



INSTITUTT FOR MATERIALTEKNOLOGI

TMAK3001 - BACHELOROPPGAVE I MATERIALTEKNOLOG

Deteksjon og forebygging av fuktinntregning og lekkasjer i nedgravde fjernvarmerør

Åpen oppgave

Martine Kvalsund
Simen Flåtter Flo
Daniel Johan Gustafsson Birkeland

Intern veileder: Marte Sørtveit Mørkve

Ekstern veileder: Åmund Utne

Prosjektnummer: IMA-B-18-2022

Statkraft Varme AS

20. mai, 2022

Sammen drag

Hensikten med denne oppgaven er å se på forbedringer av sammenføyning og kvalitetskontroll av rørskjøter, samt alternative teknologier for deteksjon av fukt og lekkasjer, med mål å redusere vedlikeholdskostnader, energitap og tjenesteavbrudd i fjernvarmevirksomheten.

Første halvdel av arbeidet omfattet semistrukturerte intervju, og dialog med nøkkelpersoner i Statkraft og andre bedrifter. Hovedfokus var på erfaringer, dokumentasjon og statistikk. Det ble utført befaringer, for å samle inn erfaringer på både installasjons- og vedlikeholdsarbeid på rørskjøter. Andre halvdel gikk til omfattende litteratursøk, hvor liknende problemstillinger, relevant dokumentasjon, og alternative teknologier for fukt- og lekkasjedeteksjon ble ettersøkt.

Fra kartleggingen ble det sluttet at årsaken til fuktinntrengning kan spores til installasjonen. Utfordrende installasjonsforhold og avvik fra prosedyrer er blant de viktigste faktorene. Muffene som sammenfører rørkappen i skjøtene er sensitive for urenheter og fukt, og mister sin vedheft til rørkappen ved mangelfull rengjøring. Like renhetskrav gjelder for isolasjonsskummet under muffen. Det kan virke som at installatørene mangler kjennskap til viktigheten av arbeidet, og hverken entreprenør eller installatør blir stilt til ansvar for avvik. Kartleggingen viste at driftbetingelser bidrar til forringelsen av rørskjøtene. Høye turtemperaturer fører til betydelig termisk ekspansjon av medierørene, og degradering av isolasjonsskummet. Kreftene fra ekspansjonen kan skade kappen og muffene, og tillate fuktinntrengning. Koblingen av alarmtrådene under installasjon er blitt gjort feil flere steder, noe som vanskeliggjør overvåkingen av nettet under drift. Hvordan trådene kobles blir ikke tilstrekkelig dokumentert, og de påkrevde kontrollmålingene av motstand som utføres på alarmtrådene, gjøres uten kjennskap til de teoretiske motstandsverdiene. Mulige feil på nylagte rør blir dermed ikke avdekket før de graves ned. Forbedrede dokumentasjonsvaner av avvik og feil kan bidra til å identifisere rotårsaker, og muliggjøre igangsettelse av effektive tiltak.

Statkraft må følge standarden EN 13941-2 systematisk for å oppnå god kvalitetskontroll. Innføringen av et korrosjonshåndteringssystem, gjennom virkshomhetsstyringssystemet SAP, anbefales. Det må legges mer vekt på innsamling og behandling av dokumentasjon gjennom rørsystemets totale livsløp, ved bruk av eksisterende verktøy som SAP og SmallMap. Det bidrar til at rotårsaker identifiseres og utbedres, framfor å bruke ressurser på rotårsakenes følger. Dagens metode for fukteteksjon med bruk av alarmtråder har flere svakheter, selv ved riktig installasjon. Initielle fuktutslag hemmer alarmsystemet for deteksjon av bakenforliggende fuktinntrengninger. Alarmtrådene er første ledd som ryker når rørene ekspanderer ved høye driftstemperaturer, og reparasjon av brudd og trådfeil krever oppgraving og fysisk tilkomst til rørene. Tre alternative fukteteksjonsmetoder ble vurdert opp mot alarmtrådene: Non-contact magnetometric diagnostics, jordgjennomtrengende radar og termografi med drone. Luftbåren termografi med drone anses som best egnet, og evner å supplere alarmtrådene der de mangler. Metoden er begrenset til visse værforhold, men effektiviteten og den intuitive fremstillingen av innsamlet data veier opp for dette. Teknologien vil bidra til å redusere tjenesteavbrudd gjennom forebyggende vedlikehold, og har lovende fremtidsutsikter for økt virkningsgrad.

Abstract

This thesis looks at improvements in joining methods and quality control of pipe joints, as well as alternative technologies for the detection of moisture and leaks, with the intent of reducing maintenance costs, energy losses and service interruptions in district heating.

The work began by mapping the scope of the issue, through semi-structured interviews, and conversations with key people in both Statkraft and other companies. The emphasis was on empirical knowledge, documentation and data. Physical inspections of pipe joints were carried out to gain insight to both installation and maintenance procedures. What proceeded was an extensive literature review, focused around similar problems, relevant documentation, and alternative technologies for moisture and leak detection.

The mapping revealed that a pipe joint's susceptibility for moisture ingress can be traced to the installation of the joint. Challenging installation conditions and deviations from procedures are key factors. The sleeves that bind the pipe jackets in a joint together, are sensitive to impurities and moisture, meaning inadequate cleaning impairs the adhesion between sleeve and pipe jacket. The efficiency of the joint insulating foam is also affected by impurities and moisture. The installers lacking knowledge on the importance of accurately installed pipe joints is evident, and neither contractor nor the installer is held accountable for installation imperfections. The survey mapping also showed that certain operating conditions accelerate the deterioration of the pipe joints. High temperatures lead to both significant thermal expansion of the steel pipes, and rapid degradation of the insulating foam. The forces from expansion can damage the joint, allowing for moisture ingress. The wiring of the integrated alarm system is faulty in several instances, making it difficult to monitor the network after commissioning. Documentation on the installed wiring is absent. During required resistance testing, the target theoretical values are unbeknownst to the installer, effectively opening up for the commissioning of already faulty pipes. Improvements in documentation habits of deviations and errors will help to identify root causes, and enable the initiation of decisive measures.

Statkraft must strictly confine with the standard EN 13941-2 fulfill the goals of improved quality control. Consideration should be made to implement a corrosion management system, through the enterprise, business and management software SAP. Attention must be placed on the collection and processing of documentation throughout the pipeline's entire life cycle, using already implemented tools such as SAP and SmallMap. This will greatly improve Statkraft's ability to identify and remedy root causes, rather than fixating on the root cause's symptoms. The current method of moisture detection using alarm wires has several weaknesses. The system is blinded from detecting moisture beyond the initial moisture ingress point. Under high thermal expansion loads, the alarm wires are prone to mechanical failure, and the act of repairing such damages requires physical access to the buried pipes. Three alternative moisture detection methods were evaluated: Non-contact magnetometric diagnostics, ground penetrating radar and airborne drone thermography. Airborne thermography by drone is considered the most suitable, and is able to supplement the alarm wires where they are lacking. The method is limited to certain weather conditions, but the efficiency and intuitive presentation of collected data outweighs this. The technology will help reduce service interruptions through preventive maintenance, and has promising future prospects for increased efficiency.

Innhold

| | |
|---|------------|
| Sammendrag | i |
| Abstract | ii |
| Forord | v |
| Forkortelser | vi |
| Figurer | vi |
| Tabeller | vii |
| 1 Innledning | 1 |
| 2 Teori | 2 |
| 2.1 Korrosjon | 2 |
| 2.1.1 Korrosjon under isolasjon | 2 |
| 2.1.2 Vern mot korrosjon under isolasjon | 4 |
| 2.2 Fjernvarme | 5 |
| 2.2.1 Lekkasjer og feil | 5 |
| 2.2.2 Fjernvarme i Trondheim | 7 |
| 2.3 Komponenter | 8 |
| 2.3.1 Enkel- og dobbelrør | 8 |
| 2.3.2 Muffer | 10 |
| 2.3.3 Polyuretan-skum | 13 |
| 2.3.4 Kvalitetskontroll jamfør EN 13941-2 | 15 |
| 2.4 Vedlikeholdsstyring | 16 |
| 2.5 Metoder for fukt- og lekkasjedeteksjon | 18 |
| 2.5.1 Alarmtråder innstøpt i rørisolasjonen | 18 |
| 2.5.2 Non-Contact Magnetometric Diagnostics | 20 |
| 2.5.3 Jordgjennomtrengende radar | 22 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5.4 | Termografi | 23 |
| 3 | Metode | 25 |
| 3.1 | Intervju | 25 |
| 3.1.1 | Intervjuformatet | 25 |
| 3.1.2 | Valg av intervjuobjekter | 26 |
| 3.2 | Befaring | 26 |
| 3.2.1 | Befaring I - Nylagt rørtrase | 26 |
| 3.2.2 | Befaring II - Oppgravd rørtrase | 27 |
| 3.3 | Kartlegging | 28 |
| 3.4 | Litteratursøk | 29 |
| 4 | Resultater og diskusjon | 30 |
| 4.1 | Forebygging av fuktinntrengning og lekkasjer | 30 |
| 4.1.1 | Installasjon og bruk av muffe | 30 |
| 4.1.2 | Drift | 33 |
| 4.1.3 | Kvalitetskontroll og dokumentering | 34 |
| 4.2 | Fukt- og lekkasjedeteksjonsmetoder | 36 |
| 4.2.1 | Dagens metoder | 36 |
| 4.2.2 | Alternative metoder | 37 |
| 4.2.3 | Valg av metode | 40 |
| 4.3 | Feilkilder | 41 |
| 4.4 | Videre arbeid | 41 |
| 5 | Konklusjon | 42 |
| | Referanser | 43 |

Forord

Denne rapporten er skrevet i samarbeid med Statkraft Varme AS, heretter omtalt som Statkraft. Ideen om samarbeidet startet gjennom et sommervikariat i bedriften, hvor ulike problemstillinger ble introdusert. Da valget av bacheloroppgave skulle tas, var det naturlig å ta kontakt med Statkraft.

Vi vil meddele vår takknemlighet for åpenheten og iveren vi har blitt møtt med hos alle bidragsyttere fra Statkraft vi har vært i kontakt med. Erfaringene og kunnskapen fra disse personene har spilt en stor rolle i utviklingen av prosjektoppgaven. Vi setter stor pris på all tid og ressurser som ble satt av for å bistå oss med oppgaven.

NTNU og Institutt for materialteknologi er to andre viktige bidragsyttere i prosjektet. I løpet av tre år har NTNU gjennom instituttet gitt oss den nødvendige kompetansen som trengtes for å skrive denne bacheloroppgaven. En spesiell takk til våre veiledere, Marte Sørtveit Mørkve fra NTNU og Åmund Utne fra Statkraft. Innspillene fra Åmund Utne har vært til stor hjelp for å orientere oss i bedriften Statkraft, og å finne de rette personene for informasjonsinnhentning. Han har også bidratt rent faglig til rapporten, noe vi setter stor pris på. Marte Sørtveit har vært til stor hjelp ved utforming, spissing og tilnærming til prosjektet, og har i tillegg kommet med en rekke viktige innspill og tilbakemeldinger.

Forkortelser

| | |
|------|--|
| CMS | Corrosion Management System 6, 38, 39, 48 |
| ERP | Enterprise resource planning 19, 20, 39 |
| GPR | Ground Penetrating Radar 25, 26, 42, 43, 46 |
| HDPE | Høytetthets Polyeten 11, 13, 34, 39 |
| KUI | Korrosjon Under Isolasjon 3, 6, 38 |
| MMM | Metal Magnetic Memory 23 |
| MSFG | Magnetic Stray Field Gradient 23, 24 |
| NCMD | Non-contact Magnetometric Diagnostics 23, 24, 42, 43, 46 |
| NDT | Non-destructive Testing 6 |
| PE | Polyeten 13, 34 |
| PEX | Kryssbundet Polyeten 13, 35 |
| PUR | Polyuretan 3, 11, 13, 14, 16–19, 34, 37–39, 48 |
| SAP | System Analysis Program Development 20, 39, 40, 48 |

Figurer

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Korrosjonshastigheten til karbonstål i vann som funksjon av temperatur. | 3 |
| 2 | Fjernvarme distribuerer varmt vann fra ulike energikilder til boliger, offentlige og kommunale bygg via preisolerte rør | 5 |
| 3 | Hyppighet av feiltyper per 100 km fra tysk fjernvarme. | 6 |
| 4 | Energikilder i Trondheim 2021 | 7 |
| 5 | Temperatur i Trondheim fra mars 2021 til mars 2022 | 8 |
| 6 | Bestanddelene i enkel- og dobbelrør | 8 |
| 7 | Dimensjoner på en grøft for tur og returrør, med to typer fyllmateriale | 9 |
| 8 | Illustrasjon av sveisemuffer, kilemuffe og krympemuffe med tilhørende komponenter . | 11 |
| 9 | En illustrasjon av hvordan krympemuffen krympes fast i kappen. | 12 |

| | | |
|----|---|----|
| 10 | Netting av rustfritt stål (a) og klammene (b) som benyttes ved installasjon av sveisemuffe. | 13 |
| 11 | Nytt og degradert PUR-skum fra fjernvarmerør etter 21 års drift. | 15 |
| 12 | Illustrasjon av moduler som inngår i et ERP system | 17 |
| 13 | En illustrasjon av tur- og returrør, og hvordan alarmtrådene er koblet i røret. | 18 |
| 14 | En rekke ulike forenklete signalprofiler, med tilhørende eksempler på hva som kan forårsake dem. | 20 |
| 15 | Forenklet fremstilling av prinsippet bak inspeksjon ved bruk av NCMD. | 21 |
| 16 | Fremstilling av data fra målinger med jordgjennomtrengende radar | 23 |
| 17 | Et eksempel på termografi av et fjernvarmenettverk fra luften med drone. | 24 |
| 18 | Bilder tatt fra et byggefelt på Solsletta i Trondheim. | 27 |
| 19 | Bilder tatt fra vedlikeholdsarbeid på rørstrekke i Turistveien. | 27 |
| 20 | Et kart med oversikt over Trondheim, både uten (a) og med (b) Stakrafts konsesjonsgrenser for fjernvarme. | 28 |
| 21 | Et eksempel på værbeskyttelse ved installasjon av nye rør og muffe. | 32 |
| 22 | Statistikk over ulike årsaker for feil som førte til vedlikehold på fjernvarmenettverket i Trondheim mellom 2009 og 2022. | 35 |

Tabeller

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Vanlige faktorer som fører til rørforingelser i nedgravde distribusjonssystem av vann | 6 |
| 2 | Anbefalt vannkvalitet for sirkulerende vann i fjernvarmerør. | 10 |
| 3 | Oversikt over muffe levert av LOGSTORE | 10 |

1 Innledning

Statkraft leverer fjernvarmetjenester i flere norske byer, deriblant Trondheim. Omlag 30% av Trondheims oppvarmingsbehov dekkes av fjernvarmen fra Statkraft, via de ti varmesentralene i byen [1]. Fjernvarmevannet kan ha tur- og returtemperaturer på hhv. 120 og 70°C [2]. Fjernvarmetjenesten benyttes av private boliger, offentlige bygg og næringsbygg, som i sum utgjør omlag 5000 kunder [3]. Statkraft har i lengre tid hatt problemer med lekkasjer i fjernvarmenettet. Lite fokus på utførelse og kvalitetskontroll av rørskjøting, samt utfordrende fukt- og lekkasjedeteksjon, er hovedårsakene til problematikken. Som en følge, pågår det i dag et kontinuerlig arbeid med å avdekke, lokalisere og stoppe lekkasjer som kunne vært avverget hadde det vært større fokus på kvalitetssikring.

Lekkasjer i fjernvarmenettet oppstår stort sett som følge av fuktinntrengning i isolasjonen på de nedgravde fjernvarmerørene. Fukten får stålrørene til å korrodere, og etter flere år med korrosjon kan det gå hull på røret. Det brukes store pengesummer på avgrensning og oppgraving av rørsesjoner, innleing av vedlikeholdspersonell, innkjøp av nytt materiell for reparasjon, samt etterfylling av fjernvarmevann tapt til lekkasjer. Utbedring av en lekkasje koster ofte flere hundre tusen kroner [3]. Det er også samfunnsmessige konsekvenser, og disse kommer i hovedsak av hvordan fjernvarmetjenesten påvirkes av lekkasjer. Når lekkasjer oppstår, og vedlikehold må gjennomføres, kan kundens tilgang til tjenesten begrenses. Statkraft fasiliterer oppvarming av flere samfunnsviktige anstalter, som er avhengige av å kunne regulere temperaturen innendørs. Det kontinuerlige vedlikeholdsarbeidet har også konsekvenser for bymiljøet. Fjernvarmerørene ligger ofte under viktig infrastruktur, som forstyrres når et rørstrekk må graves opp for reparasjon. Dette medfører at vedlikeholdsarbeid utsettes for et tidspress som kan påvirke kvaliteten på utførelsen.

Når det gjelder miljømessige konsekvenser, er vannforbruk et sentralt tema. Gitt hvor omfattende fjernvarmenettet i Trondheim er, sammen med hvor utfordrende det er å detektere og utbedre lekkasjer, er det et kontinuerlig behov for å etterfylle nettet med nytt fjernvarmevann. Statkraft har erfart at det til enhver tid er lekkasjer i fjernvarmenettet, og at dette manifesterer seg nettopp i vannforbruket. I løpet av et år må opp mot 30 000 m³ vann etterfylles, i stor grad på grunn av lekkasjer [3]. Dette tilsvarer to ganger nettets totale volum [3]. I tillegg til å være en stor økonomisk faktor, vil større utslipp av varmt alkalisk vann utgjøre en miljømessig risiko [4, 5]. Fjernvarmenettet er et lukket system, og burde dermed ikke ha et nevneverdig vannforbruk under drift. Statkraft har et vannforbruk og energitap som kunne blitt redusert dersom forebygging og deteksjon av fuktinntrengning, og påfølgende korrosjon og lekkasjer, hadde vært utbedret.

Hensikten med oppgaven er å etablere en oversikt over måter lekkasjeproblematikken i fjernvarmenettet kan løses på, ved å undersøke følgende momenter:

- Teknologier og metoder anvendt i dagens drift av nettet i Trondheim og forbedringer av disse
- Metoder for å kvalitetskontrollere sammenføyning av fjernvarmerør under montasje
- Alternative teknologier for fukt- og lekkasjedeteksjon som kan benyttes på nedgravde fjernvarmerør i Trondheim

Formålet er å redusere vedlikeholdkostnader tilknyttet nedgravde fjernvarmerør, redusere energitap fra lekkasjer, samt å redusere hyppighet av tjenesteavbrudd hos kunden.

2 Teori

Dette kapittelet tar for seg informasjon om relevante tema, metoder og prosedyrer innenfor drift og vedlikehold av fjernvarmeanlegg. Store deler av faktagrunnlaget er basert på dokumenter fra Statkraft, samt fra leverandører av produkter og tjenester Statkraft benytter seg av. Det blir også sett på alternative teknologier for fukt- og lekkasjedeteksjon.

2.1 Korrosjon

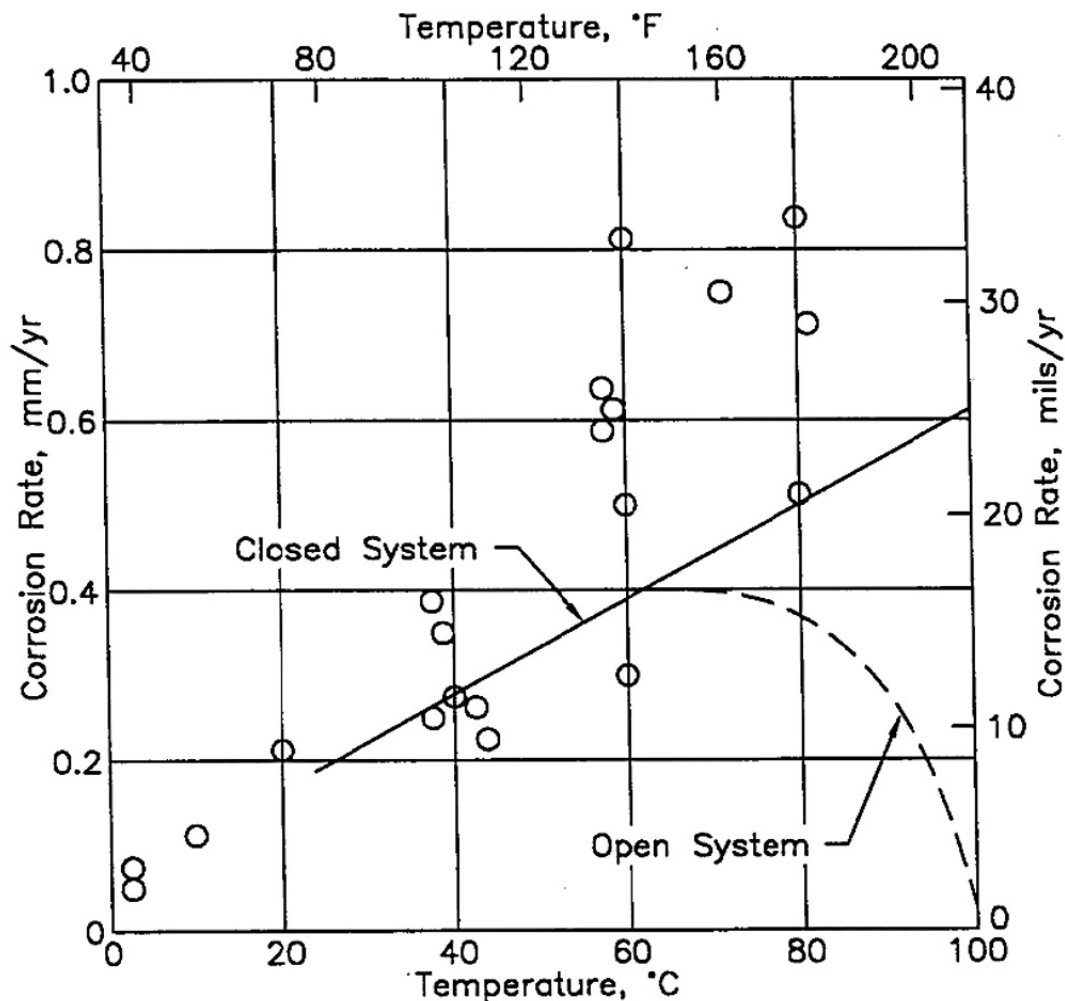
Korrosjon kan defineres som et uønsket angrep på en metalloverflate [6, s. 640-641]. En korrosjonsprosess er en redoksreaksjon, og i naturlige miljø ($\text{pH} > 3$) vil metallet oksidere når det kommer i kontakt med en oksygenholdig elektrolytt [7, s. 5-7]. Jern er et eksempel på et metall som korroderer spontant i naturlige miljø [6, s. 640-641]. Det er flere faktorer som påvirker hvor hurtig en metalloverflate korroderer. Den viktigste faktoren er tilgangen på oksygen i grensesjiktet mellom metall og elektrolytt. Andre faktorer er pH, temperatur, og hvorvidt metallet har et belegg eller ikke [7, s. 5-7]. Det utføres kontinuerlig arbeid verden over for å håndtere korrosjon av stålkonstruksjoner. En studie fra NACE International estimerer at korrosjon på global basis medfører en årlig kostnad på 2,5 billioner USD [8, s. 1]. Studien fastslår at mellom 15% og 35% av kostnadene kunne vært forhindrede med grunnleggende prinsipper for korrosjonsvern [8, s. 1].

