

Med finansiering från:



Pipe Status – Utlåtande angående utvärderade mätmetoder

OLLE PENTTINEN

RISE Research Institutes of Sweden

Säkerhet & Transport/Mätteknik

Box 857

SE-501 15 Borås, Sweden

+46 (0)10-516 50 47 (dir)

+46 (0)10-516 50 00 (tx)

olle.penttinen@ri.se

Innehåll

| | |
|--|----|
| Inledning..... | 5 |
| Mål och avgränsningar | 5 |
| Metod..... | 5 |
| Analysmetod 1..... | 6 |
| Analysmetod 2..... | 6 |
| Analysmetod 3..... | 7 |
| De undersökta metoderna | 7 |
| Lunds universitets resistivitetmetod | 7 |
| Paris universitets resistivitetmetod..... | 11 |
| Markradar..... | 12 |
| Elektrokemisk metod..... | 13 |
| Akustiska mätningar | 14 |
| Sammanfattning..... | 17 |

Inledning

RISE har i det Vinnovafinansierade projektet *Pipe Status* varit ledare för det arbetspaket där mätmetoder testats i fält för att om möjligt analysera status på vatten- och fjärrvärmeledningar. Fälttesterna har skett i nära samarbete med ett antal vatten- och fjärrvärmenätägare längs västkusten samt i Stockholm. Referensmätningar och utvärdering av respektive mätmetod har skett hos RISE. Det övergripande syftet har varit att bedöma vilken samlad kapacitet metoderna har att statusbedöma vatten- och fjärrvärmeledningar utan att gräva fram dessa. I branschen eftersträvas avbrottsfria och ingreppsfria metoder för statusbedömning. Med statusbedömning avses metodernas förmåga att detektera rörens faktiska skick med avseende på ytskikt, korrosion, återstående livslängd etc.

Mätmetoderna är olika långt komna i sin väg mot kommersialisering. De nyttjar vitt skilda tekniker för att analysera rörets och den kringliggande markens egenskaper. De mäter respektive markresistivitet, elektrisk ledningsförmåga, akustiska egenskaper samt analyserar markradarsignaler.

Tanken är att kombinationen av ett antal mätmetoder tillsammans ger ett bättre beslutsunderlag för eventuell insats. En förutsättning för att nätägarna ska kunna vara mer proaktiva i sitt underhållsarbete är att de har tillgång till rätt information om ledningsnätets status. Kan man tillskansa sig den informationen utan större entreprenadarbeten undviker man stora kostnader och påföljande störningar.

Mål och avgränsningar

Målet med den här analysen är att ge en så objektiv bild som möjligt av mätmetodernas förmåga att bidra till en komplett bild av nedgrävda ledningars status. Projektets mål har inte varit att jämföra metoderna sinsemellan. Redovisade resultat och slutsatser avser mätningar utförda i det aktuella projektet. **Rapporten tjänar inte som certifikat eller bevis för mätmetodernas generiska kvalitet, mätosäkerhet, robusthet eller tillförlitlighet i en godtycklig mätsituation utanför detta projekt.**

Metod

Varje metod har testats i fält av metodägarna själva. Testen har utförts på vatten- och fjärrvärmeledningar i södra Sverige. Parallellt med detta har markprover från mätplatserna analyserats av Sweco Geolabs (resistivitet och okulär jordartsbestämning) och Eurofins (pH, järn, magnesium, sulfid och redoxpotential). RISE har på vissa mätplatser närvarat med 3D-scanner och registrerat data för att i efterhand kunna analysera exempelvis markradar och resistivitetmätningarna med högre detaljeringsgrad.

RISE har tagit fram verifieringsdata i laboriemiljö på rör som skickats in från respektive mätplats. Totalt har RISE tagit emot 70 rör från 12 adresser. I analysen ingår 54 st vatten- och 16 st fjärrvärmerör. Med rör avses längder mellan 1 och 6 m. De rörmaterial som förekommer är:

- Gråjärn
- Stål
- Stål med PEH
- Segjärn
- Betongfodrat gråjärn

De laboratorieanalyser som utförts hos RISE är dimensionsmätningar, materialprov av medierör samt kvalitetstester av isolering kring fjärrvärmerör. De slutsatser som denna rapport redogör för baseras på faktiska jämförelser mellan leverantörernas mätresultat och de verifieringsresultat som RISE, Sweco Geolabs och Eurofins tagit fram. För att jämföra mätmetoderna med verifieringsresultaten har RISE använt tre olika analysmetoder, anpassade efter typen av data. Dessa beskrivs nedan.

Analysmetod 1

En objektiv jämförelse av två mätresultat är önskvärd. Ett verktyg för att avgöra hur väl två resultat överensstämmer är att beräkna det normaliserade felet, E_n .

$$E_n = \frac{|x_{lab} - x_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}$$

Om $E_n < 1$ betyder det att resultaten från fältmätningarna, x_{lab} , är konsistenta (överlappande) med referensmätningarna utförda av RISE, x_{ref} . Detta bygger på att de två resultaten, x_{lab} och x_{ref} , är av samma typ samt att de var för sig kan uttryckas med en tillhörande expanderad osäkerhet U_{lab} och U_{ref} . Den expanderade osäkerheten (2 standardavvikelser) representerar det intervall från medelvärdet där en enskild mätning står att finna med 95 % sannolikhet. Andel konsistenta resultat kan sedan beräknas med

$$k = \frac{\#\{E_n: E_n < 1\}}{N} = f(U_{lab})$$

vilket i ren text innebär att k motsvarar kvoten av antalet $E_n < 1$ och det totala antalet undersökta objekt N . Eftersom U_{lab} är okänd kan k uttryckas som en funktion av U_{lab} . Det gör att man iterativt kan avgöra vilken osäkerhet en mätmetod behöver tillskrivas för att överensstämmande resultat ska erhållas. För att beräkna E_n värdet används som sagt mätosäkerheten för respektive part. I detta fall likställer vi detta med spridning i resultat för referensmätningar från RISE, då vi bedömer ytterligare osäkerhetsbidrag som försumbara.

Analysmetod 2

I de fall vi jämfört mätleverantörernas subjektiva iakttagelser med ledningarnas faktiska skick så saknas möjlighet till samma objektiva analys av det normaliserade felet som beskrivs av Analysmetod 1. Det har inte varit möjligt att kvantifiera osäkerheten i de subjektiva bedömningarna. Denna typ av jämförelse blir därför något förenklad. RISE har sammanfattat resultaten från sina referensmätningar i ett samlat kvalitetsmått. Röret har klassificerats i ett värde mellan 0 och 1 där 0 representerar ett mycket skadat rör. Betyget 1 representerar således ett rör i toppskick. Vi jämför resultaten utan hänsyn tagen till metodernas egna osäkerheter (vilka är okända). Vi har valt att representera överensstämmelsen mellan två datamängder, x och y , som medelvärdet från parvisa jämförelser enligt

$$s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - |x_i - y_i|)$$

Ekvationen ger att lika bedömning från mätleverantör x_i och referensmätning från RISE y_i ger 100 % överensstämmelse, samt att helt avvikande resultat ger 0 % överensstämmelse. Medelvärdet representerar en samlad bedömning av metodens förmåga att bedöma rörets skick i relation till referensdata. Metoden kan enkelt appliceras på kontinuerliga data. Vi benämner detta bedömningsätt Analysmetod 2.

