ochtendpiek, vooral voor minder nauwkeurige drukopnemers (referentieprofiel 3). Gerapporteerd wordt vervolgens hoe groot de kans is dat er een detectie plaatsvindt tijdens het piek uur tussen 7:30 en 8:30 (Figuur 3-8). Tussen 8:30 en 9:00 is de detectiekans in (Figuur 3-8) wel groter, maar bij een lagere precisie van de drukmeting (Figuur 3-6) geldt dit niet. Het is niet zinvol en wel veel duurder om in meer tijdvakken te kijken. Dit keuze voor het piek uur is arbitrair, het zou ook in de avond kunnen zijn, maar in elk geval tijdens gebruik.

Een sensorstrategie kan zijn om eenmaal tussen 7:30 en 8:30 te meten, of meerdere keren. Om vals positieve detectie te beperken kan bijvoorbeeld worden gekozen dat sprake is van detectie wanneer tenminste twee van drie metingen positief is of tenminste drie van vijf metingen. Figuur 3-9 laat zien dat wanneer de kans 80% is om bij een meting in een uur een positief “alarm” te krijgen, de kans bij drie metingen (≥ 2 van de 3 positief) op een alarm 90% is en bij vijf metingen (≥ 3 van de 5 positief) 95%. Bij deze aanname is een minimale detectiekans van 50% gewenst.



Figuur 3-8. Ingezoomd op Figuur 3-7, in het groene tijdsframe is de kans op detectie groot.



Figuur 3-9. Kans op detectie bij verschillende sensorstrategieën op een locatie.

Om een gevoel te krijgen voor de gevoeligheid van het model voor verschillende lekgroottes zijn op dezelfde knoop (1421) vier verschillende lekgroottes toegepast. De analyse voor detectiekans is gedaan voor de in totaal 20 knopen die binnen ca. 100 meter (hemelsbreed) van het lek liggen. Tabel 3-1 vat voor de vier lekscenario's samen wat op de 20 dichtstbijzijnde knopen de kans op detectie is tijdens het piekuur en hoe groot het verschil is in gemeten druk in het lekscenario en de gemiddelde gemeten druk in twee weken. Het volgende kan worden geconcludeerd:

- Een lek van 1 m³/u wordt niet gedetecteerd in de drukmetingen, zelfs niet op de knoop waar het lek is toegevoegd.
- Een lek van 5 m³/u wordt alleen op de knoop van het lek gedetecteerd met een kans van meer dan 50%. Op de andere knopen is de detectiekans kleiner dan 15%, zodat geldt dat de combinatie van deze andere metingen geen serieuze aanwijzing geeft voor een lek.
- Een lek van 10 m³/u wordt op de knoop van het lek gegarandeerd gedetecteerd. Op de andere knopen is de kans kleiner, maar groter dan 50%.
- Een lek van 20 m³/u wordt op alle omliggende knopen gedetecteerd (met een kans > 97%). Omdat alle knopen binnen 100 m dit lek detecteren, zal in de vervolgstap naar een ruimere cirkel rondom het lek gekeken worden wat de detectiekans is, namelijk 500 m (dit lijkt op een afmeting van het netwerk van 2,9 x 4,3 km ruim genoeg).

Tabel 3-1. Kans op detectie (P) en de maximale afwijking tussen gemiddelde en gemeten waarden (Δ , in mwk) tussen 7:30 en 8:30 van een lek op knoop 1421 met verschillende groottes. Groen gearceerd is $P \geq 0,9$, en geel gearceerd is $\Delta \geq 0,5$ mwk.

Knoop	# woningen op knoop	Afstand tot lek [m]	lek [m ³ /u] op knoop 1421k							
			1		5		10		20	
			P	Δ (mwk)	P	Δ (mwk)	P	Δ (mwk)	P	Δ (mwk)
1280	1	156,5	0,00	0,01	0,07	0,23	0,64	0,51	0,98	1,13
1325	2	111,6	0,00	0,00	0,06	0,22	0,62	0,49	0,97	1,09
1336	4	97,3	0,00	0,00	0,06	0,22	0,62	0,49	0,97	1,09
1337	5	51,9	0,00	0,00	0,07	0,22	0,63	0,50	0,98	1,11
1339	8	111,9	0,00	0,01	0,08	0,23	0,65	0,52	0,99	1,18
1421	5	0,0	0,00	0,05	0,99	1,04	1,00	3,43	1,00	12,12
1422	3	78,2	0,00	0,01	0,08	0,23	0,69	0,53	0,99	1,21
1424	2	74,9	0,00	0,01	0,08	0,23	0,69	0,53	0,99	1,21
1425	1	49,0	0,00	0,01	0,09	0,24	0,72	0,55	0,99	1,28
69879	3	158,7	0,00	0,01	0,07	0,23	0,64	0,51	0,98	1,13
69881	5	158,9	0,00	0,01	0,07	0,23	0,64	0,51	0,98	1,13

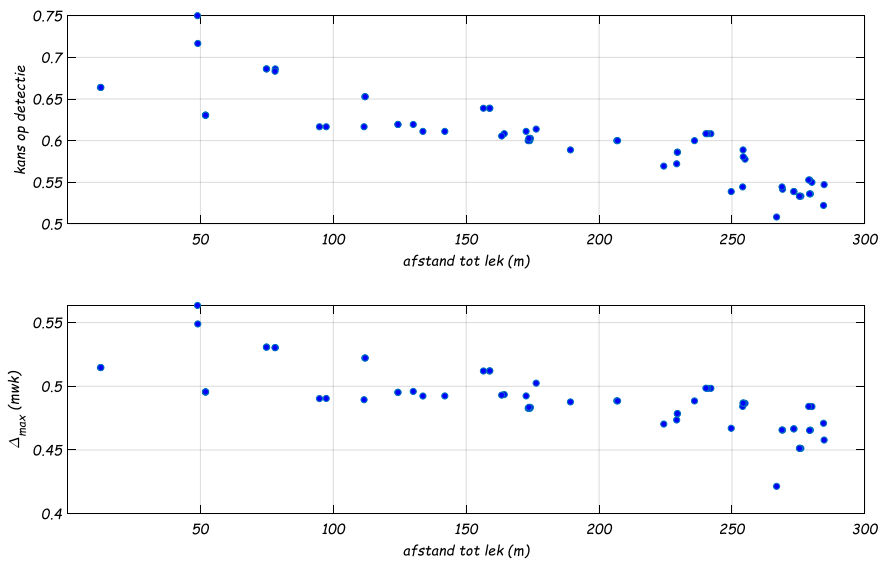
Knoop	# woningen op knoop	Afstand tot lek [m]	lek [m ³ /u] op knoop 1421k							
			1		5		10		20	
			P	Δ (mwk)	P	Δ (mwk)	P	Δ (mwk)	P	Δ (mwk)
69930	3	51,9	0,00	0,00	0,07	0,22	0,63	0,50	0,98	1,11
69944	1	94,8	0,00	0,00	0,06	0,22	0,62	0,49	0,97	1,09
69950	3	112,0	0,00	0,01	0,08	0,23	0,65	0,52	0,99	1,18
69963	4	52,0	0,00	0,00	0,07	0,22	0,63	0,50	0,98	1,11
69966	2	78,1	0,00	0,01	0,08	0,23	0,68	0,53	0,99	1,21
69976	1	74,8	0,00	0,01	0,08	0,23	0,69	0,53	0,99	1,21
70054	5	12,4	0,00	0,00	0,08	0,22	0,66	0,51	0,99	1,17
70055	4	12,6	0,00	0,00	0,08	0,22	0,66	0,51	0,99	1,17
70070	5	48,9	0,00	0,01	0,11	0,24	0,75	0,56	1,00	1,33

3.2.3 Sensorstrategie: op hoe veel plekken meten?

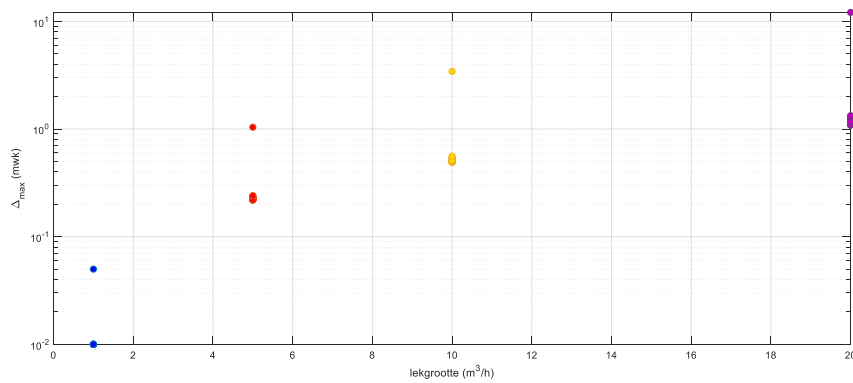
Bij de sensorstrategie moet ook bepaald worden op hoeveel plekken een meting gedaan moet worden. De data uit Tabel 3-1, aangevuld met de locaties die in een straal van 500 m liggen, is voor het lek van 10 m³/u in Figuur 3-10 uitgezet als kans ten opzichte van de afstand (hemelsbreed) tot het lek. Dichterbij het lek lijkt de kans op detectie wel iets groter, maar er is geen eenduidig verband. Op 160 m van het lek is er nog een kans op detectie, maar er is niet direct duidelijk uit de metingen op de omliggende knopen waar dat lek zou zitten (leklokalisatie). Dat kan voor andere locaties dan knoop 1421 anders zijn (knoop 1421 wordt van twee kanten gevoed). Hetzelfde beeld bestaat voor Δ_{\max} ten opzichte van de afstand tot het lek (Figuur 3-10, onder).

