

Opsporen van lekkage voordat de klant iets merkt: numerieke optimalisatie van het sensornetwerk

Claudia Quintiliani, Ina Vertommen, Karel van Laarhoven, Peter van Thienen (KWR), Joey van der Vliet (Brabant Water)

Lekkages in waterdistributienetwerken betekenen verlies van kostbaar water, een haperende klantenservice, oplopende reparatiekosten en mogelijk gedoe of schade aan het omringende milieu. Bovendien zorgen leidingbreuken voor mogelijke verontreinigingen die de waterkwaliteit bedreigen. Waterbedrijven proberen lekkages steeds sneller te detecteren, liefst voordat klanten er iets van merken. Daarvoor is echter een sensornetwerk nodig. Aangezien sensoren als debietmeters en druksensoren duur zijn in aanschaf, installatie en onderhoud, rijst de vraag: hoeveel sensoren moeten worden geïnstalleerd en waar?

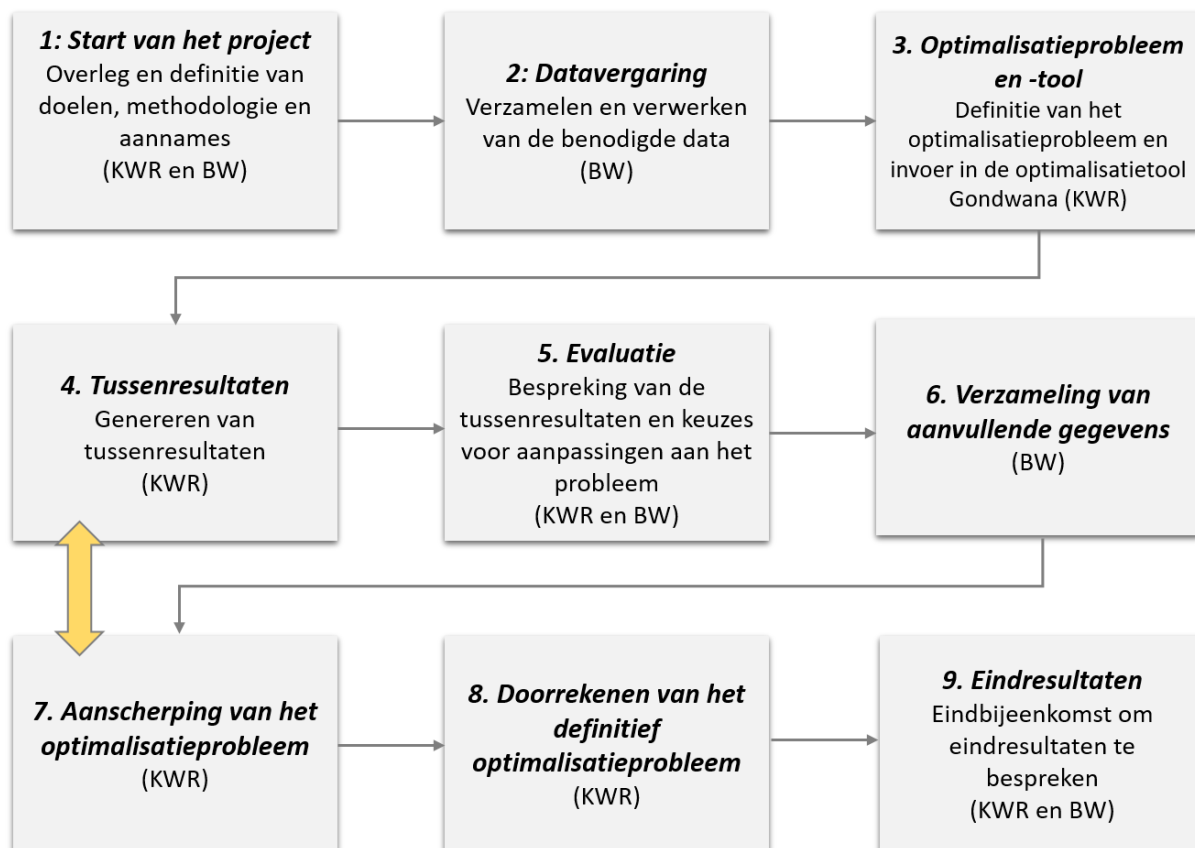
In Nederland is de lektheid in het waterdistributienetwerk relatief laag. Desalniettemin streven drinkwaterbedrijven naar een vermindering van het aantal lekkages en het opsporen hiervan voordat klanten dit merken en de dienstverlening afneemt. Voor dit doel zijn druksensoren een goede oplossing, met lagere kosten en eenvoudiger in installatie en onderhoud dan debietmeters. Belangrijke vragen waarmee drinkwaterbedrijven zitten zijn: hoeveel sensoren moeten worden geïnstalleerd voor een optimale lekdetectie? En waar moeten deze worden geplaatst voor een zo groot mogelijke effectiviteit? Om de kosten te drukken is de inzet van een beperkt aantal sensoren wenselijk. In het wagen van de mogelijkheden bieden numerieke optimalisatietechnieken, naast een deskundig oordeel, een zeer nuttig instrument waarmee het juiste aantal én de juiste plaats van de sensoren kunnen worden vastgesteld.