Den strukturelle integriteten til konstruksjoner rammet av korrosjon utgjør også et faremoment. Når stål korroderer, dannes en porøs og mekanisk skjør rust-forbindelse, som svekker konstruksjonen [9]. Korrosjon kan føre til store materielle skader, samt tap av menneskeliv [9].

2.1.1 Korrosjon under isolasjon

Isolerte stålrør er spesielt utsatt for en korrosjonsform som kalles for korrosjon under isolasjon (KUI). Denne korrosjonsformen oppstår når fukt trenger inn gjennom isolasjonen, og legger seg på overflaten av stålrøret [10]. Fukt introduseres i isolasjonen dersom den beskyttende mantlingen skades, eller dersom installasjon har pågått i fuktig miljø. Vann i gassfase medfører liten korrosjonsfare, men dersom et rørsystem med driftstemperaturer over kokepunktet utsettes for en plutselig temperaturfall, vil vanndamp i isolasjonen kondensere på metalloverflaten [10]. Valg av isolasjonsmateriale har innvirkning på intensiteten på KUI. Enkelte isolasjonstyper, som for eksempel polyuretan (PUR)-skum, vil i kontakt med vann ved høyere temperaturer brytes ned til stoffer som er korrosjonsfremmende [10].

For karbonstål og lavlegerte stål er det generell korrosjon som forekommer under isolasjonen [10]. Generell korrosjon fremtoner seg som et uniformt angrep av metalloverflaten, som etterlater seg et skall av reaksjonsprodukt [6, s. 656]. Generell korrosjon er den dominerende korrosjonsformen verden over, da den forekommer raskt i naturlige miljø [7, s. 91]. Figur 1 viser hvordan korrosjonshastigheten til karbonstål endres med temperaturen når vann er tilstede. I et åpent system vil vannet fordampe og forlate systemet, mens i et lukket system fanges vannet, og korrosjonshastigheten øker ytterligere. Et isolert fjernvarmerør er et eksempel på et lukket system som opererer i dette temperatursjiktet.



Figur 1: Korrosjonshastigheten til karbonstål i vann som funksjon av temperatur. Åpent system tilsier at vannet får forlate systemet når det fordamper, mens lukket system tilsier at vannet er forhindret i å forlate systemet. [11, s. 9]

Generell korrosjon er forutsigbart og kan bekjempes med enkle tiltak [7, s. 91]. Forutsigbarheten til generell korrosjon blir ikke den samme når det forekommer under isolasjon. For å ha kontroll på generell korrosjon, kreves det jevnlig inspeksjoner og riktig vedlikehold. Når et medierør er tildekket av isolasjon blir inspeksjonsarbeidet mer krevende. Vanskelighetsgraden øker ytterligere for isolerte rør som også er nedgravd i bakken, og dette åpner for at korrosjon kan pågå uoppdaget over lengre tid. [10]

2.1.2 Vern mot korrosjon under isolasjon

Det er fire grunnleggende prinsipper for vern mot KUI [10, s. 132]:

1. Belegg

Stålrøret kan belegges med et vann- og varmebestandig belegg før det isoleres, slik at den reaktive ståloverflaten adskilles fra den korrosive elektrolytten. Organiske belegg og termisk sprøytet aluminium kan eksempelvis benyttes.

2. Utforming

Utformingen av rørsystemet må motvirke fuktinntregning og tilførsel av korrosive stoffer på stålrøret. Det bør benyttes isolasjonstyper som ikke fremprovoserer korrosjon i kontakt med fukt, eksempelvis skumglass. Den beskyttende mantlingen må være tett, selv ved mekaniske påkjenninger fra termiske bevegelser og overgående trafikk.

3. Inspeksjon

Gode inspeksjonsrutiner forlenger levetiden til et isolert rørsystem. Dette kan utføres visuelt, ved fjerning av isolasjonen, eller ved bruk av andre metoder for ikke-destruktiv testing, også kjent som non-destructive testing (NDT).

4. Vedlikehold

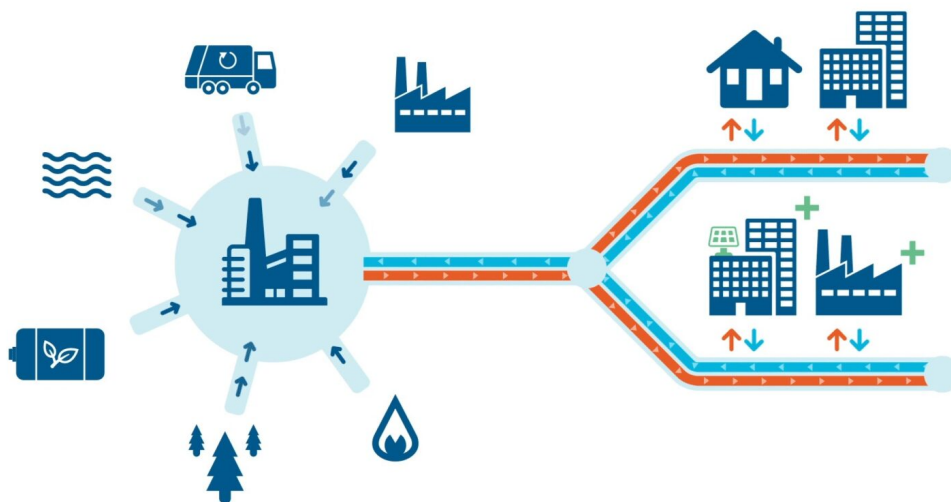
Skadet mantling tillater inntregning av vann i isolasjonen. Gode vedlikeholdsrutiner for reparasjon og utbytting av overnevnte vil redusere forekomsten av korrosjon.

NACE International foreslår at den mest robuste formen for korrosjonsvern er innføringen av et korrosjonshåndteringssystem, eller corrosion management system (CMS). Dette systemet dekker alle korrosjonsformer, ikke bare KUI. Et CMS er et dokumentert sett av prosesser og prosedyrer som kreves for planlegging, utføring og forbedring av en organisasjons evne til å håndtere trusselen korrosjon utgjør [8, s. 17]. For å maksimere effektiviteten av et CMS, må det tas hensyn til korrosjon i alle signifikante ledd i et aktivums livsløp. Sentrale elementer i et CMS er [8, s. 23-28]:

- Entreprenører og leverandører følger organisasjonens krav for korrosjonsvern, og stilles til ansvar for at tjenesten utført samsvarer med nevnte krav
- Det settes av tilstrekkelig ressurser for å utvikle, implementere og kontinuerlig forbedre organisasjonens CMS
- Kommunikasjonskanaler mellom interne og eksterne bidragsytere til virksomheten må etableres og opprettholdes
- Det sørges for at personell besitter tilstrekkelig kompetanse til å kunne følge prosesser og prosedyrer bestemt i organisasjonens CMS
- Skadeundersøkelser utføres ved avvik å avdekke rotårsaker, og for å forbedre organisasjonens CMS
- Dokumentasjon samles inn og håndteres for å kunne forbedre organisasjonens CMS

2.2 Fjernvarme

Fjernvarme er en tjeneste som leverer energi for oppvarming til kunder i urbane områder, og er mest utbredt i nordlige strøk [12, s. 14, 86]. Prinsippet bak fjernvarme er utnyttelse av varmetap i et energisystem, for å dekke et oppvarmingsbehov. I Norge drives fjernvarmen i hovedsak av enten fornybare energikilder eller overskuddsenergi fra industrianlegg [13]. Et distribusjonsnett for fjernvarme består av fire hoveddeler: forsyningskomponenter, et lukket distribusjonsnett, kundesentraler og kundens varmesystem. Den vanligste energibæreren for fjernvarme er vann. Vannet varmes og trykksettes i fjernvarmesentralene, og sendes ut til nettet i forsyningsrør, heretter omtalt som turrør. I kundesentralen overføres varmeenergien kontaktløst til kundens varmesystem gjennom en varmeveksler. Vannet returneres tilbake til fjernvarmesentralen for oppvarming gjennom returrør som ligger begravd parallelt med turrøret [12, s. 13 21]. Prinsippet i et fjernvarmeanlegg er vist i Figur 2. Sammen utgjør et nedgravd tur- og returrør en rørtrasé [3].



Figur 2: Fjernvarme distribuerer varmt vann fra ulike energikilder til boliger, offentlige og kommunale bygg via preisolerte rør. [13]

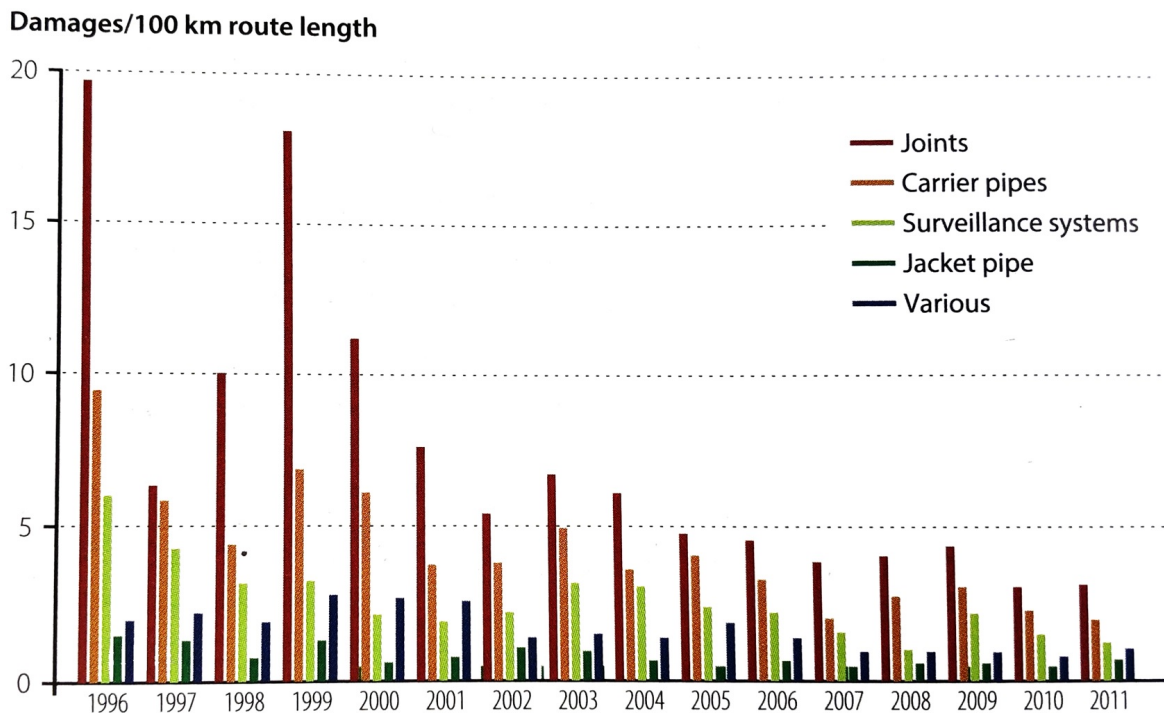
2.2.1 Lekkasje og feil

For at fjernvarme skal være en konkurransedyktig energileverandør, må kundens behov oppfylles til enhver tid. Feil og lekkasjer i et fjernvarmesystem kan medføre tjenestebrudd, store energitap, og redusert driftsikkerhet. Etterfyllingsvolumet til et fjernvarmeanlegg er hvor mange ganger totalt volum fjernvarmevann som er blitt etterfylt. Det er store variasjoner i etterfyllingsvolum mellom anlegg, men under gode betingelser kan verdier ned mot 0,5-1,0 per år oppnås [12, s. 489]. Lekkasje og ugunstige driftsbetingelser har derimot gitt eksempler på verdier opp mot 8 [12, s. 490]. Det er flere årsaker til feil i rørsystemer, og forringelse påvirkes av en rekke fysiske, miljømessig og driftsrelaterte faktorer, som vist i Tabell 1 [14].

Tabell 1: i nedgravde distribusjonssystem av vann [15].

| Fysiske faktorer | Miljømessige faktorer | Operasjonelle faktorer |
|------------------|-----------------------|------------------------|
| Røralder | Underdekket | Internt vanntrykk |
| Rørgeometri | Grøftens fyllmasse | Vannkvalitet |
| Muffetype | Jordsmonn | Strømningshastighet |
| Forskyvninger | Klima | Tilbakeslag |
| Rørmaterial | Krypestrøm | Driftspraksis |
| Rørinstallasjon | Seismisk aktivitet | Vedlikeholdspraksis |

Undersøkelser av svenske og tyske fjernvarmenettverk viser at feil oppstår hyppigst i rørskjøtene [12, s. 288-289]. Det ble vist at feilene som regel skyldtes mangler i utførelse av sammenføyning, samt materialutmattelse. Med datagrunnlag fra tysk fjernvarme, vises det til at rørskjøtene har vært hovedårsaken til feil over lengre tid. Dette er vist i Figur 3, som tar for seg utvikling av feil per 100 km fra 1996 til 2011. Figuren viser også at forekomsten av feil er blitt redusert betydelig i tidsperioden, men at det uansett er rørskjøtene som utgjør størst andel feil [12, s. 288-289].

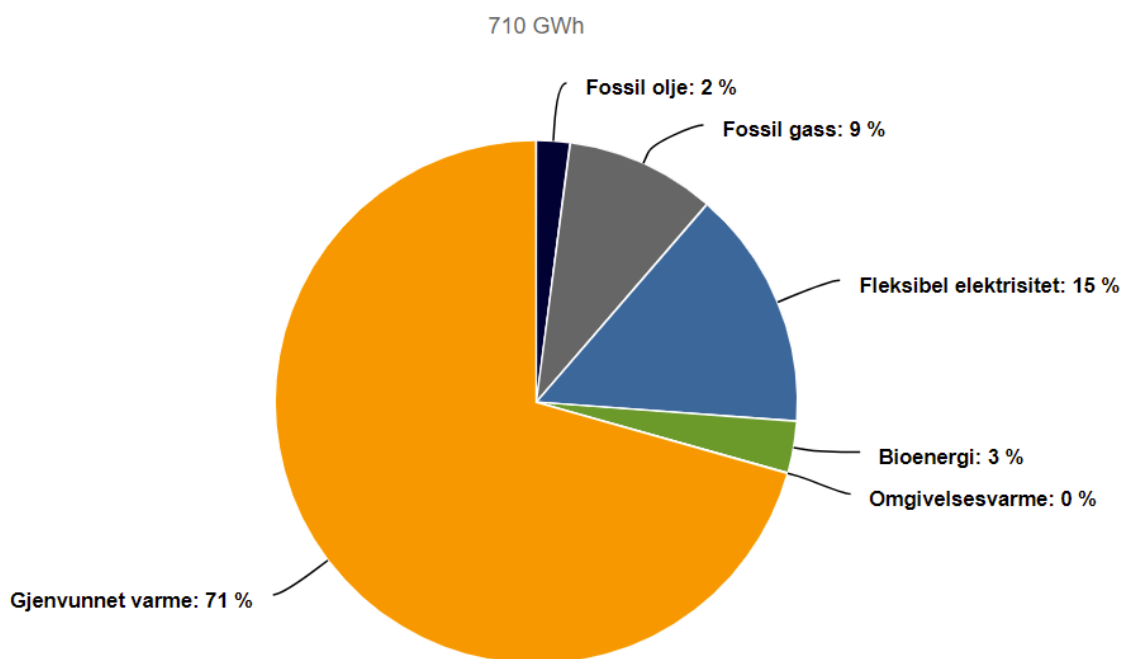


Figur 3: Hyppighet av feiltyper per 100 km fra tysk fjernvarme.[12, s. 288]

2.2.2 Fjernvarme i Trondheim

Trondheim Energiverk introduserte fjernvarme til Trondheim i 1982. Det ble da bestemt at energikilden skulle baseres på spillvarmen fra forbrenning av avfall. Fire år senere stod forbrenningsanlegget på Heimdal klart. Statkraft ble eier av Trondheim Energiverk i 2002, og tok dermed over fjernvarmevirksomheten i Trondheim [16]. I dag leverer Statkraft fjernvarme ni steder i Norge, og er blant de største leverandørene i landet [1, 17].

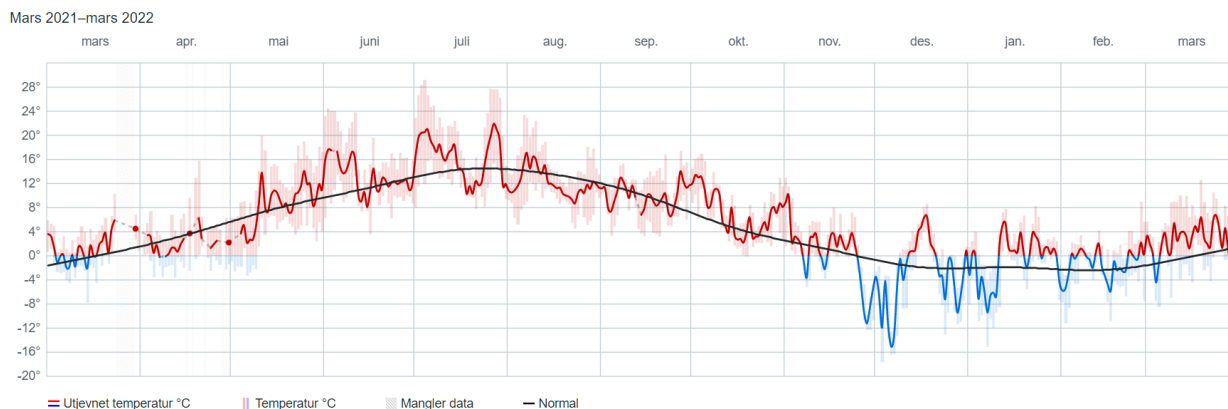
Varmesentralen på Heimdal utnytter spillvarme fra forbrenning av avfall fra Trondheim og omkringliggende kommuner. Avfallet forbrennes i forbrenningsovner med temperaturer oppmot 1000°C, hvorpå røygassen varmer opp det returnerende fjernvarmevannet [18]. Spillvarme er ikke den eneste energikilden til oppvarming i Trondheim. Både elektrisitet og fossile energikilder benyttes. Oversikt over andel ulike energikilder brukt til fjernvarmedrift i Trondheim i 2021 er vist i Figur 4 [19]. Fjernvarmeanlegget i Trondheim brer seg over hele byen, og har totalt 260 km med rørtrasé. Anlegget utvides i gjennomsnitt med tre til seks km hvert år [3].



Figur 4: Energikilder i Trondheim 2021. [19]

Vannet varmes opp og sendes ut i fjernvarmenettet med temperatur avhengig av forsyningbehov og kundenes anlegg [20]. De eldste anleggene er dimensjonert for tur-/returtemperatur på 120/70°C. I nyere tid kreves det at anlegg skal dimensjoneres for 110/60°C, og det ble nylig vedtatt at nyanlegg skal dimensjoneres for 95/43°C. Alle fjernvarmeanlegg skal uansett konstrueres for inntil 125°C. Statkraft krever minimum en differansetemperatur på 50°C for tur/retur vannet. Fjernvarmerørene har et varmetap på fem til ti prosent [21]. [3]

Klimaet i Trondheim påvirker utformingen av fjernvarmeanlegget, men også hvordan det forvitrer. I følge Köppens klimaklassifikasjon, kan Trondheims klima klassifiseres som Dfc. Det vil si kalde vintre, ingen tørkesesong og kjølige sommere [22, 23]. Figur 5 viser en grafisk framstilling over temperatur i Trondheim mellom 2021 og 2022 [24]. Årlig gjennomsnittstemperatur ligger på omtrent 4,4°C. Total mengde nedbør ble i 2019 målt til å være 1001 mm. Temperaturen og nedbør kombinert, medfører at fjernvarmerørene ligger i våt og kald grunn gjennom store deler av året [25, 26].

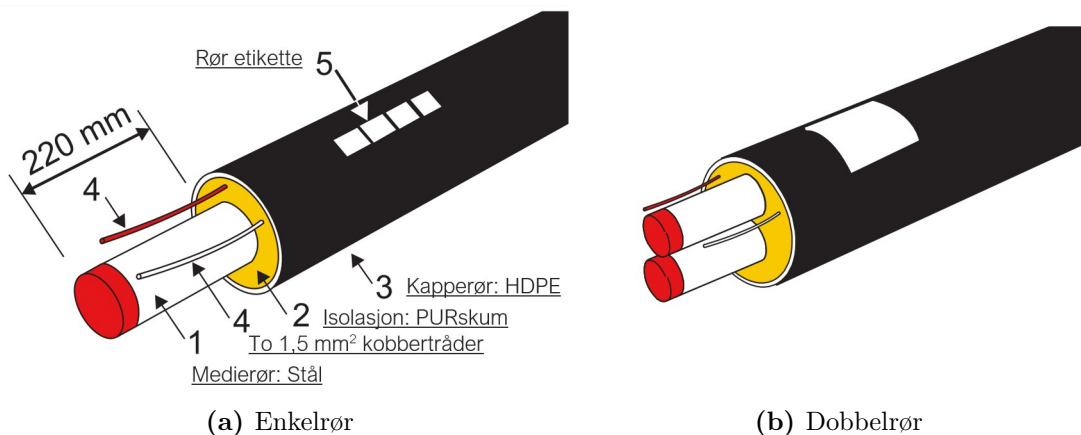


Figur 5: Temperatur i Trondheim fra mars 2021 til mars 2022 [24].

2.3 Komponenter

2.3.1 Enkel- og dobbelrør

Fjernvarmenettet i Trondheim benytter seg av to typer preisolerte rør; enkel og dobbelrør. Rørene leveres av LOGSTOR i standardlenger 6 m, 12 m og 16 m, med varierende diametre og tykkelser [27]. I dobbelrør er tur- og returrør støpt i samme kappe, til forskjell fra enkelrør som kun har ett medierør. En slik rørkompositt, med medierør, isolasjon og kappe, kalles for et fastrørsystem, og er illustrert i Figur 6. Figur 6a viser et enkelrør, og Figur 6b viser et dobbelrør. Fjernvarmerør fra denne produsenten har en forventet levetid på 30 år [28].



