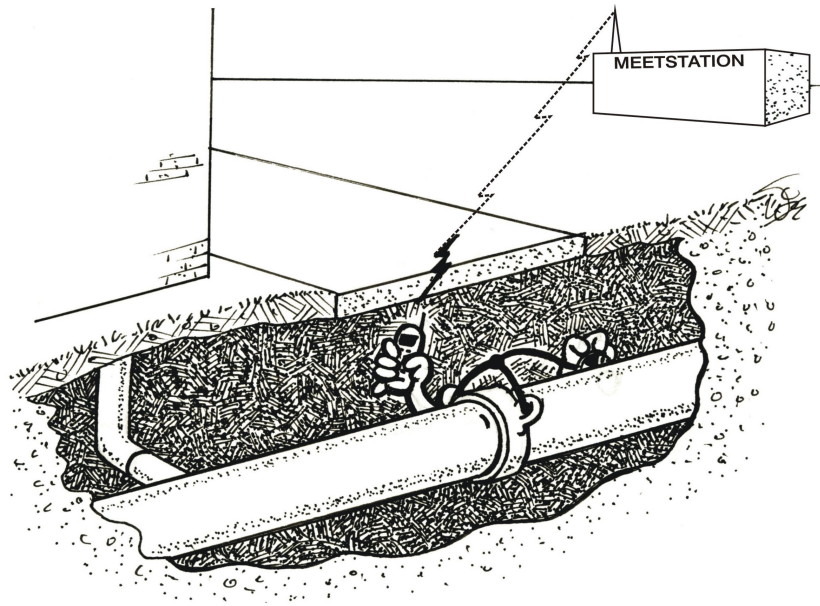


BTO 2007.023
Mei 2007

Voorzieningen voor het continu monitoren van leidingen

Een overzicht van beschikbare technieken



BTO 2007.023
Mei 2007

Voorzieningen voor het continu monitoren van leidingen

Een overzicht van beschikbare technieken

© 2007 Kiwa Water Research N.V.
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.

Kiwa Water Research N.V.

Groningehaven 7

Postbus 1072

3430 BB Nieuwegein

Telefoon 030 60 69 511

Fax 030 60 61 165

Internet www.kiwawaterresearch.eu

Colofon

Titel

Voorzieningen voor het continu monitoren van leidingen -
Een overzicht van beschikbare technieken

Projectnummer

11.1628.101

Projectmanager

W. Senden

Kwaliteitsborger(s)

W. Senden

Auteur(s)

E. Trietsch, A. van Mazijk en J. van der Wielen

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Samenvatting

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van methoden en technieken voor intelligente voorzieningen in leidingen of leidingstelsels. Intelligentie is hierbij gedefinieerd als het vermogen van een voorziening zelfstandig een signaal af te geven bij conditieveranderingen van de leiding. Op basis van deze veranderingen kan een voorspelling worden gedaan over de restlevensduur van de leiding. Deze voorspelling stelt het waterleidingbedrijf in staat om met gepland onderhoud de kans op een calamiteit sterk te reduceren.

Methoden voor conditiebepaling en leidinginspectie kunnen worden onderverdeeld in mobiele en vaste intelligente voorzieningen. De mobiele voorzieningen worden beschreven in het BTO-rapport (BTO 2004.056) "Inventarisatie van methoden voor conditiebepaling en leidinginspectie" en worden in het BTO-project "Conditiebepaling" nader onderzocht. Het onderhavige rapport geeft een overzicht van 'vaste intelligente voorzieningen', waarmee leidingen continu worden gemonitord. Hierbij is voor een belangrijk deel gebruik gemaakt van de kennis en ervaring buiten de drinkwatersector, met name van die in de olie- en gassector.

De huidige onderzoeken in de drinkwatersector blijken voornamelijk gericht te zijn op lekdetectie in plaats van de bepaling van de leidingtoestand. Alleen de *Field Signature Method* is in potentie in staat de toestand van metalen leidingen direct te bepalen in termen van wanddikte. Daarnaast bestaat er een indirecte methode, namelijk *Monitoring van omgevingsfactoren*. Omgevingsfactoren kunnen bepalend zijn voor de conditie van de leiding, zoals de corrosiviteit van de bodem waaraan het corrosiegedrag van metalen leidingen kan worden gerelateerd.

Andere directe monitoring methodieken beperken zich tot *visuele inspectie met behulp van kunstlicht of laser* van het oppervlak van de binnenwand van de leiding. De toepassing van deze methodieken in een vaste opstelling verkeert echter nog in een ontwikkelingsstadium.

Voor een permanente controle van de waterkwaliteit aan de hand van de troebelheid als parameter is de *Ultrasonic Particle Monitor* een goede optie. De toepasbaarheid in waterleidingnetten van deze door TNO-TPD voor de industrie ontwikkelde monitor zal uit nader onderzoek moeten blijken. De toepassing van *Infrarood licht* voor deeltjestelling bevindt zich in de ontwikkelingsfase, maar kan op termijn een veelbelovende optie zijn.

Voor de detectie en lokalisering van lekken/breuken geeft de inzet van *glasfiberdraden* goede mogelijkheden. Hoewel met deze techniek geen uitspraak kan worden gedaan over de conditie, is deze relatief kostenarm en eenvoudig te implementeren. *Intelligente drukmonitoring met behulp van neurale netwerken* heeft zich bewezen als een aantrekkelijke methodiek voor een snelle detectie van lekken op basis van een vergelijking tussen voorspelde en gemeten drukken.

Inhoud

	Samenvatting	1
	Inhoud	3
1	Inleiding	5
2	Huidige (conditie)monitoring	7
2.1	Inleiding	7
2.2	Faalmechanismen	7
2.3	Onderhouds- en vervangingsbeleid	9
2.4	Potentiële meerwaarde intelligentie in leidingen	9
3	'Intelligente Leidingen'	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Fysiske methodieken	11
3.3	Soft sensors en intelligente BOS systemen	13
3.4	Akoestische methodieken	15
3.5	Licht gerelateerde methodieken	16
3.6	Elektromagnetische methodieken	19
3.7	Trillingsmethodieken	21
4	Conclusies en aanbevelingen	23
5	Referenties	27
I	AWWARF project 2612	31
II	Datasheets <i>TNO-TPD</i>	35
III	Corrosion Monitoring : FIELD SIGNATURE METHOD	39

1 Inleiding

Voor de waarborging van de leveringscontinuïteit is inzicht in de kwaliteit en het kwaliteitsverloop van het leidingnet noodzakelijk. Door het volgen van de toestand van de leidingen, zoals de afname in wanddikte, kan een inschatting worden gemaakt van de restlevensduur. Hiervoor zijn conditiebepalingsmethoden nodig, die enerzijds eenvoudig in de uitvoering zijn en waarmee anderzijds een goede uitspraak kan worden gedaan over de huidige en toekomstige conditie van de leidingen.

Het onderzoek op dit gebied onderscheidt zich in:

- de ontwikkeling en verbetering van non-destructieve methoden,
- de ontwikkeling van mobiele sensoren, en
- de toepassing van hoogwaardige conditiebepalingsmethoden uit andere sectoren, zoals de olie- en gassector.

Daarnaast zijn ontwikkelingen gaande op het gebied van de zogenaamde 'intelligente' leidingen. Dit zijn leidingen, die zijn uitgerust met 'intelligente voorzieningen', waarmee de condities van de leiding automatisch worden gecontroleerd en daarmee de restlevensduur. De definitie van intelligente leidingen luidt derhalve:

'Intelligente leidingen' zijn bestaande of nieuwe leidingenelementen (leidingen, appendages, afsluiters, etc.), waaraan een extra voorziening is toegevoegd die zelfstandig een signaal kan afgeven. Dit kan gebeuren bij naderende conditieverandering of continu, waarbij een analysesysteem de signalen vertaalt in zowel monitoring als waarschuwingen voor naderende calamiteiten zoals lek en/of breuk. De geïmplementeerde, intelligente voorziening is permanent en werkt locatiespecifiek.

In dit rapport wordt een beknopt overzicht gegeven van de mogelijkheden en meerwaarden van huidige en toekomstige ontwikkelingen op het gebied van technologische intelligentie in nieuw te leggen en bestaande leidingnetten.

Binnen deze inventariserende studie is getracht enige helderheid te verschaffen over de randvoorwaarden, waaraan zowel de (toekomstige) technologieën als het distributiesysteem moeten voldoen, wil de implementatie van 'intelligentie' een duidelijke meerwaarde hebben voor de drinkwaterleidingbedrijven. Daarom is er niet alleen gecommuniceerd met de potentiële gebruiker, maar ook met onderzoeksinstanties op dit gebied.

In deze studie is gekeken naar (semi)permanente conditiebepalingsmethoden, waarbij apparatuur op een vaste locatie wordt geïmplementeerd.

Voor ontwikkelingen op het gebied van mobiele conditiebepalingsmethoden, zoals Pipe Investigation Gauges (PIG's) wordt verwezen naar het BTO-rapport "Inventarisatie van methoden voor conditiebepaling en leidinginspectie" [30].

2 Huidige (conditie)monitoring

2.1 Inleiding

In Nederland ligt ongeveer 116.000 km waterleiding [34]. Dit leidingnet bestaat voor 10% uit grijs gietijzer (GGIJ), voor 30% uit asbestcement (AC) en voor 45% uit PVC. De overige 15% bestaat uit polyethyleen (PE), staal, nodulair gietijzer en beton. Van de leidingen, die op dit moment gelegd worden is 90% van PVC. GGIJ en AC worden niet meer nieuw gelegd.

Veel onderzoek is gedaan naar het toepassen van conditiebepalingsmethoden op verschillende leidingmaterialen [1]...[9]. Daarbij is niet alleen de toestand van de leiding zelf in beschouwing genomen (zoals fouten in het fabricageproces en materiaaleigenschappen), maar ook tijdgerelateerde omgevingsfactoren (zoals belastingen en drinkwaterparameters). Immers, voor het anticiperen op een calamiteit, zoals lek of leidingbreuk, is niet uitsluitend het volgen van de conditie van de leiding zelf voldoende, maar ook de interactie met de omgeving, zoals grondzettingen en werkzaamheden van derden. In Nederland wordt thans, zij het op nog kleine schaal, de druk continu gemeten om drukverliezen als gevolg van lek of breuk vroegtijdig te kunnen signaleren.

Bij de inventarisatie van toepassingsmogelijkheden van intelligentie in leidingen is het van belang onderscheid te maken tussen het aanbrengen van voorzieningen bij (1) bestaande leidingen en bij (2) nieuw aan te leggen leidingen. Dit onderscheid zorgt voor verschillende randvoorwaarden, die aan de intelligente technologie moeten worden gesteld.

Omdat nieuw te leggen leidingen bijna altijd van PVC zijn, moet een 'voor-ingebouwde' intelligente voorziening gebaseerd zijn op de conditie of conditieveranderingen van PVC. Vanwege de lange levensduur van nieuwe PVC-leidingen is de levensduur van de voorziening een belangrijk gegeven. Technologieën voor GGIJ en AC kunnen echter niet meer samen met de leiding worden geïnstalleerd en zullen dus in een latere fase aan het operationele stelsel moeten worden toegevoegd.

In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van de faalmechanismen per leidingmateriaal en de wijze, waarop deze thans worden gemeten. Hierbij is gebruik gemaakt van een vergelijkbaar overzicht voor ijzeren en stalen leidingen, opgesteld door D. Nicholas [1]. Aan de hand van dit totaaloverzicht en een korte beschrijving van het huidige onderhouds- en vervangingsbeleid, wordt tot slot nader ingegaan op de meerwaarde van intelligentie in leidingnetten voor de conditiebepaling.

2.2 Faalmechanismen

Onder faalmechanismen worden de voorkomende oorzaken van falen van leidingen verstaan. Het falen van een systeem of component betekent het gehele of gedeeltelijke verlies van het vermogen om een bepaalde functie uit te oefenen.

Faalmechanismen kunnen worden ingedeeld in:

- Chemische faalmechanismen: het falen van leidingen als gevolg van niet wenselijke veranderingen in de waterkwaliteit door interacties tussen het water (incl. omgevingswater) en het leidingmateriaal.
- Hydraulische faalmechanismen: het falen als gevolg van ongewenste drukveranderingen.
- Biologische faalmechanismen: waterkwaliteitsveranderingen door biologische besmetting door leidingmaterialen.
- Fysische faalmechanismen: het falen van de leiding door breuk (sterkte), waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen breuk in leidingen met goede en met slechte conditie.

Tabel 2.1. Faalmechanismen gietijzeren (GIJ) leiding

<i>Faalmechanisme</i>		<i>Meetmethode</i>
Chemisch	Troebelheid van water door ijzerafgifte aan het water	Troebelheidsmonitoring
Hydraulisch	drukverlies als gevolg van aangroei	Drukmeting
Biologisch	Gevoelig voor bacteriologische besmetting	Monitoring
Fysisch (goede conditie)	Schade door derden (grondzettingen door graafwerkzaamheden, etc.)	Storingsregistratie
Fysisch (zwakke conditie)	<ul style="list-style-type: none"> • Afname wanddikte door grafitering / corrosie (zowel intern / extern) • Uitgangskwaliteit GIJ • Veranderende omgevingsfactoren (droogte, vorst, etc.) 	Meten (destructief) Onderzoeksresultaat slechts voor beperkt traject representatief.

