A network diagram with various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size, with some being significantly larger than others, and they are interconnected in a complex, non-linear fashion.

Bedrijfstakonderzoek  
BTO 2021.046 | september 2021

# Risicobeoordelings- methodiek falen productielocaties op basis van OLM

Proof of principle

# Rapport

## Risicobeoordelingsmethodiek falen productielocaties op basis van OLM; Proof of principle

**BTO 2021.046 | september 2021**

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

### Opdrachtnummer

402045.223

### Projectmanager

Stek Koop

### Opdrachtgever

BTO - Bedrijfsonderzoek

### Auteur(s)

Ir. R.C.M. (Ron) Jong, Dr. C. (Claudia) Quintiliani

### Kwaliteitsborger(s)

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

### Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

### Keywords

reliability onderhoud betrouwbaarheid risico beschikbaarheid

Jaar van publicatie  
2021

### Meer informatie

Ron Jong MSc  
T +31 (0) 30 60 69 682  
E [ron.jong@kwrwater.nl](mailto:ron.jong@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](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

# KWR

September 2021 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

## Samenvatting

Voorliggend rapport is de opbrengst van BO project 'Beschikbaarheidsanalyse productielocaties, verbinden van operations en strategie'. In dit Bedrijfsonderzoek is de mogelijke bijdrage van operationele risicoanalysetools om de algehele impact op risico en prestatie van een productielocatie te bepalen onderzocht. Het onderzoek is deels een voortzetting van BTO-project 'Systeem in balans, afwegingen van assets in de drinkwaterketen vanuit een systeembenadering'. Het kwantificeren van de prestatie en risico's van drinkwater productielocaties en deze relateren aan de prestatie en risico's van het gehele drinkwater systeem, blijkt noodzakelijk te zijn om te komen tot integrale besluitvorming op Assetmanagement gebied. Een prestatie-indicator die voor het hele systeem geldt, is de parameter OLM. Binnen het project is een simulatie methodiek ontwikkeld (proof of principle), waarmee per individueel onderdeel van een productielocatie en het watervoorzieningssysteem als geheel, de bijdrage aan de prestatie-indicator OLM kan worden bepaald. Een simulatie van de situatie is namelijk vereist, omdat storingen en onderhoud tot de reguliere bedrijfsvoering behoren en omdat de waterlevering zowel een dagpatroon kent als ook een seizoenspatroon, wat leidt tot een belasting van het assetsysteem die varieert in de tijd. Bovendien geeft de ontwikkelde methode inzicht in de bijdrage van redundantie in productielocaties en/of de onderhoudsinspanning op de prestatie van het watervoorzieningssysteem. De benadering van het beoordelen van de prestatie van het systeem is nieuw in de drinkwatersector. Momenteel is het namelijk gebruikelijk de capaciteit van het systeem te ontwerpen op een "statische" maximale belasting waarbij de het productiesysteem min of meer los staat van het distributiesysteem. Voor de leveringszekerheidsanalyse is het uitgangspunt doorgaans dat een productie-straat volledig in bedrijf is of volledig uit bedrijf is. In de ontwikkelde methode beogen we het watervoorzieningssysteem als dynamische systeem te ontwerpen, waarbij tijdens uitval van een onderdeel een restcapaciteit in bedrijf blijft.

Voor het proof of principle heeft het project zich gericht op fictieve casus, bestaande uit een relatief eenvoudige grondwaterzuivering (Vitens Pb Hoenderloo), in combinatie met een bestaand distributiegebied (Almere).

De methodiek berekent automatisch de OLM, die resulteert op een storing een productielocatie. Deze storing wordt gedefinieerd met de frequentie van de storing (MTBF = mean time between failure), de tijdsduur van de storing (MTTR = mean time to repair) en de restcapaciteit van de locatie, op het moment dat de storing optreedt. De gemiddelde OLM en de spreiding daarvan worden berekend door deze berekening 100 maal uit te voeren, met een startmoment van de storing random verdeeld over 24 uur (Monte Carlo simulatie).

Conclusie van het project is dat de ontwikkelde risicobeoordelingsmethodiek voor het falen van elementen drinkwater productielocaties gebaseerd op OLM werkt en dat deze in staat is om:

- De werkelijke OLM die resulteert bij het optreden van een storing in een productiebedrijf te berekenen;
- Inzicht te geven in het effect van een storing van een onderdeel van een productiebedrijf element op de OLM, waarvan de MTBF, MTTR en restcapaciteit bekend zijn;
- Het effect van onderhoud op OLM in te schatten, indien het effect van onderhoud bekend is (een langere MTBF of een kortere MTTR);
- Representatieve data te genereren over het functioneren van het systeem productie-distributie die op automatisch gepresenteerd kan worden.

De resultaten zijn gedeeld met de leden van het BTO thema Integraal Assetmanagemt. BTO IAM heeft geconcludeerd dat de ontwikkelde methode voldoende opbrengst heeft en perspectieven biedt voor het beoordelen van systeemprestaties en mogelijk voor leveringszekerheidsanalyse en dat de sector daar behoefte aan heeft. De aanbevelingen zijn daarom:

- In overleg met assetmanagementspecialisten van de waterbedrijven bekijken op welke wijze de resultaten het best gepresenteerd kunnen worden;
- De integratie van de bufferende werking van distributiereservoirs, meerdere productielocaties en koppelingen implementeren;
- Het omschrijven van de faalscenario's als normaalverdelingen van de MTTR en in simulaties incorporeren. De MTBF mag als constant verondersteld worden;
- Het opstellen van faalscenario's op basis van generieke beschrijving van componenten;

- Realistisch inschatten van MTTR en MTBF en opstellen van een zo volledig mogelijke lijst van falende elementen met hun effect op de restcapaciteit. Hiermee kan een overall-beeld van de verwachte OLM van bijvoorbeeld een productielocatie opgesteld worden, dus een analyse over alle storingsscenario's heen. Resultaat is de verwachte OLM (+ waarschijnlijkheidsverdeling) per tijdseenheid (bijvoorbeeld 1 jaar) voor alle mogelijke storing scenario's;
- Het modelleren van redundantie door toepassen van een FTA/RBD;
- Het werken met een veranderende faalkans als gevolg van veroudering, tijdsafhankelijkheid integreren. Geschikt hiervoor kan een dynamische foutenboomanalyse zijn (Fault Maintenance Trees, dit zijn tijdsafhankelijk foutenbomen waarin onderhoud mee-gesimuleerd kan worden);
- De toepassing van de systematiek voor verschillende perioden in het jaar of voor een vast te stellen referentieperiode, omdat verbruik/druk en dus OLM bij gegeven threshold afhankelijk is van gemiddelde dag of maxdag;
- Onderzoek of en hoeveel simulaties noodzakelijk zijn voor een voldoende nauwkeurig resultaat;
- Optimalisatie van de simulaties om rekentijd te beperken (de huidige rekentijd van 1 faalscenario bedraagt ongeveer 7 à 8 uur).

De aanbevelingen in het rapport bieden voldoende aanleiding voor een vervolg op dit project.

---

# Inhoud

Samenvatting	2
Inhoud	4
1 Inleiding	5
2 Analysesystematiek voor integraal en kwantitatief beheer	7
3 Beschrijving risicobeoordelingsmethodiek	10
3.1 Productie: opstellen FTA van Pb Hoenderloo	10
3.2 Distributie: methode voor berekening van OLM	14
3.2.1 Modelaannames	14
3.3 General methodology	15
3.4 Calculation assumptions	16
3.4.1 Samenvatting methode	17
4 Results	19
4.1.1 Results scenario 1	19
4.2 All scenario's	21
5 Conclusie en aanbevelingen	23
6 Literatuur	24

---

# 1 Inleiding

In dit Bedrijfsonderzoek onderzoeken we de mogelijke bijdrage van operationele risicoanalysetools om de algehele impact op risico en prestatie van een productielocatie te bepalen. Het onderzoek is deels een voortzetting van BTO-project 'Systeem in balans, afwegingen van assets in de drinkwaterketen vanuit een systeembenadering' (Vries et.al., 2015). In het onderzoek dat indertijd is uitgevoerd binnen het BTO-thema Assetmanagement is onder meer het nut van een kwantitatieve kansenboomanalyse verkend en is onderzocht of daarmee een vertaling is te maken van betrouwbaarheid van onderdelen naar betrouwbaarheid van een productiestation.

Beschikbaarheidsanalyses<sup>1</sup> van productielocaties<sup>2</sup> (zijnde zuiveringsinstallaties, reservoirs en hogedruksectie-pompstations, al dan niet voorzien van een winning) of van distributiepompstations (hogedruksectiepompstations, al dan niet voorzien van een reservoir) zijn van belang voor leveringszekerheidsanalyses en analyses van de waterverdeling bij verstoringen, en daarmee voor de veerkracht van het drinkwatersysteem. Om de beschikbaarheid van het watervoorzieningssysteem als geheel te bepalen, is aggregatie nodig van de betrouwbaarheid van elementen waaruit het systeem bestaat. Hierbij speelt naast de configuratie van de elementen ook de beschikbaarheid van onderdelen van de elementen, de redundantie en afhankelijkheden een rol. Deze informatie komt meestal beschikbaar bij het uitvoeren van onderhoud of het opstellen van risicoanalyses. Deze informatievoorziening vanuit operations betreft een bottom-up benadering, te weten specialistisch van aard, gericht op de huidige situatie en met een hoog detailniveau.