Figuur 3-12 toont een voorbeeld voor een andere leklocatie (knoop 70285, 50 m³/u); de kleuren geven het maximale drukverschil aan. Puur geografisch zou worden verwacht dat het lek in het midden van de donkerste kleurschakering (groen-geel in dit geval) ligt, maar dat is niet het geval. Voor leklokalisatie is dus ook een hydraulische netwerkberekening nodig.

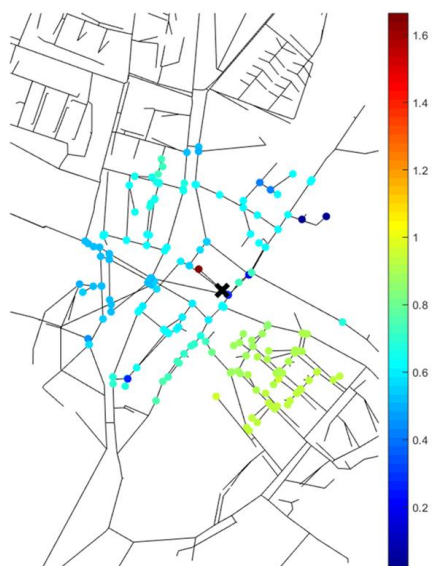
Een sensor meet Δ_{\max} zonder dat de afstand tot het lek of de grootte van het lek bekend is. De gesimuleerde data voor een lek op knoop 1421 laten zien dat de grootte van het lek ingeschat kan worden (Figuur 3-11), wanneer bekend is of het lek op dezelfde of een andere knoop zit als waar gemeten wordt. Voor andere leklocaties kan de uitkomst anders zijn.



Figuur 3-10. Kans op detectie (boven) en maximale afwijking van gemiddelde druk(onder) afhankelijk van afstand tot lek, lek van 10 m³/u op knoop 1421.



Figuur 3-11. Maximale afwijking van gemiddelde druk afhankelijk van lek grootte, data uit Tabel 3-1.



Figuur 3-12. Illustratie van leklocalisatie. Het kruisje geeft de leklocatie aan (knoop 70285, lek grootte 50 m³/u); de kleuren geven het maximale drukverschil aan tussen gemiddelde druk in het referentieprofiel en leksenario tijdens het piek uur, op de omliggende knopen waar verbruik zit.

3.2.4 Kader voor de beoordeling van sensorstrategieën

De beoogde opbrengst van het project is de bepaling van een goede sensorstrategie. Uitgangspunt is dat een (individuele) sensor een afwijking detecteert wanneer de gemeten waarde afwijkt van een referentiewaarde. Het gebruikte referentieprofiel is bepaald door de minimale druk over reeks lekvrije scenario's van 10 weekdays en 4 weekenddagen met een factor van 25% op het verschil, en een precisie van de drukopnemer van 0,05 mwk (referentieprofiel 3 uit §3.2.1). Een sensorstrategie is hier gedefinieerd door 1) de dichtheid van druksensoren, 2) de meetfrequentie (eens per dag) en 3) het beste meetmoment (tijdens piekverbruik, tussen 7:30 en 8:30 u 's ochtends). De dichtheid van de sensoren bepaalt de kans op detectie, en zal ook invloed hebben op de kans op een goede leklocalisatie. Leklocalisatie van lekken valt buiten de scope van het project.

Met als randvoorwaarde dat er slechts eens per dag gemeten wordt, wordt er geen gebruik gemaakt van tijdreeksen. Een combinatie van detectie op meerdere locaties zal met name invloed hebben op leklocalisatie, en niet op lekdetectie. De detectie wordt daarom beoordeeld op basis van individuele meters.

De gesimuleerde lekscenario's (100 willekeurige locaties, met verschillende lekgroottes) worden op de volgende aspecten beoordeeld:

- de detectiekans op de omliggende knopen (in een straal van 500 m);
- de afstand (hemelsbreed) tussen knopen met detectiekans > 50% en de knoop met het lek;
- het totaal aantal woningen met detectiekans > 50%.

3.3 Resultaten simulaties

Figuur 3-13 laat de resultaten zien in een cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling. Voor ieder lekscenario (leklocatie en lekgrootte) is op iedere omliggende knoop een detectiekans bepaald, en is een subset bepaald van knopen met een detectiekans van meer dan 50%. Vervolgens is bepaald wat de gemiddelde detectiekans is van de subset (in de linkerfiguur), wat de maximale afstand (hemelsbreed) is tussen leklocatie en de knopen in de subset (middelste figuur) en hoeveel woningen zich bevinden op de knopen in de subset (rechterfiguur). Op een knoop vindt dus geen detectie plaats als de detectiekans kleiner dan 50% is; per lekscenario wordt de gemiddelde detectiekans van alle knopen met detectie gerapporteerd.

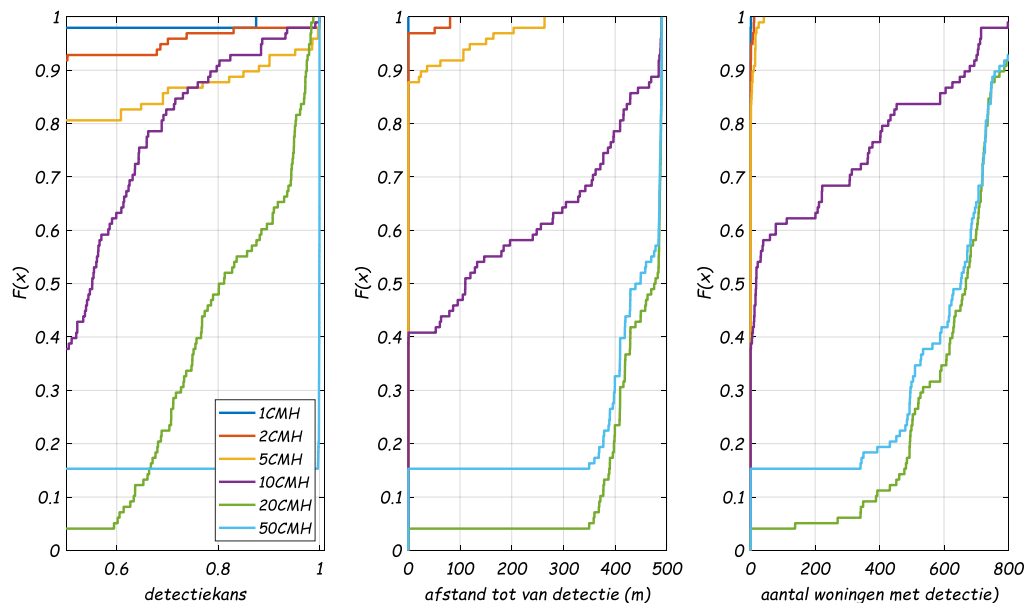
Het volgende kan worden geconcludeerd:

- Lekken van 1 m³/u worden vrijwel nooit gedetecteerd en als dat wel zo is (in 2 gevallen) is de maximale afstand 0 m, dus alleen te detecteren op de knoop zelf (en in dit geval dus ook maar bij één woning).
- Lekken van 2 m³/u worden zelden gedetecteerd, en als dat wel zo is (in 8 gevallen) is de maximale afstand 80 m, in maximaal 11 woningen.
- Lekken van 5 m³/u worden in ca. 20% van de gevallen gedetecteerd, op een maximale afstand 250 m, in maximaal 41 woningen. Dit wil zeggen dat 80% van de gesimuleerde lekken van 5 m³/u op geen enkele knoop tot een detectie van meer dan 50% leidt. Waarschijnlijk bevinden de niet gedetecteerde lekken zich met name op knopen zonder verbruik. N.B. de helft van de gesimuleerde leklocaties is op een knoop met verbruik.
- Lekken van 10 m³/u worden in ca. 60% van de gevallen gedetecteerd, op een maximale afstand van minstens 50 m, in gemiddeld 300 woningen.
- Lekken van 20 m³/u worden in ca. 95% van de gevallen gedetecteerd, tot op minimaal 350 m afstand van het lek, in gemiddeld 1000 woningen.
- Lekken van 50 m³/u worden in ca. 84% van de gevallen gedetecteerd en in de overige 16% wordt de druk zo laag dat de levering stopt, en detecteerbaar tot op minimaal 350 m afstand van het lek, in gemiddeld 1000 woningen.

Dit betekent dat grote lekken (20 en 50 m³/u) gedetecteerd kunnen worden met een relatief lage dichtheid van druksensoren. Deze lekken zouden waarschijnlijk ook met een DMA-aanpak goed meetbaar moeten zijn. Kleine lekken (1 en 2 m³/u) zijn te klein om gedetecteerd te kunnen worden met alleen eenvoudige (d.w.z. eens per dag)

drukmetingen. Lekken van 5 en 10 m³/u kunnen wel worden gedetecteerd, maar zeker niet allemaal; en bovendien is daarvoor een fijnmazig netwerk van druksensoren nodig.

Voor lekdetectie is het voldoende om een druksensor een referentieprofiel aan te leren (op basis van metingen van voorgaande 2 weken). Vervolgens kan bij een afwijking een alarm worden afgegeven. Dit betekent dat enige intelligentie in de sensor wordt ingebouwd. Voor leklokalisatie is een combinatie van metingen nodig en moeten de metingen van de individuele druksensoren centraal worden verzameld en geanalyseerd. De intelligentie zit dan niet zo zeer in de druksensoren zelf als wel in het netwerk van de sensoren.



Figuur 3-13. Cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling van de gemiddelde detectiekans voor 98 gesimuleerde lekken (links), de maximale afstand waarop het lek nog te detecteren is (midden) en aantal woningen waarop detectie mogelijk is (rechts). Alleen detectie > 50% is getoond, kleuren geven de grootte van het lek aan (CMH = cubic meter per hour = m³/u).

