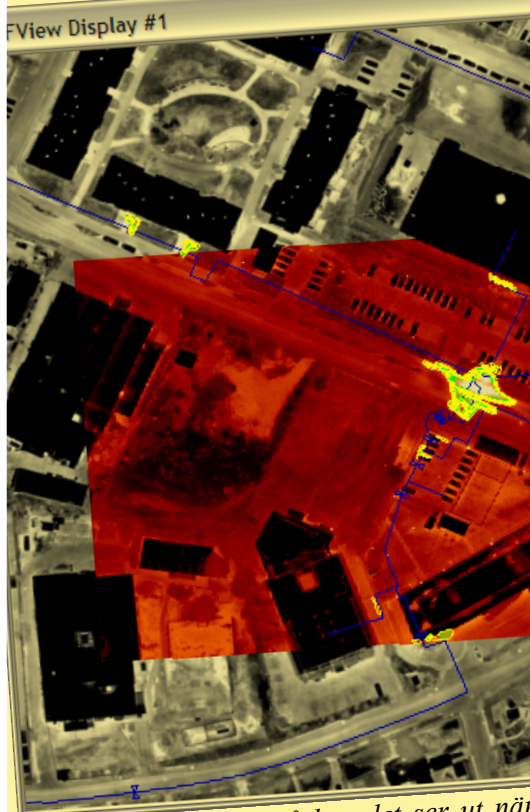


KVANTIFIERING AV VÄRMELÄCKAGE

RAPPORT 2012:17



Figur 6.18. Vänster: Exempel på resultat som ser ut som en rävning. Polygonen visar potentiella läckage.



Figur 6.19. Exempel på hur det ser ut när man zoomar in på en rävning. Den gul/gröna markeringen var ett bekräftat läckage. Den röda bilden representerar en högupplöst II-grå mosaiken.



KVANTIFIERING AV VÄRMELÄCKAGE GENOM FLYGBUREN IR-TEKNIK – EN FÖRSTUDIE

STEFAN SJÖKVIST

JOAKIM WREN

JÖRGEN AHLBERG

ISBN 978-91-7381-098-2

© 2012 Svensk Fjärrvärme AB

FÖRORD

Det här är en förstudie av de möjligheter och begränsningar som finns med flygburen IR-teknik för detektion av vatten- och energiläckage i fjärrvärmenät. Metoden har sin styrka bland annat i att kunna hantera ett helt fjärrvärmenät. Samtidigt är det viktigt att fortsatta studier reder ut de begränsningar som alltid är kopplade till nya metoder, något som annars kan leda till fel slutsatser och vara förödande ur såväl teknisk som ekonomisk synvinkel.

Projektet har genomförts av Stefan Sjökvist på Termisk Systemteknik AB, Joakim Wren på Linköpings universitet, Jörgen Ahlberg på Termisk Systemteknik AB samt professor emeritus Dan Loyd på Linköpings universitet. Projektet har också haft ett bra stöd av en mycket engagerad och kunnig referensgrupp som har bestått av Lennart Hansson och Thomas Nilsson från Göteborg Energi AB, Per Johansson från Växjö Energi AB och Mattias Moell från Vattenfall Research and Development AB.

Det här är ett projekt i forsknings- och kunskapsprogrammet Fjärrsyn som finansieras gemensamt av Energimyndigheten och fjärrvärmebranschen. Fjärrsyn ska stärka möjligheterna för fjärrvärme och fjärrkyla genom ökad kunskap om fjärrvärmens roll i klimatarbetet och för det hållbara samhället till exempel genom att bana väg för affärsmässiga lösningar och framtida teknik.

Bo Johansson
Ordförande i Svensk Fjärrvärmes tekniskråd

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att Fjärrsyns styrelse eller Svensk Fjärrvärme har tagit ställning till innehållet.

SAMMANFATTNING

Omfattande läckage av vatten och värme från fjärrvärmenät (FV-nät) är tyvärr alltför vanligt idag och förväntas öka, vilket bland annat leder till stora kostnader och helt onödig miljöpåverkan. Läckage kan exempelvis bero på att rörisoleringen har åldrats/skadats och med tiden fått försämrade egenskaper och därmed ett ökat värmeläckage, och/eller att korrosion/erosion skadat rören så att ett läckage av vatten uppstår. Eftersom en stor andel av fjärrvärmerören i Sverige är relativt gamla så är problemet i högsta grad reellt och det förväntas dessutom öka. Flera nät är idag 50 år eller äldre. Läckage kan även ske i nyare konstruktioner, t.ex. på grund av sättningar i marken eller otillfredsställande tätning av skarvar.

Det finns ett mycket stort behov av nya och förbättrade metoder för att bedöma status på fjärrvärmerör/fjärrvärmenät. Möjligheterna för bedömning av rörsystemens status, inte minst storskalig statuskontroll har fram tills helt nyligen varit mycket begränsade – man vet att rören läcker, men inte var och inte hur mycket. Metoder som bygger på förändring av elektrisk impedans eller frekvenssvar har använts och används även idag i nya rör. Erfarenheten visar dock att tillförlitligheten i många fall minskar med tiden, dels på grund av åldring av ingående material och dels beroende på förändringar i FV-nätet (t.ex. tillbyggnad och reparationer).

Flygburen IR-teknik med tillhörande stödsystem uppvisar stora möjligheter och dessutom en stor utvecklingspotential, inte minst för att metoden är oberoende av FV-rörens ålder och typ. Metoden används redan idag i viss utsträckning för att lokalisera potentiella värmeläckage. I rapporten beskrivs också det använda systemet och metoden för flygburen IR-teknik. Tidigare har metoden och erhållna resultat huvudsakligen presenterats för respektive nätägare/nätoperatör, vilket gör att ett behov finns av att presentera systemets/metodens möjligheter och begränsningar i ett vidare sammanhang.