Voor het uitwerken van strategische analyses over de prestatie en de risico's van het systeem voor mogelijke scenario's, is een globale systeembeschrijving nodig. Deze moet voldoende representatief zijn voor het systeem maar ook in staat zijn om invulling te geven aan strategische doelstellingen, systeemrisico's en stakeholdercommunicatie. Kortom, op strategisch niveau is er behoefte aan een top-down benadering, te weten strategisch van aard, gericht op het systeem in verschillende toekomstbeelden en met een globaal en integraal niveau.

Het blijkt dat het kwantificeren van de prestatie en risico's van productielocaties<sup>3</sup> en deze relateren aan de prestatie en risico's van het gehele drinkwater systeem de grootste hindernis om te komen tot integrale besluitvorming.

Doel van dit project is daarom het kunnen bepalen van de meest efficiënte investering in onderhoud of redundantie om de prestaties van het drinkwatersysteem op orde te kunnen houden of te kunnen verbeteren. Hiervoor is een prestatie-indicator nodig die voor het hele systeem geldt, dus een methodiek waarmee per individueel onderdeel de bijdrage aan deze prestatie-indicator kan worden bepaald. Binnen het project lag de focus op invloed van de prestaties van de elementen in een productiestation op OLM.

Omdat een dergelijke benadering nog niet bestond en de methode tijdens dit project ontwikkeld moest worden, heeft het project zich gericht op een relatief eenvoudige grondwaterzuivering in combinatie met een bestaand distributiegebied. In voorliggend project is gewerkt op basis van een fictieve case met concrete input van Vitens.

In eerste instantie waren 2 casus gebieden gedefinieerd, één bij Vitens (balansgebied GV50 Apeldoorn) en één bij Waterbedrijf Groningen (hele voorzieningsgebied), maar tijdens het project bleek de methodeontwikkeling zodanig

---

<sup>1</sup> Een kwantitatieve analyse over de duur dat het systeem of een onderdeel daarvan beschikbaar is, waarbij niet-beschikbaarheid mogelijk is als gevolg van falen of onderhoud.

<sup>2</sup> In dit voorstel worden productielocaties en distributiepompstations verder aangeduid als elementen. Elementen worden onderverdeeld in onderdelen.

<sup>3</sup> Zie oa: IAM Workshop 4-12-2019; Volwassenheidsmeting (BTO 2019.208(s)); Risico's en risicobeoordelingsmethodieken voor zuiveringsinstallaties (BTO 2017.032); Systematiek voor integrale analyse van de drinkwaterketen ten behoeve van assetmanagement (BTO 2014.049)

complex te zijn dat in overleg met de begeleidingsgroep besloten is om de casus te vereenvoudigen door de uitgewerkte FTA (fault tree analysis) van 1 Vitens productiebedrijf (Pb Hoenderloo) fictief te koppelen aan het voorzieningsgebied van Almere, waarvan een werkend Epanet-model beschikbaar was. Het initiële idee was om een distributienetwerk gemodelleerd in Infoworks te converteren naar een Epanetmodel. Die conversie is nodig omdat Epanet eenvoudiger is te integreren met een simulatietaal. Omdat deze conversie meer tijd heeft gevraagd dan gepland, is het proof of principle minder ver ontwikkeld dan oorspronkelijk beoogd.

De beschrijving van de ontwikkelde methode en de resultaten daarvan, zullen voorafgegaan worden door een overzicht van BTO onderzoek dat in het verleden op het gebied van analysesystematiek voor integraal en kwantitatief beheer is uitgevoerd.

## 2 Analyse-systematiek voor integraal en kwantitatief beheer

Naar een analysesystematiek voor integraal en kwantitatief beheer is in BTO verband onderzoek verricht (Vries et.al., 2015) (Wols et.al., 2017). In deze rapporten wordt een integrale aanpak gepresenteerd, die rekening houdt met een kwantitatieve analyse van relevante, water gerelateerde criteria ter ondersteuning van infrastructureel assetmanagement in de watersector. Voor analyse en evaluatie van het complexe systeem van bron tot tap blijkt volgens de studies één afwegingskader en één methodiek niet haalbaar. Als leidraad zijn enkele evaluatie-criteria en analysegereedschappen in de onderstaande tabel weergegeven (Vries et al., 2015).

Evaluatie-criterium (+indicator)	Analysegereedschap	
	<i>Productie (winning en zuivering)</i>	<i>Distributie</i>
Leveringscontinuïteit (OLM)	FMECA en foutenboomanalyse*, Bow-Tie	FMECA, Bow-Tie en criticaliteitsanalyse* m.b.v. leidingnetmodel en CAVLAR
Leveringszekerheid (interrupties bij de klant)	FMECA en foutenboomanalyse, Bow-Tie	Hydraulisch model*
Waterkwaliteit (gezondheidsrisico's)	QMRA en toxicologisch equivalent, apart opgesteld voor winning, zuivering en distributie.	
Waterbeleving (concentraties en gemiddelde snelheid)	model of metingen t.a.v. troebelheid en geur of smaak	hydraulisch model* en afsluitermodellen*

Voor drinkwaterbedrijven kan een efficiënte (her)inrichting van assetmanagement zich vertalen in kostenbesparing, een beter inzicht in de bedrijfsvoering en hoogwaardigere levering van drinkwater. Omdat er zoveel assets zijn en zoveel verschillende criteria meewegen in een bedrijfs(kosten)efficiënte benadering, is een integrale, vaak numerieke onderbouwing nodig. De analyse van de conditie van assets en van de relatie tussen assets onderling en tot het gehele systeem vormen daarbij een cruciale sleutel tot een effectieve AM-aanpak.

De analyse-methodieken wordt bepaald door de systeemdefinitie. Uit een voorbeeld-drinkwatersysteem bleek dat opsplitsing van het systeem in de delen 'Productie' (winning en zuivering) en 'Distributie' noodzakelijk was om met een foutenboom de leveringscontinuïteit van het productiedeel te bepalen. De waterinfrastructuur als geheel was (nog) te complex vanwege (1) de uiteenlopende evaluatie-criteria (als kosten, leveringscontinuïteit, waterkwaliteit, duurzaamheid, klanttevredenheid en imago), (2) de verscheidenheid en het aantal onderdelen en assets en (3) de complexe wisselwerking tussen assets. Een analyse van het voorbeeld-drinkwatersysteem liet zien dat outputs van het productie-subsysteem als input kunnen dienen voor het distributiegedeelte met de aanname dat een effect in het ene subsysteem onafhankelijk van een effect in het andere subsysteem wordt beschouwd. De gevoeligheden en betrouwbaarheid van assets ten opzichte van het hele systeem bepalen waar de kwetsbaarheid van het systeem ligt. Met een kleine aanpassing kan ook de risicomatrix, een veelgebruikt hulpmiddel in risicobeheer, worden gebruikt.

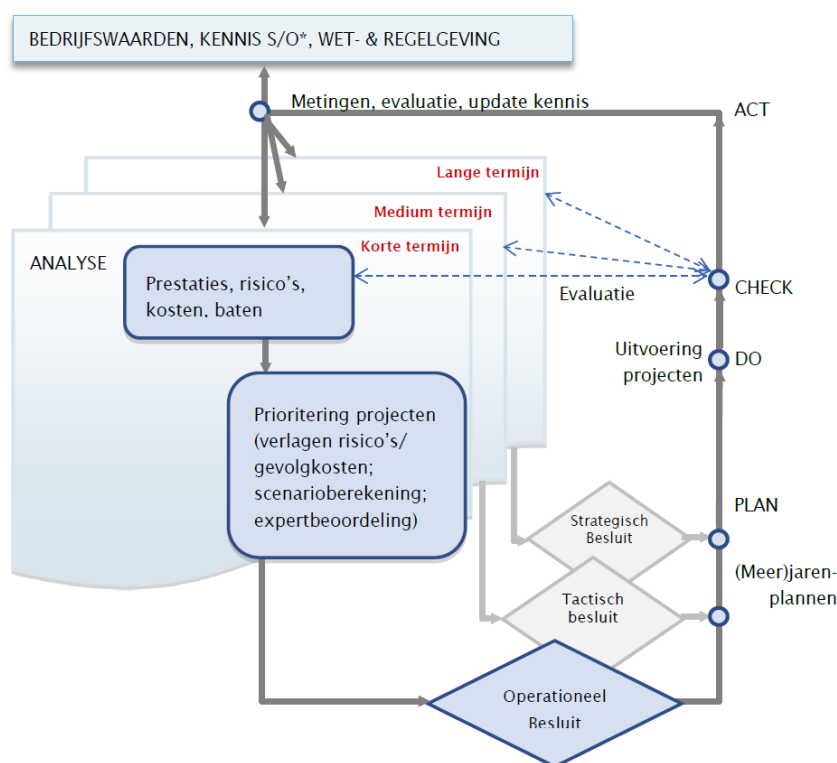
Een integrale benadering om oorzaak-gevolg effecten en redundantie in het hele systeem kwantitatief en voor verschillende criteria voor het gehele systeem in kaart te brengen, blijkt nodig voor een transparante analyse en evaluatie. De voorgestelde benadering houdt in dat normalisatie van evaluatie-indicatoren wenselijk is om prestaties te kunnen vergelijken, te monitoren en te evalueren. De definitie van eenduidige indicatoren is hard nodig voor het bepalen van risico's en prestaties met betrekking tot waterkwaliteit, waterbeleving en ook bijvoorbeeld duurzaamheid: deze ontbreken vooralsnog. Verder onderzoek kan uitwijzen of:

- multi-criteria-optimalisatie een balans kan vinden in de diverse stuurparameters van onderhouds- en investeringsplannen;
- met geavanceerde technieken expertkennis kwantitatief gevangen kan worden;
- bestaande softwaretools de evaluatie van het gehele systeem met betrekking tot de diverse criteria kunnen ondersteunen.



