



Utvärdering av icke-förstörande mätmetoder
för lokalisering av skador på rörledningar i
mark

– rapportering av projektet Pipe Status

JOHANNA SÖRENSEN | OLLE PENTTINEN



Utvärdering av icke-förstörande mätmetoder för lokalisering av skador på rörledningar i mark – rapportering av projektet Pipe Status

J. Sörensen^{a*}, O. Penttinen^b

^a Teknisk vattenresurslära, Lunds tekniska högskola (LTH), Lund

^b RISE Research Institutes of Sweden, Göteborg

* 046-222 44 87, johanna.sorensen@tvrl.lth.se

Bakgrund

Samhället är beroende av välfungerande ledningsnät för att leverera livsviktiga element som vatten och värme. När dessa ledningsnät inte fungerar tillfredsställande orsakar de stora störningar i samhället. För att kunna utveckla ett hållbart samhälle måste ledningsnäten underhållas med evidensbaserade tekniker och metoder.

I denna rapport presenteras nya tekniker som testats i ett projekt, Pipe Status, som letts av Sweden Water Research och delfinansierats av Vinnova inom ramen för utmaningsdriven innovation (UDI). Metoder som är praktiska att arbeta med har valts ut för projektet. Metoderna kräver vanligtvis inte grävarbete eller avbrott i driften. Målet är att metoderna ska öka förståelsen och kunskapen om vilka ledningsdelar som ska prioriteras vid investering i underhåll. Rörledningar försämras i olika takt beroende på till exempel material, markmiljö och användning. Kostnaderna för förnyelse finansieras av VA- och fjärrvärmekunderna och det är viktigt att investera i rätt rör. Statusbedömningar är också viktiga för proaktivt underhåll. Genom regelbunden statusbedömning är det möjligt att upptäcka svaga rör och förhindra rörbrott.

I Sverige består dricksvattennätet huvudsakligen av ledningar av gråjärn (35,3 % av total ledningslängd), PE (22,4 %), segjärn (19,8 %) och PVC (12,5 %). Fram till 1970-talet lades mest gråjärn (gjutjärn). Segjärn och PVC tog över under 70- och 80-talen. Bland de rör som läggs idag dominerar PE (>90 %). När det gäller fjärrvärmennätet är merparten av ledningsnätet av den typ som kallas tredje generationens fjärrvärmennät, det vill säga ett medeltempererat, trycksatt fjärrvärmesystem. Den största utbyggnaden i Sverige skedde under 80- och 00-talen, då denna typ av system var vanlig. Den fjärde

generationens lågtempererade fjärrvärmenät är fortfarande ovanligt i Sverige. Fjärrvärmeledningarna varierar betydligt mindre i material än dricksvattenledningarna. Sedan 1980-talet har i stort sett alla nya fjärrvärmeledningar varit plastmantlade och idag är cirka 90 % av alla fjärrvärmeledningar, nya som gamla, av denna typ. De asbestcement- (5 %) och betongledningar (4 %) som också är i drift anlades framför allt under 1970-talet. (Malm m.fl., 2016)

Medan merparten av fjärrvärmenätet byggts ut sedan 1970-talet, är dricksvattennätet betydligt äldre (Malm m.fl., 2016). Utbyggnaden påbörjades redan på 1800-talet och i många fall är dokumentationen om dricksvattenledningarna bristfällig. Det ger utmaningar när ledningarnas status ska bedömas då vissa mätmetoder ger mer tillförlitligt resultat om parametrar som till exempel dimension och material är kända.

Målsättning

Syftet med projektet Pipe Status har varit att undersöka, utveckla och utvärdera metoder för statusbedömning av fjärrvärme- och vattenrör i gatumiljö. Målet är att beskriva hur man kan hitta de sämsta delarna av ledningarna *utan* att behöva gräva eller avbryta driften. Ambitionen är att på så sätt minska driftstörningar och kostnader och, när det gäller fjärrvärmenätet, spara energi. I projektet har befintliga, ingreppsfria mätmetoder testats i fält för att undersöka deras förmåga att enskilt eller i samklang bedöma status på ledningar. Metoderna har sedan verifierats genom att analysera segment av rör i RISE laboratorium och sedan jämföra med resultaten från respektive mätmetod. De fem metoderna presenteras i tabell 1 och beskrivs i respektive kapitel nedan. Samtliga metoder

Tabell 1. Metoder och den tillämpning som beskrivs i denna rapport.

Metod	Namn	Utvecklare i projektet	Typ av ledning
Akustisk mätning av godstjocklek	Delta-t	Arne Jensen AB (AJAB)	Metalledningar Vattenledningar (tillämpning för fjärrvärmeledningar finns sedan tidigare)
Elektrokemisk metod	-	Swerea Kimab, numera en del av RISE	Alla metalledningar med en skyddsbeläggning där elektrisk kontinuitet finns mellan varje rördel (t.ex. svetsade rörledningar) Fjärrvärmeledningar och vattenledningar med skyddsbeläggning
Markradar (eng: Ground Penetrating Radar, GPR)	-	Adapis Georadar Teknik AB Guideline Geo	Metall- och plastledningar Både vatten- och fjärrvärmeledningar
Resistivitetsmätning (eng: Electrical Resistivity Tomography, ERT)	-	Teknisk geologi vid LTH Paris universitet (Sorbonne-universitetet)	Metalledningar Både vatten- och fjärrvärmeledningar
Kamera med inspelning av läckljud	Pipe Inspector	MTA Messtechnik	Diameter från DN50 till DN3000 Både vatten- och fjärrvärmeledningar

har testats på nya sätt och med nya syften. En metod som sedan tidigare används för statusbedömning av naturgasledningar har testats på fjärrvärmeledningar, en metod som redan används på fjärrvärmeledningar har testats på vattenledningar osv.

Vid sidan av de fysiska mätningarna har en statistisk modell utarbetats för att undersöka historiska data från ledningsägarna och externa data. Dessa data har analyserats för att peka ut riskledningar och för att få en bättre förståelse av de bakomliggande orsakerna till rörbrott.