(a) Enkelrør

(b) Dobblerør

Figur 6: Bestanddelene i enkel- og dobbelrør [27]

Medierøret har i hovedoppgave å frakte det varme vannet rundt i systemet, og er lagd av lavkaronstål av typen P235GH [29]. Stålrøret har høy mekanisk styrke sammenlignet med de andre materialene i fastrørsystemet. I drift kan røret levere kontinuerlig varmt vann med temperatur opp til 120°C, med maksimal temperaturgrense på 140°C [29]. Temperaturen ved drift forårsaker termisk ekspansjon. Ekspansjonen er definert som differansen mellom lengdeendringen etter ekspansjon (Δl) og utgangslengden (l_0), multiplisert med en materialavhengig ekspansjonskoeffisient (α_l) og differansetemperaturen (ΔT), vist i Ligning 1.

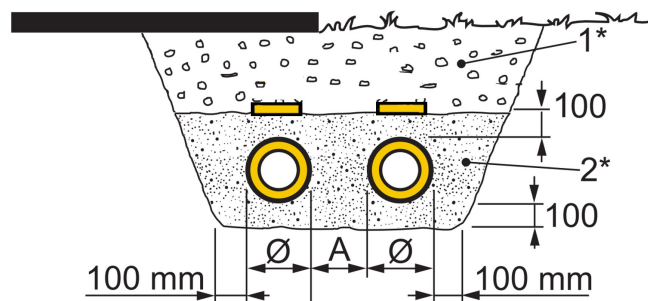
$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T \quad (1)$$

Rørisolasjonen har i hovedoppgave å begrense tap av termisk energi før fjernvarmevannet når frem til kunden [30]. Isolasjonen sørger også for å overføre og fordele kreftene fra eventuelle spenninger eller forskyvninger i medierøret over til kappen. Dermed er både de termiske og mekaniske egenskapene til skummet viktige [31]. PUR-skum blir mye brukt som isolasjonsmateriale i fjernvarmerør, grunnet gode termiske og mekaniske egenskaper. Den lukkede porøsiteten til PUR-skummet sørger også for lav vannabsorpsjon.

Under produksjon av rørene sprøytes PUR-reaktanter inn i fastrørsystemet ved hjelp av et blåsemiddel. Reaktantene vil så polymerisere, danne karbondioksid og bli til et fast skum [32]. Valg av blåsemiddel gjøres blant annet ut fra blåsemiddelets isolasjonsevne. Grunnet lav termisk konduktivitet, bruker LOGSTOR syklopentan som blåsemiddel for sine rør [27].

Kappen av høytetthets polyeten (HDPE) kapsler inn det isolerte medierøret, og har som formål å gi fastrørsystemet de riktige mekaniske egenskapene, samt å beskytte isolasjonen og medierøret mot det ytre miljøet [30]. Sammen med PUR-skummet, fungerer HDPE-kappen også som diffusjonsbarrierer for gasser, hovedsaklig luft og CO₂ [33].

Det stilles krav til utformingen av grøften som fjernvarmerørene legges i. Figur 7 viser tversnittet av en grøft, med påkrevde dimensjoner. Grøften fylles med to typer fyllingsmateriale. Nederste del av grøften (fyllsone 2) fylles med et finkornet materiale, som skal hindre oppskraping av kappen ved bevegelser av røret under drift. Avstanden (A) mellom enkeltrør i grøft avhenger av rørets diameter (\emptyset). Øverste del av grøften (fyllsone 1), fylles med et tilfyllingsmateriale. I sjiktet mellom fyllsone 1 og 2, legges det to markeringsbånd, eller et markeringsnett, som skal signalisere rørene ved fremtidig gravingsarbeid. I områder med stor mekanisk belastning eller dårlig jordkvalitet, bør grøften spesialtilpasses [29].



Figur 7: Dimensjoner på en grøft for tur og returrør, med to typer fyllmateriale [29, 34]

Vannkvalitet

LOGSTOR har oppgitt anbefalinger for vannkvaliteten som distribueres i fjernvarmenettet, blant annet for å motvirke innvendig korrosjon. Rust og sedimenter i vannet kan påvirke energioverføringen og skade komponenter i systemet. Høyt oksygeninnhold og feil pH-verdi vil bidra til økt korrosjonshastighet [35]. Tabell 2 viser en oversikt over anbefalt vannkvaliteten i enkel og dobbelrør. I enkelrør skal vannet ha en pH verdi på 9,5-10. Vannet bør være klart, og fri for leire og olje. Oksygeninnhold bør være lavt, med anbefalt verdi under $0,02 \text{ mg L}^{-1}$, og konduktiviteten bør være under $1500 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$. For dobbelrør gjelder de samme anbefalingene, med unntak av en konduktivitet på 3000 mg L^{-1} . [29, 36]

Tabell 2: Anbefalt vannkvalitet for sirkulerende vann i fjernvarmerør. [29, 36, 37]

| Parameter | Enkelrør | Dobbelrør |
|----------------|--------------------------------------|---------------------------|
| pH | 9,5-10 | 9,5-10 |
| Utseende | ren og leirfri | ren og leirfri |
| Oljeinnhold | oljefri | oljefri |
| Oksygeninnhold | $<0,02 \text{ mg L}^{-1}$ | $<0,02 \text{ mg L}^{-1}$ |
| Konduktivitet | $<1500 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ | $<3000 \text{ mg L}^{-1}$ |

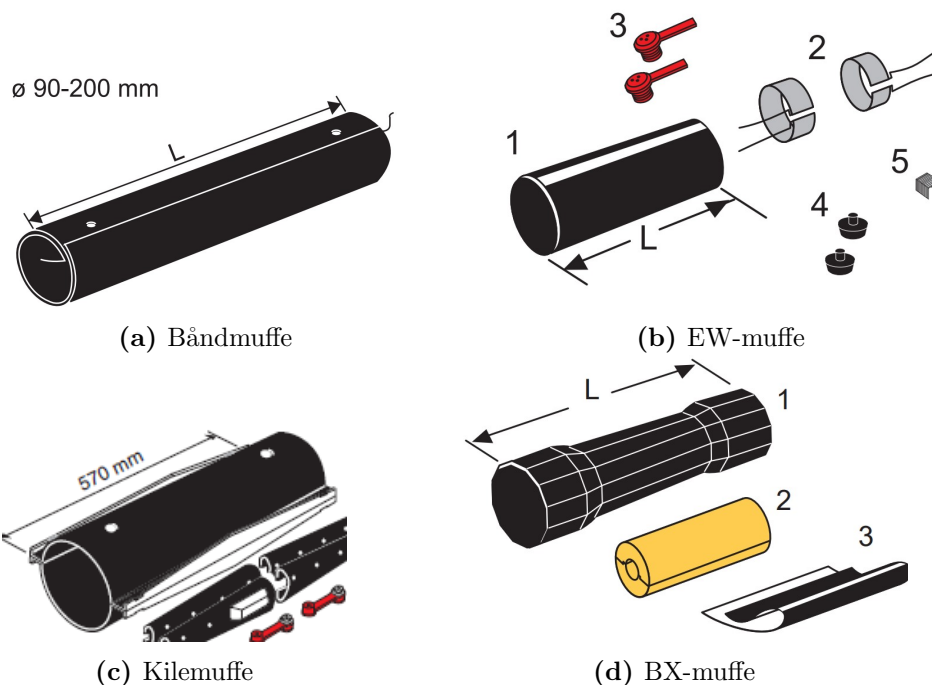
2.3.2 Muffer

Muffer er en teknologi som benyttes for å isolere og beskytte sveiste rørskjøter. De preisolerte rørstykkene leveres med eksponerte medierør i endene, for å gi tilgang til sveising under montasje. Muffenes hovedoppgave er å hindre at vann trenger inn i PUR-skummet, og dermed også hindre at korrosjon oppstår på medierørene. Det er derfor avgjørende at muffen og den underliggende isolasjonen holder tett. For å oppnå dette er utformingen til muffen og riktig installasjon av den viktige punkter. Muffer som benyttes til fjernvarmerør i dag kan deles inn i to hovedkategorier: sveise- og krympemuffe. Videre deles krympemuffer inn i to underkategorier: kryssbundet polyeten (PEX)- og HDPE-krympemuffe. Oversikt over ulike muffetyper er vist i Tabell 3 [38]. Inndelingen av muffer er basert på sammenføyingsmetoden og materialet de er laget av. Krympemuffene benytter et polyisobutylene-basert lim, kalt mastik, for å binde seg til kappen. Dette er et amorft og relativt duktilt lim som binder seg til de fleste substrat [39]. Mastik har lav skjærstyrke sammenlignet med andre alternativer, men er mindre sensitiv for forurensninger og ujevnheter under installasjon, noe som gjør at det har gode forseglingssegenskaper [39]. Forskjellen mellom polyeten (PE) og PEX er den molekylære strukturen, hvor PEX har flere kryssbindinger. Dette gjør den mer stabil når den eksponeres for varme, og gir bedre krympekraft sammenlignet med PE [38].

Tabell 3: Oversikt over ulike typer muffer som leveres av LOGSTOR. [27]

| Sveisemuffe | Krympemuffe | |
|-------------|-------------|------|
| | PEX | HDPE |
| Bånd EW | BX | B2S |
| | BXS | BS |
| | SX-WP | C2L |

Muffene kan produseres i ulike geometrier, blant annet rette, bøyde og som T-muffer. Muffene som leveres av LOGSTOR er godkjent i henhold til standarden EN 489. Illustrasjoner av de ulike typene er vist i Figur 8. Figur 8a og 8b viser illustrasjoner av sveisemuffer, og Figur 8d illustrerer en BX-krympemuffe. Historisk sett har Statkraft benyttet seg av flere ulike muffetyper. Kilemuffer, som baserer seg på å kile sammen to deler, vist i Figur 8c, er en av typene som ikke lenger er i bruk [40]. Statkraft har besluttet å bruke BX-muffe for nye rørstrekk opp til dimensjoner $\text{Ø}630$. Dette er blant annet for å unngå å bruke flytende skum, og heller benytte rørskåler. Ved bruk av rørskåler unngås det hull for påfylling av flytende skum, som er et mulig punkt for fuktinntrengning. Sveisemuffer brukes for rør nedsenket i vann, rør med diameter over $\text{Ø}630$, og på steder der det ikke kan tres på en krympemuffe. [3]

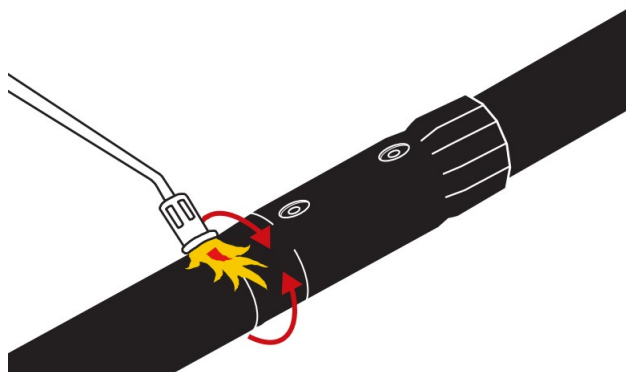


Figur 8: Illustrasjon av sveisemuffer (EW), kilemuffe og krympemuffe (BX) med tilhørende komponenter.[27, 40]

Installasjon av krympemuffer

Krympemuffene forsegles mot kappen ved å krympe når den utsettes for høy temperatur, omtrent 300°C . Under installasjon vil muffene tres over det eksponerte medierøret, og varmes opp med en gassbrenner. Krympeprosessen er illustrert i Figur 9. Det undersøkes så om muffen er tett, ved å trykksette muffen med 0,2 bar gjennom borede hull. Såpevann sprøytes så på endene av muffen for å se etter utlufting. Dersom muffen er tett, fylles den med en flytende skumblanding gjennom de borede hullene i muffen. Skumblandingen reagerer og blir til et fast PUR-skum. Skumming ved bruk av flytende skumblandinger bør gjennomføres ved atmosfæriske temperaturer på over 10°C . Dersom dette ikke er mulig, må muffen, og da spesielt den nedre halvdel av den, forvarmes ved hjelp av en gassbrenner slik at den får en overflatetemperatur på $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$ før skumming. Når blandingen er ferdig utvidet, tettes hullene ved bruk av små plastknotter som sveises fast i hullene. Ved bruk

av rørskåler vil disse kappes og tilpasses manuelt, og plasseres over medierøret før muffen tres over rørskålene. Dermed er det ikke nødvendig å bore hull i muffen, men det er da heller ikke mulig å trykkteste den. [38, 41]

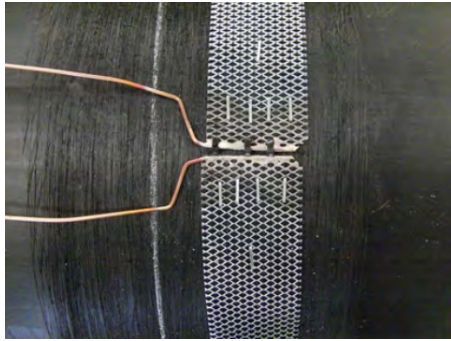


Figur 9: En illustrasjon av hvordan krympemuffen krympes fast i kappen. [41]

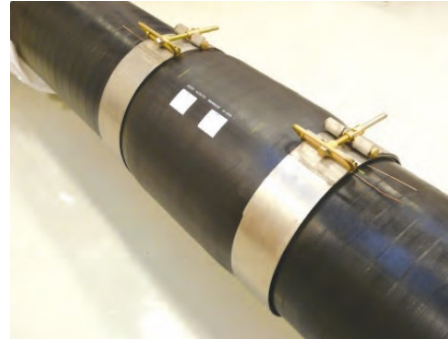
For å sikre god heft må det gjøres et forarbeid på kappen. Den overlappende flaten på enden av kappene må pusses for å gjøre overflaten ru, og for å fjerne plastoksider [41, 42]. Heften mellom muffe og kappe øker med ruheten, og fjerningen av oksider aktiverer overflaten til plastkappen, slik at den enklere binder seg til mastiken. Det er viktig at pussingen gjøres rundt omkretsen og ikke aksielt langs kappen. På denne måten unngås dannelsen av transportkanaler for vann inn i muffen [43]. De pussede områdene på kappene bør også renses, slik at løse partikler, forurensninger og fukt fjernes [42]. Da oppnås størst mulig kontaktflate mellom lim og kappe. Fukt på medierøret og i isolasjonen i de preisolerte rørene bør også fjernes før muffen installeres, slik at fukten ikke blir fanget under muffen og kappen [43]. Det er viktig at muffen krympes tilstrekkelig slik at det ikke er gliper mellom kappen og muffen [42].

Installasjon av sveisemuffer

Sveisemuffene installeres ved at et nett av rustfritt stål, vist i Figur 10a, legges på endene av kappen til rørene som skal sammenføres. Sveisemuffen tres så over det eksponerte medierøret, slik at den overlapper stålnettingene på begge sider av skjøten. Muffen klemmes så mot stålnettingen for å oppnå god kontakt. EW-muffene benytter krympeplast sammen med klammer, vist i Figur 10b, for oppnå det ønskede trykket. Båndmuffene må derimot rulles rundt kappen, klemmes fast og sveises langs sin lengderetning for å opprettholde trykket mot kappen. Stålnettingen blir så påført en høy elektrisk spenning som fører til motstandsoppvarming. Kontaktflatene til muffen og kappen vil smelte og flyte inn i hverandre gjennom stålnettingen slik at det dannes en sveis. Nettingen blir på denne måten også integrert i konstruksjonen. Tiden og temperaturen under sveisingen styres automatisk av et sveiseapparat. Dersom riktig temperatur ikke oppnås innen en viss tid, vil apparatet gi beskjed om at sveisen er ufullstendig. Det kan gjøres inntil tre forsøk på sveis før muffen ikke lenger er brukbar. Når en fullstendig sveis er oppnådd, vil data om sveisen fra apparatet lagres digitalt som dokumentasjon. [34, 44]



(a)



(b)

Figur 10: Netting av rustfritt stål (a) og klammene (b) som benyttes ved installasjon av sveisemuffe. [44]

En tett og sterk binding mellom sveisemuffen og kappen avhenger av en rekke parametre. Klammetrykket må fordeles jevnt, og bør ikke bli for høyt eller for lavt. For høyt trykk vil føre til at store deler av plasten presses ut av klammene i det plasten varmes opp og ekspanderer. Dette vil redusere tverrsnittsarealet i sveisområdet, og svekke den mekaniske styrken til sveisen. For lavt, eller ikke-uniformt trykk, vil føre til dårlig kontakt mellom plasten og stålnettingen, og en svakere sammenføyning. [45, s. 353]

Det er viktig at urenheter i sveiseflaten fjernes. Urenheter som støv, sand, vann eller andre stoffer vil hindre flyten og blandingen av plast i sveisesonen [45, s. 353]. I tillegg vil eventuelle partikler redusere kontaktarealet mellom kappe og muffe. Dette kan føre til spenningskonsentrasjoner, eller i hvert fall redusere det effektive sveisearealet [46]. Vann på kontaktflatene vil fordampe under sveising, og skape hulrom eller bobler, som igjen reduserer det effektive sveisearealet [46].

2.3.3 Polyuretan-skum

Fukttransport

PUR-skum har en lukket porøsitet, og skal dermed være tilnærmet ugjennomtrengelig for vann [31, 47]. Likevel er korrosjon på medierørene et stadig problem for fjernvarmeanlegg verden over. En studie fra 2006, utført av det nasjonale svenske test- og forskningsinstituttet i Gøteborg [47], gjorde en rekke viktige funn innen transport av fukt i PUR-skum. En viss gassdiffusjon av vanndamp gjennom skummet er forventet, men vil til vanlig, og spesielt på oppvarmede fjernvarmerør, være relativt liten og aksiell. Temperaturgradienten i skummet bidrar til å hindre diffusjon av fukt inn til medierøret. Skummets evne til å forhindre fukttransport er kun tilfellet dersom det er av høy kvalitet og fri for defekter. Defekter kan oppstå ved feil oppbevaring og håndtering, fysiske påkjenninger eller produksjons-/installasjonsfeil. Dersom rørene og muffeskummet er produsert, lagret og installert riktig, er det derfor lav sannsynlighet for at betydelige mengder vann trenger helt inn til medierøret.

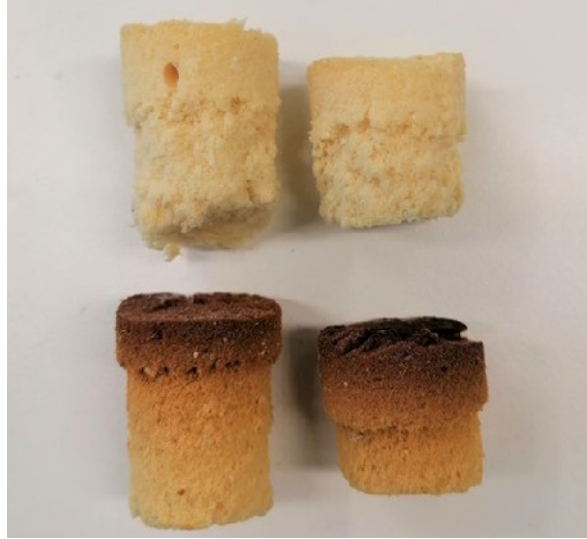
Grensenflaten mellom det feltinstallerte muffeskummet og det prefabrikkerte rørsaummet, er en mulig transportkanal for fukt i skummet. Fukttransporten avhenger i stor grad av behandlingen og oppbevaringen av rørendene, samt forholdene under installasjon av muffeskummet. Ved bruk av

flytende skumblanding vil muffeskummet i grenseflaten til vanlig ha en lukket men grovere porøsitet, og celler med en bredere størrelsesfordeling enn PUR-skummet ellers. Den grove porøsiteten gjør at det skal færre og mindre sprekker og defekter til før skummet er i stand til å transportere fukt helt inn til ståloverflaten. En lavere temperatur på medierøret under skumming kan føre til en finere porøsitet i grenseflaten, og dermed også et mer robust koblingssystem [47]. Skummet i grensesjiktet vil normalt ikke transportere betydelige mengder fukt inn til medierøret uansett porøsitet, uten at andre feil også har inntruffet [47]. Eksperimentene som ble gjennomført i den svenske studien [47] viser at en nylig kuttet endeflate på PUR-skummet til røret gir den beste vedheftingsevnen til muffeskum-massen, og dermed også den beste forseglingssevnen. Studien viste også at fukttransporten i dette grensesjiktet ble forverret dersom rørene ikke ble oppbevart tørt og isolert fra den atmosfæriske luften [47]. I 2014 ble det gjennomført en studie som undersøkte 70 stikkprøver av nylig installerte muffe fra et fjernvarmeanlegg i Nederland [43]. Denne studien viste blant annet at flat og jevn kutting av rørskummets endeflate var viktig dersom rørskåler ble benyttet i stedet for flytende skummasse. En ujevn overflate vil føre til gap og kanaler for fukttransport mellom rørskålen og rørskummet [43].

Sammenføyningen i den svenske studien ble gjennomført under tørre forhold, og utfordringene med fukt fra regn og omgivelsene under installasjon ble dermed ikke evaluert. Fukt på medierøret eller endeflatten under installasjon kan forverre forseglingssevnen til leddet, selv når de andre forholdsreglene er tatt hensyn til [47]. Dette er spesielt utfordrende ved lave temperaturer, ettersom det vil ta lengre tid før vannet fordamper vekk av seg selv. Rørdimensjon, og hvorvidt det var enkelt- eller dobbeltrør, hadde ingen åpenbar innvirkning på forseglingssevnen til sammenføyningene ifølge studien [47].

Degradering

Degradering av PUR-skummet er en av de begrensende faktorene for levetiden til fjernvarmerør. Degradert PUR-skum tillater enklere diffusjon av gasser, deriblant vanndamp, og kjennetegnes med en mørkere farge, slik det er vist i Figur 11 [48]. Det er i hovedsak tre årsaker til foreldning av PUR-skum: termisk oksidasjon, hydrolyse og vekslende mekanisk belastning.