Drinkwaterbedrijf Brabant Water levert water aan 2,5 miljoen inwoners en bedrijven in de provincie Noord-Brabant. Het bedrijf is van plan om extra druksensoren in haar waterdistributienetwerken te installeren om lekkages snel te kunnen opsporen, zelfs voordat klanten de storing opmerken. Klanten die een lek telefonisch willen melden, krijgen zo te horen dat de beheerders al bezig zijn met herstelwerkzaamheden. De focus ligt op grote lekkages die overdag optreden. Het installeren van voldoende sensoren voor een effectieve lekdetectie in het hele distributienetwerk is kostbaar en lastig. Bepaling van het optimale aantal en de optimale locatie is vanwege de omvang van de netwerken en de ontelbare mogelijkheden te ingewikkeld om handmatig te doen. Samen met KWR zoekt Brabant Water naar oplossingen voor dit probleem met behulp van numerieke optimalisatietechnieken.

Iteratief proces

Om in het Noord-Brabantse gebied Seppe tot een optimale plaatsing van druksensoren in het waterleidingnet met 43.143 klanten te komen, hebben KWR en Brabant Water in 2019 een iteratief proces doorlopen. De eerste stap hierin bestond uit het verzamelen van verschillende invoergegevens – een representatief hydraulisch model van het netwerk, in aanmerking komende sensorlocaties, etc. – en vertaling van het probleem naar een wiskundig model dat gebruikmaakt van aannames, zoals lek grootte en tijdstip van opsporen. In de tweede stap werd het optimalisatieprobleem gedefinieerd. Voor verfijning van deze twee stappen was nauwe samenwerking nodig met de hydraulische experts

van Brabant Water. In een cyclus van ontwerpessies is gezorgd voor een goede aansluiting op de praktijk. De sessies boden ruimte voor het bespreken van verschillende mogelijkheden bij het formuleren van het optimalisatieprobleem, inclusief de keuze van doelstellingen, beperkingen en parameterinstellingen. Daarmee konden experimenten worden ontworpen en uitgevoerd om de voorlopige resultaten van elke keuze te evalueren. In elke cyclus werd het optimalisatieprobleem verder aangepast, met de best beschikbare oplossing-op-maat als resultaat. Afbeelding 1 laat zien welke stappen in de gevolgde procedure werden doorlopen. De uitkomsten van elke bijeenkomst leidden tot het herhalen van de stappen 4 tot 7.



Afbeelding 1. Cyclus van ontwerpessies

Na een paar maanden leidde het proces tot inzichten hoe waterbedrijven gebruik kunnen maken van numerieke optimalisatietechnieken bij het oplossen van problemen. Brabant Water leverde kennis van het systeem en KWR de ervaring in optimalisatietechnieken. Naast het belang van de experimenten hielp de voorlopige resultatenanalyse het waterbedrijf in het ontwikkelen van een bewustzijn over de complexiteit en gevoeligheid van de parameters die van invloed zijn op de locatie van druksensoren in het leidingnet.