En annan målsättning med Vinnova-projektet var att göra en litteraturstudie kring hur existerande dricksvatten- och fjärrvärmenät ser ut, vilket presenteras i en rapport. Syftet med rapporten var att inventera de faktorer som har inverkan på skicket på nedgrävda vatten- och fjärrvärmeledningar. Rapporten heter *Kartläggning av materialfördelning och skadestatistik av vatten- och fjärrvärmeledningar i Sverige som underlag till rekommendationer för datainsamling* och är skriven av Annika Malm (RISE), Saeed Mokhlesi (DRICKS, Chalmers), Kerstin Sernhed (Lunds Tekniska Högskola) och Naz-daneh Yarahmadi (RISE). Rapporten finns fritt tillgänglig på www.pipestatus.se.

Deltagare i projektet

Eon, Göteborgs stad (Kretslopp och vatten), Krafringen, NSVA, Stockholm vatten och avfall (SVOA), VA Syd, Ängelholms kommun och Öresundskraft har deltagit i projektet genom att bidra med ledningar, kunskap och erfarenhet. Projektet har letts av Sweden Water Research. Utöver ledningsägarna och tidigare nämnda metodägare (tabell 1), har RISE bidragit till projektet med teoretiska och experimentella analyser medan Chalmers tekniska högskola och Lunds tekniska högskola (LTH) har bidragit med kunskap om vatten- och fjärrvärmeledningar och därtill relevanta frågor.

Metod

De olika metoderna har testats i fält, av metodägarna själva, och sedan jämförts med referensdata från RISE. Det betyder att RISE har undersökt ledningarna i sin laboratorier och noterat vilken typ av skador som hittats och var dessa varit placerade på ledningarna. Testerna 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 med högre detaljeringsgrad.

RISE har tagit fram verifieringsdata i laboratoriemiljö på rör som skickats in från respektive mätplats. Totalt har RISE tagit emot 70 rör från 12 adresser. I analysen ingår 54 dricksvatten- och 16 fjärrvärmerör (längd 1–6 m). De rörmaterial som förekommer är

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

Laboratorieanalyserna inkluderar dimensionsmätningar, materialprov av medierör samt kvalitetstester av isolering kring fjärrvärmerör.

Rapportens upplägg

I de följande fem kapitlen ges en kort introduktion till de olika metoderna som testats i

projektet samt en sammanfattning av resultaten från testerna. Var och ett av de fem kapitlen avslutas med en slutsats som syftar till att ge en bild av hur metoderna kan tillämpas och/eller tas vidare i framtida utvecklingsprojekt. Efter det sammanfattas hur man med hjälp av en statistisk modell baserad på historiska data om rörbrott kan förutsäga vilka ledningar som riskerar framtida rörbrott.

För en mer detaljerad genomgång av resultaten från mätningarna och hur dessa bedöms i relation till referensmätningarna hänvisas till den rapport som RISE har skrivit för projektet: *Pipe Status – Utlåtande angående de utvärderade mätmetoderna* (Penttinen, 2019). I samma rapport finns även ytterligare några detaljerade förslag till utvecklingsmöjligheter, utöver de som nämns här. Rapporten finns fritt tillgänglig på www.pipestatus.se.

Akustisk mätning av godstjocklek

Kort intro

I detta projekt har detektering av åldrad och försvagad ledning testats med en akustisk mätmetod, Delta-t, som sedan tidigare fanns på marknaden för fjärrvärmerör. I detta projekt var syftet framförallt att undersöka om metoden kan tillämpas på vattenledningar. Metoden 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 sensorernas inbördes avstånd och några rörspecifika parametrar, beräknas ledningens godstjocklek. Man får ett medelvärde för godstjockleken längs den undersökta sträckan. Resultatet redovisas oftast i form av avvikelser från nominell godstjocklek. Mätningarna ger alltså ett procentvärde på hur mycket stålroret längs mätsträckan har försvagats. Det gör metoden unik bland de metoder som undersökts i projektet, eftersom det är den enda av dessa metoder som uttalar sig om ledningens genomsnittliga status längs den mätta sträckan. I detta projekt har metoden framförallt testats på dricksvattenledningar. Speciella patentsökta beräkningsalgoritmer, mätsensorer och mätutrustning har utvecklats.

Vattenledningsrör ligger ofta djupare än fjärrvärmerör och helt stumt (med sand runt) i marken, vilket ger mindre störningar. Äldre fjärrvärmeledningar, kulvertsystem, har å andra sidan kammare med enkel åtkomst till stålroren. Där är det enkelt att koppla in mikrofonerna, för att mäta utbredningen av vibrationerna. I moderna fjärrvärmeledningar (plastmantel) och i dricksvattenledningar finns få kammare, men däremot ventilinstallationer. För att mäta räcker det att mikrofonen får kontakt med stålroret via t.ex. en ventil. Det kan också finnas möjlighet att koppla in mikrofoner inne hos abonnenterna.

En framtida utvecklingsmöjlighet är att studera hur förändringstakten i Delta-t-mätningarna relaterar till kvarvarande livslängd och rörbrott. En hypotes från projektets sida är att man skulle uppmäta en icke-linjär förändring för exempelvis segjärn, på grund av materialets plasticitet, när ett materialbrott är nära. Att utreda detta kan vara ett uppslag för kommande forskningsprojekt.

Under projektperioden har AJAB parallellt vidareutvecklat en on-line Delta-t-metod, med prototyper och prover i Öresundskrafts ledningsnät. En sensorbox, Smart Aktiv Box (SAB) har utvecklats. Denna box är utrustad med en mängd olika sensorer. Synkroniseringen av boxarna sker med hjälp av GPS. De synkade signalerna spelas in och skickas över mobildatanät till en databas där Delta-t-beräkningarna utförs och analyseras till-