Figur 11: Nytt og degradert PUR-skum fra fjernvarmerør etter 21 års drift. [48]

Oksidasjon av skummet forekommer når det kommer i kontakt med oksygenholdig luft [31, 49]. Dette kan skje dersom rørene oppbevares uten beskyttelse, eller dersom det oppstår sprekker i kappen eller muffen som vil tillate inntrengning av luft. Høye temperaturer vil i tillegg øke reaksjonshastigheten. Skummet inneholder vanligvis gassene syklopentan og karbondioksid for økt isolasjonsevne, og disse reagerer i liten grad med PUR [50]. Den lukkede cellestrukturen i skummet har lav permeabilitet for syklopentan og vanddamp, men ikke for karbondioksid og luft [31]. Ved sprekker i kappen vil luft kunne diffundere inn i isolasjonen mens karbondioksid diffunderer ut, og dermed overta karbondioksidets plass. Dette vil øke den termiske konduktiviteten til isolasjonen [31]. I tillegg vil oksygenet reagere med PUR-skummet, og endre den kjemiske sammensetningen og strukturen. Dette vil redusere den mekaniske styrken og vedheftingen mot kappen og medierøret [51, 52].

Hydrolyse forekommer når PUR-skummet kommer i kontakt med vann. Prosessen bryter ned de lange polymerkjedene i PUR-skummet til kortere kjeder og karbondioksid. Konsekvensen av dette er at det strukturelle skummet går fra å være fast, og forholdsvis sterkt, til sprøtt og skjørt. Hydrolysen er mest aggressiv ved temperaturer over 100°C, men finner sted ved temperaturer så lave som 50°C.

Store og hyppige temperaturvariasjoner vil også bidra til rask degradering av skummet [48, 53]. Dette skyldes strekk- og kompresjonsspenninger som oppstår i PUR-skummet i det medierøret deformeres av temperaturendringer. Spenningsene vil føre til både utmatting i grensesjiktet mot medierøret, sprekkdannelse og økt reaktivitet for oksidasjon [48, 51]. Dette er en av årsakene til at skummet som er i kontakt med medierøret foreldes raskest.

2.3.4 Kvalitetskontroll jamfør EN 13941-2

Statkraft følger standarden EN 13941-2, som spesifiserer kravene for dimensjonering og installering av varmeisolerete ett- og to-rørsystem for direkte nedgravde fjernvarmenett [54]. For å oppnå kvalitet i produktet vektlegger standarden følgende [54]:

- Dokumentasjon

Dokumentasjon fra designfasen som er kritisk for korrekt installasjon, og dokumentasjon utarbeidet under installasjonsfasen som er kritisk for korrekt påfølgende drift og vedlikehold, sikrer kvalitet.

- Opplæring

Installatører og overordnede skal fremvise tilstrekkelig tekniske forståelse og praktiske evner. Konsekvensene ved feilaktig håndtering og installasjon av de preisolerte rørene skal inkluderes i opplæringen.

- Alarmsystem

Alarmtrådene skal legges slik koblingsskjemaet tilsier, og avvik skal dokumenteres og videreformidles til drift og vedlikehold. En rekke tester på fuktovervåkningssystemet skal utføres før nedgraving.

- Overrekkelse

All påkrevd dokumentasjon må overleveres før drift igangsettes.

2.4 Vedlikeholdsstyring

Vedlikehold er en kompleks prosess som innebærer orientering, planlegging, overvåkning og kvalitetssikring, i tillegg til nødvendig utstyr, arbeidskraft og reservedeler. Vedlikehold kan optimaliseres ved å ta i bruk et vedlikeholdsstyringssystem. Et vedlikeholdsstyringssystem gjør det mulig å koordinere og effektivisere bruk av ressurser og informasjon tilknyttet en bedrifts virksomhet [55]. Et enterprise resource planning (ERP)-system er en programvare som brukes til virksomhetsstyring, og er blitt tatt i bruk som standard hos mange mellomstore og store bedrifter [56]. Systemet integrerer alle funksjoner i bedriften, blant annet vedlikeholdsstyring, og kobler de sammen. Systemet har et buker grensesnittet skreddersydd for å gi informasjon som kan støtte strategi, operasjoner, styringsanalyse og beslutningstagninger [57]. System Analysis Program Development (SAP) er blant de største leverandørene av ERP-system. Programmet de leverer heter også SAP. Programvaren inneholder moduler som lar bedrifter automatisere og integrere virksomheten, for å opprettholde kontinuerlig informasjonsflyt av, og oversikt over, data [58]. Modulene kan spesialtilpasses virksomhetens behov [59]. Statkraft bruker SAP til blant annet vedlikeholdsstyring, og utnytter moduler som HR, finans, vedlikehold og dokumenthåndtering [60]. Figur 12 illustrerer ulike moduler som inngår i et ERP-system [61].



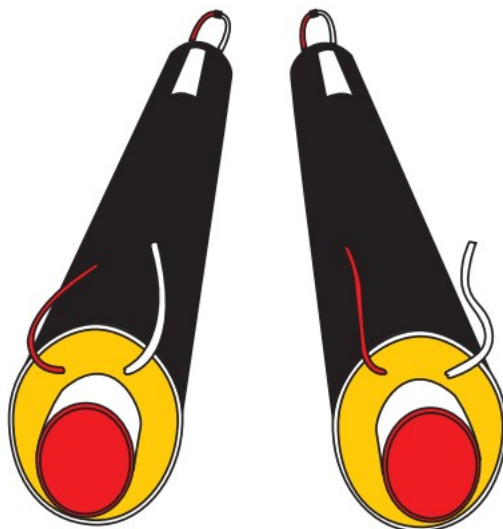
Figur 12: Illustrasjon av moduler som inngår i et ERP system .[61]

2.5 Metoder for fukt- og lekkasjedeteksjon

Det som gjør tilstandskontroll av fjernvarmerør utfordrende er at de ligger under bakken. Dette stiller konkrete krav til metoder og teknologier brukt. Dette kapittelet tar for seg metoder som tillater informasjonsinnhentning av fjernvarmerør uten fysisk tilkomst til rørene under drift.

2.5.1 Alarmtråder innstøpt i rørisolasjonen

Isolerte rør kan benytte alarmtråder for å overvåke fukt [62]. Det er dette Statkraft gjør i dag. Trådene er innbakt i isolasjonen, og går parallelt med medierøret. Det er to kontinuerlig tråder, som er koblet sammen i den ene enden av hvert overvåkede rørstrekke, som vist i Figur 13. I den andre enden av rørstrekket er alarmtrådene koblet til en alarmsentral, som har i oppgave å styre strømmen i kretsen, samt å motta og videreføre signalene fra alarmtråden til en monitoreringsentral [62]. I et fullstendig rørsystem vil det være mange slike alarmsentraler tilknyttet respektive rørstrekker.



Figur 13: En illustrasjon av tur- og returrør, og hvordan alarmtrådene er koblet i røret. Kobbertrådene er koblet sammen i den ene enden. [62]

Motstandsmåling

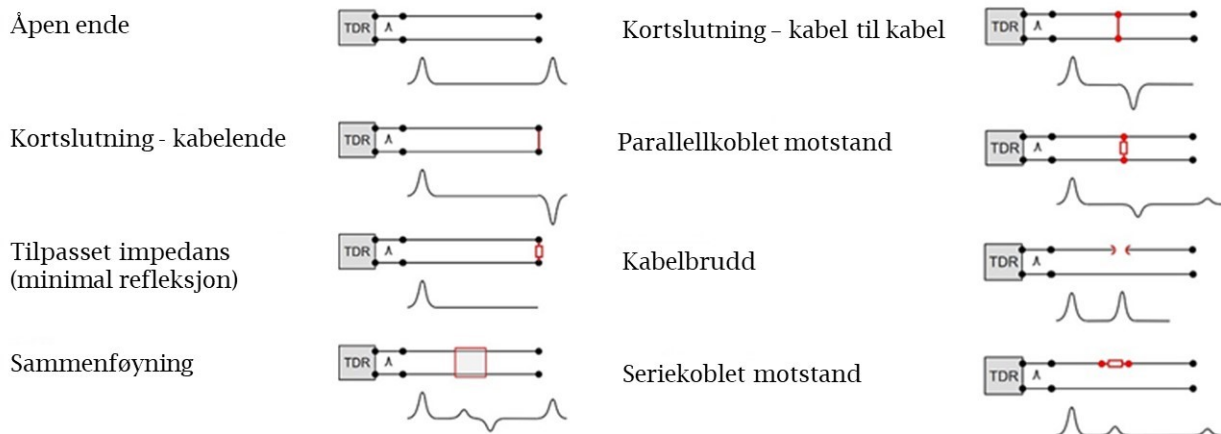
Spenningen mellom kobbertrådene og medierøret, den elektriske motstanden til kobbertrådene og medierøret per lengdeenhet, og avstanden mellom de nevnte komponentene skal være kjent etter korrekt installasjon av trådene. Avvik mellom målt motstand og teoretisk motstand vil dermed kunne avdekke enten fukt eller feilaktig installasjon. Isolasjonen som alarmtrådene er støpt inn i er elektrisk isolerende, så den totale elektriske motstanden i kretsen er derfor svært høy. Fuktinntrengning i isolasjonen vil øke den elektriske konduktiviteten mellom kobbertrådene og medierøret. Ved å måle motstanden i denne kretsen kontinuerlig, og sammenligne mot den elektriske motstandens normaltillstand, er det mulig å registrere fukt. For å avgjøre hvorvidt isolasjonen regnes som tørr eller fuktig, blir det satt et minimumskrav for isolasjonens elektriske

motstand per lengdeenhet alarmtråd. LOGSTOR har satt denne terskelen på $10 \text{ M}\Omega \text{ km}^{-1}$ [62]. Lengden på alarmtråden er alltid antatt å være dobbelt så lang som rørstrekket den befinner seg i. Bidrag til elektrisk konduktivitet gjennom isolasjonen kan både stamme fra lokal høy konsentrasjon av vann, eller fra mange små fuktige områder i isolasjonen. De to tilfellene vil registreres som like. Ettersom isolasjonen har svært lav elektrisk ledningsevne, vil selv relativt små mengder fukt gi registrerbare utslag på motstanden i systemet. [62]

Etter oppkobling, skal det gjennomføres to kontrollmålinger på rørstrekket. Dette er for å kunne avdekke eventuelle feil før rørene graves ned. Måling av motstanden gjennom kobbertråden og måling av motstand gjennom isolasjonen. Teoretisk motstand per lengdeenhet alarmtråd er kjent (omtrent $12\text{-}15 \text{ m}\Omega \text{ m}^{-1}$) [41]. Når lengden på alarmtrådene også er kjent blir det mulig å beregne den teoretiske motstanden i tråden. Den målte motstanden gjennom tråden kan deretter sammenlignes opp mot den teoretiske verdien. Dersom den avviker mer enn det som kan forventes, vil dette tilsi at det er en feil i koblingen av alarmtrådene. Deretter vil også motstanden gjennom isolasjonen måles. Dersom motstanden er lavere enn akseptkriteriet, betyr det ofte at det har kommet fukt i isolasjonen, eller at alarmtrådene er i kontakt med medierøret dersom motsanden nærmer seg null. Begge disse målingene skal gjennomføres for hver sammenføyning som utføres. [41, 62]

Impedansmåling

Lokalisering av områdene med fuktinntrengning er nødvendig for å gjennomføre vedlikehold. Dette kan gjøres ved bruk av alarmtrådene som også brukes til fuktdeteksjon. Et pulsekkometer er et apparat som kan sende ut og måle høyfrekvente elektriske pulser i en krets. Pulsekkometeret kobles på endene av kobbertrådene og medierøret. En svak men høyfrekvent elektrisk puls sendes så gjennom kobbertrådene. Impedansen til pulsen, som er forholdet mellom vekselspanning og vekselstrøm, kan forstyrres i det den forplanter seg gjennom den elektriske kretsen, ved for eksempel brudd på ledning eller redusert elektrisk motstand mellom kobbertrådene og medierør [63]. Endringen i impedans vil føre til at hele, eller deler av pulsen reflekteres tilbake mot pulsekkometeret. Den utsendte og den reflekterete pulsen vil så visualiseres på pulsekkometeret, i form av to utslag på en graf med spenning som funksjon av tid. Flere eksempel på slike grafer, og hva de representerer, er gitt i Figur 14. Grafen gjør det mulig å se hvor lang tid det tar fra pulsen blir utsendt til refleksjonen kommer tilbake. Siden materialene som pulsen beveger seg i er kjent, og dermed hastigheten pulsen brer seg gjennom materialet på, er det mulig å finne avstanden til feilen med relativt god nøyaktighet. En slik måling kan gjennomføres både manuelt på stedet, eller sentralt ved hjelp av alarmsentralene. Førstnevnte krever fysisk tilgang til alarmtrådene. [64, 65]



Figur 14: En rekke ulike forenklete signalprofiler, med tilhørende eksempler på hva som kan forårsake dem. [66]

2.5.2 Non-Contact Magnetometric Diagnostics

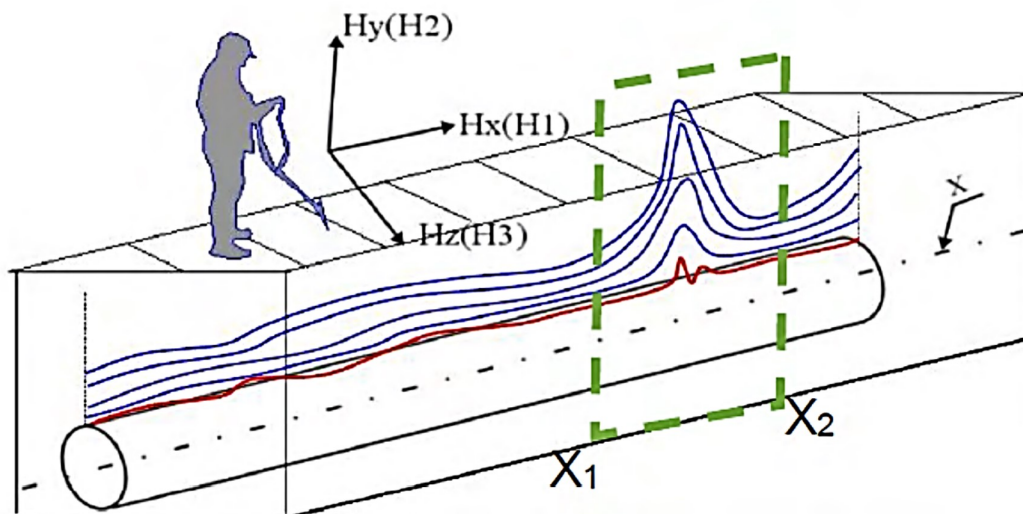
Non-contact magnetometric diagnostics (NCMD) er en del av metal magnetic memory (MMM) inspeksjonsteknologi, som evner å detektere defekter og spenningskonsentrasjoner i ferromagnetiske materialer. Dette oppnås ved å utnytte materialets magnetiske egenskaper, og hvordan disse påvirkes av defekter og spenningskonsentrasjoner. NCMD krever ikke fysisk kontakt med godset, og egner seg dermed til inspeksjon av nedgravde legemer.

Virkemåte

NCMD detekterer magnetiske lekkasjefelt fra ferromagnetiske gods [67]. Lekkasjefelt oppstår fra defekter inni eller på overflaten av godset, som får materialets interne magnetiske felt til å trenge gjennom overflaten. Defektene som forårsaker slike lekkasjefelt er ofte kilder til kritiske brudd i en konstruksjon, eksempelvis lekkasjer som følge av korrosjon [67]. Instrumentet brukt i NCMD måler styrken på lekkasjefeltsgradienten, eller magnetic stray field gradient (MSFG) [67]. MSFG gir et mål på endringen i lekkasjefeltets størrelse, som funksjon av målt lengde. Lengden kan eksempelvis være lengden målt langs et nedgravd rørstrekk [67].

Maksimal rørdybde er lik ti ganger diameteren på røret [68, s. 9]. En gruppe på to inspektører kan maksimalt dekke 3000 meter med rørstrekk i løpet av en dag [68, s. 9]. Den oppnådde dekingen er i stor grad avhengig av fremkommeligheten over der hvor rørene ligger begravd. Måleinstrumentene er sensitive for eksterne forstyrrelser, som for eksempel overhengene strømkabler og nærliggende metallobjekter over eller under bakken [68, s. 15]

For en nedgravd rørtrase, vil NCMD kunne avdekke svake punkter og diskontinuiteter på medierøret, ved å måle forstyrrelser i jordens magnetfelt forårsaket av variasjoner i MSFG langs medierøret [69]. Figur 15 illustrerer dette. Den røde kurven representerer intensiteten til lekkasjefeltet langs rørstrekket, og de blå representerer de lokale feltlinjene til jorda. Diskontinuiteten i medierøret forstyrrer jordens magnetfelt, til den grad at MSFG kan detekteres over bakken (markert i grønt).



Figur 15: Forenklet fremstilling av prinsippet bak inspeksjon ved bruk av NCMD. Rød linje representerer rørets lekkasjefelt, og de blå representerer jordens feltlinjer og hvordan de påvirkes av lekkasjefeltet. [68, p. 14]

Utførelse

Utførelse av en typisk NCMD-innspeksjon følger 6 kronologiske steg: [68, p. 11-16]

1. Informasjonsinnhenting

- Innsamling av historisk inspeksjons- og prosessdata.
- Inspektøren gjør seg kjent med tilfellet.

2. Lokalisering av rørstrekke

- Eksakt lokalisering av rørstrekket ved hjelp av radiodeteksjonsutstyr.
- Markerer en rute for senere målinger.

3. Beleggsundersøkelse

- En elektrode påsettes på eksponert medierør.
- En anode plasseres i jorden ved rørstrekket.
- Strøm påsettes, og forstyrrelse i det elektriske signalet indikerer potensiell beleggsskade.

4. Motstandstest av grunnen

- Motstand mellom fire stålelektroder plassert over rørstrekket måles med 5 meters intervaller.
- Målt motstand indikerer jordsmonnets pH og dermed korrosivitet.

5. MMM-inspeksjon

- Målinger av intensiteten på magnetiske lekkasjefelt foretas langs rørstrekket, etterfulgt av analyse av innhentet data.

6. Klassifiseringsanalyse

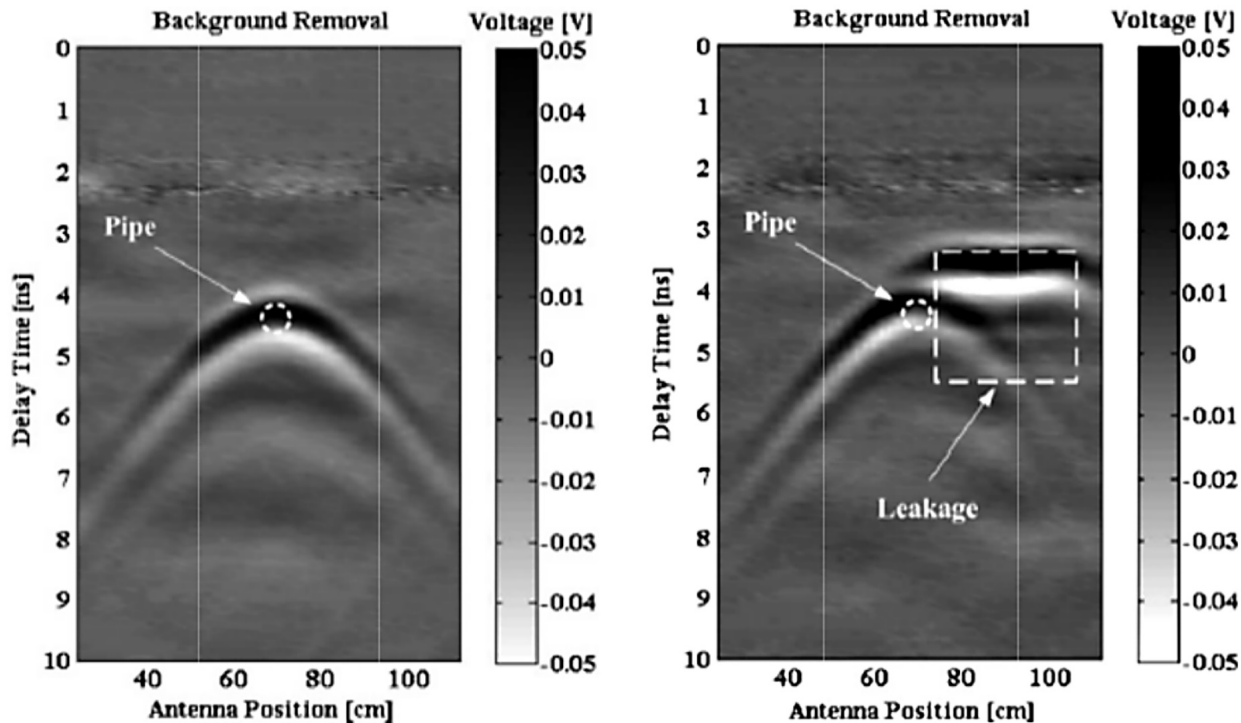
- Analyserte resultater evalueres opp mot mulige feilkilder.
- Utslag for feil rangeres etter antatt alvorlighetsgrad.

2.5.3 Jordgjennomtrengende radar

Virkemåte

Jordgjennomtrengende radar, eller ground penetrating radar (GPR), kan samle inn data om undergrunnen fra over bakken. En senderantenne emitterer elektromagnetisk stråling ned i bakken, og en mottakerantenne lytter etter refleksjoner [70]. Elektromagnetisk stråling brer seg i ulike hastigheter avhengig av mediets dielektriske konstant, og det er endringer i denne under bakken som gir refleksjoner [70]. Den dielektriske konstanten er et mål på hvor mye energi et material absorberer fra et eksternt elektrisk felt [71, s. 3]. Endringer av dielektrisk konstant under bakken stammer fra ulike forhold i grunnen, som fuktinnhold, eller tilstedeværelsen av ulike materialer og legemer. Tiden fra et radarsignal sendes ut og til en refleksjon detekteres, er en funksjon av dybden til refleksjonssignaturen [70].

GPR kan anvendes til å identifisere lekkasjer i nedgravde prosessrør [70]. Lekkasjer kan gi signaler enten ved at vannet har erodert grunnen rundt røret, eller ved at den dielektriske konstanten til grunnen rundt lekkasjen er endret på grunn av introduksjonen av vann. Målinger kan gjøres langs et rørstykke, hvor innhentet data fremstilles som detekterte signal mot posisjonen langs strekket. Figur 16 viser hvordan målinger fra en GPR-undersøkelse kan se ut. Figur 16a viser refleksjonssignaturen til et nedgravd rør, representert ved dybden, i form av tid før deteksjon av refleksjonen, signalstyrken på refleksjonen, samt posisjonen langs den 100 cm lange mottakerantennen hvor signalet ble registrert. Figur 16b viser hvordan refleksjonssignaturen til en lekkasje kan se ut. Målingene er tatt over bakken og ned på tvers av røret. Signalene har altså reflektert fra toppen av røret, sett fra rørets langsgående akse. [72]



(a) GPR-signal av et nedgravd rør uten lekkasjer. (b) GPR-signal av et nedgravd rør med en lekkasje ut fra toppen på røret.

