

Statusbedömning av ledningsnät

Kenneth M Persson

Maria Rindelöv

Roberto Grassi



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Röret & Klimat
Avlopp & Miljö
Management

SVU styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Anna Linusson, Ordförande
Daniel Hellström, Utvecklingsledare
Per Ericsson
Tove Göthner
Tage Hägerman
Stefan Johansson
Kristina Laurell
Annika Malm
Lisa Osterman
Kenneth M. Persson
Carl-Olof Zetterman

Svenskt Vatten
Svenskt Vatten
Norrsvatten
Sveriges Kommuner och Landsting
Smedjebacken
Skellefteå kommun
Formas
Kretslopp och vatten, Göteborgs Stad
Örebro kommun
Sydsvatten AB
SYVAB

Författaren är ensam ansvarig för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 14057
167 14 Bromma
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se
Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Statusbedömning av ledningsnät
Title of the report:	Evaluation of status of pipes
Författare:	Kenneth M Persson, Sydvatten och Sweden Water Research; Maria Rindelöv, Sydvatten; Roberto Grassi, Gradar
Rapportnummer:	2016-07
Antal sidor:	60
Sammandrag:	Rapporten redovisar åtta metoder som kan användas för att bedöma statusen av ledningsnät utan att behöva gräva fram dem eller orsaka avbrott i vattenleveransen. Den viktigaste parametern för ett ledningsnät är statusen för själva ledningsmaterialet. Den näst viktigaste parametern är antalet läckor. Olika metoder ger olika information om nätet men ingen metod än så länge klarar av att ge en heltäckande bild av hur statusen är. En kombination av metoder ger en fullständigare bild av näten.
Abstract:	The report presents eight methods which can be used for condition assessment on water pipes, without digging or causing interruption in the water supply. The most important parameter for water nets is the status of the pipe material. The second most important parameter is the number of leakages. Different condition evaluation methods present different kinds of information of the net, but no single method is at present able to give the full picture. A combination of different assessment methods is recommended to be used.
Sökord:	Statusbedömning, vattenledningar, korrosion, ledningshaveri, ledningsförnyelse
Keywords:	Condition assessment, water pipes, corrosion, pipe failure, pipe renewal
Målgrupper:	Ledningsnätsägare, kommuner
Omslagsbild:	Förnyelse av vattenledningar i Malmö. Maria Rindelöv, Sydvatten
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2016
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB
Om projektet	
Projektnummer:	15-102
Projektets namn:	Litteraturstudie om icke invasiva metoder för statusbedömning
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling

Förord

Att statusbedömma ledningar är inte så lätt som man kanske kan tro eller önska. Men det som är svårt kan å andra sidan vara mycket spännande att genomföra och få nya erfarenheter. Detta projekt var från början enbart inriktat på att beskriva några möjliga icke-invasiva metoder för att bedöma status av ledningsnät. Under projektets gång blev det allt tydligare att även några invasiva metoder kunde behövs för att ge en bättre uppfattning om en lednings status. Därför inkluderades fler metoder i rapporten.

Ett stort tack till alla involverade som har bistått med information. Ett speciellt tack riktas till Sydvatten, VA SYD, NSVA, Ängelholms kommun, Göteborg Kretslopp och vatten, Stockholm vatten, E.ON, Krafringen och Öresundskraft för deras engagemang och intresse.

Stort tack till Roberto Grassi på Gradar; Jan Eriksson på Wideco; Stefan Sjökvist på Termisk Systemteknik; Paavo Persaud på Jensen AB, Torleif Dahlin på Lunds universitet; Manuel Gabler på Guideline Geo, Marco Taferner och Sylvia Petschnig på MTA Messtechnik och Pedro Pinas på Pure Technologies för er hjälp och för att ha bistått med svar på alla frågor.

Vi hoppas att rapporten kommer att inspirera till nytänkande och nyfikenhet att testa olika tillvägagångssätt för att kunna statusbedöma nergrävda ledningar i en icke-invasiv omfattning som möjligt.

Projektledningen

Lund den 5 februari, 2016

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning	6
Summary.....	7
1 Inledning.....	8
2 Ljudvågor.....	10
2.1 Studier för verifiera metoden.....	12
2.2 Sammanfattning Ljudvågor.....	14
3 Trycktransienter.....	15
3.1 Studier om läcksökning	15
3.2 Studier om statusbedömning	18
3.3 Användning av trycktransienter i verkligt ledningsnät	21
3.4 Sammanfattning Trycktransienter	23
4 Ground Penetrating Radar	24
4.1 Studier om läcksökning	24
4.2 Studier om statusbedömning	25
4.4 Sammanfattning GPR	30
4.5 Piperadar	30
5 Resistivitet.....	33
5.1 Studier om statusbedömning	34
5.2 Sammanfattning Resistivitet	36
6 IR-teknik	37
6.1 Flygburna mätningar på fjärrvärmenät.....	37
6.2 Utvecklingspotential	38
6.3 Möjligheter för vattenledningar.....	39
6.4 Sammanfattning IR-teknik.....	39
7 Visuell metod	40
7.1 Sammanfattning Pipe Inspector.....	41
8 Indikationstrådar.....	42
8.1 Pulsekometermetoden	42
8.2 Widetect Water	43
8.3 Sammanfattning Widetect Water	45

9	Läckljudsupptagning och magnetometer	46
9.1	Sammanfattning Smartball PWA.....	47
10	Snakebots - framtidens inspektionsinstrument?	48
11	Sammanfattning.....	50
12	Referenser.....	52

Sammanfattning

Att bedöma statusen hos VA-ledningar i marken är inte så lätt som man kanske kan tro eller önska. Ofta är dagens metoder invasiva, det vill säga man måste gräva, ledningar måste plockas i sär och vattenleveransen avbrytas. Det innebär extraarbete och kostnader för VA-bolagen. Projektet var från början inriktat på att beskriva några möjliga icke-invasiva metoder för statusbedömning. Under projektets gång blev det allt tydligare att även några invasiva metoder kunde behövas för att ge bättre uppfattning om en lednings status.

Målet var att samla ihop kunskap om smidigare metoder för statusbedömning och även läcksökning. FoU-bolaget Sweden Water Research AB har tillsammans med representanter från teknikleverantörer och ledningsnätägare sammanställt uppgifter om åtta utvalda metoder som utnyttjar ljud, tryckvågor, elektromagnetiska vågor, resistivitet, värmestrålning, okulär besiktning med kamera och läckljudsupptagning för att beskriva egenskaper hos ledningarna. Metoderna klarar av att i viss mån begränsa dyra grävningsarbeten och avstängning av vattenförsörjningen, men befinner sig på olika nivåer när det gäller användbarheten. Vissa är färdiga, kommersiella metoder, medan andra inte är färdigutvecklade och behöver mer forskning. Materialet har samlats in genom sökning i artiklar, på webbsidor, genom intervjuer och diskussioner med teknikleverantörer och forskare.

Det första intressanta att titta på är själva ledningsmaterialet och vad metoderna kan ge för information om materialets status. Möjligheten att detektera svaga ledningsmaterial är värdefull eftersom man då kan ta ut ledningar innan de havererar. Läckor är också en viktig indikator, och i rapporten redovisas lämpliga metoder som kan detektera och exakt lokalisera läckor på både plast- och metalledningar.

Den slutsats man kan dra efter kunskapsinventeringen är att metoderna i olika omfattning kan lämna uppgifter om godstjocklek, yttre och inre korrosion samt försvagningar i materialet. Men ingen metod klarar ensam att ge en fullständig bild av statusen för en ledning. För att få ett så bra underlag som möjligt kan därför rätt metoder kombineras så att de tillsammans kompletterar varandra och ger en tydligare bild. Det är viktigt att man får bättre kännedom om ledningars kondition för att kunna lägga de begränsade resurserna på att ta ut de ledningar som verkligen är i behov av förnyelse.

VA-organisationerna bör kunna dra stor nytta av att ta fram och testa olika kombinationer av metoder för att systematiskt undersöka viktiga ledningar. Nyttan av att kunna detektera dåliga delar på ledningsnätet blir att man förhoppningsvis kan ta ut dem innan de brister i driftfasen. På så sätt görs stora besparingar för samhället, färre vattenleveranser behöver avbrytas, och allmänheten kan skonas från faror som stora haverier kan leda till.

Summary

During 2015, Sweden Water Research AB, together with representatives from technology suppliers and utilities worked together to compile information on methods for condition assessment on piping systems. Existing methods often require digging, disassembling of the pipes and interruption in water supply. This cause an extra working load and high expenses for the utilities.

The aim of this report is to present information that has been gathered about methods that are easier to work with when it comes to condition assessment and also leakage detection. Eight methods were selected and they are based on soundwaves, electromagnetic waves, resistivity, heat radiation, visual inspection with camera, leakage sound recording and the Villary Effect.

The methods are to certain extents able to reduce the necessity of digging and shutting down the water supply. Some methods are already fully developed and commercially available while others are still in need of more research and development. The most important parameter to investigate is the piping material because it is important to be able to detect poor pipes before they break. Some of the methods in this report have potential to give information about the pipe material. Leakages are the secondary most important indicator and in this report there are interesting methods to detect and localize leakage on both plastic and metallic pipes. The information to this report has been collected using article search, websites, interviews and discussion with technology suppliers and utility owners.

The conclusion of the report is that the different methods are able to say something about the wall thickness, outward and inward corrosion and weakness in the pipe material. But no method is able to alone give a satisfactory picture of the condition. To be able to get as clear picture as possible, right methods need to be combined, to be able to complement each other to give the full view of the status. It is very important to know the condition to be able to invest and focus resources to pick up the most critical pipes for renewal.

The water utilities as well as the district heating utilities can greatly benefit in the work to develop and test combinations to systematically investigate pipes for prioritization.

The benefit of being able to detect poor sections of the piping system is that you can remove them before any breakdown occur. Thus great savings can be made for society, interruption in the water supply and district heating service can be avoided and hazards for the public can be averted.

1 Inledning

Att gå från ett reaktivt förhållningssätt till en proaktivt när det gäller förvaltningen av ledningsnät är idag något som borde beaktas. Stora delar av ledningsnätet börjar komma upp till eller åtminstone närma sig slutet av den beräknade livslängden och detta ökar intresset för att systematiskt kunna undersöka ledningarna på regelbunden basis. Fördelen med att veta hur statusen för ledningsnätet ser ut ligger i att kunna förnya det innan haverier sker och på så sätt undvika de kostnader och risker ledningshaverier orsakar.

Åldern är en uppenbar faktor att ta in vid bedömning av ledningsnät. Men det är också välkänt att många äldre ledningar fortfarande generellt sett är i bra skick, medan enskilda sträckor kan vara i dåligt skick och nära att haverera. Det är värdefullt att kunna detektera de partier i ledningsnätet som är i behov av förnyelse så att pengarna läggs där de behövs men bara där. På så sätt kan stora summor sparas in när det kostsamma grävningsarbetet koncentreras på bara de platser där de sämre ledningarna finns.

Även nyare ledningar kan haverera som en del ledningsnätsägare har fått erfara. Därför är statusbedömning av hela ledningsnätet såväl aktuellt som relevant. När haverier sker, kan återställningskostnader stiga snabbt och hela samhällen berörs vid leveransavbrott. Idag är det viktigt att vi skapar samhällen med säkra vattenförsörjningssystem där riskerna för haverier minimeras trots att stora delar av ledningsnätet är i hög ålder. Haverier kan ge upphov till jordskred och att annan infrastruktur kan kollapsa, som vägar eller broar. Scenarier där ledningar simultant havererar är något vi vill undvika helt.

En annan viktig faktor som kan påverka och påskynda ledningshaverier är klimatförändringar. Extrem nederbörd kan orsaka att fyllnadsmaterial på undersidan av ledningar sköljs bort och då öka risken för ledningsbrott. Vid långvarig torka kan den torra jorden röra på sig och likaså orsaka att ledningen knäcks. Genom regelbundna statusbedömningar kan man få en bra koll på vilka ledningar som kan tänkas vara känsliga och man kan då vara bättre förberedd. Det behövs helt enkelt smidiga metoder som underlättar för VA-bolagen att kunna utföra regelbundna statusbedömningar på ledningsnätet.

I en avhandling från Lunds universitet redovisas antal läckor på olika ledningsmaterial över olika tidsperioder. Datan hämtades ut från fem olika VA-bolag runt om i Sverige där man samlade uppgifter om antalet läckor på gråjärn, segjärn, PVC, PE, stål och övriga ledningsmaterial mellan olika tidsperioder. Av sammanställningen kan man se att de flesta läckorna uppstår på gjutjärnsledningar.

I Malmö mellan perioden 1974-1993 utgjorde läckage från gråjärnsledningar 94 % av totala antalet läckor, i Örebro mellan tidsperioden 1987 till 1992 var andelen 87 %, i Eskilstuna mellan perioden 1980 till 1991 utgjordes andelen av 55 %, i Västerås var andelen 48 % och i Luleå mellan perioden 1965 till 1990 uppstod 84 % av alla läckor på gråjärnsledningar [2]. Gråjärnsledningar som är lagda under 50- och 60-talet uppvisar högre läckfrekvens, vilket förmodligen beror på en sämre anläggning med

maskiner tillskillnad från tiden innan då man grävde ner ledningar för hand och kunde bättre mekaniskt packa fyllandsmaterialet runt ledningen som utgjorde ett bättre stöd [1].

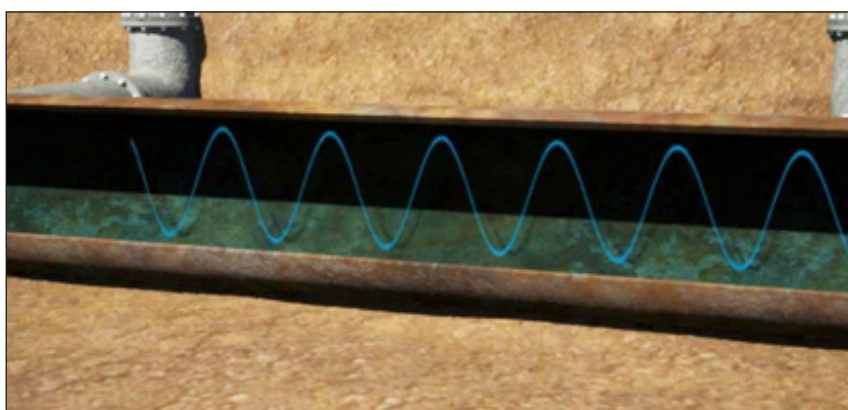
Korrosion är ofta den bakomliggande orsaken till att metalliska ledningar havererar och markens resistivitet påverkar direkt korrosionshastigheten för yttre korrosion [1]. Enligt rapporten "Rörmaterial i Svenska VA-ledningar – egenskaper och livslängd" från Svenskt Vatten har det gjorts väldigt lite undersökningar för att uppskatta korrosionshastigheten för gråjärnledningar i olika jordtyper och fyllnadsmaterial. Genom att kunna kartlägga korrosionshastighet i olika jordarter blir det lättare att avgöra kvarvarande livslängd på ledningarna. Detta är möjligt genom resistivitetsmätningar. I rapporten nämns det också att en gråjärnsledning behöver ha kvar 60 % av sin godstjocklek för att kunna stå emot tryck och inte spricka. Därför är det viktigt att implementera och utveckla metoder som bl.a. kan mäta upp kvarvarande godstjocklek och riskområden för korrosion/ pågående korrosion.

Denna rapport behandlar åtta olika metoder för statusbedömning. Vissa metoder är färdigutvecklade medan andra befinner sig i utvecklingsstadiet. Metoderna är baserade på ljudvågor, trycktransienter, elektromagnetiska vågor, strömledning, värmestrålning, optisk inspektion med filmning, indikationstrådar, läckljudinspelning och magnetometer. Metoderna begränsar behovet av uppgrävning och avstängning av vattenleverans. De är användbara för statusbedömning men även för läcksökning.

2 Ljudvågor

Genom att inducera ljudvågor i en vattenfylld ledning finns det möjlighet att få information om en lednings kvarvarande godstjocklek eller draghållfasthet. Ljudvågornas hastighet genom vattnet beror nämligen på godstjockleken [3]. Statusbedömning med hjälp av ljudvågor sker genom att man skickar ut lågfrekventa ljud genom vattnet i en ledning där ljudets utbredningshastighet uppmätts mellan två punkter [3,4]. Punkterna kan exempelvis bestå av två ventiler längs en ledning och det är själva hastigheten som ger indikationen på rörväggens kvarvarande tjocklek. En ledning med tjockare godstjocklek kommer få ljudet att ta sig fram snabbare medan en ledning med en tunnare godstjocklek där väggen är korroderad och mjukare, kommer få ljudet att sprida sig med sänkt hastighet. Man kan likna fenomenet vid att springa på ett hårt underlag, det går lättare att studsa emot underlaget och man springer med lätthet. Ljudvågor som tar sig fram där materialet är korroderat och mjukare i sin karaktär kan liknas vid att springa på sand där det är mycket svårare att få samma studs från sanden och man springer långsammare [3].

När ljudvågorna sprider sig genom vattnet orsakar trycket från ljudvågorna att rörmaterialet på molekyl- och atomnivå börjar böja sig upp och ner. Böjningarna på ledningen uppstår när ljudet pressar vattenmolekylerna utåt mot väggarna. Ju större böjningarna det blir på rörväggen, desto tunnare är godstjockleken och desto långsammare färdas ljudet [3]. Korrelationsmetoden mäter vibrationerna från läckljud via ledningens vägg och dessa vibrationer kommer från vibrationerna i vattnet. Vid läckor sprider sig ljudet från vattnet till ledningsväggen och vibrationerna får rörväggen att vibrera längs hela dess längd tills vibrationerna i vattnet dör ut. Vibrationer från ljudkällan sprider sig alltså först från vattnet till rörvägg och största delen av vibrationerna finns i vattnet [5].



Figur 2.1 Ljudvågors hastighet genom vattenfyllda ledningar beror på gods tjockleken på ledningens vägg. På så sätt går det att få indikationer på kvarvarande godstjocklek i trycksatta ledningar [3].

Det går att teckna sambandet som påverkar ljudets hastighet i en vattenfylld ledning, vilket redovisas i ekvation 1 nedan. Där är V ljudets hastighet i en vattenfylld ledning, V_0 är ljudets hastighet i vatten, D är den inre rördiametern, e är godstjockleken, K_{water} är bulkmodulen på vattnets elasticitet och E_{pipe} är Youngs modul för rörmaterialets elasticitet. Youngs modul förändras om rörmaterialet blir mjukare och påverkar ljudhastigheten i rörväggen [6].