Analysmetod 3

Analysmetod 2 kan upplevas intuitiv, men går att ifrågasättas. Därför kompletterar vi analysen av de subjektiva bedömningarna med en tredje metod, Cohen's Kappa. Vi har antagit den klassiska approachen med en binär korstabell, där mätleverantörens iakttagelser/bedömningar och referenslaboratoriets mätningar på respektive rör klassificerats som "Oskadat" respektive "Skadat". Denna metod ger ytterligare klarhet i mätleverantörernas förmågor att uttala sig om rörens status. Den väger också in sannolikheten att två parter får samma eller avvikande resultat rent statistiskt, baserat på antalet gånger man gjort en viss bedömning. Det innebär alltså att vi kan ställa andelen korrekta iakttagelser i relation till det slumpmässiga utfallet. Cohen's Kappa definieras som

$$\kappa = \frac{p_a - p_\varepsilon}{1 - p_\varepsilon}$$

där p_a är andelen överensstämmande observationer och p_ε är andelen estimerade överensstämmelser baserat på datamängdernas distributioner (slumpen). κ kan även uttryckas i termer av antalet observationer som

$$\kappa = \frac{n_a - n_\varepsilon}{n - n_\varepsilon}$$

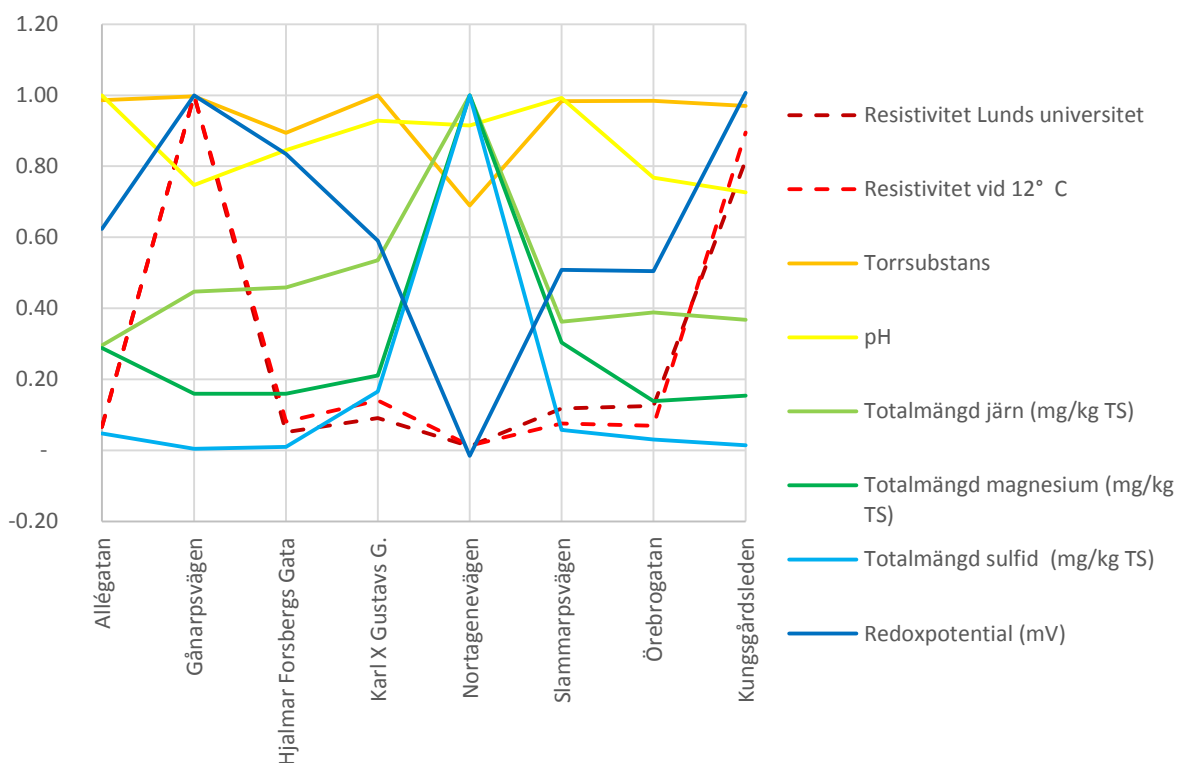
där n_a är antalet överensstämmande observationer, n_ε antalet förväntade överensstämmelser baserat på datamängdernas distributioner (slumpen) och n är det totala antalet objekt i studien. Ett värde av $\kappa=0$ indikerar att överensstämmelsen uteslutande beror på slump, $\kappa=1$ indikerar att mätleverantören och RISE gjort samma bedömningar av rörens status.

De undersökta metoderna

Ovanstående tre analysmetoder har applicerats på de mätmetoder som undersökts i projektet. I följande avsnitt har vi lyft fram det vi sett som unika karakteristika för respektive mätmetod. Vi har lyft fram deras styrkor respektive svagheter, samt fört ett resonemang kring anledningen att vissa resultat erhållits. I vissa fall har vi även dristat oss till att presentera några tankar kring potentiella utvecklingsförslag. Syftet med detta har varit att på sikt initiera fler gemensamma forskningsprojekt.