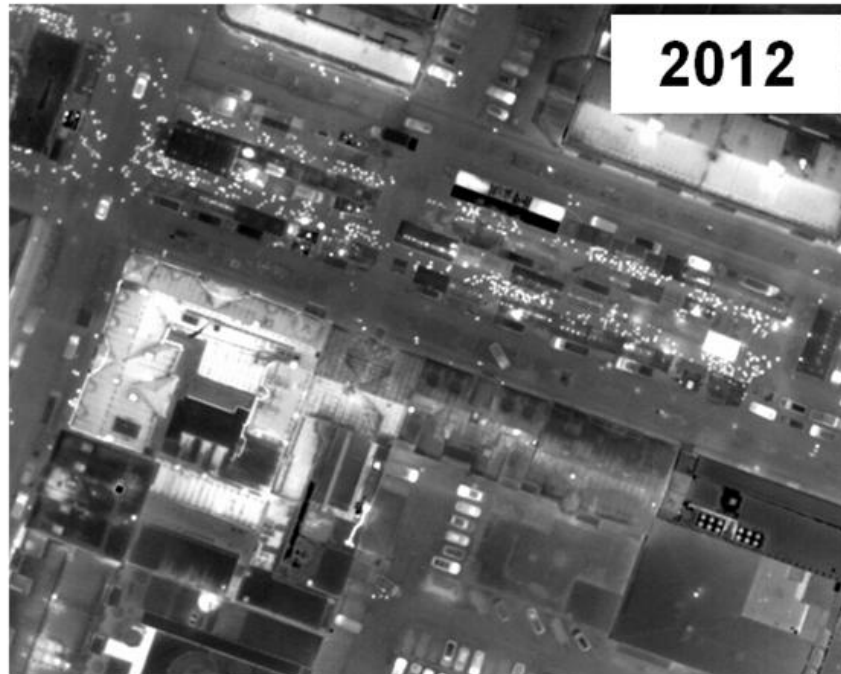
Trots att metoden med flygburen IR-teknik ännu inte är färdigutvecklad så har den visat sig vara både robust, relativt träffsäker och mycket användbar. Metoden har flera viktiga fördelar, exempelvis att stora områden kan studeras på kort tid och att temperaturen har en direkt koppling till de värme- och vattenläckage man vill kunna detektera. Lite större läckor detekteras nästan direkt oavsett var i nätet de finns, de mindre behöver först bearbetas med hjälp av någon analysmetod för att särskiljas från normala temperaturdifferenser.

Det huvudsakliga syftet med denna förstudie är att den skall utgöra grunden för ett fortsättningsprojekt i vilket metoden för detektion av värmeförluster/värmeläckage från fjärrvärmerör via flygburen IR-teknik utvecklas ytterligare. Detta innefattar bland annat att sammanfatta erfarenheter från andra studier inom området, att beskriva eget material i form av datorsimuleringar och mätningar från ett stort antal kompletta uppdrag i Sverige och Norge, samt en inledande kartläggning och analys av några av de faktorer som bedöms vara mest väsentliga.

Under framför allt 1980- och 1990-talen utfördes en del forskningsarbete av intresse, men stora begränsningar i teknikens spatiella och temporala upplösning bidrog till att den aldrig fick något riktigt genomslag. Begränsningar i tekniken och analysmetoderna gjorde troligen att man inte insåg metodens fulla potential. Detta inses tydligt av Figurerna A och B nedan, som visar de avsevärda skillnader som finns mellan modern och äldre teknik.



Figur A. IR-bilder tagna från 600-800 meters höjd över samma område med IR-teknik som var modern 1990 respektive 2006. Skillnaden i både termisk och spatiell upplösning är enorm, vilket har öppnat helt nya möjligheter för avancerad analys, klassificering och kvantifiering av energi- och medialäckage. Efter 2006 har utvecklingen ytterligare fortsatt, se Figur B.

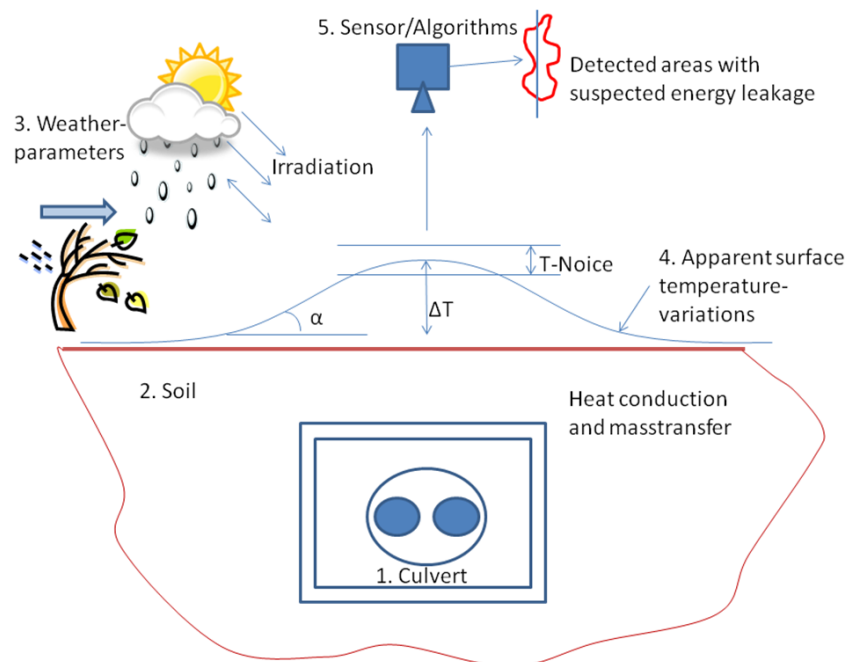


Figur B. En IR-bild registrerad i januari 2012 från 800m höjd över torget i Örebro med en modern och mycket avancerad kyld IR- kamera. Enskilda människor syns utan problem.