In Figuur 3-13 kruisen lijnen van de detectiekans (linkerfiguur) elkaar soms. Bijvoorbeeld, de lijn van lekken van 5 m³/u kruist de lijn van lekken van 10 m³/u. Dit betekent dat van de ca. 15% van de scenario's met de grootste detectiekans, deze (gemiddelde) detectiekans iets groter is bij lekken van 5 m³/u dan bij 10 m³/u, terwijl de doorgerenende scenario's alleen verschillen in lekvolume (dus leklocatie en verbruikspatronen zijn gelijk). De verklaring is dat bij grotere lekken meer knopen in de subset (van knopen met een detectiekans van minstens 50%) vallen en daarmee is er een grotere kans dat er knopen in de subset vallen met een detectiekans van net iets meer dan 50%; deze knopen zorgen daarmee dat de gemiddelde detectiekans wat lager is. Dit maakt duidelijk dat de drie figuren gezamenlijk beoordeeld moeten worden: de gemiddelde detectiekans is in sommige lekscenario's van 5 m³/u best hoog, maar dit is maar op een beperkt aantal watermeters te meten.

4 Potentie voor detectie van gesloten afsluiters

4.1 Aanpak

4.1.1 Casestudie

De vraag die beantwoord moet worden is of drukmetingen bij de watermeter kunnen helpen bij het identificeren van afsluiters die onbedoeld en onopgemerkt dicht staan. Hetzelfde netwerkmodel (Heemstede) als voor de lekdetectie is gebruikt, inclusief stochastische patronen. En een vergelijkbare modelaanpak als bij het lekzoeken uit hoofdstuk 3 is gevolgd. Dat wil zeggen dat het uitgangspunt is dat in een scenario met gesloten afsluiters significant andere drukken gemeten worden dan in een referentiescenario.

4.1.2 Referentiescenario

Er zijn verschillende situaties denkbaar waarin onbedoeld gesloten afsluiters tot een meetbare drukafwijking kunnen leiden. Hieronder worden drie soorten referentiescenario's gedefinieerd die bij de drie detectiesituaties horen.

- 1 Tijdens een dag met normale drinkwatervraag: onbedoeld gesloten afsluiters leiden niet tot klachten over te lage druk (want onopgemerkt), maar leiden mogelijk wel tot een detecteerbare afwijking in de druk. Het referentiescenario is een dag (of set van dagen) met een normale drinkwatervraag waarin de afsluiters open staan; het testscenario is een specifieke dag met een normale drinkwatervraag waarin de afsluiters gesloten zijn. Met het uitgangspunt van hoofdstuk 3 dat de referentie wordt opgebouwd uit historische data, betekent dit dat alleen nieuwe gevallen gedetecteerd kunnen worden (bijv. afsluiters die na werkzaamheden per ongeluk niet weer geopend zijn).
- 2 Tijdens een dag met een groot lek: wanneer het lek zodanig groot is dat een beperkt deel van Heemstede een lage druk heeft (OLM geldt bij $P < 50$ kPa), kan in dezelfde situatie met een aantal gesloten afsluiters een groter deel van Heemstede met een lage druk te kampen hebben. Het referentiescenario is een (willekeurige) dag met een groot lek en open afsluiters. Deze kan alleen worden bepaald door met een model te rekenen; er zijn geen historische meetreeksen met het lek (en open afsluiters) beschikbaar.
- 3 Tijdens een dag met normale drinkwatervraag en sectie-isolatie (t.b.v. een reparatie): onbedoeld gesloten afsluiters leiden onder normale omstandigheden niet tot klachten over te lage druk (want onopgemerkt), en een sectie-isolatie waarbij geen andere afsluiters gesloten zijn leidt normaal gesproken ook niet tot klachten over lage druk (want daar is het netwerk op ontworpen). Wanneer beide tegelijk voorkomen (een sectie wordt afgesloten én er staan nog onbedoeld een aantal onbekende afsluiters dicht) kan het voorkomen dat er in een deel van het netwerk te lage drukken optreden. Het referentiescenario is een (willekeurige) dag met sectie-afsluiting en open afsluiters. Deze kan alleen worden bepaald door met een model te rekenen; er zijn geen historische meetreeksen met de sectie-afsluiting (en open afsluiters) beschikbaar.

Omdat afsluiters typisch gesloten worden tijdens werkzaamheden, die meestal op werkdagen plaatsvinden, worden als referentiescenario's alleen werkdagen genomen, dezelfde als uit de simulaties voor de lekdetectie.

4.1.3 Scenario's met gesloten afsluiters.

In dit model zitten 989 afsluiters. 1% daarvan is 10 afsluiters. Voor de casestudie worden 10 willekeurige afsluiters geselecteerd die worden gesloten in het model. Daarbij wordt gecontroleerd dat het sluiten van de afsluiters geen aansluitingen zonder water zet of met een te lage druk water levert. Slechts één van de 10 werkdagen wordt doorgerekend met de 10 gesloten afsluiters. Dit kan desgewenst herhaald worden voor veel verschillende combinaties van 10 gesloten afsluiters.

4.1.4 Sensorstrategie

Wederom is de beoogde opbrengst van het project de bepaling van een goede sensorstrategie. Een sensorstrategie wordt gedefinieerd door 1) de dichtheid van druksensoren, 2) de meetfrequentie en 3) het beste meetmoment.

Om te komen tot een aanbeveling voor een sensorstrategie is weer een aanpak in een aantal stappen gevolgd:

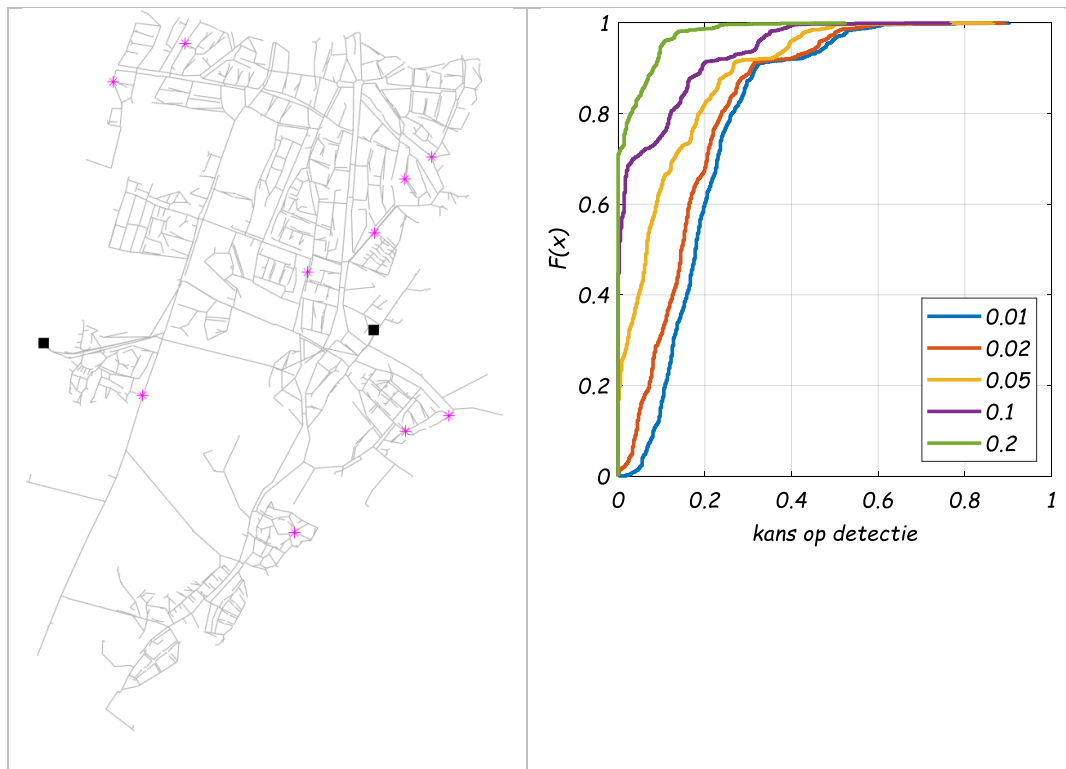
- 1 Net als bij lekdetectie is het uitgangspunt dat de meetfrequentie ca. eens per dag is, en dat het tijdvenster waarin gemeten wordt tussen 7:30 en 8:30 u is.
- 2 Met voorbeeldberekeningen van referentiescenario en lekscenario's is een inschatting gemaakt van wat een goed referentiescenario is en hoe de sensorstrategie beoordeeld kan worden (zie §4.2). Deze beoordeling vindt met name plaats op de afwijking die een individuele meter kan detecteren.
- 3 Voor verschillende scenario's wordt de detectiekans bepaald tijdens het gekozen tijdsvenster, en op basis van detectiekans kan worden bepaald hoe groot de meetdichtheid zou moeten zijn voor detectie (§4.3).

4.2 Eerste resultaten en definitie van de methode

4.2.1 Dag met normale drinkwatervraag

Om te beoordelen of tijdens een dag met normale drinkwatervraag onbedoeld gesloten afsluiters gedetecteerd kunnen worden (detectiesituatie 1 uit §4.1.2) is 1) een referentieprofiel gemaakt op basis van de minimale en maximale druk in de 10 werkdagen (zonder gesloten afsluiters), met verschillende precisie van de druksensor en 2) een voorbeeld van een afsluitersscenario met 10 willekeurige afsluiters gesloten op een van de 10 werkdagen (Figuur 4-1, links toont de locaties). Er is sprake van detectie wanneer het verschil tussen referentieprofiel en afsluitersscenario groter is dan de precisie van de druksensor. De detectiekans volgt dan uit het aantal detecties dat tijdens het piek uur (7:30 – 8:30 u) gevonden wordt. De detectiekans op iedere knoop kan worden uitgezet als een cumulatieve frequentieverdeling.