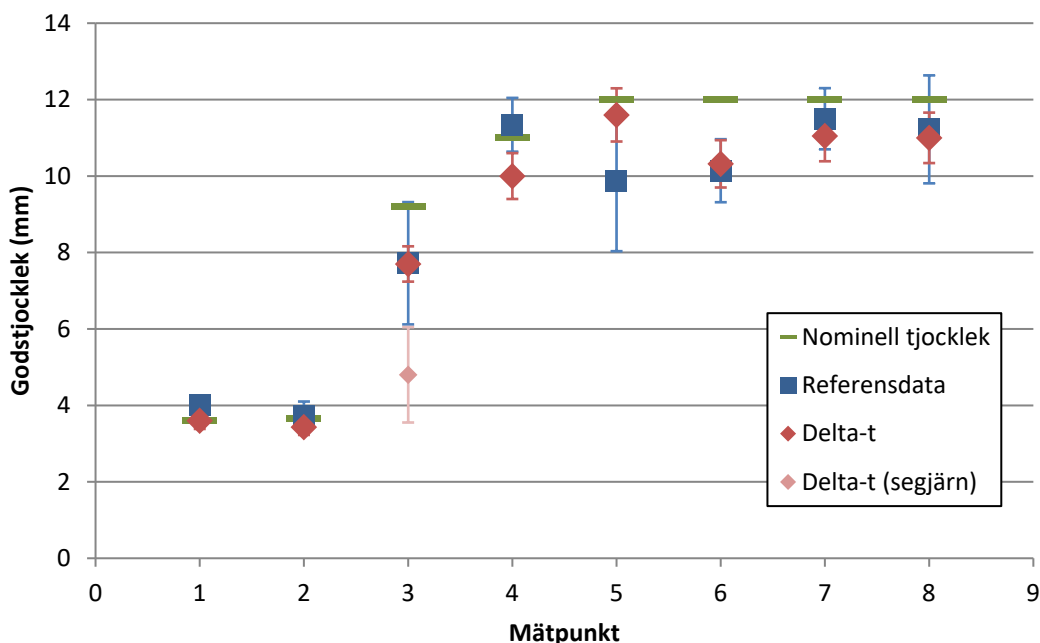
sammans med övriga mätdata. Detta erbjuder en plattform för kontinuerlig övervakning med Delta-t såväl som en möjlighet till implementering av läcksökningsalgoritmer.

En framtida utvecklingsmöjlighet är att studera hur förändringstakten i Delta-t-mätningarna relaterar till kvarvarande livslängd och rörbrott. En hypotes är att man skulle uppmäta en icke linjär förändring för exempelvis segjärn, på grund av materialets plasticitet, när ett materialbrott är nära. Att utreda detta kan vara ett uppslag för kommande forskningsprojekt.

Sammanfattning av resultat

Den akustiska metoden användes för första gången på dricksvattenrör i detta projekt. I stort sett alla mätsträckor hade något försvagade rör, men var i gott skick. Mätningarna fungerade som förväntat, förutom på ett ställe där en läcka redan fanns. Läcka upptäcktes vid mätningen. Jämförelsen visar på att metodens medelvärde för 75 % av de undersökta ledningarna är konsistent med referensdata. Om man istället anger en expanderad osäkerhet av exempelvis $\pm 6\%$ skulle man få 100 % överensstämmelse med referensdata. Att två resultat överensstämmer innebär att deras mätresultat inklusive osäkerheter överlappar, eller åtminstone tangerar varandra. Figur 1 visar att Delta-t i 6 av 8 fall hamnar inom två standardavvikelser från medelvärdet för referensmätningarna. Med andra ord innebär det att Delta-t i dessa fall hamnar inom det intervall där referensen för en enskild mätning skulle hamna med 95 % sannolikhet. För mätplats 3 redovisas även ett mätresultat där mätleverantören fått felaktig uppgift om ledningens material. I tron att materialet varit segjärn istället för gråjärn har E-modulen överskattats och vägg tjockleken underskattats. Resultatet indikerar vikten av god dokumentation för de ledningar som metoden appliceras på.

Det råder en övervikt av dricksvattenledningar (7 st.) kontra fjärrvärmeledningar (1



Figur 1. Genomsnittlig godstjocklek uppmätt med Delta-t med en expanderad osäkerhet av $\pm 6\%$ (rött) kontra referensmätning med osäkerhet av två standardavvikelser (blått). Mätning av godstjocklek med felaktig information om rörmaterial med en expanderad osäkerhet av $\pm 26\%$ (rött, ljusst). Den nominella godstjockleken (angiven av nätägaren) visas med gröna markörer.

st.) av ledningar som undersökts av RISE i projektet. Totalt har 31 rör från dessa 8 ledningar analyserats i syfte att ta fram referensdata. Totalt har 20 ledningar undersökts av metodägaren i fält.

Den allmänna uppfattningen är att landets fjärrvärmenät är bättre dokumenterade än vattennäten samt att man uppnått en högre grad av digitalisering. 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 en osäkerhet i metoden, $U_{lab} = \pm 5 \%$. Det är dock ett enskilt resultat.

RISE har förutom det experimentella arbetet även genomfört mätosäkerhetsanalyser (utvärdering av metodens osäkerhetsbidrag) för två mätningar som utförts på fjärrvärmeledningar. De aktuella analyserna gav en total uppskattad mätosäkerhet på 5,3–5,9 %. I båda fall bedömdes den antagna elasticitetsmodulen för röret utgöra det största osäkerhetsbidraget. Resultaten från analysen ligger i linje med de experimentella iakttagelserna i projektet.

Dessa resultat gäller den aktuella studien för två enskilda mätsituationer och man kan inte göra generella uttalanden om metodens mätosäkerhet i en godtycklig mätsituation utifrån dessa. Metoden är, vilket påvisats både i de experimentella och teoretiska analyserna, beroende av korrekt information från ledningsägaren.

Slutsatser

Med rätt ingångsvärden ger metoden ett resultat som är kopplat till rörets faktiska skick, men den kan inte säga hur skadorna är fördelade, om det exempelvis handlar om enstaka kraftiga skador eller ett flertal lindriga skador. Genomsnittsvärdet kan dock utgöra mycket värdefull information för nätägaren vid en samlad bedömning om rörets skick.

Generellt sett är metoden Delta-t mer mogen för fjärrvärmedistributörer då dokumentationen angående historiskt markförlagda ledningar enligt uppgift håller högre kvalitet. För vattenledningsägare förväntas något högre osäkerhet vid användning av metoden, men med korrekt dokumentation bör den kunna uppvisa goda resultat även på sådana ledningar. Det skulle vara fullt möjligt att upprepa mätningen efter en viss tid och då jämföra det nya mätresultatet med det förra för att på så sätt se i vilken utsträckning den genomsnittliga godstjockleken på röret förändrats. Om man med jämna mellanrum skulle upprepa mätningen skulle man också detektera om takten på försämringen förändras, vilket potentiellt skulle kunna ge en varning om förestående skada. Som tidigare nämnts vore det intressant att utvärdera detta som en metod att bedöma återstående livslängd för ett urval av ledningsmaterial, exempelvis segjärn.

