

BTO 2016.013 | Februari 2016

## **BTO** rapport

Perspectief en  
randvoorwaarden voor  
de ontwikkeling en  
toepassing van  
autonome inspectie-  
robots in  
waterleidingen



# BTO

## Perspectief en randvoorwaarden voor de ontwikkeling en toepassing van autonome inspectierobots in waterleidingen

BTO 2016.013 | Februari 2016

### Opdrachtnummer

400554/141/003

### Projectmanager

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

### Opdrachtgever

BTO - Beleidsonderbouwend onderzoek

### Kwaliteitsborger(s)

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

### Auteur(s)

dr. P. (Peter) van Thienen, ir. R. (Ralph) Beuken, I. (Ina) Vertommen MSc

### Verzonden aan

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

**Jaar van publicatie**  
2016

#### Meer informatie

Dr. Peter van Thienen  
T 030 6069602  
E [peter.van.thienen@kwrwater.nl](mailto:peter.van.thienen@kwrwater.nl)

#### Keywords

Inspectietechnieken,  
assetmanagement, robotica

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)

The logo for KWR (Watercycle Research Institute) features the letters 'KWR' in a bold, blue, sans-serif font. The 'K' and 'W' are connected, and the 'R' is slightly separated.

Watercycle  
Research  
Institute

BTO | Februari 2016 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

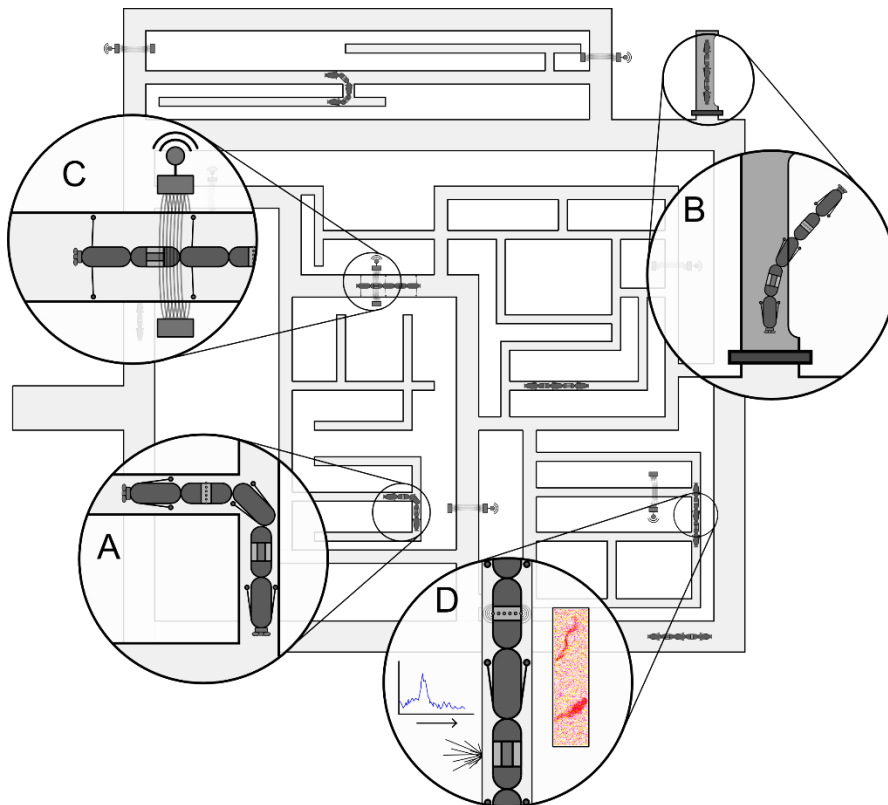
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# BTO Managementsamenvatting

## Autonome inspectierobots maken datarijk assetmanagement mogelijk

**Auteur(s)** dr. P. (Peter) van Thienen, ir. R. (Ralph) Beuken, I. (Ina) Vertommen MSc

Assetmanagement van het leidingnet drijft momenteel op generieke kennis en modellen van leidinggroepen, aangevuld met inspectiegegevens van een beperkt aantal leidingen. Autonome inspectierobots bieden een manier om kennis van de toestand van alle leidingen vanaf 100 mm diameter te verkrijgen. Dit leidt tot gerichtere saneringen, reductie in lekverlies en storingen, en een betere systeemkennis. Daarnaast is door de inzet van robots ook een verbeterde meting van de waterkwaliteit mogelijk. Ontwikkeling van autonome inspectierobots blijkt in een aanzienlijke mate te voorzien in bij de waterbedrijven bestaande behoeften. Ontwikkeling ervan wordt daarom aanbevolen.



Visie van een systeem van autonome robots die zich vrij door het netwerk kunnen bewegen (A), lokaal ingebracht en uitgenomen kunnen worden (B) voor onderhoud, op diverse plaatsen in het netwerk van energie kunnen worden voorzien en hun data kunnen afgeven (C), en overal waar ze komen relevante metingen uitvoeren (D).

### Belang: betere kennis voor betere assetmanagementbeslissingen.

Effectief assetmanagement vergt gegevens over de toestand van leidingen, waarbij met name leidingen met een hoge faalkans en een groot effect bij falen prioriteit verdienen. Er bestaan diverse technieken om de toestand in situ vast te stellen, maar deze zijn nog niet perfect en universeel toepasbaar.

### Aanpak: evaluatie waarde autonome inspectierobot.

Om aan alle specifieke vereisten die de speciale aard van het leidingnet met zich meebrengt te voldoen, wordt een concept voor inspectie voorgesteld dat afwijkt van alle op dit moment toegepaste benaderingen. Het gaat hierbij om een systeem van autonoom opererende robots (AIRs, autonome inspectierobots) die zich permanent in het leidingnet bevinden en die voorzien zijn van diverse sensoren voor onder andere toestandsbepaling van leidingen. Ter vergelijking zijn enkele alternatieve concepten uitgewerkt. Een inventarisatie van de ontwikkelbehoeften van de bedrijven voor technieken voor enerzijds het vaststellen van het optreden of voortschrijden van specifieke degradatiemechanismen en anderzijds voor aanvullende inspectiebehoeften (zoals visuele inspectie, xyz-bepaling, monsternamen, etc.) zijn gebruikt om vast te stellen in hoeverre het autonome robotsysteem voorziet in een behoefte bij de waterbedrijven. Ter vergelijking is dezelfde analyse op de alternatieve concepten toegepast. Vervolgens zijn de benodigde karakteristieken van een dergelijk systeem uitgeschreven, een businesscase ervoor doorgerekend, en zijn de contouren voor een ontwikkeltraject voor dit robotsysteem geschetst.

### Resultaten: kansen en kosten van de AIR.

Toepassing van de hierboven beschreven analyse laat zien dat de AIR duidelijk meer oplossingen biedt die beter aansluiten op de door de bedrijven geuite ontwikkelingsbehoefte dan twee andere concepten. Hiermee kan een voorkeur voor dit concept boven de alternatieve concepten worden uitgesproken voor ontwikkeling. Inzet van de

autonome inspectierobot kan een aanzienlijk financieel voordeel brengen: besparingen door voorkomen van te vroege vervanging, reductie van lekverlies en reductie van storingen bedragen naar beste inschatting in totaal 22,7 miljoen euro per jaar voor heel Nederland. Dit levert een financiële ruimte voor toepassing van de robots van maximaal 38 k€ per robot per jaar op bij tweemaal jaarlijks inspectie van het volledige toegankelijke netwerk. Daarnaast bestaan diverse bijkomende voordelen, die weliswaar moeilijker te becijferen zijn, maar wel degelijk ook een financiële waarde vertegenwoordigen, zoals de mogelijkheid tot monitoring bij werkzaamheden en systeemverbetering. De kosten voor aanschaf en exploitatie van robots, inclusief de kosten van een systeem voor energievoorziening en dataverwerking, zijn geschat op 45 k€ per robot per jaar. Hiermee kunnen we concluderen dat de financiële baten en lasten van een vergelijkbare orde grootte zijn. Dit feit, in combinatie met de niet-kwantificeerbare voordelen, leidt tot de conclusie de business case als positief te beoordelen.

### Implementatie: met ontwikkeling van de AIR naar datarijk assetmanagement.

Aanbevolen wordt om de ontwikkeling van een autonoom robotsysteem daadwerkelijk uit te gaan voeren in fase 1. Toepassing van autonome inspectierobots zal de kennisbasis voor assetmanagementbeslissingen vergroten en de kwaliteit van de elementen die de basis vormen voor deze beslissingen verbeteren. Bovendien wordt de algehele systeemkennis verbeterd. Hiermee kunnen ingrepen in het systeem gericht en accurater worden uitgevoerd en worden ook modelberekeningen waarop operationele, tactische of strategische beslissingen worden gebaseerd betrouwbaarder.

### Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *Perspectief en randvoorwaarden voor de ontwikkeling en toepassing van autonome inspectierobots in het leidingnet* (BTO 2016.013).

# Inhoud

<b>Inhoud</b>	<b>1</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>3</b>
1.1 Aanleiding en doel	3
1.2 Door het CO uitgesproken verwachtingen	4
1.3 Vervolg	4
1.4 Leeswijzer	4
1.5 Dankbetuiging	4
<b>2 Kader</b>	<b>5</b>
2.1 Informatiebehoefte assetmanagement	5
2.2 Ontwikkelingen ICT-technische middelen	7
2.3 Recente ontwikkelingen inspectietechnieken	7
2.4 In Nederland lopende initiatieven	8
2.5 Bepalingen van waterkwaliteit in het drinkwaternetwerk	10
<b>3 Visie</b>	<b>11</b>
3.1 Inleiding	11
3.2 Visie: autonome inspectierobots	12
3.3 Alternatieve concepten	12
<b>4 Inspectiebehoeften, huidige voorkeurstechieken en innovatiekansen</b>	<b>18</b>
4.1 Aanpak	18
4.2 Behoeftedekking door autonome inspectierobots	20
4.3 Behoeftedekking door alternatieve concepten	21
4.4 Synthese	21
4.5 Conclusie	22
4.6 Toepassingsscenario's Autonome Inspectierobots	25
<b>5 Karakteristieken en vereisten voor een AIR</b>	<b>27</b>
5.1 Vastgestelde vereisten	27
5.2 Vereisten netwerk	29
5.3 Vereisten organisatie eindgebruiker	29
5.4 Risico's van autonome inspectierobots in het leidingnet	29
5.5 Toepasbaarheid in andere dan drinkwaterleidingen	29
<b>6 Business case voor ontwikkeling en toepassing van AIRs</b>	<b>31</b>
6.1 Inleiding	31
6.2 Kosten van ontwikkeling	31
6.3 Kosten van toepassing	33
6.4 Primaire opbrengsten	35

6.5	Potentiële nevenopbrengsten	41
6.6	Aantallen robots en financiële ruimte	43
6.7	Balans	43
<b>7</b>	<b>Beoogd ontwikkeltraject</b>	<b>44</b>
7.1	Fase 0	44
7.2	Fase 1	44
7.3	Mogelijke partners	44
7.4	Toepassing van reeds ontwikkelde kennis	45
7.5	Risico's en beheersmaatregelen	45
<b>8</b>	<b>Perspectief datarijk assetmanagement</b>	<b>47</b>
8.1	Inleiding	47
8.2	Toestandsbepaling	47
8.3	Data	48
8.4	Van inschattingen naar kennis bij iedere beslissing	48
<b>9</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>50</b>
9.1	Conclusies	50
9.2	Aanbevelingen	51
<b>10</b>	<b>Literatuur</b>	<b>52</b>
<b>Bijlage I</b>		<b>53</b>
•	<b>Voorkeurstechieken, problemen en tekortkomingen, en oplossingspotentieel van AIR en alternatieve concepten.</b>	<b>53</b>
•	<b>Waarderingen ontwikkelbehoeften door de waterbedrijven</b>	<b>73</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en doel

De afgelopen anderhalf jaar is er in de Nederlandse drinkwatersector veel gesproken over de mogelijkheid om autonome robots toe te kunnen passen voor inspectiedoeleinden in het leidingnet (zie kader) en zijn er in Nederland bovendien enkele initiatieven gestart. Een daarvan is het BTO/Wetsus-project Ariel, waarin enkele hoofdcomponenten (m.n. behuizing en aandrijving) van een dergelijk robotsysteem worden ontwikkeld. Aan een traject dat uitmondt in een volledig commercieel toepasbaar eindproduct ontbreekt het echter vooralsnog. In opdracht van het Coördinerend Overleg van het Bedrijfstakonderzoek (BTO) van de Nederlandse drinkwaterbedrijven is daarom een studie uitgevoerd (zogenaamde fase 0) naar de behoefte aan en mogelijke waarde van autonome inspectierobots voor de drinkwaterbedrijven, waarmee de contouren voor een dergelijk systeem en een dergelijk traject kunnen worden geschetst. De resultaten hiervan worden gepresenteerd in het voorliggende rapport.

### **Kader: het proces leidend tot deze rapportage**

In het Directeurenoverleg van 11 december 2014 is onder andere een verkenning naar de CT-scan als toestandsbepalingsmethode voor begraven leidingen (Van Thienen, 2014a) gepresenteerd; deze methode blijkt niet haalbaar. Het DO heeft naar aanleiding van deze presentatie gevraagd welke nieuwe techniek 'in de wachtkamer staat' (antwoord van KWR: inspectierobots) en of en hoe de ontwikkeling van de inspectierobot kan worden versneld.

KWR heeft de vraag van de directeuren zo concreet mogelijk beantwoord in de vorm van een projectvoorstel, met duidelijke stappen en haalbare doelen, zoveel mogelijk op basis van bestaande technologie, een sterk consortium waarin alle benodigde ervaring en expertise zijn verenigd en een voorstel voor een financieringsconstructie: Prospero. Hoewel het achterliggende idee van dit voorstel door het CO werd onderschreven, is de uitwerking hiervan in het voorstel Prospero door het CO als niet toereikend beoordeeld, o.a. op grond van de mate van uitwerking van het voorstel en de geselecteerde partners voor het consortium. Daarom is besloten om met vertegenwoordigers van de waterbedrijven tot een aanscherping van het beoogde doel en het pad daarnaartoe te komen. Hiertoe is op 6 oktober 2015 een bijeenkomst gehouden. Hierin is enerzijds ter discussie gesteld in hoeverre de autonome inspectierobot (AIR) daadwerkelijk de meest geschikte oplossing is voor de waterbedrijven t.b.v. het vergaren van informatie over de toestand van het leidingnet en is anderzijds een basisdefinitie van functionele eisen opgesteld. Bovendien is hierbij door Vitens een eigen aanpak naar de ontwikkeling van een AIR i.s.m. enkele partners naar voren geschoven, welke geïntegreerd zou kunnen worden in de in dit rapport beschreven aanpak.

Op de CO vergadering van 16 november is op basis van een notitie over de resultaten van de bijeenkomst van 6 oktober gesproken over het onderzoek naar een autonome inspectierobot (AIR). Daar is, o.a. naar aanleiding van deze opbrengsten, afgesproken om op korte termijn aan de slag te gaan met fase 0 van een ontwikkelingstraject, betreffende een voorstudie naar behoefte en haalbaarheid, voorafgaand aan de mogelijke daadwerkelijke ontwikkeling: fase 1. Deze fase 0 dient om te komen tot een oordeel over het ontwikkeltraject voor een AIR voor in het leidingnet. In kleiner comité (Rik Thijssen, Bert van der Wal en Gertjan Medema) is hier vervolgens meer vorm aan gegeven. Hierbij zijn de verwachtingen m.b.t. de fase 0 duidelijk vastgesteld.



## 1.2 Door het CO uitgesproken verwachtingen

“De verwachting voor fase 0 is op hoofdlijnen: het samenvoegen van alle fragmenten aan informatie die beschikbaar zijn om de waarde van een AIR voor de drinkwatersector te kunnen bepalen en de contouren aan te geven van een productontwikkeltraject voor een AIR. Er wordt op korte termijn een rapport verwacht waarin de elementen van fase 0 geadresseerd zijn, op basis van kennis en informatie vanuit de voorbereidingstrajecten van waterbedrijven en van KWR. Voor het productontwikkeltraject wordt daarin gekeken naar fase 1, met een doorkijk naar een AIR-versie die in het leidingnet van drinkwaterbedrijven kan worden ingebracht om daar informatie over de leidingtoestand te verzamelen.”

## 1.3 Vervolg

Op basis van deze fase-0-studie kan een beslissing worden genomen om de ontwikkeling van een autonoom robotsysteem daadwerkelijk uit te gaan voeren in fase 1. Het opzetten van deze fase 1 licht buiten de scope van het voorliggende rapport.

## 1.4 Leeswijzer

In het voorliggende rapport worden de bevindingen van de fase-0-studie gerapporteerd. In hoofdstuk 2 wordt het kader geschetst, waarbij wordt ingegaan op de informatiebehoefte ten behoeve van assetmanagement, relevante ontwikkelingen en lopende initiatieven. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 een visie gepresenteerd van een technisch hulpmiddel dat in deze behoefte kan voorzien, namelijk autonome inspectierobots. Ook wordt een aantal alternatieven beschreven. Hoofdstuk 4 beschrijft een inventarisatie en duiding van inspectiebehoeften zoals geventileerd door de waterbedrijven en identificeert daarin innovatiekansen in het perspectief van de autonome inspectierobots en alternatieve concepten. De eisen waaraan de autonome robotsystemen zouden moeten voldoen, worden besproken in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 wordt een business case opgesteld voor de ontwikkeling en toepassing van autonome inspectierobots. Een mogelijk pad hiernaartoe wordt uitgestippeld in hoofdstuk 7. Hoofdstuk 8 schets een perspectief van hoe assetmanagement eruit kan zien als door inspectierobots op grote schaal vergaarde informatie beschikbaar is. Ten slotte vat hoofdstuk 9 de belangrijkste bevindingen samen in conclusies en aanbevelingen. In alle hoofdstukken is bovendien aan het begin een kader opgenomen, waarin de essentie van het betreffende hoofdstuk kort wordt verwoord.

## 1.5 Dankbetuiging

Tijdens het kortlopende en intensieve traject van deze studie hebben diverse personen van de Nederlandse drinkwaterbedrijven belangrijke input geleverd, ons van ideeën en commentaar voorzien, veel kennis en inzichten gedeeld en meegedacht over de richting en kwaliteit van dit onderzoek. Wij zijn deze personen zeer erkentelijk. Met name noemen wij graag (in chronologische volgorde) Rik Thijssen (Vitens), Bert van der Wal (Evides), Gertjan Medema (KWR), Bart Bergmans (Evides) en Henk de Kater (Evides), wier belangrijke bijdragen aan Hoofdstuk 4 wij expliciet willen benoemen, Arne Bosch (Waternet), Roel Diemel (Brabant Water), Thijs Pepels (WML), Eelco Trietsch (Vitens), Erik Driessen (Vitens), Bart Jacobs (Vitens), Hans Kraaijvanger (Vitens), Petra Holzhaus (WMD), Peter Horst (PWN), Maurits Maks (KWR) en Loet Rosenthal (PWN).

## 2 Kader

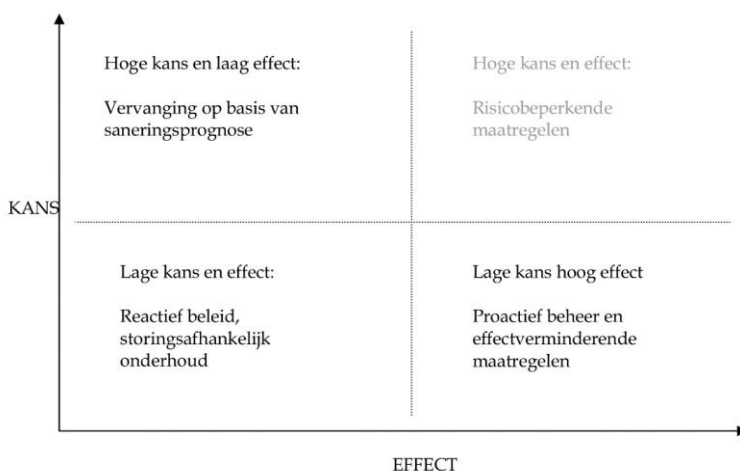
### De essentie van Hoofdstuk 2

Effectief assetmanagement vergt gegevens over de toestand van leidingen, waarbij met name leidingen met een hoge faalkans en een groot effect bij falen prioriteit verdienen. Er bestaan diverse technieken om de toestand in situ vast te stellen, maar deze zijn nog niet perfect en universeel toepasbaar. Er lopen verschillende initiatieven om betere inspectiemethoden voor de drinkwatersector te ontwikkelen of beschikbaar te maken, zowel in de hoek van de robotica als ook met een meer traditionele benadering.

### 2.1 Informatiebehoefte assetmanagement

Het assetmanagement onderzoek ten aanzien van het beheer van leidingnetten heeft zich de laatste tien jaar ontwikkeld van verkenning naar de definitie en scope tot de inzet van in bedrijfsprocessen toepasbare kennis en tools. Een duidelijke definitie van assetmanagement wordt gegeven in de 'Leidraad voor Systems Engineering binnen de GWW -sector, 2009', namelijk: 'Asset Management staat voor de activiteiten waarmee een organisatie uitvoering geeft aan het optimaal beheren van de assets en de daarmee verbonden prestaties, risico's en investeringen gedurende de gehele levenscyclus, met als doel het realiseren van het strategische bedrijfsplan en de doelstellingen van de organisatie' (de Boer et al., 2009).

Voor het optimaal beheren van assets speelt het onderbouwen van besluitvorming over beheer en sanering van leidingen een grote rol. Voor het kunnen onderbouwen van deze besluitvorming is het van belang dat de organisatie de te behalen prestatie, de risicoacceptatie en de beschikbare middelen vastlegt en vertaalt naar duidelijke richtlijnen. In Figuur 1 is een generieke vertaling gegeven van een risicobenadering naar beheermaatregelen, afkomstig uit het BTO-rapport *Inspectietechnieken voor rationeel saneringsbeleid van leidingnetten* (De Kater et al., 2010). Een dergelijke aanpak kan op basis van de specifieke invulling van de bedrijfsstrategie worden ingevuld.



FIGUUR 1: RISICOKWADRANTEN LEIDINGNETBEHEER (OVERGENOMEN UIT DE KATER ET AL., 2010).

Het beheer van leidingen wordt voor een belangrijk deel bepaald door beperkingen in kennis over de toestand van leidingen. De leidingen bevinden zich onder de grond en hebben in veel gevallen een lange levensduur en daarbij is informatie over fabricage, aanleg en beheer vaak slechts beperkt beschikbaar.