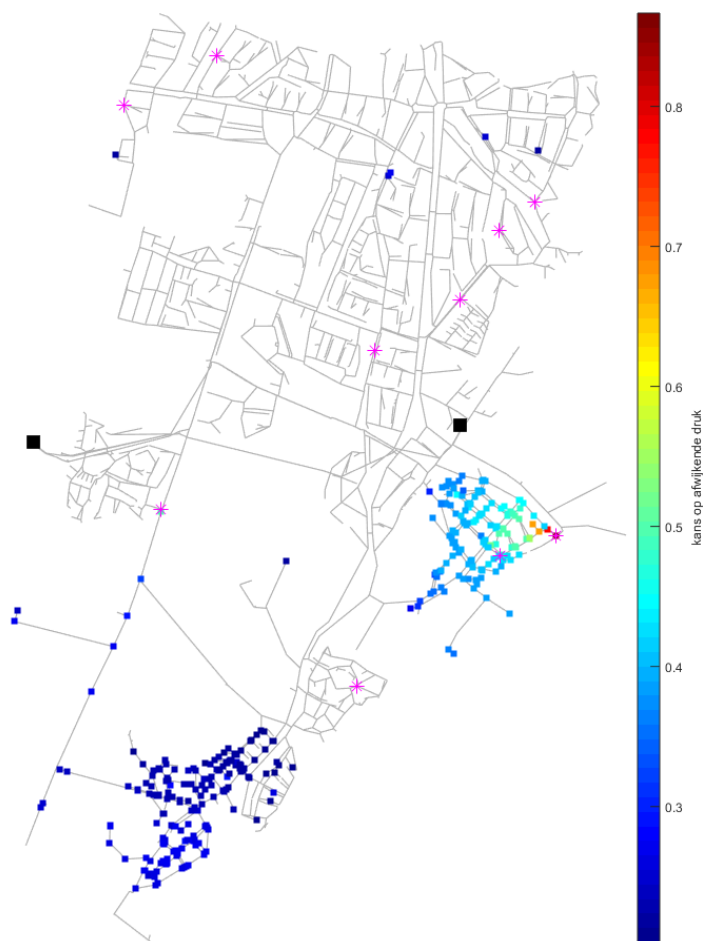
Figuur 4-1 (rechts) laat zien dat met druksensoren die met een precisie van 0,05 mwk kunnen meten (de gele lijn) voor 20% van de potentiële meetlocaties (knopen met verbruik) de drukmeting binnen het drukbereik (minimaal tot maximaal) van de referentie vallen (kans op detectie is 0, cumulatieve frequentie 0,2). Voor ca. 20% van de meetlocaties is de kans op detectie groter dan 20% (kans op detectie is 0,2, cumulatieve frequentie 0,8). Hoe lager de gevoeligheid, hoe kleiner de kans op detectie. Bij een precisie van 0,2 mwk (de groene lijn) zijn er maar 25% van de meetlocaties die een kans op detectie hebben, slechts enkelen hebben een kans groter dan 20%. De lijn voor een precisie van 0,5 mwk is niet geplot, omdat dit altijd tot 0% leidt.



Figuur 4-1. Links: het netwerkmodel van Heemstede, met in zwart het voedingspunt (vaste druk) en watertoren. In paars de 10 willekeurige afsluiters die gesloten zijn. Rechts: cumulatieve frequentieverdeling van de kans op detectie per knoop voor verschillende accuratesse van de druksensor (in mwk).

Het is niet relevant dat een foute afsluiterstand in een groot deel van het netwerk niet detecteerbaar is. Wat ter zake doet, is dat deze in een klein deel van het netwerk wél detecteerbaar is. Dit aspect is maar beperkt in Figuur 4-1 te kwantificeren. Wanneer gesteld wordt dat op ten minste 10 knopen sprake is van detectie (bij 10 van de 2046 knopen betekent dit het 0,5 of 99,5 percentiel), dan is de minimale detectiekans van deze 10 knopen 60% bij een sensorprecisie van 0,01 mwk en 23% bij een precisie van 0,2 mwk.

Daarnaast is het relevant of de locaties met detectie bij elkaar liggen, en zo een indicatie geven voor de locaties met onbedoeld gesloten afsluiters. Voor de situatie met 0,05 mwk (gele lijn uit Figuur 4-1 rechts), is de waarschijnlijkheid van detectie daarom per knoop geplot in het netwerkmodel (zie Figuur 4-2). De figuur laat zien dat in een groot deel van het netwerk er onopgemerkt afsluiters dicht kunnen staan. In het oostelijk deel van Heemstede, in een gebiedje waar 2 afsluiters gesloten zijn, is sprake van detectie (op veel knopen meer dan 40%). En ook in het zuiden is effect van een afsluiting te zien (detectiekans van ca. 30% op alle knopen), maar er is niet een gesloten afsluiter in dit gebied zelf. In het westen is geen effect op de gemeten druk (detectiekans < 20%), er is voldoende voeding via andere leidingen naar het gebiedje ten westen van de gesloten afsluiter die het dichtst bij de watertoren zit.



Figuur 4-2. Het netwerkmodel van Heemstede, met de zwarte blokjes het voedingspunt (vaste druk) en watertoren (rechts) en de paarse sterretjes de 10 willekeurige afsluiters die gesloten zijn. De gekleurde bolletjes geven de verbruikspunten aan waar de kans op detectie groter dan 20% is, waarbij de kleur de grootte van de kans codeert, bij 0,05 mwk nauwkeurigheid van de drukopnemer.

Er is niet expliciet getoond wat het gemeten verschil is, maar uit Figuur 4-1 (rechts) blijkt dat de afwijkingen klein zijn, kleiner dan 0,5 mwk. Dit stemt niet hoopvol om andere afsluiters wel te detecteren. Het leidingnet van Heemstede is zodanig overgedimensioneerd dat enkele gesloten afsluiters niet zo maar opvallen. Eerst is naar andere detectiesituaties gekeken (in de volgende twee paragrafen) voordat besloten is of de hier uitgevoerde exercitie nogmaals met andere sets van gesloten afsluiters wordt herhaald.

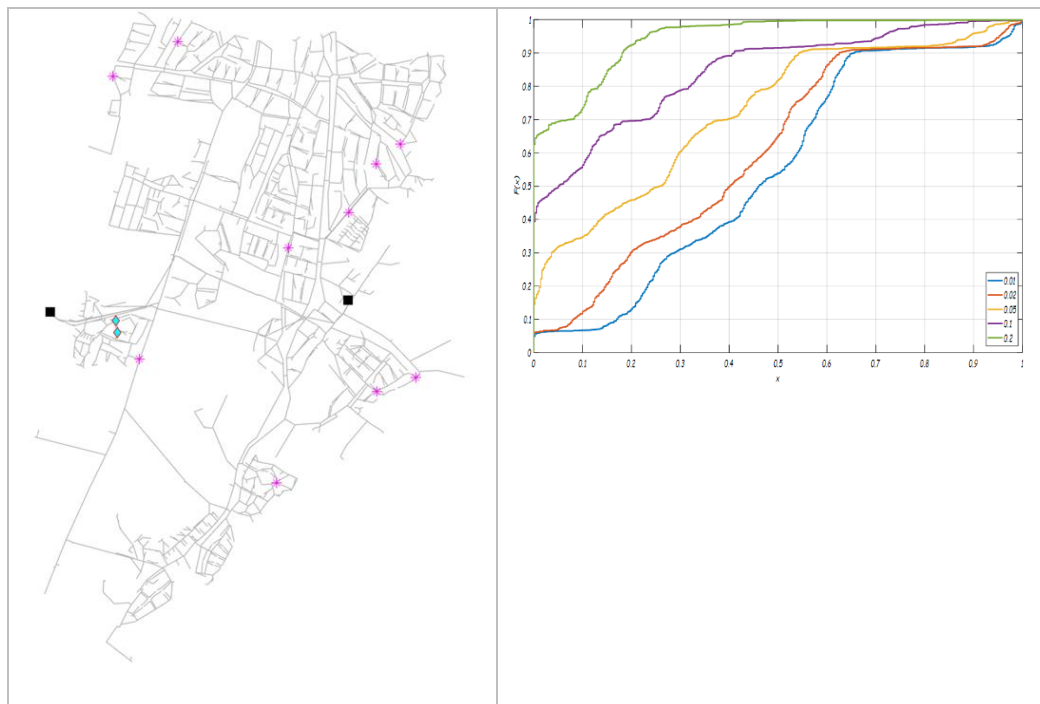
4.2.2 Dag met een groot lek

Voor een inventarisatie van de mogelijkheid voor detectie tijdens een groot lek (detectiesituatie 2 uit §4.1.2) zijn verschillende lekgroottes op knoop 944 geprobeerd, met als resultaat dat óf iedereen een lage druk (< 15 mwk) heeft óf niemand. Met de leidingnetmodelleur van Waternet is gekeken of een goed scenario gevonden kon worden waar een lek leidt tot een beperkt effect (aantal knopen met een lage druk, maar meeste knopen geen effect), maar dit bleek niet eenvoudig. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt doordat in het model van Heemstede maar één leveringspunt met vaste druk en een watertoren aanwezig zijn. In andere modellen zou dit mogelijk wel een geschikte methode zijn. Besloten is om deze detectiesituatie niet verder te simuleren.