Utvecklingspotentialen för metoden bedöms idag vara mycket stor, och det innebär att man inom några få år skulle kunna uppnå en nivå där metoden inte bara klarar att detektera utan att också automatiskt klassificera och analysera informationen så att läckagen kan kvantifieras, exempelvis i form av W/m fjärrvärmerör eller kWh per m fjärrvärmeledning eller kronor/år och meter fjärrvärmeledning. Med denna information skulle nätägaren få ett avgörande beslutsunderlag för beslut och prioritering av insatser som underhåll och/eller reparation. Detta skulle även innebära ett paradigmskifte för övervakning och statuskontroll av fjärrvärmenät.

För att uppnå den fulla potentialen med metoden krävs bland annat fördjupad kunskap om några påverkande faktorer, exempelvis hur markens beskaffenhet påverkar värmetransporten från rör till markyta, och hur väder och vind påverkar markytans temperatur och därmed resultatet. Temperaturen som mäts på markytan påverkas inte bara av fjärrvärmerörens temperatur och egenskaper, utan också av ett antal andra faktorer såsom markens och markytans beskaffenhet, värmefflöde till/från närliggande byggnader samt väder och vind. Dessa faktorer är dessutom kopplade till varandra via ett komplext *samspel* där markytans temperatur (som mäts med metoden) påverkas av övriga faktorer. Enbart markens ytemperatur är tyvärr helt otillräcklig information för att exempelvis bestämma storleken på ett värmeläckage från ett fjärrvärmerör – hela kedjan, områdena 1-5

i Figur C nedan, måste beaktas samtidigt. Förståelse för interaktionen mellan de ovan nämnda områdena är en av nycklarna till att kunna genomföra en framgångsrik tillståndskontroll av ett helt FV-nät med flygburen IR-termografi.



Figur C. Figuren visar en schematisk skiss av de 5 delområden som påverkar markens ytemperatur som kan mätas med hjälp av flygburen IR-teknik. Det finns en tydlig koppling och samverkan mellan de olika delområdena vilket bidrar till problemställningens komplexitet.

SUMMARY

Leakage of water and heat from district heating (DH) networks is unfortunately all common today and are expected to increase, partly leading to major cost and completely unnecessary environmental impact. Energy leakage may also result from the pipe due to old insulation and eventually groundwater intrusion and thus an increased heat loss. Also corrosion or erosion destroys heat pipes so leakages of water occur. Since a large number of district heating pipes in Sweden are relatively old, the problem is very much real and it is also expected to increase. Several networks are now 50 year or older. Leakage can also occur in newer constructions, eg because of movement in soil or inadequate sealing of joints.

There is a great need for new and improved methods to assess the status of district heating systems. The possibilities for assessing the pipes status, especially large-scale state monitoring has until recently been very limited.

Airborne infrared technology has great potential but also need a great development, not least because the method is independent of the actual pipes age and type. The method is already in use in order to locate potential heat or water loss. This report also describes the use of such a system and methods for airborne infrared technology. Previously, the method and the results obtained mainly presented for individual network operator, which means that there is a need to introduce the method's possibilities and limitations in a broader context.

Although the method with airborne IR technology is not yet fully developed, it has proven to be robust, relatively accurate and very useful. The method has several important advantages, such as large areas can be studied in a short time and that surface temperature has a connection to the heat and water leakage. Larger leaks are detected almost immediately regardless of where in the network they are, the small sized leakages needs to first be processed using methods to distinguish them from normal temperature differences.

The main purpose of this study is that it should be the basis for a continuation project in which the methods for detection of heat loss from insulated pipes through airborne infrared technology need a further development. This includes summarizing experiences from other studies in the field, to describe their status in the form of computer simulations and measurements from a large number of complete assignments in Sweden and Norway, as well as an initial mapping and analysis of some of the parameters that are considered most important.

In 1980 - and 1990's there were some research of interest, but the major limitations in the technology itself, spatial and temporal resolution contributed to the method never had any real impact. Limitations in technology and analytical methods were probably not realized the method's full potential.

This is seen clearly in Figures A and B earlier, which shows the significant differences between modern and older technology.

The development potential of the method is considered today to be very great, and it means that in a few years it could reach a level where the method is not only able to detect but also to automatically classify and analyze information so that leaks can be quantified, such as W/m insulated pipes or kWh per meter pipe or SEK/year and meter pipe. With this information, the network owner could get a decision basis for prioritization of activities such as type of maintenance. This would also mean a paradigm shift for monitoring and checking the status of district heating networks.

To achieve the full potential of the method it is required detailed knowledge of some influencing parameters, such as the status of the soil and mechanisms of the heat transfer from the pipes to the surface, and how the weather affects land surface temperature and hence the result. The temperature measured at ground level is affected not only by the district heating pipe temperature and properties, but also by a number of other factors such as soil and land surface conditions, heat flow from nearby buildings and the actual weather situation and the weather history. These factors are also connected to each other via a complex interaction, where the surface temperature (as measured by the IR sensor) is affected by other factors. Only the soil surface temperature is unfortunately completely insufficient information to determine the size of such a heat leak from a district heating - the whole chain, areas 1-5 in Figure C below, must be considered simultaneously. Understanding of the interaction between the above areas is one of the keys to be able to implement a successful condition monitoring system of an entire DH network with airborne infrared thermography.