De in Figuur 1 onderscheiden beheermaatregelen zijn gebaseerd op een risicobenadering. Hieruit blijkt dat afhankelijk van het risicoprofiel er een andere wijze van beheer zal plaatsvinden. In Tabel 1 is per beheertype een overzicht gegeven van de belangrijkste behevraag en bijbehorende informatiebehoefte voor het onderbouwen van beslissingen over beheer en sanering van leidingen.

**TABEL 1: BEHEERVRAAG EN BELANGRIJKSTE INFORMATIEBEHOEFTE VOOR VERSCHILLENDE BEHEERTYPEN VAN HET LEIDINGNET**

Beheertype	Behevraag en voornaamste informatiebehoefte
Risicobeperkende maatregelen	<p><b>Hoe kan de leiding zo snel mogelijk gesaneerd worden, of hoe kunnen door actieve monitoring de risico's beheerst worden?</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toestand van individuele leidingen</li> <li>• Toestand en onderhoud van afsluiters (hoger geprioriteerd)</li> <li>• Effecten van falen</li> <li>• Monitoring van lekkage</li> <li>• Bewaking falen als gevolg van activiteiten derden</li> </ul>
Proactief beheer en effectreducerende maatregelen	<p><b>Hoe wordt inzicht verkregen of de leiding nog voldoet aan gestelde eisen en kunnen de effecten van falen gereduceerd worden?</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toestand van individuele leidingen</li> <li>• Toestand en onderhoud van afsluiters (hoger geprioriteerd)</li> <li>• Effecten van falen</li> <li>• Monitoring van lekkage (eventueel)</li> <li>• Bewaking falen als gevolg van activiteiten derden (eventueel)</li> </ul>
Sanering op basis van saneringsprognose	<p><b>Hoe worden die leidingen geselecteerd die niet meer voldoen aan gestelde eisen?</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Selectie van leidingen met een toestand die niet voldoet aan gestelde normen</li> <li>• Toestand en onderhoud van afsluiters (lager geprioriteerd)</li> </ul>
Reactief beleid, storingsafhankelijk onderhoud	<p><b>Hoe worden storingen zo snel mogelijk onderkend en verholpen?</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Storingsregistratie</li> <li>• Gedrag van degradatie van groepen leidingen</li> <li>• Toestand en onderhoud van afsluiters (lager geprioriteerd)</li> </ul>

Uit Tabel 1 blijkt dat de informatiebehoefte van leidingen afhankelijk is van het risico dat er aan wordt toegewezen. De belangrijkste vragen hebben betrekking op de toestand van de leiding. Voor met name die leidingen die in geval van falen een groot effect hebben, is inzicht in de toestand van groot belang. Dit betreffen in de regel transportleidingen,

leidingen die zijn gelegen nabij risicovolle objecten of leidingen voor de levering aan geprioriteerde klanten.

Drinkwaterbedrijven worden geconfronteerd met een verouderend leidingnet. De laatste jaren is er een duidelijke toename zichtbaar in de sanering van leidingen. Als voorbeeld het aandeel saneringen van PWN bedroeg in 2009 0,2% en in 2014 0,5% van het leidingnet. Het saneren van leidingen vergt grote investeringen en om die reden is het voor bedrijven van groot belang om deze saneringsinvesteringen aan te wenden voor die leidingen die op basis van objectieve criteria het hoogste risico vertegenwoordigen. Hierbij is betere kennis over de toestand van leidingen van groot belang.

## 2.2 Ontwikkelingen ICT-technische middelen

Drinkwaterbedrijven maken steeds meer gebruik van de mogelijkheden die ICT biedt voor het beter onderbouwen van saneringsbeslissingen. Hierbij zijn de volgende ontwikkelingen van invloed op een verdere professionalisering van assetmanagement bij drinkwaterbedrijven:

- Beslissingsondersteunende software voor leidingsanering, die de besluitvorming verbeteren door het in samenhang benaderen van diverse informatiestromen en die te relateren aan bedrijfsdoelstellingen.
- Expertmodellen, zoals:
  - hydraulische pakketten voor het nauwkeurig simuleren van de hydraulica in het leidingnet;
  - SIMDEUM voor het modelleren van het verbruik;
  - COMSIMA voor het berekenen van spanningen in de leidingwand;
  - diverse pakketten voor het monitoren van volumestromen met als doel lekken te bewaken.
- Leidinginformatiesystemen en GIS, die een goed toegankelijke informatievoorziening over het leidingnet en het beheer daarvan mogelijk maken.
- Databases, zoals USTORE waarbij storingen aan leidingen op uniforme wijze worden geregistreerd en opgeslagen.
- Datatransport, waarmee grote hoeveelheden data kunnen worden verzonden.

Bovenstaande ICT-ontwikkelingen scheppen belangrijke randvoorwaarden voor de ontwikkelingen van technieken voor het meten van de toestand van leidingen en de waterkwaliteit. Daarnaast is voor een goed gebruik van genoemde software in veel gevallen meer specifieke kennis nodig over de toestand van het leidingnet en de effecten van falen.

## 2.3 Recente ontwikkelingen inspectietechnieken

In de vorige paragrafen is aangegeven dat drinkwaterbedrijven steeds verder overgaan tot professioneel assetmanagement en dat ontwikkelingen op het gebied van ICT hiervoor nieuwe mogelijkheden scheppen. Een grote uitdaging hierbij is het verkrijgen van informatie over de toestand van leidingen. De afgelopen jaren zijn er diverse initiatieven geweest om te komen tot nieuwe technieken voor het inspecteren van de toestand van leidingen. De meest relevante ontwikkelingen worden hier kort toegelicht, waarbij er sprake is van enige overlap.

- Visuele inspectie, met behulp van een CCTV camera kan een visueel beeld worden verkregen van de binnenzijde van de leiding. Door gebruik te maken van een endoscoop kan vanaf een vast punt een beeld worden verkregen van de leiding. Dit is echter slechts mogelijk voor een beperkte lengte. Met name voor de rioleringen is een grote diversiteit ontwikkeld aan visuele inspectieapparatuur, met name voor het detecteren van verstoppingen, verzakkingen en scheuren. De sterkte van het

buismateriaal is niet te meten. Deze technieken worden ook in drinkwaterleidingen toegepast, voor bijvoorbeeld het vaststellen van corrosie van metalen leidingen, defecten aan cementen bekledingen of verplaatsingen en hoekverdraaiingen bij verbindingen. Voor meer informatie zie o.a. Arsénio (2013).

- In-line inspectie, diverse technieken kunnen worden ingezet om de toestand van een leiding aan de binnenzijde te meten. Hiervoor wordt een apparaat in de leiding gebracht waarop sensoren zijn gemonteerd. Deze technieken zijn in het algemeen kostbaar, mede door de benodigde toegangsconstructie en leiden tot een onderbreking van de levering. Bestaande technieken zijn onder andere georadar voor AC leidingen (door M.J. Oomen), Acoustic Resonance Technology voor GGJ (door Breivoll), magnetic flux leakage voor metalen leidingen (door o.a. PICA en Pure Technologies) en Eddy-current voor betonnen leidingen (door o.a. Pure Technologies). Deze technieken zijn met name toepasbaar voor grotere leidingdiameters, vanaf ca. 250 mm. Voor meer informatie zie o.a. de Kater et al. (2010), Liu et al. (2012) en Beuken en Mesman (2015).
- E-Pulse metingen, deze techniek die is ontwikkeld door het Canadese bedrijf Echologics, maakt het mogelijk om vanaf de straat een globale bepaling uit te voeren van de toestand van een leidingdeel. De meting vindt plaats tussen twee toegangspunten (brandkranen, afsluiters of in gegraven gaten tot aan de bovenkant van de leiding) en betreft de gemiddelde sterkte van het gemeten deel. De techniek kan worden toegepast op leidingen van metaal of van cementhoudend materiaal. De meting kan plaatsvinden zonder dat de levering wordt onderbroken. Voor meer informatie zie o.a. Beuken et al. (2013).
- Pigs (pipe inspection gauges), dit betreffen proppen die door de leiding worden voortbewogen door hydraulische druk. Traditioneel werden pigs ingezet om leidingen schoon te maken. In de olie- en gasindustrie zijn zogenaamde intelligente pigs ontwikkeld die zijn uitgerust met sensoren voor het meten van de toestand van de leiding. Er zijn diverse initiatieven om deze technologie ook toe te passen op drinkwaterleidingen (o.a. door APPLUS -RTD, Acquaint, Hak Industrial Services). Vooralsnog is dit niet verder dan het proefstadium gekomen. Recent is een initiatief gestart door STOWA en RIONED om te komen tot een intelligente pig door drinkwater- en afvalwaterleidingen (zie ook §2.4.3).
- Smartball, is een techniek die is ontwikkeld door het Canadese bedrijf Pure Technologies. Dit zijn balletjes die door de waterstroom worden meegevoerd en die zijn voorzien van apparatuur om lekken te registreren. Voor uitvoering van de meting is een in- en uittredepunt noodzakelijk.
- Pipe Inspector: een techniek vergelijkbaar met de Smartball en die in Nederland aangeboden wordt door Schmidt Waternet en waarmee een draadloze video-inspectie mogelijk is, gecombineerd met lekdetectie.
- Plaatsbepaling, dit betreffen technieken voor het vaststellen van de ligging (locatie en diepte) van een leiding. De meest gebruikte techniek is georadar. Deze techniek heeft echter beperkingen bij kunststof leidingen, vochtige bodems en bij de aanwezigheid van meerdere objecten. Nauwkeurige plaatsbepaling van waterleidingen is mogelijk met behulp van bijvoorbeeld gyroscopen. Hiermee zijn enkele proeven uitgevoerd. Voor meer informatie zie o.a. van Ravesteijn et al. (2011).

## 2.4 In Nederland lopende initiatieven

### 2.4.1 Ariel

In een samenwerking tussen KWR en Wetsus is met financiering vanuit "Vewin Restgelden" en de BTO themagroep Assetmanagement in het najaar van 2014 het project Ariel geïnitieerd.

Dit project beoogt de eerste stappen te zetten in de ontwikkeling van een autonome inspectierobot. Sinds mei 2015 werkt er een voltijdskracht aan dit project. De voorziene opbrengsten van dit project zijn:

1. Kennis over de bouw en mogelijke toepassing van hygiënisch betrouwbare robots ten behoeve van inwendige inspectie van waterleidingen.
2. Overzicht van vereisten en randvoorwaarden voor implementatie van een inspectiesysteem van semi-autonome robots in het leidingnet, geënt op de te verwachten toepassingspraktijk bij waterbedrijven.
3. Overzicht van bruikbare en beproefde componenten voor het beoogde robotsysteem (robotica, besturing, communicatie, sensing, behuizing en aandrijving).
4. Prototype robot die zich met kabelverbinding kan voortbewegen in een leiding, terwijl deze geen gevaar vormt voor de hygiëne, beproefd in testnetwerk (lab).
5. Eisen en randvoorwaarden voor een in de praktijk toepasbaar docking station, autonome besturing en communicatie.
6. Inzichten met betrekking tot toepasbaarheid van de ontwikkelde en aanverwante techniek (robot + sensoren) in drinkwatertransport- en distributieleidingen.
7. Aanzet voor vervolgtraject naar toepassing door drinkwaterbedrijven.

Tot op het moment van schrijven is er veel vooruitgang geboekt op de eerste drie punten. Er is een kennisbasis opgebouwd, er zijn enkele concepten bedacht die in een aantal iteraties tot de basis van een eerste prototype zijn doorontwikkeld. Hierbij heeft verfijning van de ontwerpen plaatsgevonden met een nadruk op de ontwikkeling/inpassing van voortstuwing, centrale positionering, drijfvermogen en opname van de bij Wetsus in ontwikkeling zijnde ultrasone sensor voor toestandsbepaling. Inmiddels is gestart met de bouw van een eerste prototype op basis van het doorontwikkelde concept. Hiervoor is ook veel werk gedaan aan het ontwikkelen en testen van componenten (gesloten koppelingen, motoren, etc.). Op de kenmerken van het systeem dat in dit project wordt beoogd wordt teruggekomen in Hoofdstuk 5.

#### **2.4.2 Vitens – DoBots - ID-Tec**

Vitens heeft vanaf najaar 2014 met diverse bedrijven gesproken over de mogelijkheid om door hen een robot te laten ontwikkelen die zich door het leidingnet kan bewegen. Daarbij zijn ook uitgangspunten, randvoorwaarden en vereisten gedefinieerd. Dit heeft uiteindelijk geresulteerd in een offerte die in september 2015 is uitgebracht door de bedrijven DoBots en ID-Tec. Bij de eerder genoemde bijeenkomst van 6 oktober heeft Vitens deze offerte met de overige waterbedrijven gedeeld en is voorgesteld om het Vitens-traject te laten samensmelten met het beoogde gezamenlijke traject van de waterbedrijven waarvan dit rapport de fase 0 vormt. In afwachting van verdere uitwerking hiervan heeft Vitens geen vervolgstappen genomen met DoBots en ID-Tec. Op de kenmerken van het systeem dat in deze offerte wordt beoogd wordt teruggekomen in Hoofdstuk 5. (Gedeelde) stappen in het ontwikkeltraject worden benoemd in Hoofdstuk 6.

#### **2.4.3 Project STOWA en RIONED: Pigs voor niet-metalen leidingen**

In de olie-, chemie- en gasectoren bestaan technieken om met name stalen leidingen over de gehele lengte, non-destructief te inspecteren met intelligente meetapparatuur, de zogenaamde intelligent pigs (pipeline inspection gauges). Deze instrumenten worden aan het begin van een leiding ingebracht en meten de toestand van de leiding in termen van corrosie, rondheid, deuken en de staat van de lasverbindingen.

Dit project beoogt een transfer van kennis en onderzoeksmethodieken over de inzet van technieken vanuit de olie-, chemie- en gasector naar de drinkwater- en afvalwaterleidingensectoren. Daarbij komen onderzoeks- en ontwikkelvragen naar voren hoe deze technieken zich verhouden tot specifieke randvoorwaarden uit de drinkwater- en afvalwatersector, zoals waterkwaliteit, kostenefficiëntie, specifieke degradatiemechanismen, de piggability van de systemen et cetera.

Het project heeft als beoogd resultaat dat over drie jaar gevalideerde intelligent pigs voor drinkwater- en afvalwatertransportleidingen beschikbaar zijn. Deze instrumenten dienen de belangrijkste (vooraf bepaalde) faalmechanismen te kunnen detecteren en kunnen functioneren binnen de gestelde randvoorwaarden van beide sectoren. Binnen het project worden meerdere prototypen en in de praktijk gevalideerde intelligent pigs gerealiseerd.

De pigs zullen worden ontwikkeld en na drie jaar commercieel worden aangeboden door te selecteren marktpartijen. Ten tijde van publicatie van dit rapport zijn er besprekingen gaande over de totstandkoming van dit project.

### 2.5 Bepalingen van waterkwaliteit in het drinkwaternetwerk

Aangezien assetmanagement gaat over de infrastructuur die nodig is om onberispelijk water bij de klant af te leveren, wordt ook kort een kader geschetst met betrekking tot waterkwaliteitsmetingen in het leidingnet. Het ligt voor de hand om vanuit dit oogpunt systemen die in het leidingnet worden ingebracht, zoals de beoogde AIR, te voorzien van sensoren op het vlak van waterkwaliteit wanneer dit op goedkope en eenvoudige wijze kan en de primaire functie van het systeem niet hindert. Er bestaan reeds kleine, lichte sensoren voor bepaalde waterkwaliteitsparameters en er zijn bovendien veel recente en voortgaande ontwikkelingen op dit gebied. Verderop in dit rapport zullen waterkwaliteitsaspecten opnieuw aan bod komen.

De meeste waterbedrijven voeren grondige monitoring van diverse waterkwaliteitsparameters uit op de productielocaties en nemen bovendien in het kader van het wettelijke programma (REWAB) monsters aan de tap bij mensen thuis voor analyse in het lab op o.a. microbiologische parameters. Over de beperkte representativiteit van laatstgenoemde monsters is reeds het een en ander geschreven (Van Lieverloo et al., 2004, Blokker en Vogelaar, 2009), maar hun doel is ook niet het detecteren van incidenten. Tussen de productielocatie en de klant wordt door de meeste bedrijven nauwelijks of niet gemeten aan de waterkwaliteit. Toch kan dit de moeite waard zijn omdat onderweg de waterkwaliteit wel kan veranderen. De belangrijkste oorzaken zijn opwerveling van sediment, onbedoelde introductie van ongewenst materiaal bij werkzaamheden, foutieve aansluitingen van drukinstallaties bij klanten en menging van waters uit verschillende bron. Het detecteren van dergelijke incidenten vergt continue monitoring op diverse locaties in het leidingnet. Dit is op zijn minst onpraktisch met een monsterprogramma. Sensoren bieden een technologische oplossing.

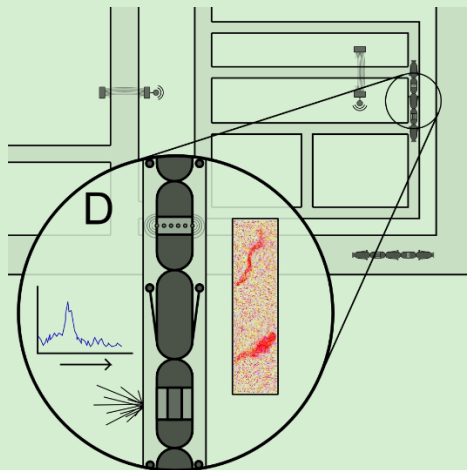
Er bestaan sinds enige jaren sensoren voor verscheidene waterkwaliteitsparameters in het drinkwaterdistributienet, zowel generiek als specifiek. Vitens heeft hier reeds ervaring mee opgedaan in de Proeftuin, en ook in andere contexten is hier ervaring mee opgedaan (bijv. Sawa). Buiten deze pilotcontexten vinden waterkwaliteitssensoren nog geen brede toepassing in drinkwaternetwerken.



## 3 Visie

### De essentie van Hoofdstuk 3

Door zijn zeer karakteristieke aard onderscheidt het drinkwaternet zich van andere leidingsystemen waarin toestandsbepalingen worden uitgevoerd. Om aan alle specifieke vereisten die deze speciale aard met zich meebrengt te voldoen, wordt een concept voor inspectie voorgesteld dat afwijkt van alle op dit moment toegepaste benaderingen. Het gaat hierbij om een systeem van autonoom opererende robots (*AIRs*, autonome inspectierobots) die zich permanent in het leidingnet bevinden en die voorzien zijn van diverse sensoren t.b.v. o.a. toestandsbepaling van leidingen. Ter vergelijking worden de meest voor de hand liggende alternatieve benaderingen besproken: *baseline* (status quo met enige doorontwikkeling), *slimme netwerken* (leidingen voorzien van sensoren), *toegankelijke netwerken* (meer toegangspunten voor bestaande inline technieken) en *smart dust* (een veelvoud van passief meegevoerde kleine meetmodules).



CONCEPT: TOESTANDBEPALING DOOR EEN AUTONOME INSPECTIEROBOT IN HET LEIDINGNET.

### 3.1 Inleiding

Het drinkwatertransport- en distributienetwerk kent een aantal specifieke karakteristieken, waarin het afwijkt van bijvoorbeeld rioolnetwerken of oliepijpleidingen. Omdat veel van de in het vorige hoofdstuk beschreven technieken in eerste instantie voor de laatstgenoemde systemen zijn ontwikkeld, is het belangrijk om even stil te staan bij de kenmerken die specifiek zijn voor drinkwaternetwerken. De belangrijkste vanuit het oogpunt van het uitvoeren van leidinginspecties zijn de volgende:

1. Het drinkwaternet is geen lineair traject maar een sterk vermaasd en vertakt systeem met veel bochten, aftakkingen, afsluiters, reparatiestukken, en materiaal- en diameterovergangen.
2. Directe toegangspunten tot het netwerk zijn slechts in beperkte mate aanwezig; elders vergt toegang graven en levert daarmee omgevingshinder op.
3. De stroming in het drinkwaternet is zeer variabel, zowel qua snelheid als op diverse locaties ook wat betreft richting.

4. Er worden voor alle materialen en systemen die in contact komen met drinkwater zeer hoge hygiënische eisen gesteld.
5. Het drinkwaternet is opgebouwd uit materialen met een grote diversiteit en er is weinig informatie beschikbaar over de fabricage en aanleg. Dit betekent dat in veel gevallen informatie over de toestand alleen beschikbaar is door het uitvoeren van metingen.

Om drinkwaternetwerken op grote schaal inwendig te inspecteren, moet een inspectietechniek worden toegepast die onder de genoemde condities effectief is. De eerste twee punten vereisen flexibiliteit m.b.t. diameters en actief sturen. Het derde punt maakt het wenselijk dat de inspectiemodule zichzelf kan voortbewegen en vastzetten in een leiding. Vanuit het oogpunt van het vierde punt zou het aantal keren dat het leidingnet open moet voor het in- en/of uitnemen van inspectie tools geminimaliseerd moeten worden. Het vijfde punt vergt in veel gevallen toepassing van meerdere meettechnieken voor een enkel tracé.