Figur 16: Fremstilling av data fra målinger med jordgjennomtrengende radar. Målingene er tatt ovenfra og på tvers av et rør, og viser signalet som reflekterer av toppen på røret. [72]

Metoden har en manglende evne til å skille nedgravde objekter fra hverandre, og å avklare objektene tilknytning til en eventuell lekkasje [72].

2.5.4 Termografi

Virkemåte

Termografisk deteksjon av lekkasjer og fuktinntrengning baserer seg på måling av infrarød stråling fra bakken. Jo varmere bakken er, desto høyere intensitet har strålingen. De detekterte strålingsforskjellene kan visualiseres i et varmekart over det undersøkte området. [73]

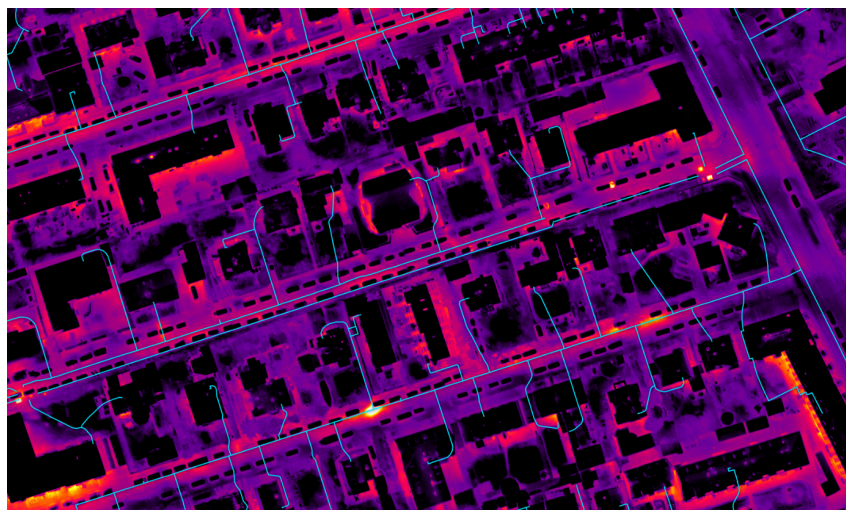
For en nedgravd rørtrasé, vil en lekkasje medføre oppvarming av den omkringliggende jorda. Fjernvarmevannet kan holde temperatur opp mot 120°C når det strømmer ut av røret, og varmeoverføringen kan forplantes opp til overflaten over lekkasjen og gi en detekterbar varmesignatur. [73]

Termografi er blitt brukt for lekkasjesøk på fjernvarmenett før, enten med håndholdte kamera, eller montert på fly [74–76]. Termografi er mest effektivt til å detektere varmesignaturer fra under bakken når omgivelsene holder en temperatur på mellom -5°C og 8°C . Nedbør og snødekke vil kamuflere varmesignaturene fra omgivelsene [77].

Luftbåren termografi med drone

Luftbåren termografi tillater omfattende overvåkning av større områder på relativt kort tid. Tradisjonelt sett har det blitt brukt fly eller helikopter, da termokameraene har vært tunge og krevd vannavkjøling [78]. Det finnes i dag flere aktører med erfaring innenfor termografi av fjernvarmenettverk, også fra nettverk i norden [75, 76, 79]. Utvikling i både kamera- og droneteknologi tillater nå bruk av droner til termografiske undersøkelser av fjernvarmenett [78] [80]. En slik drone veier i overkant av 10 kg [77], og kravene til flyging er derfor langt strengere enn de som gjelder for rekreasjonelle droner [81].

Det er store datamengder som samles inn under luftbåren termofotografering. Det tilbys i dag programvare som implementerer kunstig intelligens i databehandlingen, noe som minimerer mengden manuelt arbeid [82]. Bilder fra overflyvninger kan kombineres til et sammenhengende mosaisk bilde, slik som Figur 17 viser. Programvaren har lagt linjekartet over den innsamlede dataen, for å enklere kunne relatere varmesignaturer til fjernvarmerørene [83].



Figur 17: Et eksempel på termografi av et fjernvarmenettverk fra luften med drone. De lyse, gule og hvite flekkene på bildet viser områder hvor temperaturen er høy sammenlignet med de mørke områdene på bildet. Den lyseblå streken på bildet viser hvor fjernvarmerørene ligger under bakken. [83]

Grunnet sikkerhetrisiko for mennesker, bygninger og annet materiell, kreves det omfattende planlegging og ulike tillatelser for å gjennomføre en luftbåren termografisk undersøkelse med drone [81, 84].

3 Metode

Dette kapittelet tar for seg hvordan informasjon om Statkraft sin virksomhet i Trondheim ble samlet inn. Det har vært essensielt å danne en god oversikt over begrensninger og krav, for å kunne ta stilling til problematikken med lekkasjer Statkraft opplever.

3.1 Intervju

Det er begrenset informasjon om drift og vedlikehold av fjernvarmenettet i Trondheim som er tilgjengelig offentlig. Det ble derfor utført en rekke intervjuer med sentrale personer innenfor drift og vedlikehold i Statkraft.

3.1.1 Intervjuformatet

Det er ulike måter å gjennomføre et intervju på, og valget av metode avhenger av hvilken informasjon som etterlyses, hvordan denne informasjonen skal anvendes, samt dynamikken og forholdet mellom intervjuer og intervjuobjekt. For denne prosjektoppgaven ble en semistrukturert intervjuform valgt.

Et semistrukturert intervju er en intervjuform hvor intervjuer har lest seg opp på et tema, en person eller en problemstilling før intervjuet, for så å planlegge en rekke spørsmål som skal legge grunnlaget for intervjuets struktur og fremgang [85, s. 26-28]. De forhåndsbestemte spørsmålene blir satt opp i en intervjuguide. Intervjuformen tillater deltakerene å vike bort fra intervjuguiden, eksempelvis i forbindelse med oppfølgingsspørsmål tilknyttet intervjuobjektets respons på de forhåndsbestemte spørsmålene [85, s. 26-28]. Det ble lagd en egen intervjuguide for hvert intervjuobjekt.

Denne intervjuformen ble valgt fordi den tillater intervjuer og intervjuobjektene å være kreativ innenfor den rammen som er satt i intervjuguiden. Begrenset tilgang til informasjon om fjernvarmenettet i Trondheim på forhånd, og forventninger om at det ville avdekkes viktige og ukjente momenter tilknyttet problemstillingen i det et intervju utspilte seg, var hovedårsakene for valget.

Intervjuguiden inneholdt innledende og generelle spørsmål tilknyttet dagens drift, erfaringer med problemstillingen, samt erfaringer med dagens metoder for fukt- og lekkasjedeteksjon. Oppfølgingsspørsmålene varierte mellom intervjuobjektene, men de ble rettet mot å avklare hva intervjuobjektene anså som problematisk med momentene det i utgangspunktet ble spurt etter. Deretter gikk spørsmålene mer i detalj på ansvarsområdene til intervjuobjektene, med den hensikt å anskaffe konkrete tall, eksempler og dokumentasjon relatert til problemstillingen. Intervjuene ble fulgt opp over e-post for overrekkelse av lovet informasjon fra begge parter, eksempelvis møtereferat og dokumentasjon.

Intervjuene ble holdt både digitalt og fysisk, og det var en referent til hvert intervju.

3.1.2 Valg av intervjuobjekter

Intervjuobjekter ble valgt i samråd med ekstern veileder, Åmund Utne, i Statkraft. Valgene var basert på hvilken informasjon som var etterlyst, og hvorvidt ansvarsområdet til de ulike personene overlappet med dette. Problemstillingen brer seg over flere instanser ved driften av fjernvarmevirksomheten, noe som reflekteres i antall intervju, samt valg av intervjuobjekt. Under informasjonssøket av alternative metoder for lekkasjedeteksjon, ble det funnet en bedrift som tilbyr en relevant tjenest. Bedriften ble kontaktet, og det ble utført et intervju med en representant bedriften, ved navn Orbiton AS. Det ble utført fire intervjuer totalt, hvor intervjuobjektene hadde følgende stillingstitler:

- Vedlikeholdsleder, Statkraft
- Prosesseier distribusjon, Statkraft
- Drifts- og vedlikeholdsplanlegger, Statkraft
- Ansvarlig leder, Orbiton AS

3.2 Befaring

Med det kontinuerlige vedlikeholds- og utbyggingsarbeidet som pågår på fjernvarmenettet i Trondheim, var det mulig å gjennomføre befaringer på relevante deler av nettet. Befaringene ble arrangert av Statkraft, ledsaget av den ansvarlige for tilvirkningen. Det ble utdelt påbudt vern- og sikkerhetsutstyr før befaringene. Under befaringene var det mulig å stille spørsmål til arbeidere som jobbet på stedet, og det ble tatt bilder for å dokumentere. Befaringene ble gjort for å danne et grunnlag for forståelse av hvordan en ny rørtrase legges, samt hvordan en eldre rørtrase vedlikeholdes. Befaringene ble ansett som nødvendige for å kunne gjøre informerte vurderinger på forbedringspotensiale ved dagens metoder, samt alternative metoders kompatibilitet med rørnettet.

3.2.1 Befaring I - Nylagt rørtrase

Denne befaringen ble gjennomført med hensikt å danne et praktisk referansepunkt for installasjon av nye fjernvarmerør. På Solsletta ble det lagt en ny rørtrase med enkelrør inn mot et fremtidig leilighetskompleks. På den nye traseen var det flere skjøter mellom de preisolerte rørseksjonene fra fabrikk. Disse var sveiset sammen, men det gjenstod installasjon av muffe og skumming. Figur 18a viser et oversiktsbilde av tur- og returrørene som ligger i den preparerte grøfta. Krympemuffene som skulle brukes ligger innpakket i hvit plast like ved skjøten, for å beskytte mot fukt, sollys og urenheter. Figur 18b viser et nærbilde av en rørsjøt etter sveising av medierøret. Motstandstråder kan observeres i tversnittet av isolasjonen på venstre side, mens de tilsvarende trådene på høyre side enda ikke er pirket ut av isolasjonen.



(a) Nylagte tur- og returrør til boligkompleks på Solsletta. (b) Nærbilde av rørskjøt før muffing tatt på Solsletta.

Figur 18: Bilder tatt fra et byggefelt på Solsletta i Trondheim.

3.2.2 Befaring II - Oppgravd rørtrase

Denne befaringen ble gjennomført med hensikt å danne et praktisk referansepunkt for vedlikehold og reparasjon av eksisterende fjernvarmerør. På Turistveien ble det gravd opp flere seksjoner av en rørtrasé etter utslag på fukt fra alarmtråder. Tre av grøftene ble inspisert. Figur 19 viser tur- og returrør fra en av de inspiserte grøftene. Figur 18a viser et oversiktbilde av den oppgravde grøften. Fjernvarmerørene ligger under signalkablene, og både tur- og returrøret har kilemuffer. Signalkablene i grøfta var ikke tilknyttet fjernvarmerørene. Figur 19b viser et nærbilde av tur- og returrøret, henholdsvis øverst og nederst i bildet, etter at muffen og isolasjon var blitt fjernet.



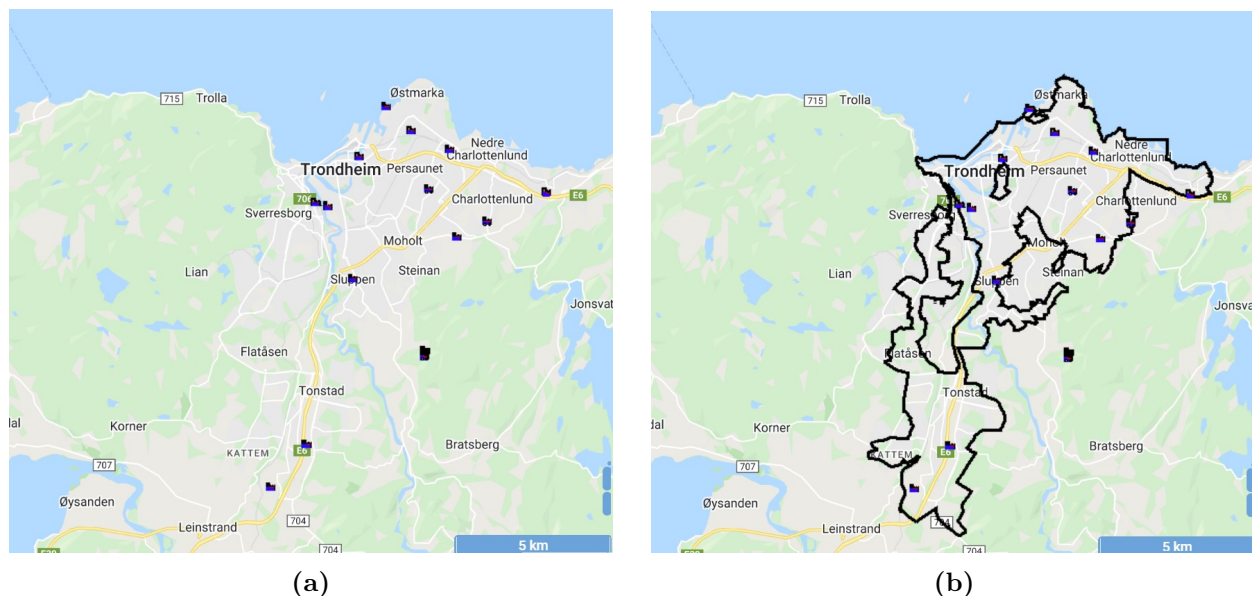
(a) Oppgravd rørskjøt med kilemuffer.

(b) Nærbilde av rørskjøt etter fjerning av muffen.

Figur 19: Bilder tatt fra vedlikeholdsarbeid på rørstrekke i Turistveien.

3.3 Kartlegging

Det var viktig å danne et komplett overblikk over problemstillingen Statkraft har i distribusjonsnettet sitt i Trondheim. Før det kunne gjøres vurderinger på dagens metoder for sammenføring, fukt- og lekkasjedeteksjon, måtte det samles inn informasjon, erfaringer, dokumentasjon og statistikk fra driften i Trondheim. Første halvdel av prosjektarbeidet gikk til denne kartleggingen. Erfaringer ble delt gjennom samtaler og intervjuer med nøkkelpersoner, samt møter med veiledere. Dokumentasjon og generell informasjon om drift ble innhentet gjennom epostutvekslinger med ekstern veileder og andre ansatte, sammen med internettsøk på kjente nøkkelord tilknyttet problemstillingen. Det ble innhentet dokumentasjon på produkter som blir anvendt i fjernvarmenettet, som preisolerte rør og alarmtråder. Installasjons- og vedlikeholdsprosedyrer ble også innhentet. Det ble gitt tilgang til verktøyet SmallMap, en karttjeneste Statkraft benytter internt, som viser en oversikt over alle deres rørtraseer tilknyttet fjernvarme og -kjøling i Norge. Dette ble benyttet til å danne et referansepunkt for omfanget av virksomheten i Trondheim, samt for å gå over og vurdere hvordan verktøyet blir brukt av Statkraft, satt opp mot verktøyets potensiale. Med Trondheim som eksempel, kan SmallMap vise et kart over byen, og gi en detaljert plassering for rørtraseer og varmesentraler. Det finnes også informasjon om kummer, skjøter og muffe i SmallMap, og det kan lagres store mengder data tilknyttet hver komponent langs rørtraseene. Figur 20a og Figur 20b viser et oversiktbilde av Trondheim i SmallMap hhv. uten og med konsesjonsgrensene for fjernvarme. Fjernvarmesentralene er også markert på kartet. [86]



Figur 20: Et kart med oversikt over Trondheim, både uten (a) og med (b) Statkrafts konsesjonsgrenser for fjernvarme.

Statistikk over feil ble innhentet i form av et Excel-ark som Statkraft hadde opprettet. Det er dette arket som er kilden til de grafiske fremstillingene vist i Kapittel 4. Excel-arkene inneholder info om dato feilene ble funnet, hvor de er blitt funnet, typen feil, antatt årsak til feilen, samt foreslått tiltak for utbedringer. Denne informasjonen var nyttig for evalueringen om hvor utbedringer vil få størst utbytte.

3.4 Litteratursøk

Andre halvdel av prosjektarbeidet gikk til å undersøke alternative metoder, teknologier og produkter som kunne knyttes opp mot problemstillingen. Da det var dannet et overblikk over driften i Trondheim, var det mulig å bruke det som referansepunkt i letingen etter andre løsninger som kunne forbedre eller erstatte dagens løsninger. Under litteratursøket ble det søkt etter kjente ord og fagtermer som vil gi relevante resultater. Det finnes flere rapporter som omhandler fukt- og lekkasjedeteksjon i nedgravde prosessrør, samt rapporter som tar for seg fuktinntregning i muffe spesifikt. Fra disse rapportene var det mulig å anvende de tilhørende referanselistene til ytterligere litteratursøk. De aktuelle funnene ble målt opp mot kravene og begrensningene i Trondheim, og deretter vurdert om det var av hensiktsmessig å se nærmere på.

4 Resultater og diskusjon

Dette kapittelet baserer seg på intervjuer og samtaler med nøkkelpersoner i Statkraft og andre bedrifter, utførte befaringer og funn fra litteratursøk. Det vil legges frem hvordan Statkraft opererer i dag, både med tanke på forebygging og deteksjon av fukt og lekkasjer, samtidig som det vil diskuteres hvordan de kan forbedre eller utbytte sine prosedyrer og metoder basert på allerede eksisterende litteratur og teknologi.

4.1 Forebygging av fuktinntrengning og lekkasjer

For å hindre at fukt og lekkasjer oppstår, må rotårsakene til problemet håndteres. Gjennom litteratursøk og intervju har det kommet fram at en av årsakene til fuktinntrengning kan spores til installasjonsfasen.

4.1.1 Installasjon og bruk av muffer

Muffer er tydelige svake ledd i fjernvarmeanlegg [12, 30, s. 288]. Det er flere sannsynlige årsaker til dette. Området hvor fjernvarmerør sammenføres er det eneste området på de ellers kontinuerlige fjernvarmerørene hvor den prefabrikkerte kappen og det prefabrikkerte PUR-skummet opphører. Det krever godt manuelt feltarbeid for å sikre god isolasjonsevne mot varmetap og mot det ytre miljøet. Fabrikasjonen av fjernvarmerør gjøres under kontrollerte forhold, slik at egenskapene til PUR-skummet og HDPE-kappen blir av høy kvalitet. Sammenføyningen av disse rørene i felt, utføres derimot under svært varierte og potensielt skadelige forhold. Dette ble tydeliggjort under befaringene [87].

Utførelsen av sammenføyningen vil også være av varierende kvalitet avhengig av installatørens evner, i følge intervju med nøkkelpersoner fra drift og vedlikehold i Statkraft [88]. Dette er også tilfelle hos andre fjernvarmeleverandører [43]. Intervjuet fikk også frem at entreprenører og installatører tilsynelatende har hatt få insentiv til å gjennomføre sammenføyningene med den nøyaktigheten installasjonsprosedyrene tilsier [88]. Det ble også uttrykt bekymringer for at entreprenørene ikke har tilstrekkelig kjennskap til viktigheten av korrekt installasjon, eller konsekvensomfanget uriktig installasjon kan medføre [88]. Dersom sammenføyningen viker fra kvalitetskravene presentert i EN 13941-2, kan forseglingssevnen, isolasjonsevnen og den mekaniske styrken til sammenføyningen bli svekket. Konkrete tiltak for å motvirke dette er å sørge for tilstrekkelig opplæring og bevisstgjøring av installatører. En installatør må kunne fremlegge de riktige sertifikatene og kvalifikasjonene for å kunne utføre arbeid. Oppfriskningskurs kan gjennomføres ved gitte intervaller, for å motvirke innøvelsen av dårlige arbeidsvaner.

Destruktive stikkprøver tester av PE-sveiser kan utføres som beskrevet i EN 13941-2, eller på et mer omfattende vis på lab. Sistnevnte er blitt utført gjennom et studie fra Nederland [43], noe som ga godt grunnlag for bekjempelsen av installasjonsfeil og andre gjengående feilårsaker. De overnevnte testene kan avdekke rotårsaker for lekkasjer i fjernvarmeanlegget, noe som åpner for initiering av korrigerende tiltak med størst mulig utbytte [43]. Den eneste testen som gjennomføres på installerte muffer i dag er trykktesting. Denne utføres kun på muffer hvor flytende skum skal etterfylles [88]. Muffer som benytter rørsåler gjennomgår ikke trykktesting [41]. For disse er det kun visuell inspeksjon som tilsier om muffen er tett eller ikke, men har til fordel at det unngås hull

i muffen for påfylling av flytende skum. Uten testing vil det bli utfordrende å avdekke rotårsaker til, og innføre tiltak mot fuktinntrengning i muffen.

Selv ved dårlig gjennomført installasjon tar det lang tid før medierørene forvitrer nok til å danne lekkasjer. I følge nøkkelpersoner i Statkraft, er dette hovedårsaken til at installatører ikke blir stilt til ansvar for arbeidet sitt [88]. Rørstrekke skal under de riktige drifts- og installasjonsforholdene, ha en forventet levetid på minst 30 år [28]. Et rørstrekke hvor sammenføyningene ikke er gjort med ønsket kvalitet vil vanligvis være i drift i fem til ti år før lekkasje oppstår [88]. På den tiden kan det ha blitt gjort flere endringer i både bruk av entreprenører og metoder, og det kan bli krevende å stille individer og bedrifter til ansvar på redelig vis. Uten konsekvenser og ansvarliggjøring kan det være krevende å endre uvaner og vranglære hos entreprenør eller installatør.

Statkraft har tidligere benyttet muffen som har hatt dårlig tetningsevne [88], eksempelvis kilemuffer. Statkraft har siden gått vekk fra denne muffetypen, og den har også utgått fra produsenten LOGSTORs sortiment [40]. Statkraft erstatter disse muffene hvis de graves frem, men grunnet tiden det tar fra installasjon og til eventuell fuktinntrengning og lekkasje, er det fremdeles flere kilemuffer i nettet. Arbeidet med å erstatte disse og reparere skadene er omfattende, både med tanke på tid og ressursbruk. Muffene Statkraft i hovedsak installerer i dag er BX-krympemuffer. Disse benyttes på rør med diameter på opp til 630 mm, mens sveisemuffer benyttes ved større rørdimensjoner og rør som skal ligge nedsenket i vann [60]. Begge disse skal være i stand til å skape en tett binding mot kappen [30]. Muffer med enkel installasjon foretrekkes, ettersom det ofte er under installasjon feil som kan lede til lekkasje gjøres [89]. Muffer av PEX er anbefalt når hurtig installasjon er viktig, eksempelvis når sentrale trafikkårer blokkeres av vedlikeholdsarbeidet. For krympemuffer anbefales myke lim, som mastik, da de er mindre sensitive for forurensninger og det oppnås god forseglingssevne. Den dobbeltforsegelende BX-muffen benytter mastik og PEX, og har i tillegg en ekstra tetningsfilm. Den skal derfor være godt egnet for å forhindre fuktinntrengning.