Tabel 2.2. Faalmechanismen asbestcement (AC) leiding

<i>Faalmechanisme</i>		<i>Meetmethode</i>
Chemisch	<ul style="list-style-type: none"> • Troebelheid uit water (sediment) • pH-verandering door uitloging 	<ul style="list-style-type: none"> • Troebelheidsmonitoring • pH meting
Fysisch (goede conditie)	<ul style="list-style-type: none"> • Schade door drukschommelingen in de leiding of de directe omgeving • Schade door derden (grondzettingen door graafwerkzaamheden, etc.) 	Storingsregistratie
Fysisch (zwakke conditie)	<ul style="list-style-type: none"> • Afname wanddikte door uitloging (intern / extern) • Sterkteverschillen 	Meten <ul style="list-style-type: none"> • destructief: fenoltaleïnetest • niet destructief: GEOradar

Tabel 2.3. Faalmechanismen PVC leiding

<i>Faalmechanisme</i>		<i>Meetmethode</i>
Chemisch	Troebelheid uit water (sediment)	Troebelheidsmonitoring
Fysisch (goede conditie)	Schade door derden (grondzettingen door graafwerkzaamheden, etc.)	Storingsregistratie
Fysisch (zwakke conditie) [11]	<ul style="list-style-type: none"> • Zwakke uitgangsconditie: <ul style="list-style-type: none"> – Insluitsels – Interne spanning – Samenstelling • Fouten / beschadigingen tijdens aanleg 	<ul style="list-style-type: none"> • (Vooraf) onderzoek <ul style="list-style-type: none"> – Schadeonderzoek – Proefstuk • Geleergraad

In de Tabellen 2.1, 2.2 en 2.3 zijn de meest voorkomende faalmechanismen en conditiebepalingsmethoden (meetmethoden) per oorzaak geïnventariseerd.

2.3 Onderhouds- en vervangingsbeleid

De conditieverandering van leidingen en leidingstelsels op de (middel)lange termijn bepaalt slechts in beperkte mate het onderhouds- en vervangingsbeleid. Ook maatschappelijke en economische overwegingen spelen in dat geval een belangrijke rol [10]. Op de korte termijn is de conditieverandering vaak wel bepalend in een saneringsbeslissing, zoals naar aanleiding van het falen van een leiding.

De conditie van leidingen is echter lastig te bepalen. Veelal zijn geen technieken voorhanden om snel inzicht te krijgen in de conditie van een leiding zonder een grote ingreep. De conditiebepaling gebeurt immers veelal destructief, waarbij niet alleen de leiding moet worden blootgelegd maar ook de levering tijdelijk moet worden onderbroken of omgeleid. Bovendien geven de meeste conditiebepalingsmethoden slechts puntinformatie. Vooral in het geval van GIJ is deze puntinformatie vaak niet representatief voor een groter gebied, waardoor zoveel monsters genomen dienen te worden dat vervangen goedkoper is.

Het huidige vervangingsbeleid is voor een belangrijk deel gebaseerd op klantperceptie. Men spreekt van een storingsafhankelijk onderhouds- en vervangingsbeleid. Globaal wordt een maximum van 5 à 10 storingen per km per jaar aangehouden voordat tot vervanging wordt overgegaan. Het maximaal geaccepteerde aantal storingen van een leiding is afhankelijk van het gebied, waarin de leiding zich bevindt. In stedelijke gebieden is de impact van een storing en daarmee de invloed op de klanttevredenheid veel groter dan in het buitengebied. In stedelijke gebieden wordt dan ook een lagere storingsfrequentie voor vervanging gehanteerd, dan voor het buitengebied.

Naast storingen spelen ook andere factoren een belangrijke rol bij vervanging, zoals stedelijke herindeling of het toevallig open gaan van de straat voor andere werkzaamheden. Het vervangen tijdens herindelingen kan ook worden opgelegd vanuit de overheid ter voorkoming van het open maken van gebieden binnen een bepaalde tijd na de herindeling.

Een laatste factor is de jaarlijkse begroting en budgettering. Wanneer de geplande vervangingen binnen het budget blijven, kan besloten worden andere trajecten voortijdig mee te nemen in het vervangingsbeleid.

Dit alles leidt veelal tot een eerdere vervanging, dan volgens de leidingconditie en verwachte restlevensduur strikt noodzakelijk zou zijn.

2.4 Potentiële meerwaarde intelligentie in leidingen

Gegeven het feit dat het huidige vervangingsbeleid slechts gedeeltelijk wordt bepaald door de conditie van de leiding, spelen conditie- en calamiteitenmonitoring thans slechts een ondersteunende rol. Een duidelijker beeld van de conditie, bijvoorbeeld door een grotere betrouwbaarheid (kleinere spreiding) van de voorspelling van de restlevensduur, levert mogelijkheden op voor specifieke investeringsprogramma's en een betere onderbouwing van het vervangingsbeleid. Intelligente technologieën, die (online) worden ingezet

voor het volgen van de conditieverandering van leidingsystemen, kunnen hierbij een grote rol spelen. Zo zal een 'intelligente voorziening' dat continu de wanddikte en de heersende leidingdruk meet, vertaald in beschikbare sterkte of faalkans, een restlevensduur voorspellen met een grote betrouwbaarheid dan de veelal destructieve inspectietechnieken (Tabellen 2.1, 2.2. en 2.3).

Daarnaast zijn calamiteiten pas te detecteren nadat ze zijn opgetreden. Intelligente technologieën, die het mogelijk maken voorafgaand aan een naderende calamiteit een signaal af te geven, maken bovendien de storingsproblematiek beter beheersbaar.

Daartegenover staan de kosten van 'intelligentie' in leidingen. Het inbouwen van 'intelligentie', eventueel in bestaande leidingnetten, brengt een bepaalde investering met zich mee. De meerwaarde van 'intelligentie' dient op te wegen tegen de implementatiekosten. Zo moet de meerwaarde van 'intelligentie' worden afgewogen tegen de potentiële verbetering van de procesbeheersing en de mogelijkheid tot anticipatie op naderende storingen.

3 'Intelligente voorzieningen'

3.1 Inleiding

Voor de inventarisatie van bestaande of in ontwikkeling zijnde 'intelligente voorzieningen', heeft een brainstormsessie plaatsgevonden met TNO TPD (Technische Fysische Dienst van TNO), die een jarenlange ervaring heeft met de ontwikkeling van deze technologieën voor de olie- en gassector.

Voor de toepassing van de in deze sector ontwikkelde 'intelligente leidingsystemen' moet bedacht worden, dat ook hier het medium (olie of gas) in een gesloten systeem onder druk wordt getransporteerd, maar dat de gehanteerde druk veelal hoger is dan in de waterleidingsystemen. Dit betekent dat de olie- en gassector hogere eisen stelt aan de fysische sterkte van de leidingen, dan het geval is in de drinkwatersector. Ook is het milieueffect van storingsen bij olie- en gassystemen groter dan bij drinkwater. Hierdoor is in het verleden veel energie gestoken in de ontwikkeling van methoden en technologieën voor het bewaken van de kwaliteit van leidingen. In het navolgende worden korte beschrijvingen gepresenteerd van al dan niet reeds toegepaste ontwikkelingen op het gebied van intelligentie in leidingnetssystemen, waarbij het gaat om fysisch georiënteerde methoden gericht op de condities van de leiding zelf. Tevens zal daarbij nader ingegaan worden op de potentiële meerwaarde van deze intelligentie in nieuwe en bestaande waterleidingnetten. Er wordt een onderverdeling gemaakt naar de volgende methodieken:

- Fysische methodieken;
- Soft sensors en intelligente BOS systemen;
- Akoestische methodieken;
- Licht gerelateerde methodieken;
- Elektromagnetische methodieken;
- Trillingsmethodieken.

Per methodiek zijn praktijkvoorbeelden of onderzoeksresultaten in het kort beschreven. Tevens worden per methodiek de bevindingen ten aanzien van de toepassing in waterleidingnetten in tabelvorm samengevat.

3.2 Fysische methodieken

Zwakke schakel

Vanuit een intelligent leidingsysteem dient een alarmering op te treden bij naderende conditieverandering of calamiteit. Op een controleerbare plaats kan een zogenaamde 'zwakke schakel' in het systeem worden ingebouwd. De locatie dient representatief voor het leidingsysteem te zijn. Op deze 'zwakke schakel' kan een sensor worden gemonteerd, die veranderingen detecteert en doorgeeft. Wanneer een verandering plaatsvindt, bijvoorbeeld een breuk in de 'zwakke schakel', betekent dit een signaal voor de conditie van de rest van het stelsel. Omdat de 'zwakke schakel' altijd eerder reageert dan de rest van

het stelsel, kunnen maatregelen op tijd worden getroffen om verdere gevolgen te vermijden.

Inbouw van een 'zwakke schakel' is in velerlei toepassingen denkbaar, bijvoorbeeld in een afsluitbare bypass of in een parallelle leiding. Wanneer de 'zwakke schakel' reageert, bijvoorbeeld door breuk, kan de betreffende bypass of parallelle leiding automatisch worden afgesloten, terwijl de andere leiding open gaat, bij gelijktijdige alarmering.

De moeilijkheid is echter de representativiteit van de gekozen locatie van de 'zwakke schakel'. Één en ander zou kunnen betekenen dat op meerdere locaties een 'zwakke schakel' aanwezig moet zijn en dus zonodig extra worden ingebouwd, wat kostenverhogend werkt. Derhalve komt deze methode eerder in aanmerking voor transportleidingen, dan voor distributienetten. Zo kan bij een transportleiding de 'zwakke schakel' ook worden ingebouwd direct voor of achter een kritische kruising.

Geconcludeerd kan worden dat met de huidige kennis echter nog niet de directe meerwaarde van deze, in potentie goede methodiek kan worden aangegeven.

Pijp-in-pijp techniek

Een relatief kostbare methode is de pijp-in-pijp techniek waarbij rond de leiding een tweede leiding wordt gelegd. Tussen de respectieve leidingwanden kunnen sensoren worden geplaatst, die reageren op de aanwezigheid van water. Deze sensoren bestaan uit verschillende open stroomdraden, die kortsluiting maken door water, dat als gevolg van een breuk van de binnenste leiding, tussen beide leidingen terechtkomt. De kortsluiting zorgt voor een alarmering.

Hoewel de intelligentie relatief eenvoudig is, is het leggen van dubbele leidingen kostbaar. De methode geeft wel de zekerheid, dat er zelfs bij breuk geen materiaal vanuit de omgeving in het drinkwater kan terechtkomen. In zwaar verontreinigde bodem zou deze methodiek om deze reden kunnen worden toegepast. Door de hoge kosten voor het leggen van dubbele leidingen is de methodiek mogelijk alleen voor deze toepassing relevant.

Opofferende bescherming

Opofferende bescherming is een methode, waarbij een ander materiaal dan het leidingmateriaal wordt opgeofferd ten gunste van het leidingmateriaal. Deze techniek kan intelligent worden door een sensor die een alarm geeft wanneer het opofferingsmateriaal gecorrodeerd is.

Een voorbeeld van opofferende bescherming is kathodische bescherming [12], waarbij een 'opofferingsmetaal' aan de buitenkant van een gietijzeren leiding wordt gemonteerd. Bij industriële toepassingen komt montage in de leiding ook wel voor. De stuwende kracht achter de bescherming is zijn positie in de 'spanningsreeks' t.o.v. het gietijzer of staal. Een aantal bedrijven heeft zich gespecialiseerd in kathodische bescherming [27]. Zo zijn er faciliteiten, die via draadloze verbindingen gegevens en alarmeringen kunnen doorgeven en zelf gevoed worden door zonne-energie. Nadeel van opofferende bescherming is dat toepassing bij andere leidingmaterialen dan metalen onwaarschijnlijk is.

Tabel 3.1 vat bovenstaande bevindingen samen.

Tabel 3.1. Fysieke methodieken

<i>Voorziening</i>	<i>Toepassing</i>	<i>Meerwaarde</i>
Zwakke schakel	Afsluitbare bypass of parallel leiding	Te onderzoeken voor drinkwaterleidingnetten
Pijp-in-pijp	Dubbele leiding met sensoren tussen de beide leidingen	Geen meerwaarde
Offerende bescherming (kathodische bescherming)	Montage binnen of buiten op leiding	Alleen toepasbaar bij metalen

3.3 Soft sensors en intelligente BOS systemen

Een soft sensor in een Beslissing Ondersteunend Systeem (BOS) is een empirisch model voor het schatten en voorspellen van een moeilijk meetbare parameter, zoals de leidingconditie op basis van eenvoudig meetbare parameters als druk en flow [13].