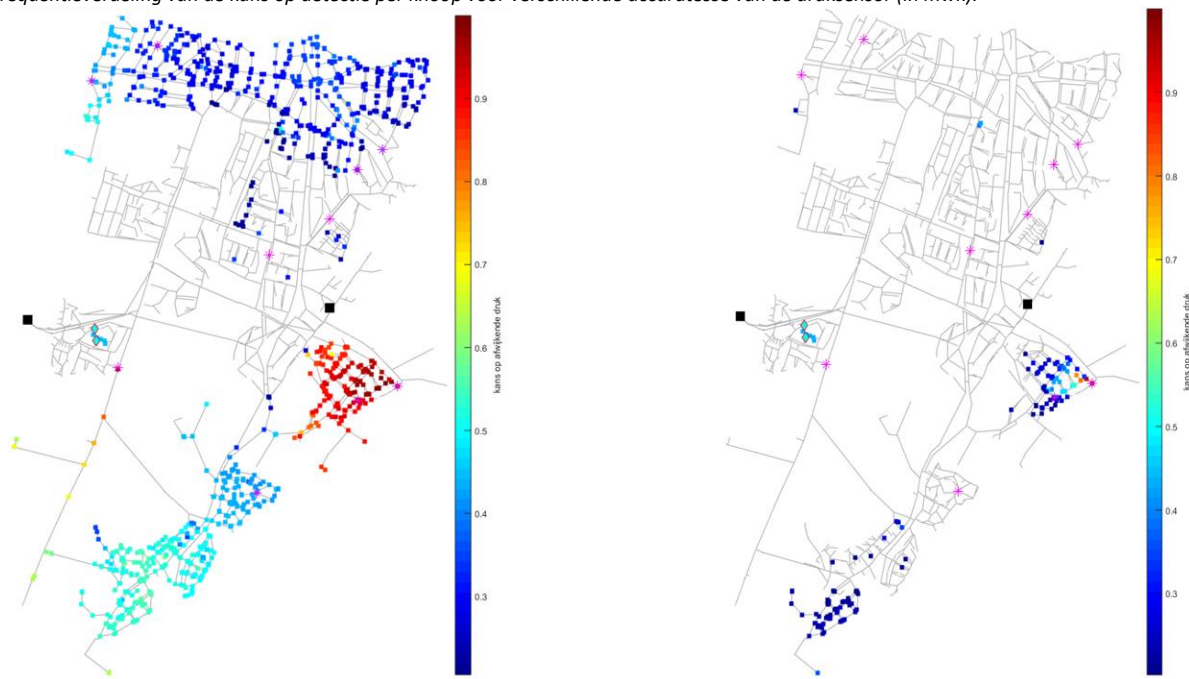
4.2.3 Dag met normale drinkwatervraag en sectie-isolatie

Voor detectie tijdens sectie-isolatie (detectiesituatie 3 uit §4.1.2) is een eerste vingeroefening gedaan met een willekeurige sectie die wordt geïsoleerd voor reparatie. De druk op alle verbruiksknoppen in geval van sectie-isolatie zonder en met de 10 extra gesloten afsluiters is met elkaar vergeleken. Figuur 4-3 laat zien dat de kans op een

afwijkende druk (ten opzichte van dezelfde situatie zonder de 10 verkeerde afsluiterstanden) een stuk groter wordt dan zonder sectie-isolatie (§4.2.1). Figuur 4-4 laat zien op welke locatie een afwijkende druk wordt gevonden. Wanneer een druksensor heel gevoelig is (bijv. 0,2 mwk, Figuur 4-4 links) geeft deze op veel locaties een iets andere druk t.o.v. het referentiescenario; bij een wat minder goede druksensor (0,5 mwk, rechts) blijven er veel minder locaties over.



Figuur 4-3. Links: het netwerkmodel van Heemstede, met in zwart het voedingspunt (vaste druk) en watertoren. In paars de 10 willekeurige afsluiters die gesloten zijn. De (drie) blauwe ruitjes met rode lijnen geven de afsluiters aan voor sectie-isolatie. Rechts: cumulatieve frequentieverdeling van de kans op detectie per knoop voor verschillende accuratesses van de druksensor (in mwk).



Figuur 4-4. Het netwerkmodel van Heemstede, met de zwarte blokjes het voedingspunt (vaste druk) en watertoren (rechts) en de paarse sterretjes de 10 willekeurige afsluiters die gesloten zijn. De blauw/rode ruitjes geven de sectie-isolatie aan. De gekleurde bolletjes geven de verbruikspunten aan waar de kans op detectie groter dan 20% is, waarbij de kleur de grootte van de kans codeert. Links: bij 0,2 mwk nauwkeurigheid van de drukopnemer; en rechts: bij 0,5 mwk nauwkeurigheid van de drukopnemer.

Dit detectiescenario geeft dus een grotere kans op detectie van gesloten afsluiters. Er zijn echter twee kanttekeningen bij te maken. Ten eerste is het referentiescenario hier het model zonder de 10 gesloten afsluiters, met dezelfde verbruiksprofielen als in het testscenario. Dat betekent dus dat de referentie heel nauwkeurig bekend is, dit is verre van realistisch. Ten tweede zijn de drukverschillen niet groot, en is derhalve een drukopnemer nodig met een heel hoge nauwkeurigheid om te kunnen spreken van detectie.

4.2.4 Kader voor de beoordeling van sensorstrategieën

De drukmeting op de sensoren in geval van 10 gesloten afsluiters wordt vergeleken met druk die is gemeten in het referentiescenario zonder de gesloten afsluiters. Omdat het doorrekenen van 10 verschillende dagen veel tijd kost, is er voor gekozen om hier met slechts een referentiescenario te rekenen. Dit suggereert dat er een perfect model beschikbaar is van de gemeten dag, maar dan zonder de gesloten afsluiters. Dit lijkt onwaarschijnlijk, maar een model op basis van metingen, in de situatie zonder gesloten afsluiters is er ook niet. Omdat in dit geval de metingen worden vergeleken met een referentiescenario op basis van een model (en niet op basis van historische metingen) wordt de afwijking in druk op basis van de absolute waarde bepaald, en gaat het bij de sensornauwkeurigheid niet om de precisie maar om de juistheid. Deze wordt door fabrikanten opgegeven, en is typisch in de orde grootte van 0,5 mwk.

Wanneer de druk in het afsluitersscenario (bijv. 32 mwk) lager is dan de druk van de referentie (bijv. 33 mwk) dan is er sprake van detectie op de druksensor wanneer de juistheid van de drukopnemer kleiner is dan het verschil (in het voorbeeld 1 mwk, dus een detectie want de juistheid is 0,5 mwk). Met 360 metingen (elke 10 sec tussen 7:30 u en 8:30) zal mogelijk niet op elk tijdstip een afwijking worden gevonden. De kans op het vinden van een afwijking wordt gedefinieerd door het aantal tijdstippen met afwijking te delen door 360.

4.3 Resultaten simulaties

Omdat in het netwerk van Heemstede geen goede lekscenario's (zonder sectie-isolatie) gedefinieerd kunnen worden, wordt het detectiescenario tijdens een groot lek niet verder uitgewerkt. Het detectiescenario tijdens sectie-isolatie geeft een duidelijk grotere kans op detectie vergeleken met een detectiescenario tijdens normale operatie. De scenario's met sectie-isolatie worden hier verder uitgewerkt.

Met dezelfde 10 afwijkende afsluiterstanden van §4.2.3 zijn in totaal 30 verschillende sectie-isolaties doorgerekend, waarbij geen secties zijn geselecteerd waarbij één van de 10 foutieve afsluiters wordt bediend. Als grens is gesteld dat er ten minste 0,5 mwk verschil zat tussen het referentiescenario (specifieke werkdag) en het scenario met een sectie-isolatie (zelfde werkdag, inclusief de 10 gesloten afsluiters) ten tijde van het piek uur.

De resultaten worden als volgt samengevat:

- 26 van de 30 situaties (87%): minder dan 10 knopen detecteren een afwijking. Dit betekent dat er geen reden is om aan te nemen dat foutieve afsluiters worden gedetecteerd.
- 1 van de 30 situaties (3%): 40 knopen (2% van de knopen met verbruik) detecteren een afwijking. Dit kan een reden zijn om op zoek te gaan naar een foutieve afsluiter.
- 3 van de 30 situaties (10%): meer dan 2040 knopen detecteren een afwijking. Meer specifiek geldt dat 2041, 2044 en 2045 van de in totaal 2046 knopen met verbruik een afwijking hebben, dus vrijwel alle knopen. Deze situatie treedt op wanneer een belangrijke sectie wordt geïsoleerd en wordt niet veroorzaakt door foutieve afsluiters. Ook in dit geval worden geen foutieve afsluiters opgespoord.

Deze 10 gesloten afsluiters kunnen worden gevonden in de volgende gevallen.

- tijdens werkzaamheden waar ze bediend zouden worden (grotweg in 1% van de werkzaamheden wanneer de bedieningskans gelijk is aan 10/989).
- tijdens werkzaamheden waar een andere sectie wordt geïsoleerd die tot meetbare drukafwijkingen leidt (in 1 van de 30 gevallen, dus ca. 3% van de werkzaamheden).

Bij een andere set van 10 gesloten afsluiters, of bij andere sectie-isolaties zullen de uitkomsten anders zijn. Er zijn waarschijnlijk ook wel configuraties te vinden die een grote kans op detectie opleveren, en mogelijk zijn dat precies sets van gesloten afsluiters die leiden tot ongewenste situaties.

Met één meting per dag (piekuur), en een juistheid (want vergeleken met verwachte absolute waarde van een model) van 0,5 mwk zonder natuurlijke variatie van verbruik (d.w.z. een perfect model met open afsluiters) geldt voor de detectie van gesloten afsluiters:

- Niet mogelijk om in normale omstandigheden gesloten afsluiters te detecteren.
- Niet mogelijk om te toetsen met een groot lek in dit netwerk.
- Tijdens sectie-isolatie: de specifieke set van 10 gesloten afsluiters wordt slechts in 1 van de 30 sectie-isolaties gevonden.

Om de laatste conclusie meer te kunnen veralgemeniseren, is het nodig om ten eerste meer sets van 10 afsluiters door te rekenen en ten tweede als referentie niet een perfect model te gebruiken, maar een model met meer onzekerheden erin. Het lastige hiervan is dat er bijna per definitie geen referentiemodel beschikbaar is op basis van metingen bij open afsluiters (met of zonder de sectie-isolatie). Alternatief zou zijn om als referentiemodel het geaggregeerde model te nemen dat Waternet in InfoWorks heeft gebouwd.