### Cyclus van assetmanagement: van planning tot actie

(Infrastructureel) assetmanagement is te ontleden in de volgende componenten: zorgdragen (1) voor levering en kwaliteit, (2) vertaald naar bedrijfswaarden, (3) bij aanvaarde risico's en kosten. Kosten kunnen breed worden geïnterpreteerd: zowel maatschappelijke (denk aan energie of duurzaamheid), de perceptie van de consument (denk aan imagoschade) of financiële kosten. Aspect (1), het zorgdragen of beheren bestaat uit een aantal stappen in een cyclus. Het omvat een fase met daarin toepassing van een (bedrijfs)specifieke analysemethodiek die leidt tot nieuwe onderhouds-/investerings- en/of vervangingsplannen. Deze plannen worden doorgaans uitgevoerd na bekrachtiging door een managementteam, waarna de kennis- en beheercyclus gecompleteerd wordt door evaluatie van nieuwe gegevens (assets, prestaties, kosten), zodat opnieuw (toekomstige) scenario's kunnen worden doorgerekend en geanalyseerd. Deze activiteiten, beginnend met planning en eindigend met acties met betrekking tot onderhoud, ontwerp of aanleg/installatie van nieuwe assets hebben een iteratief karakter en vormen een terugkerend, cyclisch patroon. In Figuur 2.1 is de cyclus van assetmanagement schematisch weergegeven.



Figuur 2.1 Cyclus van activiteiten in (infrastructureel) assetmanagement, beginnend bij de planningsfase (PLAN) (Vries et al., 2015)

Doorgaans gaan kwantitatieve analyses van prestaties, risico's of kosten vooraf aan prioritering van investerings-, onderhoud of vervangingsprojecten. Deze prioritering is gebaseerd op verschillende criteria, die vooraf bepaald zijn aan de hand van de belangrijkste bedrijfswaarden. Een besluit (◊) t.a.v. geprioriteerde, projectmatige trajecten wordt vertaald naar activiteiten (•): (meer)jarenplannen (PLAN), initiatie (DO) en realisatie van projecten (ACT) (Wols et al., 2017)

Met risicobeoordelingsmethodieken kunnen waterbedrijven hun productiebedrijven beter sturen op risico's en kosten. Wel zijn er een aantal tekortkomingen in de methodieken, zoals verschillen in niveaus (van component tot productielocatie) en subjectiviteiten (bijvoorbeeld bij de inschatting van faalfrequenties, faaloorzaken, faaleffecten per risicomatrix-groep en reparatiekosten). Deze kunnen (deels) ondervangen worden door het goed inrichten van storingsregistraties, inspecties en registratie van assetgegevens. Hiermee is het ook eenvoudiger om naast een RCM-analyse een foutenboomanalyse te doen, zodat de gevolgen van uitval van een component beter kunnen

worden ingeschat. Verdere verbetering is mogelijk door de manieren uit te breiden waarop de verschillende risicogroepen in de risicomatrix met elkaar te vergelijken zijn (prestatie-indicatoren), bijvoorbeeld door monetariseren, en dit mee te nemen in de risicobeoordelingstechnieken.

Leerpunten uit het BTO die meegenomen worden in het huidige onderzoek zijn:

1. Opsplitsing van het systeem in de delen 'Productie' (winning en zuivering) en 'Distributie' is noodzakelijk om met een foutenboom de leveringscontinuïteit van het productiedeel te bepalen;
2. Output van het productie-subsysteem kan als input dienen voor het distributiedeel, met de aanname dat een effect in het ene subsysteem onafhankelijk van een effect in het andere subsysteem wordt beschouwd;
3. Definiëren welke invoerdata gebruikt wordt.
4. Bestaande softwaretools kunnen de evaluatie van het gehele systeem met betrekking tot de diverse criteria ondersteunen.

Deze leerpunten worden meegenomen door:

- Het onderzoek in twee stappen uit voeren, het eerste was een start maken met het opstellen van een FTA (Fault Tree Analysis) voor de elementen in het casus gebied en het definiëren van de te gebruiken invoerdata. Het tweede is het koppelen van de FTA aan een distributienet, waarmee uiteindelijk inzicht verkregen kan worden in de OLM die door een storing veroorzaakt wordt (leerpunt 1, 2 en 3)
- De koppeling van de FTA met het Epanet-model te realiseren met de softwaretools zijn: Epanet, Python en C++ (Leerpunt 3).

### 3 Beschrijving risicobeoordelingsmethodiek

De focus van de beoordelingsmethodiek ligt op de wettelijke eisen voor reguliere levering en leveringszekerheid. Voor een 24 uren bedrijf behoren storingen en onderhoud tot de reguliere bedrijfsvoering. Een ander aspect van de bedrijfsvoering is dat waterlevering zowel een dagpatroon kent als ook een seizoenspatroon. Dit laatste leidt tot een belasting van het assetsysteem die varieert in de tijd. Daarom kan niet volstaan worden met bijvoorbeeld de berekening van een maximum dag of een piekuur debiet, maar is een simulatie van de werkelijkheid vereist.

Om aan de wettelijke eisen te voldoen hebben de drinkwaterbedrijven ontwerpregels bedacht voor redundantie en onderhoud (preventief, curatief). De indruk bestaat dat die ontwerpregels leiden tot: teveel capaciteit, een te grove afweging en het onvoldoende rekening houden met de leeftijd van elementen. Bij voorkeur wordt het directe effect dat een ontwerpregel op de waterlevering aan een klant heeft meegenomen in de beoordelingsmethodiek. De begeleidingsgroep heeft besloten dat hiervoor zal de in de wet gedefinieerde grootheid OLM gebruikt worden.

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 wordt het onderzoek is in twee stappen uitgevoerd, te weten:

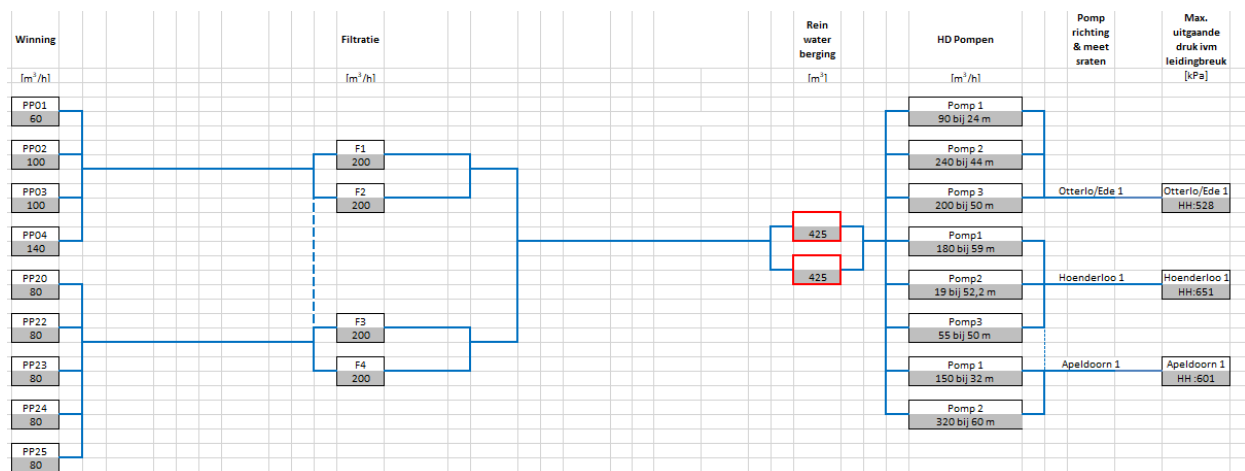
1. Per element identificeren van een aantal enkelvoudige faalsituaties, gekenmerkt met een MTBF, MTTR en effect op capaciteit. Omdat het een opstap naar een FTA is, zal deze benaming dit rapport aangehouden worden, maar in werkelijkheid is nog geen echte FTA.
2. Een Epanet-model waarmee de OLM berekend wordt. Omdat het ontwikkelen van de risicobeoordelingsmethodiek het doel is van dit project is gekozen voor relatief eenvoudige hoofdonderdelen. Het element dat onderzocht wordt is Pb Hoenderloo van Vitens en het Epanet-model van Almere is gebruikt.

In de volgende 2 paragrafen zal de opbouw en het gebruik van deze twee onderdelen in detail beschreven worden.

#### 3.1 Productie: opstellen FTA van Pb Hoenderloo

De eerste stap in de risicobeoordelingsmethodiek is het opstellen van een FTA voor de elementen in het casus gebied. In dit hoofdstuk wordt het opstellen van de FTA van Vitens productiebedrijf Hoenderloo beschreven. Onderdelen uit deze FTA zijn namelijk gebruikt in de risicobeoordelingsmethodiek.