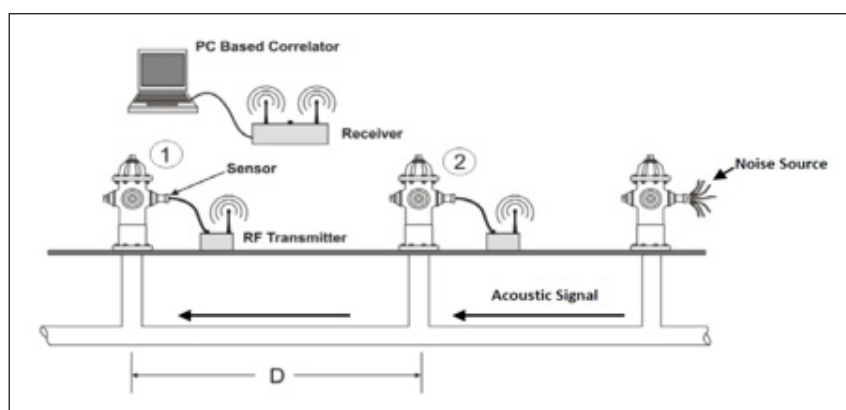
$$V = V_0 \sqrt{\frac{1}{1 + (D/e) (K_{\text{water}}/E_{\text{pipe}})}}$$

Ekvation 1

För att kunna göra beräkningar på uppmätt resultat, måste man känna till ledningens ursprungliga godstjocklek som kommer att ingå i beräkningen för referensvärdet. Resultatet från mätningen kommer att jämföras med referensvärdet och skillnaden mellan värdena visar hur mycket som har blivit nerslitet [4]. Det är även viktigt att man vet vilket material som ledningen är tillverkad av eftersom t.ex. gråjärn och segjärn har olika elasticitetsmoduler [7]. Olika moment som svetsar, flänsar, kompensatorer, lyror, förgreningar och stora avstånd mellan mätpunkterna orsakar däremot en sådan liten påverkan på resultatet, att det räknas som osignifikant [4].

Av mätningen får man fram ett medelvärde på den kvarvarande godstjockleken på hela den uppmätta ledningssträckan [3]. Metoden kan detektera korrosion som har skett över en hel yta men däremot inte lokal korrosion. Detektion kan ske för ledningar som har förlorat 10 % av ursprungligt godstjocklek via allmän korrosion runt hela ledningen på en hel längd. Metoden kan även detektera om det kan skett en 20 procentig förminskning av godstjockleken runt halva längden av en ledning eller om det har skett en 10 procentig förminskning på den övre halvan av ledningen på en hel längd [7].

Ledningar med korrosionsskydd av betong går även bra att testa. När det gäller kompositledningar kan metoden inte detektera var förminskningen har skett, om det har skett i själva rörmaterialet eller i korrosionsskyddet. Leverantörerna anger att de kan mäta 800 upp till 1 600 m per dag.



Figur 2.2 Principen för hur utrustningen appliceras på ledningar. I svenska nät kan man använda ventiler till att placera vibrationsgenerator och detektor. För att räkna ut vibrationernas utspridningshastighet, använder man sig av formeln $V = D/\Delta t$ där V är utspridningshastigheten, D är sträckan och Δt är tiden mellan detektion av signalen vid plats 1 och plats 2 [7].

2.1 Studier för verifiera metoden

Företaget Echologics i USA arbetar med den här akustiska metoden och har bland annat gjort tester med verifiering av mätresultaten i staden Columbus i Ohio, USA. Under tre dagar undersöktes 5,3 km ledningar vilka delades in i 150 meters sektioner. Staden Columbus anlätade Corrosion Probe Institute (CPI) för att verifiera resultaten. En del från varje sektion ("coupon" i Diagram 1) skickades till CPI för analys där de tittade på godstjockleken och punktkorrosion och jämförde med resultaten från Echologics (Diagram 2.1 och Tabell 2.1) [6].

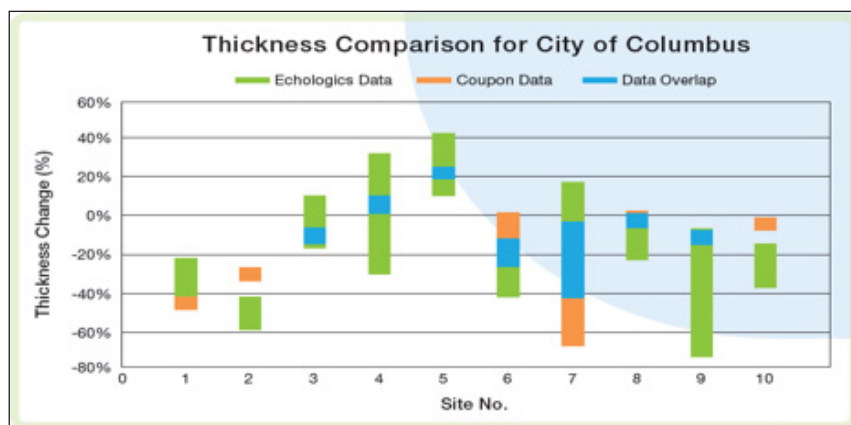


Diagram 2.1 Resultaten från testerna med Echologics akustiska metod i Ohio, USA. De gröna områdena är de uppmätta förändringarna i godstjocklekarna med den akustiska metoden från Echologics och de orange områden är de uppmätta förändringarna i godstjockleken av CPI. De blå områden är områden där data från båda mätningarna överlappar varandra. Data överlappades i sju fall av tio [6].

Tabell 2.1 Skillnader mellan de olika metoderna i procent för varje mättillfälle.

Site Number	Section Length (meters/feet)	Pipe wall thickness loss measured by Echologics	Pipe wall thickness loss measured from samples	Coupons Measured	Difference
1	442m/1451ft	-32.78%	-44.41%	3	11.63%
2	505m/1656ft	-50.67%	-30.37%	1	20.30%
3	413m/1354ft	-4.17%	-11.25%	1	7.08%
4	495m/1624ft	2.44%	5.37%	1	2.93%
5	373m/1223ft	-25.85%	-21.38%	1	4.47%
6	708m/2321ft	-24.84%	-13.95%	1	10.88%
7	693m/2274ft	-9.41%	-28.63%	2	19.22%
8	446m/1464ft	-11.27%	-2.37%	2	8.90%
9	493m/1618ft	-57.72%	-30.78%	1	26.94%
10	364m/1193ft	-25.56%	-4.31%	1	21.24%

Tabell över uppmätt förtunning av godstjocklek i procent. Skillnader uppvisas mellan resultaten från den akustiska metoden och resultaten från CPI. Skillnaderna ligger mellan 2,93 % och 26,94 % [6].

I ett annat projekt från 2012 som bestod av ett samarbete mellan GHD och Washington Suburban Sanitary Commission (WSSC), ville man använda sig av den här metoden för att konditionsbedöma utvalda delar av dricksvattenledningar. För att verifiera metoden användes ultraljud för mätning av godstjocklek, okulär besiktning och forensiska analyser på uppgrävda ledningar som utfördes av oberoende laboratorier. De ledningar som undersöktes var gråjärn- och segjärnsledningar där diametern låg mellan 150 mm och 300 mm. Verifieringsarbetet visade att metoden klarade av på ett tillfredställande sätt att spåra de ledningar med mindre kvarvarande godstjocklek [7].



Figur 2.3 I projektet testades två närliggande ledningar med den akustiska metoden där metoden klarade av att detektera ledningen med tunnare godstjocklek. Kompletterande mätningar av godstjockleken gjordes med forensiska analyser från två oberoende laboratorier. Echologics resultat visade på en tunnare godstjocklek än resultatet från laboratorierna [7].

I Sverige finns Jensen AB som arbetar med metoden som de marknadsför under namnet delta-t. De har berättat om en mätning som gjordes på en DN110 fjärrvärmeledning i Helsingborg där resultaten från delta-t mätningen visade på att mer än hälften av godstjockleken var bortslitet. De ställde sig skeptiska till resultatet och utförde därför nya mätningar. De fick samma resultat igen och då beslutade ledningsägaren Öresundskraft att ta ledningen ur drift. Ledningen inspekterades okulärt där de kunde konstatera att ledningen såg bra ut och de svetsade ihop ledningen igen. Ledningen trycksattes med vatten och nya mätningar med delta-t utfördes.

Resultaten visade återigen att mindre än hälften av godstjockleken fanns kvar. Då gick de vidare med att anlita en metallografisk expert som fick göra dragprovningar på delar av ledningen. Resultaten styrkte Delta-t-metodens resultat. Ledningen hade en nedsatt hållfasthet i ledningsväggen och hade både yttre och inre korrosion. Godstjockleken på stålet i provbitarna uppmättes till 2,1 och 3,3 mm där det fanns lokala ställen med minsta uppmätta godstjocklek på 1mm. Stålets ursprungliga godstjocklek var 5,6 mm vilket styrkte att Delta-t metoden fungerade för statusbedömning [4].



Figur 2.4 Jensen AB arbetar med metoden i Sverige och kallar den för Delta-t. Metoden är smidig att använda då den varken kräver avbrott i drift eller uppgrävning utan endast åtkomst till ventiler [8].

2.2 Sammanfattning Ljudvågor

Tabell 2.2 Sammanfattning på metoden.

Proaktiv metod?	Metoden är proaktiv genom att den kan undersöka ledningsmaterialet och utvärdera det.
Avbrott i drift?	Metoden kräver inget avbrott i driften utan mätningar kan utföras när som helst.
Rensning av ledningar?	Metoden kräver ingen spolning i ledningen före eller efter mätning.
Uppgrävning?	Metoden kräver ingen uppgrävning.
Faktorer som påverkar resultat?	De faktorer som kan påverka resultatet är om sträckan som ska testas inte är homogen i sitt material och har sträckor av okänt material eller plastledningar. Diametern bör vara densamma genom hela sträckan men metoden klarar upp till 5 % av sträckan i en annan diameter. Om data saknas för dimension, rörmaterial eller korrosionsskydd, blir det svårare att faställa godstjockleken. Svetsar, flänsar, kompensatorer, lyror, förgreningar samt stora avstånd mellan mätpunkter ger en osignifikant påverkan på resultaten.
Information från metoden?	Den information som metoden ger är ett medelvärde på kvarvarande godstjocklek för en hel ledningssträcka. Ger ingen information om punktkorrosion i dagsläget.
Kostnad?	Kostnaden för en dags mätning 2016 ligger mellan 50 000-75 000 kr exklusive moms (Jensen AB). Faktorer som kan påverka kostnaden kan vara olika typer av åtgärder för att kunna genomföra mätningen. T.ex. kan det röra sig om att hitta nya åtkomstpunkter än de som ursprungligen var tänkta för att skapa en säker yttre arbetsmiljö, säkra den inre arbetsmiljön, åtgärda risk för ras eller fall.
Insatser från ledningsnätsägarna?	De insatser som krävs från ledningsägarna är att bistå med grunddata om ledningen och ge åtkomst till ledningen. Ingen personal från bolaget krävs under mätningen.
Vilka ledningsmaterial?	Eternit, gråjärn, segjärn, stål, armerad betong DN20-DN1500
Fjärrvärme?	Metoden används idag för att statusbedöma fjärrvärmeledningar.

3 Trycktransienter

I trycksatta vattenledningar uppstår det transientvågor eller tryckvågor när det sker plötsliga förändringar i flödet. Transientvågor kan uppkomma vid t.ex. en snabb stängning av en ventil eller vid ett tvärt pumpstopp. Dessa transientvågor fortplantar sig i ledningen med hög hastighet och kan orsaka skada vid höga tryck. Men hos transientvågor som skapas under kontrollerade former finns det potential att kunna använda vågornas reflektioner till att få information om olika skeenden inne i en ledning som t.ex. pågående läckor eller gasfickor [9].

De ideala omständigheterna när en transientvåg fungerar som bäst är när det finns en rak ledning som är avstängd i båda ändarna utan avgreningar så att tryckvågen får flöda fram och tillbaka mellan ändarna. Principen för läckdetektering går ut på att skapa en transientvåg i en rak ledning utrustad med en tryckmätare och transientgenerator i ena änden. När vågen passerar en läcka, så kommer den att avge en reflektion bakåt som är mätbar. Genom att veta hur snabbt vågen tar sig fram i en specifik ledning, kan man genom att mäta tiden när reflektionen detekteras göra en beräkning på var läckan är placerad [10]. Storleken på reflektionen står i direkt relation till transientvågens storlek, läckans storlek och hur mycket friktion vågen utsätts för i ledningen. En referensmätning är nödvändig för att kunna ta tiden för vågen att ta sig igenom känd längd ledning och återvända och veta hur vågen beter sig utan läcka. Alternativt kan man skapa en simulering av en referensmätning [10].

3.1 Studier om läcksökning

I en studie beskrivs tester där man undersökte om man kunde detektera och lokalisera läckor i en större vattenledning av gjutjärn med en diameter på 750 mm. I studien erhöles intressanta resultat vilka visade att man med metoden kunde detektera en läcka på 15 l/s och lokalisera läckan med en felmarginal på 0,3 % av totala längden på ledningen [10].

I experimentet skapade man en tryckvåg genom att använda en ventil som stängdes tvärt. Man mätte först upp vågens tryck i ledningen utan läckage för att få en referens. Sedan skapades en ny transientvåg med ett simulerat läckage i ledningen för att kunna se skillnader i reflektionerna. Ledningens längd var 26 km och transientvågornas hastighet uppskattades till 950 m/sekund. Vid nedströmsänden fanns det en tank som fungerade som en ände och vid uppströmsänden fanns det en pumpstation som utgjorde den andra änden [10].

Transientvågen genererades vid G2 och uppmätning gjordes vid punkten M3. En simulerad läcka på 15 l/s skapades vid punkten L3. Läckans diameter var ca 30 mm vilket utgjorde 4 % av ledningens diameter. Reflektionerna av transientvågen jämfördes mot reflektionerna från referensmätningen där man detekterade skillnader som indikerade läcka.

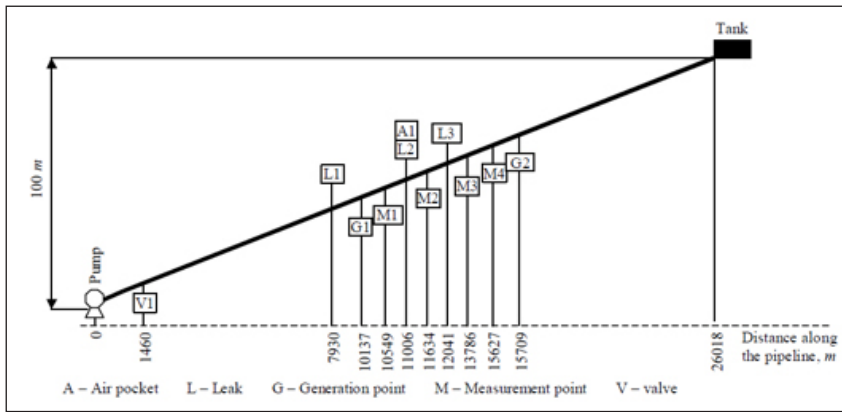


Diagram 3.1 Uppsättningen på fältförsöket [10].

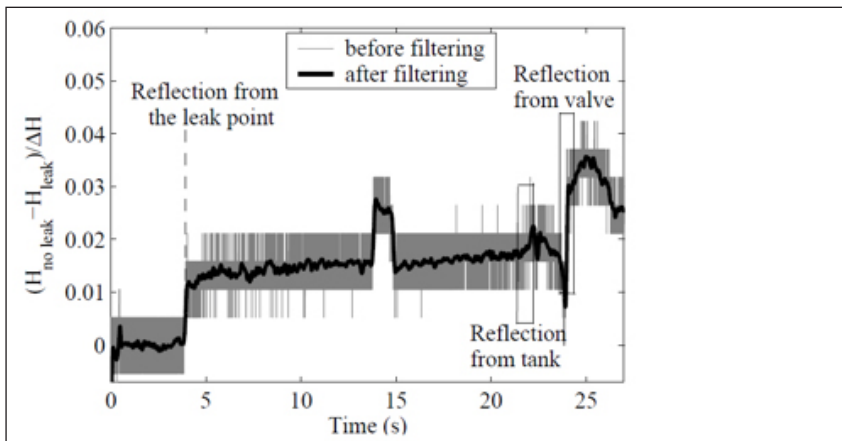


Diagram 3.2 Diagrammet uppvisar skillnader mellan mätning med transientvåg och referensmätning genom formeln $\frac{H_{no\ leak} - H_{leak}}{\Delta H}$, där $H_{no\ leak}$ är transienttrycket i ledningen utan läcka, H_{leak} är transienttrycket i ledningen med läcka och ΔH är skillnaden i ledningens tryck före och efter generering av transientvåg. Referensen utan läcka jämförs mot mätningen med läcka och skillnader redovisas i diagrammet. Den första positiva förändringen vid 3 s indikerar reflektion från läckan [10].

Skillnader orsakad av läckor beter sig som så att baslinjen förändras och går inte tillbaka till samma läge som innan. Utslaget vid 13 s går baslinjen upp och ner lika mycket och det indikerar på att detta inte är orsakat av en läcka utan berodde på att en ventil öppnades av misstag under 2 sekunder. Efter som transientvågen genererades vid punkten G2, är det möjligt att läcka finns längs ledningen på båda sidor om punkten. För att ta reda på vilken sida det är får man titta på reflektionerna från ändarna och då tittar man om det finns skillnader mot referensutslaget. I detta fall finns det ingen signifikant förändring i reflektionen från tanken i förhållandet till referensutslaget. Då kan man dra slutsatsen att läckan finns mellan G2 punkten och ventilen.

Samma test genomfördes en andra gång med läcka på punkten L3, där transientvågen genererades från punkten G2. Man ersatte mätpunkt M3 med mätpunkt M4. Samma procedur upprepades. I diagrammet nedan uppvisas förändringen i skillnaden mellan referensen och mätningen med läcka.

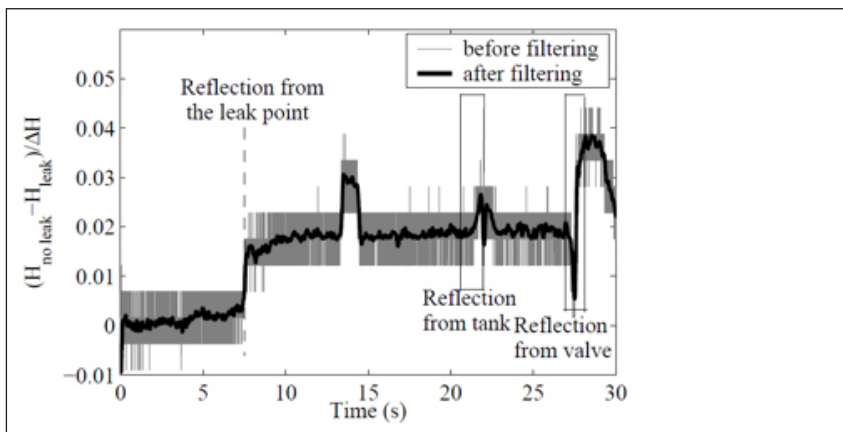


Diagram 3.3 Den positiva förändringen vid ca 7 s anger avvikelse från referensen och visar att det är en reflektion från en läcka genom att baslinjen inte återgår till ursprungsläge. Genom ankomsttiden för reflektionen kan man beräkna var läckan kan finnas åt ömse sidor om punkten M4 och man beräknade att läckan kunde ligga beläget vid punkterna 12 082 m eller vid 19 254 m. För att hitta vilken sida läckan finns om punkten M4, utförde man samma procedur som i föregående test, dvs. man tittar på reflektionerna från ändarna och jämför dem med referensvärdet. Reflektionen från tanken ger ingen förändring i baslinjen och man kan då se att läckan finns mellan ventilen och punkten M4. Genom mätningen kunde man beräkna att läckan var placerad 12 082 m på ledningen och det sanna värdet var 12 041, så det fanns en felmarginal på 41m. Genom att använda två mätpunkter, kan man komma närmre den sanna läget av läckan, då man får två uppskattade lägen för läckan [10].