Lunds universitets resistivitetsmetod

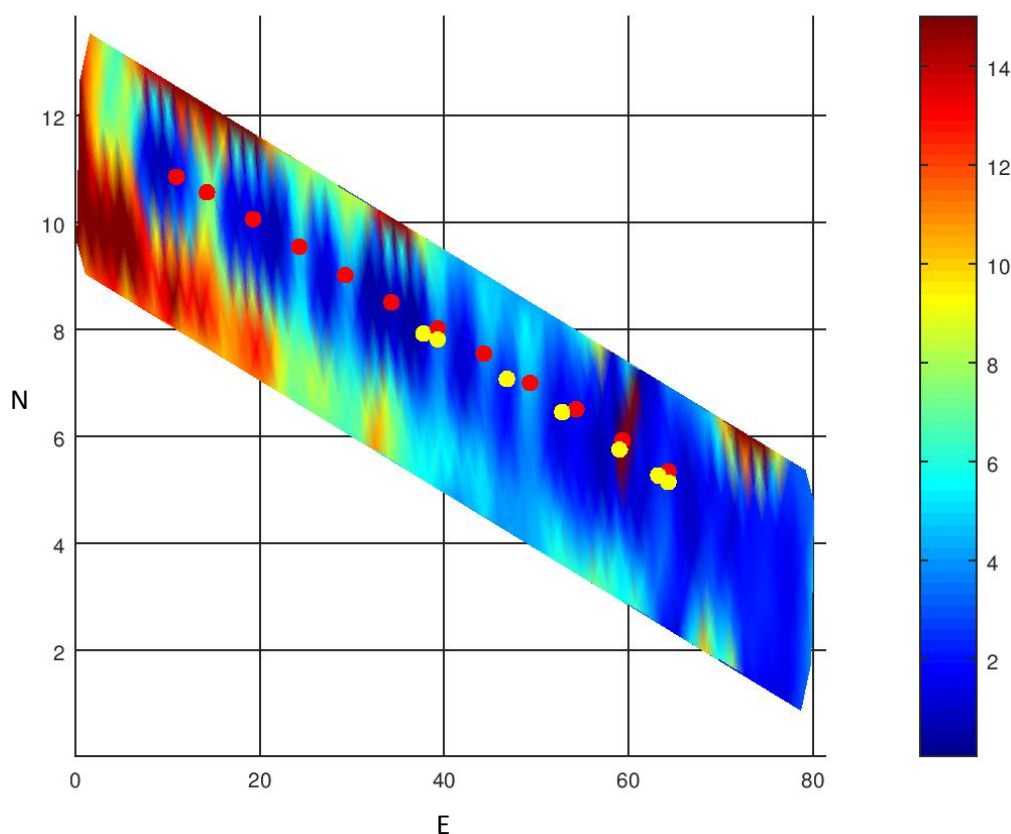
Lunds universitet använder en metod där metallpinnar placeras i marken. En ström leds galvaniskt ned i marken mellan två elektroder samtidigt som man mäter en potentialskillnad över ett mellanliggande elektroddpar. Denna metod ger efter bearbetning en tredimensionell bild av markens resistivitet. I syfte att utvärdera den galvaniska resistivitetsmetoden har projektet valt att ta markprover vid de aktuella mätplatserna. Markprovsresultaten som levererats från Sweco Geolabs och Eurofins har sammanställts. Genomsnittet för resistivitet, pH, järn, magnesium, sulfid och redoxpotential har beräknats för respektive mätområde. Lunds universitets resistivitetsmetod har sedan jämförts mot detta, Figur 1 nedan.



Figur 1. Normerade värden för de markprover som analyserats av Sweco och Eurofins i laboriemiljö samt fältmätningar av markens resistivitet utförda av Lunds universitet.

Absolutvärden för resistivitet är inte jämförda då mätprinciperna skiljer sig åt, men från de normerade värdena i Figur 1 kan det utläsas att resultaten från Lunds universitets resistivitetmätningar stämmer mycket väl överens med de laborieanalyser som utförts av Sweco Geolabs (streckade kurvor). Genom att applicera Analysmetod 2 på dessa resultat, fås en överensstämmelse på 95 %. Vi ser också ett samband mellan mängden järn, magnesium och sulfid i den analyserade jorden där markproverna från Nortagenevägen (Göteborg) särskiljer sig. Detta beror sannolikt på skillnaden i markförhållanden mellan Göteborg och övriga mätplatser som ligger i Skåne regionen. Det syns dock inget tydligt samband mellan resistivitetmetoden från Lunds universitet och mängden järn, magnesium och sulfid. Redoxpotentialen uppvisar ett till synes omvänt förhållande gentemot de tre nyligen nämnda och följer snarare markresistiviteten i viss utsträckning. Nortagenevägen påvisar lägst redoxpotential av de undersökta markproverna vilket förmodligen kan härledas till att den lerhaltiga jorden i området är relativt syrefattig. Vi ser även en något mindre andel torrsubstans i proven från denna mätplats, men resistivitetmetoden tycks inte vara starkt korrelerad till detta. Våra iakttagelser tyder sammanfattningsvis på att resistivitetmetoden från Lunds universitet väl återspeglar markens faktiska resistivitet, samt att den inte påverkas i lika stor utsträckning av övriga analyserade parametrar.

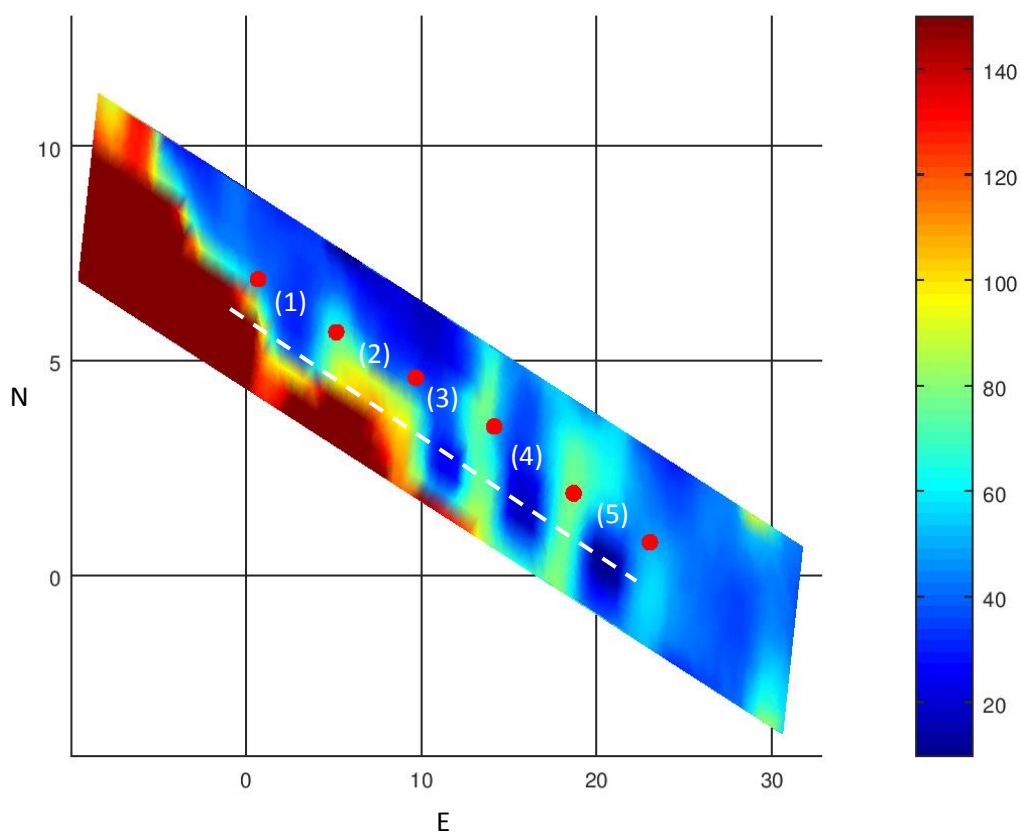
Ovanstående resonemang bygger på medelvärden från de mätplatser som analyserats. Vi har också valt att studera en mätplats i detalj, där vi då tar hänsyn till spatiala variationer och fokuserar nu på resistivitetmätningarna från Lunds universitet i kombination med 3D-mätningar från RISE. Här ser vi ett intressant samband mellan rörets placering och den respons Lunds universitet får i sina resultat.