Continue meetgegevens (bijvoorbeeld drukmetingen) vanuit het leidingnet worden in een centraal intelligent systeem gecombineerd en geanalyseerd waarna dit systeem een vertaalslag kan maken naar monitoring, risicomangement en alarmering. De meerwaarde van dergelijke systemen is dat ze in staat gesteld kunnen worden relaties tussen meetgegevens en condities te 'leren' en zich daarmee aan te passen aan systematische veranderingen. Ook zullen de functies in de loop der tijd steeds specifieker worden. De hiervoor gebruikte soft sensors zijn datageoriënteerde modellen, zoals bijvoorbeeld Kunstmatig Neurale Netwerken [14], [15], [16].

Ter illustratie twee toepassingen:

- Monitoring omgevingsfactoren
- Intelligente Drukmonitoring

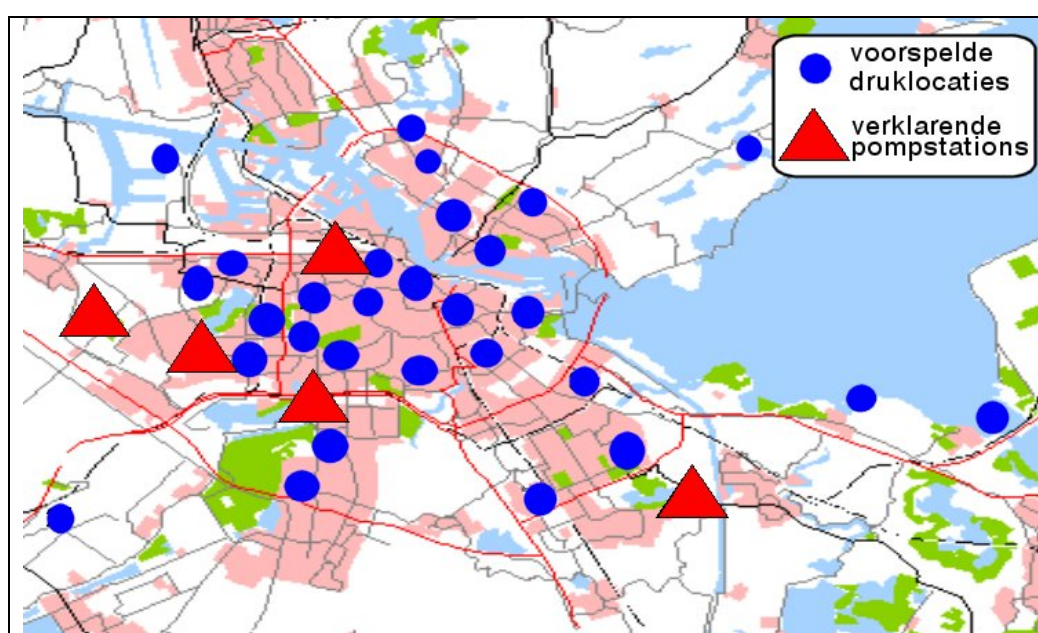
Monitoring omgevingsfactoren

Het conditieverloop van een leidingstelsel is voor een groot gedeelte afhankelijk van de omgevingsfactoren: de invloed van de bodem op de corrosie van metalen leidingen en de invloed van de pH van de bodem op de uitloging van AC. De bodemsamenstelling kan worden bepaald met behulp van *Soil Corrosivity Measurements*, waarbij met behulp van *Linear Polarization Resistance* de geleidbaarheid en daarmee de corrosiviteit van de bodem wordt gemeten [28]. Op basis van deze gegevens kan het corrosiegedrag van metalen leidingen worden gemodelleerd. Hoewel de exacte relaties tussen leidingmaterialen en de corrosiviteit van de omgeving complex is (onder andere door de aanwezigheid van coatings), geeft deze techniek een snelle en eenvoudige inschatting van het toekomstige conditieverloop.

Een andere toepassing is de bepaling van vrije kalk voor de aantasting van AC. Bij voldoende aanwezigheid van vrije kalk in de omgeving wordt geen uitwendige aantasting van AC meer verwacht. Nadeel van deze methode is dat hij lastig te automatiseren is (implementatie in/aan leidingen) en geen uitspraak doet over de inwendige aantasting.

Intelligente Drukmonitoring

Bij het Waterleidingbedrijf van de gemeente Amsterdam (Waternet) is onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om met behulp van Neurale Netwerken de leidingdruk op diverse locaties in Amsterdam te voorspellen aan de hand van gegevens van een vijftal pompstations [16], [18]. Het uiteindelijke doel van de voorspelling van de druk is een monitoringsysteem om enerzijds de kwaliteit van de inkomende drukgegevens te controleren en anderzijds trendmatige veranderingen en/of calamiteiten, bijvoorbeeld lekkages, te detecteren. Door de hoge voorspelnauwkeurigheid van de Neurale Netwerk modellen blijkt een hoogwaardige monitoringfunctie mogelijk te zijn. Hierbij wordt gebruik gemaakt van *Statistical Process Control*, een statistische toetsingsmethode voor de kwaliteit van voorspelling en meting [19].



Figuur 3.1. Voorspellende en verklarende locaties

Bron: Rapport "Ontwikkeling Analyse Component" [18]

Tabel 3.2. Soft sensors en intelligente BOS systemen

Voorziening	Toepassing	Meerwaarde
Bepaling omgevingsfactoren in relatie tot corrosie: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Soil Corrosivity Measurements</i> • <i>Linear Polarization Resistance</i> 	Corrosiegedrag van metalen leidingen	Bepaalde meerwaarde: <ul style="list-style-type: none"> • Alleen metalen • Geen uitspraak over inwendige aantasting
Bepaling omgevingsfactoren in relatie tot aanwezigheid van vrije kalk	Aantasting AC	Bepaalde meerwaarde: <ul style="list-style-type: none"> • Moeilijke implementatie • Geen uitspraak over inwendige aantasting
Intelligente Drukmonitoring mbv neurale netwerk <ul style="list-style-type: none"> • <i>Statistical Process Control</i> 	Voorspelling leidingdruk	Meerwaarde door <ul style="list-style-type: none"> • Nauwkeurige voorspelling drukken • Signalering lekkages e.d.

Tabel 3.2 geeft een samenvattend overzicht van de soft sensors en intelligente BOS systemen.

3.4 Akoestische methodieken

Akoestische monitoring wordt reeds succesvol toegepast in oppervlaktewater, bijvoorbeeld voor het detecteren van schepen en om deze te onderscheiden van dieren zoals walvissen.

Akoestische monitoring is eenvoudig toepasbaar in metalen en cementhoudende leidingen voor de detectie van breuken en lekken. Daarentegen kan met akoestische monitoring niet de conditie of conditieverandering worden gedetecteerd. Door het geluiddempende karakter van AC en kunststoffen werkt de techniek het meest nauwkeurig bij metalen leidingen. Daarnaast werkt achtergrondgeluid van verkeer of van vernauwingen in het leidingnet zeer storend.

Geluidsdetectie in water kan op verschillende manieren worden toegepast. Er kan met behulp van onderwatermicrofoons, zogenaamde *hydrofoons* 'geluisterd' worden naar afwijkende geluidspatronen. Ook kunnen geluidsgolven worden verzonden (*ultrasoon geluid*) en kan de reflectie of echo, veroorzaakt door 'obstakels', ter identificatie dienen. Daarnaast vinden ontwikkelingen plaats met ultrasoon geluid voor deeltjes meting in een leiding.

Hieronder worden de beide genoemde toepassingen van akoestische methodieken kort belicht.

Monitoring en bewaking van leidingnetten met behulp van hydrofoons

Iedere moedwillige inbreuk op het leidingnet maakt geluid: om een stof in het leidingnet te brengen, zal de druk in de leidingen moeten worden overwonnen, bijvoorbeeld door een pomp(je) te gebruiken. Ook zal de stroomsnelheid en stromingsrichting worden beïnvloed. Dit gaat gepaard met een geluid, dat afwijkt van de normale geluiden in een leidingnet. Het luisteren naar geluiden en herkennen van afwijkingen is een manier om het leidingnet te bewaken en zo in een vroeg stadium afwijkende activiteiten te herkennen. In dit kader is een gezamenlijk BTO-project opgestart door Kiwa, TNO en DHV: "Geluid in water" (zie ook [20] en [21]).

Het idee is om een netwerk van hydrofoons vast in het distributienet te installeren. Door verschil in geluidsregistratie kan niet alleen een interventie geïdentificeerd maar ook gelokaliseerd worden. Vaste verbindingen met een centrale maken online alarmering mogelijk. Deze techniek kan mogelijk ook worden gebruikt voor de toetsing van de functionaliteit van afsluiters en de detectie van lekkages.

Conditiebepaling met behulp van ultrasoon geluid

Naast "hoorbaar" geluid kan ook ultrasoon geluid worden toegepast in de conditiebepaling van leidingen [24], maar ook van de waterkwaliteit [23] (zie ook Bijlage II.1). De technieken gericht op de conditiebepaling van de leidingen zelf betreft de inspectie van de leidingen en de leidingwand met gebruikmaking van mobiele apparatuur en vallen daarmee buiten de scope van dit rapport.

Met betrekking tot de bepaling van de waterkwaliteit kan ultrasoon geluid worden toegepast voor de karakterisering van het zwevend materiaal

(deeltjes monitoring) in een leiding (Bijlage II.1). Met deze methodiek wordt naast de grootte van de deeltjes ook de concentratie en dus de troebelheid gemeten. De methodiek kent thans alleen nog industriële toepassingen, maar zou in potentie ook geschikt kunnen zijn voor drinkwaterleidingen. Zo zou met deze methodiek niet alleen de waterkwaliteit permanent bewaakt kunnen worden (optreden van 'bruinwater'), maar kan ook een calamiteit worden gesignaleerd en zonodig gelokaliseerd, die een verhoogde troebelheid tot gevolg heeft.

Tabel 3.3 geeft een samenvattend overzicht van bovenstaande bevindingen.

Tabel 3.3. Akoestische methodieken

<i>Voorziening</i>	<i>Toepassing</i>	<i>Meerwaarde</i>
Hydrofoons (permanent)	Monitoring en bewaking van leidingnetten	<ul style="list-style-type: none"> • Lokalisering van interventie • Functionaliteit afsluiters • Detectie van lek
Ultrasoon geluid	Monitoring en bewaking van de troebelheid	<ul style="list-style-type: none"> • 'Bruinwater' signalering • Detectie/lokalisering calamiteit met verhoogde troebelheid tot gevolg

3.5 Licht gerelateerde methodieken

Visuele inspectie met behulp van kunstmatig licht

De volgende meetapparatuur c.q. meetopstelling wordt gebruikt voor visuele inspectie van leidingen:

- De endoscoop;
- Closed Circuit Television (CCTV) [26].

De basis van deze methodiek is dat er opnamen gemaakt worden van de binnenkant van een leiding, waarna visuele inspectie door een deskundige noodzakelijk is voor de interpretatie van de beelden. Nadeel hiervan is de subjectiviteit van de deskundige. Omdat menselijke interpretatie nodig is, is deze methodiek afhankelijk van een stabiel beeld, meer dan geautomatiseerde interpretatietechnologieën. Er zijn op dit gebied echter wel ontwikkelingen gaande om met Digital Image Processing de visuele beelden digitaal te analyseren en te interpreteren [26], waardoor deze methodiek zich op termijn kan ontwikkelen tot een bruikbare intelligente voorziening.

De onregelmatigheden die met deze methodieken (via de mens of automatisch) aan het licht kunnen komen, zijn slechts de zichtbare mankementen, zoals slechte verbindingen, zichtbare gaten en aangroei. De afname van de wanddikte door bijvoorbeeld uitloging zijn met deze technieken niet waar te nemen. Daar tegenover staat wel dat deze manier van inspectie relatief goedkoop kan worden uitgevoerd.

Bij een permanente monitoring van de leidingwand betekent dit dat op meerdere cruciale punten in het leidingnet dergelijke opstellingen moeten worden aangebracht. Deze locaties dienen dan representatief te zijn voor het leidingnet, dan wel zijn ze aan te merken als zogenaamde 'zwakkere schakels' in het net.

Visuele inspectie met laser

Laser is een speciaal soort licht, dat gereflecteerd wordt door een leidingwand. Door de laserstraal onder een hoek op de leidingwand te richten kan met behulp van een monochroom-camera een visueel beeld worden gegenereerd van de leidingwand [26]. In dit beeld komt de geometrie van de leidingwand goed tot uiting, waardoor oneffenheden (gaten, corrosieplekken, etc.) gemakkelijk zijn waar te nemen. Nadeel van de lasertechniek is dat de kwaliteit bij toepassing onder water niet optimaal is. Een tweede beperking is dat laser alleen van het gescande oppervlak een visueel beeld kan geven en niet door het materiaal kan dringen. Hierdoor kan slechts een uitspraak worden gedaan over het gescande oppervlak, zoals bij de inspectie met kunstmatig licht.