Ett tredje test utfördes med flera läckor längs ledningen där transientvågen genererades vid punkten G1, mätningar skedde vid punkten M1 och två läckor fanns vid punkterna L1 och L2 på 15 l/s.

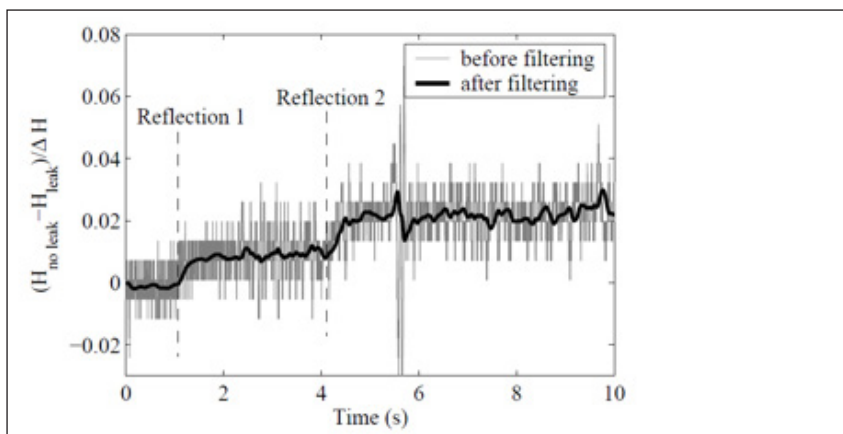


Diagram 3.4 Bilden visar förändringar p.g.a. skillnaden mellan referensutslag och mätning med två simulerade läckor. De här förändringarna indikerar läckor [10].

Storleken av förändringarna p.g.a. skillnaden mellan referensmätningen och mätningen med läckorna ger ledtrådar om var läckorna finns. Eftersom skillnaden mellan reflektionerna från tanken är mindre än skillnaden mellan reflektionerna från ventilen, kan man dra slutsatsen att den mindre läckan

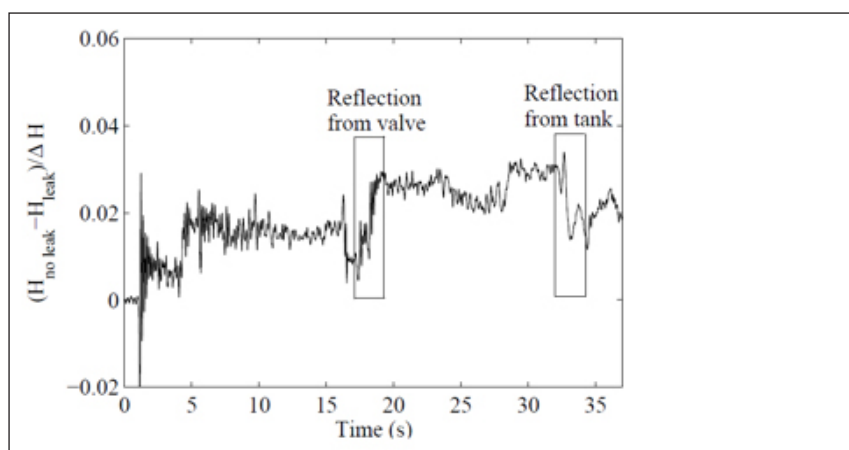


Diagram 3.5 Ett längre fönster med data där reflektioner från båda ändarna finns med. Skillnader mellan referens och mätning med transientvåg indikerar att läckorna finns på båda sidorna om transientgeneratorn och mätpunkt 1 [10].

finns mellan mätstationen och tanken. Enligt beräkningarna fick man fram att den mindre läckan skulle ligga 11 077 m på ledningen och den stora läckan skulle finnas 8 124 m utmed ledningens sträcka. De sanna värdena var 11 006 m och 7 930 m. Felmarginalen låg alltså på 71 m och 194 m [10].

I en avhandling om läckdetektering och lokalisering av Dalius Misiunas från 2004, undersöktes läckdetektering med hjälp av transientvågor både i kontrollerade former på laboratorium och ute i verkligt ledningsnät. Resultaten verkar lovande för att kunna fungera i verkliga ledningssystem [11] och författaren har vid en konferens 2008 även uttryckt hur metoden kan användas genom att permanent installera mätare och transientgenerator i en ledning för en kontinuerlig bevakning [10].

En artikel från 2012 [13] berättar om hur metoden undersöktes i laboriemiljö och ute i fält för ledningar i drift. Brandposter användes till att skapa transientvågor och metoden bedömes i artikeln ha potential till att utvecklas och öka säkerheten i läckagedetekteringen [13].

I en annan studie från 2014 [14], tar man upp hur blockeringar inne i ledningar förändrar ledningens resonansfrekvens och hur detta kan utnyttjas till att detektera igensättningen genom att skapa transientvågor. I studien undersöktes interaktionen mellan transientvåg och blockaget inne i en ledning där man sammanfattningsvis konstaterade att information om igensättningar går att erhålla men att mer forskning inom området måste bedrivas [14].

3.2 Studier om statusbedömning

Två studier berättar om hur en transientvåg påverkas av statusen på ledningsväggen [16,17]. När en transientvåg inne i en ledning når en del av ledningen som har tjockare eller tunnare godstjocklek, kommer transientvågens hastighet förändras och avge reflektioner. Om vågen når en lokal del i ledningen som har en tunnare godstjocklek, kommer detta att påverka

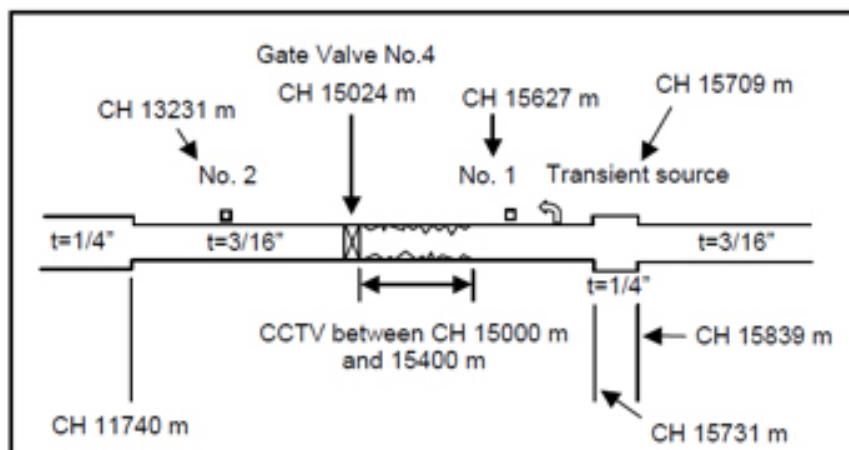
vågen genom att dess hastighet avtar. När vågen lämnar det området, kommer hastigheten att öka igen. Om vågen når ett område med tjockare godstjocklek än övrig ledning, kommer vågens hastighet att öka [15].

Sambanden som bestämmer hastigheten för en transientvåg igenom en ledning finns uttryckt i en framtagna formel. I ekvation 2 nedan är våghastigheten α , en funktion av vattnets tryckmodul K , vattnets densitet ρ , elasticitetsmodulen E , ledningens godstjocklek t , inre diametern D och ledningens ojämnhetsfaktor c . Våghastigheten är alltså en funktion av bl.a. godstjockleken och den inre diametern [15].

$$\alpha = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + (K/E) (D/t) c}} \quad \text{Ekvation 2}$$

Förändringar i godstjockleken påverkar alltså viktiga faktorer som den nominala diametern och ojämnhetsfaktorn. Godstjockleken påverkas t.ex. av inre och yttre korrosion, delaminering av korrosionsskydd eller korrosionsformationer längs de inre väggarna. Försämrat ledningsmaterial leder till sänkning av Youngs modul, vilket innebär att ledningsmaterialet blir mjukare och mer elastisk och sänker därmed hastigheten [15]. Fenomenet påminner mycket om de faktorerna på påverkar ljudvågornas hastighet genom vattenfyllda ledningar hos delta-t metoden.

I södra Australien har det utförts tester med transientvågor på en metallisk ledning med en diameter på 750 mm och en längd på 26 km. Syftet var att använda data från mätningarna till att bestämma de sektioner i ledningen som hade tunnare godstjocklek. En sektion på 400 m av de 26 km har blivit filmad med CCTV (se figur 3.1) sen tidigare och på filmen kunde man detektera ett område på tio meter med olika skadetyper. På ett ställe hade bara själva korrosionsskyddet lossnat utan något korrosionsangrepp på den blottade metallen. På andra ställen hade korrosionsskyddet lossnat och på metallväggen fanns det olika mycket grader av korrosion. I den här studien lyckades man med att hitta en koppling mellan godstjockleken och reflektionerna från transientvågorna [16].



Figur 3.1 Mätningar med transientvågor genomfördes på en metallisk ledning med en diameter på 750 mm och en längd på 26 km. En sträcka på 400 m har man filmat med CCTV. Under en studie kunde man hitta koppling mellan reflektionerna från transientvågorna och ledningens godstjocklek.

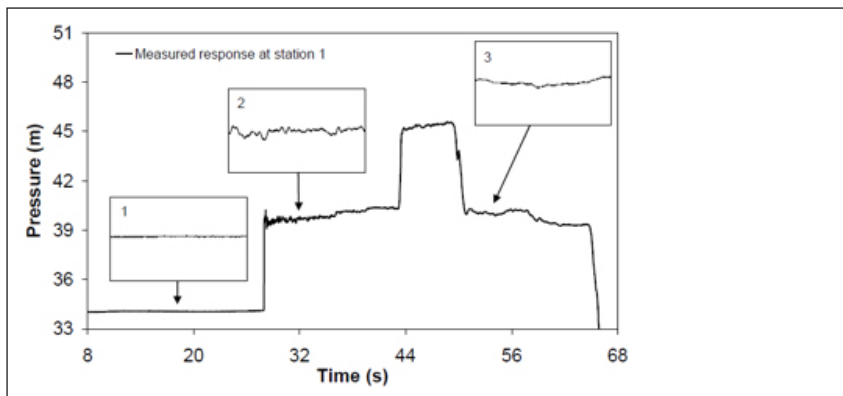


Diagram 3.6 Diagrammet uppvisar utseendet på reflektionerna från en transientvåg i den 23 km långa sektionen. Utslaget börjar med ett stadigt tryck som följs av en plötslig tryckhöjning efter ca 27 s där strukturerade reflektioner visar sig direkt efter tryckhöjningen. Strukturerna visas i förstord format i bild 2 inne i diagrammet. En andra tryckhöjning sker vid ca 43 s, vilket är en reflektion från ena änden med stängd ventil. Trycksänkningen vid 48 s orsakas av tanken på den andra änden [16].

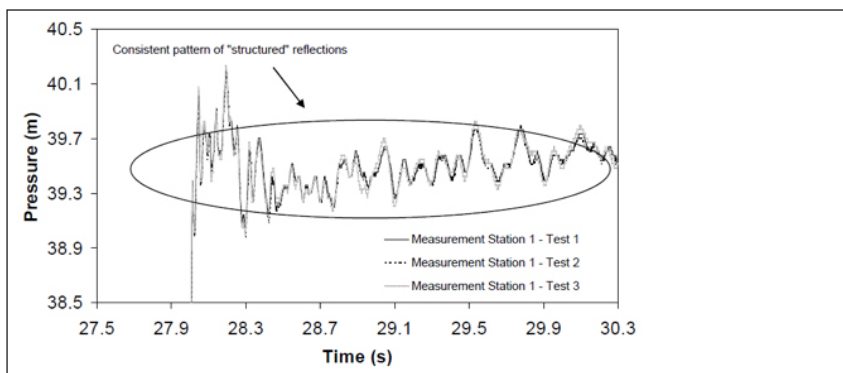
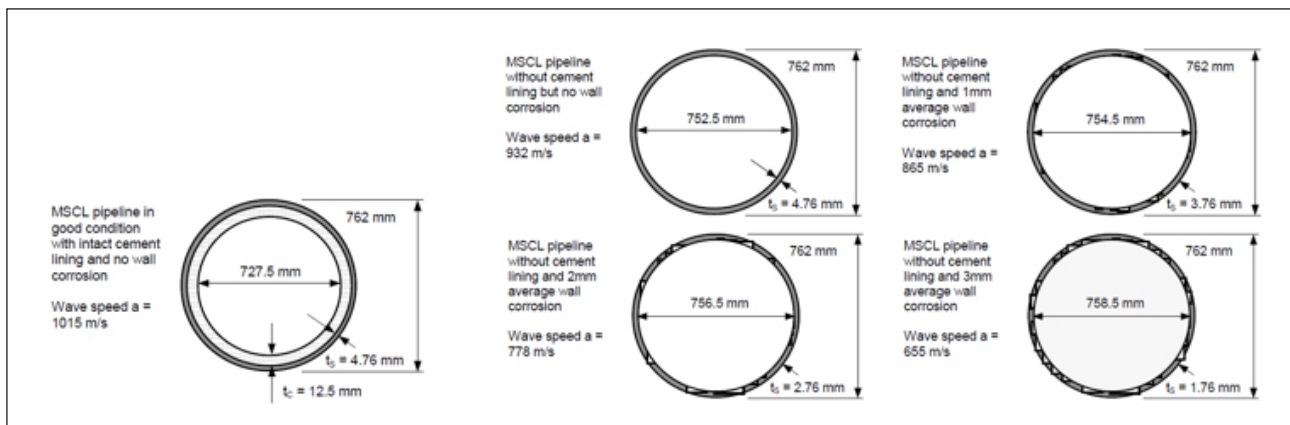


Diagram 3.7 Här är en förstoring av de strukturerade reflektionerna från förgående diagram i bild 2. Tre tester har utförts med trycktransienter på samma ledning och de strukturerade mönster har visats sig varje gång. Mätningar utfördes på ledningen både 2004 och 2007 med samma resultat. Hypotesen är att reflektionerna kommer från ett område med försämrad kondition på ledningsväggen [16].

Ekvationen för beräkning av transientvågens hastighet gör det möjligt att beräkna våghastigheten i en ledning med varierande godstjocklekar. Med hjälp av filmen från sektionen på 400 m kunde man detektera ett antal områden med olika skadetyper. Man har gjort uppskattningar på andelen korrosion på de olika områden och kvarvarande godstjocklek. Baserat på uppskattningarna, utfördes beräkningar på vågens hastighet igenom de olika sektionerna som beskrivs i figur 3.2 [16].

Baserat på beräkningarna på transientsvågens hastighet, kunde en transientvåg med reflektioner simuleras. Den simulerade modellen jämfördes med de uppmätta reflektionerna. En tidskrävande arbete lades ner på att gradvist anpassa modellen till de verkliga utslagen och möjligheten fanns då att justera godstjockleken närmre det sanna värdet, speciellt på de delar av ledningen som inte var filmad. En mer detaljerad och säkerställd bild på



Figur 3.2 Beräknade våghastigheter igenom ledning med olika skadetyper. Man gjorde beräkningar för vågens hastighet för en ledning i gott skick, för ledning med bortfallet korrosionsskydd men utan korrosion på metallväggen och beräkningar för olika grader av korrosion på 1, 2 och 3 mm på ledningsväggen [16].

spredningen av de inre skadorna och variation i godstjocklekarna kunde tas fram. Den justerade datan på skadebilden matades in i en Forward Transient Modell som baserat på datan förutsäger hur reflektioner från en transientvåg skulle se ut. De simulerade reflektionerna stämde bra med hur de verkliga reflektionerna från mätningen såg ut.

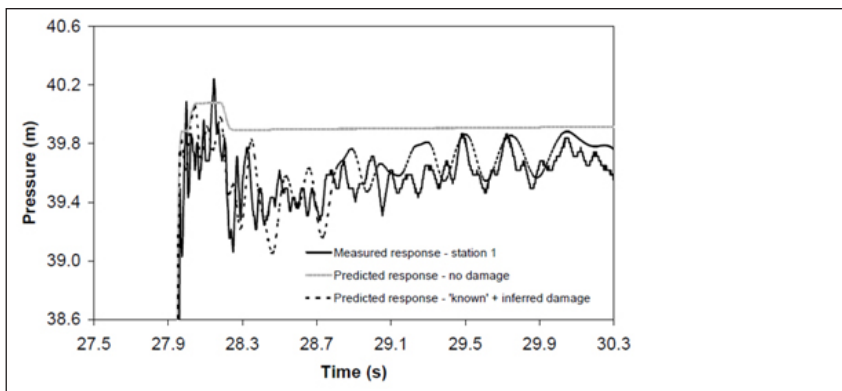
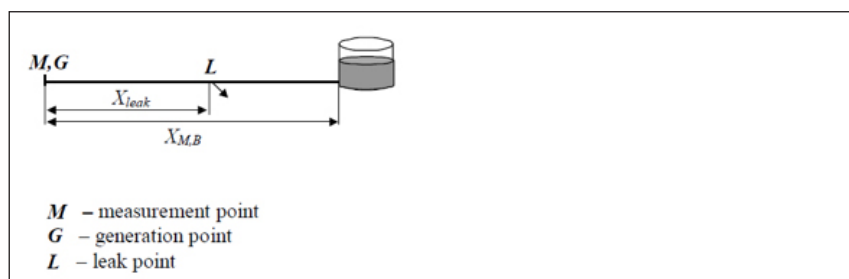


Diagram 3.8 I bilden visas reflektioner från en verklig mätning i ledningen som kallas för "Measured response". Reflektionen från den simulerade transientvågen kallas för "Predicted response - "known" + inferred damage". Man kan tydligt se att kurvorna följs åt ganska väl [16].

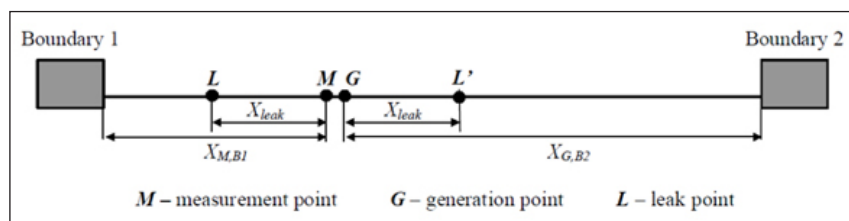
3.3 Användning av trycktransienter i verkligt ledningsnät

I figur 3.3 demonstreras en ledning som har ena änden sluten och den andra änden monterad till en tank. Den här uppställningen är en vanlig uppsättning när transientvågor ska studeras. Transientvågor genereras vid punkten G och tryck mäts vid punkten M och de här punkterna är placerade vid ledningens ena ände. En läcka brukar simuleras längs ledningen som demonstreras i bilden med avståndet Xleak.