Pb Hoenderloo is een grondwaterzuivering die gevoed wordt door 9 onderwaterpompen (Winning). De zuivering bestaat uit 4 marmerfilters (Filtratie), opgesteld in 2 straten. Na opslag van het water in 2 reinwater bergingen wordt het water door de hogedruksectie, die 9 HD pompen omvat, gedistribueerd (zie Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Schematische weergave Vitens Pb Hoenderloo, de stippellijn is een leiding met gesloten handafsluiter (info Vitens)

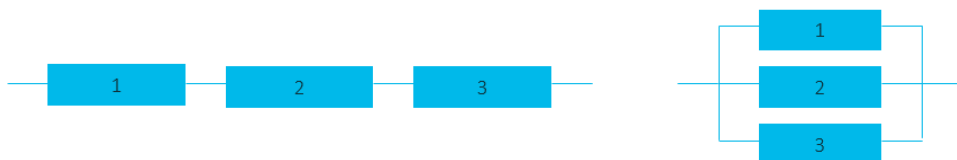
Op 14 december 2020 is samen met specialisten van Vitens tijdens een workshop de faalkans van Pb Hoenderloo ingeschat, voor een aantal soorten storingen. De faalkansen zijn gedefinieerd met een reparatietijd (MTTR = mean time to repair) en een frequentie (MTBF = mean time between failure). Een voorbeeld van een faalkans is het niet opstarten van een NSA (noodstroom aggregaat) bij een stroomstoring. Deze storing vindt gemiddeld eens per 10 jaar plaats en het kost circa 1,5 uur om de NSA met de hand op te starten. Tijdens de NSA storing valt Hoenderloo voor 100% uit. In dit geval is de MTBF 10 jaar, de MTTR 1,5 uur en de beschikbaarheid tijdens de storing 0%.

Met behulp van de MTBF en MTTR kan vervolgens de beschikbaarheid "A" (availability) van een onderdeel berekend worden bij een bepaalde storing, met onderstaande formule, waarin als voorbeeld bovenstaande NSA storing doorgerekend wordt:

$$\text{Beschikbaarheid} = \frac{\text{bedrijfstijd (MTBF)}}{\text{bedrijfstijd} + \text{reparatietijd (MTTR)}} = \frac{8 \times 24 \times 365 \times 10 \text{ jaar}}{8 \times 24 \times 365 \times 10 \text{ jaar} + 1,5} = 0,999997$$

De verzameling van deze beschikbaarheidwaarden wordt opgenomen in een RBD (Reliability Block Diagram), dat van een productiebedrijf op basis van alle storingen opgesteld kan worden. Het RBD dat voor Pb Hoenderloo is opgesteld is een vereenvoudigde uitvoering, omdat slechts gewerkt is met "and" en "or" poorten, zie ook Figuur 3.2 (Elderhalli et.al., 2019):

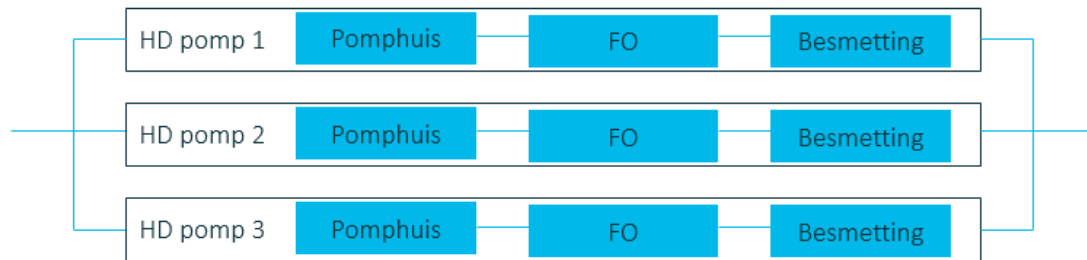
- AND = serieel systeem  $= A_s = A_1 \times A_2 \times A_3 \times \dots$
- OR = parallel systeem  $= A_s = 1 - (1 - A_1)(1 - A_2)(1 - A_3) \dots$
- waarin A = availability = beschikbaarheid



*Figuur 3.2 Schematische weergave serieel systeem van beschikbaarheid (links) en parallel systeem (rechts)*

De MTBF en MTTR kunnen namelijk niet alleen als vaste waarde maar ook als functie verdeling worden uitgedrukt en er zijn ook meer poorten dan enkel de AND en OR poort. Omdat het doel van dit project methodeontwikkeling betreft, is de RBD relatief eenvoudig gehouden. In een vervolgproject kan dit verder worden ontwikkeld.

Ter illustratie zal nu het RBD van een deel van de HD sectie Hoenderloo 1 worden opgesteld. Aangenomen is dat optredende storingen kunnen zijn: storing in pomphuis of motor, storing in frequentie omvormer (FO) of een biologische besmetting. De sectie Hoenderloo 1 bestaat uit 3 parallelle pompen en de storingen per pomp is een serieel systeem, schematisch weergegeven in Figuur 3.3:



*Figuur 3.3 Schematische weergave RBD HD sectie Hoenderloo1*

De beschikbaarheid van HD pomp 1 is (serieel systeem):

$$A_{HD1} = A_{Pomphuis} \times A_{FO} \times A_{Besmetting}$$

En de beschikbaarheid van de pompsectie Hoenderloo 1 is (parallel system):

$$A_{PS} = \{1 - (1 - A_{HD1}) \times (1 - A_{HD2}) \times (1 - A_{HD3})\}$$

Door deze exercitie voor elk onderdeel van Pb Hoenderloo te doorlopen, is een RBD van het hele productiebedrijf in Excel opgesteld, welke na invulling van de storingsgegevens (MTTR en MTBF) een start van een FTA is, zie Figuur 3.4. Hierbij moet worden opgemerkt dat de getoonde storingsgegevens indicatief zijn.

FTA											GV50 Apeldoorn				
Auteur	Ron Jong		Versie	2	Datum	23-2-2021		= invulveld							
Code	Element	Storing 1		Storing 2		Storing 3		Beschikbaarheid	Capaciteit	Beschikbaarheidsniveau's					
		MTBF (jaar)	MTTR (uur)	MTBF (jaar)	MTTR (uur)	MTBF (jaar)	MTTR (uur)	Serieel systeem		Serieel systeem	Serieel systeem	Serieel systeem	Serieel systeem		
										25%	50%	75%	100%		
										200	400	600	800	m3/h	
<b>Pb Hoenderloo</b>															
<b>Straat 1</b>															
Productiebedrijf	PA storing		Electra/NSA storing		Brand in E ruimte		Geen stuurlicht								
	Hele Pb	5	2	50	6	70	8760	5	48						
Winning	Falen pomp		Putverstopping		Waterkwaliteit					4 putten	4 putten	3 putten			
	Pompput 01	8	72	5	720	100	4380	0,9779	60	m3/h					
	Pompput 02	8	72	5	720	100	4380	0,9779	100	m3/h					
	Pompput 03	8	72	5	720	100	4380	0,9779	100	m3/h				1 put	
	Pompput 04	8	72	5	720	100	4380	0,9779	140	m3/h			1,000	0,9779	
		subtotaal								400	m3/h				
Filtratie	Technisch probleem		Waterkwaliteit		?					2 filters	2 filters	2 filters			
	Filter 1	3	24	10	120	1	0	0,9977	200	m3/h					
	Filter 2	3	24	10	120	1	0	0,9977	200	m3/h			1,000	0,9977	
		subtotaal								400	m3/h				
<b>Straat 2</b>															
Winning	Falen pomp		Putverstopping		Waterkwaliteit					4+5 putten	4+3 putten				
	Pompput 20	8	720	5	720	100	4380	0,9690	80	m3/h					
	Pompput 22	8	720	5	720	100	4380	0,9690	80	m3/h					
	Pompput 23	8	720	5	720	100	4380	0,9690	80	m3/h			1,000		
	Pompput 24	8	720	5	720	100	4380	0,9690	80	m3/h					
	Pompput 25	8	720	5	720	100	4380	0,9690	80	m3/h					
		subtotaal								400	m3/h				
Filtratie	Technisch probleem		Waterkwaliteit		?					2+2 filters	2+1 filters				
	Filter 1	3	24	10	120	1	0	0,9977	200	m3/h			1,000		
	Filter 2	3	24	10	120	1	0	0,9977	200	m3/h			winning snelfilters reservoirs Pb	winning snelfilters reservoirs Pb	
		subtotaal								400	m3/h				winning snelfilters reservoirs Pb
Reinwater berging	Technisch probleem		Waterkwaliteit		?										
	Reservoir 1	10	48	10	120	1	0	0,9981	425	m3					
	Reservoir 2	10	48	10	120	1	0	0,9981	425	m3			0,9848	0,9848	
		subtotaal								850	m3				0,9608
Pompriching Otterlo/Ede 1	Pomphuis of motor		FO		Besmetting										
	HD pomp 1	8	72	6	6	10	48	0,9983	90	m3/h	→	0,9831	0,9831	0,9831	0,9592
	HD pomp 2	8	72	6	6	10	48	0,9983	240	m3/h	→	0,9831	0,9831	0,9831	0,9592
	HD pomp 3	8	72	6	6	10	48	0,9983	200	m3/h	→	0,9831	0,9831	0,9831	0,9592
		subtotaal								530	m3/h				
Pompriching Hoenderloo 1	Pomphuis of motor		FO		Besmetting										
	HD pomp 1	8	72	2	720	10	48	0,9590	180	m3/h	→	0,9444	0,9444	0,9444	0,9215
	HD pomp 2	8	72	5	720	10	48	0,9823	19	m3/h	→	0,9673	0,9673	0,9673	0,9438
	HD pomp 3	8	72	1	720	10	48	0,9226	55	m3/h	→	0,9085	0,9085	0,9085	0,8865
		subtotaal								254	m3/h				
Pompriching Apeldoorn 1	Pomphuis of motor		FO		Besmetting										
	HD pomp 1	8	72	4	720	10	48	0,9783	150	m3/h	→	0,9634	0,9634	0,9634	0,9400
	HD pomp 2	8	72	7	720	10	48	0,9868	320	m3/h	→	0,9718	0,9718	0,9718	0,9482
Reserve	HD pomp R	8	72	2	720	10	48	0,9590	320	m3/h	→	0,9444	0,9444	0,9444	0,9215
		subtotaal								790	m3/h				

Figuur 3.4 Vereenvoudigde FTA van PB Hoenderloo

In Figuur 3.4 zijn alle onderdelen van Pb Hoenderloo te zien in de linker kolom en de steringen zijn horizontaal achter deze onderdelen getoond. De steringen per onderdeel resulteren in een seriële RBD (gele regels) en een daaruit berekende beschikbaarheid in kolom "beschikbaarheid serieel systeem". Vervolgens is bepaald wat de beschikbaarheid is om 100%, 75%, 50% en 25% van de distributiec capaciteit te kunnen verpompen. Indien de leveringszekerheid hoger moet zijn, is kans dat de onderdelen van het productiebedrijf in staat zijn om de capaciteit te leveren kleiner. De beschikbaarheid neemt hierdoor af.