Studien fra Nederland om destruktiv testing av nylagte muffen [43] fant at muffen med integrert mastik er vanskeligere å holde rene i felt. Ettersom at dette er en mulig årsak til fuktinntrengning i muffene, kan heller manuelt påført mastik vurderes. Sveisemuffer har bedre mekanisk styrke enn de limbaserte muffene dersom sveisen blir av ønsket kvalitet [90]. Den kan derfor være godt egnet i rørstrekke hvor mekanisk styrke er ekstra viktig. Sveisemuffen har også den fordel at sveisen gjennomføres automatisk [44], og at installatøren får beskjed dersom sveisen ikke blir god nok. Denne ekstra sikringen bygger under kvalitetskontroll, og fjerner et ledd for mulige menneskelige feil. Det må likevel nevnes at det er begrenset med litteratur på effektiviteten, brukervennligheten og levetiden til de ulike muffemodellene, og det er derfor krevende å gi klare anbefalinger til hva slags type muffe som fungerer best i ulike situasjoner. Praktisk erfaring fra eget anlegg vil trolig gi de beste indikasjonene på hva som fungerer best under de aktuelle driftsforholdene.

Prosesseier for distribusjon hos Statkraft har erfart at urenheter i kontaktflaten mellom muffe og kledningsrør gjengår i muffen med fuktinntrengning [88]. Rengjøring av overflatene er et av installasjonsstegene for alle muffetyper [41]. Mangelfull rengjøring tyder på enten utfordrende installasjonsforhold eller feilaktig installasjon. Grøftene hvor rørene sammenføyes inneholder sand, pukk og jord, noe som øker sannsynlighetene for at urenheter legger seg på kappe og muffe før sammenføyning. Kontroll av rene kapper og muffen gjøres kun visuelt. Den visuelle kontrollen kan være spesielt krevende på undersiden av rørene eller på innsiden av muffen. Under reparasjonsarbeid er det mer utfordrende å oppfylle renhetskrav, grunnet sølete og trange forhold i den oppgravde grøfta. Reparasjonsarbeid utføres ofte under større tidspress, da det kan påvirke

trafikken rundt grøfta, og medføre tjenestebrudd hos kunden [88]. Værforholdene i Trondheim, både med tanke på lave temperaturer og nedbør, bidrar til å gjøre installasjon og reparasjon av rørskjøter utfordrende [91]. Med tanke på viktigheten av gode sammenføyninger, kan det fokuseres mer på å hindre ugunstige installasjons- og reparasjonsforhold. Under Befaring I på Solsletta ble det eksempelvis brukt en parasoll. Som Figur 21 viser, ga ikke denne fullstendig tildekking av skjøten. Værbeskyttelsen bør være tilstrekkelig til å beskytte både installatør og rørskjøt, da installatøren også kan tilføre fukt under arbeidet. Det bør også nevnes at skjøtene kun var tildekket med parasoll under installasjon, og at medierøret og endene på isolasjonen var eksponert for vær og vind over lengre tid før dette.



Figur 21: Et eksempel på værbeskyttelse ved installasjon av nye rør og muffe.

Grensesjiktet mellom rør- og muffeskummet kan være en transportkanal for fukt inn til medierøret, dersom muffen ikke holder tett [47]. Rørskåler vil være spesielt utsatt for dette, ettersom at disse ikke har noen som helst binding til rørskummet, og derfor vil ha dårligere tetningsevne. Ved bruk av flytende skummasse, fører færre cellevegger og grovere porøsitet i grensesjiktet til at vann enklere kan trenge gjennom skummet. Fysiske påkjenninger, oksidasjon og hydrolyse kan føre til at det skapes nok rifter og hull i celleveggene til at vann transporteres hele veien inn til medierøret [47, 49, 53]. For å oppnå en så vanntett binding som mulig er det viktig å fjerne alle forurensninger og oksidert material fra rørskummet før skummingen [47]. Dette er for å sikre at bindingen og forseglingen mellom rør- og muffeskum blir så tett og sterk som mulig. Det kan derfor være gunstig å fjerne det aller ytterste laget av rørskummet like før installasjon av ny muffe. Fukt kan også føre til dårligere binding mellom muffe- og rørsaum, samt mellom muffeskum og medierør [47]. Dette er nok en grunn til å sørge for at værbeskyttelsen mot nedbør under installasjon er tilstrekkelig.

Ved bruk av rørskål vil det ikke være bindinger mellom muffe- og rørsaummet. Hindring av fukttransport vil da kun avhenge av at rørskålen er tilkappet presist, slik at det sitter tett inntil rørsaummet i begge ender [43]. Dersom endeflatene på rørskålen er kuttet ujevnt, eller for kort, vil det skape gliper og transportkanaler for fukt. Det er da kun muffen som beskytter medierøret mot fukt. Fordelene ved rørskåler er at de er prefabrikkerte, noe som sikrer bedre skumkvalitet.

Det har ikke blitt funnet entydige svar på hva som fungerer best av rørskåler og flytende skumblanding med tanke på forebygging av fuktinntrengning. Det vil uansett være viktigst å hindre initiell fuktinntrengning i muffen, og dette gjøres ved å sikre gode installasjonsforhold, og kvalitet i installasjon av selve muffen.

4.1.2 Drift

Driften av fjernvarmeanlegget påvirker også forekomsten av lekkasjer. Høye driftstemperaturer kan gi ringvirkninger som kan framprovosere fuktinntrengning og lekkasjer [15].

Det er først når fukt når medierøret at korrosjon, og potensielt lekkasje, forekommer [30]. Når fukt kommer i kontakt med isolasjonen på innsiden av muffen, vil hydrolyse forekomme. Grunnet den relativt lave temperaturen på utsiden av isolasjonen, vil degraderingen av skummet skje langsomt. Hydrolyse av våt isolasjon nærmere medierøret forekommer raskere, grunnet den økte temperaturen [92]. Hydrolyse med vann over 100°C er spesielt skadelig. Hydrolysen ødelegger celleveggene til skummet, og øker diffusjonshastigheten til fukten inn til medierøret. Denne tilbakekoblingeffekten kan forårsake hurtig degradering av isolasjonen. Reaksjonsproduktene fra hydrolysen kan akselerere korrosjonshastigheten på medierøret, grunnet redusert pH og økt konsentrasjon av reaktive stoffer [10].

Termisk ekspansjon blir utfordrende ved høye driftstemperaturer. Gjennom samtaler med prosesseier for distribusjon, og drifts- og vedlikeholdsplanlegger kom det frem at termisk ekspansjon i flere tilfeller har ført til at muffene slipper kappen, noe som fører til en glipe med eksponert medierør [88]. Et tilfelle av dette ble observert under Befaring II i Turistveien. Kaldlagte rør kan oppleve store forskyvninger som følge av termisk ekspansjon, spesielt dersom de atmosfæriske temperaturene er lave under legging. Hvis et rør legges ved en temperatur på 5°C, og temperaturen ved drift i turledningen er oppmot 125°C, blir differansetemperaturen på 120°C. Likning 1 viser at ekspansjonen er proporsjonal med differansetemperaturen. Dersom en rørtrasé har et langt, rett strekke, og temperaturdifferansen blir stor, vil røret ekspandere betydelig. Høye og fluktuerende temperaturer gjennom drift bidrar til raskere degraderingen av PUR-skummet nærmest medierøret [51]. Dette, sammen med kreftene fra termisk ekspansjon, kan svekke eller fullstendig ødelegge festet mellom isolasjonen og medierøret. Isolasjonen vil til vanlig motvirke den termiske ekspansjonen av medierøret ved at det deformeres, og overfører de aksielle kreftene til kappen [48, 93, 94]. Kappen holdes igjen av fyllmassene rundt røret gjennom friksjon. Dersom isolasjonen slipper medierøret vil det være færre krefter som motvirker den termiske ekspansjonen, og som en konsekvens vil deformasjonen av medierøret øke. Rørbøyene er de områdene som i størst grad vil utsettes for kreftene fra deformasjonen, noe som kan føre til store skader [30]. Kappen og muffene langs rørestrekket vil også utsettes for strekk- og skjærkrefter i det rørbøyene forskyves [48]. Følgene av dette er at ekspansjon og degradering av skum gjør at medierør eksponeres fullstendig mot de fuktige omgivelsene, og korrosjon finner sted.

Den termiske ekspansjonen kan reduseres ved god prosjektering, og reduserte driftstemperaturer. Installasjon av ny rørtrasé bør ikke skje ved for kalde temperaturer. I følge Standarden EN 13941-2 er det ikke tillatt å utføre arbeid på rør og komponenter under -15 °C [54]. Den mekaniske styrken mellom muffe og kappe bør maksimeres ved bruk av riktig muffetype og ved installasjon som følger installasjonsprosedyrene nøyaktig. Sveisemuffer og muffer som benytter sterkere og hardere limtyper har utvist bedre skjærstyrke enn muffer lagt med mastik [89]. Statkraft bør dermed vurdere om slike muffer skal benyttes i rørestrekk som er spesielt utsatt for termisk ekspansjon. Det skal

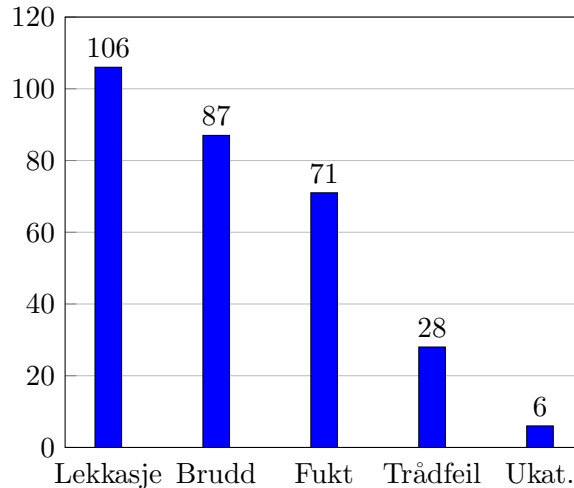
likevel merkes at slike muffe er mer sensitive for forurensninger, og det blir dermed ekstra viktig å holde kontaktflatene rene og tørre under installasjon [39]. Stabile og lavere driftstemperaturer bør også etterstrebes for å unngå store og vekslende termiske krefter i rørene [93]. Senking av driftstemperaturer kan derimot være utfordrende ettersom at eldre deler av fjernvarmenettet er dimensjonert for vann med tur- og returtemperaturer på 120/70°C.

4.1.3 Kvalitetskontroll og dokumentering

En forutsetning for effektiv fjernvarmedrift er at installasjon og vedlikeholdsarbeid utføres i tråd med etablerte standarder. Standarden EN 13941-2 er til for å kvalitets sikre installasjon av muffe. Gjennom intervju kom det fram uklarheter om hvorvidt kvalitetskontroll av muffene har blitt fulgt. [88]. Krav om tilstrekkelig sertifisering er viktig for å sikre kvalitet i arbeidet. Korrekt testing av alarmsystem og muffe etter standarden kan luke ut feil før rørene graves ned. Standarden påpeker hvordan erfaringsoverføring og overrekkelse av dokumentasjon mellom installasjon og drift er viktig for å sikre riktige driftsbetingelser, og for å gjøre vedlikeholdsarbeid mer effektivt. Statkraft har i dag lite formell overlevering av dokumentasjon med fokus på kvalitetkontroll [88]. Når alle etablerte punkt og krav for kvalitetssikring følges, reduseres sannsynligheten for feil.[54]

Elementene i standarden for kvalitetskontroll er en god måte å sikre punktene i CMS. Korrosjon er den direkte årsaken til lekkasjer der hvor fukt kontakter medierøret fra utsiden. God korrosjonsvern vil i stor grad hjelpe i bekjempelsen av fenomenet. Av de fire grunnleggende prinsippene for korrosjonsvern, er utforming, inspeksjon og vedlikehold viktig å ta med i dette tilfellet. Utforming er delvis dekket ettersom at mantlingen skal være tett og rørsystemets utforming motvirker inntrengning av fukt og andre korrosive stoffer. PUR-skummet framprovoserer derimot korrosjon i kontakt med fukt, men besitter flere gode egenskaper som gjør det lite realistisk å skifte ut for en annen skumtype [7, 10, s. 132]. Det tas ikke hensyn til bellegg ettersom PUR-skummet og HDPE-kappa skal beskytte røret fra det ytre miljø. Å belegge medierøret er ikke en del av leverandørens prosedyre i dag, og må eventuelt legges til dersom det er ønsket. Det vil allikevel være mer gunstig å forhindre årsak i fuktinntrengning framfor å hindre korrosjon med bellegg ved fuktinntrengning. Et CMS, slik det fremstilles av NACE [8], er forenelig med, og bør inngå i, en bedrifts ERP-system, som SAP. Korrosjon tas hensyn til fra start til slutt gjennom aktivas livssyklus, gjennom dokumentert arbeid, avsetting av tilstrekkelig ressurser, opplæring for utførelse og forståelse, og erfaringsoverføring mellom livsfaser.

Under intervju med prosesseier for distribusjon, og drift og vedlikeholdsplanlegger, kom det fram at Statkraft har hatt for lite fokus på rapportering og dokumentasjon av feil og vedlikehold [88]. Hvilke komponenttyper hvor fukt og lekkasjer gjengår er eksempelvis ikke dokumentert. Det blir dermed vanskelig å se mønstre og finne rotårsaker for feilene. I senere tid har Statkraft begynt å dokumentere feil i et Excel-regneark kalt "Innføring av feil". I regnearket er det kolonner for informasjoninnføring av blant annet dato, sted, rør, årsak og tiltak for aktuell feil [95]. Under kartleggingen ble det gitt tilgang til regnearket, og innholdet er oppsummert i Figur 22. Feilene er sortert etter oppført feilårsak, og datagrunnlaget er fra tidsperioden mellom 4. mai 2009 og 16. mai 2022. *Lekkasje* tilsvare lekkasje av fjernvarmevann fra medierøret, *Brudd* tilsvare brudd på alarmtråd, *Fukt* tilsvare registrert fukt i isolasjon, *Trådfeil* tilsvare diverse typer feil på alarmtrådene og *Ukat.* tilsvare andre ukategoriserte feil. Det er registrert totalt 300 feil i tidsperioden. Lekkasjer er den hyppigste feilen, og utgjør 35 % av alle feil [95].



Figur 22: Statistikk over ulike årsaker for feil som førte til vedlikehold på fjernvarmenettverket i Trondheim mellom 4. mai 2009 og 16. mai 2022 [95].

Oversikten over feil er mangelfull. Det er variert mengde data oppgitt for hver feil, og det er større tidsperioder hvor det ikke er blitt innført noen feil. Dette skyldes trolig av at innføringen av nye feil er blitt neglisjert, da det i andre perioder er blitt innført feil regelmessig. En viktig slutning fra denne dataen er at det er store mørketall for tilstanden av fjernvarmenettet i Trondheim. Den nest hyppigste feilårsaken er brudd, og der hvor det er blitt brudd, har evnen til å detektere feil forsvunnet. Med andre ord vil en innføring av ett brudd i statistikken bety at det potensielt er mange uoppdagede lekkasjer. En annen kilde til mørketall er at det i perioder hvor feil er blitt unnlatt å føres inn i oversikten. Å samle statistikk over forekomst av feil, samt typen feil, er essensielt for at en bedrift skal kunne luke ut skadelige driftsparametere og prosedyrer, som motvirker evnen til å utføre forebyggende vedlikehold. I intervju med prosjektleder og drifts- og vedlikeholdsleder kom det fram at det er mangel på rapporteringssystem for utført vedlikehold, og at en rotårsaksanalyse for lekkasjer i muffe burde vært utført [88].

Økt dokumentering kan legges ved i kartverktøyet SmallMap, som fremstiller informasjon om flere aspekter ved fjernvarmenettet i Trondheim. I dag er utnyttelsen av tjenesten noe begrenset, da den informasjonen som er lagt inn i hovedsak er hvor i byen rørtraseene går. Informasjonen som kan implementeres i SmallMap er blant annet tideligere utført vedlikeholdsarbeid på en komponent, muffetyper brukt, og bilder fra montering og vedlikeholdsarbeid på stedet [96]. Fra samtaler med entreprenør under Befaring II, kom det fram at entreprenøren tar bilder av feil som observeres etter oppgraving, samt av stedet før og etter graving. Dette er informasjon entreprenøren bruker internt og som dokumentasjon til kommunen [87]. Dersom entreprenøren hadde hatt tilgang til SmallMap i felt, kunne det blitt lagt inn informasjon direkte. Tilgang på SmallMap vil også kunne bidra til å sikre tilstøkkelig informasjon hos entreprenøren ved senere arbeidoppdrag. Slik visuell informasjon kan Statkraft dra nytte av i feilrapporter. Bildene kan implementeres i SmallMap som dokumentasjon, og bør samles i vedlikeholdssystemet SAP. Å samle prosedyrer, bilder, tegninger og teknisk dokumentasjon på et og samme sted vil effektivisere drift- og vedlikeholdsarbeidet dersom det brukes riktig. Dokumentering og rapportering er spesielt viktig for å definere forbedringspotensial og unngå at uønskede tilfeller gjentas. SAP har en dokumenteringsmodul som Statkraft kan benytte til å øke og samle dokumentasjon. For at SAP skal kunne fungere optimalt, må det benyttes som et verktøy på tvers av funksjoner.

4.2 Fukt- og lekkasjedeteksjonsmetoder

4.2.1 Dagens metoder

Under både kartlegging og litteratursøk ble dagens metodener for fukt- og lekkasjedeteksjon undersøkt. Alarmtrådene er en del av en teknologi som både tillater deteksjon og lokalisering av fukt i fjernvarmenettet. Metoden er skreddersydd for fjernvarmevirksomhet, men erfaringer tilsier at den også er svært sensitiv for menneskelige feil som kan forekomme under både installasjons- og reparasjonsarbeid. Omfanget til fjernvarmenettet i Trondheim tilsier at det er mange ledd hvor menneskelig aktivitet kan forårsake feil. Statistikken vist i Figur 22 viser at trådfeil går igjen ofte. Trådfeil stammer som regel fra feilaktig oppkobling under installasjon. Det kan være krysskobling av tråder, og tråder som kommer i kontakt med hverandre eller medierøret.

Fra intervju kom det fram et estimat på at $1/3$ av alarmtrådene var koblet mot en alarmsentral, og $1/3$ av disse gir kontinuerlige og brukbare målinger [97]. I fjernvarmeanlegget på omlag 260 trasékilometer, utgjør dette en betydelig andel av nettet som ikke overvåkes optimalt eller i det hele tatt [3]. Forebyggende vedlikehold blir dermed krevende, ettersom at mange feil først vil bli kjent når fukt og korrosjon har ført til lekkasje på et rør. Lekkasje kan så oppdages gjennom registrering av vanntap, og lokaliseres med en kombinasjon av seksjonering av nettet og håndholdte termografiske kamera. Denne fremgangsmåten er tidkrevende [60].

Gode prosedyrer for hvordan trådene skal kobles, spesielt i tilfeller som forgreninger, enkelt- til dobbeltrør, kan bidra til å redusere antall feilkoblinger. Eksplisitt dokumentasjon av trådkoblingen fra installasjon tas ikke vare på [88]. Fotografering av koblingen ville bidratt til å avdekke problemer tilknyttet impedansmetoden, hvor kjennskap til alarmtrådenes koblingsbane er nødvendig for å lokalisere fukt. Under Befaring I og intervju med drifts- og vedlikeholdsleder, ble det diskutert hvordan installatørene ikke har tilgang til den teoretiske motstanden som forventes i alarmtrådene [97]. Avvik mellom målt og teoretisk verdi indikerer at trådene ikke er koblet slik de skal. Mangelen på de teoretiske verdiene betyr at det potensielt graves ned nye rør med koblingsfeil, som kunne blitt avdekket under motstandstesting.

Dersom alarmtrådene er koblet riktig, vil systemet fremdeles være blind for fuktinntregninger bortforbi nærmeste lekkasjedeteksjon [97]. Dette gjelder fram til rørseksjonen med fuktutslag graves opp og utbedres. Dersom utslaget på alarmtrådene er en falsk positiv, vil det være kostbart å rette opp i, og det vil hindre deteksjon av faktiske bortenforliggende utslag. Denne begrensingen skyldes prinsippene metoden baserer seg på. Gitt korrekt installasjon, er det derfor lite som kan utbedres på annet vis enn å forebygge fuktinntregning, gjennomføre hyppigere vedlikehold, eller å anvende en annen deteksjonsmetode. inntregning inntregning

Det at alarmtrådene er bakt inn i isolasjonen er en stor fordel med tanke på enkelhet ved installasjon, men det utgjør også en av de største ulempene ved teknologien. Alarmtrådene kan som følge av termisk ekspansjon ryke og miste sin funksjon. Dette fører til at mye av vedlikeholdet som gjøres er korrigerende, og en av de større ulempene med korrigerende vedlikehold er at tidsrammene er uforutsigbare. Det kan risikeres at vedlikeholdstiltak må utføres under svært ugunstige forhold, eksempelvis forhold der hvor det er utfordrende å motvirke fuktinntregning, og hvor installasjon må foregå under anbefalte temperaturgrenser. Disse feilene kan igjen føre til nye lekkasjer. Grunnet dette, er det undersøkt alternative metoder som kan supplere alarmsystemet der det mangler.

4.2.2 Alternative metoder

Gjennom litteratursøket ble det undersøkt flere ulike metoder for både fukt- og lekkasjedeteksjon i medierør. Fra kartleggingen av fjernvarmenettverket i Trondheim ble det avdekket en rekke begrensninger og krav som deteksjonsmetoder må forholde seg til, noe som innsnevret utvalget aktuelle metoder betraktelig.