Det är såklart kostsamt att genomföra upprepade mätningar och det finns en risk att man inte lyckas reproducera mätningen, till exempel om man inte monterar sensorerna på precis samma sätt, därför kan fast installerade sensorboxar, av typen SAB som nämndes i inledningen, vara ett bra alternativ ur rent mätteknisk synvinkel. Beroende på hur små och enkelt monterade boxarna kan bli i framtiden, kan det med tiden dessa komma att bli intressant även för vattenledningar med mindre dimensioner i distributionsnätet.

I Pipe Status-projektet har som planerat endast manuella, enstaka mätningar testats med Delta-t. Man har inte testat och verifierat upprepade mätningar, än mindre kontinuerliga mätningar med hjälp av fjärravlästa mätare, vilket har utvecklats vid sidan av projektet. Att utveckla en liknande mätare som kan monteras på brandposter, ventiler eller liknande är inte orimligt. Ledningsägare skulle kunna välja att investera i sådana mätare för montering på ledningar där risk för och/eller konsekvenser av haverier är större.

Elektrokemisk metod

Kort intro

Den elektrokemiska metoden är användbar för att undersöka välisolerade skyddsbeläggning som är applicerad på metalliska rörledningar. Mätmetodiken, som sedan tidigare tillämpas på naturgasledningar, skulle med fördel kunna användas på rörledningar där varje rördel har elektrisk kontakt med varandra genom t.ex. svetsning. Exempel på sådana rörledningar är fjärrvärmeledningar eller vattenledningar som har en skyddsbeläggning av plast. Metoden har visat sig fungera för att hitta områden med skador på rörledningars skyddsbeläggning. Detta är intressant då dessa skador ökar risken för korrosion och genomfrätningar på rörledningarna. Däremot visar metoden inte utbredningen av en eventuell skada på röret, utan alltså enbart skada på skyddsbeläggningen.

Elektrokemiska potentialmätningar (korrosionspotentialmätningar) utförs var 10:e meter utefter rörledningen utan strömutmatning. För att kunna utföra mätningarna ansluts en mätsladd till en ventil som är placerad t.ex. i kabelbrunnen och som är i elektrisk kontakt med rörledningen. En ytterligare mätsladd ansluts till en mättad elektrod som trycks mot markytan. De båda mätsladdarna ansluts sedan till en multimeter med hög ingångsimpedans. För att kunna lokalisera beläggningsskador på en ledning matas en likström ut från olika mätelektroder som är nedtryckta i marken. Den utmatade strömmen från mätelektroden skickas till rörledningen. Den utmatade strömmen från elektroderna, kommer att läcka in i blottlagda stålytor där korrosion pågår. Vid inläckningsställen, dvs. blottlagda stålytor, uppstår stora potentialgradienter som enkelt kan mätas med två externa referenselektroder som trycks mot markytan. Fördelen med mätmetoden är att den kan lokalisera exakt var den blottlagda skadan är och att antalet mätvärden är relativt få jämfört med övriga mätmetoder.

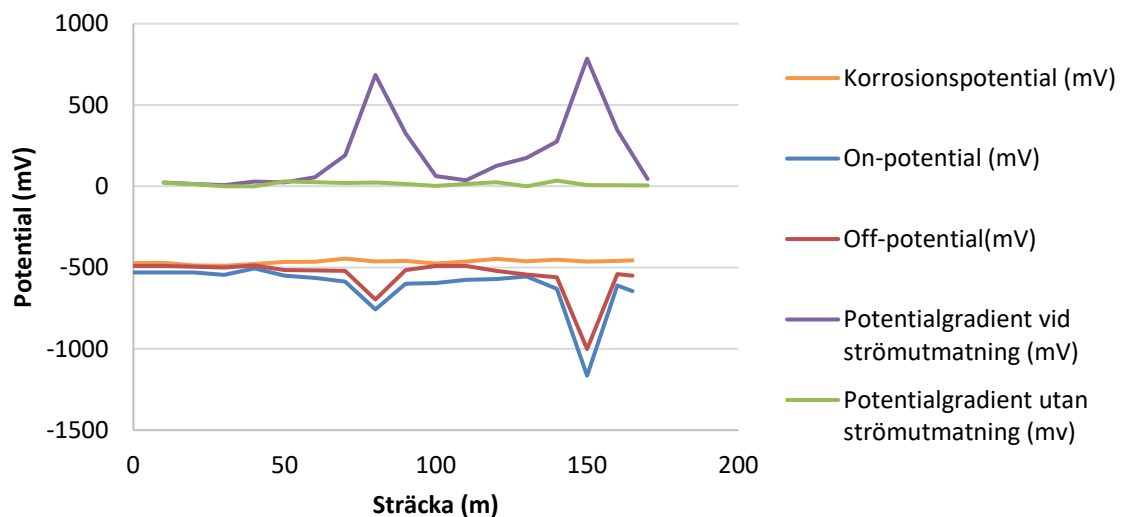
Den elektrokemiska mätmetoden är en snabb och enkel mätmetod för att hitta skador på metalliska ledningar belagda med en skyddsbeläggning (gäller både fjärrvärmeledningar och plastbelagda vattenledningar). Antalet mätningar är få på en ledningssträcka (en mätning per 10 meter, varje mätning tar några sekunder). Resultaten från mätningarna behöver inte databehandlas utan kan enkelt redovisas i ett XY-diagram. Ingen dyr utrustning behöver användas.