Figur 3.3 En vanlig uppsättning vid studier med transientvåg. Uppsättningen utgör de ideala förhållanden för att kunna göra bra detekteringar på reflektioner från transientvågor [11].

Vid fältmätningar kan den optimala uppsättningen vara svår att införa då det kan bli besvärligt med generator och mätare vid ledningens ändar. Den operativa funktionen får inte störas av utrustning och i verkliga system kan generatoren och mätaren monteras in vid två olika punkter. Uppsättningen måste anpassas efter varje individuell ledning för den mest optimala lösningen. I verkligheten är det få ledningar som är avstängd i varje ände då ledningsnät har många utgreningar och är komplext. Men en idé är att utföra periodvisa mätningar med transientvågor genom att permanent installera en generator och mätare i en ledning. Vid mätningstillfällena skulle det vara möjligt att skapa tillfälliga ändar i ledningen genom att t.ex. stänga ventiler under tiden tester pågår. Testerna kan exempelvis utföras under natten då det skulle orsaka minst störningar och under övrig tid skulle ledningen stå öppen [11].



Figur 3.4 Bilden visar hur en mer realistisk uppsättning kan se ut inne i verkliga ledningssystem [11].

Med denna uppsättning kommer det att skapas två transientvågor från generatoren eftersom den är placerad nästan i mitten av ledningen. Vågorna kommer att färdas i två motsatta riktningar och kan då detektera eventuella läckor på var sida om generatoren, som är markerade som L och L' i bilden ovan.

Reflektioner från en läcka ger ingen information om vilken sida den kommer ifrån. För att veta på vilken sida läckan finns måste man iaktta reflektionerna från ändarna och se vilken reflektion som har ett mindre tryck än från tidigare utförda mätningar/referens. Men man kan även använda sig av simulerade transientvågor där man simulerar reflektioner både med och utan läcka för att använda informationen till underlag för att detektera läckage [11].

Olika föremål och skeenden i en ledning ger upphov till olika typer av reflektioner och i en annan studie har man undersökt både med simulering och i verkliga ledningar hur de olika reflektionerna kan se ut. I den studien såg man att t.ex. en spricka orsakar en trycksänkning, ändrar ger fullständiga reflektioner, en förminskning i diametern ger en topp och en luftficka orsakar en trycksänkning som följs av en ökning. Även olika rörmaterial påverkar formationen på vågorna och ge olika mycket dämpningar [17]. Risken finns att tillfällen då det kan vara svårt att urskilja reflektioner från skadat väggmaterial eller från en läcka ifrån komponenter och andra möjliga källor till reflektioner. Men en stor fördel som metoden kan medföra är att genom en permanent insatt transientgenerator och mätare, kan det vara möjligt att kontinuerligt bevaka en ledning och detektera förändringar. Detta kan vara till hjälp för att veta när det är dags för mer ingående undersökningar. Resultaten av studierna med transientvågor är intressanta och den här tekniken kan ha potential till att fungera som ett verktyg för statusbedömning.

3.4 Sammanfattning Trycktransienter

Tabell 3.1 Sammanfattning på metoden.

Proaktiv metod?	Metoden verkar ha potential till att kunna vara en proaktiv metod. Det beror på hur mycket metoden går att utveckla då den har uppvisat potential att kunna detektera förändringar i godstjocklek. Metoden har även potential att detektera och lokalisera läckor, men då har redan ledningsmaterialet brustit och arbetet blir mer av reaktiv natur.
Avbrott i drift?	Metoden kräver driftavbrott under själva mätningen. Om metoden skulle implementeras i ledningsnät, skulle man behöva stänga av en längd på varje ände och alla utgreningar. Förslagsvis skulle man kunna utföra de här typerna av mätningar under nattetid.
Rensning av ledningar?	Metoden kräver troligtvis ingen spolning, varken före eller efter mätning.
Uppgrävning?	Metoden kräver ingen uppgrävning. Existerande åtkomstpunkter som t.ex. brunn eller pumpstation går att använda där man kan installera en tryckmätare.
Faktorer som påverkar resultatet?	De faktorer som påverkar resultatet från en mätning är t.ex. ledningslängd, material, initierad tryckvågsstorlek, eventuell läckas storlek eller störande hydrauliska komponenter.
Information från metoden?	Den information som går att få ut från transienttryck är förändringar i ledningen. Genom återkommande mätningar av trycktransienten på en specifik ledningssträcka under samma förutsättningar, kan eventuella förändringar i ledningen upptäckas. Ändras trycktransientens egenskaper kan ju detta bero på någon ledningsförändring. Ett tänkbart exempel är en backventil som pga. felfunktion stänger för-sent. Andra exempel är läckage, korrosionsskydd som har lossnat, sättningar eller möjligtvis tunnare godstjocklek.
Kostnad?	Kostnad för användning av transienttryck utgörs av kostnaden för utrustning.
Insatser från ledningsnätsägarna?	De insatser som krävs av ledningsnätsägarna är inhämtande av kunskap om trycktransienter. Det skulle också vara värdefullt om jämförande beräkningar av förväntad trycktransient skulle kunna göras.
Vilka ledningsmaterial?	Alla material men det är svårare med plast. Alla dimensioner.
Fjärrvärme?	Metoden är möjligt att utföra på fjärrvärmeledningar.

4 Ground Penetrating Radar

Ground Penetrating Radar (GPR) är en elektromagnetisk teknik som mest har används till att undersöka den grunda ytan av underliggande jord, byggmaterial, vägar och broar. GPR bygger på principen av att sända och ta emot elektromagnetiska vågor i radiofrekvensområdet (12,5 MHz till 4 GHz) [18]. Vågor skickas ner i marken via antenner och reflekteras när de träffar på olika föremål. Dessa reflektioner analyseras vidare genom ett datorprogram för att inhämta information om vad som finns under marken. Antennerna kan sitta i samma enhet eller var för sig med en kontrollenhet varifrån alla parametrar styrs genom en fältdator. [19].

Radartillverkarna har på senare tid arbetat mycket med multiantenner med olika frekvenser som når olika djup ner i jorden. Valet av antenner innebär en balans mellan penetration och upplösning. En lågfrekvent antenn ger en radarpuls som penetrerar djupare men har samtidigt en längre våglängd som i sin tur ger sämre upplösning medan en högfrekvent antenn genererar en radarpuls med kortare våglängd med högre upplösning som istället dämpas fortare, d.v.s. den tränger inte lika djupt ner i marken [19]. Många GPR-system kan anpassas till undersökning i stadsmiljö, öppet landskap och på olika marknivåer och inmätning sker ofta snabbt. Endast en till två operatörer behövs ute i fält och GPR kan ge bra upplösning för de två första metrarna i jorden där det är möjligt att lokalisera ledningar av både metall och plast. Ofta går det även att tolka formen på ledningen. De dataprogram som används till att bearbeta data ägs av leverantörerna och kräver utbildning för att kunna hantera dem.

GPR är mest känd för att användas till att lokalisera nergrävd infrastruktur men vad som är mindre känt är att GPR har visats sig ha en potential i att detektera läckage från ledningar som t.ex. utläckage av olja från högspänningsledningar [18] och utläckage från vattenledningar [21].

4.1 Studier om läcksökning

I en studie från England prövade man att använda GPR till att detektera läckor på nergrävda ledningar i ett urbant område. Eftersom asfalt och betongytor uppvisar en sämre dränering, innehåller jorden undertill mindre andel fukt och vid läcka kan det uppkomma en skarp gräns där vattenhalt runt läckan ökar markant i de här områdena. Sådana gränssytor kan GPR tydligt visa och resultaten av studien beskrivs som lovande. GPR ger en effektiv detektering av läckor med hjälp av en kombination av amplitudanalyser av tid, frekvensdomän och dess variation. I studien tittade man på interaktionen mellan fukten och övrig jord, på vilket djup läckan fanns och antennens frekvens. Författarna till artikeln påpekar även att operatörens tolkning och erfarenhet måste kombineras med en mer avancerad signalbehandling av amplitudegenskaperna. De här resultaten är särskilt intressanta för VA-branschen där läcksökning på plastledningar är svårare [20].

I en annan studie undersökte man under kontrollerade former på laboratorium om GPR kunde detektera läckor på metall- och PVC ledningar. Initialt utvecklades en laboratoriemodell bestående av en låda som innehöll en ledning som täcktes med sand. För att simulera en läcka på en ledning, borrades ett hål i mitten av röret för att tillåta vattenläcka bland simulerad jord (sand). Slutsatsen av studien var att GPR lätt kunde anpassas till att upptäcka vattenläckor i ledningar av både metall och plastledningar i distributionssystem. Även förbättringar av digital signalbehandling med t.ex. Hilbert Transform är möjligt och kan bidra till att förfinas och förbättra noggrannheten i resultaten [21]. En liknande studie har utförts där man har arbetat med pre-processing metodik som innebär att man visualiserar egenskaper som inte direkt syns i bilder från undersökningar med hjälp av statistisk och multi-agent modeller. Även här utfördes tester på PVC med läcka i laboratoriemiljö och ute i fält. Efter mätningen gick man igenom flera bilder från GPR-undersökningen och kombinerade rådata med statistiska och multi-variata modeller för en bättre analys av resultaten. I studien konstateras att den här typen av visualisering kommer att underlätta tolkningen av radarsignalerna för dem som inte har en stor erfarenhet med att arbeta med radarteknik. Man vill även eftersträva en automatiserad bedömning på resultaten och reducering av den subjektiva tolkningen från operatören [23].

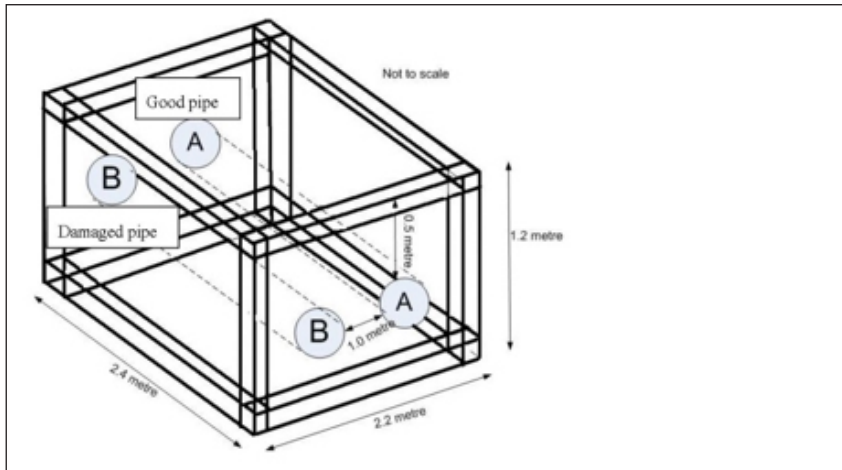
4.2 Studier om statusbedömning

I en avhandling från Birmingham Universitet finns en detaljerad studie med GPR med syftet att detektera försämrade ledningar. En serie laboratorieförsök utfördes för att bestämma giltigheten och effektiviteten hos typiska kommersiella GPR system. I studien undersöktes även olika typer av skador på plastledningar med olika frekvenser på antennerna [24].

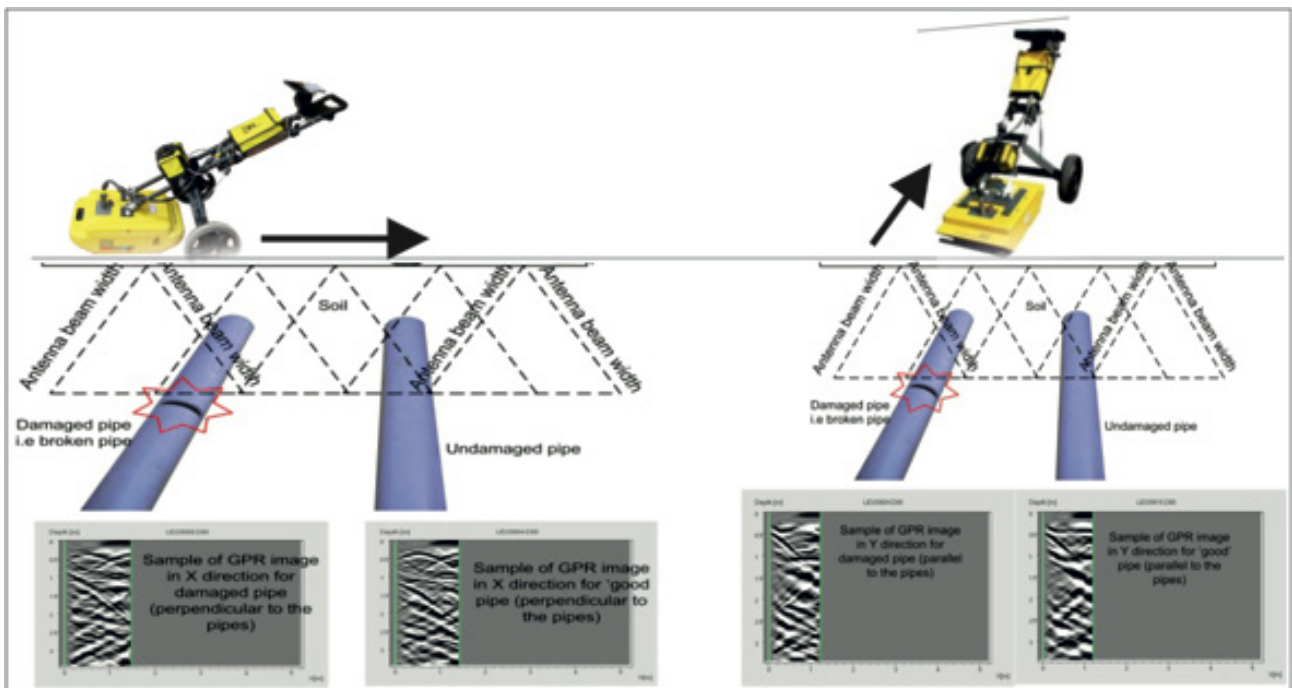
GPR undersökningarna genomfördes i syfte att erhålla specifika signalegenskaper från skadade respektive intakta ledningar som var nergrävda. Slutsatserna från studien var att GPR kan identifiera vissa typer av skador under kontrollerade förhållanden i laboratoriemiljö. Avhandlingen innehåller även rekommendationer för framtida studier när det gäller ledningar i metall eller lergodsrör. Studien kan ligga till grund till att kartlägga ledningars skademekanismer och förändringar baserade på rörmaterial, typ av skada, medium i ledningen och omgivande material. Till exempel kunde avvikelser i en läckande gjutjärn detekteras. Avvikelsen bestod av en förstörd rörsektion som orsakas av den omgivande fuktiga jorden nära den skadade sektionen. De här egenskaperna, om de är väl kända, kan kombineras med signalbehandlingstekniker för att automatisera och optimera både upptäckt och identifiering av ledningsskador. Detta kan leda till en förbättring och optimering av användningen av GPR för nergrävda ledningar.

Under forskningsarbetet byggdes en låda på 2,4 x 2,2x och 1,2 m på höjden där man placerade två ledningar av PE bredvid varandra, varav den ena hade en konstgjord spricka tvärs över manteln. Den andra var fri från skador. Syftet med försöket var att undersöka om radarn kan detektera skada på ledningen och ge tydliga utslag. Lådan fylldes med sand och innehöll inga

metalliska material som skulle orsaka andra störande reflektioner. Antennen som användes hade en yta på 60 cm x 37 cm, vilket innebär att det är omfånget på det område som antennen lyser upp på det undersökta objektet. Två frekvenser användes, en på 250 MHz (långa vågor) och en på 700 MHz (korta vågor) för att pröva olika upplösningar.



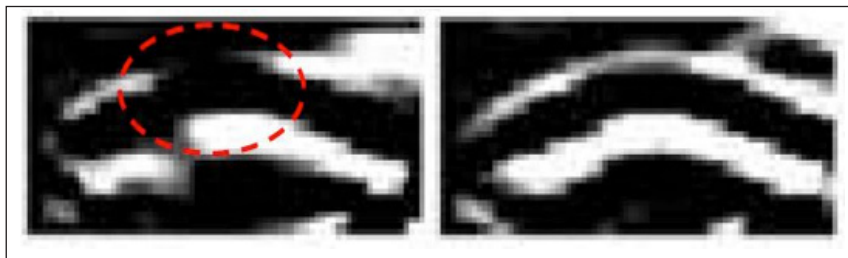
Figur 4.1 Experiment i en testbädd med två PE ledningar begravda i sand där ena ledningen hade en konstgjord spricka. Syftet var att ta reda på om radarn kunde ge tydliga utslag för den skadade ledningen [24].



Figur 4.2 Radarn har dragits longitudinellt med och tvärs över ledningarna, för att få en jämförelse av reflektioner mellan tvärgående och parallella radarprofiler [24].

Dataanalys av resultanten är fokuserad på amplitudförändringar och amplitudkontraster, dvs. kontraster mellan skadat och oskadat rör. En skillnad som finns mellan skadat och oskadat rör är markerat i bilden nedan. Resultaten analyserades med en statistisk operator, Mean Square Error, för att

storlekssätta amplitudsförändringar mellan den skadade och den hela ledningen. Beräkningar gjordes för de två frekvenserna och för de två olika riktningarna.



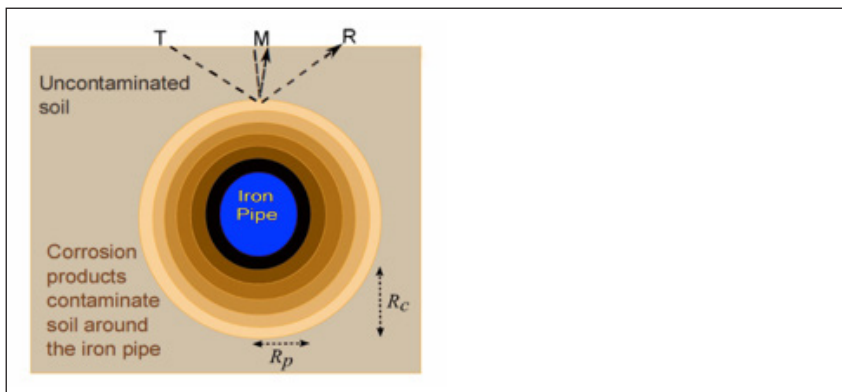
Figur 4.3 Vågrät undersökning med radar har fångat upp sprickan på den ena ledningen där området är helt svart i bilden till vänster. Jämför med den hela ledningen där området är intakt och gråfärgad i bilden till höger [24].

I studien varierades storleken på sprickan där utslaget noterades och slutsatserna i avhandlingen säger att det går att se typiska skillnader i signaler från skadade rör relativt hela rör. Det går att detektera vissa skadetillstånd med båda frekvenserna men frekvensen på 250 MHz hade sämre upplösning. Detektionen av skadetillståndet är begränsat och förutsätter att sand har läckt in till ledningen. Detekteringen är direkt relaterad till hur mycket jord som kommer in till ledningen och utan inläckage av jord är skadan svårare att detektera [24].