Figur 2. Den pseudofärgade bakgrunden representerar markens uppmätta resistivitet med resistivitetmetoden från Lunds universitet [enhet ej angiven] på ett djup av 1.5 m. Iakttagelser från RISE representeras av runda markörer. Röd markering = muff, gul markering = större rostfläck. (Rostfläckarnas position är justerad i vertikal led för tydligare visualisering.) Figurens axlar representerar oidentifierade koordinater i SWEREF99 TM.

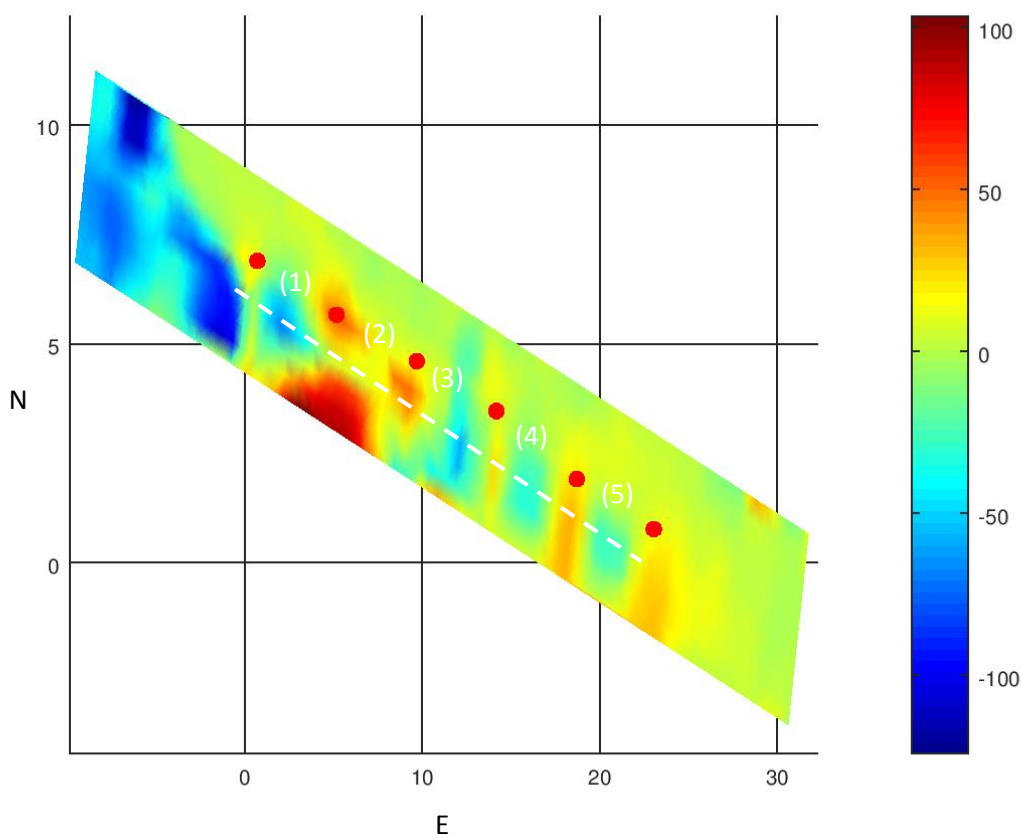
Vi ser att variationen i resistivitet och muffarnas placering uppvisar en viss korrelation. På flertalet ställen sammanfaller muffarnas position med en förhöjd resistivitet. Ledningen bestod i det aktuella mätområdet av betongfodrat gråjärn där ytskiktet var delvis angripet av sporadisk punktkorrosion. Då rörytans tätskikt uppvisat ett flertal mindre skador, är vår hypotes att röret fungerat som en galvanisk ledare i marken och därmed bidragit till en sänkt resistivitet. Vidare var muffarna tätade med gummipackning vilket kan förklara den resistivitetshöjning som uppmäts vid flertalet muffar. Graden av resistivitetshöjning varierar mellan muffarna och kan möjligen förklaras av variation i den galvaniska ledningsförmågan. Isolationsförmågan i muffarna var dock ingenting som mättes i fält, innan rörsektionerna togs isär för transport, så hypotesen är ej bekräftad vid den aktuella mätplatsen. De större rostfläckar som illustreras med gula markörer i Figur 2 ger som synes inga signifikanta utslag i resultaten.

För att verifiera dessa resultat grävdes fem verifierade rörsektioner ned på nytt. Denna gång fanns alltså i förväg kontrollerade rör i marken till skillnad från övriga tillfällen. Tre av rören hade ett mer degraderat ytskikt. Två sektioner var av något bättre kvalitet, en av dessa lindades också in i tejp för att simulera ett helt oskadat ytskikt. Man var intresserad av hur detta påverkade resistivitmätningar samt radarmätningar som också utfördes på dessa ledningar, se avsnittet om Markradar nedan. Resultat från resistivitmätningen, Figur 3, bekräftar tidigare erhållna resultat.



Figur 3. Markresistivitet mätt av Lunds universitet i ett område med fem rör av varierande skick. Röda markörer symboliserar käppar, som markerat rörändarnas positioner. Rörrens position markerat med en vit streckad linje. Käpparna var placerade vid sidan av schaktet, varför markörerna är något förskjutna i nordnordostlig riktning i förhållande till rörändarna. Med start från vänster var skicket på rörens ytskikt: (1) Dåligt, (2) relativt oskadat och dessutom tejpats, (3) skadat, (4) relativt oskadat, (5) skadat. Figurens axlar representerar avidentifierade koordinater i SWEREF99 TM.

En annan skillnad var att rören ej var vattenfyllda vid detta mättillfälle. De båda rörändarna, början av rör (1) och slutet av rör (5), har inte tejpats utan rören låg öppna mot jordmassorna. Jord har sannolikt trängt in i rören någon decimeter i respektive ända i samband med igenfyllning av schaktet. Muffarna, med befintliga gummipackningar i gott skick, slöt dock helt tätt mellan varje rörskarv. Man ser tydligt en höjd resistivitet vid muffar med gummipackningar, samt för hela delsträcka (2), som var tejpats. Markresistiviteten varierar längs mätsträckan. Då den även mättes innan rören lades ned kan vi genom subtraktion få en tydligare bild av rörens bidrag, Figur 4.