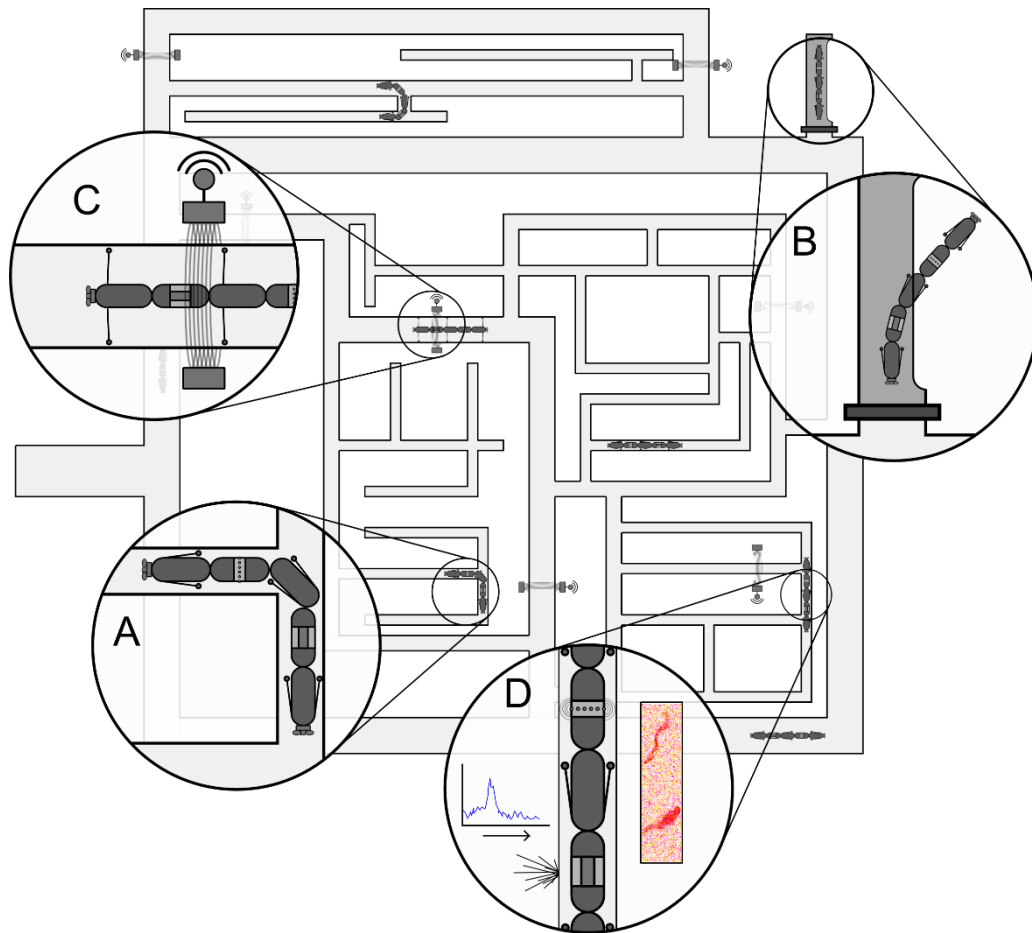
### 3.2 Visie: autonome inspectierobots

Om tegemoet te komen aan de specifieke eisen en karakteristieken van drinkwatertransport- en distributienetwerken, is een inspectieconcept voorgesteld (van Thienen, 2014b) dat specifiek is toegespitst op de hierboven beschreven kenmerken van het leidingnet. Dit concept omvat een systeem van in grote mate autonome robots die zich permanent in het leidingnet bevinden om zich daar te wijden aan hun primaire taak: meten. Deze robots zijn voorzien van sensoren om de toestand van leidingen te kunnen bepalen (bijvoorbeeld camera: visueel, laserscanner: geometrie, ultrasone sensor: effectieve wanddikte, etc.) en bovendien desgewenst van aanvullende sensoren voor het meten van waterkwaliteitsparameters (bijv. geleidbaarheid, temperatuur, troebelheid). De robots kunnen zichzelf voortbewegen en vastzetten in leidingen van verschillende diameters. Her en der in het netwerk verspreid bevinden zich leidingsegmenten waar de robot zich via inductie kan opladen, waar deze zijn vergaarde data kan afleveren, en waar hij nieuwe instructies kan ontvangen. De robots zijn in staat om autonoom door het leidingnet te navigeren. Bovendien zijn zij koppelbaar, zodat een gestrande robot door een collega gered kan worden. Omdat zij autonoom opereren, kunnen zij 24 uur per dag metingen uitvoeren, waarbij geen actieve besturing door een operator noodzakelijk is. Dit concept wordt geïllustreerd in Figuur 2.

### 3.3 Alternatieve concepten

#### 3.3.1 Inleiding

Om de toegevoegde waarde van de hierboven beschreven visie te toetsen, is het zinvol om deze af te zetten tegen een of meer alternatieven. In de volgende paragrafen worden enkele alternatieven op hoofdlijnen beschreven. Om de (on)mogelijkheden van deze alternatieve concepten in de beschouwing goed mee te nemen, is gepoogd om de grenzen van deze concepten duidelijk te omschrijven. Specifieke technieken, zoals bijvoorbeeld maar niet uitsluitend intelligent PIGs, kunnen binnen enkele van deze concepten worden geplaatst en vormen daarmee een component van deze concepten. De beschreven aspecten komen m.b.t. de AIR in meer detail hierboven en in de volgende delen van het rapport aan de orde. Een samenvattende vergelijking van de concepten is weergegeven in Tabel 2.



FIGUUR 2: VISIE VAN EEN SYSTEEM VAN AUTONOME ROBOTS DIE ZICH VRIJ DOOR HET NETWERK KUNNEN BEWEGEN (A), LOKAAL INGEBRACHT EN UITGENOMEN KUNNEN WORDEN (B) VOOR ONDERHOUD, OP DIVERSE PLAATSEN IN HET NETWERK VAN ENERGIE KUNNEN WORDEN VOORZIEN EN HUN DATA KUNNEN AFGEVEN (C), EN OVERAL WAAR ZE KOMEN RELEVANTE METINGEN UITVOEREN (D).

TABEL 2: KENMERKEN VAN HET BEOOGDE AUTONOME ROBOTSYSTEEM EN ALTERNATIEVE CONCEPTEN.

	<i>Baseline met focus op Intelligent PIGs</i>	<i>Autonome inspectierobot</i>	<i>Slim netwerk</i>	<i>Toegankelijk netwerk</i>	<i>Smart dust</i>
<i>aanwezigheid in leidingnet</i>	bezoeker	bewoner	onderdeel van netwerk	bezoeker	bezoeker
<i>toegang tot netwerk</i>	leidingnet open	net blijft gesloten	net blijft gesloten	leidingnet open	leidingnet open
<i>bereikbaarheid locaties</i>	lineair traject	vrije route	daar waar aangelegd	afhankelijk van inspectie-methode	afhankelijk van route water
<i>voortbeweging</i>	voortstuwing door water	eigen voortbeweging	n.v.t.	afhankelijk van inspectiemethode	voortstuwing door water
<i>toepassingen</i>	toestandsbepaling leidingen	toestandsbepaling + waterkwaliteit	toestandsbepaling + waterkwaliteit	toestandsbepaling + waterkwaliteit	toestandsbepaling* + waterkwaliteit
<i>tijdsvenster van toepassing</i>	momentopname	24/7/365	24/7/365	momentopname	momentopname
<i>deel van het netwerk</i>	primair - (secundair)	primair - secundair - (tertiair)	primair - secundair - (tertiair)	primair - secundair - (tertiair)	primair - secundair - (tertiair)
<i>toepassings-momenten</i>	geplande inzet	geplande inzet + incidenten	geplande inzet + incidenten	geplande inzet	geplande inzet
<i>toepasbare meettechnieken binnen randvoorwaarden van concept</i>	breed spectrum	breed spectrum, maar beperkingen m.b.t. afmetingen en energiebehoefte	breed spectrum, maar beperkingen m.b.t. afmetingen, functie en energiebehoefte	breed spectrum	voldoende kleine en energiezuinige sensoren

\* indien geschikte sensoren worden ontwikkeld

### 3.3.2 Baseline

<i>omschrijving</i>	De baseline is de huidige situatie, waarin met een combinatie van technieken (w.o. sensoren op PIGs, crawlers (kabelgebonden inspectietool op wielen; kunnen onder water worden toegepast), ROVs (Remotely Operated Vehicles, op afstand bestuurd, in het water zwevende inspectietool), uitwendige bepalingen, etc.) inspectie van de belangrijkste delen van het netwerk op een aantal belangrijke aspecten wordt uitgevoerd. Zowel de kosten als de informatieopbrengst zijn bij (en door) de huidige toepassingsomvang relatief beperkt. Een complete omschrijving hiervan wordt gegeven in §4.1. Doorontwikkeling van bestaande en reeds toegepaste technieken zoals de PIG, bijvoorbeeld in het kader van het in §2.4.3 beschreven initiatief valt ook binnen het baseline-scenario. De verwachting is dat binnen dit scenario vervangingen voor een groot deel zullen plaatsvinden op basis van opgetreden storingen.
<i>belangrijkste technologieën</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• carriers (PIGs, crawlers, ROVs)</li> <li>• meet- en registratietechnieken (ultrasoon, elektromagnetisch, destructief, camera's)</li> </ul>
<i>kosten</i>	orde <b>tientallen euros/m</b>
<i>opbrengsten</i>	Gemiddelde of specifieke toestand van punten of leidingsegmenten, zettingen, beelden van het buiswendige.
<i>haalbaarheid binnen 5 jaar</i>	gerealiseerd
<i>risico's</i>	Er is te weinig kennis over de toestand van leidingen. Omdat het leidingnet verouderd en daarmee het aantal storingen toeneemt, komt er meer maatschappelijke druk op drinkwaterbedrijven om leidingen te vervangen. Aangezien niet duidelijk is welke de leidingen zijn die hiervoor geprioriteerd moeten worden, en grootschalige inzet van de huidige inspectietechnieken als te duur wordt beschouwd, zal het bedrijf veel vervangingen moeten uitvoeren zonder dat duidelijk is dat het aantal storingen beheersbaar blijft.

### 3.3.3 Slimme netwerken

<i>omschrijving</i>	Door de voortgaande ontwikkeling van sensoren die direct of indirect iets kunnen zeggen over de toestand van leidingen en die ingebouwd (zullen) kunnen worden in of op de buiswand (zie bijvoorbeeld Trietsch et al., 2007), wordt het mogelijk om een drinkwatertransport- en -distributienetwerk aan te leggen dat zelf kan rapporteren over zijn toestand. Dit kan een slim netwerk worden genoemd (hoewel deze term ook breder wordt toegepast). De sensoren zijn alle op afstand uit te lezen en bieden een actueel beeld van de toestand van leidingen. We hanteren de volgende uitgangspunten: <ul style="list-style-type: none"> <li>- sensoren in de buiswand en verbinding die iets zeggen over de toestand en/of degradatie;</li> <li>- directe dataverbinding;</li> <li>- camera's op kritieke punten.</li> </ul>
<i>belangrijkste technologieën</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sensoren voor indirecte toestandsbepaling, zoals glasvezelkabels t.b.v. detectie van breuk van bewapening, hoekverdraaiing, etc.</li> <li>• geïntegreerde sensoren voor directe toestandsbepaling</li> </ul>
<i>kosten</i>	De kosten voor de aanleg van glasvezelkabels hebben we <b>niet kunnen achterhalen</b> . Naast aanleg bestaat een post voor de interpretatie van data.

	<p>Buizen met geïntegreerde sensoren zullen naar verwachting in aanschaf een veelvoud kosten van exemplaren die niet van sensoren zijn voorzien. Hiermee komen de aanlegkosten naar verwachting op <b>honderden euro's per meter</b>.</p> <p>Het op grote schaal retrofitten van bestaande leidingen wordt vanuit oogpunt van kosten als niet haalbaar beschouwd.</p>
<i>opbrengsten</i>	<p>Door toepassing van de juiste sensoren in de relevante leidingen wordt informatie over de toestand van alle van deze techniek voorziene leidingen verkregen op ieder gewenst moment. Echter, aanleg van buizen met geïntegreerde sensoren gaat pas zinvolle informatie over degradatie opleveren als, volgens bedoeling vele decennia later, de degradatie zijn intrede doet. De vraag doet zich voor of de gehanteerde techniek dan niet verouderd zal zijn (en daarmee ook niet meer kosteneffectief).</p>
<i>haalbaarheid binnen 5 jaar</i>	<p>De technologische ontwikkeling van in buizen geïntegreerde sensoren voor toestandsbepaling staat nog in de kinderschoenen. Daarna zal uitrol op significante schaal enige decennia kosten. Het aanleggen van glasvezelkabels in of langs leidingen en het gebruik hiervan voor bijvoorbeeld het bepalen van hoekverdraaiingen of het detecteren van het falen van bewapening wordt nu reeds gedaan.</p>
<i>risico's</i>	<p>Het is niet makkelijk om toegang te krijgen tot leidingen. Hierdoor zullen de graafkosten aanzienlijk zijn en mogelijk de verwezenlijking van deze technologieën verhinderen. Ook dient er hier aandacht te zijn voor de spreiding van de toestand. Aangezien deze in veel gevallen aanzienlijk is zullen er vele sensoren noodzakelijk zijn om een goed beeld te krijgen. Gezien de lange levensduur van leidingen is het plaatsen in nieuwe leidingen pas op de lange duur zinvol.</p>

### 3.3.4 Toegankelijke netwerken

<i>omschrijving</i>	<p>Inwendige inspectietechnieken die afhankelijk zijn van kabels (bijvoorbeeld crawlers) hebben een beperkt bereik (zowel wat betreft afstand alsook het aantal bochten dat kan worden genomen) en hebben toegang tot het inwendige van het netwerk nodig (bijvoorbeeld een mangat). In grote delen van het netwerk zijn deze toegangspunten in onvoldoende mate aanwezig om een significant deel van het netwerk met kabelgebonden technieken te inspecteren. De aanleg van extra toegangspunten kan dit probleem verhelpen. Om een netwerk volledig toegankelijk te maken, moet worden gedacht aan een toegangspunt om de 200-300 m en met maximaal 4 bochten tussen twee punten. We hanteren het volgende uitgangspunt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- toepassing van bestaande inspectietechnieken;</li> <li>- doorontwikkeling van deze technieken, bijvoorbeeld in het kader van het in §2.4.3 beschreven initiatief valt ook binnen dit scenario.</li> </ul>
<i>belangrijkste technologieën</i>	Bestaande appendages
<i>kosten</i>	<p>Stel om de 300 m een toegang - voor 119000 km zijn dat dan 400.000 toegangen. Stel dat aanleg inclusief graven etc. 1000€ kost, levert dit een kostenpost van <b>400 miljoen euro</b>.</p>
<i>opbrengsten</i>	Betere toegankelijkheid van het netwerk voor bestaande kabelgebonden inspectiemethoden
<i>haalbaarheid binnen 5 jaar</i>	Technologisch gezien nu haalbaar. Implementatie op significante schaal zal naar verwachting veel tijd en investeringen vergen.

<i>risico's</i>	Hoge investering die vervolgens niet wordt terugverdiend. Groter risico voor hygiënische betrouwbaarheid.
-----------------	---

### 3.3.5 Smart Dust

<i>omschrijving</i>	<p>Smart Dust is een generieke benaming voor micro-elektronische/ micro-elektromechanische systemen voorzien van sensoren (chemisch, mechanisch) die worden toegepast in grote hoeveelheden tegelijk. Hierbij moet worden gedacht aan honderden of duizenden eenheden ("motes") met een grootte op centimeterschaal tot (veel) kleiner. Bij toepassing in het drinkwaternet kunnen deze worden losgelaten in de waterstroom bij het pompstation en dieper in het netwerk weer worden opgevangen met speciale voorzieningen. Onderweg meten zij continu. Uitgangspunten voor de beschouwing hieronder zijn:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- eenheden van enkele centimeters groot;</li> <li>- voorzien van camera;</li> <li>- voorzien van dataopslag;</li> <li>- voorzien van waterkwaliteitssensor;</li> <li>- voorzien van hydrofoon;</li> <li>- voorzien van nader te ontwikkelen systeem voor locatiebepaling in de leiding;</li> <li>- voorzien van nader te ontwikkelen sensor voor toestandsbepaling;</li> <li>- behoeft opvangvoorziening diep in het net.</li> </ul>
<i>belangrijkste technologieën</i>	Micro-elektronica, sensoren
<i>kosten</i>	<p>Kosten per eenheid zullen beperkt zijn (honderd euro bij grootschalige productie?), mogelijk herbruikbaar, maar wel grotere aantallen nodig. De grootste kosten gaan naar verwachting in het aanleggen van opvanginstallaties zitten. Als we veronderstellen dat een mote een gemiddelde levensduur van 5 inzetten heeft en er 1000 worden losgelaten per meet sessie, zijn de materiaalkosten <b>20.000 euro per meet sessie</b>. Hierbij komen nog de (eenmalige) kosten voor installatie van opvangpunten. Uitgaande van 50-200 opvangpunten per meet/distributiegebied en aanlegkosten van 1500 euro per opvangpunt vergt dit een eenmalige aanvullende investering van <b>75.000-300.000 euro per meet/distributiegebied</b>.</p>
<i>opbrengsten</i>	Mogelijkheid om een grote hoeveelheid metingen te verkrijgen, maar met name eenvoudige parameters (geluid, beeld, temperatuur, eenvoudige chemische parameters) door de geringe omvang van en controle over de eenheden.
<i>haalbaarheid binnen 5 jaar</i>	Bij voldoende ontwikkelingspanning is binnen enkele jaren een systeem voor simpele parameters denkbaar. Aparte aandacht vergt de ontwikkeling van een effectief opvangsysteem voor de motes. De in de uitgangspunten genoemde nader te ontwikkelen sensor voor toestandsbepaling laat naar verwachting langer op zich wachten. Daarom wordt dit concept niet meegenomen in de behoeftebepaling van het volgende hoofdstuk.
<i>risico's</i>	Achterblijven van materiaal in het netwerk en desintegratie daarvan.



## 4 Inspectiebehoeften, huidige voorkeurstechnieken en innovatiekansen

### De essentie van Hoofdstuk 4

Een inventarisatie van de ontwikkelbehoeften van de bedrijven voor technieken voor enerzijds het vaststellen van het optreden of voortschrijden van specifieke degradatiemechanismen en anderzijds voor aanvullende inspectiebehoeften (zoals visuele inspectie, xyz-bepaling, monsternamen, etc.) toont dat voor circa de helft van deze behoeften het autonome robotsysteem een goede oplossing biedt.

Toepassing van dezelfde analyse op de in het vorige hoofdstuk besproken alternatieve concepten laat zien dat de AIR duidelijk meer oplossingen biedt die goed aansluiten op de door de bedrijven geuite ontwikkelingsbehoefte dan twee andere concepten. Hiermee kan een voorkeur voor dit concept boven de alternatieve concepten worden uitgesproken voor ontwikkeling.

### 4.1 Aanpak

Veel inspecties worden uitgevoerd om vast te stellen of en in welke mate bepaalde faalmechanismen optreden. Evides heeft hiervan een goed bruikbare opsomming gemaakt. Deze bevat eveneens een selectie van voorkeurstechnieken om het optreden en voortschrijden van deze specifieke faalmechanismen vast te stellen. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan een op een PIG of crawler gemonteerde elektromagnetische techniek voor de vaststelling van corrosie in stalen buizen in het transportnet, of aerial remote sensing voor het bepalen van ongelijke zettingen als er geen hoge nauwkeurigheid is vereist. Een volledig overzicht hiervan is weergegeven in Bijlage I.

De meeste waterbedrijven hebben op verzoek aangegeven hoe vaak de verschillende faalmechanismen in hun netwerken voorkomen en in welke mate er behoefte is aan (verdere) technologische ontwikkeling van inspectiemethoden voor dit specifieke faalmechanisme. Voor ieder van deze bij de faalmechanismen genoemde huidige voorkeurstechnieken is vervolgens vastgesteld welke bezwaren of nadelen er aan deze technieken kleven. Vervolgens is bepaald welke oplossingsrichting in algemene zin denkbaar en realistisch is voor deze specifieke problemen. Ten slotte is bepaald in hoeverre de autonome inspectierobot en de alternatieve concepten een oplossing voor deze problemen zouden bieden. Ter illustratie geeft Tabel 3 enkele voorbeelden. Een overzicht van al deze resultaten is opgenomen in bijlage I.

Naast het vaststellen van (de mate van) het optreden van faalmechanismen, kunnen inspecties nog voor diverse andere doeleinden worden ingezet. Bijlage I geeft een overzicht van de aanvullende behoeften voor inspectie. Hierbij is opnieuw in samenspraak met Evides een voorkeurstechniek benoemd (alle bedrijven zijn in de gelegenheid gesteld om alternatieve voorkeurstechnieken aan te dragen). Vervolgens is ook hier vastgesteld welke bezwaren of nadelen er aan deze technieken kleven, welke oplossingsrichting in algemene zin denkbaar en realistisch is voor deze specifieke problemen en in hoeverre de autonome

TABEL 3: ENKELE VOORBEELDEN VAN PROBLEEMIDENTIFICATIE EN DOOR DE CONCEPTEN GEBODEN OPLOSSINGEN.

<b>Falen buis/ verbinding</b>	<b>Huidige voorkeurs-techniek</b>	<b>probleem</b>	<b>oplossings-richting, breed toepasbaar</b>	<b>oplossing AIR</b>	<b>oplossing slim netwerk</b>	<b>oplossing toegankelijk netwerk</b>
Ongelijke zetting	<p>uitwendig (als hoge nauwkeurigheid vereist is)</p> <p>inwendig (als hoge nauwkeurigheid vereist is en uitwendig niet mogelijk is) op PIG/crawler</p>	kosten	iets waar je minder voor hoeft te graven	moet blijken uit business case	bepaling met glasvezel -> grond hoeft niet open; business case moet aantonen of dit echt goedkoper is	moet blijken uit business case
		leiding open en buiten bedrijf	iets waar de leiding niet voor open en buiten bedrijf hoeft	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	Meer (vaste) toegangspunten leiding niet hoeft te worden opgegraven en afhankelijk van de inspectietool niet buiten bedrijf gesteld.
		hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	leiding hoeft niet open	leiding hoeft niet open	Hygiënisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten

TABEL 4: GEHANTEERDE DEFINITIES VOOR ONTWIKKELINGSBEHOEFTE EN OPLOSSINGSVERMOGEN.

Ontwikkelingsbehoefte	<p>Zes waterbedrijven hebben de ontwikkelbehoefte m.b.t. iedere huidige voorkeurstechologie gescoord: laag, gering, hoog, of zeer hoog. Aan elk antwoord is een numerieke waarde gegeven, als volgt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Laag = 1</li> <li>· Gering = 2</li> <li>· Hoog = 3</li> <li>· Zeer hoog = 4</li> </ul> <p>Per faalmechanisme en andere inspectiedoelen is het gemiddelde van de antwoorden van de verschillende bedrijven uitgerekend.</p>
Oplossingsvermogen	<p>Op basis van antwoorden voor de verschillende problemen/ tekortkomingen bij de huidige inspectietechnieken is bepaald of de alternatieve technieken een oplossing bieden: ja/nee/mogelijk wel. Op basis daarvan is een score toegekend als volgt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Indien het concept een duidelijke verbetering biedt in vergelijking met de huidige inspectietechniek: score = 1</li> <li>· Indien het concept een verbetering biedt in vergelijking met de huidige inspectie techniek, maar de mate van deze verbetering niet helemaal duidelijk is (bv. "moet blijken uit business case": score = 0.5</li> <li>· Indien het concept geen verbetering biedt in vergelijking met de huidige inspectie techniek: score = 0</li> </ul> <p>Daarna is het gemiddelde per faalmechanisme/ ander inspectiedoel uitgerekend.</p>

inspectierobot een oplossing voor deze problemen zou bieden. Een overzicht van al deze resultaten is eveneens opgenomen in Bijlage I.