Beschikbaarheid op basis van statische analyse is een te algemene grootheid om de betrouwbaarheid van een productiebedrijf te kunnen beschrijven. Beschikbaarheid bestaat uit het aantal keer falen en de duur per falen. Het is van belang of een element 100 keer 1 uur 'down' is, of 1 keer 100 uur. Omdat faalintervallen en reparatietijd beschreven worden door statische verdelingen en omdat elke element een andere verdeling heeft, is simulatie de enige manier om de beschikbaarheid van het geheel te bepalen. De beschikbaarheid is daarom niet meegenomen in de volgende stappen van het onderzoek, de beschrijvingen van de individuele steringen (MTBF en MTTR) en het effect daarvan op de capaciteit van het productiebedrijf (RBD) wel.

## 3.2 Distributie: methode voor berekening van OLM

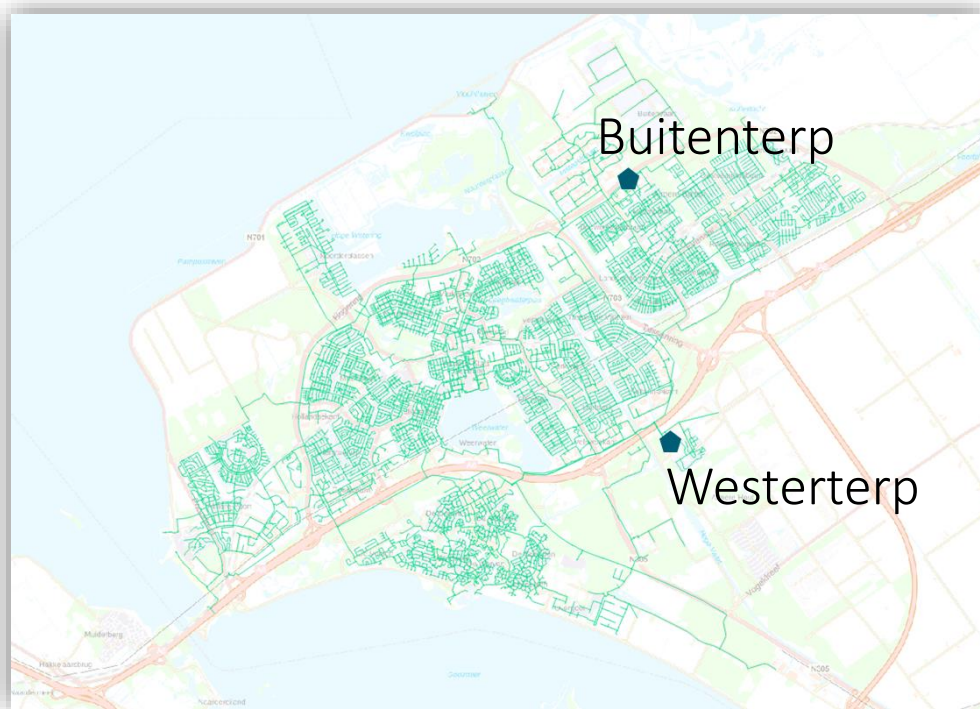
Het berekenen van de OLM op basis van enkelvoudige faalsituaties geïdentificeerd en gekenmerkt met een MTBF, MTRR en effect op capaciteitsgegevens is nieuw. In dit hoofdstuk wordt de opzet van deze methode beschreven in de volgende stappen:

- Aannames
- Doorgerekende storingsscenario's
- Opzet rekenmethode

### 1. Modelaannames

Er is gerekend met een fictief watersysteem. Doel is het ontwikkelen van een methode en bewijzen dat het werkt. Het gaat om een demonstratie, nog niet om een validatie. In een nieuw project zou het valideren met een uitgebreide gevoeligheidsanalyse van de methode met een realistisch systeem aan de orde kunnen komen. Daarom zijn een aantal aannames gedaan, te weten:

- Casus gebied is het werkende Epanet-model van Almere, met als voedingspunten Buitenterp en Westerterp, die in werkelijkheid reservoirs zijn zie Figuur 3.5. Het netwerk bevat ongeveer 21000 knopen en 22000 pijpen.



Figuur 3.5 Layout netwerk Almere

- Het gebruikte dagpatroon is van 31-08-2020 (zomer), met een tijdstap van 1 minuut.
- De basis verbruiken (base demands) per knoop zijn door Vitens aangeleverd op basis van meterstanden van 2019.
- Voor alle knopen geldt hetzelfde (huishoudelijke) patroon op basis van de afzet van Buitenterp.
- Het voor deze studie gemodelleerde element is de voeding vanuit Buitenterp, de maximale volumestroom op 31-08-2020 is 807 m<sup>3</sup>/h (100% is naar boven afgerond op 900 m<sup>3</sup>/h).
- Aangenomen is dat de voeding vanuit Westerterp (1980 m<sup>3</sup>/h maximaal op 31-08-2020) ongestoord water kan leveren.

- De winning, filtratie en reservoirs van het productiebedrijf zijn in dit stadium nog niet gemodelleerd in het model (is wel zeer nuttig voor latere versies, met name i.v.m. het effect van het distributiereservoir bij vooral kortere storingen van winputten en filters)
- De distributie vanuit Buitenterp is gesimuleerd op basis van de verhouding van de pompen in de HD pompset Otterlo/Ede van Pb Hoenderloo. De maximale volumestroom van Otterlo/Ede is 530 m<sup>3</sup>/h en deze wordt geëxtrapoleerd naar de 900 m<sup>3</sup>/h die Buitenterp op 31-08-2020 maximaal kan leveren:
  - HD1 90 m<sup>3</sup>/h (17%) = 153 m<sup>3</sup>/h op 31-08-2020
  - HD2 240 m<sup>3</sup>/h (45%) = 405 m<sup>3</sup>/h op 31-08-2020,
  - HD3 200 m<sup>3</sup>/h (38%) = 342 m<sup>3</sup>/h op 31-08-2020
- De MTTR is tijdsduur van een storing, uitgedrukt in uur en de MTBF is de frequentie van de storing, uitgedrukt in jaar.
- De MTTR en MTBF in de scenario's zijn in overleg met de begeleidingsgroep geschat ten behoeve van het onderzoek (opzetten methodiek).
- Bij langdurige storingen die meerdere dagen duren, wordt het dagpatroon van 31-08-2020 gerepeteerd.
- De OLM van een scenario wordt berekend over 5 dagen, dag 1 is om model te laten stabiliseren, gedurende dag 2 vindt de storing plaats en de rest van de dagen is voor uitloop.
- De storingen (scenario's) die gesimuleerd worden zijn weergegeven in Tabel 3.1 Gesimuleerde storingen Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Gesimuleerde storingen

Scenario	Type storing	MTBF [jaar]	MTTR [uur]	Rest capaciteit [ m <sup>3</sup> /h ]	Rest capaciteit [ % ]
Test					
1	Defecte motor HD pomp 2	8	72	492 m <sup>3</sup> /h	55%
Storing 1 Element					
5	Defecte FO HD pomp 2	6	6	492 m <sup>3</sup> /h	55%
6	Defecte waaier HD pomp 2	30	72	492 m <sup>3</sup> /h	55%
7	Defecte FO HD pomp 1	6	6	747 m <sup>3</sup> /h	83%
8	Defecte FO HD pomp 3	6	6	558 m <sup>3</sup> /h	62%
Grote storing					
9	Stuurlucht storing (1 straat)	5	48	450 m <sup>3</sup> /h	50%
Storing hele productiebedrijf					
10	PA storing	5	2	0 m <sup>3</sup> /h	0%
11	E en NSA storing	50	6	0 m <sup>3</sup> /h	0%
Invloed onderhoud (langere MTBF)					
12	Defecte motor HD pomp 2	12	72	492 m <sup>3</sup> /h	55%

In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de gebruikte methode. Doordat dit hoofdstuk door Claudia is geschreven, wordt overgegaan op de Engelse taal.