Ook hier geldt dat bij een permanente monitoring van de leidingwand op meerdere cruciale punten in het leidingnet een dergelijke opstelling moet worden aangebracht. Ook zijn vaste opstellingen in een te beveiligen object zoals een transportleiding of een ambassade denkbaar.

Conditiebepaling met infrarood

De toepassing van infrarood bij de conditiebepaling van waterleidingen is een relatief nieuw onderzoeksgebied [26]. Het principe van infrarood is dat warme objecten warmte en dus licht uitzenden in het infrarood-spectrum. Omgezet in het zichtbare spectrum geven verschillende temperaturen van objecten of stoffen verschillende kleuren. Zo zijn er ontwikkelingen gaande om met infrarood deeltjes te tellen (temperatuurverschil tussen de deeltjes enerzijds en het transporterende water anderzijds) en daarmee een indicatie te kunnen geven van de troebelheid als parameter van de waterkwaliteit of om calamiteiten te kunnen signaleren, die zich een verhoogde troebelheid tot gevolg hebben. Op termijn zou deze techniek een goed alternatief kunnen zijn voor de troebelheidsmonitoring met ultrasoon geluid (Par. 3.4).

Glasfiber draden (zie ook Bijlage II-2)

Glasfiberdraden behouden over lange afstanden de mogelijkheid licht te geleiden en terug te kaatsen. Door glasfibers aan een leidingwand te bevestigen vervormen de glasfiberdraden zich op identieke wijze als de leidingwand [25]. Bij grote vervormingen, bijvoorbeeld door extreme zettingen, kan de leidingwand zich dermate zetten dat de glasfiberdraad uitrekt en zelfs breekt. Deze vervormingen kunnen aan de hand van licht worden gedetecteerd en gelokaliseerd. De terugkaatsing van licht door de draden en de tijdsperiode tussen uitzenden en ontvangen geven informatie over de locatie van een eventuele breuk. Ook het uitrekken van glasfiberdraden kan worden gelokaliseerd (Fig. 3.3).

Op deze wijze kunnen vele kilometers leiding worden voorzien van relatief goedkope glasfiberdraden, waarna op gezette tijden een controle met behulp van licht plaatsvindt.

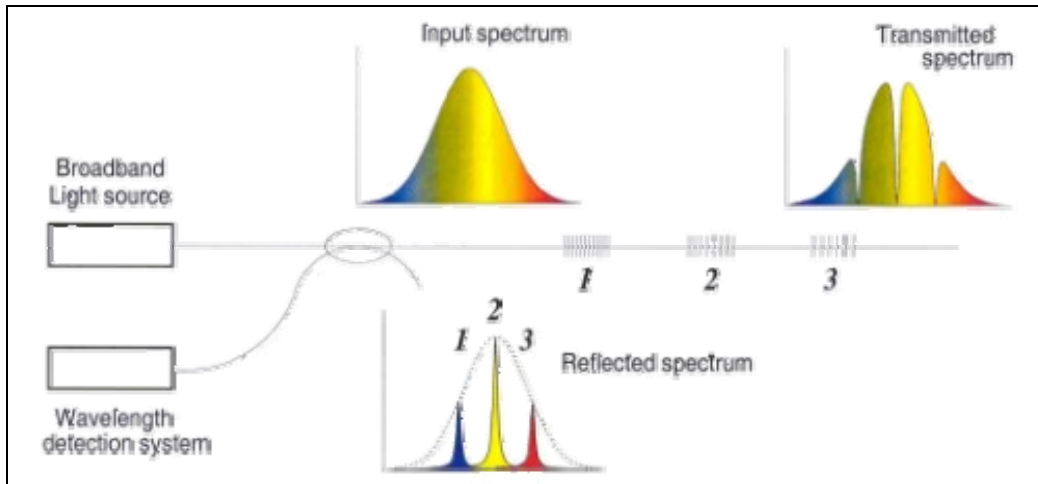


Fig. 3.3. Detecteren van 'rek' in glasfiberdraden [25]

Tabel 3.4. Licht gerelateerde inspectie methodieken

Voorziening	Toepassing	Meerwaarde
<ul style="list-style-type: none"> • Endoscoop • Closed Circuit Television 	Visuele inspectie buiswand aan de hand van gemaakte opnamen	Beperkte meerwaarde: <ul style="list-style-type: none"> • Digitale analyse en interpretatie van de beelden nog in ontwikkeling • Alleen zichtbare schade of aantasting • Opstellingen op meerdere representatieve locaties
Laserapparatuur met monochroom-camera	Visuele inspectie buiswand aan de hand van gemaakte opnamen	Beperkte meerwaarde: <ul style="list-style-type: none"> • Beeldkwaliteit in water beperkt • Alleen zichtbare schade of aantasting • Opstellingen op meerdere representatieve locaties
Infrarood camera	Monitoring en bewaking van de troebelheid	Beperkte meerwaarde: <ul style="list-style-type: none"> • Techniek is nog in ontwikkeling als goed alternatief van ultrasoon geluid • 'Bruinwater' signalering • Detectie/lokalisering calamiteit met verhoogde troebelheid tot gevolg
Glasfiber draden	Detectie van zettingen, lek en breuk	<ul style="list-style-type: none"> • Duidelijke meerwaarde m.b.t. bepaling mogelijke calamiteiten ten gevolge van zettingen • Geen meerwaarde m.b.t. conditiebepaling van de leiding zelf

Nadeel van deze methode is dat er geen uitspraak kan worden gedaan over de conditie van de leiding zelf, maar slechts van externe factoren (zettingen) en calamiteiten (daadwerkelijke breuken). Het is echter een financieel aantrekkelijke technologie om ingezet te worden voor snelle signalering van (naderende) calamiteiten.

Tabel 3.4 vat bovenstaande beschouwingen samen.

3.6 Elektromagnetische methodieken

Field Signature Method (zie ook Bijlage III)

De 'Field Signature Method' (FSM) is een gevoelige monitoring techniek voor inspectie en monitoring van metallische pijpleidingen op corrosie, erosie en scheurvorming [32], [33]. Deze techniek wordt sinds 1991 in de Offshore en On-Shore Olie en Gas Productie toegepast. De techniek is vergelijkbaar met de Eddy Current techniek, waarmee oneffenheden in de leidingwand kan worden gedetecteerd door het opvangen van verstoringen in een opgewekt elektrisch veld [31].

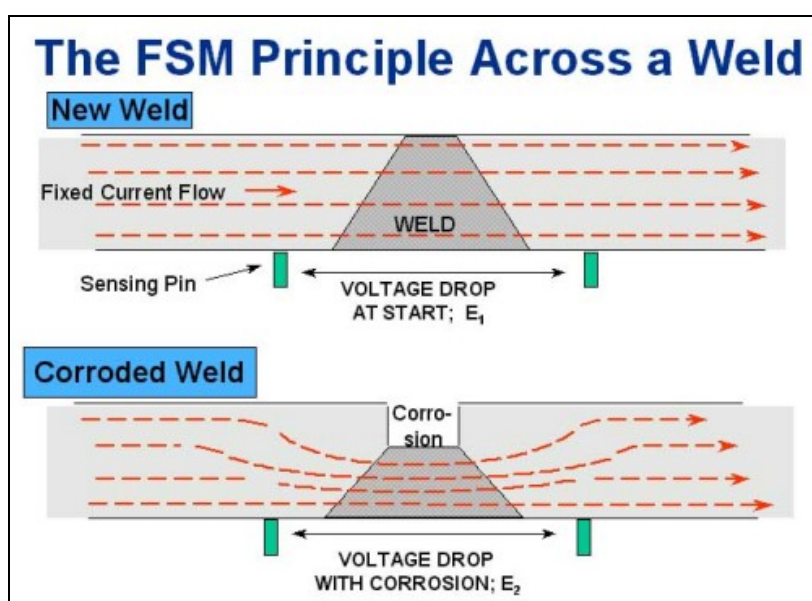


Fig. 3.4. Meetprincipe van FSM schematisch weergegeven met een voorbeeld van 'weld root corrosion'. Corrosie zal resulteren in een toename van de spanning tussen een pin-paar

De FSM-methode is gebaseerd op het sturen van een stroomstoot door een geselecteerd gedeelte van het te bewaken object, en is vergelijkbaar met een weerstandsmeting. Sensorpinnen op het object meten het elektrische veld (elektrische weerstand) tijdens het lopen van de stroom (Fig. 3.4). De eerste meting is voor het vastleggen van de 'handtekening' of 'vingerafdruk'. Bij iedere volgende meting wordt een verandering in de wanddikte gedetecteerd tengevolge van het veranderen van het elektrische veld tussen één of meerdere sensor-pin-paren (sensormatrix). De resoluties die worden gehaald zijn beter dan 1/1000 van de wanddikte (fabrieksopgave). Bij een wanddikte van 10 mm is de meetresolutie dus beter dan 0,01 mm. Omdat de sensormatrix ten minste 28 sensorpinnen, of een veelvoud hiervan bevat, kan een nauwkeurig drie - dimensionaal beeld van de toestand van de wand onder de matrix worden weergegeven (zie Fig. 3.5). De FSM-systemen zijn 'vaste' installaties waar de sensor-pinnen en instrumentatie permanent zijn aangebracht en op afstand worden uitgelezen. (Fig. 3.6).

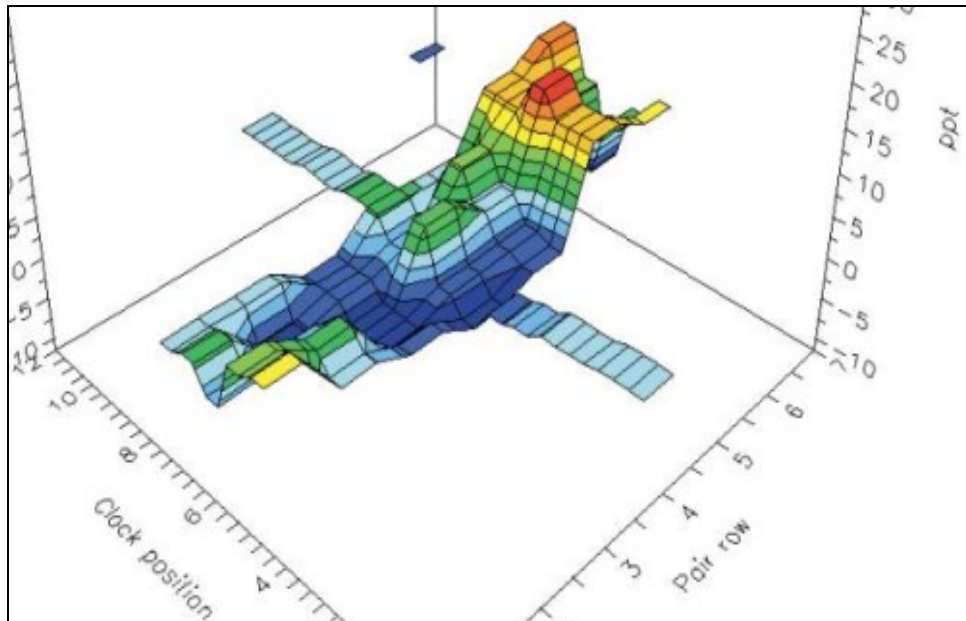


Fig. 3.5. Drie dimensionale voorstelling van corrosie onder een FSM IT matrix. (PPT staat voor 'parts per thousand', dit wil zeggen delen per duizend van de wanddikte. 1 ppt is 0,1% van de wanddikte).

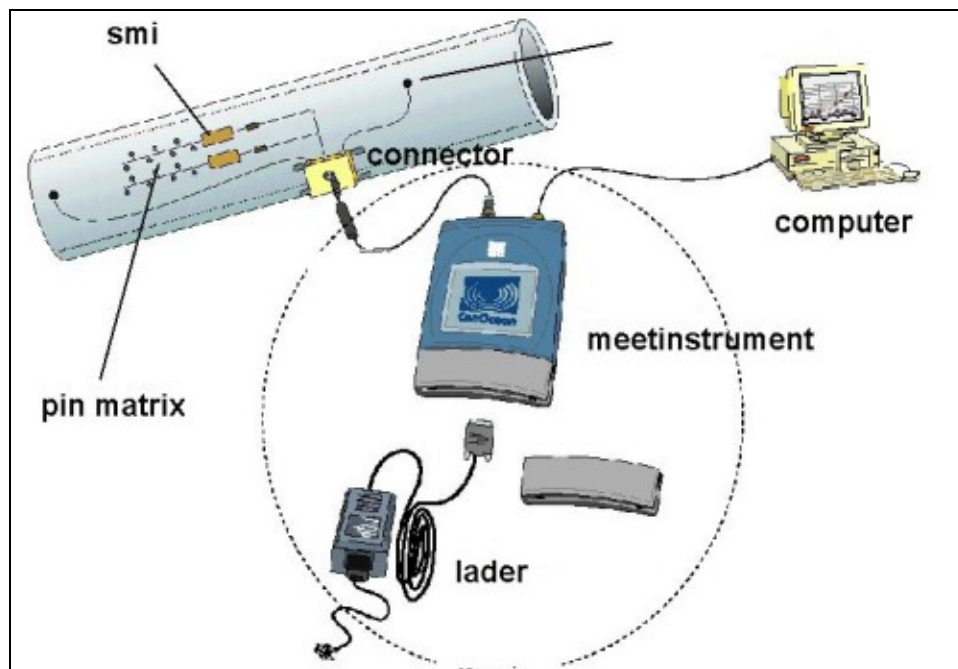


Fig. 3.6. Modulaire opbouw van het FSM IT meetsysteem. De pin matrix bevindt zich aan de buitenkant van de leiding. Per 28 pinnen één 'SMI', Sensing Matrix Interface.