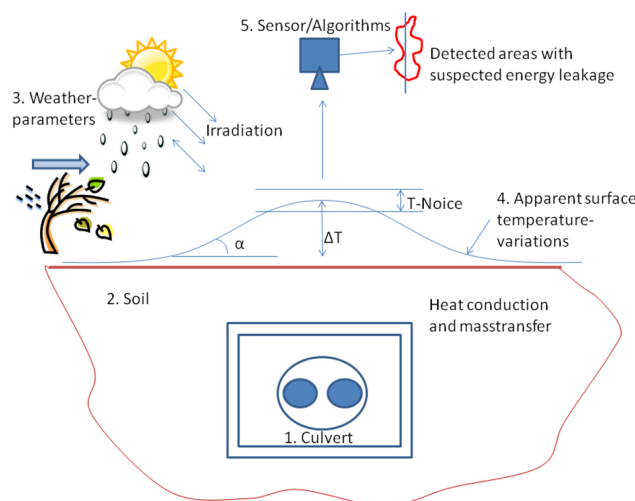


Figure C. The figure shows a schematic sketch of the five areas that affect the soil's surface temperature that can be measured using airborne infrared technology.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	15
1.1	Om rapporten	15
1.2	Syfte och mål	16
1.3	Problemformulering	16
1.3.1	Område 1 Kulvert och rör	18
1.3.2	Område 2 Markfysik	19
1.3.3	Område 3 Miljöfaktorer	19
1.3.4	Område 4 Markytans verkliga och skenbara temperaturvariationer	20
1.3.5	Område 5 Sensor och dataanalys	20
2	BAKGRUND	22
3	LITTERATURSTUDIE	25
3.1	Rör och kulvertar ur ett termiskt perspektiv	25
3.1.1	Skummade plastmantelrör	26
3.1.2	Betong- och asbestcementkulvert	27
3.2	Kulvertgrav	29
3.3	Värmeförluster från fjärrvärmerör	30
3.3.1	Rör och isolering	31
3.3.2	Värmetransport i mark	32
3.4	Markytan och väderförhållanden	34
3.4.1	Lufttemperatur och konvektion	34
3.4.2	Solinstrålning	34
3.4.3	Himlens emissivitet	35
3.4.4	Nederbörd, kondensation och förångning	36
3.5	IR-teknik för detektion av värmeförluster från fjärrvärmerör	37
3.6	Fjärrkyla	39
4	BESKRIVNING AV IR-TEKNIKEN	40
4.1	IR-strålning	40
4.2	IR-kameratekniken	41
4.3	Mätprincip vid flygburna registreringar	43
4.4	Efterbearbetning av data	43
5	TILLGÄNGLIG TEKNIK	44
5.1	Teknikens status idag	44
5.2	Tillgängliga flygburna IR system	45
6	ETT EXEMPEL UR VERKLIGHETEN	47
6.1	Introduktion	47
6.2	Genomförandefaser	47

6.2.1	Datainsamling	47
6.2.2	Analys	47
6.3	Några verkliga IR-bilder	49
6.4	Modellering och simulering av temperaturdifferenser ovan ledning	52
6.4.1	Exempel 1: Betongkulvert	55
6.4.2	Exempel 2: Olika förläggingsdjup	56
6.4.3	Felfritt PUR-rör	57
6.4.4	PUR rör med förhöjd fukthalt	57
6.4.5	PUR-rör med simulerad vattenläcka	58
6.5	Ett flyguppdrag	59
6.5.1	Varför datoriserad analys	60
6.5.2	Flygningen	60
6.5.3	Sammanställningen	61
6.5.4	Visualiseringsverktyget FView	62
6.5.5	Analysverktyget FView-Analyze	64
6.6	Diskussion	65
7	FRAMTIDA UTVECKLING	66
7.1	Vision och mål från en användares synvinkel	66
7.2	Önskade förmågor	66
7.2.1	Läcksökning	66
7.2.2	Statusbestämning	67
7.2.3	Historik, nuläge och framtidsprognos	67
7.3	Problemområdenas nuläge och önskade utveckling	67
7.3.1	Område 1: Kulvert och rör	68
7.3.2	Område 2: Markfysik	68
7.3.3	Område 3 och 4: Miljöfaktorer och markytans temperaturvariationer	68
7.3.4	Område 5: Sensor och dataanalys	69
7.4	Slutsatser och förslag på framtida arbete	70
8	PROJEKTETS FORTSÄTTNING – VAD BÖR GÖRAS OCH HUR?	71
8.1	Förslag till projektbeskrivning – fortsättningsprojekt	71
8.2	Projektplan	72
9	REFERENSER	74

1 INLEDNING

Denna förstudie syftar till att klargöra och analysera de möjligheter som idag finns för en förbättrad och effektiviserad identifiering och klassificering av värme- och vattenläckage via flygburen IR-teknik. Tekniken finns och används redan idag i viss utsträckning, men än så länge endast för att lokalisera potentiella värmeläckage. För närvarande är inte kvantifiering möjlig, men utvecklingspotentialen bedöms vara mycket stor. En fortsatt förbättring av metoden kräver bland annat fördjupad kunskap om några påverkande faktorer, exempelvis hur markens beskaffenhet påverkar värmetransporten från ledning till markyta, och hur väder och vind påverkar markytans temperatur och därmed resultatet.

Omfattande läckage av vatten och värme från fjärrvärmenät (FV-nät) är tyvärr vanligt idag, vilket leder till stora kostnader och en helt onödig miljöpåverkan. Läckage kan exempelvis bero på att rörisoleringen har åldrats eller skadats och med tiden fått försämrade egenskaper och därmed ett ökat värmeläckage. Korrosion eller erosion kan ha skadat rören så att ett läckage av vatten uppstår. Med tanke på att en stor andel av fjärrvärmerören i Sverige är relativt gamla så är problemet i högsta grad reellt och det förväntas dessutom öka. Flera av dagens fjärrvärmeanläggningar är 50 år eller äldre. Läckage kan även ske i nyare konstruktioner, t.ex. på grund av sättningar i marken eller otillfredsställande tätning av skarvar.