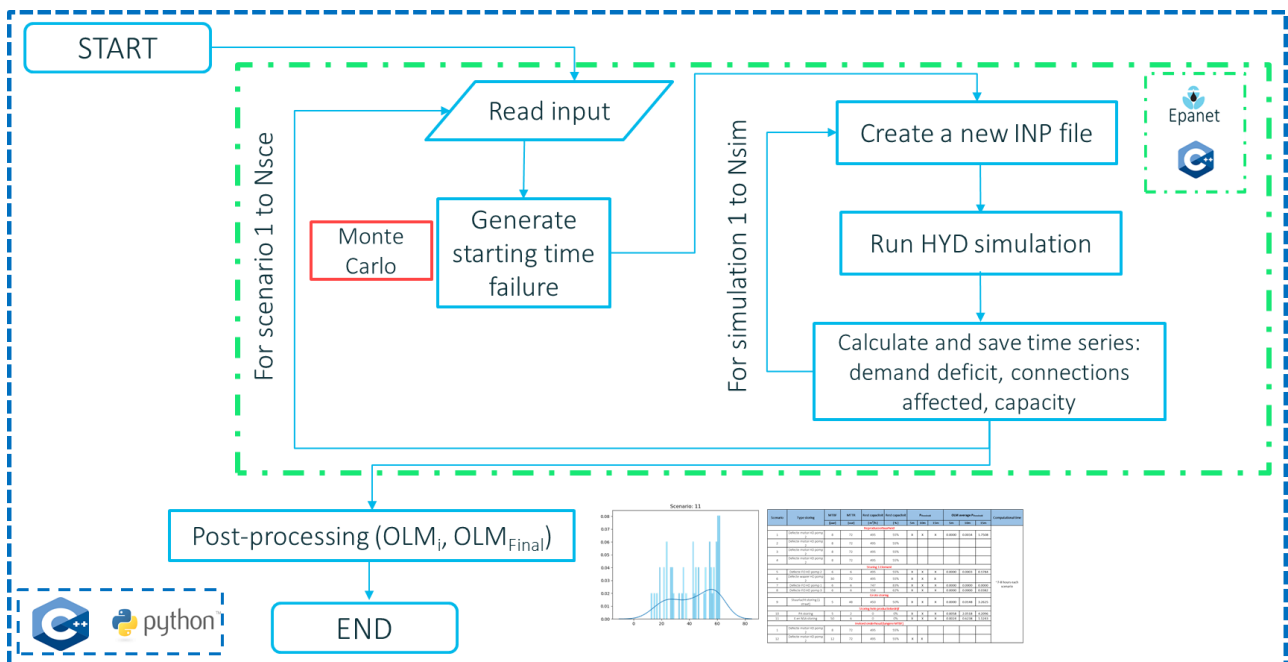
### 3.3 General methodology

The general framework of the methodology is presented in this paragraph. The core of the calculation is developed in a C++ environment. The choice to perform this analysis in Epanet, was because a well-workable and validated model was available and because the input and output files of Epanet can be easily linked to the programming language C++ used.



- First, the input data are defined in terms of MTTR, MTBF and residual capacity (% of resource delivered during the failure) (Tabel 3.1).
- With a Monte Carlo,  $N_{sim}$  random starting failure times are generated. The failure can occur at any time of the first 24 hours of the simulation, with a time resolution of 1 minute.
- For each of the starting failure times, a new .INP file is created which contains the controls for the simulation of the failure in the MTTR.
- Then, the HYD (hydraulic simulation) is run and the results for each time step (in terms of demand deficit, connections affected and inflow from the source failing) are saved in matrixes. These terms require an analysis step, not direct result of Epanet (direct result is supplied demand and pressure), so there are two steps.

The same procedure is repeated for the total number of defined scenarios ( $N_{sce}$ ).



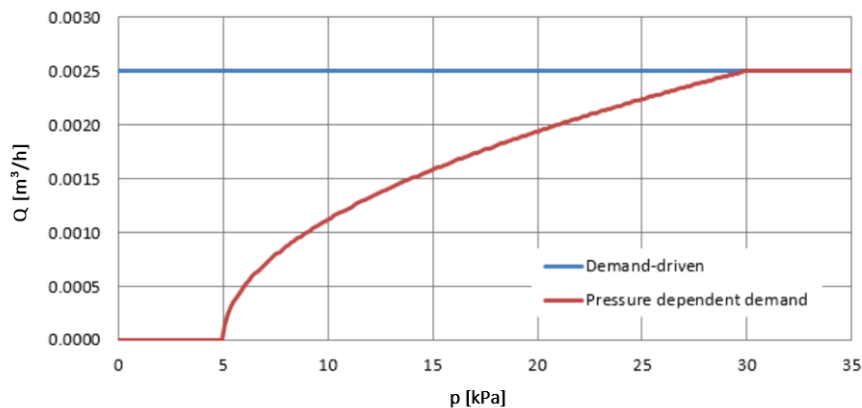
Figuur 3.6 Methodology framework.

Once the time series of the results are saved for all the scenarios, in the post-processing (in Python) the  $OLM_{final}$  is calculated and some plots are generated to show the results:

- $OLM_{m1}$  is the number of customers with too low pressure in the first minute in case of malfunction (start time), divided by the amount of customers in the modelled area [minutes x customers/customers]
- $OLM_{s1}$  is the sum of  $OLM_{m1} \dots OLM_{mMTTR}$ ; the OLM of the first calculation of the malfunction [minutes]; So the time runs from  $t = \text{start time}$  ( $OLM_{m1}$ ) until  $t = \text{MTTR}$  ( $OLM_{mMTTR}$ ) in steps of 4 minutes.
- $OLM_d$  is the average of the  $OLM_s1 - OLM_{NSCE}$  [minutes]
- The final  $OLM_{final}$  of the relevant scenario is the  $OLM_d / \text{MTBF}$  [minutes/year]

### 3.4 Calculation assumptions

The toolkit of Epanet 2.2 was used as engine for the hydraulic calculations. The hydraulic analysis is done considering the PDA approach (Pressure Driven Analysis). This allows the actual demand delivered at a node to depend on the node's pressure. Below some minimum pressure demand is zero, above some service pressure the full required demand is supplied and in between demand varies as a power law function of pressure (see Figuur 3.7).



Figuur 3.7 Demand Driven Analysis (DDA) and Pressure Driven Analysis differences.

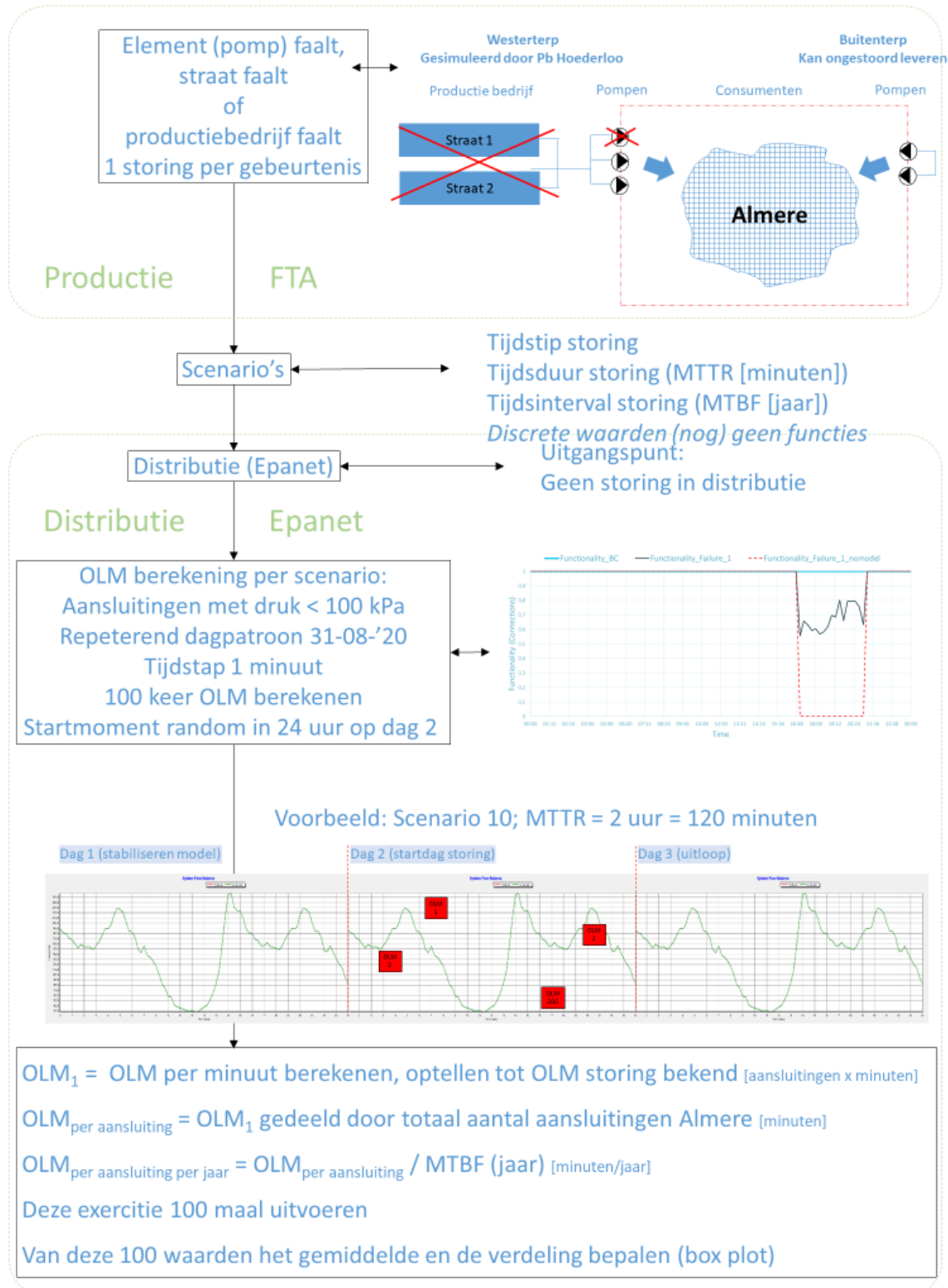
A summary of the assumptions considered are reported below:

- The OLM is calculated when insufficient pressure occurs because of the failure of a certain component. The pressure thresholds considered for the calculation in the presented methodology is  $P_{\text{threshold}} = 5/10/15$  mWk (50, 100, 150 kPa).
- Only quantity failures are considered in the scenarios. Only Buitenterp is considered to fail.
- The failure is simulated with the use of a Flow Control Valve (FCV). When the failure occurs, the setting of the FCV is changed to reduce the maximum capacity delivered.
- MTTR and MTBF is considered as a constant value.
- The total simulation time is 5 days.
- The HYD simulation time step is 1 minute.
- OLM is calculated with a time step of 4 minutes.
- Total number of scenarios simulated = 9 (Tabel 3.1).