Relatief nieuw is het 'FSM Inspection Tool' (FSM-IT) systeem, waarbij een draagbaar meetinstrument is ontwikkeld voor toepassing in de proces industrie en op raffinaderijen (Fig. 3.6). De FSM-IT techniek is direct afgeleid van de FSM techniek en is op de markt sinds 1998. De FSM-IT techniek is

aanzienlijk lager in prijs dan de FSM techniek omdat op een onbeperkte aantal locaties sensormatrices kunnen worden aangebracht, die met één instrument kan worden uitgelezen. Hoewel deze methodiek in potentie volledig voldoet aan het principe van de 'intelligente leiding', lijkt voor toepassing in de drinkwatersector nader onderzoek bijv. in een proefopstelling vooralsnog wenselijk.

Tabel 3.5. Elektromagnetische methodieken

<i>Voorziening</i>	<i>Toepassing</i>	<i>Meerwaarde</i>
Field Signature Method	Conditiebepaling: Wanddikte: Corrosie/erosie scheurvorming	Beperkte meerwaarde: <ul style="list-style-type: none"> • Alleen metalen

3.7 Trillingsmethodieken

Er komt slechts één trillingsmethodiek in aanmerking als intelligente voorziening: de *Guided Wave op medium*.

Hierbij wordt een golf op het medium water gezet [29], waarbij gebruik wordt gemaakt van het genereren van specifieke drukpulsen. Deze drukpulsen kunnen op bepaalde locaties verderop in het leidingsysteem worden opgevangen en geanalyseerd. Door met behulp van Kunstmatig Neurale Netwerken [14] [15] [17] de ingangsgolf (inputvariantie) met de opgevangen golf (outputvariantie) te vergelijken, kan de conditie van de leiding en eventuele onregelmatigheden (bijvoorbeeld lekkages) in beeld worden gebracht. Hoewel deze, voor de oliesector ontwikkelde technologie de potentie heeft om ook als intelligente voorziening in waterleidingnetten te kunnen worden toegepast, zal dit met name voor AC- en PVC-leidingen nader moeten worden onderzocht. In Tabel 3.6 wordt dit kort samengevat.

Tabel 3.6. Trillingsmethodieken

<i>Voorziening</i>	<i>Toepassing</i>	<i>Meerwaarde</i>
Guided Wave apparatuur	Op medium (water) geplaatst: <ul style="list-style-type: none"> • M.b.v. Kunstmatige Neurale Netwerk conditiebepaling + lek 	Meerwaarde onbekend: <ul style="list-style-type: none"> • Toepasbaarheid voor waterleidingen moet nog onderzocht worden, met name voor AC en PVC

4 Conclusies en aanbevelingen

De huidige methoden van conditiebepaling betreffen voornamelijk destructieve methoden. Er zijn echter ontwikkelingen gaande naar niet-destructieve technieken, vooral in de olie- en gassector. Uit de inventarisatie van deze ontwikkelingen blijkt duidelijk, dat lekdetectie het hoofddoel van veel onderzoeksrichtingen is. Om een calamiteit als gevolg van lek vóór te zijn, moet het onderzoek echter meer worden gericht op de bepaling van de conditie van de leiding in z'n totaliteit en niet alleen van het oppervlak van de binnenwand van de leiding. Met behulp van een nauwkeurige conditiebepaling kan namelijk de restlevensduur van een leiding worden geschat en daarmee het moment van lekkage worden voorspeld. Dit stelt het waterleidingbedrijf in staat om met gepland onderhoud calamiteiten voor te kunnen zijn.

Bij de inventarisatie van de voorzieningen voor *continue* monitoring van leidingen blijkt er slechts één methodiek te zijn, die in potentie in staat is de hele wanddoorsnede te analyseren en imperfecties te detecteren en daarmee een voorspelling van de restlevensduur te genereren: de '*Field Signature Method*' (FSM), een voor de olie- en gasindustrie ontwikkelde gevoelige monitoring techniek voor inspectie en monitoring van metallische pijpleidingen, tanks, reactoren e.d. op corrosie, erosie en scheurvorming. Voor toepassing in de drinkwatersector is vooralsnog nader onderzoek wenselijk.

Daarnaast wordt één methodiek gepresenteerd, waarmee indirect het conditieverloop van leidingen kan worden voorspeld: *Monitoring van omgevingsfactoren*, die bepalend zijn voor de conditie van de leiding, zoals de corrosiviteit van de bodem, waaraan het corrosiegedrag van metalen leidingen kan worden gerelateerd.

Voor een permanente inspectie van de conditie van het oppervlak van de binnenwand van de leiding op een aantal cruciale locaties in het waterleidingnet worden bestaan twee licht gerelateerde methodieken: *visuele inspectie met behulp van kunstlicht en laser*. Beide methodieken verkeren echter nog in een ontwikkelingsstadium. Bij de visuele inspectie met kunstlicht bevindt de digitale analyse en interpretatie van de beelden zich nog in ontwikkeling, terwijl bij de inspectie met laser de aanwezigheid van het water (gevulde buis) de beeldkwaliteit nog teveel in negatieve zin beïnvloedt.

Bij de in de oliesector ontwikkelde "*Guided Wave op medium*" - methodiek wordt middels het uitzenden en elders ontvangen van drukpulsen de conditie van de leiding geanalyseerd. De toepasbaarheid voor waterleidingnetten van deze methodiek, met name voor AC en PVC moet nog volledig onderzocht worden.

Voor de bewaking van de waterkwaliteit in termen van troebelheid op een bepaalde locatie worden twee methodieken vermeld:

- **Ultrasoon geluid:** De *Ultrasonic Particle Monitor* meet in een leiding zowel de deeltjes grootte en de concentratie, dat als maat voor de troebelheid kan gelden.
- **Infrarood licht:** Deze methodiek is gebaseerd op het feit dat verschillende objecten/stoffen (hier water en zwevende deeltjes) verschillende temperaturen hebben.

Toepassing van deze methodieken vraagt echter nog nader onderzoek. De Ultrasonic Particle Monitor is door TNO-TPD ontwikkeld voor industriële toepassingen. De tweede methodiek bevindt zich nog volledig in de ontwikkelingsfase.

Voor de detectie en lokalisering van lekken/breuken zijn *hydrofoons* en *glasfiberdraden* interessante opties. Hoewel met deze methoden geen uitspraak kan worden gedaan over de conditie van het leidingnet, zijn met name glasfiberdraden zeer interessant, omdat deze techniek kostenarm is en eenvoudig te implementeren in nieuw te leggen leidingen. Een toepassing in bestaande leidingsystemen is echter ook denkbaar. Daarnaast heeft de *Intelligente drukmonitoring* met behulp van neurale netwerken zich bewezen als een aantrekkelijke methodiek voor de voorspelling van leidingdrukken en het signaleren van lekken.

Tabel 4.1 Kosten en Efficiency per methodiek

Voorziening	Methodiek	Toepassing	Materiaal	Kosten	Efficiency
Zwakke schakel	Fysiek	Afsluitbare bypass als referentie	Alle	-	o
Pijp-in-pijp		Dubbele leiding met sensoren tussen de beide leidingen	Alle	---	+
Opofferende (kathodische) bescherming		Montage binnen of buiten op leiding	Metalen	+	+
Soft sensors en BOS systemen	-	Voorspelling en monitoring gedrag	Alle	o	o
'Hoorbaar' geluid, Hydrofoon	Akoestisch	Monitoring, bewaking leidingnetten, lekken	Metalen	-	-/o ¹
Ultrasoon geluid		Waterkwaliteit/troebelheid	Alle	-/o	o/+
Endoscoop, Closed Circuit TV	Optisch	Visuele inspectie buiswand	Alle	+	o
Laser		Visuele inspectie buiswand	Alle	o	-/o
Infrarood		Waterkwaliteit/troebelheid	Alle	o	o
Glasfiber draden		Detectie zettingen, lek en breuk	Alle	+	o/+
Field Signature method	Elektromagnetisch	Conditiebepaling: wanddikte	Metalen	o	o/+
Guided Wave	Trillingen	Conditiebepaling	Metalen	o	o/+

¹ In het project "Geluid in water" worden de toepassingsmogelijkheden van hydrofoons onderzocht.

Vanwege de eenvoud en wellicht geringe kosten wordt aanbevolen het *zwakke-schakel-principe* nader te onderzoeken.

Tot slot is in Tabel 4.1 op voorhand getracht per methodiek een inschatting te maken van de kosten en efficiency van de onderscheidenlijke methodieken.

In het kader van het AWWARF project 2612 "Monitoring Structural Behaviour of Piping Systems" is onder meer ook gekeken naar methodieken voor permanente conditiebepaling van leidingen, zoals de continue drukmeting, maar ook omgevingsparameters in relatie tot de leiding (Bijlage I, [22]). De algemene conclusie van dit onderzoek is dat er geen enkele techniek bestaat, die beantwoordt aan alle eisen, nodig voor een continue bewaking van de leidingconditie en de daarmee samenhangende voorspelling van de restlevensduur.

5 Referenties

- [1] D. Nicholas, M. Heathcote en G. Moor, Practical condition assessment options for critical trunk water mains, *Water Science and Technology: water supply*, Vol. 3(1-2), pp. 1-9, 2003
- [2] Th. J.J. van den Hoven en M.W.M. van Eekeren, *Optimale samenstelling van drinkwater*, Nieuwegein: Kiwa mededeling 100: onderzoeksrapport van de Commissie Conditionering, 1988.
- [3] C.A.C. van de Lisdonk, L.P.M. Rosenthal en P.G.G. Slaats, *Conditiebepaling van asbestcementleidingen – inventarisatie*, Nieuwegein: Kiwa SWI 98.140, 1998.
- [4] G.A.M. Mesman, *Validatie Georadar voor kleine diameters AC buizen*, Nieuwegein: Kiwa BTO 2001.150(c), 2001.
- [5] G.R. Sterk en C.A.C. van de Lisdonk, *Conditiebepalingsmethoden voor asbestcementleidingen – beoordeling met praktijkonderzoek*, Nieuwegein: Kiwa SWE 99.004, 1999.
- [6] M. de Koning, *Conditiebepaling voor grijs gietijzeren leidingen*, Nieuwegein: Kiwa BTO 2000.04, 2000.
- [7] G.A.M. Mesman, *Conditiebepaling Verbindingen*, Nieuwegein: Kiwa BTO 2001.205(c), 2001.
- [8] E.A. Trietsch en M. de Koning, *Operationeel leidingnetbeheer en conditie- en levensduurbepaling (Clusteronderzoek 2000)*, Nieuwegein: Kiwa BTO 2001.129(c), 2001.
- [9] L.P.M. Rosenthal, *Leidingnetbeheer*, Nieuwegein: Kiwa SWE 97.010, 1997.
- [10] P. Slaats, G. Mesman en L. Rosenthal, Schade in asbestcement leidingen: vervangen of repareren?, *H₂O*, Vol 16, pp. 27-30, 2003.
- [11] P. Slaats, J. Vreeburg, A. Boersma en J. Breen. PVC waterleidingen: hoe lang gaan ze mee?, *H₂O*, Vol 16, pp. 23-26, 2003.
- [12] J.W. Sandker, *Kathodische-bescherming*, [home.planet.nl/~sandk012/Encyclo.htm], 1996
- [13] A. Kordon, *Hybrid Intelligent Systems for Data-Driven Monitoring and Optimization*, IMA Workshop Data-driven Control and Optimization December 4, 2002.
- [14] M.T. Hagan, H.B. Demuth en M. Beale, *Neural Network Design*, Boston: PWS Publishing Company, 1996.
- [15] J.M.L. van der Wielen, *Gestructureerd modelontwerp met Kunstmatig Neurale Netwerken*, MSc. Thesis, Deventer: Witteveen+Bos en Wageningen Universiteit, 2001.
- [16] J.M.L. van der Wielen, F.H. Schulze en M. Bergman, Verbeterde Kunstmatig Neurale Netwerken voor brede toepasbaarheid in integraal waterbeheer, *H₂O*, vol. 23, pp. 17-20, 2001
- [17] D.T. Pham en D. Karaboga, *Intelligent Optimisation Techniques*, Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [18] M. Bergman, F.H. Schulze en J.M.L. van der Wielen, *Ontwikkeling Analyse Component*, onderzoeksrapport ASD487-1 Witteveen+Bos i.o.v. Gemeente Amsterdam Waterleidingbedrijf, 2001.