In de analyse die volgt zal worden gekeken naar de ontwikkelingsbehoefte van technologieën en naar het oplossingsvermogen van concepten. Deze begrippen worden gedefinieerd in Tabel 4.

#### 4.2 Behoefte dekking door autonome inspectierobots

Figuur 3 vat de resultaten samen voor de AIR. De figuur geeft voor hoeveel faalmechanismen er in welke mate (geen, gering hoog) door de AIR een oplossing wordt geboden voor de set van geïdentificeerde problemen voor de specifieke voorkeurstechiek van het faalmechanisme, gesorteerd naar de door de bedrijven geuite ontwikkelingsbehoefte m.b.t. technieken gericht op deze faalmechanismen. Let op dat de spreiding tussen de bedrijven hierbij relatief beperkt is (zie Bijlage I), oftewel de bedrijven zijn hierin eensgezind.

Weliswaar wordt er in Figuur 3 voor grofweg de helft van de behoeften geen oplossing geboden door de AIR, voor de andere helft wordt een hoog oplossingsvermogen geconstateerd. Het gaat hierbij met nadruk om punten waarvoor door bedrijven een hoge ontwikkelbehoefte is aangegeven.

De aspecten waarop de AIR positief scoort houden verband met de volgende eigenschappen van het systeem:

- Er is minder overlast voor de omgeving omdat er met AIRs niet meer hoeft te worden gegraven.
- Er is minder overlast voor de klant en de bedrijfsvoering omdat de leiding met AIRs niet meer buiten bedrijf hoeft.
- Er is minder besmettingsrisico omdat bij AIR de leiding bijna nooit meer open hoeft (voor inspectie).
- Er is mogelijk een kostenvoordeel t.o.v. de huidige situatie, maar dat is op dit moment niet hard te maken.

#### 4.3 Behoefte dekking door alternatieve concepten

Voor twee van de in §3.3 beschreven alternatieve concepten is eveneens ingeschat in welke mate deze een oplossing zouden bieden voor de bij de huidige voorkeurstechieken geïdentificeerde tekortkomingen en bezwaren, namelijk voor *slimme netwerken* en *toegankelijke netwerken*. De individuele waarderungen zijn opgenomen in Bijlage I. Deze zijn in eerste instantie ingevuld door KWR en vervolgens gecontroleerd en aangevuld door Bart Bergmans en Henk de Kater van Evides. Een weergave van de samengevatte resultaten wordt aangeboden in Figuur 4 voor de *slimme netwerken* en in Figuur 5 voor de *toegankelijke netwerken*. Voor het concept *slimme netwerken* blijkt een groot gedeelte van de problemen en behoeften niet opgelost te worden door dit concept. Voor circa een kwart is dit wel het geval. Bij het concept *toegankelijke netwerken* is het beeld dat, net als bij de AIR, dit concept voor grofweg de helft van de behoeften geen oplossing biedt. De andere helft is min of meer gelijkmatig verdeeld tussen een groep waarvoor een gering oplossingsvermogen is geconstateerd en een groep waarvoor een hoog oplossingsvermogen geldt.

Voor de *slimme netwerken* komen de positieve scores voort uit vergelijkbare systeemeigenschappen als bij de AIR. Dit geldt in mindere mate ook voor de *toegankelijke netwerken*. Een subjectieve waardering, afkomstig van Evides en onderschreven door de auteurs, is weergegeven in Tabel 5.

TABEL 5: KWANTITATIEVE WAARDERING VAN DE ASPECTEN VAN DE CONCEPTEN DIE BIJDAGEN AAN HUN OPLOSSINGSVERMOGEN.

	AIR	slim netwerk	toegankelijke netwerk
niet graven	10	10	7
niet buiten bedrijf	10	10	9
niet open	10	10	6
kostenvoordeel	?	0	?

#### 4.4 Synthese

De vraag in hoeverre het de moeite waard is om een nieuwe technologie te ontwikkelen moet worden beantwoord vanuit enerzijds de behoefte aan de verwachte opbrengsten van de betreffende technologie en anderzijds de mate waarin de betreffende technologie een oplossing biedt voor problemen met en tekortkomingen van de huidige voorkeurstechieken (en ook de kosten, hiervan is een indicatie gegeven in Hoofdstuk 3 en dit aspect wordt verder uitgewerkt voor de AIR in Hoofdstuk 6). Om dit te beoordelen zijn in een reeks figuren alle relevante faalmechanismen en aanvullende inspectiebehoeften (zie Bijlage I) gepositioneerd als functie van de geconstateerde ontwikkelbehoefte en het oplossingsvermogen van een specifiek concept. In Figuur 6 is dit gedaan voor de *autonome inspectierobot*. Figuur 7 en Figuur 8 bieden deze weergave voor respectievelijk het *slimme netwerk* en het *toegankelijke netwerk*. Het algehele beeld hierbij is dat de *autonome*

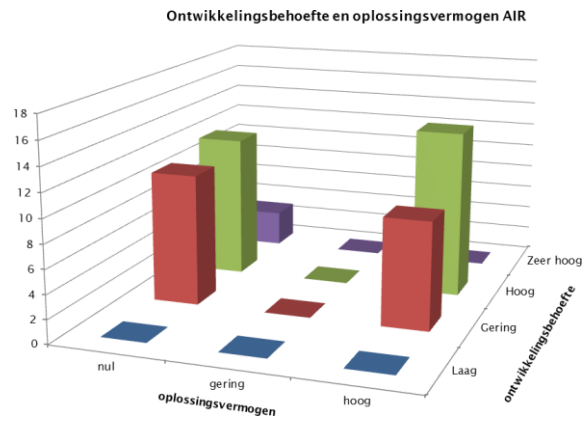
*inspectierobot* duidelijk meer oplossingen biedt met een hoge ontwikkelingsbehoefte en een hoog oplossingsvermogen (groene kwadranten in de figuren) dan de andere twee concepten.

Let op dat in alle figuren de horizontale as (ontwikkelingsbehoefte) in principe weliswaar tot 4 kan gaan, maar dat de gemiddelden van de door de bedrijven opgegeven waarden de 3 niet overschrijden.

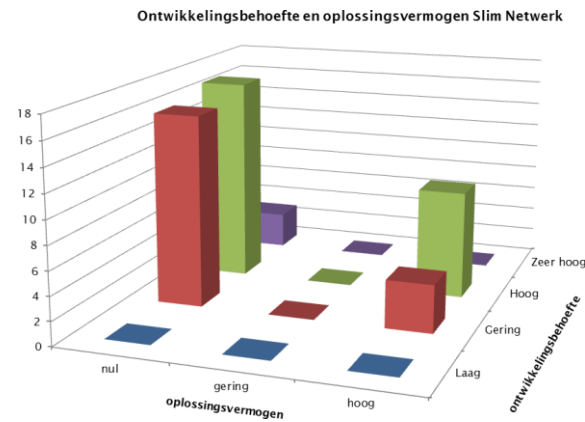
Tabel 6 biedt een lijst van specifieke inspectiebehoeften die zich in de groene kwadranten bevinden voor alle drie de concepten. Deze bevinden zich voor distributieleidingen met name buiten het veld van toestandsbepaling. Voor transportleidingen is de verdeling tussen toestandsbepaling en aanvullende inspectiebehoeften gelijkmatiger.

#### 4.5 Conclusie

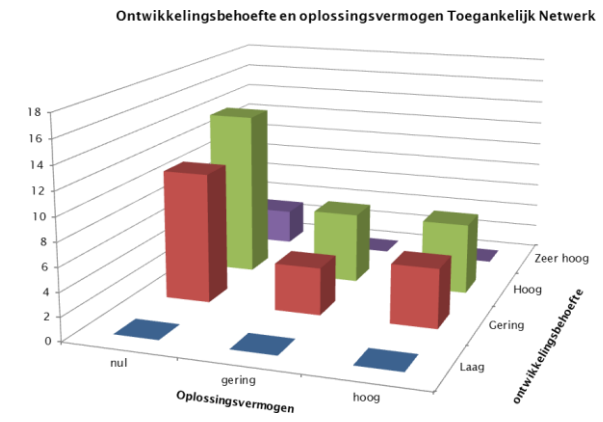
Het algehele beeld dat naar voren komt, is dat de *autonome inspectierobot* duidelijk meer oplossingen biedt met een hoge ontwikkelingsbehoefte en een hoog oplossingsvermogen (groene kwadranten in de figuren) dan de andere twee concepten. De hoge ontwikkelingsbehoefte betekent dat de bedrijven hebben aangegeven dat technologische ontwikkeling voorbij de huidige stand van zaken zeer wenselijk is, bijvoorbeeld vanwege het frequente voorkomen van het specifieke faalmechanisme en de ontoereikendheid van de huidige voorkeurstechologie. Het hoge oplossingsvermogen betekent dat de autonome inspectierobot in hoge mate in staat is om een oplossing te bieden voor de problemen die bestaan bij toepassing van de huidige voorkeurstechologie. Deze oplossingen bevinden zich voor distributieleidingen met name buiten het veld van toestandsbepaling. Voor transportleidingen is de verdeling tussen toestandsbepaling en aanvullende inspectiebehoeften gelijkmatiger. Wanneer gekozen moet worden voor de ontwikkeling van een enkele van de drie concepten, kan hiermee een voorkeur voor het AIR-concept boven de alternatieve concepten worden uitgesproken.



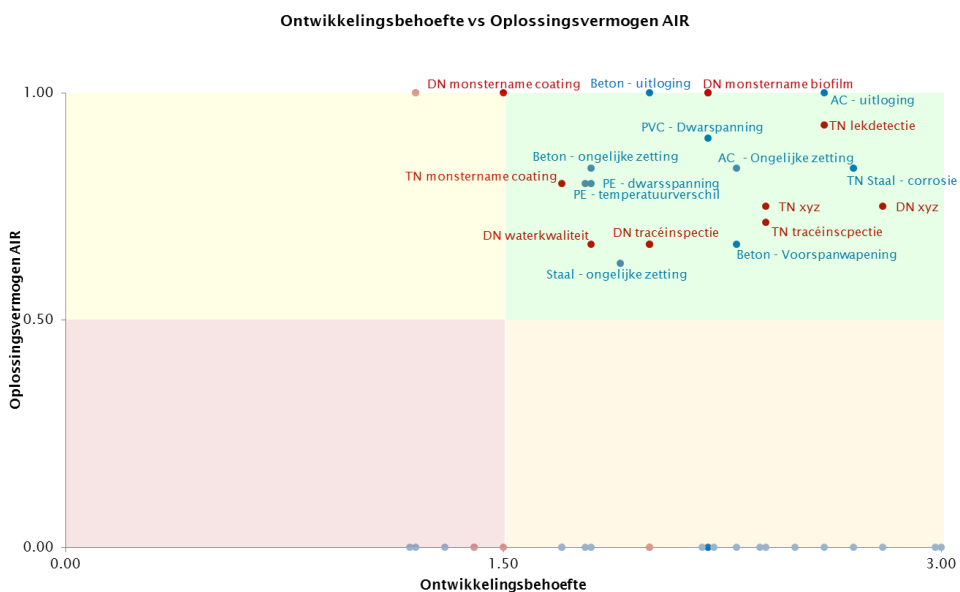
FIGUUR 3: BESCHIKBARE OPLOSSINGEN VOOR AANTALLEN FAALMECHANISMEN EN AANVULLENDE INSPECTIEBEHOEFEN GESORTEERD NAAR DOOR DE BEDRIJVEN OPGEGEVEN ONTWIKKELBEHOEFTE EN DE MATE WAARIN DE AIR HIERVOOR EEN OPLOSSING BIJDT.



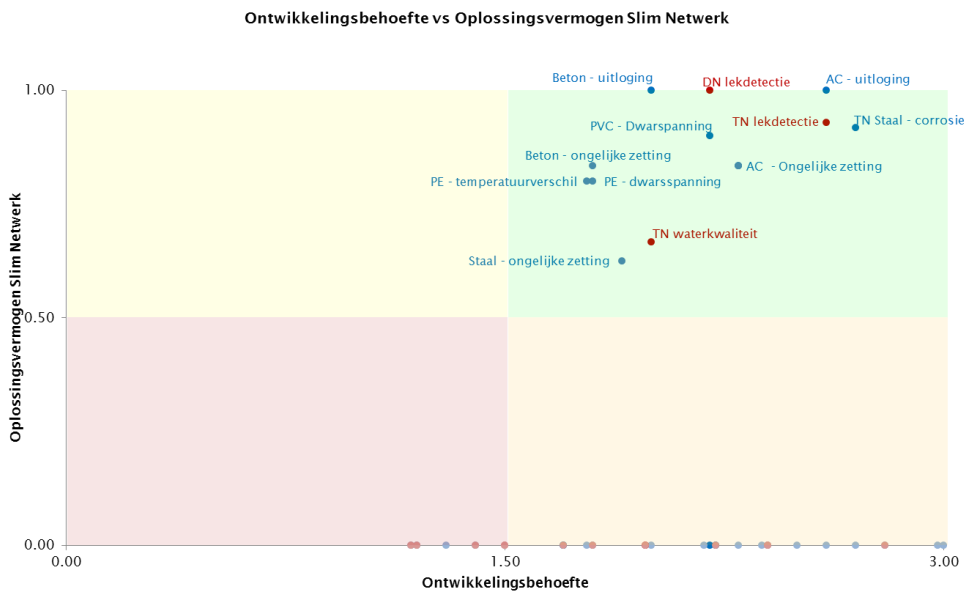
FIGUUR 4: BESCHIKBARE OPLOSSINGEN VOOR AANTALLEN FAALMECHANISMEN EN AANVULLENDE INSPECTIEBEHOEFEN GESORTEERD NAAR DOOR DE BEDRIJVEN OPGEGEVEN ONTWIKKELBEHOEFTE EN DE MATE WAARIN HET SLIMME NETWERK HIERVOOR EEN OPLOSSING BIJDT.



FIGUUR 5: BESCHIKBARE OPLOSSINGEN VOOR AANTALLEN FAALMECHANISMEN EN AANVULLENDE INSPECTIEBEHOEFEN GESORTEERD NAAR DOOR DE BEDRIJVEN OPGEGEVEN ONTWIKKELBEHOEFTE EN DE MATE WAARIN HET TOEGANKELIJKE NETWERK HIERVOOR EEN OPLOSSING BIJDT.



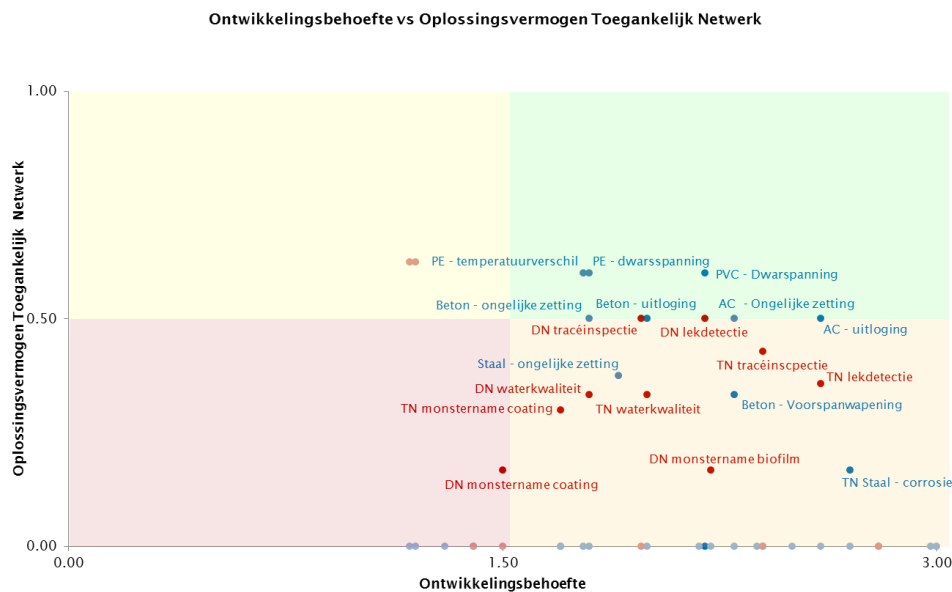
FIGUUR 6: PLOT VAN ALLE INSPECTIEBEHOEFTE (FAALMECHANISMEN EN AANVULLENDE BEHOEFTE) ALS FUNCTIE VAN DE ONTWIKKELINGSBEHOEFTE EN DE MATE WAARIN DE AIR EEN OPLOSSING BIEDT. LET OP DAT IN EEN AANTAL GEVALLEN MEERDERE PUNTEN OVER ELKAAR HEEN LIGGEN – IN DEZE GEVALLEN ZIJN ZIJ EEN STUKJE OPGESCHOVEN. TOEPASSING VAN AUTONOME ROBOTS IS MET NAME INTERESSANT IN HET GROENGEKLEURDE RECHTER BOVENKWADRANT VAN HET DIAGRAM. TN: TRANSPORTNET, DN: DISTRIBUTIENET.



FIGUUR 7: PLOT VAN ALLE INSPECTIEBEHOEFTE (FAALMECHANISMEN EN AANVULLENDE BEHOEFTE) ALS FUNCTIE VAN DE ONTWIKKELINGSBEHOEFTE EN DE MATE WAARIN HET SLIMME NETWERK EEN OPLOSSING BIEDT. LET OP DAT IN EEN AANTAL GEVALLEN MEERDERE PUNTEN OVER ELKAAR HEEN LIGGEN – IN DEZE



GEVALLEN ZIJN ZIJ EEN STUKJE OPGESCHOVEN. TOEPASSING VAN *SLIMME NETWERKEN* IS MET NAME INTERESSANT IN HET GROENGEKLEURDE RECHTER BOVENKWADRANT VAN HET DIAGRAM.



FIGUUR 8: PLOT VAN ALLE INSPECTIEBEHOEFTE (FAALMECHANISMEN EN AANVULLENDE BEHOEFTE) ALS FUNCTIE VAN DE ONTWIKKELINGSBEHOEFTE EN DE MATE WAARIN HET *TOEGANKELIJKE NETWERK* EEN OPLOSSING BIEDT. LET OP DAT IN EEN AANTAL GEVALLEN MEERDERE PUNTEN OVER ELKAAR HEEN LIGGEN – IN DEZE GEVALLEN ZIJN ZIJ EEN STUKJE OPGESCHOVEN. TOEPASSING VAN *TOEGANKELIJKE NETWERKEN* IS MET NAME INTERESSANT IN HET GROENGEKLEURDE RECHTER BOVENKWADRANT VAN HET DIAGRAM.

#### 4.6 Toepassingsscenario's Autonome Inspectierobots

De conclusie van de vorige paragraaf impliceert niet dat er geen ruimte voor en behoefte aan andere technieken bestaat en blijft bestaan. In het kader van de behoefte aan informatie over de daadwerkelijke toestand van leidingen is het denkbaar de inspectierobots in alle delen van het leidingnet toe te willen passen. Het is echter redelijk om te veronderstellen dat, vanwege randvoorwaarden van ruimte en energie, met op deze robots gemonteerde toestandsbepalingsmethoden niet dezelfde nauwkeurigheid kan worden bereikt als met bijvoorbeeld op PIGs gemonteerde apparatuur. Om die reden is het denkbaar dat de robots met name ingezet zullen worden in delen van het leidingnet waar een minder hoge mate van nauwkeurigheid volstaat en in delen waar inspectie met andere technieken niet wenselijk of haalbaar is vanwege de netwerkgeometrie, de kosten, of andere overwegingen. Meer in algemene zin blijft er dus naar verwachting ook voor andere technieken een toepassingsgebied.

Er zijn talloze specifieke scenario's denkbaar waarin de toepassing van autonome inspectierobots waardevolle aanvullende informatie levert. In deze gevallen is een ad hoc afweging van de voor- en nadelen noodzakelijk. Een sprekend voorbeeld is de WRK-leiding, waar vanwege het grote risico een frequente inspectie wenselijk is.

TABEL 6: OVERZICHT VAN INSPECTIEBEHOEFTEEN WAAR DE VERSCHILLENDE CONCEPTEN EEN GEMIDDELD TOT HOOG OPLOSSINGSVERMOGEN (GROEN: 1,0; GEEL  $\geq 0,75$ ; ORANJE  $\geq 0,5$ ) BIJEDEN. ALLEEN ASPECTEN MET EEN BOVENGEMIDDELTE ONTWIKKELINGSBEHOEFTE ( $\geq 1,5$ ) ZIJN WEERGEGEVEN. TN: TRANSPORTNET, DN: DISTRIBUTIENET.

<i>AIR</i>	<i>slim netwerk</i>	<i>toegankelijk netwerk</i>
1 TN AC Uitloging	1 TN AC Uitloging	1 TN - lokale inspectie
2 DN - lekdetectie	2 DN - lekdetectie	2 DN - lokale inspectie
3 DN - monstername (biofilm)	3 TN Beton Uitloging	3 DN PVC Dwarsspanning
4 TN Beton Uitloging	4 TN - lekdetectie	4 DN PE Dwarsspanning
5 DN - monstername (coating)	5 TN Staal Corrosie	5 DN PE Temperatuurverschil (niet-trekvast)
6 TN - lokale inspectie	6 DN PVC Dwarsspanning	6 TN AC DwarsspanningUitloging
7 DN - lokale inspectie	7 TN Beton Voorspanwapening	7 TN AC Ongelijke zetting
8 TN - lekdetectie	8 TN AC Ongelijke zetting	8 DN - lekdetectie
9 DN PVC Dwarsspanning	9 TN Beton Ongelijke zetting	9 TN Beton Uitloging
10 TN Staal Corrosie	10 DN PE Dwarsspanning	10 DN - tracéinspectie
11 TN AC Ongelijke zetting	11 DN PE Temperatuurverschil (niet-trekvast)	11 TN Beton Ongelijke zetting
12 TN Beton Ongelijke zetting	12 TN - waterkwaliteit	
13 DN PE Dwarsspanning	13 TN Staal Ongelijke zetting	
14 DN PE Temperatuurverschil (niet-trekvast)		
15 TN - monstername (coating)		
16 DN - xyz		
17 TN - xyz		
18 TN - tracéinspectie		
19 TN Beton Voorspanwapening		
20 TN - waterkwaliteit		
21 DN - tracéinspectie		
22 DN - waterkwaliteit		
23 TN Staal Ongelijke zetting		

## 5 Karakteristieken en vereisten voor een AIR

### De essentie van Hoofdstuk 5

De vereisten aan het beoogde robotsysteem zijn duidelijk op een rij gezet. Vastgesteld is dat zowel in het Ariel-traject als in het door Vitens voorgestelde traject in zijn huidige vorm een deel van de benodigde functionaliteit ontwikkeld zal worden, maar dat er meer nodig is. Hiertoe wordt in verderop in Hoofdstuk 7 een traject geschetst. Naast technologische ontwikkeling van het robotsysteem zelf zal inzet hiervan enige aanpassingen in het netwerk vergen t.b.v. inbreng en uitname en overdracht van energie en data. Ook de organisatie van de eindgebruiker moet worden ingesteld op het draaiend houden van het robotsysteem en op het optimale gebruik van de gegevensstroom die het systeem zal opleveren. Ten slotte brengt het gebruik van de robots in het leidingnet ook enige risico's met zich mee. Deze zijn benoemd.