## 2. Samenvatting methode

De gehele risicobeoordelingsmethodiek die in het kader van dit project is ontwikkeld is in Figuur 3.8 samengevat.

## Risicobeoordelingsmethodieken op basis van OLM



Figuur 3.8 Schematische opbouw van de risicobeoordelingsmethodiek

## 4 Results

First results obtained for the scenario 1 will be described and displayed, and then the overall results.

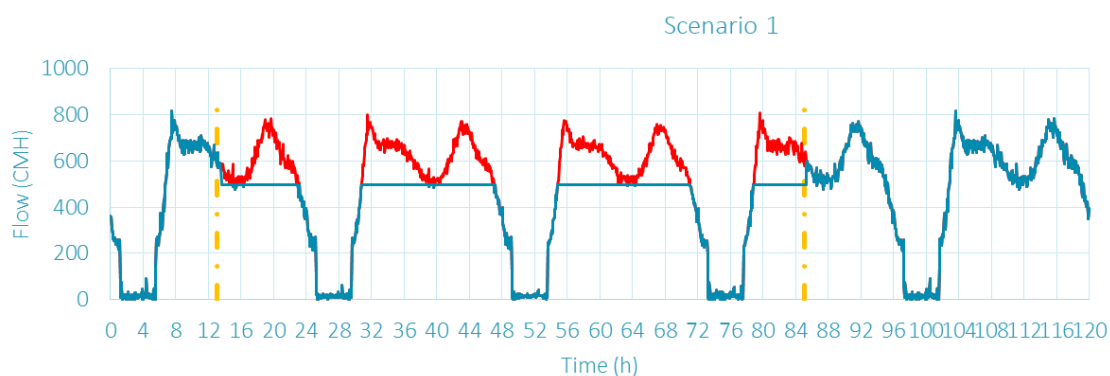
### 3. Results scenario 1

The results obtained for the scenario 1 are presented in more details below.

Scenario 1, the failure of HD pump 2, is characterized by the following input data:

- MTTR = 72 h
- MTBF = 8 years
- Capacity during failure is 55% of the total capacity.

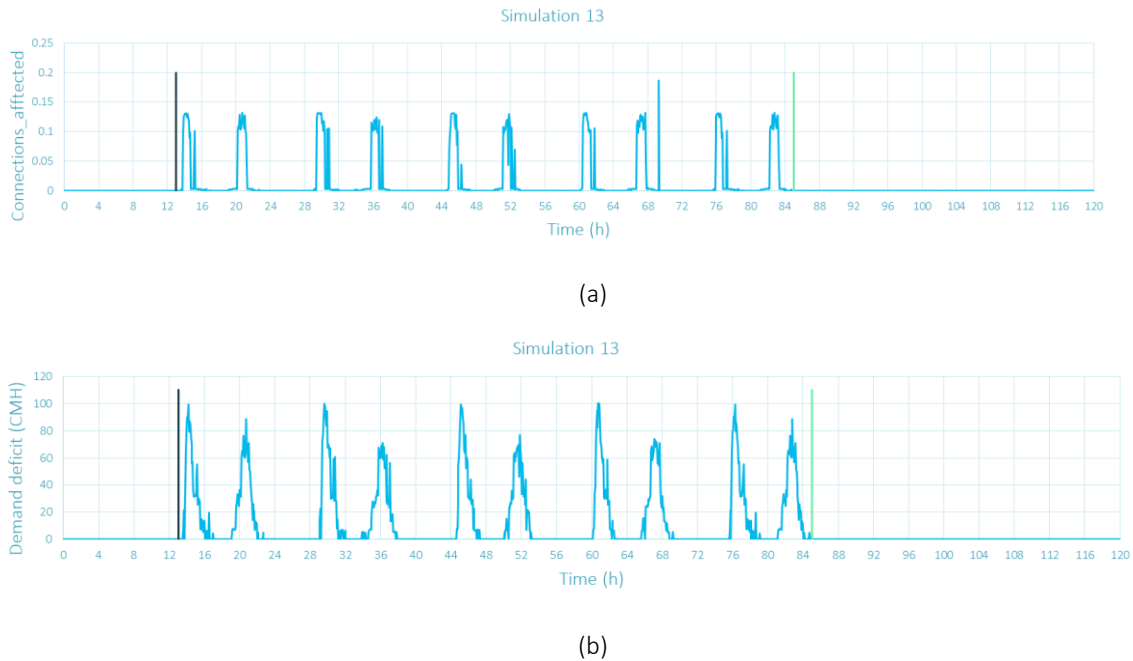
At the time of the failure occurrence (Figuur 4.1), a FCV's setting is changed to limit the initial total flow (initial capacity) every time that the maximum capacity during the failure event tends to be exceeded (capacity during failure). The yellow lines in the figure are the start and stop time of the simulation. The red line is initial capacity without failure, the blue line is the capacity during failure. The rate difference between those lines is the lost capacity.



*Figuur 4.1 Delivered flow from Buitenterp for scenario 1 with a starting failure time = 13:01 (simulation number 13 out of 100).*

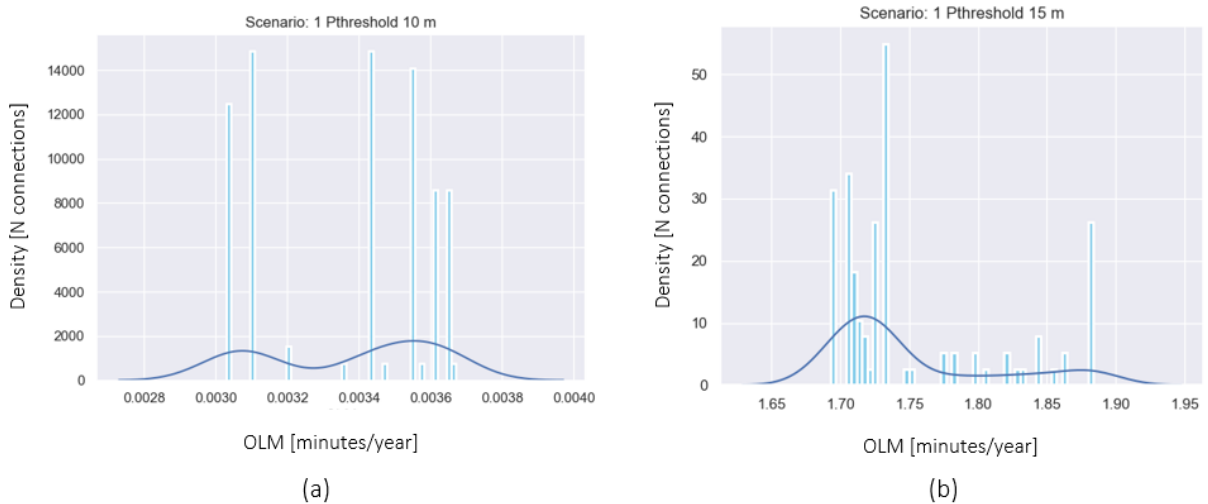
Every 4 minutes, the pressure in all the nodes of the network are compared with the  $P_{\text{threshold}}$  selected for the calculation of the OLM. If the pressure is below the limit, the connections affected are calculated for the final evaluation of the OLM.

The effects of the failure scenario per time step can be seen in Figuur 4.2, in terms of affected connections with respect to the total (value included between 0 = no connections affected and 1 = all connections affected), in Figuur 4.2(a), and demand deficit, in Figuur 4.2(b).



Figuur 4.2 Time series of affected connections and demand deficit for simulation 13, scenario1. The black vertical line is the start of the simulation, the green line the stop time.

Finally, the probability density, used to specify the probability of a variable (OLM in this case) to fail with a particular range of values, is presented in Figuur 4.3 for (a)  $P_{\text{threshold}} = 10 \text{ mWk}$  and  $P_{\text{threshold}} = 15 \text{ mWk}$ . The density is represented by a bimodal curve, indicating which are the most probable value of OLM to expect with the variation of the starting failure time.



Figuur 4.3 Probability density for the OLM in minutes calculated for scenario 1, for the 100 simulations.

Figure 4.3 shows that the pump failure that is modelled in scenario 1, results in many customers with a small OLM at a pressure of 10 mWk and in a small amount of customers with a large OLM at 15 mWk. So with this method the OLM can be simulated as does the density of the occurring OLM.