- [19] W.A. Shewart, *Statistical Method From the Viewpoint of Quality Control*, The Graduate School - The Department of Agriculture, Washington D.C., 1939.
- [20] J.H.G. Vreeburg, *Geluidsmetingen als monitoring en bewaking van drinkwater leidingnetten*, Kiwa Projectvoorstel BTO, 2003.
- [21] F.P.G. Driessen, *Leidingbeveiliging*, onderzoeksvoorstel cofinanciering TNO, TNO-FEL, 2003.
- [22] J. Zhang, *Monitoring structural behaviour of piping systems - executive summary*, AWWARF project 2612 in progress (zie Bijlage I).
- [23] E. Wilmlink en M. de Kroon, *Ultrasonic Particle Monitor*, datasheet, [http://www.tno.nl/industrie_en_techniek/productieoptimalisatie_in/stromingsdynamica/flow_centre/sensors_and_instrumentati]
- [24] H.D. Lee, P.J. Kwak, H.J. Shin en Y.H. Jang, *Development of digital ultrasonic image construction system for the deflection or cracks in water distribution pipes*.
- [25] L. Cheng, *High-speed Fiber Bragg Grating sensor system*, datasheet, [http://www.tno.nl/industrie_en_techniek/productieoptimalisatie_in/stromingsdynamica/flow_centre/sensors_and_instrumentati]
- [26] D.N. Chapman and C.D.F. Rogers, *Report On Asset Location And Condition Assessment*, Water Mains & Services & Leakage, Maintenance - WM/12, UKWIR report, 2002.
- [27] Van der Heide [<http://www.vanderheide.nl>], divisie Kathodische Bescherming & Corrosie Engineering
- [28] P. R. Roberge, *Handbook of Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, ISBN 007-076516-2, 1999. [<http://www.corrosion-doctors.org/Electrochem/LPR.htm>]
- [29] Mondelinge mededeling Shell Global Solutions
- [30] J.M.L. van der Wielen, J. van Doornik, C. Roubos, *Inventarisatie van methoden voor conditiebepaling en leidinginspectie*, Nieuwegein: Kiwa BTO 2004.056, 2004.
- [31] *Beschrijving Eddy Current techniek* [http://www.hocking.com/theory_intro.htm]
- [32] Corrodium BV [http://www.corrodium.nl/monitoring/monitoring_index.htm]
- [33] CorrOcean [<http://www.corrocean.com/fsinspect/>]
- [34] VEWIN Jaarstatistiek 2005

I AWWARF project 2612

Bron: J. Zhang, Awwa Research Foundation
6666 W. Quincy Ave. Denver, CO 80235-3098
tel. 303.347.6114, fax: 303.730.0851, jzhang@awwarf.org [22]

EXECUTIVE SUMMARY MONITORING STRUCTURAL BEHAVIOUR OF PIPING SYSTEMS PROJECT 2612

Introduction to project

The aim of the project was to investigate techniques that could be used to continuously monitor the structural performance of potable water distribution systems. The primary interest was in mains of 30-in. diameter and larger and those that are classed as operationally critical. Critical parameters for continuous monitoring were identified for the range of pipe materials used for water distribution activities. Potential technologies were then identified which could be used to monitor these parameters, and several of these technologies were investigated in the laboratory and in the field, to assess their suitability for pipeline structural monitoring. The ways in which the most suitable technologies could be selected and successfully integrated into operational systems were addressed, and a methodology showing how the information gathered can be used to assist in the effective management of pipeline assets has been developed.

Results

For the materials under consideration in this study, the task of selecting suitable monitoring parameters was approached by assessing the informational needs of the pipeline operator, in conjunction with the likely modes of pipe failure. This led to the classification of monitoring parameters into one of three groups:

- Global monitoring parameters (internal pressure, external pipe load, wall thickness)
- Local monitoring parameters (leakage rates, crack growth, joint integrity)
- Environmental monitoring parameters (soil resistivity and pH levels, water pH, temperature)

Tables have been generated considering the various parameters, why they should be monitored and suggesting a frequency of monitoring.

Each of the potential monitoring technologies was then assessed and its suitability to provide information pertinent to the desired monitoring parameters was considered. The most suitable technologies were then assessed using laboratory and field tests. These technologies are listed below:

- Assessment of on-pipe techniques - continuous sensing
 - o Strain gauges
 - o Ultrasonic corrosion monitoring
- Assessment of on-pipe techniques - periodic monitoring

- Global positioning system (GPS)
- Guided wave inspection
- Assessment of techniques - in pipe monitoring
 - Conventional direct (DIVER system)
 - Acoustic emission monitoring
- Remote sensing techniques
 - Satellite based high resolution systems
 - Synthetic aperture radar (SAR)
 - Laser altimetry (LIDAR)
 - Infrared - thermal IR systems

The evaluation of these and other similar technologies has been summarised in Chapter 9, which gives a brief description of the technology, its performance, its applicability to the monitoring parameters, operational considerations, and some information on costs. The systems discussed all offer potential for pipeline structural monitoring, but there are some limitations on pipe material type for some of the techniques.

Consideration has also been given as to how the data from monitoring systems can be integrated into a pipeline asset management system and strategy, and how monitoring techniques can be used to assist with asset management decisions. An overview of the data transfer and integration options is provided. Finally, a strategy has been developed, which outlines a logical approach to using structural monitoring information, and shows how this information can be used to assist with the effective management of pipeline assets. This approach can be summarised as follows:

- Select and prioritise pipelines
- Screening and monitoring
- Investigation and assessment
- Remedial actions
- Future monitoring plan

Conclusions

Pipeline monitoring parameters have been identified by considering the information needs of the pipeline operator, in conjunction with the likely modes of failure of water pipelines. These monitoring parameters were classified into three groups:

- Global monitoring parameters (e.g. internal water pressure, external pipe load, wall thickness measurement)
- Local monitoring parameters (e.g. leakage rate, pipe strain measurement, crack growth, joint integrity)
- Environmental monitoring parameters (soil resistivity and pH, water pH, temperature)

A number of potential technologies for pipeline structural monitoring have been investigated and categorised into three groups:

- Continuous sensing
- Remote sensing

- In-pipe sensing

Continuous Sensing Technologies

- Vibrating Wire strain gauges should be considered as simple, low cost but robust installations for the long-term measurement of changes in strain for all types of metallic pipes. Successful application to cast iron pipelines has been achieved.
- Guided Wave technology has been successfully demonstrated as a means of identifying features and areas of corrosion on both cast iron and steel pipes. It is currently limited to single pipe spools for mechanically jointed pipe.
- An ultrasonic-corrosion monitoring system, which was directly bonded to the pipe, was successfully installed on steel pipes, but failed to register satisfactory readings on cast iron pipe.
- Information from a differential global positioning system has been acquired from remote stations on a periodic basis and demonstrated that trends in pipe movement could be established.
- The residual stress measurement technique has been successfully applied to cast iron pipes to provide base residual and loaded stress readings.

Remote Sensing Technologies

- Optical satellite imagery has been shown to be suitable for screening or periodic monitoring of pipeline routes for encroachment and third party interference.
- Aircraft based thermal IR imagery can be used as an aid to leakage screening.
- The processing and analysis of thermal IR imagery acquired along a pipeline corridor has been shown to be highly suitable for both initial leakage screening and for periodic monitoring of leakage.
- Using a combination of visible and near IR imagery from satellites, initial leakage screening and periodic monitoring for leakage can be undertaken.
- Aircraft based photography has been shown to be suitable for periodic monitoring of pipeline routes for encroachment and third party interference.
- LIDAR data can be used to assess potential flood risk areas and parts of a pipeline route at risk from landslip.
- Satellite based SAR Interferometry data can be used to monitor ground movement.
- Aircraft based SAR Interferometry data is suitable for third party interference and encroachment assessments where cloud cover prevents the use of alternative techniques.

In-pipe Monitoring

- Direct monitoring instruments such as the Diver systems have been successfully installed to continuously monitor parameters such as pressure, temperature, conductivity and dissolved oxygen content within a potable water pipeline.
- Acoustic emission monitoring has been successfully applied to pre-

stressed concrete cylinder pipelines.

- The use of a prototype in-pipe tool for feature assessment, metal loss and pipeline route mapping, has shown that in-pipe techniques are operationally feasible, but further development of the sensors and stability of the Rede Pig tool is still required.

General

- No single technique can fulfill all of the requirements for pipeline structural monitoring and different combinations of techniques will be appropriate in different circumstances.
- A methodology has been produced to assist with the selection of the most appropriate techniques to meet the requirements of the pipeline operator for the particular circumstances.

II Datasheets *TNO-TPD*

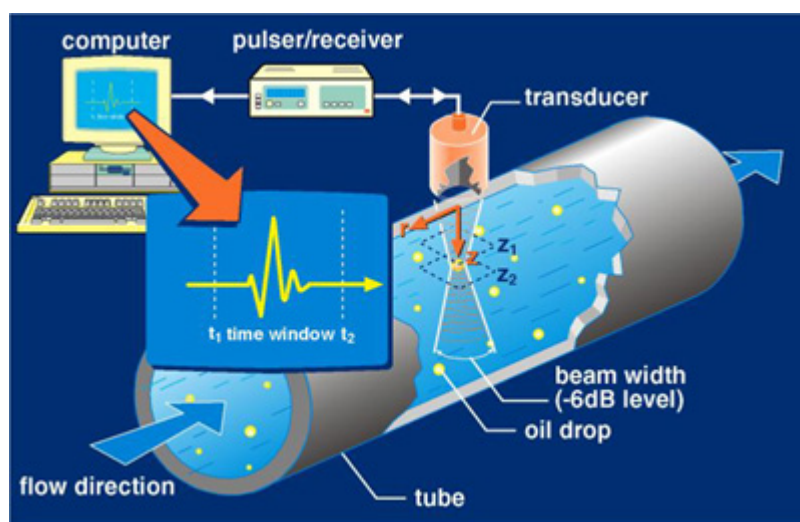
II.1 Ultrasonic Particle Monitor

Bron:

http://www.tno.nl/industrie_en_techiek/productieoptimalisatie_in/stromingsdynamica/flow_centre/sensors_and_instrumentati/ [23]

Ultrasonic Particle Monitor

TNO TPD has developed an ultrasonic diffraction technique (patented) to characterise suspensions, which is especially suitable for low to extremely low concentrations. It covers a range where conventional techniques (e.g. ultrasonic transmission techniques) fail. Based on this technique, TNO TPD has developed the Ultrasonic Particle Monitor (the UPM).



A schematic view of the set up

General characteristics

The Ultrasonic Particle Monitor derives both particle size distribution and concentration. It has the following features:

- Suited for low to extremely low concentration measurements.
- in-process, on-line measurements
- Simple hardware, small volume
- Robust, no moving parts
- Insensitive to fouling
- Insensitive to changes in temperature, flow or chemical composition
- Compatible with harsh environments (high temperature, high pressure)

Applications

Using a non-intrusive, rugged ultrasonic sensor, a wide range of suspensions may be characterised, even in highly demanding and harsh environments. Therefore, the UPM is applicable in the following branches of industry:

- Petrochemical industry
- (Bio)Chemical industry (e.g. polymerisation monitoring)
- Off-shore industry (e.g. oil-in-water monitoring)
- Food industry
- Process industry (e.g. discharge monitoring)
- Industrial cleaning

Measurement principle

A detailed description of the measurement technique can be found in patent EP 0 801 305 A1 (U.S. 08/834,049). A measurement sequence starts by generating an acoustic pulse by means of the ultrasonic transducer. The transducer is focused in the suspension, which flows perpendicular to the transducer beam. A particle in the suspension passing the target region generates an echo, which is detected by the transducer. An echo exceeding the detection level marks a particle in the measurement volume. Intelligent data processing, based on a physical model, produces particle size distribution and concentration.

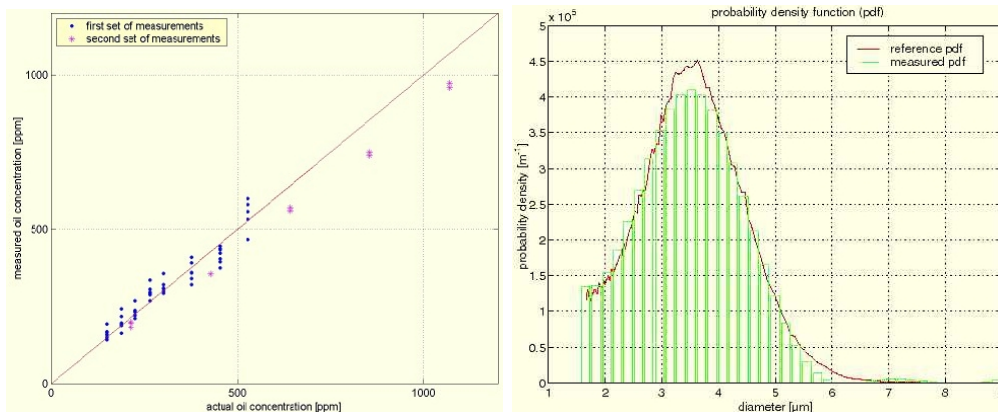
Specifications of the UPM

General

Depending on the acoustic properties, particle sizes may vary between 1 - 100 μm at concentrations from roughly 1 to 1000 ppm. Under certain conditions, the UPM may discriminate between different kinds of particles. A typical update rate is in the order of minutes. The accuracy depends on the specific conditions of the application.