### 5.1 Vastgestelde vereisten

In de bijeenkomst van 6 oktober is een lijst van vereisten voor het beoogde robotsysteem opgesteld. Ook is een fasering in de ontwikkeling voorgesteld, van prototype 1 met basale functionaliteit via een uitgebreider prototype 2 naar het eindproduct. Een overzicht van de vereisten en in welke fase hieraan moet worden voldaan is weergegeven in Tabel 7. Hierin is tevens aangegeven in hoeverre de lopende initiatieven, enerzijds Ariel en anderzijds het initiatief van Vitens met DoBots en ID-Tec, naar verwachting aan deze vereisten zullen voldoen (inschatting op basis van de beschikbare documentatie). Hierbij wordt opgemerkt dat Vitens in haar traject diverse aspecten heeft besproken met de betrokken bedrijven die niet expliciet in de hieruit resulterende offerte (Van Rossum en van der Valk, 2015) zijn benoemd, of die expliciet buiten de activiteiten van de offerte worden geplaatst (samen gemarkeerd met ○ in Tabel 7). Er kan dus ook niet zondermeer van worden uitgegaan dat deze aspecten gerealiseerd kunnen worden binnen het kader van de offerte (hoewel de partijen hier technische mogelijk wel toe in staat zijn).

TABEL 7: OVERZICHT VAN VASTGESTELDE VEREISTEN VAN HET ROBOTSISTEEM. SYMBOLEN: ~ IN ENIGE MATE, ✓ IN GROTE TOT VOLLEDIGE MATE, ○ BESPROKEN MET VITENS, NIET IN OFFERTE OPGENOMEN.

	aspect	fase			lopend initiatief	
		P1	P2	E	Ariel	ID/DB
1	<b>behuizing</b>					
1.1	drukbestendig	✓	✓	✓	✓	✓
1.2	horizontale bochten en T-stukken	✓	✓	✓	✓	✓
1.3	verticale beweging tot een hoek van 60°	✓	✓	✓	~	○
1.4	systeem voor inbrengen/uitnemen		✓	✓		
1.5	snelheid		✓	✓	✓	✓
1.6	door alle soorten afsluiters, inclusief vlinderkleppen		✓	✓	✓	○
1.7	een of meerdere diameterbereiken, minimale diameter 100 mm			✓	✓	✓
1.8	zo min mogelijk fysiek contact (onderhoud, accu's)			✓	✓	○
1.9	(re)produceerbaarheid onderdelen			✓		
2	<b>voortbeweging, positionering en navigatie</b>					
2.1	autonome voortbeweging, met de stroom mee en tegen de stroom in	✓	✓	✓	✓	✓
2.2	besturing, beïnvloeding, opdrachten <ul style="list-style-type: none"> <li>• interactief (d.w.z. bij te sturen op moment dat communicatie mogelijk is) <ul style="list-style-type: none"> <li>• continu</li> </ul> </li> </ul>	✓	✓	✓		○
2.3	exacte en stabiele positionering (t.o.v. de wand, m.a.w. centreerbaar, en lateraal)		✓	✓	✓	✓
2.4	aansturing op basis van hydraulisch model			✓		
2.5	omgang met obstructies			✓		○
2.6	alarmfunctie, zoekt contact bij overschrijding			✓		
3	<b>sensoren, data en communicatie</b>					
3.1	locatiebepaling (x,y,z), bepaling buisrondheid en materiaal (visueel)	✓	✓	✓		✓
3.2	dataoverdracht van en naar de robot	✓	✓	✓		✓
3.3	voorbereid op vele typen sensoren	✓	✓	✓	✓	○
3.4	bepaling toestand leidingmaterialen AC, GG en PVC <ul style="list-style-type: none"> <li>• buis + verbinding</li> <li>• degradatiemechanismen <ul style="list-style-type: none"> <li>• spanning, zetting <ul style="list-style-type: none"> <li>• (waterkwaliteit)</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	~	✓	✓		~○
3.5	herkenning van obstructies			✓		✓
3.6	interpreteerbaar			✓		○
4	<b>toepassing</b>					
4.1	terugvindbaar en recupereerbaar		✓	✓		○
4.2	veilig		✓	✓	✓	○
4.3	“publieksvriendelijk” (geen weerstand oproepend bij de klant)		✓	✓		○
4.4	hygiënisch		✓	✓	✓	○
4.5	drukval, bruin water			✓		
4.6	rendabel			✓		○

## 5.2 Vereisten netwerk

Toepassing van autonome inspectierobots in het netwerk vergt aanpassingen van het netwerk in de gebieden waar de robots zullen worden toegepast. Er moeten inbrenge- en uitnamepunten worden gerealiseerd in een beperkte dichtheid en oplaad- en dataoverdrachtpunten. De dichtheid van de laatstgenoemde punten hangt samen met het maximale bereik van de robots, die van het eerstgenoemde met de frequentie van uitname (voor onderhoud of anderszins). Het uitgangspunt is dat de robots permanent in het leidingnet verblijven. Daarom zullen de oplaad- en dataoverdrachtpunten naar verwachting een hogere dichtheid kennen (zie Figuur 2). Maar er kan ook worden gedacht aan mobiele laad- en overdrachtstations.

Laatstgenoemde punten moeten voorzien zijn van energietoevoer en moeten bovendien over een data-aansluiting beschikken voor het doorsturen van de meetgegevens die door de robots worden afgegeven naar de centrale opslag van het waterbedrijf en nieuwe instructies aan de robots kunnen worden gegeven.

## 5.3 Vereisten organisatie eindgebruiker

Hoewel de robots autonoom (heten te) zijn, vergt de inzet van deze robots ook de nodige menskracht. In de eerste plaats is dit nodig voor onderhoud van het systeem in brede zin en het oplossen van problemen ermee. Dit houdt ook in het lokaliseren en uitnemen van gestrande robots. Daarnaast zal dataverwerking en interpretatie, afhankelijk van de gebruikte sensoren, de nodige menselijke inspanning vereisen. Bovendien moeten verschillende inspectiebehoeften binnen de organisatie worden gecoördineerd en geprioriteerd bij het plannen van de routes en inzet van sensoren van de robots. Ten slotte moeten alle assetmanagementprocessen die baat kunnen hebben bij de inzet van gegevens die worden voortgebracht door de robots zodanig worden ingericht dat zij hier ook daadwerkelijk iets mee doen en van profiteren.

## 5.4 Risico's van autonome inspectierobots in het leidingnet

Tabel 8 geeft een overzicht van de risico's van toepassing van autonome inspectierobots in het leidingnet en suggesties hoe met deze risico's om te gaan. Let op dat veel van de genoemde risico's ook op andere inspectietechnieken van toepassing zijn.

## 5.5 Toepasbaarheid in andere dan drinkwaterleidingen

Toepassing van inspectierobots in andere dan drinkwaterleidingen ligt op zichzelf voor de hand. In eerste instantie kan hierbij worden gedacht aan afvalwaterleidingen. Deze kunnen over enigszins afwijkende karakteristieken beschikken (uniforme stroomrichting, geringere mate van vermazing, niet altijd volledig gevuld), hetgeen gereflecteerd moet worden in de karakteristieken van de robot. Daarnaast stelt de vloeistof aanvullende eisen aan het robotsysteem, bijvoorbeeld i.v.m. de mogelijke aanwezigheid van vaste bestanddelen in het afvalwater. Uitbreiding van de toepasbaarheid van de AIR op afvalwaterleidingen zou dus een heroverweging/uitbreiding van de bovenstaande karakteristieken betekenen. Met oog op de complexiteit van datgene wat nu reeds wordt voorgesteld voor drinkwaterleidingen alleen, is het aan te bevelen om uitbreiding en doorontwikkeling naar andere soorten leidingen pas te overwegen na succesvolle toepassing in drinkwaterleidingen, zodat de kans van slagen voor het drinkwaterleidingnet zo groot mogelijk is.

TABEL 8: OVERZICHT VAN RISICO'S VAN TOEPASSING VAN AUTONOME INSPECTIEROBOTS IN HET LEIDINGNET MET MOGELIJKE / BEOOGDE BEHEERS/RESPONSMAATREGELEN.

Risico	Beheers/responsmaatregelen
Verontreiniging bij intrede	adequaat reinigingsprotocol
Mechanische problemen	redding door andere robot
Lekkage naar behuizing	redding door andere robot + terug naar uitnamepunt voor reparatie
Biofilmvorming levert probleem op bij vastklemmen	vorm en materiaal van klempunten
Biofilmvorming op sensoren	terug naar uitnamepunt voor reiniging, ontwikkeling in situ reinigingssysteem
Vastraken in corrosie, bocht, afsluiter, zinker of vernauwing	vaststelling, lokalisatie, opgraven en leiding vervangen
Beweging die niet gemaakt kan worden (combinatie van horizontalen en verticale bocht?)	andere route kiezen
De weg kwijt, gedesoriënteerd	redding door andere robot
Batterij is op	redding door andere robot
Laadstation defect	reparatie laadstation, robot moet hierop wachten
verdachte meetwaarden	terug naar uitnamepunt voor controle/kalibratie
Problemen dataopslag of verwerking in robot	terug naar uitnamepunt voor reparatie
Problemen dataopslag of verwerking tussen robot en centrale dataverwerking	terug naar uitnamepunt voor reparatie
Meetsituatie buiten specificaties (grote diameter, onbekend materiaal)	ad hoc oplossing

## 6 Business case voor ontwikkeling en toepassing van AIRs

### De essentie van Hoofdstuk 6

Er is een businesscase voor de ontwikkeling en inzet van AIRs opgezet. Aan de kostenkant voor de ontwikkeling bieden andere initiatieven enige houvast – deze zullen ruim boven de 1 miljoen euro liggen. De vereiste inspanning wordt ingeschat op bijna 2000 uren, aangevuld met ruim 600 k€ aan directe kosten. De exploitatiekosten worden bij bepaalde aannames geschat op 45 k€ per robot per jaar.

Aan de opbrengstenkant wordt een cijfermatige uitwerking gemaakt voor drie besparingsposten voor heel Nederland:

- voorkoming van te vroege vervanging: 14,5 M€ per jaar
- Reduceren van het lekverlies: 2,1 M€ per jaar
- Reductie van storingen: 6,0 M€ per jaar

De som hiervan bedraagt 22,7 M€ per jaar. Daarnaast worden diverse bijkomende voordelen geïdentificeerd, die weliswaar moeilijker te becijferen zijn, maar wel degelijk ook een financiële waarde vertegenwoordigen. Op basis van een scenario van brede inzet van de robots met 2 maal jaarlijks een inspectie van alle leidingen van 100 mm en groter levert dit een financiële ruimte voor toepassing van de robots van maximaal 38 k€ per robot per jaar op. Dit scenario vergt bijna 600 robots voor heel Nederland.

Binnen de globale mogelijkheden voor een kostenschatting voor de inzet van robots constateren we dat de financiële baten en lasten van een vergelijkbare orde grootte zijn. Dit feit, in combinatie met de niet-kwantificeerbare voordelen, leidt tot de conclusie de business case als positief te beoordelen.

### 6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt gepoogd een business case op te zetten voor de toepassing van het eerder beschreven systeem van autonome inspectierobots. Hierbij wordt aandacht besteed aan de kosten van ontwikkeling en exploitatie en de primaire en secundaire opbrengsten. Het doel van deze business case is niet om met een hoge mate van nauwkeurigheid kosten en opbrengsten te kwantificeren. Dit is onmogelijk bij de grote hoeveelheid onzekerheden in het geheel. Wel is de bedoeling om in ieder geval enkele richtgetallen te produceren en potentiële financiële valkuilen te vermijden.

### 6.2 Kosten van ontwikkeling

In 2015 zijn de kosten van de ontwikkeling van een robotsysteem tot het niveau van prototype 2 (zoals beschreven in het vorige hoofdstuk) in het kader van het Prospero-voorstel (Van Thienen et al., 2015) begroot op 925 keuro, voor een aanzienlijk deel uitgaande van academische kaders (o.a. m.b.t. loonkosten van onderzoekers in opleiding). Het Prospero-voorstel was bovendien zodanig opgezet dat in synergie met het Ariel-project tot een prototype zou worden gekomen.

Uitgaande van een doorontwikkeling van prototype 2 naar het eindproduct en hogere loonkosten is de verwachting dat de kosten voor fase 1 ruim boven de 1 miljoen euro zullen uitvallen, waarbij ook hier wordt uitgegaan van voortbouwen op de resultaten van Ariel. Het voorstel dat Vitens in zijn eigen initiatief van 2 marktpartijen heeft gekregen heeft weliswaar (vooralsnog) een veel lager prijskaartje, maar lijkt ook (in eerste instantie) in mindere mate aan de gestelde eisen te voldoen, zie §5.1.

In het nu beoogde productontwikkeltraject moeten vergelijkbare stappen worden doorlopen, naar verwachting voor een aanzienlijk deel door commerciële partners. In hoeverre dit de oorspronkelijke kosteninschatting van Prospero doet wijzigen, is op dit moment moeilijk te zeggen. Nader overleg met eventuele commerciële en andere partners kan hier duidelijkheid over scheppen. Daarnaast zal ook de laatste stap, van prototype 2 naar eindproduct, moeten worden gefinancierd en uitgevoerd. Ook om de omvang hiervan te bepalen moet overleg met beoogde commerciële partners worden gevoerd.

TABEL 9: BENODIGDE STAPPEN IN HET ONTWIKKELTRAJECT EN INSCHATTING VAN DE BIJBEHORENDE INSPANNING (IN MENS-DAGEN) IN DE OPEENVOLGENDE FASEN. P1: PROTOTYPE 1, P2: PROTOTYPE 2 (ZIE HOOFDSTUK 5).

stap	omschrijving	inspanning P1 (mens- dagen)	inspanning P2 (mens- dagen)	inspanning eindproduct (mensedagen)	som
1	opzet consortium	50			50
2	randvoorwaarden en grof ontwerp	10	5		15
3	bouw proefinstallatie	20	5		25
4	chassis/behuizing	50	20		70
5	aandrijving	50	20		70
6	energiesysteem	50	20	10	80
7	plaatsbepaling	50	20	10	80
8	aansturing	50	20	20	90
9	centrale positionering / stabilisatie		40	20	60
10	sensorplatform, inclusief extern betrokken sensoren	50	20	20	90
11	systeem voor energie- en dataoverdracht	50	20	20	90
12	systeem voor inbreng/ uitname		50	20	70
13	autonomie	70	30	20	120
14	locatiebepaling	50	20	10	80
15	navigatie m.b.v. model			35	35
16	omgang met obstructies			25	25
17	alarmfunctie			25	25
18	interactiviteit	30	20	10	60
19	systeem voor recuperatie		40	20	60
20	integraal robotsysteem	30	15	15	60
21	testen componenten en integraal systeem	30	20	15	65
22	pilots prototype 2 in operationeel leidingnet*		50		50
23	pilots eindproduct in* operationeel leidingnet			50	50
	projectbegeleiding waterbedrijven	20	20	20	60
25	projectmanagement 10%	88.5	65.25	51.75	205.5
26	onvoorzien 15%	88.5	65.25	51.75	205.5
	<b>som</b>	<b>837</b>	<b>585.5</b>	<b>468.5</b>	<b>1891</b>

\* inclusief inspanning bij de waterbedrijven



TABEL 10: GROVE INSCHATTING VAN DIRECTE KOSTEN IN HET BEOOGDE ONTWIKKELTRAJECT.

stap	omschrijving	kosten P1 (k€)	kosten P2 (k€)	kosten eindproduct (k€)	som
1	materialen				
	proefopstelling	40			40
	robots	40	80	200	320
	station energie/data	20		50	70
	inbreng/uitname		20	50	70
	pilots		40	40	80
2	onvoorzien	12	12	30	54
	<b>som</b>	112	152	370	634

Tabel 9 geeft een overzicht van de benodigde stappen met een grove inschatting van de bijbehorende inspanning. Een grove inschatting van de aanvullende directe kosten is weergegeven in Tabel 10. Beide inschattingen zijn gemaakt door KWR op basis van de ervaringen uit het Ariel-project en ter toetsing voorgelegd aan de waterbedrijven. Hierbij is voor de materiaalkosten voor de robots uitgegaan van 1 exemplaar van prototype 1, 2 exemplaren van prototype 2 (mede i.v.m. testen van recuperatie) en 5 exemplaren van het eindproduct.

### 6.3 Kosten van toepassing

De kosten van toepassing van de AIR zijn op dit moment zeer lastig in te schatten. De grootste onzekerheden zijn hierbij de volgende:

- productiekosten – deze hangen mede af van ontwerpkeuzes m.b.t. materialen en componenten die in het nog te doorlopen ontwerpproces worden gemaakt;
- betrouwbaarheid – regelmatig falen van robots zal mogelijk een significante kostenpost met zich meebrengen omdat het terughalen en repareren van de robot veel extra manuren zal vergen;
- ondersteunende infrastructuur – de benodigde dichtheid van laad- en dataoverdrachtstations zal sterk afhangen van de prestaties die worden gerealiseerd in het eindproduct m.b.t. energie en metingen; ook hier is een sterke afhankelijkheid van ontwerpkeuzes. De doelstelling/verwachting is dat de robot meerdere kilometers moet kunnen reizen op een enkele acculading. Hiermee wordt een ondergrens voor de dichtheid aan laad- en overdrachtstations in het netwerk bepaald. Het aantal inbreng- en uitnamepunten kan aanzienlijk geringer zijn dan het aantal laadpunten. Precieze aantallen hangen in sterke mate af van de netwerkstructuur. Op het moment dat in fase 1 een concrete actieradius is bepaald/gekozen, kan op basis van netwerkmodellen een benodigde dichtheid van de stations worden berekend. Ook kan worden gedacht aan mobiele laad- en overdrachtstations.

Met deze onzekerheden in het achterhoofd kan een grove inschatting voor exploitatiekosten worden gemaakt. De opbouw en berekening hiervan zijn weergegeven in Tabel 11. Het resulterende richtbedrag is 45 k€ per robot per jaar.

TABEL 11: GROVE INSCHATTING VAN DE EXPLOITATIEKOSTEN VAN EEN SYSTEEM VAN AUTONOME INSPECTIEROBOTS.

Gemeenschappelijke uitgangspunten		
km leiding	93801	
aantal robots	600 *	* dit aantal wordt in het onderstaande nader toegelicht
aantal bedrijven	10	

Laad- en dataoverdrachtstations		in- en uitnamepunten		robots		dataverwerking	
aantal km leiding per station	50	aantal km leiding per punt	250				
aantal laadstations	1876	aantal laadstations	375				
per laadstation		per punt		per robot		per bedrijf	
kosten aanschaf	10000	kosten aanschaf	5000	kosten aanschaf	50000	kosten aanschaf	50000
kosten aanleg	10000	kosten aanleg	10000	kosten onderhoud (/jr)	5000	kosten personeel (/jr)	50000
kosten onderhoud (/jr)	2500	kosten onderhoud (/jr)	1000	levensduur (jr)	3	kosten onderhoud (/jr)	5000
levensduur (jr)	5	levensduur (jr)	10	kosten per jaar	13000000	levensduur (jr)	5
kosten per jaar	12194000	kosten per jaar	937500	kosten per jaar per robot	21667	kosten per jaar	650000
kosten per jaar per robot	20323	kosten per jaar per robot	1563			kosten per jaar per robot	1083

<b>totale exploitatiekosten</b>	<b>44636</b>	<b>euro/ robot/ jaar</b>
---------------------------------	--------------	--------------------------

## 6.4 Primaire opbrengsten

### 6.4.1 Inleiding

In dit rapport is een opgave gegeven van de mogelijke voordelen van de inzet van een AIR voor verbeterde kennisopbouw over het functioneren van het leidingnet van drinkwaterbedrijven. Voor het verder kwantitatief beoordelen van de financiële ruimte voor toepassing van AIR is in onderstaande business case een vergelijking gemaakt tussen twee scenario's:

1. Nul-scenario, gebaseerd op de huidige situatie, zonder noemenswaardige technologische verandering van inspectiewijze.
2. AIR-scenario, gebaseerd op een brede inzet van AIR in het Nederlandse leidingnet.

Door te kwantificeren wat de financiële meerwaarde is voor bedrijven van de inzet van AIR, ontstaat inzicht in de financiële ruimte voor de ontwikkeling en toepassing van dergelijke systemen. Deze kwantificering heeft op drie onderdelen plaatsgevonden:

1. Het financieel voordeel van het voorkomen van te vroege vervanging als gevolg van betere informatie over de toestand van de leiding. Dit financieel voordeel zal niet in alle gevallen direct resulteren in een kostenbesparing, aangezien bedrijven vaak een vaste omvang hebben van het budget voor het vervangen van leidingen. Beter onderbouwde beslissingen over het vervangen van leidingen resulteren op lange termijn in een kostenbesparing, aangezien leidingen die in de toekomst tot de meeste storingen leiden als eerste zullen zijn vervangen. Het in staat zijn tot het beter prioriteren van te vervangen leidingen leidt daarmee tot een betere prestatie en dus tot waardevermeerdering van het leidingnet.
2. Het financieel voordeel van het reduceren van het lekverlies als gevolg van betere en snellere detectie van lekken. Dit financieel voordeel kan worden geïnterpreteerd als een vermindering van marginale kosten voor de productie en distributie van water.
3. Het financieel voordeel van het vermijden van storingen. Door vroegtijdig lekken te detecteren en te signaleren welke leidingen een verdachte toestand hebben, kunnen storingen worden voorkomen. Door een schadebedrag te schatten per storing is hiermee het financiële voordeel te berekenen.

De business case is uitgevoerd op het totale drinkwaterleidingnet van Nederland. Voor het financiële voordeel door uitstel van investering is het leidingnet ingedeeld naar vier leidingtypen: stedelijk distributie, landelijk distributie, hoofddistributie en transportnet. Voor deze groepen is ingeschat welk voordeel het voorkomen van te vroege vervanging oplevert. Dit heeft plaatsgevonden samen met experts van bedrijven, te weten achtereenvolgens met Evides, met BW en WML, met Vitens en met WMD en PWN. De bespreking met Evides en Vitens was op hoofdlijnen. Met BW, WML, WMD en PWN zijn de gehanteerde cijfers vastgesteld. Het financiële voordeel van het reduceren van het lekverlies en het vermijden van storingen is gebaseerd op een schatting van de mogelijke reducties voor heel Nederland.