Vastgestelde variabelen voor optimalisatie

De volgende variabelen zijn van invloed op de eindresultaten:

- Tijdsvenster waarin wordt gemeten – door natuurlijke schommelingen in de watervraag kunnen lekken over het hoofd worden gezien. Overdag, wanneer de vraag hoog is, veroorzaakt een lek een grote drukval en valt dus goed op. Tegelijk is de kans groot dat hetzelfde effect wordt veroorzaakt door variabel gedrag van consumenten. Nachtelijke metingen zijn minder gevoelig voor fouten als gevolg van consumentengedrag, maar tegelijk zijn lekken minder snel zichtbaar omdat de drukval die hierbij ontstaat dan lager is. Het is dus de vraag op welk moment de sensoren de meest betrouwbare informatie zullen geven. Hiervoor is het tijdstip van 15:00 uitgekozen. Voor het waterbedrijf is dit het meest geschikte moment omdat hiermee lekkages in de daguren sneller kunnen worden opgespoord en klanten er dan ook het meest last van zouden hebben.
- Simulatie van lekgrootte (m^3/h) – hoe groter een lek, hoe groter het drukverlies dat dit tot gevolg heeft en hoe gemakkelijker het lek kan worden gedetecteerd. De werkelijke lekgrootte is afhankelijk van het soort lek, de hydraulische omstandigheden en de locatie in het netwerk waar het lek optreedt. Daarnaast varieert de lekgrootte in de tijd. In de gehanteerde aanpak is een vereenvoudiging aangebracht. Er is gekozen om een constante lekgrootte van $60 m^3/h$ te hanteren en vervolgens te evalueren of de sensoren dit lek oppikken. Deze keuze hangt samen met het doel van Brabant Water om zich vooral te richten op grotere lekken die snel door klanten worden opgemerkt, niet op kleine, langzaam groeiende lekken.
- Moment waarop een gedetecteerde drukval als een echt lek wordt bestempeld – aangezien overdag drukverschillen optreden als gevolg van schommelingen in de watervraag, kan niet elk drukverschil aan een lek worden toegewezen. Daarom heeft Brabant Water vastgesteld welke drukverandering wijst op een mogelijk lek dat moet worden gelokaliseerd en gerepareerd en dat niet meer dan 100 alarmen per dag veroorzaakt. Op grond van fluctuaties die in het gebied zijn geregistreerd, is dit drukverschil vastgesteld op 2,5 m waterkolom.
- Formulering van de ‘dekking’ – het leidend criterium waarmee de dekking door een reeks sensoren wordt beoordeeld is vastgesteld op het aantal (klant-) aansluitingen dat wordt gedekt door de sensoren, en niet op het aantal lekken dat in een simulatie wordt gedetecteerd, zoals aanvankelijk was bedacht. Het bleek namelijk dat de sensoren vooral werden geplaatst in gebieden met een hoger aantal knooppunten, waarin uiteraard ook een groter aantal lekken wordt gesimuleerd. Op verzoek van Brabant Water is de doelfunctie in het optimalisatieprobleem daarom aangepast om zich meer te richten op het reduceren van het effect van lekken voor klanten.
- Selectie van haalbare sensorlocaties – aangezien Brabant Water in de nabije toekomst alle buizen gaat vervangen door PVC 110, is in de criteria voor de sensoren alleen rekening gehouden met knooppunten die op dit type buizen zijn aangesloten en met elektrische voeding.

Numerieke optimalisatietechnieken: een krachtig hulpmiddel

Proberen dit soort problemen met de hand op te lossen, met behulp van deskundige beoordeling, geografische informatiesystemen en hydraulische modellering, is een tijdrovend proces dat leidt tot één enkele oplossing. Hoewel die oplossing wellicht tegemoetkomt aan de eisen van het bedrijf,

kunnen de prestaties ervan nog steeds verre van optimaal zijn. Numerieke optimalisatietechnieken zijn een krachtig hulpmiddel om binnen een aanvaardbare tijd tot bruikbare resultaten te komen. Het softwareplatform Gondwana [1], ontwikkeld door KWR, is bedoeld om de inzet van deze technieken te vergemakkelijken. Geïnspireerd op de evolutietheorie van Charles Darwin maakt dit generieke platform het mogelijk om optimalisatieproblemen van distributienetwerken door middel van ‘natuurlijke selectie’ op te lossen. Het evolutionaire algoritme begint met het genereren van een ‘populatie’ van potentiële oplossingen. In dit geval: verschillende mogelijke sensorconfiguraties. Vervolgens start een iteratieve cyclus, bestaande uit de volgende stappen:

- ‘natuurlijke selectie’ – het kiezen van de best presterende sensorconfiguraties volgens de criteria van het waterleidingbedrijf en het weggooien van slechtere oplossingen;
- ‘reproductie’ – het creëren van nieuwe oplossingen door combinatie (‘kruising’) van elementen van verschillende sterke oplossingen;
- ‘mutatie’ – het toepassen van minieme veranderingen in sterke oplossingen voor het verkennen van ruimte voor verbetering.