4.3.1 Detektion av korrosion

Gråjärn och segjärn innehåller metaller som järn och magnesium som vid yttre korrosion avges ut till omgivningen i form av joner [21]. Anledningen till att det sker en omvandling från metall till metalljoner beror på att metaller i korrosiva jordar befinner sig i ett ostabilt tillstånd och drivs genom termodynamiska krafter att omvandlas till stabilare former så som metalljoner eller metalloxider. De är de former som metall vanligtvis brukar förekomma i ute i naturen. Metalljoner som vandrar ut till omgivande jord från en ledning kan även driva på korrosionen på ledningen och spridas ut vidare i miljön [24].

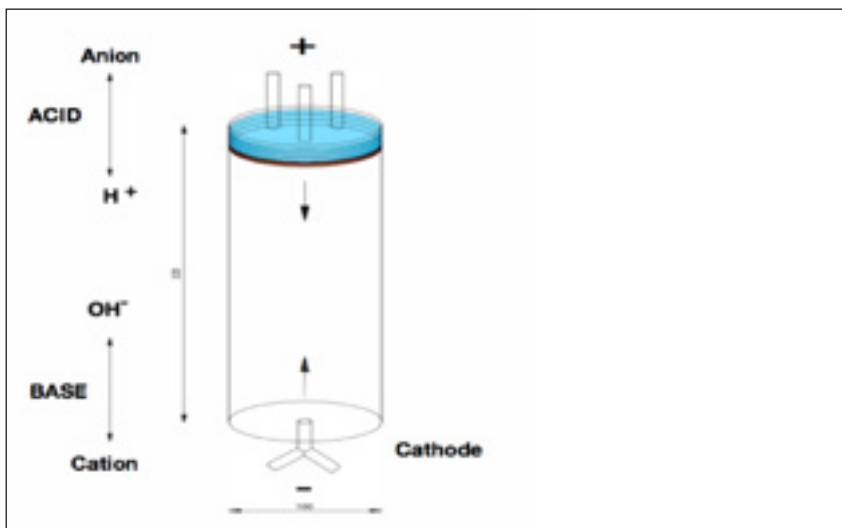
I en presentation som hölls av Pennock vid "15th International Conference on GPR" år 2014, framgick det att det finns en potential att detektera korrosion på nergrävda metalledningar med GPR. En studie har genomförts för att ta reda på vad som sker i omgivande jord när ett järnrör korroderar i lera och hur korrosionsprodukterna påverkar radarsignalerna. I studien såg man att korrosion av järnmetalledningar skapar en koncentrationsgradient av metalljoner som påverkar konduktiviteten och permittiviteten i omgivande mark. Hög koncentration av korrosionsprodukter påverkar reflektioner från radarn på så sätt att GPR-signalerna dämpas markant och ledningen går ej att detektera [26].



Figur 4.4 Bild över hur en koncentrationsgradient av korrosionsprodukter kan se ut från ett rör där det pågår korrosion [26].

Olika typer av jordar är olika mycket selektiva för joner och formationer av olika föreningar. Lera har en stark tendens att reagera med katjoner och bilda föreningar. Korrosionsprocessen av järnmetalledningar går ofta sakta med en dynamisk påverkan på den omgivande jorden där korrosionsprodukterna trots ha en låg löslighet och påverkar jorden endast inom begränsade områden.

För att studera korrosionsprocessen hos en gråjärnledning, använde man sig av en mätcell som fylldes med lera och där en platta av gråjärn monterades fast i ena änden. Korrosion inducerades på plattan genom anod-katod interaktioner och pH förändringar. Korrosionsprocessen pågick upp till tre månader [26].



Figur 4.5 Cellens uppbyggnad [26].

Efter den elektrokemiska processen på 3 månader, togs prover ut från leran med ett intervall på 10mm mellan provtagningspunkterna. De parametrar som analyserades var fukthalt, konduktivitet och permittivitet. Som komplement användes även Time Domain Reflectometry (TDR) som uppmätte lerans konduktivitet och permittivitet. All data låg till underlag för FDTD simuleringar av radarsignalernas reflektioner.

Tabell 4.1 Datasamling från provtagningar ur cellen [26].

Distans mm	Konduktivitet		Permittivitet TDR
	EC mS/m	TDR mS/m	
10	429,00	441,96	21,57
20	399,00	393,57	21,57
30	386,00	215,34	21,57
40	378,00	215,34	19,00
50	268,00	235,67	22,44
60	202,90	218,76	28,80
70	207,80	227,69	9,46
80	206,90	220,29	9,04
90	150,66	165,44	24,94
100	163,86	187,11	21,79
Natural Clay	23,90	39,04	32,60

Data i tabell 4.1 redovisar mätvärden från varje provtagning i cellen. Proven togs med 10 mm avståndintervall och det första provet togs 10 mm från plattan, nästa togs 20 mm från plattan osv. Syftet var att kartlägga koncentrationsgradienten av joner och korrosionsprodukter från gråjärnsplattan. I varje prov uppmättes konduktiviteten och permittiviteten. Den här datan låg till underlag till simuleringarna av radarsignalerna, där datan motsvarar ca 4 veckor utan korrosion, 4 veckor med korrosion och 3 månader med korrosion. Radarreflektionen från ledningen har en fördröjning på 20 ns och fördröjningen blir betydligt längre vid korrosion. Efter 3 månader av korrosion uteblev reflektion av radarsignalen helt.

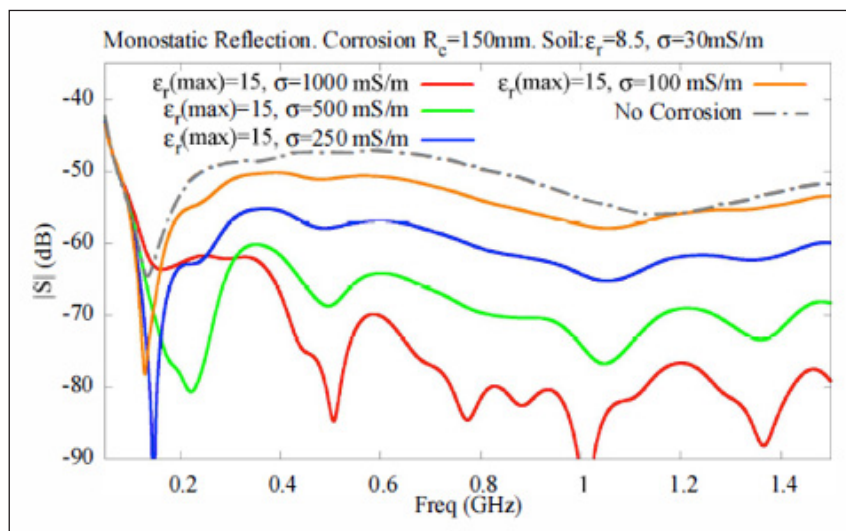


Diagram 4.1 Simulerade radarutslag baserat på b.l.a. korrosion orsakad av konduktivitetsförändringar (mS/m) i marken. Vid ingen korrosion är styrkan (dB) hög på signalen som illustreras av den streckade linjen i grått högst upp. De följande linjerna visar att styrkan på radarsignalen blir svagare och svagare ju högre konduktiviteten blir. Vid 1 000m S/m är signalen ej detektbar och ledningen går möjligtvis detekteras vid de lägre frekvenserna vid 100 MHz [26].

Från experimentet framgår att konduktiviteten i marken påverkar radar-signalernas reflektion och man kan tänka sig att vid korrosion kommer korrosionsprodukter orsaka en fördröjning i reflektionerna eller att radarsignalen dör ut helt vid kraftigt kontaminerad jord. Studien antyder även att det går att se ledningen och omgiven jord (lera) på en frekvens som ligger vid eller under 100 MHz, beroende på ledningens diameter. Resultaten kan ha praktiska viktiga tillämpningar för att bedöma korrosion på en ledning när man känner till den lokala jordens sammansättning [26].

4.4 Sammanfattning GPR

Tabell 4.2 Sammanfattning av metoden.

Proaktiv metod?	Finns potential för att räknas som en proaktiv metod. Nämnade studier visar en intressant indikationer att kunna detektera områden kring ledningen där det sker eller finns risk för korrosionsangrepp. Det pågår även studier baserat på Inverse Scattering Theory där datosimulering och tester visar sprickor i tidig fas. Frågan är om man kan överföra metoderna från forskningen ut till verkligheten. I PE- och PVC-rör och delvis i betong kan man analysera signalamplitud och ser hur den varierar. Det kan leda till intressanta utslag relaterade till materialegenskaper.
Avbrott i drift?	Metoden kräver inget avbrott i drift.
Rensning av ledningar?	Ingen spolning behövs före eller efter undersökning.
Uppgrävning?	Metoden kräver ingen uppgrävning.
Faktorer som påverkar resultat?	De faktorer som påverkar resultaten kan vara vilken jordtyp som ledningarna ligger i och om det ligger andra ledningar i närheten. Signalerna från markradar kan dämpas helt om ledningen ligger i lera. Men mycket beror på om det är marin-lera med mycket salt joner eller kontinental-lera och på vilka mineraler leran innehåller. Roberto Grassi på Gradar berättar att lera med tjäle har fixerade joner som rör sig betydligt långsammare. Då ökar resistiviteten och radarsignalerna kan reflekteras tillbaka.
Information från metoden?	Den information som går att få ut med GPR kan vara riskområden där det pågår eller finns risk för korrosion. Läckage från vattenledningar har detekteras med GPR under förutsättningen att omgivande område är torrare i relation till läckan. Läckage från plastledningar är under de här omständigheterna möjliga att lokalisera.
Kostnad?	Kostnaden för en dags mätning brukar ligga mellan 12 000-15 000kr (Gradar) men det beror helt på hur stora områden som ska scannas av.
Insatser från ledningsnätägare?	De insatser som krävs från ledningsnätägarna är att bistå med underliggande data om var ledningen går, på vilket djup ledningen ligger och fyllnadsmaterial. Ingen extrapersonal från bolaget krävs vid undersökningar.
Vilka ledningsmaterial?	Alla rörmaterial. Från DN 100 och uppåt.
Fjärrvärme?	Metoden fungerar även på fjärrvärmeledningar.

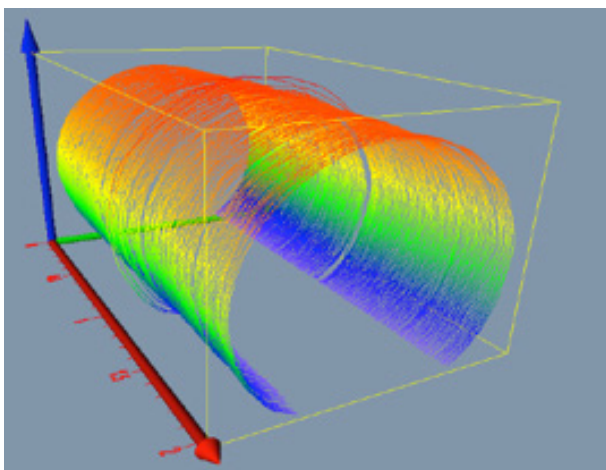
4.5 Piperadar

I en artikel från 2013 ges det en beskrivning av Piperadar, vilket är ett instrument för statusbedömning av avloppsledningar. Instrumentet är ett exempel på hur radartechniken kan användas till att statusbedöma icke-metalliska ledningar, som t.ex. plastledningar. Piperadar används till ledningar med diameter mellan 450–900 mm där den bär två radarantennar, se bild 15. Metoden fungerar endast på icke metalliska ledningar och tekniken går ut på att använda två eller fler högfrekventa GPR-antennar som scannar av ledningsväggarna [27].



Figur 4.6 Robot som kan inspektera icke-metalliska ledningar som betong och plastledningar inifrån ledningen. Radar utgör en del av lösningen då radarn fångar upp godstjocklek och slitningar [27].

Roboten använder sig av olika funktioner som radar, laser, CCTV och ekolod för att undersöka deformationer, godstjocklek, hål, skicket på det armerade skyddet och håligheter i jorden utanför ledningen. Informationen från CCTV kombineras med data från radarinspektionerna. LIDAR funktionen är mätningar med laser som karakteriserar ledningens inre vägg och eventuella deformationer. Lasern roterar för att kunna samla in data om ledningens geometriska utseende. Data jämförs med ursprunglig data om ledningens utseende från tillverkarens specifikation. LIDAR kombineras med ett navigationssystem som kartlägger ledningens position i en tre dimensionell axel [27].



Figur 4.7 Deformationer på plastledningar kan detekteras genom roterande laser. Bilden är genererad från laserdata [27].

De två högfrekventa radarantennerna roterar från klockans 9 position till 3 position. Varje antenn har sin egen kanal som skickar och tar emot signaler. Fördelen med detta är att om det blir något utslag vet man att det ligger på den del av röret som just den antennen har scannat av. Antennerna tillförser med en kontinuerlig avläsning av ledningens godstjocklek, armerat skydd och eventuella hål och undermineringar i marken utanför ledningen.

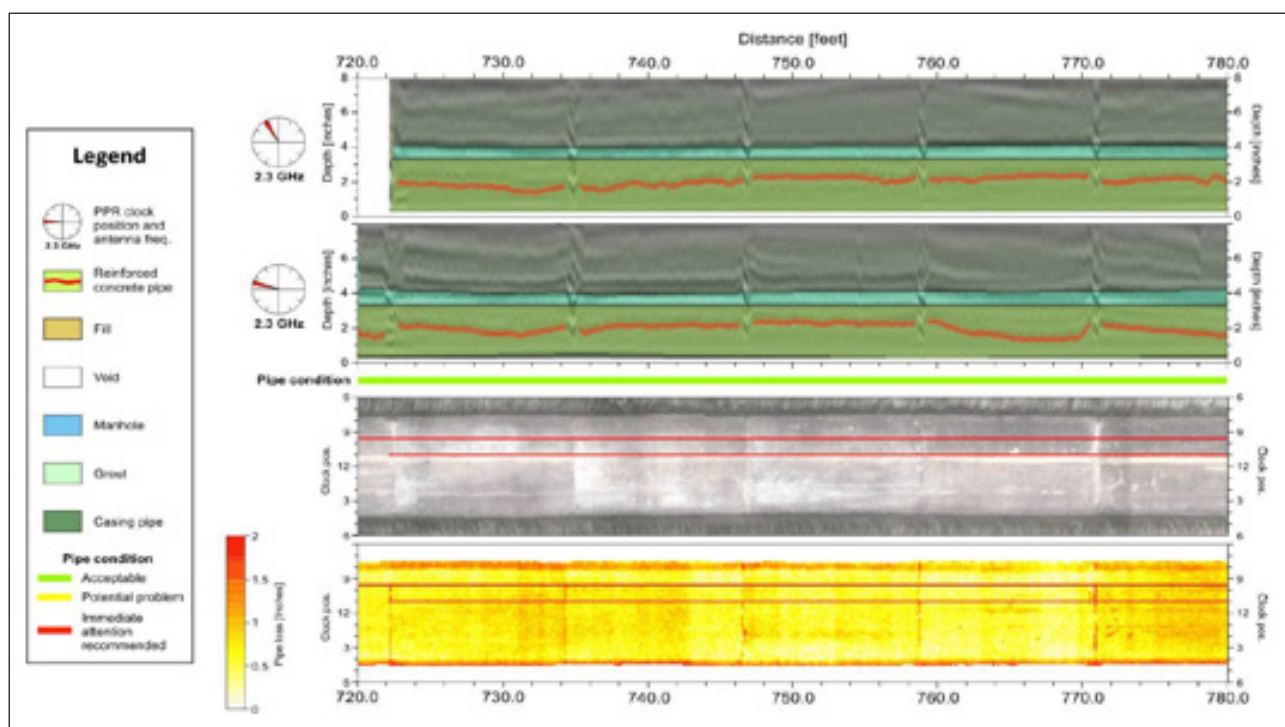


Diagram 4.2 Översikt på resultat från en scanning av en betongledning med en diameter på ca 700 mm. Den översta bilden är en radarscanning med en 2,3 GHz antenn från "klockan elva" position. Godstjockleken markeras med en svart linje och armeringen markeras med röda prickar som bilda en röd linje. Data från radarinspektionen visar på variationer i godstjockleken och i armeringens placering i betongen. Den andra bilden är också data från radarsignaler men här är antennen placerad i "klockan halv tio" position. Den gråa bilden är CCTV inspektionen och den gula är LIDAR undersökningen som markerar uttunnning av ledningsväggen. Konditionen på betongledningen bedömdes som god [27].

Piperadar presenteras som en ny lovande metod för statusbedömning där radarfunktionen ger ett unikt bidrag till att ge en tillförlitlig diagnos på ledningen. Piperadar är ett exempel på hur radar kan komma till nytta genom invasiv inspektion då radar klarar att inspektera icke-metalliska ledningar och ge en bild på statusen [27].

5 Resistivitet

Resistivitetsmätning är en metod som används för att bedöma den elektriska ledningsförmågan i marken. Marken genererar alltid en liten spänning eftersom den innehåller mineraler som är strömledande. Jordens strömledningsförmåga går att detektera genom att placera två elektroder i marken och en voltmätare emellan dem där man kommer att kunna avläsa en spänning.

Om den ena elektroden flyttas runt, kan den detektera spänningar av varierande grad. Detta beror på att marken innehåller olika typer av bergarter och ansamlingar av olika typer av vatten som t.ex. sötvatten, bräckt vatten eller kontaminerat vatten med olika mineralinnehåll. Därmed kommer marken att uppvisa olika grader av strömledningsförmåga som kallas för självpotential eller spontan potential. Genom metoden går det även att upptäcka underjordiska håligheter som t.ex. slukhål eller gruvhål och det är möjligt eftersom när vatten flödar in och ut ur ett hålrum uppstår det förändringar i spänningen. Metalliska objekt är också möjliga att detektera, skulle det t.ex. ligga korroderande skrot inne i en hålighet, då kommer den elektriska potentialen att stiga [28].

Resistivitetstekniken går ut på att man skickar ström i marken och iakttar jordens ledningsförmåga, dvs. dess konduktivitet. Flödet av elektroner mellan mineraljonerna utgör den elektriska konduktiviteten. Konduktiviteten beror på jonernas rörlighet, vad för typ av jon det är och deras koncentration.