### 6.4.2 Financieel voordeel voorkomen van te vroege vervanging

Voor het bepalen van het financieel voordeel van vervanging zijn onderstaande stappen doorlopen.

1. Voor de acht bedrijven die deelnemen aan USTORE is een uitdraai gemaakt van de USTORE leidinggegevens per 1 januari 2015. Van Evides is aanvullende informatie verkregen.
2. Van deze leidingen zijn alleen de leidingen geselecteerd met een diameter van 100 mm en groter. Het uitgangspunt is dat de te ontwikkelen robot niet inzetbaar zal zijn in leidingen kleiner dan 100 mm.
3. De resterende leidingen zijn ingedeeld naar vier leidingtypen gebaseerd op diameter, te weten:
  - Distributie, alle leidingen tussen 100 mm en 149 mm. Deze groep is vervolgens onderverdeeld naar stedelijk en landelijk volgens de verhouding 80% - 20%.
  - Hoofddistributie, alle leidingen tussen 150 mm en 299 mm.
  - Transport, alle leidingen  $\geq 300$  mm.
4. De vier leidingtypen zijn verder onderverdeeld in materiaalsoort:
  - Kunststof: PVC en PE
  - Cementshoudend: AC en beton
  - Metaal: GGJ, NGJ en staal
5. Tabel 12 geeft een overzicht van de resulterende 12 leidinggroepen en de bijbehorende leidinglengte. De totale lengte bedraagt ca 93.800 km, wat overeenkomt met 79% van het leidingnet. Anders gezegd, 21% is kleiner dan 100 mm of heeft een afwijkend leidingmateriaal.
6. Tabel 12 geeft eveneens de gemiddelde vervangingskosten per leidingtype. Dit betreffen de geschatte gemiddelde kosten, inclusief kosten voor voorbereiding en verwijdering. De hoogte van deze gemiddelde kosten zijn afgestemd met drinkwaterbedrijven en gelden als gemiddelde voor alle bedrijven.

TABEL 12 OVERZICHT VAN DE LENGTE (KM) EN VERVANGINGSKOSTEN (€/M) PER GEHANTEERDE GROEPEN LEIDINGEN VOOR DE BUSINESS CASE

	Stedelijk distributie	Landelijk distributie	Hoofddistributie	Transport	Totaal
Kunststof	19.973	4.993	13.476	3.664	42.105
cementshoudend	16.560	4.140	8.289	5.526	34.515
metaal	5.972	1.493	5.457	4.259	17.181
som	42.505	10.626	27.222	13.449	93.801
Gem verv. kosten	150	130	240	600	

7. Voor het bepalen van de netto contante waarde wordt uitgegaan van een gemiddeld netto rentepercentage van 2%.
8. Van alle 12 leidinggroepen wordt in Tabel 13 geschat wat het jaarlijks vervangingspercentage is. Dit percentage bevat:
  - actieve vervangingen: vervangingen op initiatief van het drinkwaterbedrijf,
  - reactieve vervangingen: vervangingen op initiatief van derden,
  - reconstructies: vervangingen waarbij als gevolg van werkzaamheden van derden de leiding verlegd moet worden.
 In de verdere tekst worden reconstructies geschaard onder de term reactief vervangen.
9. Voor elke leidinggroep is geschat welk deel actief wordt gesaneerd. Het resterende deel wordt dus reactief vervangen (inclusief reconstructies).
10. De leidingen die actief vervangen worden, zijn onderverdeeld in twee groepen op basis van de toestand die middels inspectie met robots correct had kunnen worden ingeschat.

- Terecht vervangen: leidingen die een restlevensduur hebben op basis van de gemeten toestand van minder dan 10 jaar.
- Onterecht vervangen: Leidingen die een restlevensduur hebben op basis van de gemeten toestand van 10 jaar of meer.

Uitgangspunt achter de verdeling in deze groepen is dat bij een gemeten restlevensduur korter dan 10 jaar de vervanging terecht is. Reconstructies worden in alle gevallen gezien als terecht vervangen. Ook leidingen die reactief worden vervangen en die een restlevensduur hebben langer dan 10 jaar, maar die vanwege uitvoeringstechnische aangelegenheden (nabij gelegen, kans op breuk bij graven, etc) worden vervangen, worden geschaard onder terecht vervangingen.

11. De leidingen die onterecht zijn vervangen hebben een restlevensduur van 10 jaar of meer, dat wil zeggen dat deze kan variëren van 10 jaar tot zeer lang. Voor het kunnen kwantificeren van het mogelijk aantal jaar uitstel wanneer meer informatie over de toestand beschikbaar zou zijn (inzet AIR), is hier voor de vier leidingtypen een gemiddelde rekenkundige restlevensduur gehanteerd van 20 jaar. Hoewel in Hoofdstuk 4 is vastgesteld dat met name voor het distributienet de AIR niet altijd een pasklare oplossing biedt voor de directe toestandsbepaling m.b.t. specifieke degradatiemechanismen, wordt er in deze analyse vanuit gegaan dat indirecte bepalingen met de AIR (o.a. visuele inspectie, ovaliteitsmeting, akoestische lekdetectie) voldoende aanvullende informatie geven om voor alle beschouwde leidingtypes de vervangingsbeslissing (beter) te kunnen onderbouwen.

TABEL 13 OVERZICHT INSCHATTINGEN VERVANGINGSPERCENTAGE, AANDEEL ACTIEF VERVANGEN EN AANDEEL TE VROEG VERVANGEN VOOR ACTIEVE EN REACTIEVE VERVANGINGEN. DE TABEL LAAT ZICH ALS VOLGT LEZEN: VERVANGINGEN 0,5% PER JAAR, WAARVAN 30% ACTIEF WORDT VERVANGEN. VAN DEZE ACTIEVE VERVANGINGEN WORDT AANGENOMEN DAT 5% TE VROEG WORDT VERVANGEN. VAN DE REACTIEVE VERVANGINGEN (70%) WORDT AANGENOMEN DAT 40% TE VROEG WORDT VERVANGEN.

	Totaal	Stedelijk distributie	Landelijk distributie	Hoofddistributie	Transport
Kunststof	Vervangingen per jaar	0,50%	0,30%	0,30%	0,50%
	fractie actief verv.	30%	30%	30%	80%
	actief: >10jr te vroeg	5%	5%	5%	5%
	reactief: >10jr te vroeg	40%	40%	20%	20%
cementhoudend	Vervangingen per jaar	2,00%	1,50%	1,50%	1,50%
	fractie actief verv.	70%	50%	50%	80%
	actief: >10jr te vroeg	15%	15%	15%	5%
	reactief: >10jr te vroeg	40%	40%	40%	40%
metaal	Vervangingen per jaar	1,50%	1,00%	1,00%	0,50%
	fractie actief verv.	50%	50%	50%	80%
	actief: >10jr te vroeg	10%	10%	10%	5%
	reactief: >10jr te vroeg	50%	50%	40%	40%

12. Voor het invullen van Tabel 13 zijn de volgende overwegingen gegeven. Opgemerkt wordt dat deze tabel in meerdere bijeenkomsten tot stand is gekomen en daarmee is gebaseerd op 'voortschrijdend inzicht'.
- Als uitgangspunt voor de inschattingen in Tabel 12 geldt een beslissingshorizon tussen 2020 en 2035. Aangenomen wordt dat het 5 jaar zal

duren voordat een inspectiesysteem gebaseerd op robots operationeel zal zijn op grote schaal en dat deze technologie een toepassingsduur heeft van 15 jaar. De inschattingen van Tabel 12 hebben dan ook betrekking op die periode.

- De vervangingen per jaar zijn geverifieerd aan de hand van een opgave van WMD en de door de DPWE bedrijven aangedragen percentages voor de EBC Benchmark. Gezien het streven van de drinkwaterbedrijven om de omvang van de vervangingen toe te laten nemen, zijn vervolgens schattingen gemaakt voor de komende 20 jaar. Gezien de betrouwbaarheid van deze cijfers zijn deze bij de auteurs na te vragen.
- Als uitgangspunt dienen vervangingen in de deelgroep stedelijke distributie, aangezien dit de groep is waarin de meeste vervangingen plaatsvinden. Het aantal vervangingen in deze groep voor de materiaalgroepen kunststof, cementhoudend en metaal is geschat op respectievelijk 0,5%, 2,0% en 1,5%. Voor landelijk distributie en hoofddistributie zijn lagere schattingen gehanteerd.  
Het percentage te vervangen transportleidingen vergt discussie. BW en WML geven aan dat dit nihil is. PWN en WMD geven aan dat dit wel substantieel is. PWN geeft een schatting van 0,6%. In deze berekening wordt 0,5% aangehouden voor kunststof en metaal. Omdat het de verwachting is dat ook AC transportleidingen een relatief beperkte restlevensduur hebben is hiervoor 1,5% aangehouden.
- De fractie actief vervangen is het hoogste bij cementhoudende leidingen in stedelijke distributie. Gezien de toestand van met name AC leidingen willen bedrijven hier de komende jaren veel vervangingen plannen. In stedelijke distributiegebieden worden metalen leidingen iets minder vaak actief vervangen en kunststof leidingen nog minder. De achtergrond is dat de materialen met de slechtste toestand het hoogste aandeel actieve vervangingen hebben.  
In landelijke gebieden is het aantal actieve vervangingen bij cementhoudende en metalen relatief lager omdat hier de effecten van falen lager zijn dan in stedelijke gebieden en bedrijven minder gauw tot actieve vervanging over gaan. Ook voor hoofddistributie geldt een verlaagd aandeel actief vervangen, omdat de toestand van deze leidingen veelal beter is en daardoor relatief meer leidingen worden vervangen op initiatief van derden. Voor alle typen transportleidingen is ingeschat dat zij in 80% van de gevallen actief worden vervangen. Voor transportleidingen nemen bedrijven vooral zelf initiatief tot vervangen.  
Er is data overlegd van WMD die registreert of leidingen actief of reactief zijn vervangen. Voor alle AC leidingen geldt dat 60% van de leidinglengten actief wordt vervangen. Voor PVC bedraagt dit 39% en voor de overige materialen 19%.
- Van de stedelijke en landelijk distributieleidingen en de hoofddistributieleidingen die actief vervangen worden, wordt slechts een beperkt deel beschouwd als onterecht vervangen. Deze leidingen worden veelal geselecteerd op basis van storingen. Het hoogste aandeel onterecht vervangen schat men in bij AC.  
Voor transportleidingen neemt men aan dat vrijwel alle actief vervangen leidingen terecht zijn. Hier worden geen (of een zeer beperkt aantal) storingen gewenst. Daarom zal al na een zeer laag aantal storingen een vervanging als terecht worden aangewezen.
- Voor reactief vervangen leidingen is het aandeel onterecht vervangen leidingen veel hoger, aangezien hier externe redenen bepalen dat een leiding wordt vervangen. Voor acht van de twaalf groepen wordt aangenomen dat 40% van de

vervangingen onterecht is. Dit aandeel is hoger ingeschat bij metalen distributieleidingen die vaak worden vervangen vanwege een hoge leeftijd, terwijl de toestand vaak nog relatief goed is. Voor kunststoffen leidingen in het hoofddistributie- en transportnet wordt aangenomen het aandeel onterechte vervangingen lager is, aangezien dit voornamelijk leidingen zijn die vervangen moeten worden (i.c. reconstructies). Uit exitbeoordelingen wordt vrij vaak geconstateerd dat uitgenomen leidingen (meestal AC) nog in een goede toestand verkeren. Vaak zijn er in het verleden storingen opgetreden, maar dit betreffen in veel gevallen specifieke “slechte” leidingen. Onderzoek laat ook zien dat de spreiding van de toestand van deze leidingen vrij groot is. Er kan daarom geconcludeerd worden dat als bedrijven met AIR in staat zijn specifieke leidingen met een verdachte toestand te detecteren, het mogelijk is om in geval van een vervangingswerk van derden zich te beperken tot het vervangen van een beperkt aantal “slechte” leidingen. Dit zal tot een aanzienlijke reductie van onterecht vervangen leidingen leiden.

13. Op basis van de bovenstaande aannamen zijn in Tabel 14 de leidinglengten aangegeven die jaarlijks onterecht vervangen worden. Onder onterecht wordt hier verstaan dat deze een restlevensduur hebben van 10 jaar of meer en dat deze bij inzet van een inspectierobot niet vervangen zouden zijn. De totale leidinglengte betreft 262 km per jaar.

TABEL 14 LENGTE (KM) LEIDINGEN DIE PER JAAR ONTERECHT WORDT VERVANGEN

		Stedelijk distributie	Landelijk distributie	Hoofd-distributie	Transport	Totaal
Kunststof	actief: km/jr onterecht	1,5	0,2	0,6	0,7	3,1
	reactief: km/jr onterecht	28,0	4,2	5,7	0,7	38,5
cementhoudend	actief: km/jr onterecht	34,8	4,7	9,3	3,3	52,1
	reactief: km/jr onterecht	39,7	12,4	24,9	6,6	83,7
metaal	actief: km/jr onterecht	4,5	0,7	2,7	0,9	8,8
	reactief: km/jr onterecht	22,4	3,7	10,9	1,7	38,7
Totaal		130,9	26,0	54,1	14,0	224,9

14. De lengtes actief en reactief onterecht vervangen leidingen zijn per leidinggroep opgeteld. Vervolgens zijn de netto contant gemaakte kosten berekend op basis van de gemiddelde vervangingskosten, de gekozen gemiddelde rekenkundige restlevensduur (20 jaar) en het netto rentepercentage (2%). De in Tabel 15 aangegeven waarden representeren het contant gemaakte financiële voordeel van uitstel van vervangingskosten, als gevolg van meer kennis over de toestand van leidingen door de inzet van AIR. Anders gezegd, dit is de financiële ruimte door voorkomen van te vroege vervanging voor het ontwikkelen en exploiteren van een AIR. De totale financiële ruimte bedraagt 14.5 M€ per jaar. De top-vijf groepen met de meeste financiële ruimte zijn: (1) cementhoudend stedelijke distributie, (2) cementhoudend hoofddistributie, (3) cementhoudend transport, (4) kunststof stedelijke distributie en (5) metaal stedelijke distributie.

Overigens, als het niet mogelijk is een AIR te ontwikkelen voor leidingen kleiner dan 150 mm, dan bedraagt de financiële ruimte 7,0 M€ (48%) per jaar. Dit onderstreept het

belang om ook robots te ontwikkelen die zich kunnen voortbewegen in kleinere diameters.

TABEL 15 CONTANT GEMAAKT VERVANGINGSKOSTEN (M€) VOOR ONTERECHT VERVANGEN LEIDINGEN

	Stedelijk distributie	Landelijk distributie	Hoofddistributie	Transport
Kunststof	1,45	0,23	0,49	0,29
cementhoudend	3,66	0,86	3,17	2,28
metaal	1,32	0,22	1,28	0,59
Totaal	6,42	1,31	4,95	3,15
				14,51

#### 6.4.3 Financieel voordeel reductie van lekverlies

Het niet-inrekening gebracht verbruik (NIRG) bedraagt (Drinkwaterstatistieken, 2015) 65 Mm<sup>3</sup> per jaar. Aangenomen wordt dat 50% hiervan kan worden toegewezen aan technisch lekverlies. Door de inzet van AIR kunnen lekken beter en eerder worden opgespoord en zal het aantal lekken verminderen door het gericht uitnemen van leidingen in slechte toestand. Aangenomen wordt dat hierdoor een totale reductie van het lekverlies mogelijk is van 50%. Voor het berekenen van het financiële voordeel wordt een marginale kostprijs gehanteerd van 0,13 €/m<sup>3</sup>.

Het totale voordeel met betrekking tot het reduceren van lekken bedraagt 2,1 M€ per jaar.

#### 6.4.4 Financieel voordeel reductie van het aantal storingen

In Tabel 16 is een schatting weergegeven van de reductie van het aantal storingen als gevolg van de inzet van AIR. Deze reductie is berekend op 6,0 M€ per jaar

TABEL 16 REDUCTIE VAN STORINGEN EN FINANCELE VERTALING (K€)

	Stedelijk distributie	Landelijk distributie	Hoofddistributie	Transport
Gem. kosten per storing (€)	2.500	700	5.000	25.000
Huidige storingsfrequentie	0,040	0,050	0,030	0,010
Aantal storingen	1700	531	817	134
Reductie storingsfrequentie	50%	50%	50%	50%
Kosten reductie (M€)	2.1	0,2	2.0	1.7
Som (k€)				6.0

#### 6.4.5 Totale financiële ruimte voor de inzet van AIR

Op basis van bovenstaande berekeningen is becijferd dat de totale financiële ruimte per jaar voor de inzet van AIR bedraagt:

- Voorkomen van te vroege vervanging: 14,5 M€ per jaar
- Reduceren van het lekverlies: 2,1 M€ per jaar
- Reductie van storingen: 6,0 M€ per jaar
- Totaal: 22,7 M€ per jaar



### 6.4.6 Gevoeligheidsanalyse

Variatie van de diverse invoerparameters geeft enig inzicht in de gevoeligheid van de hierboven bepaalde getallen. De parameters waarvoor de uitkomst het gevoeligst is, zijn de gemiddelde vervangingskosten, vervangingsfractie per jaar en de fractie actief saneren. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in Tabel 17. Alle gevonden waarden liggen in het bereik van 19,0-26,3 miljoen euro.

TABEL 17: GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN TE REALISEREN BESPARINGEN OP VOORKOMEN VAN TE VROEGE VERVANGING, REDUCTIE LEKVERLIES EN REDUCTIE STORINGEN MET AUTONOME ROBOTS.

#	Parameter	max	resultaat max		min	resultaat min	
0	Basisparameters (22,7 M€)						
1	Gem vervangingskosten	125%	26,3	116%	75%	19,0	84%
2	Rekenkundige restlevensduur	125%	25,5	112%	75%	19,6	86%
3	Rentevoet	1,5%	25,4	112%	2,5%	19,6	86%
4	vervangingsfractie per jaar	125%	26,3	116%	75%	19,0	84%
5	fractie actief saneren	125%	19,4	86%	75%	25,9	114%
6	actief: fractie >10jr te vroeg	125%	23,7	104%	75%	21,6	95%
7	reactief: fractie >10jr te vroeg	125%	25,2	111%	75%	20,1	88%
8	fractie lekverliezen te vermijden door inspecties	125%	23,2	102%	75%	22,1	97%
9	Reductie storingsfrequentie	125%	24,2	106%	75%	21,2	93%

## 6.5 Potentiële nevenopbrengsten

### 6.5.1 Doelen en opbrengsten

In Hoofdstuk 4 is reeds beschreven welke aanvullende inspectiedoelen kunnen worden gediend met autonome inspectierobots. De directe en indirecte opbrengsten hiervan voor de waterbedrijven worden hieronder nader beschreven.

### 6.5.2 Continue reiniging van het netwerk

Een inspectierobot blokkeert onvermijdelijk een deel van de doorsnede van de buis. Dit is niet per definitie een nadeel. Rondom de robot zal het water met een wat hogere snelheid stromen. Zeker wanneer de doorsnede van de robot een significante fractie van de doorsnede van de buis vormt, zal dit bij voldoende stroomsnelheid voor opwerveling van het aanwezige sediment zorgen. Echter, omdat dit slechts over de lengte van de robot plaatsvindt, betreft het steeds een zeer beperkte hoeveelheid sediment die gedurende het verdere transport richting klant door turbulente diffusie verder zal worden verdund. Bij voortbeweging van de robot vindt dit proces steeds op een nieuw stukje leiding plaats, zodanig dat stap voor stap de leiding wordt gereinigd, waarbij ordegroottes minder sediment tegelijkertijd in suspensie wordt gebracht dan bij spuien. Op deze wijze draagt de robot bij aan continue verwijdering van sediment uit het netwerk.

### 6.5.3 Monitoring bij werkzaamheden

Bij werkzaamheden aan kritieke leidingen of aan leidingen in een kritieke omgeving kan met behulp van AIRs worden gemonitord in hoeverre de werkzaamheden directe invloed hebben op de toestand van de betreffende leidingen. Op basis hiervan kunnen werkzaamheden worden onderbroken of bijgestuurd, voordat een leiding het begeeft. Hiermee kan schade en overlast worden voorkomen.

#### 6.5.4 Waterkwaliteitsmetingen – continue en bij incidenten

Uitrusting van robots met (generieke) waterkwaliteitssensoren maakt hun inzet mogelijk bij waterkwaliteitsincidenten. Zo kan men, met inzet van meerdere robots, ter plekke vaststellen en monitoren wat het verspreidingsgebied van een besmetting is en ook als een soort speurhond in het leidingnet op zoek gaan naar de bron. In operationele zin bieden dergelijke sensoren bij continue monitoring extra datapunten m.b.t. de waterkwaliteit in het drinkwaternet.

#### 6.5.5 Systeemverbetering

Toepassing van autonome inspectierobots kan op verschillende manieren bijdragen aan verbetering van het volledige systeem van het beheer en de operatie van het leidingnet. Een overzicht is weergegeven in Tabel 18.

TABEL 18: OVERZICHT VAN SYSTEEMVERBETERINGEN TEN GEVOLGE VAN AIR-METINGEN EN DAARUIT VOORTVLOEIENDE VOORDELEN.

bepaling	directe systeemverbeteringen	indirecte opbrengst/systeemverbetering	consequenties
xyz	exacte kennis van posities leidingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>● beter geïnformeerde aannemers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● minder graafwerk om een leiding te lokaliseren</li> <li>● minder graafschade</li> <li>● minder overlast</li> <li>● minder imagoschade</li> <li>● minder OLM</li> </ul>
visuele inspectie afsluiters	actuele kennis van afsluiterstanden	<ul style="list-style-type: none"> <li>● betrouwbare afsluiting</li> <li>● accurater model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● snellere beheersing incidenten</li> <li>● effectievere beheersing incidenten</li> <li>● minder imagoschade</li> <li>● minder OLM</li> <li>● betrouwbaardere rekenuitkomsten</li> <li>● betere voorspellingen systeemgedrag</li> <li>● betere scenarioberekeningen</li> <li>● betere fundering operationele, tactische en strategische beslissingen</li> </ul>
akoestische detectie van lekken	reductie achtergrondlekkage	<ul style="list-style-type: none"> <li>● lager lekverlies</li> <li>● accurater hydraulisch model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● imagoverbetering</li> <li>● betrouwbaardere rekenuitkomsten</li> <li>● betere voorspellingen systeemgedrag</li> <li>● betere scenarioberekeningen</li> <li>● betere fundering operationele, tactische en strategische beslissingen</li> </ul>

## 6.6 Aantallen robots en financiële ruimte

Op basis van de beschikbare financiële ruimte voor een AIR is vast te stellen wat de maximale kosten mogen zijn per robot. De eerste stap in deze benadering is het schatten hoeveel robots er in Nederland nodig zijn voor de inspectie van het leidingnet. Uitgangspunt hierbij is dat robots worden ingezet in leidingdiameters van 100 mm en groter.