Oil-in-water suspensions

Droplets may vary between 5 - 100 μm . Concentrations of oil droplets from roughly 1 to 1000 ppm can be determined. The UPM discriminates between gas bubbles, sand and oil droplets. The typical update rate is in the order of one minute. The first example gives an indication of the accuracy.



The figure above shows various concentration measurements of oil in water. The vertical axis gives the output of the UPM. The actual concentration of suspended oil in water is used as a reference and is given on the horizontal axis.

This figure gives the results of measurements of particle size distribution (probability density function) on a medical contrast agent. The red line gives the result of a calibrated reference measurement, the green bars are the UPM results.

Availability

TNO TPD plans to develop a commercially available, competitively priced version of the ultrasonic particle monitor. A prototype is available for demonstration and feasibility studies.



Picture of the ultrasonic sensor of the UPM

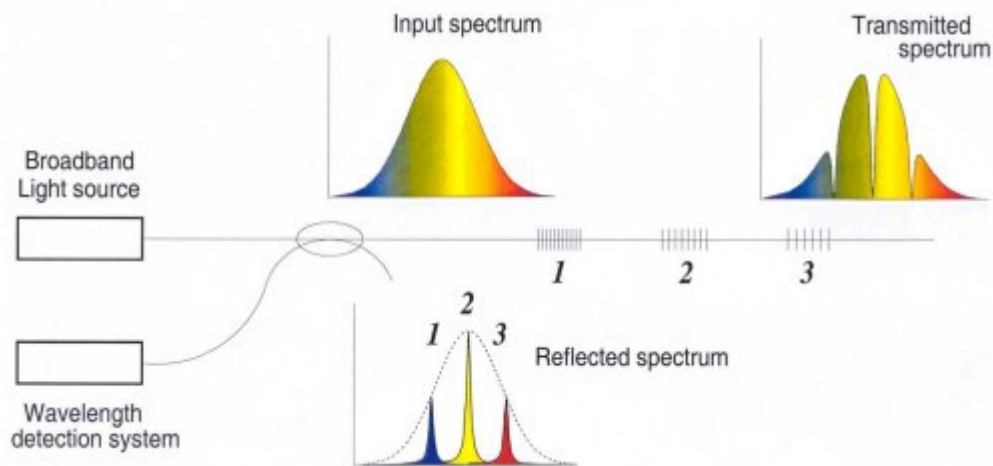
II.2 High-speed Fiber Bragg Grating sensor system

Bron:

http://www.tno.nl/industrie_en_techiek/productieoptimalisatie_in/stromingsdynamica/flow_centre/sensors_and_instrumentati/ [25]

High-speed Fiber Bragg Grating sensor system

Fiber optic sensors based on Fiber Bragg Grating (FBG) technology are found to be a promising technique for measuring parameters like strain, temperature, pressure, vibration, acceleration etc. The operation of a FBG is similar to a conventional grating: the reflection of the FBG depends on the wavelength. In a FBG sensor, the physical parameter to be measured will introduce a change in the reflection wavelength of the FBG.



In comparison with conventional electrical sensors, the FBG sensors are insusceptible to EMI and have no EM emission. They are intrinsically safe and have unique optical multiplexing potential. A large number of FBG sensors can be addressed and can be read out by a limited number of lead fibers. Furthermore, the FBG sensors are potentially lightweight, small and can be embedded and integrated in (composite) structures. Therefore, the FBG sensor is suitable in particular for Structural Health Monitoring. By recording and analyzing the output of the FBG sensors, the condition of the structure can be determined and the lifetime can be predicted.

TNO TPD has developed a high-speed interrogation/demultiplexing system for FBG sensor array with a maximum of 32 sensors. Our approach combines absolute measurement with a high readout frequency (about 20 kHz) for all the 32 FBG sensors simultaneously. This combination is unique and is of interest in particular for the detection of dynamic loading, acoustic emission and impact location. Several vibration and shock wave experiments were carried out and the results were presented at international conferences and exhibitions.



The TNO TPD system can also be optimised for a large measurement range which is required for depth sensing based on the measurement of hydrostatic pressure. The development of a system with a dynamic range of 1:20,000 is scheduled for the near future.

III Corrosion Monitoring : FIELD SIGNATURE METHOD

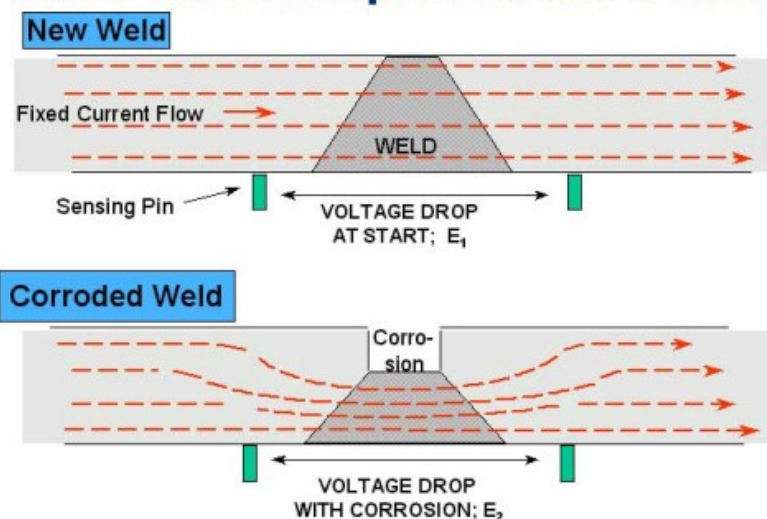
Bron: http://www.corrodium.nl/monitoring/monitoring_index.htm

1. Meetprincipe

Het meetprincipe van de 'Field Signature Method' is gelijk aan dat van de in de olie en gaswereld wijdverbreid ingezette ER-probes: Het meten van de elektrische weerstand van het metaal. Het verschil tussen de ER probe en een FSM opstelling is dat bij FSM direct aan het te meten object (buisleiding, reactor, et cetera) gemeten wordt. Het te meten bereik ligt in de orde van grootte van 0,2 tot 2 m² met in uitzonderlijke situaties uitschieters naar meer dan 5 m².

Het FSM principe is in de tachtiger jaren ontwikkeld in Noorwegen. De achtergrond was niet corrosie monitoring maar het monitoren van scheuren in lassen in een gasplatform. In het laboratorium is dit meetprincipe ook bekend onder de naam 'potential drop'. In de loop van de tijd heeft dit van oorsprong scheurmeetsysteem zich ontwikkeld tot een corrosiemeetsysteem, echter, de verwachting is dat het belang van scheurmonitoring in de toekomst sterk zal groeien.

The FSM Principle Across a Weld

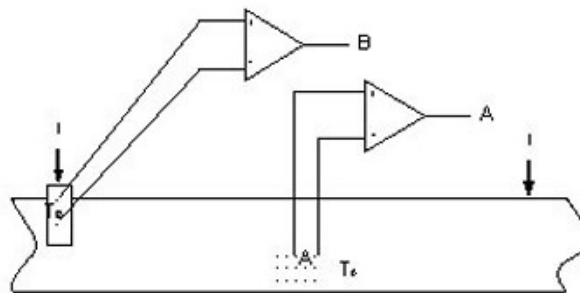


Afbeelding 1 : Meetprincipe van FSM schematisch weergeven met een voorbeeld van 'weld root corrosion'. Corrosie zal resulteren in een toename van de spanning tussen een pin-paar.

Afbeeldingen 1 en 2 tonen het meetprincipe van het FSM systeem. Over een matrix van sensoren (pinnen) wordt een stroom van ongeveer 100 A geleid. Tegelijkertijd wordt de elektrische potentiaal over een 'pin pair' gemeten, deze bedraagt ongeveer 150 μ V.

Veranderingen in de wanddikte tussen twee pinnen resulteren in een verhoging van de elektrische potentiaal, immers volgens $U=IR$ zal bij een verhoging van de weerstand de spanning toenemen. Met een referentie pin-paar worden eventuele temperatuurschommelingen gecompenseerd

Measurement Principle



- $FC_{ai} = (B_s/A_s \times A_i/B_i - 1)1000$

Afbeelding 2 : Meetprincipe van de FSM methode. Ieder pin-paar (A) wordt gemeten ten opzichte van een vast referentie pin-paar (B).

2. Online en Offline metingen

FSM kan zowel online, met loggers, als offline worden gemeten. Bij online kan worden gekozen tussen alle typen verbindingen, van fieldbus kabel (explosieveilig) tot GSM of echografisch (onder zeeniveau). Er is een draagbaar apparaat voor het uitvoeren van metingen aan verspreide meetmatrixen. De naam van dit systeem is FSM-IT (Field Signature Method Inspection Technology).

2.1. FSM metingen (online)

Sinds het begin van de negentiger jaren worden ongeveer 80 leidingen online gemeten. De locatie van deze leidingen is 'subsea' zoals in de Noordzee, de Golf van Mexico of aan land zoals in Libië en Colombia. Het voordeel van de online FSM methode is dat moeilijk bereikbare locaties automatisch worden gemeten en dat veel data ter beschikking komen wat resulteert in perfecte trendmetingen. Een nadeel is de relatief hoge prijs omdat voor iedere matrix een meetinstrument nodig is. Afbeelding 3 toont een toepassing voor online monitoring van FSM op een gasplatform op de Noordzee.



Afbeelding 3 : Online monitoring met FSM op een gasplatform in de Noordzee

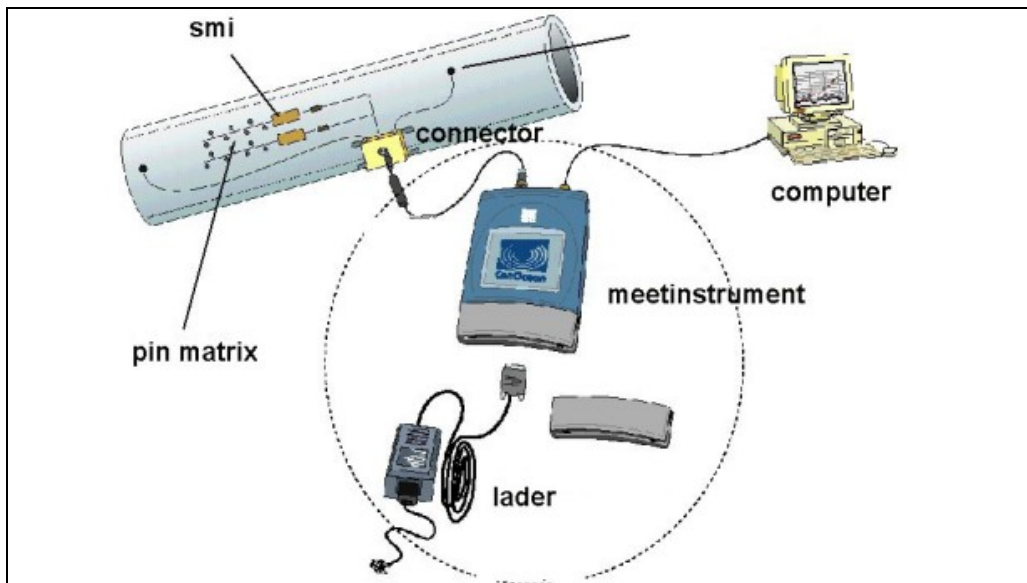
2.2. FSM IT metingen (Off-Line)

FSM IT is ontwikkeld voor Raffinaderijen en de procesindustrie. Met één meetinstrument is het mogelijk om vele matrixen te meten waardoor de prijs per meetlocatie laag blijft. De bedrijfstemperatuur van de te monitoren locatie mag maximaal 400 °C zijn. Een bekende toepassing is het monitoren van naftainezuurcorrosie in raffinaderijen of het monitoren 'weld root corrosion' in gasleidingen. Het monitoren van scheuren in bijvoorbeeld stoomleidingen of brugdelen is een relatief nieuwe toepassing, echter de verwachting is dat de markt hiervoor snel zal groeien.