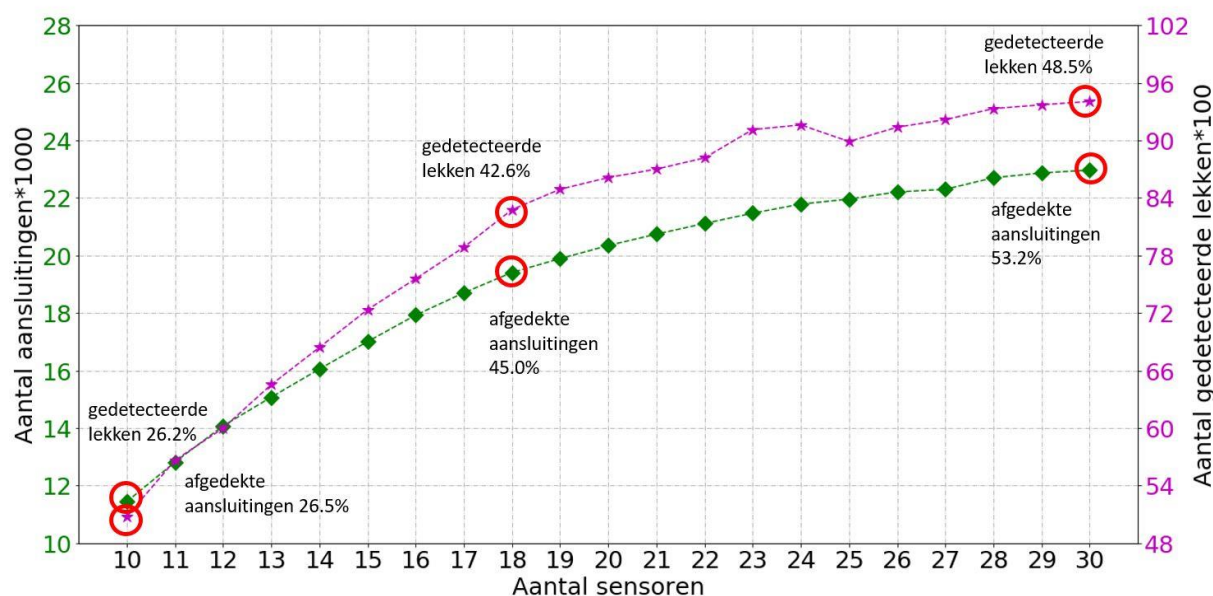
Met deze automatische, gestructureerde aanpak doorloopt Gondwana verschillende richtingen. Door het zoekproces bij te houden en de prestaties van de oplossingen af te wegen – zoals het aantal sensoren (kosten) en detecteerbaarheid van lekkages (prestaties) – ontstaat inzicht in de meest robuuste oplossing.

Gondwana in wiskundige termen

Voordat Gondwana iets kan oplossen, moet het probleem eerst in wiskundige termen worden gevat. In het geval van een optimale plaatsing van druksensoren betekent dit het maximaliseren van de waarschijnlijkheid waarmee een lek wordt gedetecteerd, gekoppeld aan een uit budgettaire overwegingen redelijk aantal druksensoren [2]. Vertaald naar de praktijk: de eerste term (doelfunctie) werd uitgedrukt in het totaal aantal gebruikers, verbonden met een gebied waarin een specifiek lek optreedt; een maat voor de blootstelling van de bevolking. De tweede term werd voorgesteld als het minimaliseren van de investeringskosten, rekening houdend met het maximale budget dat beschikbaar is voor de installatie van nieuwe sensoren. In het onderzochte netwerk kwamen 5.814 locaties in aanmerking voor het plaatsen van sensoren. Deze kwamen overeen met alle knooppunten, verbonden met PVC-buizen met een diameter van 110 mm en te bedienen door een elektriciteitsvoorziening. Vervolgens werd een methodologie gedefinieerd voor het kwantificeren van de detecteerbaarheid van lekken aan de hand van hiermee samengaande drukveranderingen in het netwerk. Met deze ‘gevoeligheidsmatrix’ [3] kon de dekking van de sensoren worden geëvalueerd.