Möjligheterna för automatiserad bedömning av rörsystemens status har fram tills helt nyligen varit mycket begränsade och metoderna var också förhållandevis svåransända. Man vet att rören läcker, men inte var och inte hur mycket. Storskalig statuskontroll kräver för ändamålet anpassade metoder, vilka fram till nu inte har funnits eller i många fall varit undermåliga. Metoder som bygger på förändring av elektrisk impedans eller frekvenssvar har använts och används även idag i nya rör. Erfarenheten visar dock att tillförlitligheten minskar med tiden, dels på grund av åldring av ingående material dels beroende på förändringar i FV-nätet (t.ex. tillbyggnad och reparationer). Här uppvisar flygburen IR-teknik med tillhörande stödsystem stora möjligheter, inte minst för att mätmetoden är helt oberoende av FV-rörens ålder och typ. Metoden har redan visat sig både robust och relativt träffsäker, trots att utvecklingen endast har pågått en förhållandevis kort tid.

1.1 Om rapporten

Syftet med rapporten för denna förstudie är att den skall utgöra grunden för ett fortsättningsprojekt där metoden för detektion av värmeförluster/värmeläckage från fjärrvärmeledning via flygburen IR-teknik utvecklas ytterligare och görs snabb och användarvänlig. Rapporten innehåller en omfattande litteraturomgång av tidigare arbeten inom området. Under framför allt 1980- och 1990-talen utfördes en hel del forskningsarbete av intresse, men eftersom

publiceringen till stor del utgjordes av internrapporter hos ett flertal organisationer så är det totala materialet svårtillgängligt och oöverskådligt. Detta har medfört att många arbeten inte fick den spridning som de förtjänade. Teknikens status vid den tiden gjorde också att man kanske inte till fullo insåg metodens stora potential.

I rapporten beskrivs också ett flygande system och metoden för flygburen IR-teknik. Tidigare har metoden och erhållna resultat huvudsakligen presenterats för respektive nätägare/nätoperatör, vilket gör att ett behov finns av att presentera systemets/metodens generella möjligheter och begränsningar i ett vidare sammanhang. Slutligen beskrivs inverkan från några viktiga faktorer med utgångspunkt från litteraturstudien och eget material i form av datorsimuleringar och mätningar från flygningar i Sverige och Norge. Några väsentliga förbättringsmöjligheter identifieras, och en inledande analys utförs.

1.2 Syfte och mål

Syftet med förstudien är att analysera och klargöra de väsentliga förbättringsmöjligheter som finns avseende statuskontroll av FV-nät med flygburen IR-teknik. Detta innefattar att dels sammanfatta tidigare erfarenheter från andra studier inom området, dels att beskriva erfarenheter från några egna mätningar med flygburen IR-teknik till datorsimuleringar av aktuella förlopp. Vidare redovisas en kartläggning av de faktorer som bedöms vara mest väsentliga samt en inledande analys av dessa faktorer.

Målet med förstudien är också att presentera en plan för fortsatt arbete i ett större projekt som syftar till att möjliggöra kvantifiering av värmeläckage, med utgångspunkt från de erfarenheter som förstudien ger. I ett längre perspektiv innebär detta att metoden vidareutvecklas speciellt för existerande FV-nät för att förbättra dess användbarhet och prestanda, och därmed öka dess kundnytta. Det övergripande målet är att kunna bistå FV-ägarna med en statuskontroll som är av avgörande betydelse för planering och beslut av underhåll och reparationer av FV-nät. Vår vision är att metoden också ska vara ett effektivt verktyg för att kunna bedöma både ekonomiska och miljömässiga konsekvenser av att utföra (eller kanske avstå från att utföra) underhåll och reparationer av skadade delar av nätet.

1.3 Problemformulering

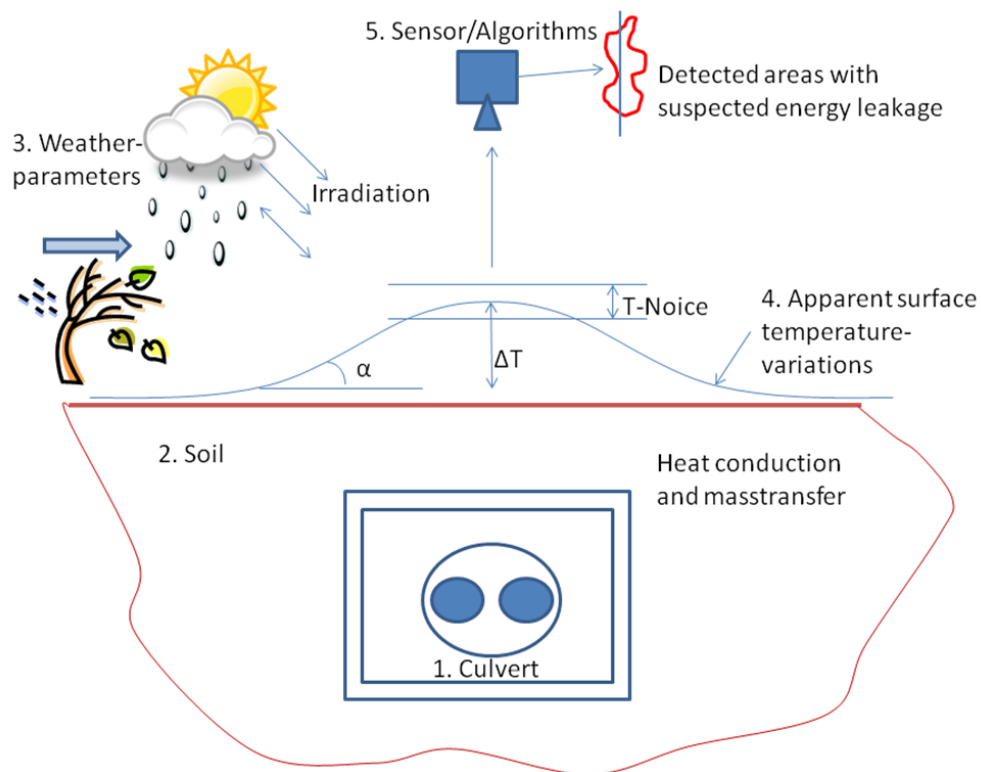
Med hjälp av flygburen IR-teknik kan variationer av markens ytemperatur mätas med god noggrannhet och upplösning över stora områden (hela fjärrvärmenät) på relativt kort tid. Tillförs marken värme lokalt, till exempel från ett fjärrvärmerör med skadad isolering, så stiger markens temperatur vilket gör att en temperaturhöjning uppkommer på markytan. Det är sedan tidigare väl dokumenterat att medelstora och stora värmeläckage från fjärrvärmenät kan detekteras med metoden.