Figur 4. Markresistivitet mätt av Lunds universitet med rör subtraherat med markresistivitet utan rör. Röda markörer symboliserar käppar, som markerat rörändarnas positioner. Rörens position markerat med en vit streckad linje. Käpparna var placerade vid sidan av schaktet, varför markörerna är något förskjutna i nordnordostlig riktning i förhållande till rörändarna. Med start från vänster var skicket på rörens ytskikt: (1) Dåligt, (2) relativt oskadat och dessutom tejpade, (3) skadat, (4) relativt oskadat, (5) skadat. Figurens axlar representerar avidentifierade koordinater i SWEREF99 TM.

Denna subtraktion påvisar på ett tydligare sätt den förhöjda resistiviteten vid muffarna samt den tejpade sektion (2). Slutsatsen blir att resultaten från den metod som Lunds universitet använder för att mäta markresistivitet påverkas av hur väl isolerat röret är. Det är intressant att vi i projektet kunnat påvisa detta samband. Lunds universitet säger att modellen kan matas med ytterligare a priori information om rörets position, innan resistiviteten beräknas från rådata. Det skulle kunna ge en ännu bättre bild av resistiviteten i anslutning till röret. Detta är mycket intressant och bör utredas i framtida projekt. Markradar kan exempelvis användas som komplement för lokalisering.

Paris universitets resistivitetsmetod

I projektet deltog även forskare från Paris universitet. De ansvarade för en resistivitetsmetod där man, istället för att applicera en ström genom marken med elektroder, skapade en kapacitiv koppling med en matta som drogs efter en vagn. Den kapacitiva metoden uppvisade resultat med lägre spatial upplösning än tekniken från Lunds universitet. Handhavandet var däremot enklare vilket möjliggör att större arealer kan undersökas på kortare tid, jämfört med tekniken där elektroder placeras i marken. Den fungerar även på hårda ytor. Resistivitetsmetoderna är inte utvärderade med någon av de tre beskrivna analysmetoderna med avseende på rörens status, då de inte uttalat sig om annat än uppmätt resistivitet. Däremot noteras det att de två resistivitetsmetoderna är samstämmiga till 65 % enligt Analysmetod 2. Analysmetod 3, Cohen's Kappa ger ett liknande värde av 61 % utan hänsyn tagen till det slumpmässiga utfallet. Om detta inkluderas nås en överensstämmelse av 42 %. Det kan tolkas som en moderat överensstämmelse. Metoderna drar i grova drag åt samma håll, men skillnader

förekommer. Skillnaderna kan delvis förklaras av metodernas varierande spatiala upplösning. En hypotes är också att metoderna påverkas olika av markytans resistivitet, framförallt att förändringar i denna har större inverkan på den kapacitiva metoden.

Markradar

I projektet har två företag genomfört fältmätningar med markradar. Guideline Geo har i första hand undersökt rörens precisa placering i marken som ingångsvärde till resistivetsmätningarna ovan. Adapis Georadar har framförallt använt sin monokanalradar i kombination med stångslingram för att undersöka markens elektromagnetiska egenskaper. Osäkerheten i positionering av rör i mark har inte utretts då RISE inte haft tillgång till rådata från båda markradarleverantörer. Osäkerheten antas framförallt härstamma från GPS:ens osäkerhet i spatial riktning och detta i kombination med variation i markens elektromagnetiska egenskaper i vertikal riktning. Överensstämmelsen mellan Adapis iakttagelser och referensmätningar från RISE ligger enligt Analysmetod 2 på ca 65 % där båda datakällor viktats på det sätt som beskrivits tidigare. Adapis är den enda mätleverantör som lämnat resultat för alla mätplatser i projektet, mycket positivt. Mätleverantören var dock initialt frikostig med sina uttalanden samtidigt som en majoritet av ledningarna var i relativt bra skick, vilket medför att slumpen kan tillskrivas relativt stor påverkan i det här fallet. Även om Adapis och RISE lämnar samstämmiga uppgifter (observationer) i 65 % av fallen, skvallrar Analysmetod 3, Cohen's Kappa, om detta. Förhållandet mellan Adapis och RISE uttalanden kan redovisas i tabellform.

Tabell 1. Observationer och estimeringar (förväntat utfall baserat på totala antalet observationer) för Adapis och RISE

| Observationer | | RISE | | Σ | Estimeringar | | RISE | | Σ |
|---------------|---------|--------|---------|----|--------------|---------|--------|---------|----|
| | | Skadat | Oskadat | | | | Skadat | Oskadat | |
| Adapis | Skadat | 2 | 15 | 17 | Adapis | Skadat | 2.75 | 14.25 | 17 |
| | Oskadat | 9 | 42 | 51 | | Oskadat | 8.25 | 42.75 | 51 |
| Σ | | 11 | 57 | 68 | Σ | | 11 | 57 | 68 |

Tabell 1 visar att det råder en övervikt av oskadade ledningar. Denna assymetri gör att sannolikheten att Adapis gör ett korrekt uttalande om en oskadad ledning av ren slump (estimeringar) blir överhängande. Måttet av överensstämmelse hade blivit större om andelen skadade rör i studien varit högre och Adapis pekat ut fler av dessa. Det blir extra tydligt om vi specifikt jämför observationer och estimeringar, Tabell 2,

Tabell 2. Observationer och estimeringar för överensstämmande iakttagelser

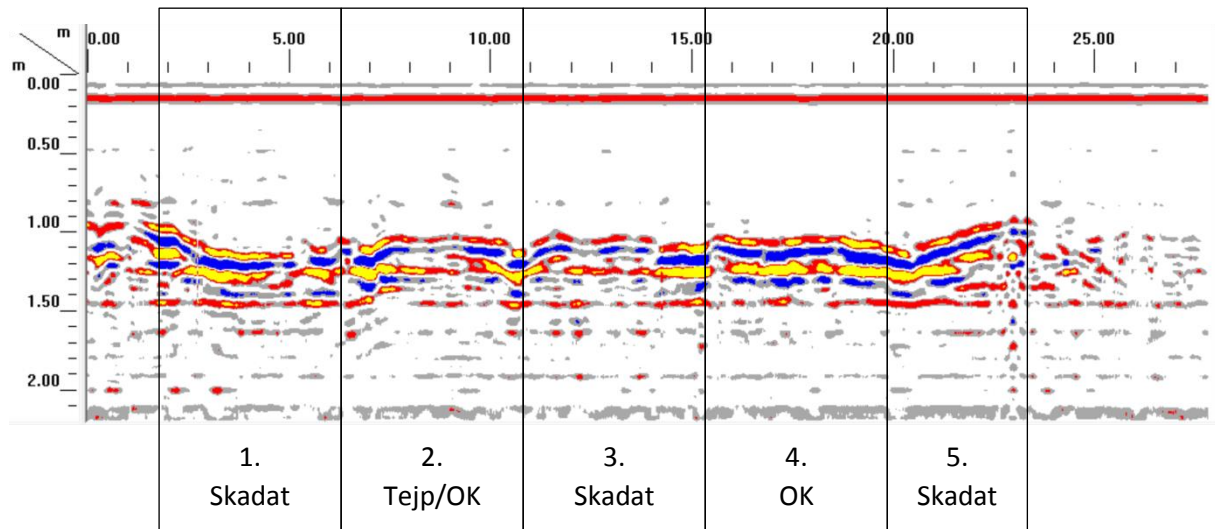
| | Skadat | Oskadat | Σ | Andel |
|--------------|--------|---------|------|-------|
| n_a | 2.0 | 42.0 | 44.0 | 65% |
| n_ϵ | 2.8 | 42.8 | 45.5 | 67% |