Sammanfattning av resultat

Av resultaten från de elektrokemiska mätningarna utförda utefter fjärrvärmeledningen längs Trastvägen i Lund framgick det att ledningen hade två stålytor med kraftiga korrosionsangrepp. Det handlade om skarvar på fjärrvärmeledningen där läckage uppstått framförallt i mantelskarven. De korroderade stålytorna vid skarvarna har tidigare varit tejpade. Korrosionsskadorna som uppmättes var placerade ca 78 meter och 147 meter från startpunkten. Vid uppgrävning av rörledningen konstaterades att rörledningen hade kraftiga korrosionsskador på de ställen som konstaterats med den elektrokemiska mätmetoden. På figur 2 visas hur mätresultaten kan visas grafiskt.

Resultaten från projektet indikerar att blottlagda skador hos belagda fjärrvärmeledningar kan fastställas med denna mätmetod. Hur små skador som kan upptäckas på fjärrvärmerör med mätmetoden är för närvarande inte känt eftersom antalet mätningar har varit för få för att kunna fastställa hur små skador som kan fastställas.

Vid de första undersökningarna visade samtliga mätningar av både fjärrvärmeledningarnas korrosionspotential och potentialgradienten mellan två referenselektroder att fjärrvärmeledningarna är i elektrisk kontakt med obelagd koppar. Detta innebär att samtliga närliggande och obelagda elinstallationer som är jordade och nedgrävda i jord kommer att erhålla ström från de jordförlagda elektroderna strömmatade av koppar.



Figur 2. Potential uppmätt med den elektrokemiska metoden vid en av mätplatserna. Förändringar i potential och potentialgradient indikerar skada.

Detta problem löstes genom att placera mätelektrodena i närheten av den markförlagda rörledningen. Genom att lösa detta problem har metoden i det här projektet gått från att vara omöjlig att använda på fjärrvärmeledningar i gatumiljö till att vara mogen att kommersialiseras för detta ändamål.

Slutsatser

Metoden har vidareutvecklats inom projektet och bedöms fungera som metod att söka efter skador på isoleringen på fjärrvärmerör. Åtminstone en ledningsägare (Öresundskraft) har uttalat att de betraktar den som fullt användbar i sitt arbete med proaktivt ledningsunderhåll.

En potentiell utvecklingsmöjlighet för den elektrokemiska metoden är att kombinera mätningen av läckström med mätning av markresistivitet (ERT). En kombination av dessa två metoder bör möjliggöra en korrektion för variation i markresistivitet i den uppmätta läckströmmen. På detta sätt kan man potentiellt med större säkerhet rangordna skador efter uppmätt läckström på den undersökta ledningen.

Under projektet har det också konstaterats att metoden torde vara lämplig för att kontrollera nyanlagda metalliska vattenledningar med en isolerande skyddsbeläggning inte fått skador i samband med nedgrävning, något som inte är helt ovanligt.

Markradar

Kort intro

En sändarantenn skickar iväg en kort, elektromagnetisk puls ner i marken, vilken reflekteras av objekt i marken. En mottagningsantenn registrerar ekot som studsar tillbaka. Man kan normalt se objekt, till exempel rörledningar, ett par meter ner i marken. Vid gynnsamma jordförhållande kan man se ytterligare någon meter. Det är möjligt att se både rör av plast av metall med markradar. Det kan också vara möjligt att se ett pågående läckage eftersom vattnet påverkar jordens egenskaper.

Det finns olika typer av markradar. Två företag har genomfört fältmätningar i projektet, Guideline Geo med multikanalradar och Adapis Georadar med enkanalsradar.

Sammanfattning av resultat

Adapis Georadar har framförallt använt sin monokanalradar i kombination med stångslingram för att undersöka markens elektromagnetiska egenskaper. Adapis har under projektets gång utvecklat sin förmåga att tolka de radarekon som rör genererar. I början av projektet var träffsäkerheten låg (i stort sett slumpmässig), men i projektets slutskede blev träffsäkerheten bättre. I samband med mätningar på de skadade rören som grävts ned enkom för projektets räkning, noterade Adapis mer koherenta radarekon för oskadade rörsektioner (sektion 2 & 4), kontra de skadade (sektion 1, 3 & 5) där ekona var mer inkohärenta. Detta illustreras på figur 3. 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.

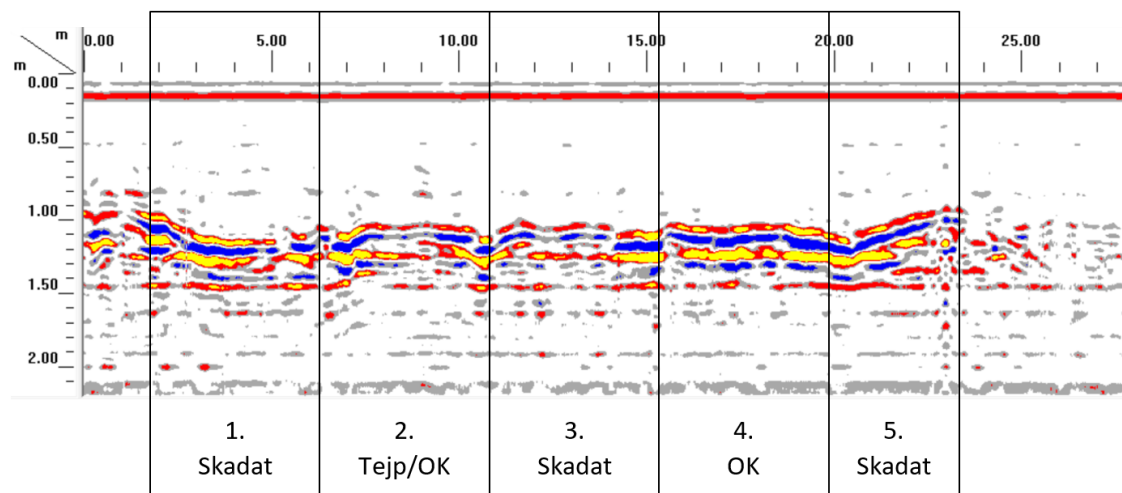
Generellt kan sägas om markradar att metoden är snabb och enkelt på så vis att utrustningen är lätt att ta med och att det går snabbt att skanna över en längre sträcka. Adapis undersöker i skrivande stund en möjlighet att postprocessa större datamängder med en förbättrad, automatiserad analys. Detta bör förslagsvis tas vidare i kommande projekt för att utreda eventuella automatiseringsmöjligheter.