Om de algemene conclusie te kunnen trekken dat foute afsluiterstanden moeilijk te detecteren zijn, wordt aanbevolen om (veel) meer sets van afsluiters door te rekenen.

5 Discussie

5.1 Praktische aspecten van drukmetingen in huishoudens

Er is een aantal praktische aspecten van drukmetingen waar in deze modelstudie nog geen rekening mee is gehouden, maar die mogelijke toepassingen nog verder kunnen compliceren.

- Onnauwkeurigheid van drukopnemers kan voortkomen uit detectielimiet, precisie of juistheid.
 - De toepassing in dit project vraagt om drukmetingen waarbij nog water wordt geleverd, waarbij geldt dat uit de praktijk duidelijk is dat de detectielimiet (de minimale druk die gemeten kan worden) geen probleem is.
 - De juistheid (hoe goed komt de gemeten waarde overeen met de werkelijke waarde, uitgedrukt als de gemiddelde afwijking) is bij gangbare drukopnemers niet heel hoog, en bij goedkopere drukopnemers is deze in de ordegrootte van 0,5 mwk. Omdat de toepassing voor lekdetectie uitgaat van een verschil in druk tussen een referentiescenario zonder lek (historische metingen) en de situatie met een lek is de juistheid waarschijnlijk niet van heel groot belang. Voor de detectie van foutieve afsluiterstanden gaat het wel om de juistheid (want er wordt vergeleken met een verwachte absolute modelwaarde). Het is mogelijk om de juistheid te vergroten door kalibratie (wat een meter duurder maakt), de juistheid kan afnemen door drift (bijv. onder invloed van biofilm). Een mogelijkheid is om gedurende de nacht alle drukopnemers te vergelijken en de resultaten te gebruiken om de meters onderling te kalibreren. Dit betekent dat de drukmetingen bruikbaar blijven en falende drukopnemers geïdentificeerd kunnen worden.
 - Het aspect precisie (de mate van herhaalbaarheid uitgedrukt in de standaardafwijking) is bij goedkope meters naar verwachting niet hoog, en dit is wel een aspect waar rekening mee moet worden gehouden. Fabrikanten geven geen waarde op voor de precisie. De precisie is ingeschat op 0,05 mwk, een factor 10 kleiner dan de juistheid. In de casestudie van lekdetectie is de variatie ten gevolge van verbruik belangrijker dan de precisie.
- Wanneer de uitgaande druk van een pompstation wordt gestuurd op drukmetingen in het voorzieningsgebied zal het drukverloop over de dag er anders uitzien dan in de modelstudie waar met een vaste druk af PS is gerekend. Wanneer een gebied wordt voorzien met één voeding is waarschijnlijk de voorspelbaarheid van het drukverloop redelijk goed. Wanneer een gebied wordt voorzien met meerdere voedingen zal altijd een hoge spreiding optreden vanwege een zekere onvoorspelbaarheid van de combinaties van voedingen en mogelijke regelingen. Wanneer een lek ontstaat zal de druk af PS over het algemeen worden opgevoerd. Dit maakt de detecteerbaarheid van een lek met druksensoren minder eenduidig; goed bruikbaar voor knopen dichtbij het drukmeetpunt waarop gestuurd wordt en minder goed bruikbaar op andere knopen. Door met name naar het drukverschil te kijken in plaats van naar de absolute druk bij de watermeter kan nog wel een lek worden gedetecteerd. Daarbij is dan wel een centrale analyse van data nodig, de druksensor kan niet puur op basis van het eigen signaal en de historie een alarm geven.
- Om energie (beperkte levensduur van de batterij) te sparen (zie kader hieronder) is uitgegaan van één drukmeting per dag, tijdens het piek uur (7:30 – 8:30). Omdat vooral de communicatie energie vraagt, is het ook mogelijk om uit te gaan van een keer per dag versturen van data, waarbij wel meer metingen op een dag zijn verzameld. Er kunnen bijv. meerdere metingen tijdens dat uur worden gedaan. Als alternatief kan ook ieder uur een meting worden gedaan (tijdens de dag, tijdens de nacht is minder zinvol). Tijdens weekend of feestdagen kan een ander tijdsvenster worden gekozen, bijv. tussen 9:30 en 10:30. Dunea zal in 2020 12% van de (klein) zakelijke klanten van een digitale datalogger voorzien.

Na 2020 wordt dit bij Dunea verder uitgerold bij alle (klein) zakelijke klanten; voor huishoudelijke watermeters is nog geen plan opgesteld. Bij de zakelijke klanten en

DMA's wordt gewerkt met dataloggers met een 220V voeding waarvan de data per vijf minuten wordt opgeslagen. De beperkende factor voor hoogfrequente communicatie bij huishoudens is de levensduur van de batterij. Bij laag frequente communicatie is de initiële standtijd van een volumewatermeter 20 jaar en van een ultrasone watermeter 15 jaar. Bij hoogfrequente communicatie wordt de standtijd alleen maar korter.

- Door tijdens het piek uur meer metingen te doen kan de detectiekans worden verhoogd. Op basis van de detectiekans van één meting, kan de detectiekans voor meerdere metingen worden berekend. In §3.2.2 is uitgegaan van een bepaalde strategie om het aantal vals positieven te beperken (bijv. er is sprake van detectie als minstens 3 van de 5 metingen positief zijn). Met dit uitgangspunt kan de detectiekans worden vergroot als de detectiekans voor één meting minstens 50% is.
- Bij het verbruik in een woning zakt de druk door drukverlies over dienstkraan en aansluitleiding. Er is in het model geen rekening gehouden met deze drukverliezen. Het is nog niet onderzocht, maar het zou aan te raden kunnen zijn, om alleen drukmetingen te gebruiken wanneer er geen verbruik is in de woning. Dit beperkt het aantal metingen enigszins, maar ook in een gezin van 4 personen zal tijdens het piek uur ca. 30 minuten lang geen verbruik plaatsvinden.

5.2 Toepasbaarheid van drukmetingen voor leklocalisatie in een DMA-aanpak

In dit project is gerekend met 1) een realistische variatie in verbruik, en dus in druk; 2) met een realistische nauwkeurigheid van relatief goedkope maar wel robuuste drukopnemers die in een watermeter gebouwd kunnen worden; 3) met een laagfrequente meting van de druk zodat de levensduur van de batterij niet te veel verkort wordt; en 4) met de mogelijkheid om bij elke watermeter te meten. Bij metingen op DMA-niveau (waarbij aan de ingangen de volumestroom en druk wordt gemeten en mogelijk nog op enkele plekken in de DMA ook druk) zal het eerste uitgangspunt gelden, maar kan de nauwkeurigheid van de drukopnemer veel hoger zijn en de meetfrequentie ook. In dat geval geldt echter wel dat er veel minder meetlocaties zijn. In dit project is niet uitgezocht wat de consequenties zijn voor de mogelijkheden van de DMA-aanpak.

In het TKI-project Callisto wordt daar wel naar gekeken. Ook zijn er een aantal drinkwaterbedrijven die met Burst Alert en Burst Finder van RHDHV praktijkervaring aan het opdoen zijn. Dunea is bij beide sporen betrokken. Daarnaast is er een afstudeerder bij RHDHV bezig om ook middels een modelmatige beschouwing te komen tot inzicht m.b.t. lekken die kunnen worden gedetecteerd. Dunea gaat Burst Finder toetsen middels een proef in de DMA van de wijk Duindorp (ca. 3.000 woningen, vrijwel alleen huishoudelijk). Er zijn 6 drukmeters geplaatst en er wordt gestart met een gesimuleerd lek dat aanvankelijk van 9 m³/u meet. Vervolgens wordt het lek verkleind.

De resultaten van TKI Callisto en het voorliggende DPWE-onderzoek worden samen in een artikel gepresenteerd waarin enkele vuistregels worden gegeven voor de resolutie die gehaald kan worden, dit zal in 2020 worden gepubliceerd.

5.3 Business case

In het projectplan is de intentie uitgesproken om informatie over kosten (incl. kosten communicatie) van IWM te verzamelen bij de projectgroep leden, zodat alle ingrediënten voor een business case gepresenteerd zouden worden. Dit is niet gedaan. Ten eerste zijn de kosten nog in ontwikkeling, zodat er slechts een momentopname gepresenteerd zou worden die bij de afronding van het rapport al gedateerd zou kunnen zijn. Ten tweede wordt de keuze voor een bepaald communicatieprotocol bijv. voornamelijk gedreven door de dichtheid van adressen die bemeterd worden, zodat voor de DPWE-bedrijven geen gelijke uitgangspunten hoeven te gelden. Ten derde lijkt het technisch niet erg interessant om IWM te voorzien van druksensoren omdat kleine lekken en dichte afsluiters niet gedetecteerd kunnen worden.

5.4 Optimalisatie

Door de lekscenario's te vergelijken met het referentiescenario kan worden bepaald welke soort lekken (locatie, grootte) met welke sensorstrategie kunnen worden geïdentificeerd en gelokaliseerd. Voor iedere sensorstrategie kunnen de kosten en de potentiële opbrengsten worden bepaald. Dit is voeding voor een business case die de waterbedrijven kunnen opstellen. Deze business case kan ook vergeleken worden met een andere aanpak om lekverliezen te beperken, zoals een aanpak op DMA-niveau.

Op basis van deze inzichten kunnen waterbedrijven inzicht krijgen voor opbrengsten en kosten en welke randvoorwaarden bij een optimale sensorstrategie horen. Om het daadwerkelijke optimum (locatie sensoren etc.) te bepalen is een numeriek optimalisatiealgoritme nodig. Een tool als Gondwana zou kunnen worden ingezet om het werkelijke optimum te bepalen.