Optimale range

Het aantal sensoren dat uit de oplossingen naar voren komt varieert tussen 10 – overeenkomstig het huidige aantal geïnstalleerde sensoren – en 30 - het maximaal aantal sensoren dat Brabant Water met het beschikbare budget kan installeren. Met de momenteel geïnstalleerde sensoren dekt het drinkwaterbedrijf 26,5% van de totale aansluitingen (43.143). Door 20 extra sensoren toe te voegen kan deze dekking worden verhoogd tot 53,2%, wat betekent dat ongeveer 48,5% van de lekken gedetecteerd kan worden. Deze resultaten zijn zichtbaar in afbeelding 2, waarin het aantal geïnstalleerde sensoren (x-as) staat uitgezet tegen het aantal afgedekte aansluitingen (groen) cq. gedetecteerde lekken (paars).



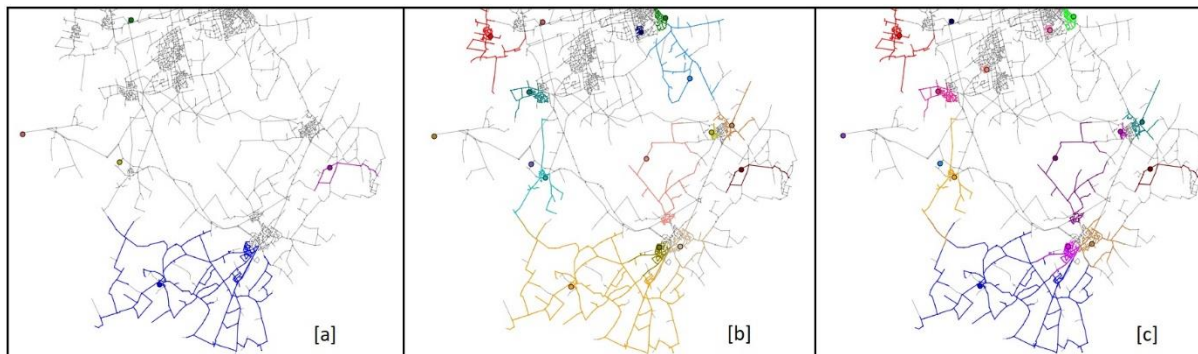
Afbeelding 2. Verloop van het aantal afgedekte aansluitingen (groen) en gedetecteerde lekken (paars) bij verschillende aantallen geïnstalleerde sensoren

Een totale dekking van de optredende lekkages met sensoren kan niet worden gegarandeerd, omdat voor de beschouwde lekwaarde de drukval vaak onder de drempelwaarde (2.5 m) ligt. Bovendien zijn in sommige gebieden van het netwerk geen locaties aanwezig die in aanmerking komen voor plaatsing van sensoren, zelfs als de drukval voldoende is om een lek te detecteren. Er blijven dus altijd blinde vlekken in het netwerk. De belangrijkste toegevoegde waarde (stijgende lijn in afbeelding 2) wordt verkregen door tussen de elf en achttien sensoren toe te passen. Het aantal afgedekte aansluitingen neemt met elke toegevoegde sensor met ongeveer 2 tot 3 procent toe. Vanaf negentien sensoren vlt de grafiek af en begint de dekkingsbijdrage per sensor te dalen van 1% tot 0,2%.

Ook toont de afbeelding het aantal gedetecteerde lekken (paars). Dit geeft antwoord op de vraag: wat is het nut van elke sensor in termen van gedetecteerde lekken, en hoe helpt dit Brabant Water beslissingen te nemen over het juiste ontwerp dat beter past bij hun verwachtingen en mogelijkheden?

Kaarten maken dekkingsgraad lekdetectie zichtbaar

Om het voordeel van elke geïnstalleerde sensor voor een toename in lekdetectie duidelijk te illustreren zijn kaarten gemaakt (afbeelding 3). Deze dekkingskaarten maken het mogelijk om voor elke oplossing te visualiseren waar de sensoren zich bevinden.