Als wordt uitgegaan van een gemiddelde snelheid van voortbewegen van een robot van 0,02 m/s *tijdens het meten*, dan kan een robot per maand 53 km afleggen (voor verplaatsing is een hogere snelheid voorzien). Er van uitgaande dat de robot zich 50% van de tijd voortbeweegt is het bereik gemiddeld 26 km per maand. Er wordt van uitgegaan dat elke leiding gemiddeld twee maal per jaar wordt geïnspecteerd. Deze inspectie kan zijn ten behoeve van een toestandsmeting of voor overige metingen (monitoren bij werkzaamheden, meten waterkwaliteit, etc). In Tabel 19 is per leidinggroep aangegeven hoeveel robots er op basis van de aanwezige lengte en de voorgaande aannamen benodigd zijn. In totaal zijn er volgens deze berekening 593 robots noodzakelijk in Nederland. Voor andere inspectiefrequenties schaaft dit aantal direct mee.

TABEL 19: BENODIGDE AANTALLEN ROBOTS BIJ INSPECTIE VAN ALLE LEIDINGEN VANAF 100 MM TWEE MAAL PER JAAR.

	Stedelijk distributie	Landelijk distributie	Hoofddistributie	Transport
Kunststof	126	32	85	23
cementhoudend metaal	105	26	52	35
	38	9	35	27
Totaal	269	67	172	85
				593

Op basis van de totale financiële ruimte van 22,7 M€ per jaar is er per robot 38 k€ per jaar beschikbaar.

## 6.7 Balans

Op basis van redelijk kwantificeerbare voordelen van de inzet van inspectierobots wordt een financieel voordeel van 22,7 miljoen euro becijferd. Daarnaast worden diverse bijkomende voordelen genoemd, die weliswaar moeilijker te becijferen zijn, maar wel degelijk ook een financiële waarde vertegenwoordigen. Op basis van een scenario van brede inzet van de robots met 2 maal jaarlijks een inspectie van alle leidingen levert dit een financiële ruimte voor toepassing van de robots van maximaal 38 k€ per robot per jaar op. Dit bedrag bevat alle kosten van aanschaf, onderhoud, inzet, en aanpassingen in het netwerk. De kosten voor aanschaf en exploitatie van robots, inclusief de kosten van een systeem voor energievoorziening en dataverwerking, zijn geschat op 45 k€ per robot per jaar. Binnen de globale mogelijkheden voor een kostenschattning voor de inzet van robots constateren we dat de financiële baten en lasten van een vergelijkbare orde grootte zijn. Dit feit, in combinatie met de niet-kwantificeerbare voordelen, leidt tot de conclusie de business case als positief te beoordelen.

Opgemerkt wordt dat de hier uitgevoerde business case beperkingen kent, onder andere omdat er weinig gegevens beschikbaar zijn ter onderbouwing van de hier gedane aannamen. Daarnaast schetst de business case een situatie in de toekomst die veel onzekerheden kent. De gehanteerde cijfers dienen daarom beschouwd te worden als de beste benadering.

## 7 Beoogd ontwikkeltraject

### De essentie van Hoofdstuk 7

Op basis van deze fase-0-studie kan een beslissing worden genomen om de ontwikkeling van een autonoom robotsysteem daadwerkelijk uit te gaan voeren in fase 1. Hiervoor zullen partners op verschillende expertisegebieden noodzakelijk zijn. In verschillende kaders zijn contacten gelegd die de basis voor de keuze van de partners kunnen vormen. De nog aan te wijzen trekker van fase 1 is de natuurlijke persoon om het consortium te vormen. Er bestaan verschillende risico's in een dergelijk ontwikkeltraject. Voor de belangrijkste zijn beheersmaatregelen voorgesteld.

### 7.1 Fase 0

Op basis van deze fase-0-studie kan een beslissing worden genomen om de ontwikkeling van een autonoom robotsysteem daadwerkelijk uit te gaan voeren in fase 1.

### 7.2 Fase 1

In de bijeenkomst van 6 oktober en in gesprekken met CO-leden is aangegeven door de waterbedrijven dat een werkvorm wordt gewenst waarin een externe projectleider een consortium van met name marktpartijen (inclusief KWR) trekt. Deze projectleider kan worden aangesteld door een collectief van participerende waterbedrijven. Het ligt voor de hand dat deze projectleider een centrale rol speelt in het opzetten van het consortium. Bovendien kan deze vorm geven aan een collectieve aansturing van het project, verantwoording richting opdrachtgevers en het maken van afspraken rondom intellectueel eigendom. Hierbij moet worden opgemerkt dat KWR en de waterbedrijven via het Ariel-project gehouden zijn aan het IP-reglement dat geldt bij de Wetsus thematafel *Smart Grids*.

In het consortium zijn in ieder geval de volgende soorten partijen essentieel:

• eindgebruikers	waterbedrijven
• eigenaars van pilotlocaties	selectie uit de 10 waterbedrijven
• specialist mechatronica	bedrijf/universiteit
• specialist elektronica	bedrijf
• specialist autonomie	bedrijf/ universiteit
• specialist sensing/ toestandsbepaling	bedrijf
• kennisinstituut drinkwater	KWR, Wetsus

### 7.3 Mogelijke partners

Het ligt buiten de scope van dit rapport om een overzicht van geschikte mogelijke partners voor een fase 1 op stellen en in te vullen. Deze taak ligt het meest natuurlijk bij de nog aan te wijzen trekker van fase 1. Desalniettemin volgt hier een kort overzicht van de partijen waarmee tot nu toe in relevante kaders contacten zijn geweest.

In het kader van haar eigen ambities een ontwikkeltraject voor inspectierobots te definiëren heeft Vitens reeds een uitgebreide scan van mogelijke geschikte bedrijven uitgevoerd. De partijen die hun een offerte hebben uitgebracht, Do-Bots en ID-Tec, zijn mogelijk geschikte partners op de gebieden van respectievelijk autonomie en mechatronica/elektronica. Met

name m.b.t. het laatste punt zijn er naar verwachting meer geschikte bedrijven te vinden. In haar traject heeft Vitens ook belangstelling bij buitenlands waterbedrijven vastgesteld voor mogelijke participatie. Specialisme op het gebied van toestandsbepaling kan worden gezocht bij op dit gebied actieve partijen als A.Hak en Acquaint. Vanuit academische hoek beschikken de Technische Universiteiten van Twente en Delft over uitstekende onderzoekers op relevante gebieden. Ten slotte is KWR het voor de hand liggende instituut met kennis van de drinkwaterwereld. Wetsus is partner in het lopende Ariel-project en daarmee een waardevolle aanvullende kennisdrager.

#### **7.4 Toepassing van reeds ontwikkelde kennis**

In het kader van het BTO-Wetsus-project Ariel wordt, zoals beschreven in §2.4.1 sinds medio 2015 gewerkt aan de ontwikkeling van enkele basiscomponenten van een autonoom robotsysteem. Op dit moment wordt een eerste prototype gerealiseerd. In dit prototype is reeds veel kennis en begrip van het beoogde toepassingsgebied verwerkt m.b.t. ontwerp- en materiaalkeuzes die niet vanzelfsprekend aanwezig is bij mogelijke commerciële partners. Integratie van de resultaten van Ariel in fase 1 ligt daarom zeer voor de hand, zowel vanuit het oogpunt van de gedane investering alsook vanuit het oogpunt van de bereikte en te bereiken resultaten, en wordt van harte aanbevolen.

#### **7.5 Risico's en beheersmaatregelen**

Het starten van een (product)ontwikkelingstraject brengt uiteraard de nodige risico's met zich mee. In het geval van de autonome inspectierobot zit de ontwikkeling weliswaar voor een groot deel in het samenbrengen van bestaande systemen en aspecten, maar is het aantal elementen dat wordt samengebracht toch dusdanig groot dat niet alle mogelijke problemen en hun consequenties te overzien zijn. Vanuit die gedachte is het onderstaande overzicht van risico's, mogelijke consequenties en beheersmaatregelen opgezet (Tabel 20).

TABEL 20: RISICO'S, MOGELIJKE CONSEQUENTIES EN BEHEERSMAATREGELEN VAN DE ONTWIKKELING VAN EEN AUTONOOM ROBOTSISTEEM VOOR DE INWENDIGE INSPECTIE VAN DRINKWATERLEIDINGEN.

	<i>Risico</i>	<i>Consequentie</i>	<i>Beheersmaatregel</i>
1.	parallel aan dit traject wordt door andere partijen iets vergelijkbaars ontwikkeld	Mogelijk kleiner marktpotentieel en daarmee verkleining kansen en mogelijke opbrengsten van industrialisatiefase.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Open ogen en oren tijdens het project – verder is hier niet zoveel aan te doen.</li> </ul>
2.	ontwikkelde robotsysteem voldoet niet aan eisen na afloop van het traject		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Juiste partners in ontwikkelconsortium</li> <li>● Begeleiding en afstemming op einddoel gedurende het hele project.</li> <li>● Zoveel mogelijk uitgaan van bestaande en beproefde componenten.</li> <li>● Zoveel mogelijk technische haalbaarheid doorrekenen in vroeg stadium.</li> </ul>
3.	geen geschikte toestandsbepalings-technieken beschikbaar	beperkte toepasbaarheid van robotplatform	<ul style="list-style-type: none"> <li>● profiteren van de opbrengsten op het gebied van andere inspectie-behoefte</li> <li>● toepassingsperspectief en –beoordeling ook vanuit nu beschikbare sensoren maken.</li> <li>● vertrouwen in de technologische vooruitgang.</li> </ul>
4.	onmogelijkheid om bepaalde functionaliteiten in één robot te combineren	ontwikkelde robotsysteem voldoet niet aan eisen	<ul style="list-style-type: none"> <li>● zie 2</li> <li>● individuele robots op individuele aspecten toespitsen</li> </ul>
5.	ontwikkelkosten onbeheersbaar	veel geïnvesteerd, geen resultaat zonder nog meer investeringen	<ul style="list-style-type: none"> <li>● beginnen met het uitwerken van de grootste technologische uitdagingen, hieraan go/no-go-momenten verbinden</li> </ul>

## 8 Perspectief datarijk assetmanagement

### De essentie van Hoofdstuk 8

Toepassing van autonome inspectierobots vergroot de kennisbasis voor assetmanagementbeslissingen en verbetert de kwaliteit van de elementen die de basis vormen voor deze beslissingen. Beslissingen worden dus niet langer voor een groot deel genomen op basis van inschattingen, maar op basis van hardere kennis. Bovendien wordt de algehele systeemkennis verbeterd. Hiermee kunnen ingrepen in het systeem gericht en accurater worden uitgevoerd en worden ook modelberekeningen waarop operationele, tactische of strategische beslissingen worden gebaseerd betrouwbaarder.

### 8.1 Inleiding

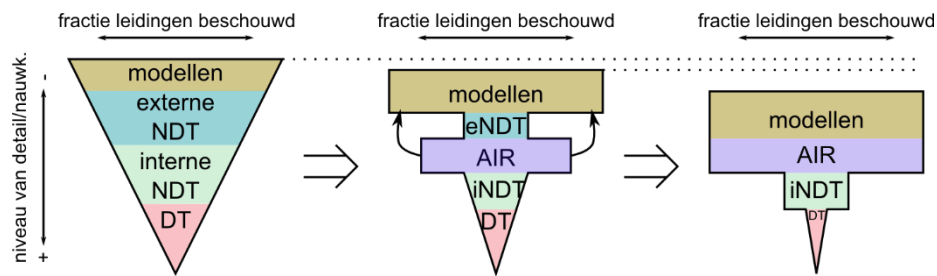
Op het moment dat autonome inspectierobots op betekenisvolle schaal worden ingezet, wat betekent dit dan voor de manier waarop assetmanagement wordt uitgevoerd? Dit hoofdstuk formuleert een antwoord op die vraag.

### 8.2 Toestandsbepaling

De huidige benadering van toestandsbepaling wordt wel eens gevisualiseerd als een omgekeerde piramide (Figuur 9, links, naar Echologics, 2016). Hierin wordt weergegeven dat de toestand grofstoffelijk voor het hele netwerk wordt bepaald met een lage mate van detail en nauwkeurigheid. Op basis hiervan wordt de toestand met een oplopende mate van nauwkeurigheid bepaald voor een steeds kleiner deel van het netwerk met respectievelijk externe niet-destructieve bepalingen (zoals bijvoorbeeld externe akoestische technieken), interne niet-destructieve bepalingen (bijvoorbeeld elektromagnetische technieken op een intelligent PIG) en ten slotte destructieve bepalingen (b.v. thymolftaleïnetests).

In het middelste plaatje van Figuur 9 zijn ook de autonome inspectierobots opgenomen. De verwachting is dat deze weliswaar een hoger niveau van detail en nauwkeurigheid zullen kunnen leveren dan externe technieken, maar niet dan interne technieken die op een kabelgebonden carrier zijn gemonteerd. Deze verwachting komt voort uit ten eerste de beperkte beschikbaarheid van energie in autonome systemen en ten tweede de mogelijk minder accurate positionering van sensoren t.o.v. de wand in autonome systemen in vergelijking met bijvoorbeeld op PIGs gemonteerde systemen. Brede toepassing van de AIR zal naar verwachting een grote stroom data opleveren die ons in staat zal stellen om de kwaliteit van conditie- en verouderingsmodellen te verbeteren. Om deze reden is zowel de boven- als ondergrens van het modellenbereik in positieve zin verschoven. Hiermee wordt het toepassingsgebied van externe niet-destructieve technieken naar verwachting kleiner.

Bij toepassing van autonome inspectierobots door het volledige leidingnet heen (Figuur 9 rechts) zal de kwaliteit van de modellen verder verbeteren. In combinatie met de volledige dekking door de AIRs resulteert dit in het verdwijnen van de behoefte aan externe niet-destructieve toestandsbepalingmethoden. Voor inwendige NDT's blijft een niche aanwezig, namelijk voor kritieke leidingen die met een hogere mate van nauwkeurigheid en detail moeten worden geïnspecteerd dan mogelijk is met autonome robots. Destructieve tests zullen alleen nog worden uitgevoerd wanneer dit opportuun is, ter ondersteuning van verdere modelvorming en interpretaties van meetopbrengsten van de AIR en iNDT.



FIGUUR 9: ONTWIKKELING VAN NIVEAU VAN DETAIL EN NAUWKEURIGHEID VAN KENNIS VAN DE TOESTAND VAN LEIDINGEN EN DE FRACTIE VAN HET LEIDINGNET WAAROP DIT NIVEAU VAN TOEPASSING IS. NDT STAAT VOOR NIET-DESTRUCTIEF TESTEN, DT VOOR DESTRUCTIEF TESTEN.

### 8.3 Data

Grootschalige inzet van AIRs zal resulteren in een grote aanvullende datastroom. Deze draagt alleen bij aan effectief assetmanagement als er aan een aantal voorwaarden wordt voldaan:

1. automatische verwerking van de ruwe data tot eenvoudig te interpreteren gegevens;
2. toegankelijke opslag van de ruwe en de verwerkte data, bijvoorbeeld door directe koppeling in een GIS/LIS-systeem;

Het eerste punt is voor de ene meting gemakkelijker dan voor de andere. Zo kunnen beelden van de camera sec worden opgeslagen. Bepaling van rondheid op basis van beeldverwerking bij laserkegelprojectie is naar verwachting ook goed te automatiseren. Voor andere delen van de datastroom (meetgegevens van andere sensoren) zal dit minder eenduidig zijn. Oplossingen hiervoor zullen maatwerk zijn.

Inzet van autonome inspectierobots op enige schaal zal hoe dan ook een aanzienlijke ICT-infrastructuur vergen. Enerzijds zal de hierboven genoemde wenselijke koppeling met GIS/LIS-systemen hiervan een bedrijfsspecifieke implementatie vergen. Anderzijds kan een centrale opslag van inspectiegegevens naar het model van USTORE een prachtige gegevensbasis vormen voor de modelverbetering zoals beschreven in/bij Figuur 9. Op deze wijze beschikken alle bedrijven over een uitgebreide database aan referentiegegevens en KWR als onderzoeksinstituut over een schat aan gegevens in te zetten in onderzoek ten dienste van de sector.

### 8.4 Van inschattingen naar kennis bij iedere beslissing

Assetmanagement drijft op dit moment op generieke kennis en modellen van cohorten, aangevuld met inspectiegegevens van een beperkt volume leidingen. De gegevens die de autonome inspectierobots zullen opleveren omvatten enerzijds veel gegevens over de toestand van individuele leidingen en anderzijds een grote hoeveelheid input voor de hierboven genoemde modelverbetering.

Dit zal in de praktijk betekenen dat beslissingen over leidingen in steeds grotere mate worden genomen op basis van kennis dan wel een inschatting van hoge betrouwbaarheid over de toestand van de betreffende leidingen in plaats van de huidige inschatting van middelmatige betrouwbaarheid en incidentele bepalingen van hogere betrouwbaarheid. Dit heeft als gevolg dat er minder leidingen zullen worden gesaneerd waarvan de toestand beter is dan ingeschat en die dus eigenlijk nog niet gesaneerd hadden hoeven te worden, zoals ook in de businesscase van Hoofdstuk 6 beredeneerd.



Het zwaartepunt verschuift dus in feite van inschattingen naar kennis. Deze accurate kennis van het netwerk en zijn toestand leidt tot het ingrijpen in het netwerk op het juiste moment en een reductie van het aantal verrassingen.

## 9 Conclusies en aanbevelingen

### 9.1 Conclusies

- Een inventarisatie van de ontwikkelbehoeften van de bedrijven voor technieken voor enerzijds het vaststellen van het optreden of voortschrijden van specifieke degradatiemechanismen en anderzijds voor aanvullende inspectiebehoeften (zoals visuele inspectie, xyz-bepaling, monsternamen, etc.) toont dat voor circa de helft van deze behoeften het autonome robotsysteem een goede oplossing biedt.
- De analyse laat zien dat de AIR duidelijk meer oplossingen biedt die goed aansluiten op de door de bedrijven geuite ontwikkelingsbehoefte dan twee alternatieven (*slimme netwerken* en *toegankelijke netwerken*). Hiermee kan een voorkeur voor dit concept boven de alternatieve concepten worden uitgesproken.
- Deze oplossingen bevinden zich voor distributieleidingen met name buiten het veld van toestandsbepaling (dus in de aanvullende inspectiebehoeften). Voor transportleidingen is de verdeling tussen toestandsbepaling en aanvullende inspectiebehoeften gelijkmatiger.
- Vastgesteld is dat zowel het Ariel-traject als het door Vitens voorgestelde traject in zijn huidige vorm een deel van de benodigde functionaliteit gaan ontwikkelen, maar dat er meer nodig is, namelijk fase 1.
- Naast technologische ontwikkeling van het robotsysteem zelf zal inzet hiervan het volgende vergen:
  - o enige aanpassingen in het netwerk t.b.v. inbreng, uitname en overdracht van energie en data;
  - o instellen van de organisatie op het draaiend houden van het robotsysteem en op het optimale gebruik van de gegevensstroom die het systeem zal opleveren.
- De ontwikkelkosten voor het robotsysteem als product zullen ruim boven de 1 miljoen euro liggen. De huidige beste inschatting komt uit op bijna 2000 uren inspanning en 634 k€ directe kosten.
- Omtrent de kosten van de inzet bestaan op dit moment grote onzekerheden. De kosten voor aanschaf en exploitatie van robots, inclusief de kosten van een systeem voor energievoorziening en dataverwerking, zijn geschat op 45 k€ per robot per jaar.
- Besparingen door voorkoming van te vroege vervanging, reductie van lekverlies en reductie van storingen bedragen naar beste inschatting in totaal 22,7 miljoen euro per jaar.
- Daarnaast worden diverse bijkomende voordelen geïdentificeerd, die weliswaar moeilijker te becijferen zijn, maar wel degelijk ook een financiële waarde vertegenwoordigen.
- Dit levert een financiële ruimte voor toepassing van de robots van maximaal 38 k€ per robot per jaar op bij tweemaal jaarlijks inspectie van het volledige toegankelijke netwerk. Binnen de globale mogelijkheden voor een kostenschatting voor de inzet van robots constateren we dat de financiële baten en lasten van een vergelijkbare orde grootte zijn. Dit feit, in combinatie met de niet-kwantificeerbare voordelen, leidt tot de conclusie de business case als positief te beoordelen.
- Deze fase-0-studie biedt voldoende basis voor een positieve beslissing om de ontwikkeling van een autonoom robotsysteem daadwerkelijk uit te gaan voeren in fase 1.

- Toepassing van autonome inspectierobots zal de kennisbasis voor assetmanagementbeslissingen vergroten en de kwaliteit van de elementen die de basis vormen voor deze beslissingen verbeteren.

## 9.2 Aanbevelingen

- Op basis van de bevindingen hier gerapporteerd wordt aanbevolen fase 1 voor de ontwikkeling van autonome inspectierobots voor waterleidingen in te zetten.
- Tijdens dit ontwikkeltraject kan de technische en economische haalbaarheid nader worden bepaald.
- Daarbij wordt aanbevolen te profiteren van de in verschillende trajecten opgedane ideeën en de in het project Ariel opgedane kennis m.b.t. veilige en effectieve ontwerpen van robots en gebruik te maken van uitgewerkte ontwerpen en componenten.

# 10 Literatuur

Arsenio, A.M. (2013). *Lifetime prediction of PVC push-fit joints*, 2013, Ph.D. theses TU-Delft: (Delft).

Beuken, R.H.S., P. Horst, G.A.M. Mesman en R.J. van Eijk (2013). *Akoestische metingen brengen leidingconditie in beeld*. H2O-Online / 19 december 2013.

Beuken en G.A.M. Mesman (2015). *Workshop Inspectietechnieken voor het leidingnet*. BTO 2015.222(s).

Blokker, E.J.M. en A.J. Vogelaar (2009) *Optimalisatie meetprogramma E. coli in distributienet*. BTO 2009.008.