Det är uppenbart att mer information om en värme- och/eller vattenläckas beskaffenhet vore önskvärd. Exempel på viktiga förbättringsmöjligheter är att kunna skilja en värmeläcka från en vattenläcka, kvantifiera läckans storlek, och att mer exakt lokalisera läckans ursprung. Med denna information skulle nätägaren få ett avgörande beslutsunderlag för beslut och prioritering av insatser som underhåll och/eller reparation. En önskvärd utveckling är att kunna uppskatta kostnaden för ett aktuellt värme- och/eller vattenläckage.

En framtida vision skulle kunna vara att minska underhålls- och reinvesteringarkostnader, garantera leveranssäkerhet till kunderna även i åldrande nät, säkra att ett optimalt underhåll kan utföras även om personalresurser internt och externt är begränsade. Även utveckling av nya lösningar för strategisk planering, effektivt underhåll, läcksökning, statusbestämning borde vara önskvärd. Även information om historik och nuläge är viktigt för att göra bra framtidsprognoser om nätets status.

Vad krävs då för att uppnå dessa förbättringar? Det visar sig att markens yttemperatur beror på ett mycket komplicerat *samspel* mellan ett flertal olika faktorer som alla påverkar yttemperaturen. Enbart markens yttemperatur är helt otillräcklig information för att exempelvis bestämma storleken på ett värmeläckage från ett fjärrvärmerör – hela kedjan, områdena 1-5 i Figur 1.1, måste beaktas samtidigt.

Markens temperatur, inklusive yttemperaturen, beror på ett flertal faktorer såsom markens fukthalt och material, nederbörd och vindförhållanden, samt fjärrvärmerörens dimension, läggningsdjup och återfyllnadens beskaffenhet. Flera av ingående faktorer varierar också med tiden, vilket medför att t.ex. vindförhållanden både *under och en tid innan* en yttemperaturmätning genomförs är faktorer som påverkar ytans temperatur. Förståelse för interaktionen mellan de ovan nämnda områdena är en av nycklarna till att kunna genomföra en framgångsrik tillståndskontroll av ett helt FV-nät med flygburen termografi. Även detta måste tas hänsyn till för att förbättra metoden. De faktorer som påverkar metoden kan delas in i fem områden enligt Figur 1.1.



Figur 1.1. Figuren visar en schematisk skiss av de fem delområden som påverkar markens ytemperatur som kan mätas med hjälp av flygburen IR-teknik. Det finns en tydlig koppling och samverkan mellan de olika delområdena vilket bidrar till problemställningens komplexitet.

1.3.1 Område 1 Kulvertar och rör

Olika konstruktioner av kulvertar har olika värmeläckage under normal funktion. Konstruktionerna är också olika känsliga för skador som stör funktionen. Rörens dimensioner, vattentemperatur och läggningsdjup påverkar såväl värmeläckage under normal drift som värmeläckagets storlek och utbredning vid en skada.

Nyproducerade kulvertar och rör inklusive isolering och eventuellt ytskikt är mycket väl beskrivna i [1]. Termiska egenskaper har analyserats både i fjärrvärmeapplikationer [2] och inom andra tillämpningsområden [3]. Äldre konstruktioner finns också relativt väl beskrivna. Vad som däremot i stor utsträckning saknas är analyser av hur värmeförlusterna påverkas av olika typer av kulvertskador. Detta kan tyckas något förvånande eftersom skador och läckage är så vanligt förekommande.

1.3.2 Område 2 Markfysik

Markens termiska och hydrologiska egenskaper skiljer sig mellan olika jordarter, sand, kross etc. Fukthalt påverkar markens homogenitet och därmed dess värmeledningsförmåga, densitet och värmekapacitet. Regn och snösmältning höjer generellt fukthalten i mark, men i vilken utsträckning beror på markförhållanden och eventuell beläggning av exempelvis asfalt på marken vilket är vanligt ovanför fjärrvärmerör. Även grundvattennivå kan vara en faktor att beakta.

Hur marken beter sig ur ett termiskt perspektiv under inverkan av fukt är intressant inom flera områden även utanför fjärrvärmertilämpningen. Mycket arbete och resultat här finns publicerat och kan utnyttjas även inom fjärrvärmeområdet. Personerna bakom denna rapport har publikationer som kan utnyttjas, se till exempel [4]. Delar av det aktuella tillämpningsområdet är dock i hög grad okänt, exempelvis samspelet mellan kulvert och rör för olika återfyllnadsmaterial.

Projektgruppens erfarenhet säger att lövfria, snöfria, solfria, och regnfria perioder är det som bäst lämpar sig för att detektera läckor med flygburen IR. Under dessa perioder är dock risken för att marken fryser/tinar som störst, vilket dels påverkar den värme som är bunden i marken, dels markens värmeledningsförmåga. Man kan tyvärr sällan mäta temperaturen under ideala förhållanden, vilket gör att det kommer att ställas mycket stora krav på analysmetodiken.

1.3.3 Område 3 Miljöfaktorer

Väder, vind och nederbörd påverkar i hög grad markytans temperatur. Samspelet mellan markytans temperatur, lufttemperatur, vind, solinstrålning och strålningsutbyte mellan markytan och dess omgivning avgör om markytan avkyls eller värms.