där n_a representerar summan av överensstämmande observationer, n_ϵ summan av överensstämmelser baserat på slump. Vi ser att andelen överensstämmelser av rent statistiska orsaker är större än andelen överensstämmande observationer. Om Cohen's Kappa beräknas med dessa värden enligt Analysmetod 3 som

$$\kappa = \frac{n_a - n_\epsilon}{n - n_\epsilon} = \frac{44 - 45}{68 - 45} = -0.07$$

n är det totala antalet observationer. $K=-0.07$ indikerar en risk enligt tidigare resonemang att Adapis resultat kan vara helt slumpmässiga, vilket alltså delvis kan tillskrivas det asymmetriskt viktade dataunderlaget metoden jämförts emot.

Adapis var dock från början tydlig med att deltagandet i projektet utgjorde en läroprocess. Adapis har under projektets gång utvecklat sin förmåga att tolka de radarekon som rör genererar. I projektets slutskede, i samband med mätningar på rören som grävts ned enkom för projektets räkning, noterade Adapis mer koherenta radarekon för oskadade rörsektioner (2, 4), kontra de skadade (1, 3, 5) där ekona var mer inkoherenta, Figur 5.



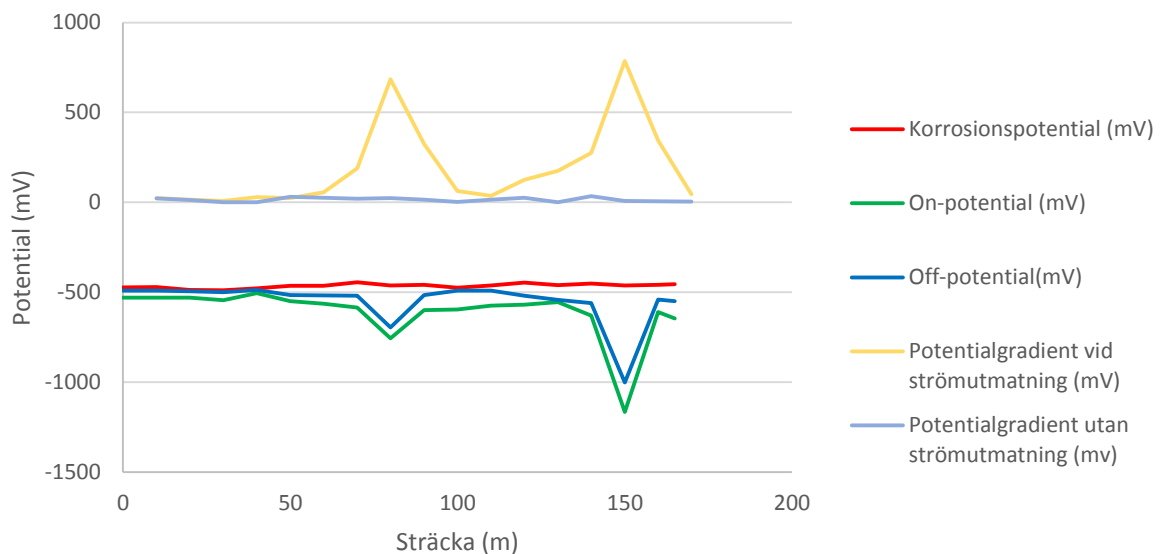
Figur 5. Adapis resultat från markradarmätningar. Lodrät profil. Rörens hjässa på ca 1.1 m djup.

Denna iakttagelse är i sig ett resultat av projektet och kan ligga till grund för en mer automatiserad metodik för skadedetektering med hjälp av markradar. Adapis undersöker i skrivande stund möjligheter till analys av variogram för att postprocessa större datamängder. En hypotes är att val av filterstorlek (intervall) i analysen kan spela en avgörande roll för möjligheter att klassificera skador av olika storlek. Detta bör förslagsvis tas vidare i kommande projekt för att utreda eventuella automatiseringsmöjligheter och i vilken grad det ökar överensstämmelsen i en studie av den typ som här utförts.

Elektrokemisk metod

Swerea KIMAB deltog i projektet med en elektrokemisk metod, främst med syfte att identifiera skador i isolering på fjärrvärmerör. Den fungerar bättre på isolerade fjärrvärmeledningar som har ett galvaniskt skydd mot marken i jämförelse med vattenledningar. En förutsättning är att fjärrvärmeledningen inte är skyddsjordad vilket bekräftades på en av mätplatserna, där mätningar inte kunde genomföras. Den elektrokemiska metoden går förenklat till så att man ansluter sig till fjärrvärmenätets medierör med en elektrod. Med en elektrod av motsatt polaritet traverserar man sedan längs rörets sträckning och letar efter den potentialsänkning som uppstår där det finns läckströmmar i marken. Man använder även en alternativ potentialgradientmetod där två elektroder förs ned i marken. Läckströmmar uppstår där manteln och PUR-skummet är skadat, så fukt trängt in i isoleringen. Metoden har modifierats i projektet. Man upptäckte exempelvis att metoden krävde en omvänd polaritet, samt att de markförlagda elektrodena behövde placeras på ett annat avstånd till ledningen, för att fungera i den tänkta tillämpningen. Den här metoden testades på två adresser och enbart på fjärrvärmerör. Totalt analyserades 16 rör från dessa två adresser. Överensstämmelsen med

referensmätningar från RISE enligt Analysmetod 2 uppgick till 75 %. Swerea lyckades precisera ett par punkter med skador på manteln och undermålig vidhäftning av isoleringen mot medieröret, vilket indikerar att vatten trängt in i isoleringen på dessa ställen, Figur 6.



Figur 6. Resultat för den elektrokemiska metoden från en av mätplatserna. Förändringar i potential och potentialgradient indikerar skada.