5.5 Ervaring met IWM in het buitenland

De scope van het DPWE project was specifiek niet gericht op informatie over communicatieprotocollen, batterijlevensduur etc., maar op het toepassen van extra sensoren voor de toepassing in operatie en beheer van het leidingnet. Daar waar in het buitenland al veel AMR zijn geïnstalleerd is met name veel te leren van de praktische aspecten. De buitenlandse voorlopers gebruiken de IWM eigenlijk alleen voor automatische afrekening en een beetje lekdetectie bij klanten. De Spaanse waterbedrijven waren niet geïnteresseerd in de mogelijkheid van extra sensoren, de Deense hebben wel gekeken naar mogelijkheden van temperatuursensoren.

Kamstrup heeft wel een commercieel product (watermeter) op de markt met temperatuursensoren en met een noise logger. Toepassingen door waterbedrijven zijn nog niet gerapporteerd en de mogelijkheid van de noise logger in lekdetectie is alleen theoretisch (en beperkt) beschreven.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Een praktijkproef bij Oasen heeft laten zien dat druksensoren (waarschijnlijk goed gekalibreerd, en ingesteld op continue metingen, en slechts op enkele plekken geïnstalleerd) in een leidingnet een bepaald gesimuleerd lek konden helpen detecteren. Deze DPWE-studie heeft in een virtuele testomgeving heel veel verschillende lekken gesimuleerd (van 1 tot 50 m³/u) op veel verschillende locaties (niet alleen op een brandkraan), waarbij een realistische variatie van verbruik is gesimuleerd, en waarbij uitgegaan is van druksensoren op iedere watermeter met een beperkte precisie en slechts één meting per dag.

Onder deze omstandigheden blijkt:

- Lekken van 20 en 50 m³/u kunnen worden gedetecteerd met een relatief lage dichtheid van druksensoren. Deze lekken zouden ook met een DMA-aanpak goed meetbaar moeten zijn. De lekken die op deze manier te detecteren zijn, zijn zo groot dat je daar in Nederland eigenlijk geen apart lekdetectiesysteem voor nodig hebt. De leidingen van de DPWE-bedrijven liggen bijna allemaal in stedelijk gebied dus er is altijd wel iemand die het meldt.
- Lekken van 5 en 10 m³/u kunnen soms worden gedetecteerd (in 20% respectievelijk 60% van de gesimuleerde locaties), en daarvoor is een fijnmazig netwerk van druksensoren nodig. Deze lekken zullen met een DMA-aanpak ook niet goed gevonden kunnen worden; hier heeft de watermeter met druksensor mogelijk een meerwaarde als deze in voldoende woningen geïnstalleerd wordt.
- Lekken van 1 en 2 m³/u zijn te klein om gedetecteerd te kunnen worden met alleen goedkope drukmetingen. Deze lekken leiden tot kleine afwijkingen in druk ten opzichte van de variatie ten gevolge van normaal verbruik.

Voor lekdetectie is het voldoende om een druksensor een referentieprofiel aan te leren (op basis van metingen van voorgaande 2 weken, zoals in deze studie is gesimuleerd). Vervolgens kan bij een afwijking een alarm worden afgegeven. Dit betekent dat enige intelligentie in de sensor wordt ingebouwd. Wanneer er op druk gestuurd wordt, dan is het beter om het drukverschil te analyseren, in plaats van de absolute waarde van de druk. In dat geval zit de slimheid niet in de meter zelf, maar is een centrale verwerking van data nodig.

Voor leklokalisatie is een combinatie van metingen nodig; en moeten de metingen van de individuele druksensoren centraal worden verzameld en geanalyseerd. De intelligentie zit dan niet zo zeer in de druksensoren zelf als wel in het netwerk van de sensoren.

Voor de detectie van afsluiters in een afwijkende stand is in een beperkte simulatiestudie met een perfect referentiemodel en een relatief hoge nauwkeurigheid (juistheid) van de drukmetingen gevonden dat het niet vanzelfsprekend is dat gesloten afsluiters gevonden worden. In ieder geval is voor een detectie van foutieve afsluiters met drukmetingen een goed hydraulisch model onontbeerlijk, waarbij de intelligentie gevonden moet worden in het netwerk van sensoren in combinatie met een hydraulisch model, en dus niet in de druksensoren zelf.

Bij de echte grote klappers lijken extra drukmeetpunten voor Waternet waardevol om de OLM (> 50 kPa) beter te kunnen inschatten.

6.2 Aanbevelingen

De methode om een virtueel lab op te zetten met realistische verbruikspatronen en een realistische variatie daarin in combinatie met realistische meetnauwkeurigheden biedt veel potentie om ook andere meetstrategieën door te rekenen, bijv. de meerwaarde van temperatuur-, EGV-, pH- of troebelheidsensoren of noise correlators op digitale watermeters. Een ander voorbeeld is te onderzoeken wat het effect is van het verhogen van de meetfrequentie, en de analyse van een tijdreeks in plaats van enkele metingen.

Er zijn watermeters op de markt met temperatuursensoren en noise correlators; andere soorten sensoren zijn nog niet in watermeters geïntegreerd. Voor temperatuur en de noise correlators geldt dan dat naast de theoretische (modelmatige) beschouwing ook door waterbedrijven praktijkervaring kan worden opgedaan met dit type sensoren. En dat de theorie daarmee getoetst kan worden.

Het onderwerp IWM staat erg in de belangstelling bij de Nederlandse waterbedrijven, waarbij iedereen ook nog wat zoekend is. Tijdens het project werd het als een gemis ervaren dat er in het projectplan alleen ruimte was opgenomen om over onderzoek te praten, er en nauwelijks ruimte was om als projectgroep ervaringen uit te wisselen. De platformfunctie van DPWE is op deze manier niet optimaal benut. Aanbeveling is om dit aspect in een vervolgproject meer aandacht te geven. Waar bijvoorbeeld behoefte aan blijkt te zijn, is meer zicht op de 'life cycle costs van digitale watermeters'. Wat kan worden verwacht aan extra onderhoud c.q. het oplossen van storingen, wanneer digitale watermeters grootschalig worden uitgerold? Hoe verhouden life cycle costs zich tot die van conventionele watermeters? Wat zijn de ervaringen in het buitenland? Dit zijn aspecten die zich meer lenen voor het uitwisselen van ervaringen, dan voor een onderzoeksproject.

Een vervolgproject zou kunnen bestaan uit een pilotproef met digitale watermeters voor het opsporen van lekken. Waarbij de waterbedrijven vooral naar de kosten van aanschaf, installatie, datavergaring en onderhoud kijken; en waarin KWR de theoretische beschouwing kan toetsen en de sensorstrategie kan optimaliseren. In hetzelfde project kan de inzet van digitale watermeters voor het detecteren van foutieve afsluiterstanden verder worden onderzocht.

7 Referenties

- Arregui, F., Cabrera, E. en Cobacho, R. (2006). *Integrated Water Meter Management*, IWA Publishing.
- Arregui, F. J., Gavara, F. J., Soriano, J. en Pastor-Jabaloyes, L. (2018). "Performance Analysis of Ageing Single-Jet Water Meters for Measuring Residential Water Consumption." *Water*, 10(5), 612.
- Blokker, E. J. M. en Albert, M. F. M. A. (2017). "Overzicht toepassing van sensoren en ICT in de watermeter." *KWR 2017.101*, KWR, Nieuwegein.
- Ferrandez-Gamot, L., Busson, P., Blesa, J., Tornil-Sin, S., Puig, V., Duviella, E. en Soldevilla, A. (2015). "Leak localization in water distribution networks using pressure residuals and classifiers." *IFAC-PapersOnline*, 48(21), 220-225.
- Lambrou, P. T., Anastasiou, C. C., Panayiotou, C. G. en Polycarpou, M. M. (2014). "A Low-Cost Sensor Network for Real Time Monitoring and Contamination Detection in Drinking Water Distribution Systems." *IEEE Sensors journal*, 2765-2772.
- Lieverloo, J. H. M. v. en Giethoorn, P. K. (2000). *Factoren die de miswijzing van ingebruik zijnde watermeters beïnvloeden*, Kiwa N.V., Nieuwegein. SWI 99.257.
- Moors, J. (2016). "Model-based leak localization in small water supply networks, Case study in DMA Leimuiden." MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Perez, R., Nejjari, F., Puig, V., Quevedo, J., Sanze, G., Cugero, M. en Peralta, A. (2011). "Study of the isolability of leaks in a network depending on calibration of demands." *11th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, Exeter.
- Quevedo, J., Cugero, M. A., Perez, R., Nejjari, F., Puig, V. en Mirats, J. M. (2011). "Leakage location in water distribution networks based on correlation measurements of pressure sensors." Terrasa Spain.
- Steffelbauer, D. B., Gunther, M. en Fuchs-Hanusch, D. (2017). "Leakage localization with differential evolution: A closer look on distance metrics." *Procedia Engineering*, 186(XVIII International conference on water distribution systems, WDSA2016), 444-451.
- Thienen, P. v. en Vries, D. (2013). "Backtracing van verontreinigingen in het distributienet. Methoden en bronbepaling met stochastische watervraag." KWR, Nieuwegein.

I Informatie via persoonlijke contacten

In mei 2019 heeft Mirjam Blokker een bezoek gebracht aan Valencia, specifiek aan drie waterbedrijven (Aguas de Valencia/ Global Omnium, Aguas de Murcia en FACSA in Castellón) met een focus op digitale watermeters, en aan de Universitat Politècnica de València (UPV). Op het CCWI congres 2019 (2-4 september, te Exeter) is de poster gepresenteerd die in het DPWE-onderzoek van 2017 is gemaakt met de kwalitatieve beschrijving van mogelijke voordelen van IWM en extra functionaliteit op deze watermeters. De informatie uit de contacten die daar zijn opgedaan is (nog) niet in de literatuur te vinden.