Eftersom marken har en stor termisk tröghet tar det lång tid (från timmar till dagar) innan förändringar av yttemperaturen ger något utslag djupare ner i marken. Detta gör också att den normala dygnsvariationen har störst effekt på markytan och marken strax under ytan.

Kondensation av luftens fukt på markytan (dagg) respektive förångning (upptorkning) av markytan kan påverka marktemperaturen i hög grad. Dessa fenomen påverkas i sin tur av luftens temperatur, relativa fuktighet och vindförhållanden. Motsvarande problem uppstår om vattnet på markytan fryser eller smälter.

1.3.4 Område 4 Markytans verkliga och skenbara

temperaturvariationer

Markytans temperatur och temperaturkontrast är det som knyter ihop allting. Markytans temperatur påverkas av kulvertar, rör, markfysik och miljöfaktorer, och markytans (skenbara) temperaturvariationer är det som sensorn registrerar och som senare behandlas med avancerad signalbehandling. För att detektion överhuvudtaget ska vara möjligt måste det finnas en temperaturkontrast mellan markytan ovanför ett läckande rör och ett opåverkat rör.

Inverkan av markens egenskaper och aktuella väderförhållanden kan till viss del fångas upp med hjälp av speciell signalbehandling av temperaturfält och temperaturderivator. Detta kräver emellertid mycket god kunskap om samspelet mellan ingående faktorer som påverkar yttemperaturen i det område som studeras.

1.3.5 Område 5 Sensor och dataanalys

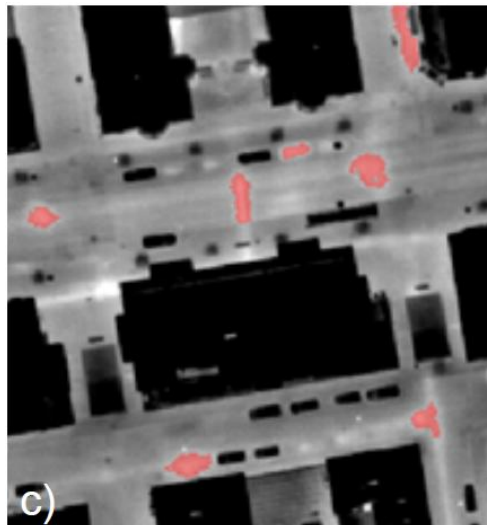
Detta område behandlas för närvarande inom ett treårigt FoU-projekt, FOCUS, se [5]. där Termisk Systemteknik leder delen ”Remote Thermography” tillsammans med FOI (Totalförsvarets forskningsinstitut) i Linköping.

Flygburen fjärrtermografi ger snabbt upphov till mycket stora mängder bilddata/mätdata, och även om en kunnig operatör ganska lätt kan upptäcka exempelvis tecken på en fjärrvärmeläcka i en sådan bild är det praktiskt omöjligt att manuellt analysera tiotusentals bilder. En automatiserad lösning som går igenom alla bilder och rapporterar alla troliga läckor är därför inte bara önskvärd utan helt nödvändig. Även om en sådan metod inte är perfekt från en början så reducerar den antalet bilder som en operatör behöver analysera noggrant, till ett rimligt antal bilder, säg tiotals i stället för tiotusentals.

Analysen är dock mycket svår att automatisera eftersom falska detektioner lätt uppstår, främst på grund av andra värmekällor än fjärrvärmeläckage (soluppvärmning, fordon). Att designa en algoritm som tar bort de falska detektionerna utan att ta bort de äkta kräver bland annat stora mängder exempeldata från fjärrvärmeområdet, vilket tidigare inte funnits tillgängligt. Under de senaste åren har dock Termisk Systemteknik termograferat ett antal (> 10) städer med fjärrvärmenät, och det är nu möjligt att utnyttja insamlade data för design och träning av automatiska klassificerare.

Syfte och mål med FOCUS-projektet är att undersöka och implementera metoder, tekniker och utnyttjande av elektro-optiska flygburna sensorer, samt genomföra semi-automatisk insamling och analys av data. Syftet är även att göra nuvarande delvis manuella rutiner effektivare och minimera antalet möjliga falsklarm.

I Figur 1.2 visas ett exempel där en IR bild analyserats och de detekterade ytorna med förhöjd temperatur överlagrats med röd färg för enklare visuell inspektion. Även annan information om de detekterade ytorna kan lätt beräknas såsom storlek, övertemperatur, brusmått, gradienter m.m.



Figur 1.2. Bild registrerad med flygburen IR-kamera. Analyserad bild där detekterade ytor med förhöjd temperatur överlagrats med röd färg.

I ett konferensbidrag beskrivs den pågående utvecklingen av detektionsalgoritmer inom FOCUS projektet går att läsa om, se [6].

Tonvikten i det föreliggande arbetet ligger på detektering och klassificering av läckage från fjärrvärmesystem. En mindre del av FOCUS projektet syftar till att undersöka möjligheten att använda samma teknik för inventering av viltbestånd i naturen.

Inom den del som berör utveckling av algoritmer för detektion av fjärrvärmeläckor kommer utvecklingen att baseras på utnyttjandet av ett antal bildegenskaper (t.ex. hur skarpa, raka, krokiga, avlånga, etc. ”värmefläckarna” är). Utvecklingen innefattar också en statistisk analys som inkluderar hur ovan nämnda parametrar relaterar till äkta och falska detektioner, samt att utprova och träna en klassificeringsalgoritm. De utvecklade algoritmerna kan sedan appliceras på både nya och tidigare insamlade data. I arbetet kommer man att använda metoder för avancerad bildanalys.

2 BAKGRUND

Efter många år med forsknings och utvecklingsarbete vid FOI om hur man detekterar nedgrävda landminor med IR-teknik påbörjades ett treårigt utvecklingsprojekt med Göteborg Energi AB. Projektet har relativt nyligen har avslutats och där användes tekniken från minspaningen inom ett nytt område - storskalig kartering av marktemperaturer ovan fjärrvärmenät initialt har överförts till fjärrvärmeområdet.