Guideline Geo har i första hand undersökt rörens precisa placering i marken som ingångsvärde till resistivitetsmätningarna nedan. En jämförelse av skador med referensdata har inte varit aktuell.

Slutsatser

För Adapis markradar har resultaten förbättrats mot slutet av projektperioden. Även om man inte nått hela vägen fram och metoden i dagsläget befinner sig för långt från marknaden, så är den samlade bedömningen att resultaten är så pass lovande att den bör fortsätta att utvecklas för att i framtiden kunna användas reguljärt i arbetet med att identifiera skador på ledningarna.

Som ett oplanerat sidospår har metoden använts i projektet för att identifiera s.k. blöta muffar, dvs de rörskarvar där omgivande fukt och vatten trängt in i isoleringen runt fjärrvärmerör. När plastmantlade isolerade fjärrvärmerör havererar är det mycket van-



Figur 3. Lodrät mätprofil från Adapis Georadars mätningar. Rörens hjassa ligger på ca 0,9 m djup.

ligt att detta sker just i skarven till följd av korrosion. Träffsäkerheten har här varit så pass hög att nätägare är intresserad av att fortsätta tillämpa metoden reguljärt.

Resistivitetmätning

Kort intro

Resistivitetmätningar stora styrka är att de ger en detaljerad bild av kritiska markförhållanden, detta kan till exempel vara lågresistiva jordarter och övergångar mellan olika jordarter. Resistiviteten beror i vanliga jordmaterial främst av vatten- och joninnehåll, och lerinnehåll har stor betydelse då det binder till sig vatten och joner. Vid resistivitetmätning sätts vanligtvis ett 80-tal elektroder ner i marken. Om det uppstått en läcka förväntas denna att vara tydligt synlig vid resistivitetmätning. Metodens roll i projektet var dock inte att visa ledningens status, utan att visa på potentiellt korrosiva jordar, vilket tillsammans med andra data skulle kunna peka ut riskledningar.

Vid resistivitetmätning leds ström ner i marken genom två strömelektroder varefter potentialskillnaden mäts mellan två potentialelektroder, d.v.s. mätningen görs med galvanisk koppling. Metoden bygger på att marken har varierande resistivitet, d.v.s. oförmåga att leda ström (Loke m.fl., 2013), och benämns ofta ERT (Electrical Resistivity Tomography). Moderna instrument kan automatiskt koppla ihop och mäta på elektroderna i en systematisk sekvens, och resultatet tolkas med hjälp av numerisk modellering till en tvärprofil eller en tredimensionell bild av markens resistivitet.

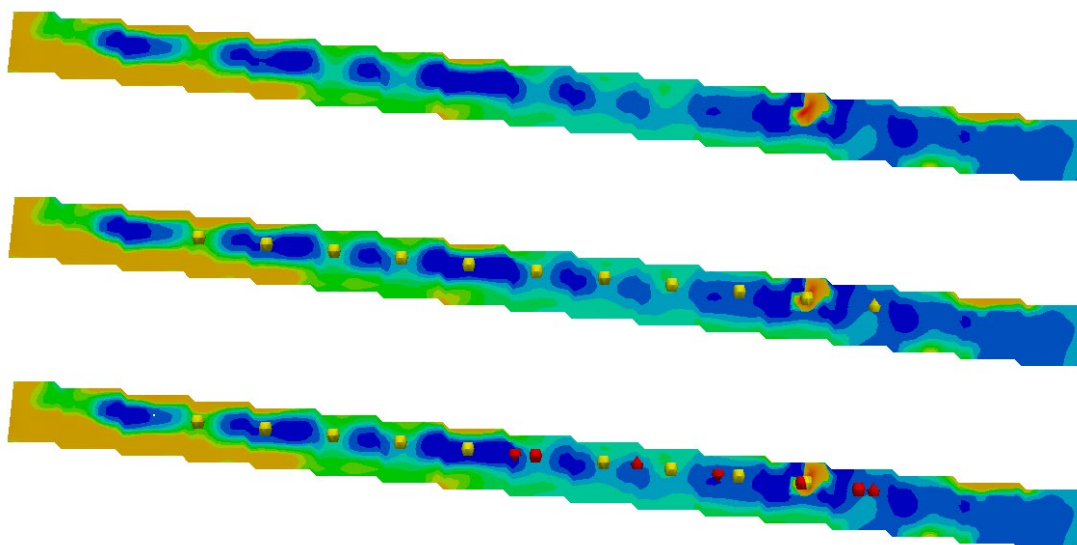
En nackdel med resistivitetmetoden är att den är tidsödande och därmed dyr i mantimmar. Vid undersökning i gatumiljö kräver metoden att man borrar små hål i asfalten eftersom den galvaniska metoden bygger på galvanisk kontakt med jorden.

I projektet testades också en prototypurustning som utvecklats vid Paris universitet (också känt som Sorbonne-universitetet), baserad på en variant av metoden som bygger på kapacitiv koppling och därför inte kräver att man sticker ner elektroder i marken (Loke m.fl., 2013). Istället mäts resistiviteten med plattor som dras över markytan. Fördelen är att man snabbt kan skanna av längre sträckor för att bedöma korrosionsrisk. Dock ger den kapacitiva varianten lägre upplösning i resultaten, och metoden kräver ytterligare utveckling för att kunna användas i rutinemässiga undersökningar.

Resistivitetmätningar i gatumiljö kompliceras av att ledningarna in ligger i en mycket heterogen miljö. God kunskap om tidigare arbete i marken är därför värdefull för att kunna tolka resultaten (Rejkjær m.fl., 2018).

Sammanfattning av resultat

Metoden har i huvudsak använts för att undersöka markens strömledningsförmåga och därmed tänkbar risk för korrosion. Mätningen på ledningen i Göteborg gav dock indikationer på att metoden även skulle kunna se skador på ledningar. Dessa ledningar var mycket påverkade av ytkorrosion. Analysresultat från Göteborg visas på figur 4. Här ses att resistiviteten är lägre framförallt vid muffar. På figur 5 visas motsvarande resultat som en graf. För att bekräfta dessa resultat krävs ytterligare undersökningar, helst med olika typer av ledningar och omfattning på skador, och med olika omgivande miljö.