### 4.1 All scenario's

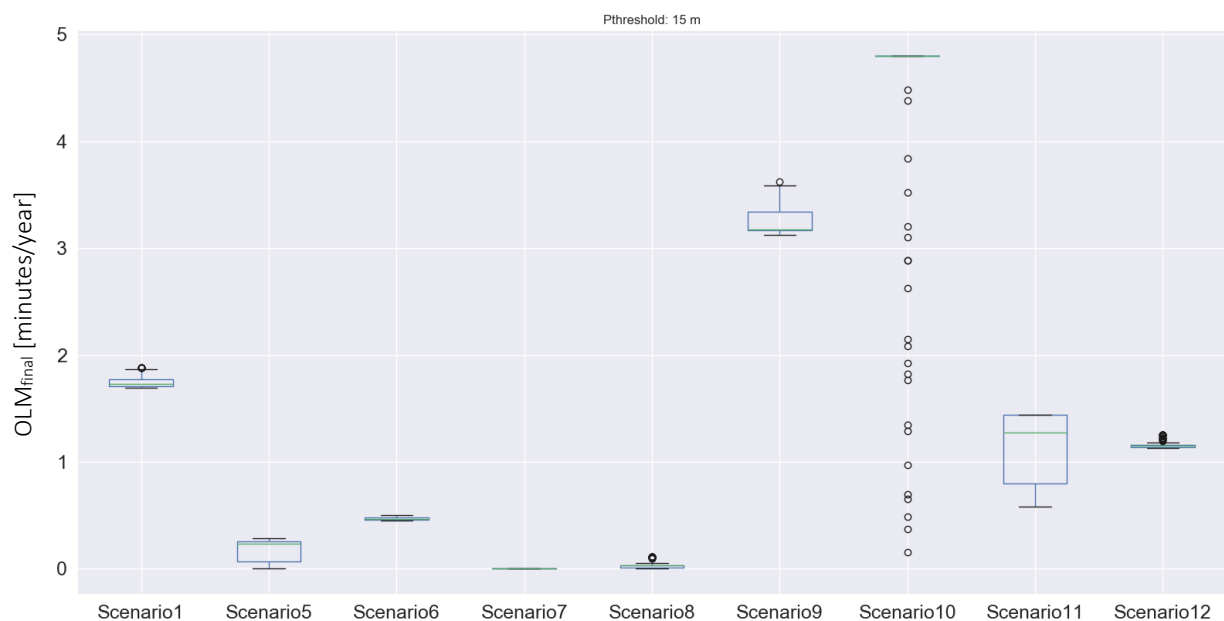
The simulation of each scenario (100 simulations per scenario) takes around 7-8 hours.

The final results in terms of average OLM (minutes) per scenario are summarized in Tabel 4.1. In the case of Almere, the network is very redundant and none of the failure scenario can cause a drop of pressure below or equal to 5 mWk (50 kPa). More significant results are obtained when considering pressure threshold of 15 mWk (150 kPa).

Tabel 4.1 Final results – average OLM per scenario.

Scenario	Type storing	MTBF	MTTR	Rest capaciteit	Rest capaciteit	OLM average [minutes] P threshold:		
		[jaar]	[uur]	[ m <sup>3</sup> /h ]	[ % ]	5 mWk	10 mWk	15 mWk
<i>Reproduceerbaarheid (niet onderzocht)</i>								
1	Defecte motor HD pomp 2	8	72	492 m <sup>3</sup> /h	55%	0,0000	0,0034	1,7508
<i>Storing 1 Element</i>								
5	Defecte FO HD pomp 2	6	6	492 m <sup>3</sup> /h	55%	0,0000	0,0003	0,1784
6	Defecte waaier HD pomp 2	30	72	492 m <sup>3</sup> /h	55%	0,0000	0,0090	0,4699
7	Defecte FO HD pomp 1	6	6	747 m <sup>3</sup> /h	83%	0,0000	0,0000	0,0000
8	Defecte FO HD pomp 3	6	6	558 m <sup>3</sup> /h	62%	0,0000	0,0000	0,0382
<i>Grote storing</i>								
9	Stuurlucht storing (1 straat)	5	48	450 m <sup>3</sup> /h	50%	0,0000	0,0148	3,2625
<i>Storing hele productiebedrijf</i>								
10	PA storing	5	2	0 m <sup>3</sup> /h	0%	0,0058	2,0518	4,2096
11	E en NSA storing	50	6	0 m <sup>3</sup> /h	0%	0,0024	0,6238	1,1243
<i>Invloed onderhoud (langere MTBF)</i>								
12	Defecte motor HD pomp 2	12	72	492 m <sup>3</sup> /h	55%	0,0000	0,0023	1,6340

In order to give an idea of the variation of the OLM per scenario for each of the simulations and evaluate the effects of the starting failure time variation, results for P<sub>threshold</sub>=15 mWk are plotted in a boxplot (Figuur 4.4).



Figuur 4.4 Boxplot results P<sub>threshold</sub>= 15 mWk.

Uit Figuur 4.4 is het volgende op te maken:

De gemiddelde OLM van scenario 1, 9, 10, 11 en 12 is hoog doordat:

- De MTTR lang is (scenario 1). Scenario 6 heeft eenzelfde MTTR maar van dat scenario is MTBF langer, waardoor de uiteindelijke OLM per jaar lager wordt.
- De MTTR lang is in combinatie met een korte MTBF (scenario 9). Ik combinatie met een restcapaciteit van 50% resulteert dit in een hoge OLM.
- De MTBF kort is in combinatie met een restcapaciteit van 0% (scenario 10).
- De MTTR lang is in combinatie met een restcapaciteit van 0% (scenario 11).
- De MTBF kort is en MTTR lang in combinatie met een lage restcapaciteit (scenario 12).

De variatie groot is indien:

- De MTTR kort is (scenario 10 en 11) en de restcapaciteit laag. In dit geval is het gesimuleerde startmoment van de storing van belang. Indien de storing start op een piekmoment van de water vraag, bijvoorbeeld 7 uur 's morgens, zal de OLM hoog zijn. Start de storing in een dal, bijvoorbeeld 24 uur, zal de OLM veel lager zijn. Dit resulteert in een grootte spreiding in de hoogte van de OLM (zie Figuur 4.1).

## 5 Conclusie en aanbevelingen

Doel van dit project was een “proof of principal” van een risicobeoordelingsmethodiek voor productielocaties gebaseerd op OLM en deze werkt. Beschreven methode is in staat is om:

- De werkelijke OLM die resulteert bij het optreden van een storing in een productiebedrijf te berekenen;
- Inzicht te geven in het effect van een storing van een onderdeel van een productiebedrijf element op de OLM, waarvan de MTBF, MTTR en restcapaciteit bekend zijn;
- Het effect van onderhoud op OLM in te schatten, indien het effect van onderhoud bekend is (een langere MTBF of een kortere MTTR);
- Representatieve data te genereren over het functioneren van het systeem productie-distributie die op legio manieren automatisch gepresenteerd worden.

In dit stadium is het slechts een “proof of principal”, de methode moet nog verder gevalideerd worden met onder andere een gevoeligheidsanalyse. In overleg met de begeleidingsgroep is besloten dat dit een reële opbrengst van het project is, omdat het resultaat een nieuw ontwikkelde beoordelingsmethode betreft. Maar het is slechts een start, aanbevelingen zijn daarom:

- In overleg met assetmanagementspecialisten van de waterbedrijven bekijken op welke wijze de resultaten het best gepresenteerd kunnen worden;
- De integratie van de bufferende werking van distributiereservoirs, meerdere productielocaties en koppelingen implementeren;
- Het omschrijven van de faalscenario's als normaalverdelingen van de MTTR en in simulaties incorporeren. De MTBF mag als constant verondersteld worden;
- Het opstellen van faalscenario's op basis van generieke beschrijving van componenten;
- Realistisch inschatten van MTTR en MTBF en opstellen van een zo volledig mogelijke lijst van falende elementen met hun effect op de restcapaciteit. Hiermee kan een overall-beeld van de verwachte OLM van bijvoorbeeld een productielocatie opgesteld worden, dus een analyse over alle storingsscenario's heen. Resultaat is de verwachte OLM (+ waarschijnlijkheidsverdeling) per tijdseenheid (bijvoorbeeld 1 jaar) voor alle mogelijke storing scenario's;
- Het modelleren van redundantie door toepassen van een FTA/RBD;
- Het werken met een veranderende faalkans als gevolg van veroudering, tijdsafhankelijkheid integreren. Geschikt hiervoor kan een dynamische foutenboomanalyse zijn (Fault Maintenance Trees, dit zijn tijdsafhankelijk foutenbomen waarin onderhoud mee-gesimuleerd kan worden);
- De toepassing van de systematiek voor verschillende perioden in het jaar of voor een vast te stellen referentieperiode, omdat verbruik/druk en dus OLM bij gegeven threshold afhankelijk is van gemiddelde dag of maxdag;
- Onderzoek of en hoeveel simulaties noodzakelijk zijn voor een voldoende nauwkeurig resultaat;
- Optimalisatie van de simulaties om rekentijd te beperken (de huidige rekentijd van 1 faalscenario bedraagt ongeveer 7 à 8 uur).

De aanbevelingen in het rapport bieden voldoende aanleiding om op te pakken in een vervolg op dit project.



---

## 6 Literatuur

Elderhalli, Y., Hasan, O., & Tahar, S. (2019). A methodology for the formal verification of dynamic fault trees using HOL theorem proving. *IEEE Access*, 7, 136176–136192. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942829>

Vries, D., Agudelo-Vera, C., & Van Summeren, J. (2015). *Systematiek voor integrale analyse van de behoefte van assetmanagement (BTO 2014.049)*.

Wols, B., Bertelkamp, C., & Beuken, R. (2017). *Risico 's en methodieken voor zuiveringsinstallaties (BTO 2017.032)*.