Afbeelding 3. Dekkingskaart [a] voor de geïmplementeerde sensoren die er op dit moment zijn en voor de oplossingen met [b] 24 sensoren en [c] 25 sensoren. Vanwege privacyregels wordt slechts een deel van het gebied van Seppe weergegeven. Elke kleur illustreert het gebied dat door een sensor wordt bestreken

Verschillende kleuren tonen de leidingen waarin tussen de gesimuleerde lekkages tussen twee knooppunten worden gedetecteerd. De grijze leidingen vallen buiten het bestek van de toegepaste oplossing. Hoewel de huidige druksensoren om andere redenen zijn geïnstalleerd, blijkt uit de simulatie dat zes van de tien effectief zijn in lekdetectie. Slechts één hiervan is zichtbaar in afbeelding 3a. Uit afbeeldingen 3b en 3c blijkt voorts dat een verschillend aantal sensoren (respectievelijk 24 en 25 stuks, waarvan in beide gevallen slechts 16 sensoren zichtbaar zijn) tot een andere ruimtelijke configuratie kan leiden: dat wil zeggen. Dat de sensorlocaties in de oplossing met 25 sensoren niet gelijk zijn aan de locaties van de oplossing met 24 sensoren, plus een nieuwe locatie, maar dat meerdere sensoren een nieuwe locatie krijgen. Vanuit het perspectief van een geleidelijke investering die nodig is voor het installeren van nieuwe sensoren, moet de eindconfiguratie dus vooraf worden bepaald. Hierin moet rekening worden gehouden met het feit dat de prestaties tot het moment waarop de volledige set van sensoren is geïnstalleerd, nog niet optimaal zijn.

Optimale resultaten voor Brabant Water

Om met de woorden van een betrokken expert van Brabant Water te spreken heeft dit project *“al met al niet veel tijd in beslag genomen, veel onverwachte vragen en antwoorden opgeleverd, veel inzicht gegeven in het hydraulisch systeem en geleid tot een verbazingwekkend geoptimaliseerd resultaat voor de locaties van onze nieuwe sensoren.”*

Over het algemeen tonen de verkregen resultaten aan dat numerieke optimalisatietechnieken heel bruikbaar en waardevol zijn om praktische werkingsproblemen in een distributiesysteem op te lossen. Succesvolle implementatie is mogelijk in nauwe interactie met de experts van het drinkwaterbedrijf, zoals in dit geval met de experts van Brabant Water. Rekening houdend met hun specifieke behoeften en verwachtingen kunnen veel onderzoeksvragen worden geïdentificeerd en opgelost. De samenwerking met experts vergroot het bewustzijn van de complexiteit van het probleem en van de invloed van de betrokken variabelen. Als vervolg op het project gaat Brabant Water in de komende

maanden verder met de aanschaf en installatie van druksensoren en wordt de toegepaste methode naar andere gebieden uitgebreid.

Samenvattend zijn in het project verschillende lessen geleerd. Zo is het belangrijk om als eerste stap na te denken over het beoogde doel, welke benodigde gegevens beschikbaar zijn of nog ontbreken, en met welke beperkingen rekening moet worden gehouden. Ook is het nodig gebruik te kunnen maken van een tool die werkt met een evolutionair algoritme, zoals Gondwana. Daarnaast moet de mogelijkheid bestaan om samen te werken met experts van het drinkwaterbedrijf, zodat zij het optimaliseringsproces kunnen ondersteunen. Tot slot moet het belang worden genoemd om voorafgaand aan het traject voldoende testen op te zetten, om te begrijpen of het uiteindelijke gedrag van de sensoren is zoals verwacht, en of de gekozen parameters geschikt zijn voor het uiteindelijke doel. Rekening houdend met al deze factoren moet het voor elk drinkwaterbedrijf mogelijk zijn om op een vergelijkbare manier druksensoren in te zetten bij het opsporen van lekken.

Referenties

1. Thienen, P. van en I. Vertommen. 'Gondwana: A generic optimization tool for drinking water distribution systems design and operation (Open Access)'. in *Procedia Engineering 13th Computing and Control for the Water Industry Conference*, CCWI 2015, 2015.
2. Quintiliani, C., Vertommen, I., Laarhoven, K. van, Vliet, J. van der en P. van Thienen. *Optimal pressure sensor locations for leak detection in a Dutch water distribution network*. EWaS4 proceeding (in press), 2020.
3. Farley, B., J.B. Boxall, en S.R. Mounce, S.R. *Optimal locations of pressure meter for burst detection. Proceedings of the 10th Water Distribution Systems Analysis Conference*, Kruger National Park, South Africa, 2008.