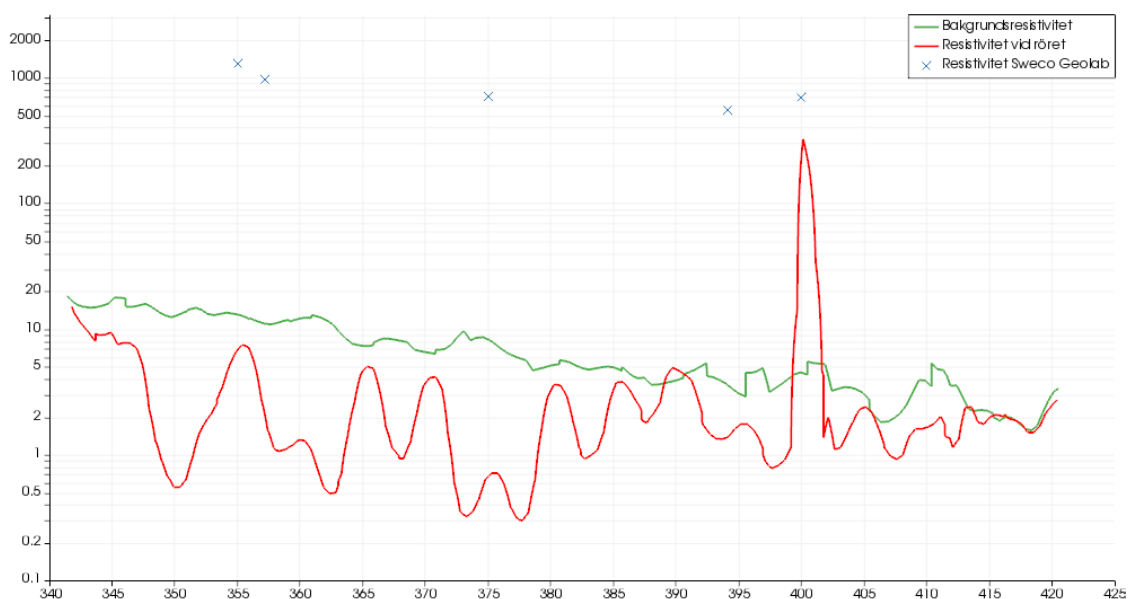


Figur 4. Resultat från resistivitetsmätning av en gråjärnsledning (bitumen, DN200) i Göteborg. Den översta profilen visar resistivitet enbart, den mittersta profilen visar muffarnas placering (gula markeringar) och den nedersta profilen visar muffarnas placering (gult) och rostfläckar (rött).

Resistivitetmetoden återspeglar väl markens faktiska resistivitet. Jämförelsen gjordes av RISE med hjälp av jordprover från respektive mätplats. Resistivitetmetoden påverkas inte i lika stor utsträckning av övriga analyserade parametrar (pH, järn, magnesium, sulfid och redoxpotential).

En intressant vidareutveckling av metoden är att ta in information om ledningens placering innan post-processering av mätningarna. Det skulle kunna ge en ännu bättre bild av resistiviteten i anslutning till rörledningen.

I projektet ses förändringar vid varje muff flertalet muffar, men dessa förändringar varierar mellan muffarna. Det vore därför intressant att se hur dessa förändringar hänger ihop, exempelvis genom att mäta resistansen över respektive muff för att se om korre-



Figur 5. Resultat från resistivitetsmätning av en segjärnsledning (bitumen, DN200) i Göteborg. Vid varje muff eller rostfläck är resistiviteten väsentligt lägre än i omgivande jord.

lation kan påvisas.

Slutsatser

Metoden i sig har inte ambition att uttala sig om skicket på röret, även om vissa upptäckter gjorts i projektet som skulle kunna dra metoden också i denna riktning. Metoden undersöker markens förmåga att leda ström, vilken bl.a. påverkas av markens sammansättning. Om en ledning löper genom ett område som har hög förmåga att leda ström (låg resistivitet) kan man anta att ledningen på denna plats är mer utsatt för korrosion än på andra platser. Svaga läckströmmar förekommer generellt sett i marken i urban miljö till följd av exempelvis högspänningskablar eller andra anläggningar och kan leda till korrosion på metallföremål i marken, såsom vatten- och fjärrvärmeledningar.

Det finns potential att förbättra mätningarna med resistivitetsmetoden genom att ta med information från markradar. Markradarn kan bestämma rörets exakta position, vilket är en viktig information i analysen av mätningarna med resistivitetsmetoden.

Kamera med inspelning av läckljud

Kort intro

Metoden går ut på att filma röret inifrån och samtidigt spela in ljud för att detektera eventuellt läckage. Vid inspelning registreras kamerans position, vilket ger exakt positionering av läckan (felmarginal 1 m). Utrustningen ger också information såsom tryck, turbiditet, ledningsförmåga och temperatur. Förutom läckor visas bland annat anslutningar och muffar. Metoden kräver ingen rengöring av röret innan mätning.

Sammanfattning av resultat

Ventiler, brandposter och liknande befintliga ingångar på ledningen är tänkta att användas när sonden matas in och hämtas ut. Det var emellertid ingen av de påtänkta ledningarna som hade tillräckligt stora öppningar för att man skulle kunna få in sonden utan driftsavbrott eller grävarbete. Av denna anledning har sonden inte kunnat testas som planerat i projektet.

Hos en nätägare (NSVA) uppstod en möjlighet att använda sonden på en tryckavloppsledning av plast med en misstänkt skada. Ledningen fylldes med havsvatten och försöket med sonden var framgångsrikt såtillvida att det kunde konstateras att det inte fanns någon skada på röret, bortsett från att det var delvis igensatt på sina ställen, dock var sikten för dålig för att kamerans potential kunde utnyttjas.

Statistisk modell baserad på historiska data

Utöver de fyra metoderna som testades i fält, utarbetade Stockholm vatten och avfall (SVOA) parallellt en metod som utnyttjar den stora mängd data som många ledningsägare har om sina ledningar. Metoden, Artificial Neural Networks (ANN) vilket är en slags artificiell intelligens (AI), testades på Stockholm vatten och avfalls ledningsdatabas för dricksvattenledningar. Metoden är intressant eftersom den ger en översikt över vilka gator och områden i stadens ledningsnät som bör prioriteras när man gör fältundersökningar genom att den pekar ut risk- och högriskledningar.