En deteksjonsmetode må ta hensyn til at fjernvarmenettet er et lukket system. Dette medfører at teknologier som baserer seg på prober eller deteksjonsutstyr som farer med vannstrømmen, ikke enkelt kan introduseres og fjernes fra rørsystemet. Deteksjonsmetodene må også ta hensyn til de høye temperaturene nettet driftes ved. For enkelte deteksjonsmetoder er driftstemperaturer opp mot 120°C en fordel, og for andre blir temperaturen et problem, særlig med tanke på elektronikk. Den mest utslagsgivende begrensningen er at medierørene er gjemt under isolasjon, og i tillegg at fjernvarmerørene er begravd under bakken. De fleste NDT-metoder krever en viss grad av tilkomst til godset, og ofte tilgang til begge sider av godset [98]. Dette gjør de fleste tradisjonelle NDT-metoder uegnet til omfattende tilstandskontroll av nedgravde fjernvarmerør.

Metodene som er presentert i kapittel 2 ble undersøkt nærmere, grunnet at de i størst grad er kompatibel med driftsbetingelsene i Trondheim. Disse metodene er hverken avhengig av montasje av nye komponenter, eller tilkomst til fjernvarmerørene for å kunne samle inn informasjon om rørets tilstand. Alle metodene anvender teknologi som på hvert sitt vis avdekker parametere ved det underliggende fjernvarmerøret. Det har blitt vektlagt at metodene skal kunne gi en komplett tilstandskontroll av hele nettet i Trondheim, samt at de til en viss grad er kommersialiserte.

Non-contact magnetometric diagnostics

NCMD kan gi en nøyaktig indikasjon på posisjonen til eventuelle diskontinuiteter på det nedgravde røret, hvorpå nevnte diskontinuiteter kan skyldes korrosjon som følge av fuktinntrengning, eller hull på røret som har ført til lekkasjer. Metoden kan klassifisere alle deteksjoner etter alvorlighetsgrad, for å skille signaler med høy konfidens fra støy. Fra utprøvelsen på Heimdal ble det gitt 50 utslag på et totalt 217 meter langt måleområde [68].

Teknologien er svært sensitiv for forstyrrelser. Forstyrrelser er vanskelig å unngå i et tettbebygget område som Trondheim. Overhengende strømkabler, nedgravde rør og strømkabler, samt metallobjekter både over og under bakken forstyrrer signalet. I tillegg til å forstyrre faktiske signaler, er disse faktorene også med på å gi falske positive. Kombinert med at Trondheim har en total rørtrasé på 260 km [3], og at det maksimalt kan dekkes 3 km på en dag, gjør denne metoden svært arbeidsintensiv. En faktor er hvilke data metoden samler inn, men en annen viktig faktor er hvor mye som må til for å samle inn data. Utbyttet er viktig når det er store strekninger. Hvis metodens potensiale skal utnyttes fullt, må alle de seks stegene for utførelse gjennomføres. En fullstendig utnyttelse innebærer at rørtraseen må lokaliseres med radioutstyr, også må en rekke undersøkelser med ulike instrumenter og begrensninger utføres, og til slutt må større mengder data tolkes.

NCMD er totalt sett en svært arbeidsomfattende og tidkrevende deteksjonsmetode. Dens sensitivitet for trivielle forstyrrelselementer gjør at den gir mange irrelevante utslag som fremdeles må tolkes. Den har begrensninger på dybden den kan måle, som medfører at deler av fjernvarmenettet ligger utenfor tilfredsstillende deteksjonsevne. På en annen side vil metoden

nokså presist kunne bestemme posisjonen til avvik, den kan utføres over bakken, og den påvirkes ikke av hvorvidt nettet er i drift eller ikke. Værforhold påvirker metodens ytelse i liten grad. I tillegg er den blitt utprøvd i felten, som betyr at funksjonaliteten er grunnet fra representative forhold, og ikke bare laboratorieforsøk. Det er vanskelig å argumentere for at det er fordelaktig å implementere denne metoden i Trondheim.

Jordgjennomtrengende radar

GPR vil gi utslag på nedgravde objekter ligger over eller ved siden av fjernvarmerørene. Befaring II i Turistveien viste et eksempel på fremmedlegemer under bakken som ville gitt utslag på GPR-målingene. Som Figur 19 viser, ligger det flere rør i den samme grøften som Statkraft sine tur- og returrør. Disse rørene, som ikke har noe med fjernvarmerørene å gjøre, ligger i tillegg øverst i grøfta, og ville overdøvet ekkosignalene til de underliggende fjernvarmerørene betydelig. GPR har lav deteksjonsgrad av lekkasjer i naturlig våt grunn, eller i grunn som er mettet med vann fra en lenge pågående lekkasje [70]. Som statistikken fra Trondheim kommune viste [25], vil Trondheim i løpet av et år oppleve betydelige megder nedbør gjennom året. Klimaet gjør at andelen dager i året hvor GPR-målinger kan utføres til sitt fulle potensial er lav. Metoden er i liten grad utprøvd i felt på nedgravde fjernvarmerør. Det vil altså kreve arbeid fra Statkraft eller andre aktører for å utarbeide en god metode for anvendelse av teknologien. For denne metoden vil det også være arbeidskrevende å dekke hele fjernvarmenettet, da den krever at en operatør plasserer senderantennen på bakken for en måling, for så å flytte den videre for hver nye måling langs traseen.

Sett i lys av begrensningene, har GPR likevel potensiale til bruk for lekkasjedeteksjon i nedgravde fjernvarmerør, men det er forbeholdt at metodikken og anvendelsen av teknologien modnes, samt at fjernvarmenettet er i et klima hvor det ikke er fuktig grunn omkring rørene.

Termografi med drone

Termografi med drone trenger hverken tilgang til rør eller bakken for å utføre tilstandskontroll. Fordeler ved dette er at forstyrrelsen av bymiljøet ved målinger elimineres, og mengden manuelt arbeid blir minimal. Høye temperaturforskjeller mellom fjernvarmevannet og omgivelsene gjør at lekkasjer gir sterke signaturer i målingene. Det vil også være mulig å detektere varmetap og fuktinntrengning grunnet dårlig isolasjon, dersom nok varme absorberes av omgivelsene. Det betyr at metoden kan bygge opp under forebyggende vedlikehold. Store deler av et fjernvarmenettverk kan dekkes på relativt kort tid, da bygninger, gjerder og andre omkringliggende legemer ikke vil være til hinder. I tillegg vil økt høyde over bakken tillate økt dekningsgrad av bakken per måling. Metoden er tilpasningsdyktig til eksisterende infrastruktur, og fleksibel for utbygging, ettersom den vil kunne overvåke gamle rør på lik linje med nylagte.

Det at teknologien utnytter varmesignaturer som middel til å detektere lekkasjer, har imidlertid flere ulemper knyttet til seg. Disse ulempene er latente til teknologien bak termografi, og vil påvirke ytelsen til deteksjonsmetoden uavhengig av om bruken er håndholdt eller luftbåren. Et termokamera vil detektere alle signaturer innenfor temperaturområdet det er kalibrert for. Når det er større områder som dekkes, vil dette gi mye data og flere signaturer som kan tolkes som en lekkasje. Temperaturdifferansene mellom lekkasjer av fjernvarmevann og omgivelsene kan potensielt bli svært store, slik at en lekkasje vil skille seg ut fra omkringliggende signaturer. Det

må likevel vies mye oppmerksomhet til behandling og tolkning av innhentet data. Sortering av signaturer vil kreve kjennskap til området og rørtraseen som overvåkes, samt styrker og svakheter ved termografi. Teknologien er godt utviklet, men databehandlingsevnene av informasjonen som teknologien fremlegger henger bakpå. I senere tid har metoder for effektivisert rutevalg og autonomitet i databehandlingen blitt vektlagt, og databehandlingsteknologien utvikles stadig [82]. Problematikken ved databehandling har trolig vært en av hovedgrunnene til at termografi ikke er blitt utbredt for lekkasjedeteksjon av større seksjoner av fjernvarmenett.

Overflyvningene gir et øyeblikksbilde av tilstanden til nettet, og vil dermed kreve flere overflyvninger for å observere endringer. Alarmtrådene som er i bruk i dag, gir kontinuerlig overvåkning, og kan gi umiddelbare utslag for fukt etter det er kommet i kontakt med alarmtrådene. For å øke konfidensen i utslagene, bør det utføres jevnlig overflyvninger som tillater observasjon av endringer og trender i fjernvarmenettet.

Alle overnevnte faktorer skygges av den negative påvirkningsgraden enkelte værforhold har på virkningsgraden til teknologien. Termografi avhenger av å detektere kontraster og endringer i emisjonsintensitet til termisk stråling fra bakken. Dette fungerer best i forhold hvor bakken over rørene er tørr og bar. Hvorvidt dette er normalen eller unntaket, avhenger av når på året og hvor i verden målingene finner sted. Gitt at disse forholdene er oppfylt, må det fremdeles tas hensyn til når på døgnet målingene tas. Dersom bakken bestråles av sol, vil det først og fremst kunne reflektere stråling fra sola, men bakken i seg selv vil også bli oppvarmet. De beste målingene oppnås når det er størst temperaturforskjell mellom bakken over en lekkasje, og omgivelsene rundt. Målinger bør derfor utføres like før soloppgang, da bakken har fått mest mulig tid til å kjøle seg ned, og ved temperaturer omkring 0°C. En annen betingelse som må oppfylles for å kunne se kontrast mellom lekkasjer og omgivelsene, er at traseene er i drift, altså at varmt fjernvarmevann gjennomstrømmer rørene. Dette kan bli problematisk i varmere strøk, hvor sesongen med oppvarmingsbehov er kort. Vær og varmebehov er sammenkoblet, noe som i dette tilfellet er en lite ideell kombinasjon. Ønket om å redusere driftstemperaturene i fjernvarmeanlegget vil kunne redusere virkningsgraden til denne metoden.

Dronebasert termografi er bedre egnet enn fly og helikopter, da sistnevnte krever mer ressurser og infrastruktur enn en drone. En drone kan fly lavere, da den er mer manøvrerbar og mindre sjenerende med tanke på støy og rotorvind. Det at dronen kan flys lavere gjør overflyvninger mindre påvirkelige av skydekket, noe som betyr at det vil være dager hvor dronen kan fly, men ikke fly og helikopter. Manøvrerbarheten til dronen tillater operatøren å enkelt følge en rørtrasé i ønsket tempo. Det reduserer mengden data som må behandles etter hver overflyvning. I norden har det de siste årene dukket opp flere selskap som tilbyr fullstendige termografiske inspeksjonstjenester av fjernvarmerør med droner. Tjenesten inkluderer planlegging, anskaffelse av tillatelser, overflyvninger og databehandling [77, 82]. Stakraft trenger kun å supplere bedriften med linjekart som gir info om hvor dronen skal fly [77]. Databehandlingen er delvis automatisert, og fremstillingen av funnene kan fremlegges på et intuitivt vis, hvor bildene fra dronen samles til en mosaikk som legges over linjekartet, slik at signaturer kan korreleres mot fjernvarmenettet. Registreringen av potensielle feil gjøres automatisk, og både bedrift og Statkraft kan gå over for å evaluere funnene [82]. Under rette forhold, evner dronen å detektere konturen av fjernvarmerør i en trasé uten at hverken fuktinntrengning eller lekkasje hadde funnet sted [99]. Når linjekart og mosaikken med termisk data legges over hverandre, vil avvik mellom linjekart og faktisk utlagt nett avdekkes. Funn av slike avvik vil bidra til å forbedre informasjonen om nettet i SmallMap. Dette forenkler fremtidige tilvirkninger på det aktuelle rørstrekket, ved å minimere sannsynligheten for at det graves feil.

Kostnadsomfanget av å benytte seg av en slik tjeneste er todelt. Den initielle planleggingen med søknader om tillatelser, rutevalg og annet forberedelsesarbeid, medfører den største enkeltkostnaden [99]. Initieringsfasen kan bli lang og krevende, grunnet hvor omfattende fjernvarmenette er i Trondheim. Etter initiell planlegging og første overflyvning, vil kostnaden av påfølgende flyvninger basere seg på en kilometerpris [99]. Det er en fordel å gjennomføre flere flyvninger slik at endringer kan observeres, og med en programvare som tillater sammenligning av overflyvninger, vil klassifiseringsarbeidet effektiviseres. Det fremkom ingen konkrete verdier for hva implementeringen av metoden vil koste. Implementeringen vil kunne eliminere mange av dagens utgifter fra driftsavbrudd og vedlikehold, som jo skyldes manglende overvåking. Det må dermed gjøres en avveining om hva som er viktigst for Statkraft.

Dersom termografisk tilstandskontroll med drone skal implementeres i Trondheim, må det tas en rekke hensyn. Klimaet i Trondheim vil by på utfordringer i form av andelen dager i året det kan gjennomføres overflyvninger. Trondheim har kalde vintre og mye nedbør [24, 25]. Det betyr at det i en betydelig andel av året enten er ugunstige temperaturer, våt eller snødekt grunn, noe som forringer eller umuliggjør gode målinger. I lengre perioder med gunstig vær vil det være mulig å dekke store deler av nettet, om ikke hele, men dette kan være en uforutsigbar fremgangsmåte. Alternativt kan det samkjøres med de eksisterende metodene for tilstandskontroll. Steder hvor alarmtråder er blitt koblet feil, eller av andre grunner ikke er operative, kan dronen brukes til overvåking. Dette er en mindre ressurskrevende anvendelse enn å sikte mot full dekningsgrad, gitt at områdene som ikke overflys har et allerede fungerende alarmsystem. Slik vil hele nettverket dekkes en av de to metodene.

4.2.3 Valg av metode

Ingen av de alternative metodene kan i dag fullstendig overta rollen til alarmtrådene. Alarmtrådene opplever lite støy, gir kontinuerlig overvåking, er enkle i bruk og har potensial til å dekke store deler av rørrnettverket uten betydelig arbeidskraft og kostnader. Den begrenses heller ikke av vær eller fysiske hindringer på overflaten over rørene, slik flere av de alternative metodene gjør. Den har likevel en rekke svakheter som gjør at den i dag ikke evner å overvåke hele rørrnettverket til Statkraft. Termografi med drone har komplimenterende egenskaper til den allerede eksisterende metoden, og blir derfor vurdert som et godt supplement. Dette er fordi det er en ikke-intrusiv, ukomplisert og effektiv metode, som både kan bidra til forebyggende og korrigerende vedlikehold av fjernvarmenettet i Trondheim. Dermed økes også overvåkningsdekningen til alarmtrådene ettersom det blir færre fuktige punkt i rørstrekkene som hindrer deteksjon av bakenforliggende fukt. Metoden er utprøvd i felt, og det eksisterer bedrifter i Norge og Skandinavia ellers som tilbyr tjenesten. NCMD og GPR krever store mengder manuelt arbeid, opplæring til bruk av instrumenter og tolkning av resultater, og er sensitive for støy som gjør det krevende å skille mellom lekkasje og fremmedlegeme. Termografi derimot, utnytter det som gjør fjernvarmerør særskilte i bymiljøet, nemlig det at de driftes ved temperaturer som ikke går igjen mange andre steder. Databehandlingen er delvis automatisert, og funn kan fremstilles på en oversiktlig og intuitiv måte. Metoden vil med flere overflyvninger muliggjøre deteksjon av endringer over tid, noe som sorterer ut varmesignaturer som på et enkeltbilde kunne blitt feilaktig tolket som en lekkasje.

Implementering av termografi med drone i Trondheim vil trolig ta litt tid, og vil sannsynligvis innebære en potensielt høy initiell kostnadsramme. Innføringen vil ikke påvirke eksisterende

traseer, samtidig som den er kompatibel med fremtidige traseer. Med evnen til å detektere fukt, forbedre kartdata og utføre overflyvninger jevnlig, har metoden potensiale til å rettfærdiggjøre den initiale investeringen. Både drone- og automasjonsteknologi har forbedret seg mye de siste årene, og vil sannsynligvis forbedres videre i fremtiden, i takt med utviklingen av elektronikk og maskinlæring. Termografi har nevneverdige begrensninger tilknyttet vær, men dens kompatibilitet med eksisterende metoder for tilstandskontroll vil kunne veie opp for dette.

4.3 Feilkilder

Resultatene i denne rapporten er i stor grad basert på intervju og samtaler med ulike personer i Statkraft. Informasjonsinnhenting fra felt og gjennom direkte observasjoner fra planlegging, installasjon, drift og vedlikehold ville lagt en ekstra tyngde til resultatene, men grunnet tidsbegrensningen for prosjektet ble ikke dette mulig. Informasjonen som er anskaffet er likevel hentet fra personene som er ansvarlig for feltene, noe som belyses i rapporten, og de er derfor ansett å være gode kilder til erfaringer tilknyttet installasjon og vedlikehold. Det må likevel tas med i betraktning at resultatene kan være mer subjektive enn de ville vært gjennom direkte observasjoner. De observasjonene som ble gjort under befaringene ved Solsletta og Turistveien ble ikke ansett å være tilstrekkelig til å gjøre antagelser for hele fjernvarmeanlegget i Trondheim.

4.4 Videre arbeid

For å øke forståelsen for muffenes svakheter, vil det være nyttig å gjennomføre tester for mekanisk styrke og vanntetning av ulike typer muffen ved ulike installasjons- og driftsforhold. For å avklare fordeler og begrensninger ved bruk av enten flytende skumblanding eller rørskåler kan det være interessant å undersøke om de sveiste hullene på kappen er spesielt utsatt for fuktinntrengning. Sammenlignende statistikk for forekomsten av lekkasjer ved bruk av enten flytende skumblanding eller rørskåler, vil også gi verdifull informasjon. Gjennom intervju har det kommet fram at ventiler og rør i kummer har vært spesielt utsatt for rustangrep, ettersom at vann ofte kommer inn[88]. Materialvalgsanalyser for de utsatte komponentene, og undersøkelse av forebyggende tiltak mot korrosjon vil ytterligere bidra til redusert vedlikehold av fjernvarmeanlegget.

5 Konklusjon

Det ble avdekket en rekke punkt for forbedringer ved dagens prosedyrer og metoder for kvalitetskontroll, vedlikehold og deteksjon av fukt- og lekkasjer i Statkrafts fjernvarmeanlegg i Trondheim.

Fuktinntrengning i muffene skyldes først og fremst utfordringer ved installasjon. Statkraft bør stille tydelige krav til kompetansen til installatører av muffe. Oppfriskningskurs kan bidra til å unngå uvaner og motvirke vranglære. Entreprenørene bør gjøres kjent med typiske kritiske feil ved installasjon, og konsekvensene av dem. Under installasjonen må tørre og rene muffe og kapper etterstrebes. Bedre værbeskyttelse vil derfor være et billig, men trolig effektivt tiltak for å bedre kvaliteten på sammenføyningene. Stikkprøving med destruktiv testing av nylig monterte muffe kan identifisere rotårsaker til fuktinntrengning, samt styrker og svakheter for de ulike typene, og typiske installasjonsfeil. Bruk av rørskåler hindrer bruk av trykktesting etter installasjon, og gjør sammenføyningen mindre motstandsdyktig mot fukttransport inn til medierøret. Om den forenklede installasjonen, gode skumkvaliteten og mangelen på sveisepropper gjør opp for dette, har det ikke blitt gjort funn på. For å hindre termisk ekspansjon, bør rørlegging ved lave temperaturer unngås. Stabile, men også lave driftstemperaturer vil være det mest effektive tiltaket for å unngå rask degradering av PUR-skummet.

For å sikre kvaliteten på sammenføyning av rør må standarden EN 13941-2 følges systematisk. Samsvar med standarden vil være en viktig bidragsyter i å opprettholde et godt CMS. Videre kan det understrekes at SAP er tilrettelagt for å fasiliterer en bedrifts CMS, og vil ved innføring bidra til å sikre bedre vedlikeholdsstyring. Statkraft bør ha økt fokus på dokumentering og rapportering gjennom SAP og SmallMap. Gjennom dokumentering kan det oppdages og ta lærdom av feil, samt samle verdifull data og statistikk. Det vil også bidra til å sikre tilstrekkelig flyt av informasjon og erfaringer mellom installasjon og drift. Statkraft bør håndtere rotårsak til lekkasje, fremfor å kontinuerlig rette opp i symptomer som trådfeil, fukt og lekkasjer.

Fortsatt bruk av alarmtråder, med supplering av dronetermografi vil trolig være den best egnede løsningen for Statkraft. Alarmtrådene gir god overvåkning i de delene av nettet de har dekning. Termografi vil bidra til å redusere antall korrigerende tiltak mot lekkasjer, og i tillegg dekke de delene av røret hvor alarmtrådene ikke er tilstrekkelig.

Referanser

1. Statkraft Varme AS. *Trondheim* Statkraftvarme.no. <https://www.statkraftvarme.no/om-statkraftvarme/fjernvarmeanlegg/trondheim/> (29. mar. 2022).
2. Ved Statkraft Varme AS - Trondheim), Å. U. (*SV: Poster til posterkonferanse (E-mail)* 24. mar. 2022.
3. Åsmund Utne. *Oppklaringsspørsmål* 20. apr. 2022.
4. Suter, G., Cormier, S., Schofield, K., Gilliam, J. & Barbour, C. *pH* epa.gov. <https://www.epa.gov/caddis-vol2/ph#high> (26. apr. 2022).
5. Sappington, K. & Norton, S. *Temperature* epa.gov. <https://www.epa.gov/caddis-vol2/temperature> (26. apr. 2022).
6. Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. *Materials Science and Engineering* 9. ed., SI version. 905 s. ISBN: 978-1-118-31922-2 (Wiley, Hoboken, 2015).
7. Bardal, E. *Korrosjon og korrosjonsvern* 2. utg. 337 s. ISBN: 978-82-519-1173-3. https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2008010300047 (Tapir, Trondheim, 1994).
8. Koch, G. *mfl. International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study* mar. 2016. <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>.
9. Petrovic, Z. Catastrophes Caused by Corrosion. *Vojnotehnicki glasnik* **64**, 1048–1064. ISSN: 0042-8469. <http://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=0042-84691604048P> (29. mar. 2022) (2016).
10. Groysman, A. *Corrosion for Everybody* 368 s. ISBN: 978-90-481-3477-9. <http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3477-9> (25. apr. 2022) (Springer Netherlands, Dordrecht, 2010).
11. Abayarathna, D., Ashbaugh, W., Kane, R., McGowan, N. & Heimann, B. *Measurement Of Corrosion Under Insulation And Effectiveness Of Protective Coatings* i *Proceedings of the Corrosion97* Corrosion97 (NACE International, New Orleans, 3. sep. 1997), 15. <https://onepetro.org/NACECORR/proceedings/CORR97/All-CORR97/NACE-97266/113401>.
12. Frederiksen, S. & Werner, S. *District heating and cooling* 1st. 586 s. ISBN: 978-91-44-08530-2. https://bibsys-almaprimo.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/13q4kuj/BIBSYS_ILS71472421460002201 (Studentlitteratur AB, Lund, 12. aug. 2013).
13. Statkraft Varme AS. *Om fjernvarme* Statkraftvarme.no. <https://www.statkraftvarme.no/kunnskapsenter/fjernvarme/om-fjernvarme/> (6. mar. 2022).
14. Al-Barqawi, H. & Zayed, T. Condition Rating Model for Underground Infrastructure Sustainable Water Mains. *Journal of Performance of Constructed Facilities* **20**, 126–135. ISSN: 0887-3828. <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%290887-3828%282006%2920%3A2%28126%29> (15. mai 2022) (1. mai 2006).
15. Tereshchenko, T. & Nord, N. Importance of Increased Knowledge on Reliability of District Heating Pipes. *Procedia Engineering* **146**, 415–423. ISSN: 1877-7058. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581630889X> (8. apr. 2022) (1. jan. 2016).
16. Statkraft Varme AS. *Varme i over 100 år* Statkraftvarme.se. <https://www.statkraftvarme.se/no/om-statkraftvarme/Historie/> (20. apr. 2022).