I.1 Business cases AMR

De drie bezochte Spaanse waterbedrijven maken serieus werk van automatic meter reading (>30% al AMR, streven naar 100%). De business case voor deze waterbedrijven is puur op het aspect “op afstand afleesbaar” al positief. Dat komt doordat in Spanje (conventionele) watermeters minimaal eens per drie maanden moeten worden afgelezen door een medewerker van het waterbedrijf. De AMR's genereren veel data. De waterbedrijven benutten nog niet alle data, maar er zijn wel al enkele toepassingen:

- Lekken bij klanten, en ze daarop attenderen.
 - Vooral nuttig voor mensen met vakantiewoningen die niet permanent bewoond zijn.
 - Ze sporen er in Valencia 7000 per jaar op (op ca. 1,2 miljoen gebruikers).
- Granny alert, als bij aangemelde (oudere) klanten die zelfstandig wonen geen verbruik is, wordt de familie gewaarschuwd.
- Lekken in DMA's opsporen: verschil tussen ingaande volumes en gemeten consumptie. Zo wordt ook oneigenlijk gebruik van hydranten gevonden.
- Detectie van fraude: als meters teruglopen, tijdens warme dagen nauwelijks water verbruikt wordt, etc.
- Alle info ook aan de klant beschikbaar stellen. Klant kan eigen alarm instellen, bijv. voor vakantiewoning.
- Voeding voor de digital twin (Valencia).

Wat opvalt is dat men alleen gebruik maakt van de op afstand uitleesbare volumestroommetingen, en dus geen extra sensoren toepast. Ten tweede valt op dat er wel data-analyse gedaan wordt van de individuele metingen, maar geen data-analyse van de dataset als geheel.

Kamstrup heeft zijn (positieve) business case gedeeld voor de digitale (ultrasone) meter in Denemarken. In deze business case zijn de volgende zaken meegenomen:

- Verbeterde service: geen handmatige meteruitlezing, potentie voor consumenten om geld, energie en water te besparen, alarmen bij lekkage (50 gevallen in een jaar, gem. 183 m³ lekverlies), betere service als een klant een lekkage heeft, mogelijk om de meter elk jaar correct en nauwkeurig af te lezen - geen schattingen.
- Optimalisatie van administratie en operationele taken: gemakkelijker opvolging van wanbetalers, facturatiefrequentie kan hoger, klachten van klanten (m.b.t. de facturatie) kunnen gemakkelijker en sneller worden afgehandeld.
- Meer inkomsten: verkoop van meters en Kamstrup-afsluiters aan appartement- / woningcorporaties in Denemarken en daarmee ook individuele facturering aan de huurders, opsporing van fraude en meters met afwijkingen, minder gevallen van terugbetaling aan consumenten met lekken. Doordat verbruik in het lage bereik nauwkeuriger wordt gemeten, kan dat ook worden afgerekend.
- Waterbesparing: bewaking van lekverlies per uur - vroeger eenmaal per jaar.

I.II Verbeterd watermeterbeheer

De auteurs van het IWA handboek over watermeterbeheer (Arregui et al. 2006) werken aan de UPV. Gedemonstreerd zijn de nieuwste ontwikkelingen op dit vlak waarbij ook gebruik wordt gemaakt van de data van digitale watermeters. Data-analyse kan informatie geven over degradatie van watermeters. Zo kan onderzocht worden of groepen watermeters een vergelijkbare of afwijkende verandering van waterverbruik op dagbasis per woning (en dus per watermeter) laten zien. Wanneer cohort A een grotere toename van het afgelezen verbruik laat zien dan cohorten B en C in dezelfde periode, is er mogelijk een probleem met de nauwkeurigheid van de watermeters in cohort A. Redenen kunnen zijn dat cohort A een minder goede waterkwaliteit krijgt aangeboden (de miswijzing van de watermeter wordt dan kennelijk beïnvloed door de waterkwaliteit, zie bijv. Lieverloo en Giethoorn (2000)), of dat cohort A bij huishoudens is geïnstalleerd met een relatief groot waterverbruik (de miswijzing van de watermeter wordt dan kennelijk beïnvloed door het totale doorstroomde volume) (Arregui et al. 2018).

I.III Toepassing van noise loggers in de watermeter

Een extra functionaliteit op de digitale watermeter is een noise logger t.b.v. lekdetectie. Kamstrup heeft deze onlangs inderdaad op de markt gebracht, zie hun website voor enkele voorbeelden van lekdetectie met gesimuleerde lekken en leidingbreuken in een woning, op de aansluitleiding en op een brandkraan (<https://www.kamstrup.com/en-en/blog/5-examples-of-leaks-found-with-acoustic-leakage-detection>). Toepassingen door waterbedrijven zijn nog niet gerapporteerd en de mogelijkheid van de noise logger in lekdetectie is alleen theoretisch (en beperkt) beschreven.

I.IV Toepassing van temperatuursensor in de watermeter

Jonas Kirstein is promoveert aan de Technische Universiteit van Denemarken (DTU) op het onderwerp “Data-driven water distribution system analysis – exploring challenges and potentials from smart meters and beyond” (thesis begin 2020 verwacht). Op CCWI presenteerde hij de toepassing van temperatuursensoren op watermeters, in combinatie met een model dat het verloop van de temperatuur over de lengte van het leidingnet beschrijft (gebaseerd op eerder werk van KWR), met als doel het vinden van gesloten afsluiters. Hier wordt de temperatuur als een niet-conservatieve (dat wil zeggen veranderend over de tijd) tracer gebruikt om het pad dat het drinkwater door het leidingnet aflegt te bepalen.

In de presentatie werd duidelijk dat er eigenlijk onvoldoende data verzameld werd voor de beoogde toepassing. Er werd namelijk heel veel data uit de meetset gefilterd als zijnde een onbetrouwbare weergave van de drinkwatertemperatuur in het leidingnet. Wanneer er geen water wordt verbruikt, wordt de temperatuur van het water in de watermeter beïnvloed door de temperatuur in de meterkast. Met een meetfrequentie van eens per uur van zowel waterverbruik als de temperatuur, kon slechts van enkele metingen met voldoende zekerheid worden bepaald dat het een meting was tijdens verbruik, en dus de temperatuur van het drinkwater in het leidingnet representeerde. De enkele grote afwijkingen die werden gevonden tussen metingen en model bleken te komen door ofwel een verkeerde verdunning van het netwerkmodel, ofwel door verkeerde GPS-coördinaten van de watermeter. De metingen konden dus wel gebruikt worden om verschillen tussen model en werkelijkheid op te sporen.

Op basis van dit onderzoek werden suggesties gedaan voor mogelijke toepassingen van temperatuursensoren op watermeters en vervolgonderzoek (aangevuld met toelichting van de auteurs van dit rapport):

- Temperatuurmetingen geven inzicht in de bodemtemperatuur.
 - Op locaties die voldoende ver weg van de transportleiding liggen, zal de eindtemperatuur van het drinkwater gelijk zijn aan de bodemtemperatuur.

- Op deze manier kunnen warmtekaarten worden gemaakt voor de ondiepe ondergrond die ook voor andere sectoren interessant kan zijn (gemeente).
- Locaties die dicht bij elkaar liggen zouden ongeveer gelijke temperaturen moeten meten. Afwijkingen kunnen duiden op lokale hotspots of aansluitleidingen die relatief lang zijn of ondiep liggen; of duiden op een onnauwkeurigheid of verloop in de sensoren.
- Temperatuurmetingen geven inzicht in de drinkwatertemperatuur.
 - Dit geeft de mogelijkheid op bewaking van een deelaspect van de waterkwaliteit.
 - Consumenten kunnen automatisch worden gewaarschuwd (te lang te hoge/lage temperaturen).
 - Voor onderzoek naar een relatie tussen watertemperatuur en gezondheidsrisico, bacteriegroei, desinfectiebijproducten (voor Nederland niet relevant), troebelheid, etc. kunnen goede meetlocaties worden geselecteerd.
 - Door de temperatuur van wijken met elkaar te vergelijken, en met de verwachte waarden uit het model kunnen warmtebronnen met een wat grotere reikwijdte dan alleen hotspots worden geïnventariseerd (stadsverwarming of andere ondergrondse antropogene bronnen).
 - Dit geeft inzicht in locaties waar mogelijk thermische energie kan worden teruggewonnen.
 - Door de watertemperatuur als tracer door het drinkwaterdistributienetwerk te gebruiken in combinatie met een hydraulisch netwerkmodel en een model dat de verandering van de temperatuur beschrijft, is het wellicht mogelijk om het hydraulisch model te kalibreren, en bijv. lekken of gesloten afsluiters te detecteren, of verbruikers die een afwijkend verbruik kennen.

I.V Toepassing in een digitale tweeling

Aan de TU Delft is dr. David Steffelbauer bezig met het project DASH of water (Data-driven Stochastic Hydraulic models of drinking Water systems). Dit project integreert metingen van IWM's en SIMDEUM. Watermeters meten slechts eens per uur het verbruik. Voor met name toepassingen op het vlak van waterkwaliteit zijn verbruiksgegevens per 5 minuten nodig om het stroompad door het leidingnet goed te kunnen modelleren en bijv. data van waterkwaliteitssensoren goed te kunnen interpreteren. De data van de IWM's kunnen worden gebruikt om de inputparameters van SIMDEUM te bepalen; vervolgens kan SIMDEUM worden ingezet om de ontbrekende metingen op een tijdsbasis van 5 minuten te genereren. Een digitale tweeling van een hydraulisch model dat gevoed wordt met verbruiksmetingen waar gaten in zitten (ofwel omdat niet overal een IWM is geïnstalleerd, ofwel omdat data verloren is gegaan in de transmissie, ofwel omdat data op een te grove resolutie wordt gemeten), kan op deze manier worden verbeterd met virtuele metingen die door SIMDEUM worden geleverd.