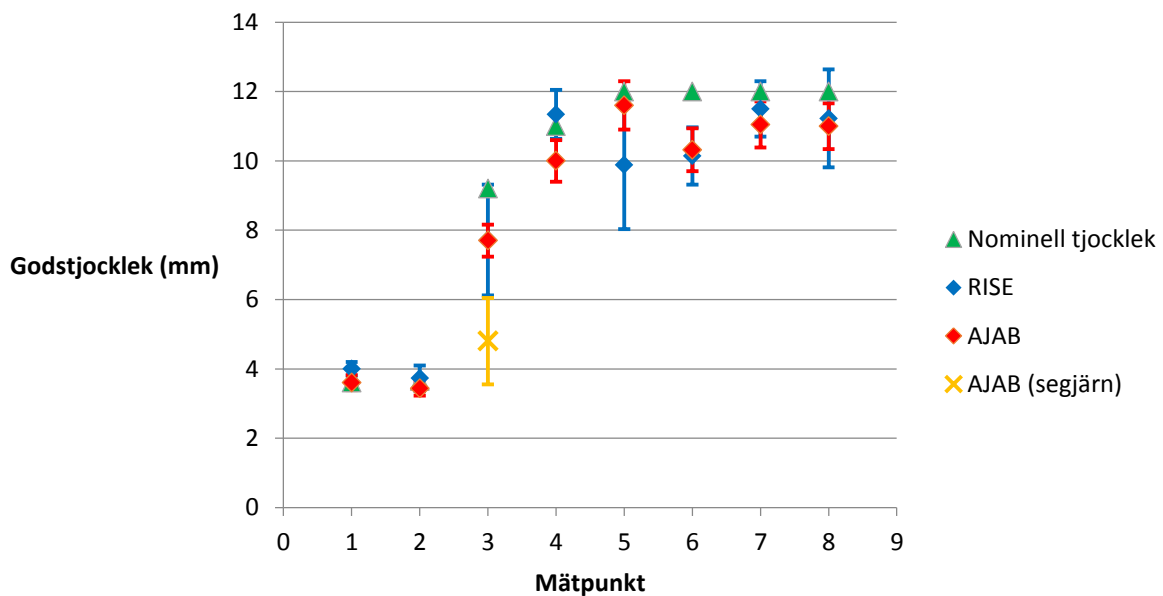
Hade RISE fokuserat enbart på mantelskador, kunde metoden fått ett högre värde på samstämmighet. Då RISE bedömt rörens skick som helhet, dvs mantel/PUR/medierör, dras betyget ned eftersom metoden missat sektioner med undermålig isolering. Fukt tros ha vandrat från närliggande skador i manteln och brutit ned PUR-skummet där manteln trots allt varit intakt. Något som eventuellt skulle vara intressant att vidareutveckla ett samarbete kring är en kombination av Swereas elektrokemiska metod och Lunds universitets resistivitetsmetod för vattenledningar. Genom att kombinera teknikerna kunde eventuellt markresistiviteten filtreras bort för att erhålla en tydligare bild av läckströmmarnas distribution i marken. Man skulle på så sätt eventuellt kunna kartlägga skador på vattenledningars yttskikt. Det finns dock en praktisk utmaning när det gäller vattenledningar. Frånvaron av galvanisk koppling mellan rörsektioner på grund av gummipackningar, som tidigare beskrivits i avsnittet om Lunds universitets resistivitetsmetod. Den elektrokemiska metoden bygger på att hela den undersökta konstruktionen har galvanisk kontakt. Det är därför den varit framgångsrik på välisolerade fjärrvärmerör med svetsade fogar.

Akustiska mätningar

Den akustiska metoden Delta-t, ansvarar Arne Jensen AB (AJAB) för. Den bygger på en teknik där ljud alstras av en sändare och registreras av två mottagare. Dessa enheter är monterade på samma ledning, med ett inbördes avstånd. Genom att mäta tiden från att ljudet alstras till det att det registreras av mottagarna, samt med kännedom om avstånd och några fler parametrar, används denna metod för att uppskatta ledningens väggtjocklek. Man får ett medelvärde för väggtjockleken längs den undersökta sträckan. Jämförelsen med experimentella referensdata från RISE ter sig därför något annorlunda än för andra metoder. Här finns en möjlighet att beräkna det normaliserade felet enligt det vi kallar Analysmetod 1. E_n har beräknats som ett medelvärde för respektive mätplats. Eftersom U_{lab} är okänd uttrycks andelen överensstämmande resultat som en funktion av U_{lab} enligt

$$k(U_{lab}) = \frac{\#\{E_n(U_{lab}): E_n(U_{lab}) < 1\}}{N}$$

k representerar kvoten mellan antalet mätplatser för vilka $E_n < 1$ och det totala antalet mätplatser N . Den aktuella jämförelsen mellan resultat från mätningarna med Delta-t och referensdata från RISE är intressant ur flera aspekter. Det visar att AJABs beräknade medelvärde i 75 % av de undersökta ledningarna är överensstämmande med referensdata från RISE. Det innebär att AJABs medelvärde hamnar inom den expanderade osäkerhet från medelvärdet som RISE erhållit i sina mätningar, referensvärdet, för 6 av 8 ledningar. Om AJAB istället angivit en expanderad osäkerhet av exempelvis ± 6 % skulle man få 100 % överensstämmelse med referensdata från RISE. Med överensstämmelse enligt Analysmetod 1 avses att resultaten inklusive angivna osäkerheter tangerar varandra.



Figur 7. AJABs resultat (röd kvadrat) för åtta mätplatser med en expanderad osäkerhet av ± 6 % kontra RISE resultat (blå kvadrat) med mätosäkerhet av två standardavvikelser för uppgrävda rör från samma mätplatser. Den nominella godstjockleken (angiven av nätägaren) illustreras med gröna markörer. AJAB (segjärn) illustrerar resultat med felaktig information från nätägaren angående rörmaterialet.

Det tydliggörs i Figur 7 där felstaplarna hos dataserier med kvadratiska markörer, RISE referensdata och AJAB med en osäkerhet på 6 %, tangerar varandra i alla mätplatser. För mätplats 3 redovisas ytterligare en mätning, vilket på ett tydligt sätt klargör vikten av att metodägaren får korrekt information om ledningsmaterialet innan analysen utförs. Inför mätning fick AJAB information om att objektet var en betongfodrad segjärnsledning. RISE kunde konstatera att det var en betongfodrad gråjärnsledning vid efterföljande laboratorieanalyser. Med denna information antogs inledningsvis en felaktig elasticitetsmodul för rörmaterialet vilket som synes får stort genomslag i beräkning av godstjockleken. Felstaplarna för den orange mätserien utgör 26 % av uppmätt värde. AJAB gavs möjlighet att genomföra en ny beräkning och kunde med rätt information förbättra överensstämmelsen med RISE för den aktuella mätpunkten.