Boer, de Goos, Hans Bruinsma, Erik Elich, Bart van Luling, Gerrit Wemeijer (2009): *Leidraad voor Systems Engineering binnen de GWW-sector, V2.0*, Werkgroep Leidraad Systems Engineering: <http://www.leidraadse.nl/>

De Kater, H., R. Beuken en A. Vogelaar (2010) *Inspectietechnieken voor rationeel saneringsbeleid van leidingnetten*. BTO 2010.013.

Echologics (2016): <http://echologics.com/condition-assessment/pre-stressed-concrete-cylinder-pipe-pccp>, geraadpleegd op 21 januari 2016.

Liu Z., Y. Kleiner, B. Rajani, L. Wang en W. Condit (2012). Condition assesment technologies for water transmission and distribution systems, EPA/600/R-12/017U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati.

Trietsch, E., A. van Mazijk en J. van der Wielen (2007) *Voorzieningen voor het continu monitoren van leidingen – Een overzicht van beschikbare technieken*. BTO 2007.023.

Van Lieverloo, J.H.M., G.A.M. Mesman, P.K. Baggelaar, A. Hamed en G.L. Bakker (2004) *Detectiekans van fecale verontreinigingen in drinkwaterdistributiesystemen. Een oriënterende evaluatie*. BTO 2004.063.

Van Ravesteijn et al. (2011) *Kabels en leidingen detecteren zonder graven*. COB O10\_ER\_11\_47157

Van Rossum, A. en F. van der Valk (2015) *Voorstel autonome waterleidingrobot*. offerte uitgebracht aan Vitens.

Van Thienen, P. (2014a) *CT-scan voor begraven leidingen*. BTO 2014.021.

Van Thienen, P. (2014b) *ARieL: Autonome Robots voor de inwendige Inspectie en metingen in Leidingnetten – fase 1*. Projectvoorstel BTO Assetmanagement.

Van Thienen, P. et al. (2015) *Prospero: Project ter Realisatie van autonOme inSPEctieRObots voor drinkwaterleidingen*. Projectvoorstel aan het CO van het BTO, juni 2015.

## Bijlage I

Voorkeurstechnieken, problemen en tekortkomingen, en oplossingspotentieel van AIR en alternatieve concepten.

TABEL 21: FAALMECHANISMEN, VOORKEURSTECHNIKEN, PROBLEMEN EN TEKORTKOMINGEN EN OPLOSSINGEN HIERVOOR, MET SCORING VAN AIR, SLIMME NETWERKEN EN TOEGANKELIJKE NETWERKEN.

Materiaal	Falen buis/ verbinding	Huidige voorkeurstechniek	probleem	oplossingsrichting, breed toepasbaar	biedt AIR een oplossing?	specifieke oplossing AIR	biedt een slim netwerk een oplossing?	specifieke oplossing slim netwerk	biedt een toegankelijke netwerk een oplossing?	specifieke oplossing toegankelijk netwerk	Score AIR	score slim netwerk	score toegankelijk netwerk
Staal	Corrosie	Inwendige Electromagnetische Techniek op een PIG/crawler	hoge nauwkeurigheid is zeer duur, omdat veel sensoren dicht bij de wand nodig zijn								0	0	0
			nauwkeurige positionering dicht bij de wand	schuifarm, maar dan wel een drager nodig die groot genoeg is	ja	ja	sensoren in wand				1	1	0
			Tool zelf is duur, kalibratie sensoren, voor iedere diameter	idem dito (maar wel binnen grenzen)	ja	ja	sensoren in wand				1	1	0

		een aparte tool nodig (behalve heel grote diameters, waarvoor een modulair systeem bestaat)										
		data naar informatie vergt veel tijd van analisten				mogelijk	positiedata is duidelijk, zowel lateriaal als in omtrekring			0	0.5	0
		leiding open en buiten bedrijf	gemakkelijke toegang (mangaf); iets waar de leiding niet voor open en buiten bedrijf hoeft	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	mogelijk	Meer (vaste) toegangspunten leiding niet hoeft te worden opgegraven en afhankelijk van de inspectietool niet buiten bedrijf gesteld.	1	1	0.5
		van tevoren zeker stellen dat de leiding goed rond is en er geen obstakels zijn	visuele identificatie van obstakels, passeren vlinderklep, armsysteem voor positionering sensoren	ja	niet nodig	ja	niet nodig			1	1	0
		hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open	ja	leiding hoeft niet open	mogelijk	Hygiënisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van	1	1	0.5





beton	Dwarsspanning	?	er is niets, maar ook weinig behoefte								0	0	0
	Voorspanwapping	Electromagnetisch	data naar informatie vergt veel tijd van analisten				mogelijk			gemakkelijke interpretatie van data bij beschikbaarheid van de juiste sensoren?	0	0.5	0
			leiding open en buiten bedrijf	iets waar de leiding niet voor open en buiten bedrijf hoeft	ja	langere verblijftijd in leidingnet	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	mogelijk	Meer (vaste) toegangspunten leiding niet hoeft te worden opgegraven en afhankelijk van de inspectietool niet buiten bedrijf gesteld.	1	1	0.5
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open	ja	leiding hoeft niet open	mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	1	0.5
	Uitloging	Echologics ePulse	nauwkeurigheid - alleen secties met elkaar vergelijken	lokaal meten	ja	systeem kan lokaal meten	ja	systeem kan lokaal meten			1	1	0
			appendages nodig - die zijn er weinig op transportleidingen, anders	lokaal meten	ja	systeem kan lokaal meten	ja	systeem kan lokaal meten	ja	meer appendages aanwezig	1	1	1



			lokaal meten - mogelijk met inwendige toepassing grondradar (maar daarvoor moet de leiding droog staan =- CHECK DIT)											
Uitloging	Echologics ePulse	nauwkeurigheid - meten in secties tussen appendages		ja	systeem kan lokaal meten	ja	systeem kan lokaal meten					1	1	0
		appendages nodig - die zijn er weinig op transportleidingen, anders moet er worden gegraven	lokaal meten	ja	systeem kan lokaal meten	ja	systeem kan lokaal meten	ja	meer appendages aanwezig			1	1	1
Ongelijke zetting	Aerial remote sensing (als hoge nauwkeurigheid niet vereist is)											0	0	0
	uitwendig (als hoge nauwkeurigheid vereist is)	kosten	iets waar je minder voor hoeft te graven	mogelijk	moet blijken uit business case	mogelijk	bepaling met glasvezel - > grond hoeft niet open; business case moet aantonen of dit echt goedkoper is	mogelijk	moet blijken uit business case			0.5	0.5	0.5

		inwendig (als hoge nauwkeurigheid vereist is en uitwendig niet mogelijk is) op PIG/crawler	leiding open en buiten bedrijf	iets waar de leiding niet voor open en buiten bedrijf hoeft	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	mogelijk	Meer (vaste) toegangspunten leiding niet hoeft te worden opgegraven en afhankelijk van de inspectietool niet buiten bedrijf gesteld.	1	1	0.5
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open	ja	leiding hoeft niet open	mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	1	0.5
	Rubber ring	?	er is niets	lekdetectie (reactief) - proactief op basis waargenomen trend							0	0	0
PVC	Dwarsspanning	Laser ovaliteit meting op crawler of ultrasoon op PIG/crawler	kosten		mogelijk	moet blijken uit business case	mogelijk	moet blijken uit business case			0.5	0.5	0
			graven (geen mangaten in distributieleidingen)	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem	ja	sensoren in buiswand	ja	voldoende toegangspunten aanwezig	1	1	1
			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	mogelijk	Meer (vaste) toegangspunten leiding niet hoeft te worden opgegraven en afhankelijk van	1	1	0.5

									de inspectietool niet buiten bedrijf gesteld.			
		hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open	ja	leiding hoeft niet open	mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	1	0.5
		kan slechts kort buiten bedrijf worden genomen zonder aanvullende maatregelen	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	langere verblijftijd in leidingnet	ja	geen onderbreking van bedrijfsvoering	ja	Kan eventueel onder druk als vaste toegangspunten op die manier worden geconstrueerd	1	1	1
	Verweking	?	er is nog niets		drager voor aankomende veelbelovende technieken					0	0	0
	Materiaalveroudering	?	er is nog niets		drager voor aankomende veelbelovende technieken					0	0	0
	Ongelijke zetting	Aerial remote sensing								0	0	0
AC	Uitloging	Echologics ePulse								0	0	0
	Ongelijke zetting	Aerial remote sensing								0	0	0
	Rubber ring	?	er is niets		lekdetectie (reactief) - proactief op					0	0	0

				basis waargenomen trend										
PE	Dwarsspanning	Laser ovaliteit meting op crawler of ultrasoon op PIG/crawler	kosten									0	0	0
			graven (geen mangaten in distributieleidingen)	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem	ja	graven niet nodig	ja	voldoende toegangspunten aanwezig	1	1	1	
			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	mogelijk	Meer (vaste) toegangspunten leiding niet hoeft te worden opgegraven en afhankelijk van de inspectietool niet buiten bedrijf gesteld.	1	1	0.5	
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open	ja	leiding hoeft niet open	mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	1	0.5	
			kan slechts kort buiten bedrijf worden genomen zonder aanvullende maatregelen	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	langere verblijftijd in leidingnet	ja	geen onderbreking van bedrijfsvoering	ja	Kan eventueel onder druk als vaste toegangspunten op die manier worden geconstrueerd	1	1	1	

	Materiaalveroudering	?	er is niets							0	0	0	
	Ongelijke zetting	Aerial remote sensing								0	0	0	
	Lasverbinding	?	er is niets							0	0	0	
	Temperatuurverschil (niet-trekvast)	Voegwijdtemeting	kosten							0	0	0	
			graven (geen mangaten in distributieleidingen)	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem	ja	graven niet nodig	ja	voldoende toegangspunten aanwezig	1	1	1
			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	mogelijk	Meer (vaste) toegangspunten leiding niet hoeft te worden opgegraven en afhankelijk van de inspectietool niet buiten bedrijf gesteld.	1	1	0.5
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open	ja	leiding hoeft niet open	mogelijk	Hygiënisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	1	0.5
			kan slechts kort buiten bedrijf worden genomen zonder aanvullende maatregelen	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	langere verblijftijd in leidingnet	ja	geen onderbreking van bedrijfsvoering	ja	Kan eventueel onder druk als vaste toegangspunten op die manier worden geconstrueerd	1	1	1

Gietijzer	Corrosie	Echologics ePulse									0	0	0
	Ongelijke zetting	Aerial remote sensing									0	0	0
	Rubber ring	?	er is niets	lekdetectie (reactief) - proactief op basis waargenomen trend							0	0	0
	Lood-striktouw	?	er is niets, geen geleidelijk falen	lekdetectie (reactief)							0	0	0
	Corrosie	Echologics ePulse									0	0	0
Staal	Ongelijke zetting	Aerial remote sensing									0	0	0
	Rubber ring	?	er is niets	lekdetectie (reactief) - proactief op basis waargenomen trend							0	0	0
	Lood-striktouw	?	er is niets, geen geleidelijk falen	lekdetectie (reactief)							0	0	0
	Corrosie	Echologics ePulse									0	0	0
	Ongelijke zetting	Aerial remote sensing									0	0	0



TABEL 22: AANVULLENDE INSPECTIEBEHOEFTE, VORKEURSTECHNIKEN, PROBLEMEN EN TEKORTKOMINGEN EN OPLOSSINGEN HIERVOOR, MET SCORING VAN AIR, SLIMME NETWERKEN EN TOEGANKELIJKE NETWERKEN.

Type	Doel	Huidige voorkeurstechiek	probleem	oplossingsrichting, breed toepasbaar	biedt AIR een oplossing?	specifieke oplossing AIR	biedt een slim netwerk een oplossing?	specifieke oplossing slim netwerk	biedt een toegankelijke netwerk een oplossing?	specifieke oplossing toegankelijk netwerk	Score AIR	score slim netwerk	score toegankelijk netwerk
visueel	lokale inspectie	endoscoop	appendage moet beschikbaar zijn	iets dat geen lokale toegang nodig heeft	ja	heeft geen lokale toegang nodig			ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	0	1
			graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem			ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	0	1
			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf					1	0	0
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open			mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	0	0.5
	tracé-inspectie	Pipe Inspector	autofocus i.c.m. opwerveling	software?							0	0	0
			volledigheid beeld	opname van volledige buiswand							0	0	0

			verwerking							0	0	0
			kosten		mogelijk	zal moeten blijken uit business case		mogelijk	zal moeten blijken uit business case	0.5	0	0.5
			2 mangaten moet beschikbaar zijn	iets dat geen lokale toegang nodig heeft	ja	heeft geen lokale toegang nodig		ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	0	1
			graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem				1	0	0
			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf				1	0	0
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open		mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	0	0.5
		Crawler	beperkt bereik door kabel (zeker icm bochten of verticaal profiel)		ja	los		ja	veel toegangspunten	1	0	1
			kosten		mogelijk	zal moeten blijken uit business case		mogelijk	zal moeten blijken uit business case	0.5	0	0.5
			mangat moet beschikbaar zijn	iets dat geen lokale toegang nodig heeft	ja	heeft geen lokale toegang nodig		ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	0	1
			graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem		ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	0	1

			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf					1	0	0
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open			mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	0	0.5
xyz		uitwendige technieken	kosten	iets waar je minder voor hoeft te graven	mogelijk	moet blijken uit business case					0.5	0	0
		inwendige technieken	leiding open en buiten bedrijf	iets waar de leiding niet voor open en buiten bedrijf hoeft	ja	langere verblijftijd in leidingnet					1	0	0
lek-detectie		akoestisch uitwendig	appendages nodig		ja	inwendig met hydrofoon op robot	ja	denkbaar met inwandige sensoren	ja	veel appendages beschikbaar	1	1	1
			beperkt toepasbaar voor zachte materialen		ja	inwendig met hydrofoon op robot	ja	denkbaar met inwandige sensoren			1	1	0
		akoestisch inwendig	kosten		mogelijk	zal moeten blijken uit business case	mogelijk	zal moeten blijken uit business case			0.5	0.5	0
			mangat of andere opening moet beschikbaar zijn	iets dat geen lokale toegang nodig heeft	ja	heeft geen lokale toegang nodig	ja	geen lokale toegang nodig	ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	1	1
			graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem	ja	graven niet nodig			1	1	0

			leiding open en mogelijk buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf			1	1	0
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open	ja	leiding hoeft niet open	mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	1	0.5
waterkwaliteit	meten op verschillende niveaus in de leiding	steeklans	graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem	ja	graven niet nodig			1	1	0
			toegang via appendage nodig	iets dat geen lokale toegang nodig heeft	ja	heeft geen lokale toegang nodig	ja	geen lokale toegang nodig	ja	veel appendages beschikbaar	1	1	1
			kosten: maatwerk per punt	breed toepasbaar							0	0	0
monstername	coating	ROV met grijparm	weinig controle over monsternamen, alleen los/loszittend materiaal	gereedschap							0	0	0
			mangat moet beschikbaar zijn	iets dat geen lokale toegang nodig heeft	ja	heeft geen lokale toegang nodig					1	0	0
			graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem			ja	veel appendages beschikbaar	1	0	1
			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf					1	0	0



			volledigheid beeld	opname van volledige buiswand						0	0	0	
			verwerking							0	0	0	
			kosten		mogelijk	zal moeten blijken uit business case			mogelijk	zal moeten blijken uit business case	0.5	0	0.5
			graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem			ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	0	1
			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf					1	0	0
			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open			mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	0	0.5
		Crawler	beperkt bereik door kabel (zeker icm bochten of verticaal profiel)		ja	los			ja	veel toegangspunten	1	0	1
			kosten		mogelijk	zal moeten blijken uit business case			mogelijk	zal moeten blijken uit business case	0.5	0	0.5
			graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem			ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	0	1
			leiding open en buiten bedrijf	iets waarbij de leiding in bedrijf kan blijven	ja	leiding hoeft niet open en niet buiten bedrijf			ja	veel lokale toegangspunten beschikbaar	1	0	1

			hygiënische aspecten	iets waar de leiding niet voor open hoeft	ja	leiding hoeft niet open			mogelijk	Hygienisch beter controleerbaar door vaste toegangspunten in plaats van modderige putten	1	0	0.5
xyz		uitwendige technieken	kosten	iets waar je minder voor hoeft te graven	mogelijk	moet blijken uit business case					0.5	0	0
		inwendige technieken	leiding open en buiten bedrijf	iets waar de leiding niet voor open en buiten bedrijf hoeft	ja	langere verblijftijd in leidingnet					1	0	0
lek-detectie		akoestisch uitwendig	appendages nodig		ja	inwendig met hydrofoon op robot	ja	denkbaar met inwandige sensoren	ja	veel appendages beschikbaar	1	1	1
			beperkt toepasbaar voor zachte materialen		ja	inwendig met hydrofoon op robot	ja	denkbaar met inwandige sensoren			1	1	0
waterkwaliteit	meten op verschillende niveaus in de leiding	steeklans	graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem					1	0	0
			toegang via appendage nodig	iets dat geen lokale toegang nodig heeft	ja	heeft geen lokale toegang nodig			ja	veel appendages beschikbaar	1	0	1
			kosten: maatwerk per punt	breed toepasbaar							0	0	0
monstername	coating	uitname	graven	iets waar je niet voor hoeft te graven	ja	graven niet nodig na installatie systeem					1	0	0





## Waarderingen ontwikkelbehoeften door de waterbedrijven

TABEL 23: WAARDERING VAN ONTWIKKELBEHOEFEN T.O.V. BESTAANDE VOORKEURSTECHNIEKEN VOOR BEPALING VAN FAALMECHANISMEN. WEERGAVE PER BEDRIJF EN OVER DE LINIE (GEMIDDELDE EN STANDAARDDEVIATIE).

Leiding- net	Materiaal	Falen buis	Falen verbinding	Evides	Vitens	Brabant Water	Waternet	WML	PWN	Gemiddelde	Std		
Transportnet	Staal	Corrosie		4	3	3	2	2	2	2.7	0.7		
		Ongelijke zetting		2	1	2	3	1	1	1.7	0.7		
				2	1	2	3	1	2	1.8	0.7		
				2	3	3	3	1	1	2.2	0.9		
				2	3	3	3	1	1	2.2	0.9		
			Lasverbinding	3	1	3	1	1		1.8	1.0		
		Lood-striktouw	2	1	3	1	1		1.6	0.8			
	beton	Dwarsspanning			1	1	1	2		1	1.2	0.4	
		Voorspanwapening			2	3	2	2	3	2	2.3	0.5	
		Uitloging			1	2	3	3	1	2	2.0	0.8	
		Ongelijke zetting				3	1	3	1		1	1.8	1.0
							1	2	2		2	1.8	0.4
							1	2	3		1	1.8	0.8
		Rubber ring			4	1	3	3			2.8	1.1	
	AC	Dwarsspanning			1	1	1		2		1.3	0.4	
		Uitloging			3	1	3		3	3	2.6	0.8	
		Ongelijke zetting			3	3	3		2	1	2.4	0.8	

				3	3		1	2	2.3	0.8
				3	3		2	1	2.3	0.8
		Rubber ring	4	3	4		1		3.0	1.2
Distributienet	PVC	Dwarsspanning	2	2	1	3	3		2.2	0.7
		Verweking	2	4	2	3	1		2.4	1.0
		Materiaalveroudering	4	3	3	4	1	3	3.0	1.0
		Ongelijke zetting	2	1	3	3	3	3	2.5	0.8
	AC	Uitloging	1	4	3		3	4	3.0	1.1
		Ongelijke zetting	2	3	3		2	3	2.6	0.5
		Rubber ring	3	3	3		1	1	2.2	1.0
	PE	Dwarsspanning	2	2	1	2			1.8	0.4
		Materiaalveroudering	4	3	2	2		1	2.4	1.0
		Ongelijke zetting	2	2	2	2		1	1.8	0.4
		Lasverbinding	2	3	2	3		1	2.2	0.7
		Temperatuurverschil (niet-trekvast)	2	2	2	2		1	1.8	0.4
	Gietijzer	Corrosie	2	4	3	3	1	3	2.7	0.9
		Ongelijke zetting	2	3	3	2	1	1	2.0	0.8
		Rubber ring	1	2	3	2	1	1	1.7	0.7
		Lood-striktouw	2	3	3	4	1	1	2.3	1.1
Staal	Corrosie	2	3	3	3	1	1	2.2	0.9	
	Ongelijke zetting	2	2	2	2	1	1	1.7	0.5	
	Rubber ring	1	1	2	1		1	1.2	0.4	
	Lood-striktouw	2	1	2	1		1	1.4	0.5	

TABEL 24: WAARDERING VAN ONTWIKKELBEHOEFEN T.O.V. BESTAANDE VOORKEURSTECHNIEKEN VOOR AANVULLENDE INSPECTIEBEHOEFEN. WEERGAVE PER BEDRIJF EN OVER DE LINIE (GEMIDDELDE EN STANDAARDDEVIATIE).

Leidingnet	inspectie	toepassing	Evides	Vitens	Brabant Water	Waternet	WML	PWN	Gemiddelde	Std	CV
transport	visueel	lokale inspectie	2	2	1	1	0	1	1.2	0.7	0.59
		tracéinspectie	3	3	3	3	1	3	2.7	0.7	0.28
			0	3	3	3	1	3	2.2	1.2	0.56
	xyz		3	3	3	1	2	1	2.2	0.9	0.41
			3	4	3	2	2	2	2.7	0.7	0.28
	lekdetectie		3	3	3	2	1	3	2.5	0.8	0.31
			3	3	3	2	2	3	2.7	0.5	0.18
	waterkwaliteit	meten op verschillende niveaus in de leiding	3	2	2	1	1	3	2.0	0.8	0.41
	monstername	coating	2	1	3	1	2	1	1.7	0.7	0.45
		bioflim	3	1	3	1	1	0	1.5	1.1	0.75
sediment		3	1	3	1	1	3	2.0	1.0	0.50	
		0	1	3	0	1	0	0.8	1.1	1.28	
distributie	visueel	lokale inspectie	2	2	1	1	0	1	1.2	0.7	0.59
		tracéinspectie	2	3	3	3	1	1	2.2	0.9	0.41
			0	3	3	3	1	1	1.8	1.2	0.66
	xyz		3	3	3	1	2	4	2.7	0.9	0.35

		3	4	3	2	2	4	3.0	0.8	0.27
lekdetectie		2	3	3	1	1	3	2.2	0.9	0.41
waterkwaliteit	meten op verschillende niveaus in de leiding	3	2	2	0	1	3	1.8	1.1	0.58
monstername	coating	1	1	3	1	1	2	1.5	0.8	0.51
	bioflim	3	2	3	1	1	3	2.2	0.9	0.41
	sediment	2	2	3	1	1	3	2.0	0.8	0.41