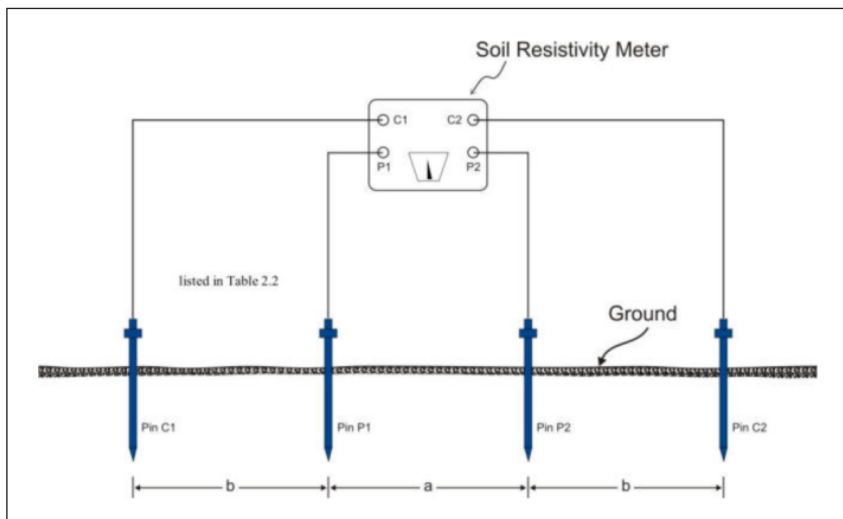
Genom resistivitetsmätningar går det alltså att avgöra hur korrosionsbenäget en mark är och hitta samband mellan yttre korrosion på ledningar och markförhållanden. Jord som har en låg konduktivitet uppvisar en hög resistivitet och sand är ett exempel på en sådan jordtyp. Sand uppvisar en hög resistivitet och är minst korrosiv. Lera har en låg resistivitet och är mycket korroderande, speciellt om saltvatten finns närvarande. Resistiviteten i marken sjunker ju mer närvaro av vatten och joner det finns, se tabell 3 [28].

Tabell 5.1 Översikt över resistiviteten i olika jordar och relationen till jordens korrosivitet [29].

Jordens Resistivitet (ohm/cm)	Graden av jordens korrosivitet
> 20 000	Icke korrosivt
20 000 - 10 000	Mild korrosivt
10 000 - 5 000	Måttligt korrosivt
5 000 - 3 000	Korrosivt
3 000 - 1 000	Mycket korrosivt
< 1 000	Extremt korrosivt

En uppsättning som kallas Wenner Array är en vanlig uppsättning av elektroder när man utför resistivitetsmätningar vid nergrävda ledningar. Det innebär att man använder sig av fyra elektroder som sticks ner i marken bredvid varandra i en rak linje. Avståndet mellan elektroderna ska vara lika långa och resistiviteten uppmäts genom en resistivitetsmätare. Ju längre

avståndet mellan elektroderna, desto djupare i jorden uppmäts resistiviteten. Och omvänt gäller, ju närmre elektroderna står varandra, desto ytligare sker mätningen [29].



Figur 5.1 Wenner four-pin uppsättningen [29].

Växelström tillsätts mellan elektroderna C1 och C2 (se figur 5.1) och potentialen mäts sedan mellan elektroderna P1 och P2 som kan avläsas i mätaren. Mätaren beräknar resistiviteten enligt ekvationen $\rho = 2 AR$, där ρ är markens resistivitet i ohm/ centimeter, A är avståndet mellan elektroderna i cm, R är resistansen i jorden uppmätt i ohm. Värdet som beräknas är ett medelvärde på resistiviteten för det djup som har uppmäts. Det är lämpligt att placera elektroderna minst 4,5 m från närmsta metalliska ledning för att undvika att ledningen tar upp ström från elektroderna och påverkar resultatet [29].

5.1 Studier om statusbedömning

En hypotes är att det kan vara möjligt att detektera pågående korrosion genom resistivitetsmätningar. Vid korrosion pågår det ett flöde av elektroner och det bildas mineraföreningar i närliggande jord, kanske i en högre dekonterbar koncentration. En möjlighet kan vara att använda sig av Inducerad Polarisation, (IP), vilket är en metod som används till att kartlägga var höga och låga halter av mineraler finns för att detektera olika bergarter [30].

Under en mätning skickas det ner ström i jorden varefter tiden för hur länge det tar för den uppladdade spänningen att klinga av mäts upp. Mineraler i jorden kommer att laddas upp med spänning och kommer lagra spänningen för en tid. Mätningar på urladdningen sker med jämna tids mellanrum och en kurva över urladdningsprocessen registreras. Ju högre koncentration av mineraler, desto längre tid tar det för dem att urladdas [30].

En studie från Nigeria utgör ett exempel på där man använde resistivitetsmätningar och mätningar av självpotential för att statusbedöma en nergrävd oljeledning. Oljeledningen låg i Ubeji Delta State och projektets mål

var att detektera områden kring ledningen där det pågår eller finns stor risk för korrosionsangrepp. Man använde sig av Wennermetoden där avståndet mellan elektroderna var ca 10 meter för att undersöka omgivande jord kring ledningen som låg nergrävd på ca 3 m. Sträckan som uppmättes var 250 m lång. Mätningarna utfördes i ett område som beskrivs som säsongmässig sumpskog där sedimenten i marken utgörs av sand, silt och stenar [30].

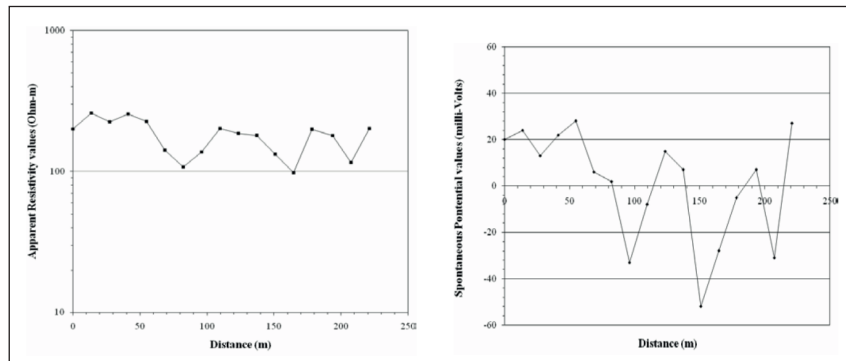


Diagram 5.1 och 5.2 uppvisar resultat från resistivitets- och självpotentialmätningar. Till vänster ser man tre punkter där resistiviteten sjunker ner till mellan 98,0 och 116,0 Ohm/m och det innebär att dessa områden har en hög konduktivitet. Till höger visas likaså tre punkter med värden som ligger mellan -31 och -52 mV. Punkterna sammanfaller på båda diagrammen ungefär vid samma platser längs ledningen och beskrivs i rapporten som anodiska områden där järnjoner går ut från ledningen till omgivande jord och avger elektroner [31].

Resultaten tolkades som områden längs ledningen där det finns stor risk för korrosionsangrepp och ledningshaveri i framtiden (se diagram 5.1 och 5.2). Resistiviteten på de här platserna är likvärdiga miljöer med fuktig lera som är extrem korrosiv (se tabell 5.1). Resistivitetsmätning uttrycks i studien som användbar för detektering av pågående/begynnande korrosion och som en proaktiv metod för att kunna ingripa innan ledningen havererar. Man föreslår rutinkontroller med metoden för att undvika haverier [29]. Ett annat exempel på att dessa metoder bär på potential för att detektera korrosion är Southwest Research Institute i USA som har tagit fram en patenterad korrosionshastighetsmätare för ytkorrosion på nergrävda ledningar med katodskydd [32].

I en avhandling från Torontos Universitet utkommen år 2000, undersöktes relationen mellan omgivande jord och yttre korrosion på dricksvattenledningar i gråjärn. Prover togs både från ledningar och från omgivande jord där viktiga parametrar studerades såsom pH, resistivitet och sulfatreducerande bakterier. Provbitar blev uttagna från gråjärnledningar och togs ut från ställen där ledningen hade läckage och där reparationer har skett. Av alla provbitar hade 73 % utsatts för yttre korrosion, vilket indikerar på att yttre korrosion utgör en betydande faktor för försämrad status på den yttre delen av en ledning [33].

Resistivitet, pH och sulfatreducerande bakterier studerades individuellt för att uppskatta hur pass mycket de var för sig kunde kopplas till korroderade ledningar. I studien kunde man konstatera att yttre korrosion hade en starkast relation till jordens resistivitet. Man tittade på korrosionshastigheten

och kunde se att korrosionshastigheten på gråjärnsledningar sjönk när resistiviteten ökade. Sambandet stämde för båda provtyperna från ledningarna.

Man såg att sambandet tog sig bäst i uttryck som en logaritmisk regressions linje som uppvisar hur den yttre korrosionshastigheten signifikant ökar när resistiviteten går ner under 2 500 ohm/cm (diagram 5.3). Mellan 0–500 ohm/cm var medelhastigheten för korrosion 0,11 mm/år, från 1 500–2 000 ohm/cm sjönk hastigheten till hälften 0,058 mm/år och mellan 2 500–3 000 ohm/cm sjönk hastigheten sju gånger [33].

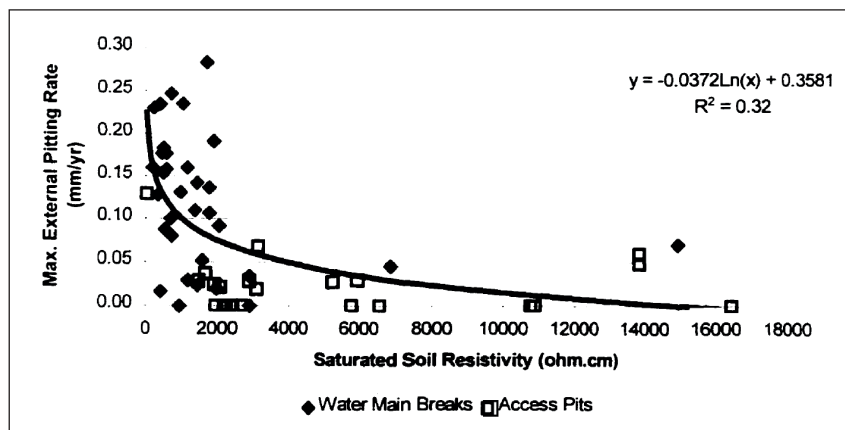


Diagram 5.3 Diagrammet illustrerar sambandet mellan jordens resistivitet och korrosionshastigheten på nergrävda gråjärnsledningar [33].

5.2 Sammanfattning Resistivitet

Tabell 5.2 Sammanfattning av metoden

Proaktiv metod?	Metoden kan räknas som en proaktiv metod. Potential finns att detektera korrosiva jordar, punkter där det sker korrosion på ledningarna eller där risken är stor för korrosionsangrepp. Man kan även detektera vattenansamlingar. Metoden kan även tänkas detektera skador på isolerande ytbeläggningar.
Avbrott i drift?	Metoden avbryter inte drift.
Rensning av ledningar?	Metoden kräver ingen spolning före eller efter mätning.
Uppgrävning?	Metoden kräver att hål borras vid asfalterade ytor för att få ner elektroderna. Med detta krävs det att trafik stängs av.
Faktorer som påverkar resultat?	I städer kan det vara svårt att använda resistivitetsmätningar då omgivande ledningar, marklager och andra okända faktorer kan störa och påverka resultatet.
Information från metoden?	Den information som metoden ger är översikt över geologiska strukturer, utbredning av olika geologiska material, mineralinnehåll i jorden, vattenansamlingar, slukhål. Områden med hög risk för korrosion eller pågående korrosion. Övervakning av läckage (lakvatten, vägsalt, etc.)
Kostnad?	Kostnaden för resistivitetsmätningar över en dag ligger på ca 30 000 kr. Mellan 2 400 – 6 000 kr/100 m mätning.
Insatser från ledningsnätägarna?	De insatser som krävs från ledningsnätägare är att ta fram dataunderlag om ledningen och google earth karta. Ledningsnätägarna behöver kommunicera med kommunen för att planera borring på asfalterade ytor och organisera lagning av hålen. Kommunicera med trafikverket för avstängning av trafik på gator och vägar. Det kan t.ex. inte stå parkerade bilar ivägen
Ledningsmaterial	Inte beroende av rörmaterial. DN 100 och uppåt
Fjärrvärme?	Metoden går att använda på fjärrvärmeledningar

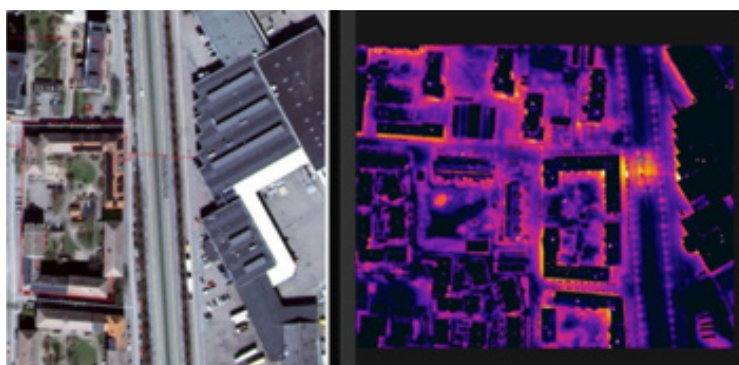
6 IR-teknik

IR-tekniken (infraröd teknik) är en teknik där en värmekänslig kamera kan visualisera hur varma olika objekt är och deras gradskillnader. Värmen som olika objekt avger kallas för infraröd strålning och ligger i våglängdsområdet 0,75 nm – 1 mm på det elektromagnetiska spektrumet. Den här typen av ljus är osynligt för det mänskliga ögat eftersom vågorna är för långa och ljuset upplevs istället som värme. Infraröd strålning värmer upp olika slags objekt där strålningen absorberas och alla objekt som ligger över den absoluta nollpunkten på $-273,15^{\circ}\text{C}$ avger infraröd strålning [34]. Ju varmare ett objekt blir, desto mer infrarött ljus avger den. En IR-kamera fångar upp den infraröda strålningen och omvandlar informationen till elektriska signaler. Signalerna processas vidare till en bild som avbildar strålningen och dess variationer [35].

6.1 Flygburna mätningar på fjärrvärmenät

I fjärrvärmebranschen används flygtermografering för att söka läckor över stora områden på ett fjärrvärmenät. Detta är möjligt eftersom temperaturen på fjärrvärmevatten kan ligga någonstans mellan $75\text{--}110^{\circ}\text{C}$ och omgivande mark har en temperatur (i Sverige) på $8\text{--}13^{\circ}\text{C}$. Flygningarna brukar äga rum under natten för att temperaturskillnaden ska bli så stor som möjligt mellan omgivning och fjärrvärmevattnet [36] (figur 6.1).

De förberedelser som måste genomföras före en flygning är en planering på hur många kilometer ledningar som man vill undersöka där man går igenom flygstråk, flyghöjd och hastighet. IR-kameran monteras fast inne i ett flygplan tillsammans med datorer för lagring av data och bilder. De områden där bolaget vill ta bilder markeras och flygplanets GPS-system förprogrammeras att vid specifika positioner skicka signaler till IR-kameran för fotografering. Positionen registreras i datasystemet, liksom flygplanets position och vinkel för varje bild under flygningen. Nere på marken kan sensorer placeras ut på strategiska platser som mäter luftens temperatur, marktemperatur och värmestrålningen.



Figur 6.1 Termografering: Läckagedetektering med flygfotografering på fjärrvärmeledningar [37].

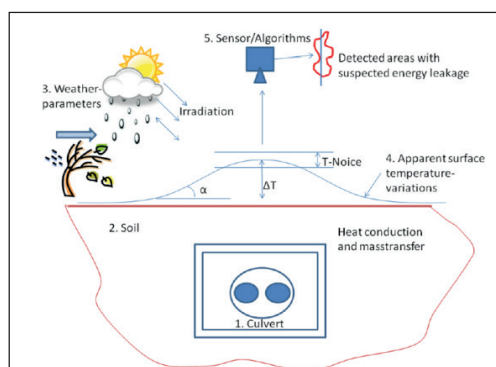
6.2 Utvecklingspotential

I rapporten ”Kvantifiering av värmeläckage genom flygburen IR-teknik” från Fjärrsyn bedöms utvecklingspotentialen för flygburen IR-teknik som stor för läcksökning på fjärrvärmeledningar. Flygtermografering med IR-kamera har från 1990-talet utvecklats mycket där upplösningen har förbättrats avsevärt. Idag är det möjligt att se enskilda individer på en bild tagen från 800 meters höjd (se figur 6.2) [37].



Figur 6.2 Bildserie som uppvisar utvecklingen med flygtermografering. De två första bilderna är från 1990 och 2006 och är tagen från samma position med en höjd på 600–800 m. Den sista bilden från 2012 är tagen från 800m höjd över torget i Örebro och där kan man tydligt se individer [37].

Idén finns att kunna möjliggöra kvantifiering av fjärrvärmeläckorna och uppskatta deras kostnader för att underlätta för bolagen att göra prioriteringar. Idag pågår utveckling av algoritmer som kan urskilja riktiga läckor från falska utslag. Vid stora utläckage på fjärrvärmenäter är det lätt att detektera läckorna men det är inte lika lätt att detektera de mindre läckorna eftersom de är svårare att urskilja från falska larm med förhöjd marktemperatur. Förhöjda marktemperaturer kan orsakas av andra källor än fjärrvärmeläckage och för att kunna få en bättre förståelse krävs det erfarenheter från andra studier, datorsimuleringar, data från ett stort antal mätningar på fjärrvärmenät under olika förhållanden och kartläggning och analys av de viktigaste faktorerna som påverkar markytans temperatur (se figur 6.3) [37].



Figur 6.3 Överblick på olika faktorer som påverkar resultatet med flygtermografering. Det är parametrar som fukthalt i marken, jordtyp, nederbörd, vindförhållande, fjärrvärmeledningarnas dimension, läggningsdjup och fyllnadsmaterial. Det är viktigt att få en förståelse hur parametrarna samverkar för att kunna genomföra en god kontroll av läckor i ett fjärrvärmenät [37].

Att ta fram algoritmer för igenkänning av falska utslag är även nödvändigt när det gäller att hantera all data som genereras under en flygning. Upp emot tiotusentals bilder kan bli tagen med kameran, vilket gör det omöjligt för operatören att analysera alla bilder. Algoritmer och ett nytt system behövs som kan gå igenom alla bilder och detektera alla troliga läckor för att underlätta analysarbetet [37].

6.3 Möjligheter för vattenledningar

Det kan finnas potential med metoden att detektera vattenläckor eftersom fukt i marken har förmågan att behålla värme kvar en längre tid än torr jord. Vid solnedgång när allt kyls ner, kommer värmen alltså att stanna kvar på de områden där fukt finns. Läckor kan på så sätt detekteras, förutsatt att jorden vanligtvis inte innehåller stora mängder fukt. En idé är att utföra flygtermografering vid solnedgång för att detektera den värmen som fukten behåller. Fördelen med en sådan här metod är att stora områden av ledningsnät kan bli undersökt på en gång. En bra idé är att utföra undersökningarna på vintern då det kommer bli större kontrast mellan läckage och marken [38].