Generellt tycks det vara så att Delta-t erhåller ett något lägre medelvärde för uppmätt godstjocklek än RISE, med två undantag i den aktuella studien. I det mest avvikande fallet, mätpunkt 5, gäller det en gråjärnsledning från 1890, det objekt för vilket RISE även uppvisade den högsta mätosäkerheten, Figur 8.



Figur 8. Gråjärnsrör från 1890 med invändig beläggning.

Detta rör hade som synes en invändig beläggning, vilket bör haft en påverkan på AJABs mätmetod. Metoden bör rimligtvis påverkas i viss mån av den kraftiga beläggningen, vilken tycks utgöras av en blandning av organiskt och icke organiskt material. Med Delta-t analyseras vägg tjocklek eller kvarvarande sådan, och det är inte utrett hur den invändiga beläggningen påverkar rörväggens hållfasthet. Ett rimligt antagande är att RISE genom att avlägsna den invändiga beläggningen inför referensmätning av den kvarvarande godstjockleken kan erhålla ett lägre värde än AJAB med Delta-t. Det skulle i så fall förklara avvikelserna för mätplats 5, Figur 7.

AJAB erfar att Delta-t är en robust metod under kända betingelser. Dvs den bygger på fysikaliska samband för vågutbredning i vattenledningar. Om betingelserna är okända, eller felaktigt antagna, som i fallet gällande det betongfodrade gråjärnet, mätplats 3, introduceras fel i modellerna. Den aktuella analysen bygger enbart på data som samlats in i projektet. AJAB har besökt 20 st mätplatser i projektet. Totalt har 31 rör från 8 av dessa mätplatser analyserats hos RISE. Det råder en övervikt av färskvattenledningar (7 st) kontra fjärrvärmeledningar (1 st) i studien. Den allmänna uppfattningen är att landets fjärrvärmenät är bättre dokumenterade än vattennäten. Möjligen hade graden av överensstämmelse därför varit högre i en studie på enbart fjärrvärmerör. Mätningarna på den aktuella fjärrvärmeledningen i denna studie hade exempelvis varit konsistenta med referensdata om man antagit $U_{lab} = \pm 5\%$. Det är dock ett enskilt resultat. Det krävs ett större dataunderlag, för att göra generella uttalanden om metodens osäkerhet på både vatten- och fjärrvärmeledningar. Vi hänvisar till stycket om **Mål och avgränsningar** för detta projekt. Slutsatsen blir att metoden är starkt beroende av korrekt information från ledningsägaren för att vid ett enskilt mättillfälle avgöra rörets skick.

Vid upprepade mätningar, reproducerade vid återkommande besök, eller med stationärt monterad utrustning torde man eventuellt kunna uttala sig om rörets förändring med en lägre osäkerhet. Det skulle ge ett mått på förändringshastigheten, men i sig inte ett säkrare mått på återstående livslängd. En intressant vidareutveckling av detta vore dock att analysera förändringstakten och framförallt derivatan av denna strax innan skada uppstår. En hypotes är att man skulle uppmäta en ickelinjär förändring för exempelvis segjärn, på grund av materialets plasticitet, när ett materialbrott är nära. Även detta kan vara ett uppslag för kommande forskningsprojekt.

Sammanfattning

De mätmetoder som utvärderats i projektet har alla olika karakteristika. Som beskrivet i rapporten har vi försökt vara objektiva men pragmatiska i våra jämförelser och lyft fram de mest intressanta iakttagelserna. Alla metoder har inte genomgått samma analys, således bör resultaten inte jämföras sinsemellan om vi inte explicit uttryckt oss så. Mätmetodernas egenskaper återges enklast i en tabell, Tabell 3.

Tabell 3. Sammanfattning av de undersökta mätmetodernas egenskaper

| Leverantör, Mätmetod | Analysmetod | | | Fördelar | Nackdelar | Utvecklingsförslag |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|--|--|--|
| | A1 | A2 | A3 | | | |
| Lunds universitet, Markresistivitet | - | 95 % ¹ | - | 3D information om markresistivitet. God överensstämmelse med markprover från Sweco Geolabs. Påverkas av vattenledningar med skadat ytskikt. Utvecklingspotential | Tidsödande. Uttalar sig inte om rörets status. Tveksam tillämpning på fjärrvärmerör. | Ta hänsyn till a priori information. Tätare samarbete med markradar för information om rördjup etc. Samarbete med Swerea, kombination av mätprinciper. |
| Paris universitet, Markresistivitet | - | 65 % ² | 42 % | Snabb metod för att skanna av längre sträckor. Metod under utveckling | Låg upplösning. Påverkas av markytans resistivitet. Uttalar sig inte om rörets status. | Förfinna den spatiala upplösningen. Införa korrekationer för olika typer av marktyper. |
| Adapis, Markradar | - | 65 % | 0 % ³ | Bra på att lokalisera rör. Bra nedträngningsdjup pga lågfrekvent signal. Reagerar på dimensionella avvikelser. Utvecklingspotential | Svårt att uttala sig om rörets skick inledningsvis, rost etc. Något sämre spatial upplösning pga lågfrekvent signal. | Automatisera postprocessingen för att göra statusbedömningen mer objektiv. |
| Guideline Geo, Markradar | - | - | - | Bra på att lokalisera rör. Bra spatial upplösning. | Svårt att uttala sig om rörets skick, rost etc. Högfrekventa signaler tränger inte ned så djupt i marken. | - |
| Swerea, Elektrokemisk | - | 75 % | 12 % ⁴ | Uttalar sig om isoleringens status och framförallt mantelskadans placering. Relativt enkel och billig metod. Snabba analysvar. | Fungerar bara på välisolerade ledningar utan skyddsjord. Svårt att uttala sig om skadans utbredning. | Samarbete med Lunds universitet för att reducera påverkan från markresistivitet. Kombination av dessa mätprinciper kan ge ytterligare information. |
| Arne Jensen AB, Delta-t | 75 % ⁵ | | | Uttalar sig om medierörets genomsnittliga status. Möjlighet att detektera läckor. ⁶ | Metodens osäkerhet direkt beroende av korrekt information från nätägaren. | Minimera de största mätosäkerhetsbidragen Stationära installationer med analys av förändringens derivata. |

¹ Värdet representerar relation till markprover från Sweco Geolabs.

² Värdet representerar relation till resistivitetmätningar från Lunds universitet.

³ Låg överensstämmelse delvis på grund av datamängdens asymmetri och Adapis läroprocess. Fler skadade ledningar kunde resulterat i ett annat utfall. Lovande iakttagelser i projektets slutskede som inte återspeglar sig i redovisade resultat.

⁴ Låg överensstämmelse på grund av att metoden inte upptäcker delar av ledning där fukt spridit sig innanför manteln. God statistik för mantelskador.

⁵ Avser medelvärdets överensstämmelse med referensdata från RISE.

⁶ Läckageljud upptäcktes med metoden vid en av mätplatserna.