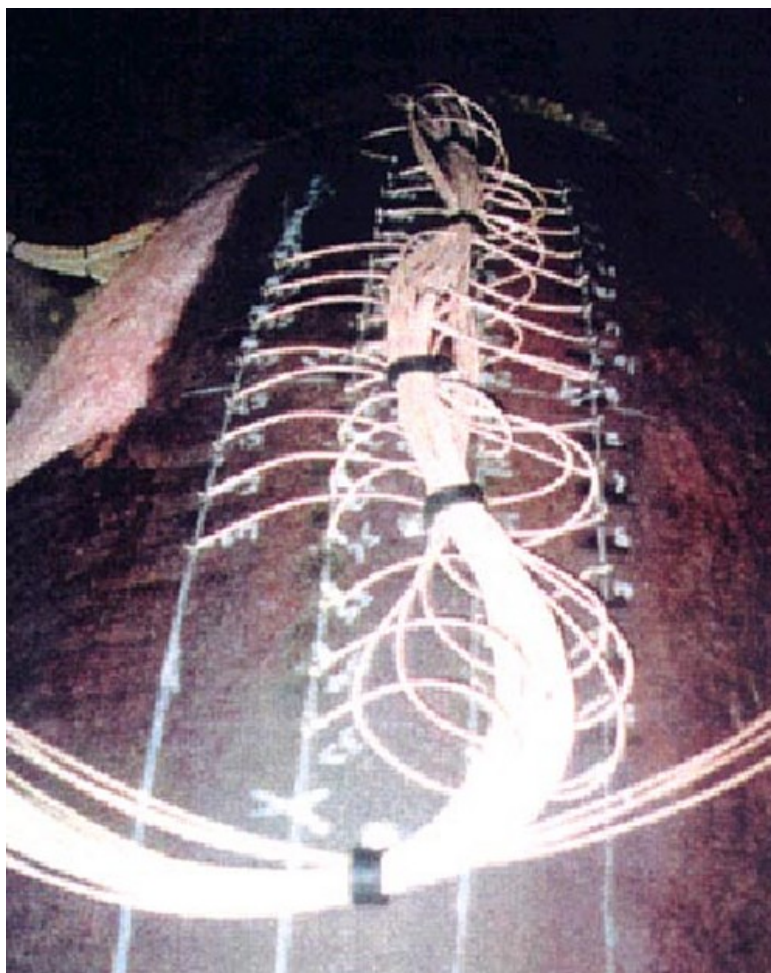
Het FSM IT meetsysteem is opgebouwd uit (zie afbeelding 4):

1. Een matrix bestaande uit 28, 56 of 84 gestiftlaste M3 boutjes en kabels.
2. Een referentieplaat met een referentie pin-paar evenals 'current feed' M6 bouten en kabels.
3. Voor iedere 28 pinnen één 'SMI', Sensing Matrix Interface.
4. Een Draagbaar meetapparaat.
5. Een PC met software.

Afbeelding 5 toont een FSM IT matrix op een 48" leiding in een raffinaderij (bedrijfstemperatuur 400 °C).



Afbeelding 4 : Modulaire opbouw van het FSM IT meetsysteem.



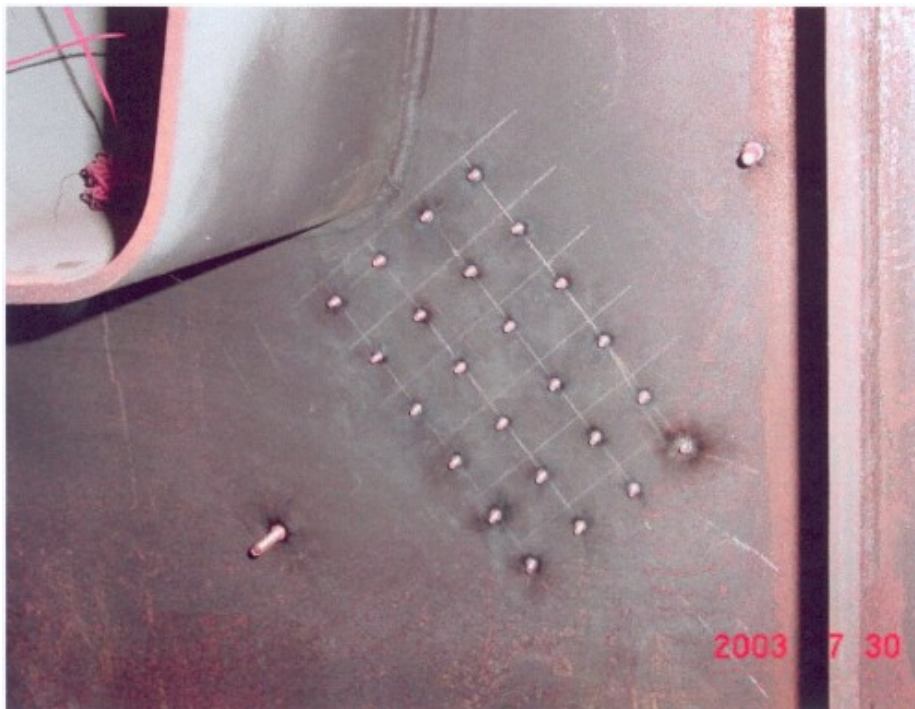
Afbeelding 5 : FSM IT matrix ter bewaking op naftinezuur corrosie in een raffinaderij. De matrix wordt goed ingepakt in isolatiemateriaal en een aluminium of stalen mantel.

Afbeelding 6 toont een typische toepassing van FSM IT voor ondergrondse pijpleidingen.



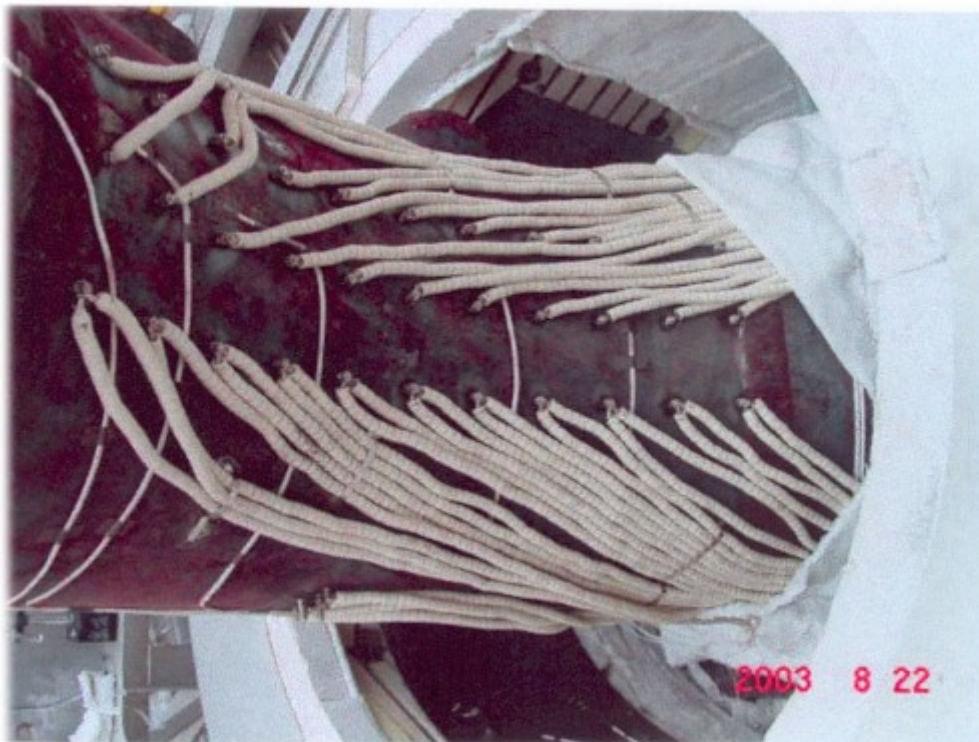
Afbeelding 6 : FSM IT voor ondergrondse pijpleidingen.

Afbeelding 7 toont een FSM IT matrix op een brugdeel in Japan. Op de locatie van de matrix worden scheuren verwacht.



Afbeelding 7 : Scheurmonitoring op een stalen brugdeel. Zichtbaar zijn de 6 mm gestiftlaste 'current feed pins' en 3 mm gestiftlaste 'sensor pinnen'. De kabels, SMI's, connector, het isolatiemateriaal en de mantel moeten nog worden aangebracht.

Afbeelding 8 toont een FSM IT matrix voor het monitoren van scheuren in stoomleidingen.



Afbeelding 8 : Het monitoren van scheuren in een stoomleiding.

3. Meetgevoeligheid

Voor uniforme corrosie bedraagt de meetgevoeligheid voor FSM beter dan 0,1% van de wanddikte en voor FSM IT beter dan 0,5% van de wanddikte. Voor lokale corrosie is de meetgevoeligheid minder, voor 'weld root corrosion' 1-3% van de wanddikte en voor putcorrosie 5-20% van de wanddikte. Zogenaamde 'pinholes', dit zijn naaldvormige putjes in roestvaststaal zijn niet of heel moeilijk te meten.

Met scheurmeting is nog relatief weinig ervaring. Verdere groei van bestaande grote scheuren is met FSM IT nauwkeurig te volgen. Nieuwe scheuren zijn ook goed op te pikken, echter alleen als de locatie en de richting van de scheurgroei redelijk goed kan worden voorspeld.

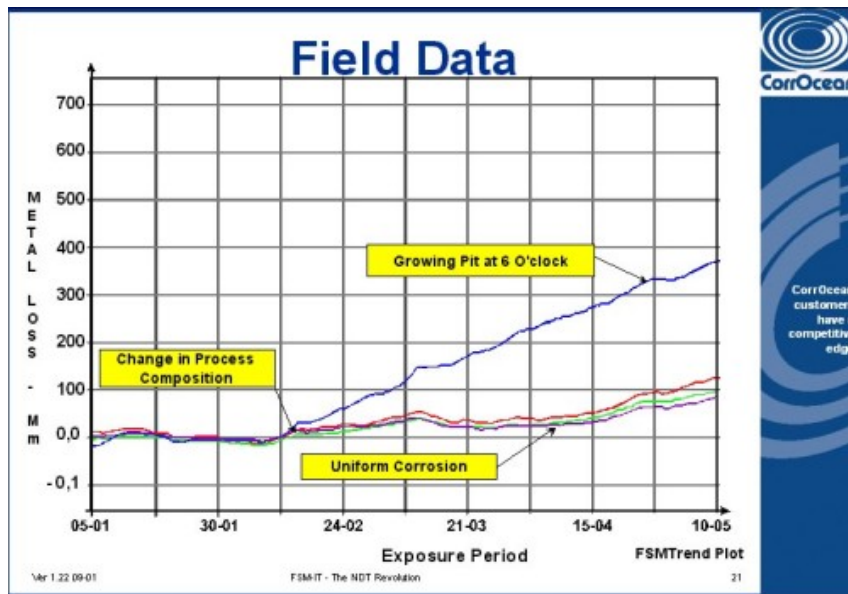
4. Temperatuur

FSM IT kan worden ingezet bij temperaturen van -40 tot 400 °C. FSM kan worden ingezet bij temperaturen van -40 tot +200 °C.

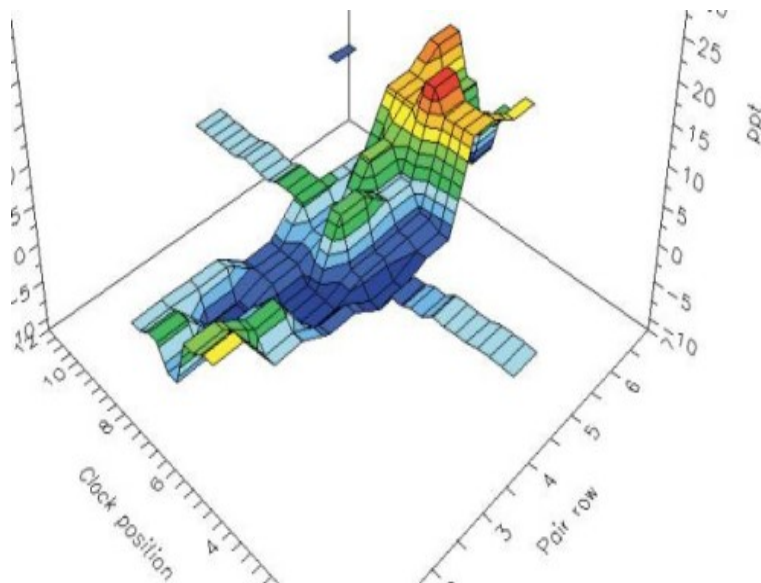
5. Data analyse

Met de software 'MultiTrend' kunnen de data op twee wijzen worden geanalyseerd:

1. Met lineaire grafieken waarbij iedere lijn een pin-paar voorstelt. De dikteafname onder het pin-paar wordt hierbij uitgezet tegen de tijd. Men zou zo dus de pin-paars aan een scheurtip zichtbaar kunnen maken en scheurgroei aldus kunnen monitoren (zie afbeelding 9).
2. Met een drie dimensionale voorstelling van de toestand van het materiaal onder de matrix. Op dit moment is dit alleen mogelijk bij corrosie, voor scheurgroei zijn algoritmen in ontwikkeling (afbeelding 10).



Afbeelding 9 : Presentatie van FSM IT data middels lineaire grafieken waarbij de dikteafname (μm) wordt uitgezet over de tijd.



Afbeelding 10 : Drie dimensionale voorstelling van corrosie onder een FSM IT matrix. PPT staat voor 'parts per thousand', dit wil zeggen delen per duizend van de wanddikte. 1 ppt is 0,1% van de wanddikte.