6.4 Sammanfattning IR-teknik

Tabell 6.1 Sammanfattning av metoden

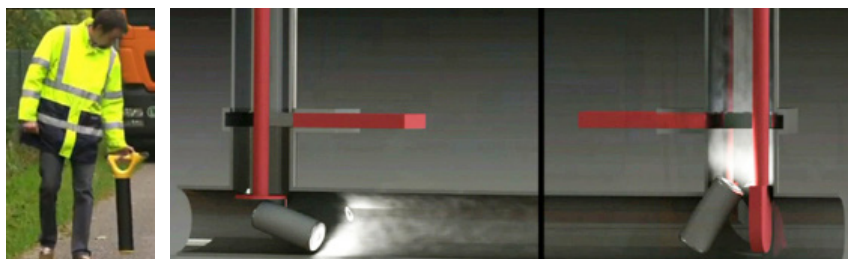
Proaktiv metod?	Metoden är inte en proaktiv metod utan kan potentiellt endast detektera utläckage.
Avbrott i drift?	Metoden skulle inte kräva något avbrott i driften.
Rensning av ledning?	Metoden kräver ingen spolning före eller efter undersökning.
Uppgrävning?	Metoden kräver ingen uppgrävning.
Faktorer som påverkar resultaten?	De faktorer som kan påverka resultatet är temperaturen, vindförhållanden, tid på dygnet då mätningen utförs, fukthalt i marken, jordtyp, ledningarnas dimension och läggningsdjup. Även fyllnadsmaterial spelar roll. Växtlighet kan skymma sikten på fotografierna.
Information från metoden?	Den information som metoden ger är en stor överblick på möjliga läckage över stora delar av ett ledningsnät. Potentiellt kan man även avgöra storleken på läckorna.
Kostnad?	Kostnaden för att kartlägga, inhämta all data och genomföra en komplett analys med tillhörande leverans, pss som för fjärrvärme, kostar för kund ca 0,7-1 kr per meter rör. En stad med 50 mil rör skulle då få betala cirka 400 000 - 500 000 kr.
Insatser från ledningsnätsägare?	Inga insatser skulle krävas av ledningsnätsägarna.
Ledningsmaterial?	Inte beroende av rörmaterial men mindre dimensioner ger för små temperaturskillnader.
Fjärrvärme?	Metoden används idag på fjärrvärmeledningar.

7 Visuell metod

Pipe Inspector är en flytande, sladdlös och batteridriven kamera som inspekterar vattenledningar i dimensionerna DN50–DN3000. Kameran följer med vattenflödet och med ett fulladdat batteri kan kameran inspektera upp till 150 km ledningar under en enda dag. Undersökningen kräver inget avbrott i driften. Kameran har HD kvalitet med LEDS och har en inbyggd läckljuds upptagning som detekterar och lokaliserar läckor på en felmarginal på ± 1 m oavsett rörmaterial. Pipe Inspector har förmågan att utföra längdmätning inne i ledningen som möjliggör en mer exakt lokalisering.

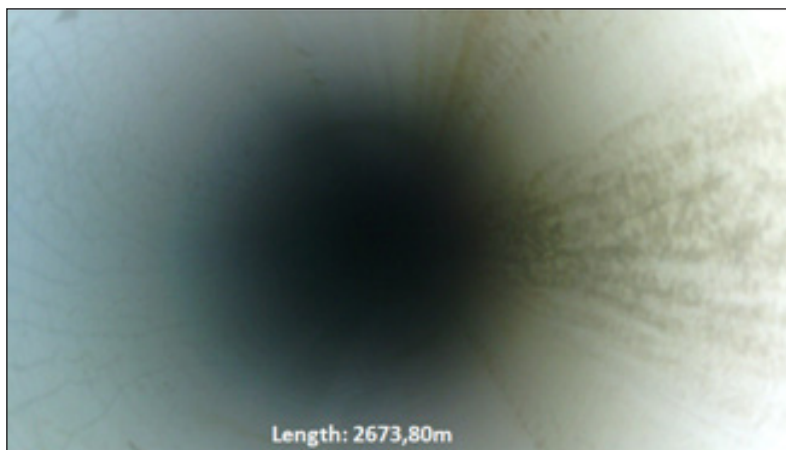
För metalledningar kan inspelningen ta upp ljud från läckor på 10 l/h och hos PE från 50 l/h vid 5 bar. Läckljuds upptagningen störs inte av andra ljud från ledningarna eller större diameter på ledningen. Kameran klarar av 90-gradersböjar och tryck upp till 100 bar.

Andra funktioner som kameran har är även en konstant mätning av tryck, turbiditet, konduktivitet och temperatur under hela mätningsprocessen. Med metoden får man även uppgifter om kopplingar, skarvar, toppar och lågpunkter. Metoden kan kräva rensning av ledningen före och efter undersökning. Det går även att spåra kameran (och ledningen) genom marken [39].



Figur 7.1 och 7.2.

Pipe Inspector kameran går att spåra från marken vid undersökningar i plastledningar. Kameran kräver en "t-ventil" för att få in den och kunna plocka ut den ur ledningen. T-ventiler måste finnas integrerat i ledningsnätet eller anbringas för att man ska kunna genomföra undersökningen [39].



Figur 7.3 Bild från en Pipe Inspector undersökning. Kameran kan utföra längdmätning från startpunkt och ge exakt lokalisering av läcka med en felmarginal på ± 1 m [40].

7.1 Sammanfattning Pipe Inspector

Tabell 7.1 Sammanfattning av metoden

Proaktiv metod?	Möjligtvis en proaktiv metod då kameran filmar insida av vattenledningar. Filmning kan ge information om skador på ledningsväggen om skadan ligger synlig. Tyvärr kan sediment och lagringar längs väggarna dölja sprickor och korrosion.
Avbrott i driften?	Metoden kan kräva att man får öka flödes hastigheten om det finns risk att kameran kan fastna. Detta kan orsaka upprivning av sediment och påverka vattenkvaliteten. Ventiler till avgreningar måste stängas av.
Rensning av ledningen?	Metoden kan kräva spolning både före och efter undersökning.
Uppgrävning?	Metoden kan kräva uppgrävning om det inte finns två anordningar på ledningen där det går att få in och få ut kameran på. Då måste nya öppningar installeras.
Faktorer som påverkar resultaten?	De faktorer som kan påverka resultatet är sättningar i ledningen eller andra oförutsedda föremål som kan stoppa kameran. Om kameran skulle fastna någonstans, kan man försöka få loss den genom att öka flödet. I värsta fall får man gräva och plocka ut den.
Information från metoden?	Den information som kameran ger är en visuell bild på hur ledningen ser ut på insidan. Kameran spelar in läckljud när den passerar läckan och ge en exakt lokalisering av läckan (± 1 m). Kameran mäter kontinuerligt under undersökningen parametrar som konduktivitet, turbiditet, temperatur och tryck. Kameran utför även exakt längdmätning för hur långt den har åkt.
Kostnad?	Kostnaden för en mätning ligger från 5 500 EURO för en mätning.
Insatser från ledningsnätägarna?	De insatser som krävs från ledningsnätägarna är att bistå med underliggande data om ledningen, fylla i checklista för förberedande arbete. En person från bolaget behövs ute på fält.
Vilka ledningsmaterial?	Alla rörmaterial, DN50-DN3000
Fjärrvärme?	Metoden går att använda på fjärrvärmeledningar vid temperaturer $< 80^{\circ}\text{C}$.

8 Indikationstrådar

Företaget Wideco har utvecklat en ny metod för läckdetektering hos dricks-vattenledningar vilket möjliggör en snabb detektering och informering via sms och email i realtid [39]. Metoden är framtagen från fjärrvärmeindustrin där läckage på fjärrvärmeledningar detekteras via resistansmätningar. Indikationstrådar av koppar, s.k. larmtrådar ligger ingjutna i de preisolerade fjärrvärmeledningarna och vid fukt kommer det ske en överledning av ström mellan trådarna p.g.a. konduktiviteten ökar i PUR-isoleringen. PUR-isoleringen har en hög resistans vid torrt tillstånd som snabbt sjunker vid in- eller utläckage av vatten. Den metoden kallas specifikt för isolationsresistansmätning [42].

Indikationstrådarna brukar ligga med en jämn fördelning i fjärrvärmenätet och gjuts in i isoleringen kring de olika komponenterna som fjärrvärmerör, rörböjor, avgreningar mm. När komponenterna sätts ihop, skarvas även koppartrådarna ihop. Isolationsresistansmätningen detekterar dock endast att fukt finns närvarande någonstans på ledningen. Den ger ingen information om det finns fler än en läcka eller var exakt läckan finns [43].



Figur 8.1 Fjärrvärmeledningar med isolering runt om som fångar upp eventuell utläckage eller inläckage till ledningarna. I bilden syns även koppartrådarna som används till att detekterar fukt [42].

Dessa indikationstrådar är normalt inkopplade till ett mätsystem, ofta kallat övervakningssystem, där fjärrvärmeledningarna är indelade i sektioner med relativt korta indikationstrådar med var sin övervakningsenhet (detektor). Många mätsystem kombinerar resistansmätningar med pulsekometoden för att även kunna lokalisera läckan [45].

8.1 Pulsekometermetoden

Vid lokalisering av läckan använder man sig av pulsekometermetoden vilket innebär att en elektrisk signal skickas ut längs koppartrådarna. Där det finns en störning på larmtråden eller en förändring av isoleringens egenskaper

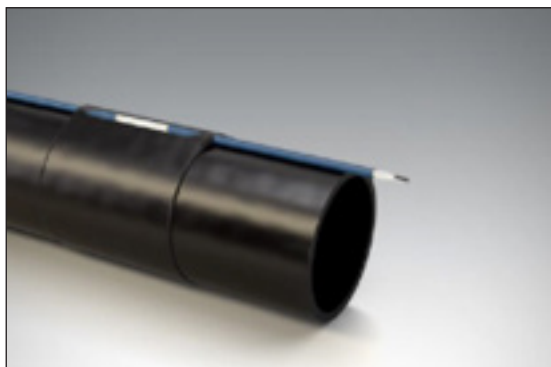
som t.ex. fuktig isolering, kommer en del av pulsen att reflekteras tillbaka till instrumentet [45].

De två parametrar som är utmärkande för pulsekometer tekniken är den karakteristiska impedansen och vågutbredningshastigheten. Reflektionerna uppmäts med en hög tidsupplösning och registreringen kan visas som en kurva. Genom att man redan känner till vågutbredningshastigheten kan metoden räkna ut var reflektionen kommer ifrån, d.v.s. avståndet till fuktstället. Signalen kan ha två typer av utseende, den kan finnas i formen av en puls eller som en flank. Pulsen har egenskapen av en halv sinusvåg och genom att moderera pulsen kan räckvidden ändras – lång räckvidd och låg upplösning eller kort räckvidd och hög upplösning. Flanken kan beskrivas som en fyrkantsvåg med kort stigtid och bibehållen toppspänning hela den inställda mätperioden för att därefter återgå till ursprungsnivån. Båda fallen innebär att förändringar i kretsens karakteristiska impedans registreras, men med olika typer av reflexer.

Resistansmätningar ger alltså indikation på när det finns fukt mellan larmtråd och medieröret och pulsekometer metoden ger en lägesbestämning av var fukten finns utmed ledningen. [43].

8.2 Widetect Water

Widetect Water är ett övervakningssystem för vattenledningar där sensor-kabeln W3 monteras fast direkt på vattenledningen. Där det finns risk för läckage som t.ex. vid stumsvetsar och elsvetsmuffar, öppnas W3-kabelns hölje och vid läckage kommer den öppna delen detektera fukt och detektorn skicka iväg alarm.



Figur 8.2 Widetect 3 sensorkabel W3 [39].

På de ställena man vill bevaka läckage, som t.ex. skarvar, där öppnas kabeln för att kunna detektera och lokalisera fukt. Tyvärr går det inte att bevaka läckage över en hel ledningssträcka utan systemet är utformat att endast vara öppnade på specifika punkter. Information om läckage får ledningsnätsägaren i realtid i form av sms [39].

Vid de ställen där W3-kabeln är öppen läggs ett skydd över för att förhindra att omgivande vatten tränger in och ger falsklarm. Skyddet utgörs

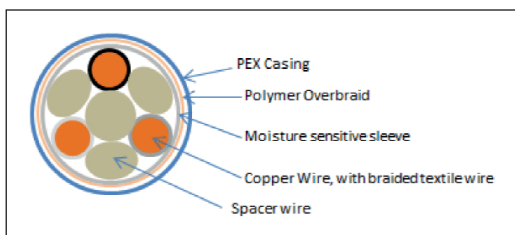
av ett krympsvep som värms upp tills den börjar krympa och den inbyggda mastiken smälter och klibbar fast på ledningen [46].



Figur 8.3 Ett krympsvep täcks över där kabeln är öppnad. Den värms upp så att den smälter och fastnar på ledningen [41].

W3-kabeln fungerar alltså på samma sätt som larmtrådarna för fjärrvärmeledningar. I den öppnade W3-kabeln blottläggs den inre delen innehållande tre koppartrådar där en överledning kan ske mellan dem om de utsätts för fukt. Resistansen mellan koppartrådarna kommer alltså att sjunka då det sker utläckage av dricksvatten ifrån ledningen. WiDetect Water systemet innehåller även pulsekometer tekniken som skickar ut växelströmpulser för lokalisering av läckan. Vid detektering kommer reflektionsvågor visualiseras på en skärm (pulsekometerkurva).

Med datorprogrammet tas en referenskurva när ledningen är nyinstallerad och W3-kabeln är torr. Denna referenskurva används till att justera gränser för larmdetektering. En detektor kan bevaka skarvar över en ledningssträcka upp till 2 km och det går att justera hur ofta som systemet ska göra mätningar [46].



Figur 8.4 W3 kabel med koppartrådar för mätning av resistans och pulsekometer [41].

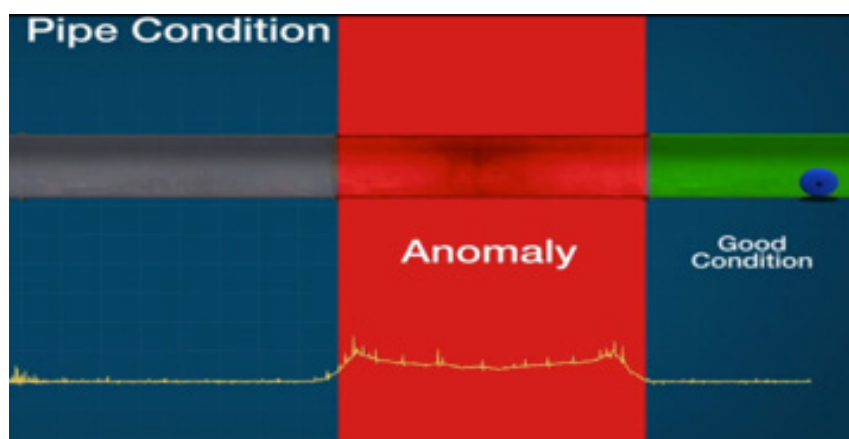
8.3 Sammanfattning Widetect Water

Tabell 8.1 Sammanfattning av metoden

Proaktiv metod?	Metoden är inte en proaktiv metod utan detektera läckage men metodens styrka ligger i att kunna larma i realtid och informera om läckor. Den informationen är värdefull på ledningar där läckor kan orsaka stora störningar i samhället.
Avbrott i drift?	Metoden kräver inget avbrott i drift.
Rensning av ledningar?	Metoden kräver ingen spolning av ledningen.
Uppgrävning?	Det går inte att installera indikationstrådar på redan nergrävda ledningar utan installation kan endast ske på nya ledningar som ska läggas ner eftersom trådarna måste dras över en hel ledningssträcka. Uppgrävning kan bli aktuellt om någon skada skulle uppstå på utrustningen, t.ex. på skyddshöljet.
Faktorer som kan påverka resultaten?	De faktorer som kan påverka funktionen skulle kunna vara sådant som försvårar eller förhindrar övervakningen t.ex ett dåligt montage skulle kunna ge falsklarm som skulle kunna ödelägga systemet. Skador på kabeln kan också påverka.
Kostnad?	Kostnaden för inskaffa Widetect 3 är idagsläget inte ännu fastställt.
Insatser från ledningsnätsägare?	De insatser som krävs från ledningsnätsägarna är att under rörinstallation montera W3 kabeln på röret, öppna kabeln på intressanta ställen och försluta dessa med krympmanschett/vulktejp. Efter installation och idrifttagning sköter sig systemet i princip själv. Läckage meddelas av larm via SMS/e-post.
Vilka ledningsmaterial?	Alla rörmaterial, alla dimensioner
Fjärrvärme?	Metoden används idag på fjärrvärmeledningar. Klarar högst 80 grader på vattnet.

9 Läckljudsupptagning och magnetometer

Pure Technologies har kommit ut med Smartball PWA (Pipe Wall Assessment). I den här versionen ingår förutom läcksökning även statusbedömning av ledningsmaterialet. Statusbedömningen sker genom detektering av ett fenomen som kallas för Villarieffekten i ledningsväggen. Villari-effekten innebär att metall under stress förlorar sin magnetism och detta orsakar att magnetfältet börjar fluktuera. En magnetometer är integrerad i Smartball som scannar av förändringar i rörväggens magnetfält [48].



Figur 9.1 Smartball PWA detekterar både läckor och stress i ledningens vägg. Där förändringar detekteras hos ledningsväggen markeras detta parti för närmre undersökning. Metoden kan urskilja individuella ledningssträckor eftersom den detekterar alla skarvar [48].

Smartball PWA har förmågan att detektera korrosion, gropar och sprickor om de är stora nog att orsaka störningar i magnetfältet. Magnetometern detekterar även alla fogar, ventiler, reparationer i materialet och även skador på ovasidan av ledningen. Partier där korrosion eller annan stress i rörväggen har detekterats märks ut för uppföljande mätning. Smartball PWA spelar även in läckageljud och finlokaliserar läckan [48].

9.1 Sammanfattning Smartball PWA

Tabell 9.1 Sammanfattning av metoden

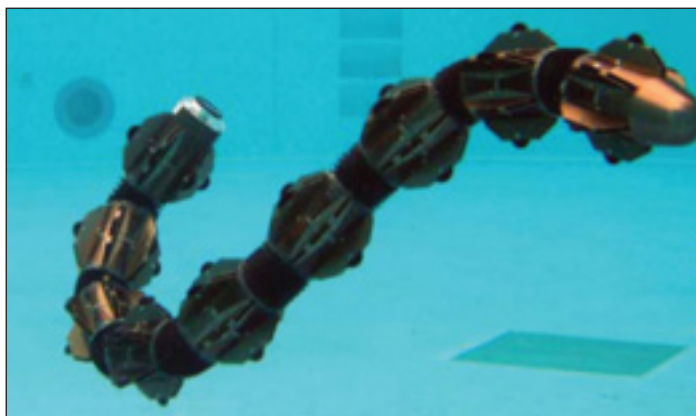
Proaktiv metod?	Metoden är delvis proaktiv då den ger viss information om stress i ledningsmaterialet och kan lokalisera var dessa punkter finns.
Avbrott i drift?	Metoden kräver oftast inget avbrott i drift.
Rensning av ledningar?	Metoden kan kräva spolning före och efter undersökning, då sediment riskerar att röras upp.
Uppgrävning?	Metoden kan kräva uppgrävning och installation av öppningar om det inte finns bra åtkomstpunkter där man kan få in bollen. Sensorer måste placeras mellan 1 km mellanrum längs ledningen och det kan innebära uppgrävningar. Oftast går det att lösa med befintliga åtkomstpunkter.
Faktorer som kan påverka resultaten?	De faktorer som kan påverka undersökningen kan vara risken för att bollen kan fastna och då kan man få tillfälligtvis öka flödes hastigheten för att få igenom bollen vid trånga utrymmen. Det är även viktigt att ha bra dataunderlag, genomföra grundlig planering och ventilkontroller för att undvika problem under mätningen.
Information från metoden?	Den information som metoder ger är om det finns spänningar i ledningsmaterialet som t.ex. korrosion, sprickor eller gropar. De måste dock vara tillräckligt stora för att orsaka störningar i magnetfältet så att de blir dektbara. Magnetometern detekterar även alla fogar, ventiler och reparationer. Smartball PWA spelar även in läckljud och ger en finlokalisering.
Kostnad?	Planering och förarbete 20 000 euro, läcksökning för 10 km ledning 50 000 euro, upp till 40 km ledning kommer ett tillägg på 90 000 euro. Över 40 km ledning kommer ett tillägg på 20 000 euro.
Insatser som krävs från ledningsnätägarna?	Pure Technologies kommer inleda med ett förplaneringsstadium där de tillsammans med bolaget planerar mätningen. Denna fas ligger på 2-3 veckor. Pure Technologies måste få tillträde till åtkomstpunkter på ledningen. Skulle det krävas att fler åtkomstpunkter måste grävas fram, faller kostnaden och arbetet på ledningsnätägaren. En person från bolaget behöver närvara vid undersökningen för assisterande hjälp.
Vilka ledningsmaterial?	Läcksökning: alla rörmaterial. PWA: metall. DN 300 och uppåt.
Fjärrvärme?	Metoden fungerar på fjärrvärme.