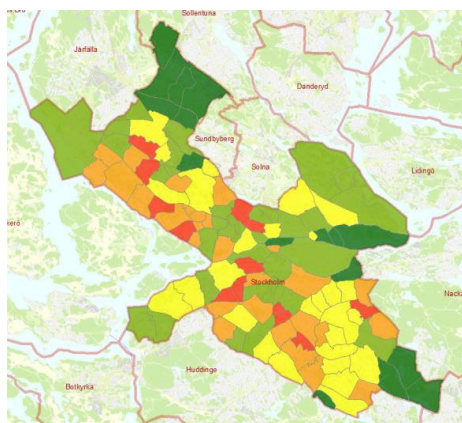
I den ANN som utarbetades i projektet används 21 indataparametrar. Dessa består dels av information om själva ledningarna (material, dimension, ålder, etc.), dels av

externa parametrar som kan påverka ledningarnas kondition (geologi, väder, driftstörningar, etc.). Utdata utgörs av historiska läckor och genomförd förnyelse, vilka samlats in från arbetsorder och registrerade omlagda ledningar.

I metoden byggs en statistisk modell upp där viktning av olika indata matchas med utdata (läckor/förnyelse). Resultatet blir en bedömning av varje ledningssträckas kondition, där 1 ges till de ledningar som bäst matchar utdata, dvs de sträckor som matchar rör där läckor eller förnyelse registrerats i databasen, och 0 ges till de sträckor som matchar historiskt problemfria rör. Alla ledningar med under 0,5 i konditionsvärde anses vara av god kondition, och de över 0,5 definieras som riskledningar. Högriskledningar pekas ut om de har ett värde över 0,91 (värdet gäller för denna modell baserad på Stockholm vatten och avfalls data). Av de 37 910 ledningssträckorna som analyserats i projektet, pekades 1 016 ut som högriskledningar, 6 874 ut som riskledningar och 30 020 som ledningar med god kondition. På figur 6 visas hur resultaten från modellen kan visualiseras.

Det blir intressant att de kommande åren följa hur vanligt det är med rörbrott i respektive riskgrupp. Vid en genomgång av läckestatistik under en månad (december 2018), hade det upptäckts läckage för 3 högriskledningar, 12 riskledningar och 3 ledningar som modellen angett hade god kondition. Om man räknar om det som registrerade läckage per 1 000 ledningar hade högriskledningarna 3,0 läckage/1 000 ledningar, riskledningarna 1,7 läckage/1 000 ledningar och de med god kondition bara 0,1 läckage/1 000 ledningar, vilket tyder på modellen är effektiv i att peka ut ledningar med risk för läckage eller rörbrott. Även om metoden missar vissa ledningar som riskerar rörbrott eller läckage, kan den ge en första indikation om vilka ledningar som bör prioriteras i underhållsarbetet, innan man påbörjar mätningar i fält.

En möjlig vidareutveckling av metoden är att göra en sammanvägning av risk och konsekvens vid läckage eller ledningsbrott genom att väga in vilka abonnenter som är inkopplade på ledningen och vilka problem som skulle kunna uppstå vid ett eventuellt läckage eller rörbrott.



Figur 6. Exempel på hur modellresultaten kan visualiseras. Här visas områden med hög andel riskledningar. Områden som visas i rött har en högre andel riskledningar än områden som visas i gult. Gröna områden har allra lägst andel riskledningar.

Generella slutsatser från projektet

Sammanfattningsvis har samtliga metoder som testats visat sig intressanta att arbeta vidare med vid statusbedömning av fjärrvärme- och vattenrör i gatumiljö. Det har också visat sig att vissa metoder kan dra nytta av att kompletteras med andra metoder. Till exempel kan mätningar av markresistivitet kompletteras med markradar för att ge information om rörets läge vilket är gynnsamt för efterbearbetningen av data. En elektrokemisk statusbedömning kan i sin tur kompletteras med resistivitetsmätningar för att göra metoden mindre känslig för variationer i markresistivitet. Två av metoderna, akustisk mätning av godstjocklek (Delta-t) och den elektrokemiska metoden, anses vara mogna att tas vidare mot marknaden, medan markradarmätning och resistivitetsmätning ses som komplement till de andra och kräver fortsatt utveckling för att bli fristående metoder för statusbedömning av rör.

Generellt sett är troligen det bästa tillvägagångssättet för statusbedömning att kombinera metoder som kompletterar varandra för att tillhandahålla olika typer av data. Samtidigt är det klokt att nyttja data om historiska rörbrott och läckage i större utsträckning, t.ex. genom en ANN-modell såsom testats i projektet.

En mycket viktig slutsats från projektet är behovet av bra dokumentation av ledningsnätet. Bra dokumentation underlättar arbetet med statusbedömning på två sätt. Dels är dokumentationen viktig för att kunna peka ut vilka ledningar som är i riskzonen för ledningsbrott eller läckage och dels är dokumentationen viktigt för att få tillförlitliga resultat från flera av fältmätningssättet.

Referenser

- Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B. (2013) Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135–156.
- Malm A., Mokhlesi S., Sernhed K., Yarahmadi N. (2016) *Kartläggning av materialfördelning och skadestatistik av vatten- och fjärrvärmeledningar i Sverige som underlag till rekommendationer för datainsamling*. Online på www.pipestatus.se.
- Penttinen O. (2019) *Pipe Status – Utlåtande angående de utvärderade mätmetoderna*. RISE, Göteborg, Sverige. Online på www.pipestatus.se.
- Rehn D., Giertz T. (2019) *En AI-modell för vattenledningsnätet*. Stockholm vatten och avfall, Stockholm, Sverige.
- Rejkjær S., Finco C., Schamper C., Réjiba F., Guérin R., Dahlin T., Tabbagh A. (2018) Comparison between DC ERT and Moving Multi-Depth Electrostatic Arrays in an Urban Context. in *Procs. 24th European Meeting on Environmental and Engineering Geophysics*, 9-13 September 2017, Porto, Portugal.