-
17. Statkraft Varme AS. *Fjernvarmeanlegg* Våre anlegg. <https://www.statkraftvarme.no/om-statkraftvarme/fjernvarmeanlegg/> (3. mai 2022).
 18. Statkraft Varme AS. *Hva skjer på Heimdal varmesentral* Statkraftvarme.no. <https://www.statkraftvarme.no/kunnskapscenter/barekraft/hva-skjer-pa-heimdal-varmesentral/> (6. mar. 2022).
 19. Norsk Fjernvarme. *Energikilder Trondheim* Fjernkontrollen. <https://www.fjernkontrollen.no/trondheim/> (20. apr. 2022).
 20. Gadd, H. & Werner, S. Achieving Low Return Temperatures from District Heating Substations. *Applied Energy* **136**, 59–67. ISSN: 0306-2619. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914009696> (14. mai 2022) (31. des. 2014).
 21. Statkraft Varme AS. *Fjernvarme* aug. 2010. https://www.statkraftvarme.no/globalassets/old-contains-the-old-folder-structure/documents/faktaark_tcm84-14828.pdf (20. mar. 2022).
 22. Dannevig, P. i *Store norske leksikon* (17. mar. 2020). http://snl.no/Tr%C3%B8ndelag-_klima (14. mai 2022).
 23. Mamen, J. i *Store norske leksikon* (18. mai 2021). http://snl.no/K%C3%B6ppens_klimaklassifikasjon (14. mai 2022).
 24. *Historiske værdata for Trondheim* i samarbeid med Meteorologisk institutt & NRK. Yr.no. <https://www.yr.no/nb/historikk/graf/1-211102/Norge/Tr%C3%B8ndelag/Trondheim/Trondheim?q=siste-13-m%C3%A5neder> (5. apr. 2022).
 25. Nøst, T. *Vannovervåkning i Trondheim 2019* (Trondheim Kommune, Trondheim, 15. apr. 2022), 168. <https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/miljoenheten/naturforvaltning/vannovervaking---rapporter/vannovervaking-i-trondheim-2019---resultater-og-vurderinger.pdf> (5. apr. 2022).
 26. *Klima av Trondheim: Vanntemperatur, Temperaturer, klima grafer, klima tabeller for Trondheim* - *Climate-Data.org* Climate-Data.org. <https://no.climate-data.org/europa/norge/s%C3%B8r-tr%C3%B8ndelag-fylke/trondheim-707/> (5. apr. 2022).
 27. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR Product Catalogue 2022*. <https://www.logstor.com/media/7319/kingspan-logstor-product-catalogue-specifications-en-eur.pdf> (4. apr. 2022).
 28. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *Entreprenører Kingspan*. LOGSTOR. <https://www.logstor.com/dk/fjernvarme/forretningspartnere/entreprenorer/> (16. mai 2022).
 29. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR Single pipes 2022*. <https://www.logstor.com/media/7262/kingspan-logstor-design-manual-single-pipes-specifications-da-eur.pdf> (28. mar. 2022).
 30. Nilsson, S. F. i *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems* (red. Wiltshire, R.) 191–214 (Woodhead Publishing, Oxford, 1. jan. 2016). ISBN: 978-1-78242-374-4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423744000094> (1. apr. 2022).
 31. Kellner, J. & Dirckx, V. Change of thermal conductivity of polyurethane pre-insulated pipes as a function of time. *Euroheat & Power Fernwärme International* **28**, 44–49. ISSN: 0949-166X. <https://silo.tips/download/summary-change-of-thermal-conductivity-of-polyurethane-pre-insulated-pipes-as-a> (29. apr. 2022) (6. jan. 1999).
-

-
32. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *Product Catalogue District Energy* 3. mai 2020. <https://www.logstor.com/media/6506/product-catalogue-uk-202003.pdf> (29. apr. 2022).
 33. Olsson, M., Jarfelt, U., Fröling, M. & Ramnäs, O. The Polyethylene Casing as Diffusion Barrier for Polyurethane Insulated District Heating Pipes. *Cellular Polymers* **20**, 37–48. ISSN: 0262-4893. <https://doi.org/10.1177/026248930102000103> (5. apr. 2022) (1. jan. 2001).
 34. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR Installation Manual for Weld Joints* 2022. <https://www.logstor.com/media/7219/kingspan-logstor-installation-manual-for-weld-joints-user-installation-guide-en-eur.pdf>.
 35. *Veileder: Vannkvalitet* Norsk Fjernvarme. <http://www.fjernvarme.no/fakta/veileder-vannkvalitet> (3. mai 2022).
 36. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR Design Twinpipes* 2022. <https://www.logstor.com/catalogues-and-documentation?lang=1737> (5. apr. 2022).
 37. Oppdatert, P. *Kjemiske og fysiske stoffer i drikkevann* fhi.no. [https://www.fhi.no/nettpub/stoffer-i-drikkevann/kjemiske-og-fysiske-stoffer-i-drikkevann/](https://www.fhi.no/nettpub/stoffer-i-drikkevann/kjemiske-og-fysiske-stoffer-i-drikkevann/kjemiske-og-fysiske-stoffer-i-drikkevann/) (26. apr. 2022).
 38. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR Shrink Joint System: SX-WP Joint* 2018. https://www.logstor.com/media/6870/logstor_sx-wp_brochure_en_2018_new.pdf (4. apr. 2022).
 39. Andrenacci, A. & Wong, D. *Evaluation of Buried Pipeline Coatings Under Soil Stress* i. CORROSION 2012 (OnePetro, 11. mar. 2012). <https://onepetro.org/NACECORR/proceedings/CORR12/All-CORR12/NACE-2012-1234/119884> (6. mai 2022).
 40. Daniel Frantzen. *Fjernvarme og fjernkjøling, del tema: FV03 "Distribusjonssystemer"* Energiomlegging en kompetanseutformingBergen. 27. nov. 2012. <https://docplayer.me/3978354-Energiomlegging-en-kompetanseutfordring-kursserie-i-regi-av-varmeforum.html> (18. apr. 2022).
 41. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR Handling and Installation* 21. mar. 2022. <https://www.logstor.com/media/7215/kingspan-logstor-handling-and-installation-manual-user-installation-guide-en-eur.pdf> (3. mai 2022).
 42. i. *Handbook of Plastic Joining* (red. Troughton, M. J.) 2. utg. (William Andrew Publishing, Boston, jan. 2009). ISBN: 978-0-8155-1581-4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515814500196> (1. apr. 2022).
 43. Van der Stok, E. *QUALITY CONTROL OF JOINT INSTALLATION IN PRE-INSULATED PIPE SYSTEMS* i *Akademisk artikkelsamling fra 14th International Symposium on District Heating and Cooling* The 14th International Symposium on District Heating and Cooling (Kiwa Technology, Stockholm, 9. sep. 2014), 8. <https://www.kiwa.com/4ad67c/globalassets/netherlands/kiwa-technology/downloads/12.3-ernst-van-der-stok-quality-control-of-joint-installation-in-preinsulated-pipe-systems.pdf>.
 44. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR Weldable joint for pre-insulated pipe systems* 20. aug. 2010. https://www.logstor.com/media/6834/ew-joint_en_p_dh-dc-og.pdf (4. apr. 2022).
 45. ASM International & ASM International Handbook Committee. *Engineered Materials Handbook, Desk Edition* Desk. 1313 s. ISBN: 978-0-87170-283-8. Google Books: Cbk5n7Ny4asC (ASM International, Materials Park, nov. 1995).
-

-
46. Shi, J., Zheng, J., Guo, W. & Qin, Y. Defects Classification and Failure Modes of Electrofusion Joint for Connecting Polyethylene Pipes. *Journal of Applied Polymer Science* **124**, 4070–4080. ISSN: 1097-4628. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.35013> (20. apr. 2022) (2012).
 47. Sällberg, S.-E., Nilsson, D. S. & Bergström, G. *Leakage ways for ground-water in PUR-foam* i *Proceedings of the 10th International Symposium on District Heating and Cooling* 10th International Symposium on District Heating and Cooling (SP Swedish National Testing and Research Institute, Reykjavik, 9. mai 2006), 10. http://www.lsta.lt/files/events/31_saellberg.pdf.
 48. Banushi, G. *mfl.* Durability of District Heating Pipelines Exposed to Thermal Aging and Cyclic Operational Loads. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* **12**, 04020067. ISSN: 1949-1204. <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29PS.1949-1204.0000521> (29. apr. 2022) (1. feb. 2021).
 49. Olsson, M. E., Jarfelt, U., Mangs, S. & Ramnäs, O. Diffusion of Cyclopentane in Polyurethane Foam at Different Temperatures and Implications for District Heating Pipes. *Journal of Cellular Plastics* **38**, 177–188 (1. mar. 2002).
 50. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR District Heating Pipe Systems* 9. jun. 2010. https://www.logstor.com/media/6857/pipe-technology_en_p_dh.pdf.
 51. Vega, A., Yarahmadi, N., Sällström, J. H. & Jakubowicz, I. Effects of Cyclic Mechanical Loads and Thermal Ageing on District Heating Pipes. *Polymer Degradation and Stability* **182**, 109385. ISSN: 0141-3910. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391020303153> (28. apr. 2022) (1. des. 2020).
 52. Vega, A. *Degradation mechanisms and long-term performance of PUR insulation in district heating pipes* Thesis for the degree of Licentiate of Engineering (Chalmers University of Technology, Göteborg, 2018). 40 s. <https://core.ac.uk/download/pdf/198030228.pdf> (29. apr. 2022).
 53. Kim, J., Kim, Y. S., Kim, H.-g. & Yoon, J. Effect of Operating Temperature Conditions in 21-Year-Old Insulated Pipe for a District Heating Network. *Case Studies in Thermal Engineering* **27**, 101265. ISSN: 2214-157X. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21004287> (29. apr. 2022) (1. okt. 2021).
 54. *NS-EN 13941-2:2019+A1:2021* Standard (European Committee for standardization, 28. mar. 2022), 96. <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1397620> (5. mar. 2022).
 55. Nikolopoulos, K., Metaxiotis, K., Lekatis, N. & Assimakopoulos, V. Integrating industrial maintenance strategy into ERP. *Industrial management & data systems* **103**, 184–191. ISSN: 0263-5577 (2003).
 56. Klos, S. & Patals-Maliszewska, J. The impact of ERP on maintenance management. *Management and Production Engineering Review* **4**, 15–25. <https://bibliotekanauki.pl/articles/407072> (12. mai 2022) (2013).
 57. Matende, S. & Ogao, P. Enterprise Resource Planning (ERP) System Implementation: A Case for User Participation. *Procedia Technology. CENTERIS 2013 - Conference on ENTERprise Information Systems / ProjMAN 2013 - International Conference on Project MANagement/ HCIST 2013 - International Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies* **9**, 518–526. ISSN: 2212-0173. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313002120> (12. mai 2022) (1. jan. 2013).
-

-
58. Davenport, T. H. Putting the Enterprise into the Enterprise System. *Harvard Business Review*. ISSN: 0017-8012. <https://hbr.org/1998/07/putting-the-enterprise-into-the-enterprise-system> (27. apr. 2022) (1. jul. 1998).
 59. Hypher, O. Standardløsning for SAP® nå på plass i Tyrkia: Felles IT-løsning på tvers av landegranser, 2. <https://nttdata-solutions.com/no/success-stories/statkraft/> (28. apr. 2022) (feb. 2016).
 60. Hagen, J. A. & Weiseth, A. E. *Oppklarings spørsmål* 5. nov. 2022.
 61. Singh, G. *Top SAP Modules List in 2022 [SAP FI, SAP CO, SAP SD, SAP HCM and More]* Course News Daily. <https://coursenewsdaily.com/top-sap-modules/> (5. mai 2022).
 62. LOGSTOR Denmark Holding ApS. *LOGSTOR Detetct: Surveillance Handbook 2022*. <https://www.logstor.com/media/7220/kingspan-logstor-surveillance-handbook-specifications-en-eur.pdf> (21. feb. 2022).
 63. Skaar, J. & Sandstad, J. i *Store norske leksikon* (16. feb. 2022). http://snl.no/impedans-_elektroteknikk (28. mar. 2022).
 64. HV Technologies, Inc. *The Basics of Time Domain Reflectometry (TDR)* HV Technologies. <https://hvtechnologies.com/the-basics-of-time-domain-reflectometry-tdr/> (28. mar. 2022).
 65. Nilsson, S., Sällberg, S.-E. & Bergström, G. *Moisture Measurements with Time Domain Reflectometer (TDR) i Proceedings of the 10th International Symposium on District Heating and Cooling* 10th International Symposium on District Heating and Cooling (SP Swedish National Testing and Research Institute, Reykjavik, 5. sep. 2006), 9. https://www.lsta.lt/files/events/37_nilsson.pdf.
 66. everything RF. *What is a Time Domain Reflectometer (TDR)? - everything RF* everythingRF.com. <https://www.everythingrf.com/community/what-is-a-time-domain-reflectometer> (7. apr. 2022).
 67. Dubov, A. & Kolokolnikov, S. Assessment of the Material State of Oil and Gas Pipelines Based on the Metal Magnetic Memory Method. *Welding in the World* **56**, 11–19. ISSN: 1878-6669. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF03321331.pdf> (1. mar. 2012).
 68. Heimtoft, C. *Final Report of District Heating Underground Pipeline Inspection Field Trial Utilising Non-Contact Magnetometric Diagnostics (NCMD) at Trondheim* (Statkraft Varme AS, Trondheim, sep. 2021), 53.
 69. Dubov, A., Dubov, A. & Kolokolnikov, S. *Technical Diagnostics of Underground Pipelines Based on Non-Contact Magnetometric Diagnostics, the Metal Magnetic Memory Method and Conventional NDT Methods i 3rd International Conference on Diagnostics of Structures and Components Using Metal Magnetic Memory Method* 3rd International Conference on Diagnostics of Structures and Components Using Metal Magnetic Memory Method (Energodiagnostika Co. Ltd., Praha, 23. mai 2018), 5. https://www.ndt.net/article/mmm-ndt-2019/papers/09_Technical_diagnostics_of_underground_pipes_based_NCMD_en.pdf.
 70. Eyuboglu, S., Mahdi, H. & Al-Shukri, H. *Detection of Water Leaks Using Ground Penetrating Radar* (University of Arkansas at Little Rock, Little Rock, Arkansas, USA, 3. mar. 2004), 17. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.553.8326&rep=rep1&type=pdf> (27. apr. 2022).
 71. Yaw, K. C. *Measurementt of Dielectric Material Properties - Application Note* 23. mai 2012. https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/00aps_undefined/RAC-0607-0019_1_5E.pdf (28. apr. 2022).
-

-
72. Abouhamad, M., Zayed, T. & Moselhi, O. *Leak Detection in Buried Pipes Using Ground Penetrating Radar - A Comparative Study i Pipeline 2016: Out of Sight, Out of Mind, Not Out of Risk* Pipelines 2016 (Kansas City, 20. jul. 2016), 8. <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/9780784479957.039> (27. apr. 2022).
 73. Holtebekk, T. i *Store norske leksikon* (21. aug. 2021). http://snl.no/infrar%C3%B8d_str%C3%A5ling (6. apr. 2022).
 74. Aslam, H., Mortula, M. M., Yehia, S., Ali, T. & Kaur, M. Evaluation of the Factors Impacting the Water Pipe Leak Detection Ability of GPR, Infrared Cameras, and Spectrometers under Controlled Conditions. *Applied Sciences* **12**, 1683. ISSN: 2076-3417. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1683> (12. mai 2022) (6. feb. 2022).
 75. Øyvind Lieøyvind Lie. *Varmefotograferer fjernvarmenettet fra fly* Tu.no. <https://www.tu.no/artikler/varmefotograferer-fjernvarmenettet-fra-fly/246519> (6. apr. 2022).
 76. Friman, O., Follo, P., Ahlberg, J. & Sjøkvist, S. Methods for Large-Scale Monitoring of District Heating Systems Using Airborne Thermography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **52**, 5175–5182. ISSN: 0196-2892, 1558-0644. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6656858/> (14. mai 2022) (aug. 2014).
 77. Nielsen, G. *Leak detection with drones in DH systems* Smart Heating Croatia 2021 Zagreb. 10. apr. 2021. https://www.urbandanish.solutions/heatingcroatia2021/media/uploads/cms/files/ds_leak_detection_with_drones_in_dh_systems.pdf (19. apr. 2022).
 78. Hossain, K., Villebro, F. & Forchhammer, S. UAV Image Analysis for Leakage Detection in District Heating Systems Using Machine Learning. *Pattern Recognition Letters* **140**, 158–164. ISSN: 01678655. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167865520302038> (14. mai 2022) (des. 2020).
 79. Chris Winquist. *Fortum, Advian and Gridjet improve the detection of district heating leaks using Artificial Intelligence* advian.fi. <https://www.advian.fi/en/blog/fortum-advian-and-gridjet-improve-the-detection-of-district-heating-leaks-using-artificial-intelligence> (6. apr. 2022).
 80. Ogan, R. & Paden, W. *Electrical Transmission Line Inspection Using Unmanned Aircraft i IEEE Expert 2019 SoutheastCon* (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Huntsville, 12. apr. 2019), 1–7. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9020590>.
 81. Luftfartstilsynet. *Spesifikk kategori* Luftfartstilsynet.no. <https://luftfartstilsynet.no/droner/nytt-eu-regelverk/spesifikk-kategori/> (3. mai 2022).
 82. Moss, T. *Orbiton* urbanenergi.no. <https://urbanenergi.no/utstillingsomrade/orbiton> (8. apr. 2022).
 83. Thoss, M. *Case Study for Drone Systems – with ThermalCapture Recorder 2.0* 640 thermalcapture.com. <https://thermalcapture.com/thermal-mapping-inspection-of-district-heating/> (19. apr. 2022).
 84. Termisk Systemteknik AB. *Diagnostik fjärrvärmenät* Termisk Systemteknik. <https://termisksystemteknik.se/tda-fjarrvarme-test/> (19. apr. 2022).
 85. Brinkmann, S. & Tanggaard, L. *Kvalitative metoder empiri og teoriutvikling* 1. utg. Overs. av Hansen, W. 224 s. ISBN: 978-82-05-40815-9. https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2013071908130 (Gyldendal akademisk, Oslo, 2012).
 86. *SmallMap* Smallworld Systems AS, 5. nov. 2022. <https://smallworldnordic.no/smallmap/>.
-

-
87. *Oppsummering av observasjoner og innspill fra befaring 2* i samarbeid med Dyrendahl, R. & Dueskar, R. 28. apr. 2022.
 88. *Intervju med Jon Anders Hagen og Arne Weiseth* i samarbeid med Jon Anders Hagen (Prosjektleder ved Statkraft Varme AS - Trondheim) & Arne Weiseth (Drifts- og vedlikeholdsplanlegger ved Statkraft Varme AS - Trondheim). 2. nov. 2022.
 89. Sällberg, S.-E. & Nilsson, S. F. *Durability of Shrink Joints* i *Proceedings of the 11th International Symposium on District Heating and Cooling* The 11th International Symposium on District Heating and Cooling (SP Technical Research Institute of Sweden, Reykjavik, 2. sep. 2008), 5. https://dhc2008.hi.is/session/greinar/p4_Sallberg.pdf.
 90. LeBono, J., Barton, L. & Birkett, M. Low Temperature Tensile Lap-Shear Testing of Adhesively Bonded Polyethylene Pipe. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **74**, 57–63. ISSN: 01437496. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749616302378> (13. mai 2022) (apr. 2017).
 91. Brozovsky, J., Simonsen, A. & Gaitani, N. Validation of a CFD Model for the Evaluation of Urban Microclimate at High Latitudes: A Case Study in Trondheim, Norway. *Building and Environment* **205**, 108175. ISSN: 0360-1323. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013232100576X> (6. apr. 2022) (1. nov. 2021).
 92. Gietzelt, M., Grage, T., Kahle, M. & Fernwärme-Forschungsinstitut Hannover. *Stability of PUR Insulation in Pipes for Heat- and Refrigeration-Transmission* i *Akademisk Artikkelsamling Fra 10th International Symposium on District Heating and Cooling* 10th International Symposium on District Heating and Cooling (SP Swedish National Testing and Research Institute, Reykjavik, 5. sep. 2006). <https://www.semanticscholar.org/paper/Stability-of-PUR-insulation-in-pipes-for-heat-and-Gietzelt-Grage/c1b149ef1c9d494388a6b6b0913f0ce7fd39e665> (4. mai 2022).
 93. Yarahmadi, N., Vega, A. & Jakubowicz, I. Accelerated Ageing and Degradation Characteristics of Rigid Polyurethane Foam. *Polymer Degradation and Stability* **138**, 192–200. ISSN: 0141-3910. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391017300654> (29. apr. 2022) (1. apr. 2017).
 94. Kirkegaard, K. S. & Manager, D. High Performance, Cost Effective PUR Insulation System for LNG/LPG Flowlines, 16.
 95. Statkraft Varme AS. *Innføring av feil* 2009.
 96. Fredriksson, C. *Smallmap — Smallworld Nordic* <https://www.smallworldnordic.com/smallmap/> (19. mai 2022).
 97. *Intervju med Øystein Ramsli* i samarbeid med Øystein Ramsli (Leder for drift og vedlikehold ved Statkraft Varme AS - Trondheim). 2. mar. 2022.
 98. Loland, A. & Lid, P.-A. *NDT håndboken* 536 s. (Force Technology, Sandvika).
 99. *Møte med Tomas Moss fra Orbiton* i samarbeid med Tomas Moss (Daglig leder - Orbiton). 22. apr. 2022. <https://urbanenergi.no/utstillingsomrade/orbiton>.
-