10 Snakebots – framtidens inspektionsinstrument?

Det finns en ständig efterfrågan på metoder för att inspektera ledningar i olika dimensioner och material, därför behövs det tas fram ny innovativ teknik. En idé som kan vara intressant är att skapa en simmande robot som kan självständigt undersöka ledningar.

Många företag och universitet utvecklar kommersiella konstgjorda mätormar, så kallade snakebots. De är robotar som är tillverkade för att röra sig och ta sig fram, precis som en orm. Fördelarna med en ormliknande robot är att de har helt andra möjligheter att ta sig fram genom olika platser än traditionella robotar med hjul, band eller gående. Forskare på Carnegie Mellon University har arbetat med att programmera orm-robotar i årtal och har lyckats få robotarna att kräla sig fram genom stenar, spillror från ras, genom ledningar och runt om ledningar. De har studerat hur ormar rör sig i naturen och lyckats få fram robotar som kan göra snabba och skarpa svängningar, precis som ormar. Så med andra ord har de här robotarna en mycket bättre förmåga att ta sig fram eftersom de är mångsidiga och inte har ett rörelsemönster som är begränsat till endast krälning, klättring eller simning. Exempel på användningsområden där dessa typer av robots används idag är för utforskning av andra planeter och kirurgi [49].

De robotar som används för kirurgi går att fjärrstyra och den minsta som finns är 12 mm bred och 300 mm långt. Forskarna hoppas på att kunna ta fram ännu mindre robotar som kan ta sig in genom blodkärl till de platser där de ska utföra operationer. Mätormar kan p.g.a. sina flexibla ormrörelser ta sig fram i svåråtkomliga ställen som farliga att skära upp, t.ex. hjärtat. De kan ta sig fram utan att störa eller skada organen i bröstkorgen [50].



Figur 10.1 Kan en självlärande orm-robot vara det framtida inspektionsinstrumentet för vattenledningar, som kan simma runt i ledningarna och mäta godstjocklek, hitta fel och kanske t.o.m. åtgärda dem [51]?

Den Europeiska Rymdorganisationen samarbetar med SINTEF i Norge för att ta fram en ormrobot för utforskning av planeter. SINTEF har arbe-

tat med en förstudie där man tittar på möjligheter hur en ormrobot kan transporteras med en rymdfarkost till t.ex. mars och koppla bort sig från transportmedlet för att undersöka det nya territoriet. Den ska arbeta självständigt med att samla in stenar och ta jordprover för att sedan återvända till rymdfarkosten [52].

NASA arbetar också med ta fram den här typen av robotar, de är intresserade av robotar som kan fungera självständigt och ta egna beslut med hjälp av inbyggda sensorer. Varje sektion i deras robotar är utrustade bl.a. med mikrokontroller, små datorer och motorer för att få gångjärnen att röra sig till olika positioner. NASA hoppas att skapa en mjukvara som kan få roboten att bli självlärande genom egna erfarenheter och t.ex. lära sig hur den ska kräla från mjuka till hårda ytor, ta sig över områden med klippor, klättra upp längs berg och ta sig in genom sprickor [53]. Kan den här utvecklingen av snakebots ligga som en grund till att skapa innovativt instrument för inspektion av vattenledningar? Kanske finns det möjligheter till att förminska teknologier till att kunna kombineras på en ormliknande robot som självständigt kan inspektera ledningar? En risk är att roboten kan fastna inne i ledningarna och det är viktigt att det finns teknik för att kunna spåra roboten.



Figur 10.2 Kanske en ål-robot skulle passa för vattenledningar [54]?

11 Sammanfattning

Målsättningen med arbete med statusbedömning borde först vara att ta reda på hur konditionen på ledningsmaterialet ser ut, eftersom ledningsmaterialet är den viktigaste parametern. När materialet väl ger vika börjar röret läcka med alla dess konsekvenser. Målet borde vara att undvika de stora haverierna så mycket som möjligt.

De presenterade metoderna har potential att detektera olika typer av defekter och metoderna kan var för sig ge en viss information men den informationen är inte tillräckligt för att få en tydlig bild på statusen. T.ex. delta-t/ePulse metoden har sin styrka i att kunna ge information om ledningsmaterialet. Metoden ger för närvarande ett medelvärde på godstjockleken över en ledningssträcka men ger ingen information om punktkorrosion eller var de är belägna. Den här aukustiska metoden skulle passa bra att kombinera med andra metoder som skulle kunna klara av att t.ex. detektera yttre punktkorrosion. Möjligen finns det potential hos både resistivitetsmätning och markradar att identifiera riskområden för yttre korrosionsangrepp eller pågående korrosion.

Delta-t/ePulse metoden är beroende på dataunderlag från ledningsnätsägaren som berättar om vilket ledningsmaterial som finns på en sträcka. Skulle det finnas andra ledningsmaterial än vad som är dokumenterat, då kan beräkningarna bli felaktiga. Därför är det viktigt att få tillförlitlig information om hur ledningen ser ut på insidan. Även för mätningar med transienttryck hade det varit fördelaktigt att veta hur ledningen ser ut på insidan och var olika komponenter sitter. Dataunderlag från ledningsnätsägarna är inte alltid korrekt och därför skulle en metod som Pipe Inspector vara viktig att använda för att få se ledningen från insidan för att få en säker grund att stå på.

Även trycktransienter har potential att ge information om vad som sker inne i en ledning som t.ex. läckage, sättningar eller om korrosionskydd har lossnat. Det vore intressant i studiesyfte att permanent installera generator och mätare i en ledning för att kunna följa inre förändringar i en ledning och se hur reflektionerna beter sig. Den här metoden har framgångsrikt detekterat läckage på stora transportledningar och även testas på vattenledningsnät. Transienttryck påminner om delta-t/ePulse då ljudvågor och vattenhammare verkar bete sig på liknande sätt inne i en ledning och samköra metoderna på samma ledning hade varit intressant för att kunna jämföra utslagen och se om de båda kan tillsammans ge en tydligare bild.

Idag finns det inte så många metoder som fokuserar på ledningsmaterialet och är smidiga att arbeta med. Pure Technologies har kommit ut med Smartball PWA som är utrustad med magnetometer som kan detektera stress i ledningsväggen. Det går dock inte att få ut information om kvarvarande godstjocklek eller större detaljer. Fördelen med Smartball PWA är dock att den kan ge information om ledningsväggen som t.ex. Pipe Inspector saknar. Pipe Inspector kan å andra sidan ge en visuell bild på hur det ser ut inne i en ledning.

Läckor är också en viktig parameter att titta på när det gäller att göra en bedömning på hur en ledning mår. Metoder som Smartball och Pipe Inspector är metoder som kan finlokalisera läckor och som dessutom ger kompletterande information. Flygtermografering skulle vara smidig då metoden är helt ingreppsfri. Men hur bra flygtermografering skulle fungera på vattenledningar är svårt att säga då inga studier har utförts. Om metoden skulle gå att optimera för vattenledningar, hade metodens styrka varit att snabbt kunna få överblick på alla läckor på stora delar av ett ledningsnät. Larmtrådar är smidiga då de kan direkt larma i realtid via sms om vattenläckage vid skarvar. Den informationen är kritisk information på viktiga ledningar som går till t.ex. sjukhus där tillgången till vatten är en absolut nödvändig för vård och operationer.

Vad som har framkommit genom den här kunskapsinventeringen är slutsatsen att ingen metod ensam klarar av att ge en fullgod bild på en ledningsstatus. Arbete med endast en metod kommer fortfarande lämna ledningsnätägaren till att göra gissningar och uppskattningar. Vill man kunna få en tydligare bild av statusen, då måste man kombinera metoder och lägga bild på bild. Detta kommer bli ett nödvändigt ont om man är ute efter att kunna statusbedömma de ledningar som redan är nergrävda, kunna prioritera rätt ledning till förnyelse och komma mer bort från ett reaktivt arbetssätt.

12 Referenser

1. Malm A, Horstmark A, Larsson G, Uusijärvi J, Meyer A, Jansson E, (2011) *Rörmaterial i Svenska VA-ledningar – egenskaper och livslängd*. Svenskt Vatten, Rapport nr 2011-1
2. Sundahl A-C (1996), *Diagnos av vattenledningars kondition*. Institutionen För Teknisk Vattenresurslära, Lunds Universitet.
3. Echologics (2015) "E-pulse, reducing capital expenditures just got easier" <http://echologics.com/condition-assessment/epulse> (2015-08-31, 14:23)
4. Jensen AB, Kontroll av rörvägg, dokument
5. Rundström T, Schleimann-Jensen A, (1984) "Metoder för lokalisering av läckor på värmekulvertar" Byggforskningsrådet, Libertryck Stockholm
6. Echologics (2010) "Acoustic-Based Condition Assessment" <http://www.echologics.com> (2015-11-25)
7. Bhimanadhuni S, (2014) "Pilot Acoustic Condition Assessment of Water Distribution System, Washington Suburban System Sanitary" Virginia Polytechnic Institute and State University, Washington Suburban Sanitary Commission, Maryland
8. Jensen AB (2015) Statuskontroll Fjärrvärmeledningar www.arnejensen.se/ (2015-11-19)
9. Jönsson L (2003) "Trycktransienter i rörsystem för vattentransport – problem och nytta". VA-forsk, Svenskt Vatten Rapport nr 28 2003.
10. Misiunas D, Lambert M, Simpson A (2006) "Transient-based periodical leak diagnosis" *Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis*, American Society of Civil Engineers, Cincinnati, Ohio, Utah, USA, 27–30 August
11. Misiunas D (2003) "Burst Detection and Location in Pipeline and Pipenetworks –with application in water distribution systems" Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund's University, Universitetsstryckeriet
12. Misiunas, D., Lambert, M., Simpson, A. (2008) Transient-Based Periodical Pipeline Leak Diagnosis. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*: pp. 1–19. American Society of Civil Engineers
13. Shucksmith, James D.; Boxall, Joby B.; Staszewski, Wieslaw J.; Seth, Allyson; Beck, Stephen B.M. (2012) "On Site Leak Location in a Pipe Network by Cepstrum Analysis of Pressure Transients" *American Water Works Association*, Vol 104, Number 8, page E457–E465
14. H.-F. Duan, P. Lee, M. Ghidaoui (2014) "Transient Wave-blockage Interaction in Pressurized Water Pipelines" 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, *Procedia Engineering* 70 , page 573–582

15. Stephens M.L.; Lambert M.F; Simpson A.R. (2013) "Determining the internal wall condition of a water pipeline in the field using an inverse transient model" *Journal of Hydraulic Engineering*, 139 (3); 310–324
16. Stephen M.L.; Simpson A.R., Lambert M.F. (2008) "Internal Wall Condition Assessment for Water Pipelines using Inverse Transient Analysis" 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA, August 17–20, 2008, Kruger National Park , South Africa
17. Covas D, Ramos H, Lopes N, Almeida A.B, (2006) "Water Pipe System Diagnosis by Transient Pressure Signals" Eighth Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA); August 27–30, 2006, Cincinnati, Ohio, United States
18. Daniels, D. J, (2004) *Ground Penetrating Radar*, 2nd edition, The Institution of Electrical Engineers (IEE), London, UK, 2004
19. Wilén P (2001) Mobil markradarutrustning, förstudie. Svensk Gasteknisk Center, Rapport 125
20. King M.L, (2000) "Locating a subsurface oil leak using ground penetrating radar", *Proc. SPIE 4084*, Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, 346 (April 27, 2000); doi:10.1117/12.383590
21. Charlton, M.B. and Mulligan, M. Efficient detection of mains water leaks using ground-penetrating radar, Proceedings of Subsurface and Sensing Technologies and Applications III, 30 July – 1 August 2001, San Diego, CA, SPIE Vol. 4491, 375–386
22. Eyuboglu, S, & Mahdi, H. dan Al-Shukri, H. ((2003). *Detection of Water Leaks using Ground Penetrating Radar*. The 3rd International Conference on Applied Geophysics. December Orlando, Florida: Environmental and Engineering Geophysical Society., 8–12.
23. Ayala–Cabreria D., Herrera M., Izquierdo J., Ocana–Levario S.J.and Perez–Garcia R.: *GPR-Based Water Leak Models in Water Distribution Systems*
24. Saiful Wazlan Wahab (2013) Assessing the condition of buried pipe using ground penetrating radar, Thesis, School of Civil Engineering, College of Engineering and Physical Science, The University of Birmingham
25. Hossein A, Corrosive Soils –causes, effects and mitigation. Testing Engineers. <http://www.testing-engineers.com/case1.html> (2015-11-19)
26. Pennock S.R., T.M. Abedt, G. Curionit, D.N. Chapmant, U.E. Johnt, C.R.J. Jenks. Investigation of Soil Contamination by Iron Pipe Corrosion and its Influence on GPR Detection. 15th International Conference on Ground Penetrating Radar – GPR 2014
27. Ékes C, Neduczka B. Fleury M., Hess D., (2013). Advanced Condition Assessments: the benefits of using Pipe Penetrating Radar. North American Society for Trenchless Technology (NASTT) No-Dig Show 2013 Sacramento, California March 3–7

28. Styles P (2012) Environmental Geophysics – everything you ever wanted (needed!) to know but were afraid to ask! European Association of Geoscientists and Engineers
29. Corrosion Doctors (2015) Module Four of CCE 281 Corrosion: Impact, Principles, and Practical Solutions. <http://www.corrosion-doctors.org/Corrosion-Kinetics/Ohmic-drop-soil.htm> (2015-11-20)
30. GeoVista (2015) Elektriska Metoder- Inducerad polarization. <http://www.geovista.se/metoder/ip-inducerad-polarisation/> (2015-11-20)
31. Ekine A, Emijakporue G.O. (2010) Investigation of Corrosion of Buried Pipeline by the Electrical Geophysical Methods. Journal of Applied Sciences and Environment Management, Vol. 14 (1) p. 63–65
32. Southwest Research Institute (2014) In-Situ Measurement of Corrosion in Buried Pipelines Using Vertically Measured Pipe-to-Soil Potentials. <http://www.swri.org/4org/d20/home/what/pipe-to-soil.htm> (2015-11-20)
33. Balvant R, Yehuda K, (2001) Comprehensive Review of Structural Deterioration of Watermains: Physically based models. Institution of Research in Construction, National research Council Canada. Urban Water 3, p. 151–164
34. Termisk Systemteknik (2015) Värmekamera. <http://www.termisksystemteknik.se/> (2015-11-20)
35. FLIR (2015) Så fungerar en värmekamera. <http://www.flir.se/cs/display/?id=41536> (2015-11-20)
36. GEAB (2015) Flödesdebitering. <http://www.gotlandsenergi.se/flodesdeb.pab> (2015-11-20)
37. Sjökvist S, Wren J, Ahlberg J, (2012) Kvantifiering av värmeläckage. Svensk Fjärrvärme AB. Fjärrsyn rapport 2012:17
38. Samtal med Stefan Sjökvist, Termisk Systemteknik.
39. MTA-Messtechnik, MTA Pipe Inspection Methodology. Dokument.
40. MTA-Messtechnik (2015) Videos http://www.mta-messtechnik.at/pipe-inspector/pipe-inspector_en/video.html (2015-11-20)
41. Witeco (2015) Widetect 3 <http://witeco.se/widetect/widetect-w3/> (2015-11-20)
42. Nilsson S, Sällberg S-E, Bergström G, (2005) Fuktmätning med pulsekometer. Svensk Fjärrvärme AB, Forskning och Utveckling. Rapport nr 2005:124.
43. Bjurström H, Cronholm L-Å, Edström M-O, (2003) Fukt i fjärrvärmerör, larmsystem och detektering – inventering av mätmetoder och gränsvärden. Svensk Fjärrvärme AB, Forskning och Utveckling. Rapport nr 2003:98
44. Kalifeh A, Ofir B, (2013) Bedömning av isolerings grad på äldre fjärrvärmeledningar –med hjälp av teoretiska och verkliga värmeförluster. Halmstad Högskola.

45. Andresson J, (2002) Digitala läckdetekteringssystem – en studie av nyare tekniker på marknaden och jämförelser med dagens system. Svenska Fjärrvärmeföreningen, Forskning och Utveckling. Rapport nr 2002:71
46. Samtal med Jan Eriksson, Wideco.
47. Pure Technologies (2015) Smartball Pipe Wall Assessment . https://www.puretechltd.com/technologies-brands/smartball/smartball_pipe_wall_assessment (2015-11-20)
48. Samtal med Pedro Pina, Pure Technologies.
49. Georgia Tech Research, Horizon (2015) Snake robots learn to turn by following the lead of real sidewinders. <http://www.rh.gatech.edu/news/389951/snake-robots-learn-turn-following-lead-real-sidewinders> (2015-11-23)
50. Biorobotics Lab Carnegie Mellon University (2013) Why a snake. <http://biorobotics.ri.cmu.edu/projects/modsnake/index.html> (2015-11-23)
51. MIT Technology Review (2015) Snakelike Robots for Heart Surgery. <http://www.technologyreview.com/news/409851/snakelike-robots-for-heart-surgery/> (2015-11-23)
52. HiBot (2012) ACM-R5H. http://www.hibot.co.jp/en/products/robots_1/acm-r5h_33 (2015-11-23)
53. Shubber K, (2013) Future Mars Rovers may get Snake Robot Companion. <http://www.wired.co.uk/news/archive/2013-09/16/mars-snake-robot> (2015-11-23)
54. Bluck J, (2000) NASA developing a “snakebot” to explore and build in space. http://www.nasa.gov/centers/ames/news/releases/2000/00_66AR.html (2015-11-23)
55. http://bondmoran.nu/?attachment_id=8525



Box 14057 • 167 14 Bromma

Tfn 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se