Förstudien baseras på erfarenheter från såväl ett nationellt som internationellt femtonårigt forskningsprojekt för detektion av nedgrävda minor med flygburen IR-teknik. Angreppssättet inom minprojektet uppvisar likheter med tillståndskontroll av fjärrvärmenät, vilket gör att delar av den tidigare metodutvecklingen och teoribildning kring värme- och fukttransport i mark. I båda projekten är detekterbara temperaturförhöjningar av primärt intresse. Projektgruppen inom minprojektet, vars nyckelkompetens numera finns hos Termisk systemteknik, har producerat över 30 vetenskapliga artiklar och rapporter under de år som projektet bedrevs. En sammanfattning finns i rapporten Optical Methods for Detection of Minefields [4].

I denna förstudie sker en fokusering på värmeflödet från fjärrvärmerören, genom marken och upp genom markytan till omgivningen. Avsikten är att klargöra olika förutsättningar för att kunna detektera ett vatten- eller energiläckage i FV-nätet. I ett annat parallellt projekt tillsammans med FOI utvecklar Termisk Systemteknik förbättringar av den flygburna sensors prestanda och detektionskapacitet av fjärrvärmeläckor.

Institutionen för Mekanisk värmeteori och strömningslära vid Linköpings Universitet, har mycket hög kompetens vad gäller analys, modellering och simulering av komplexa värmeöverföringsproblem.

Tillståndskontroll av stora fjärrvärmesystem är komplex och tidsödande. Göteborg Energi AB har initierat ett utvecklingsprojekt för att använda flygburen värmekamerateknik, eller IR-teknik, för att effektivt kartera hela sitt fjärrvärmenät. Göteborg Energi genomförde redan 1990 ett projekt där man använde flygburen IR-teknik för att detektera läckor i FV-nätet. Efter drygt 10 år ville man fortsätta utifrån dessa erfarenheter. Detta resulterade i ett samarbete mellan Göteborgs Energi och Försvarets forskningsinstitut (FOI) som påbörjades 2006.

IR-tekniken har utvecklats i hög takt det senaste decenniet vilket framgår i Figur 2.1 som återger samma område. Skillnaden i både termisk och spatiell upplösning är enorm, vilket har öppnat helt nya möjligheter för avancerad analys, klassificering och kvantifiering bara under de senaste åren. Efter år 2006 har förbättringen fortsatt. En nyregistrerad bild med dagens bästa IR-kamerateknologi visas i Figur 2.2.



Figur 2.1. IR-bilder tagna från 600-800 meters höjd över samma område med teknik som var modern 1990 respektive 2006.



Figur 2.2. En IR-bild registrerad i januari 2012 från 800m höjd över torget i Örebro med en modern och mycket avancerad IR- kamera. Enskilda människor syns enkelt.

Från 2007 övertogs projektet av Termisk Systemteknik som genomförde analyserna och slutförde projektet 2009. Resultatet har löpande presenterats vid tre distributionskonferenser anordnade av Svensk Fjärrvärme år 2007 i Stockholm, 2009 i Helsingborg samt 2012 i Stockholm. Efter dessa presentationer har ett flertal FV-ägare hört av sig om att inleda motsvarande karteringar av sina respektive FV-nät. Vidare har artiklar publicerats av bl.a. Ny Teknik, Dagens Industri och Fjärrvärmetidningen.

En ständigt återkommande fråga vid dessa presentationer är om det går att kvantifiera energiläckage och uppskatta de direkta kostnaderna för läckaget. Man har även ställt frågor om man utifrån det analyserade resultatet kan förbättra planeringen av framtida underhåll och reinvesteringar på ett kostnadseffektivare sätt än idag.

3 LITTERATURSTUDIE

Litteraturstudien fokuserar på värme- och medialäckage från fjärrvärmenät och detektion av läckage med hjälp av termiska metoder.

Först beskrivs några vanliga rör- och kulvertvarianter samt kulvertgraven där de läggs. Därefter beskrivs och diskuteras de värmetransportmekanismer som avgör värmeförlusternas storlek, och som har en avgörande betydelse för möjligheten att detektera, klassificera och kvantifiera läckagets storlek. Metoder för att mäta värmeförluster beskrivs och diskuteras. I första hand studeras användning av IR-teknik, då sådan teknik har en särställning eftersom den enkelt kan mäta temperatur och temperaturskillnader över stora ytor/områden. Även andra metoder för temperaturmätning samt värmeflödesmätare studeras i viss utsträckning. Metoder baserade på sådan teknik har dels använts för att studera värmeläckage från fjärrvärmerör dels för att studera markens termiska egenskaper, interaktion mellan kulvert och mark, och inverkan av väderdata som t.ex. vindförhållanden.

Litteraturgenomgången knyter an till den uppdelning i områden som presenteras i Figur 1, dvs *kulvert*, *markförhållanden*, *väderförhållanden* och *markytans temperaturfördelning*. Område *sensor/algoritmer* studeras inte i det aktuella projektet eftersom detta område dels är kopplat till ett fristående projekt dels inte är centralt för det fjärrvärmeprojektet; se vidare i [5].

3.1 Rör och kulvertar ur ett termiskt perspektiv

Utformningen av kulvertar och fjärrvärmerör har förändrats genom åren. Kunskapen om fördelar och nackdelar med olika konstruktionsprinciper har byggts upp, samtidigt som nya rör- och isoleringsmaterial har blivit tillgängliga på marknaden.

Generellt sett består en fjärrvärmekulvert av ett medierör där värmebäraren flödar, ett isolerskikt som skyddar mot värmeförluster, och ett mantelrör som ger mekanisk stabilitet, skyddar mot yttre påverkan, och för vissa kulverttyper skyddar mot inträngande vatten.

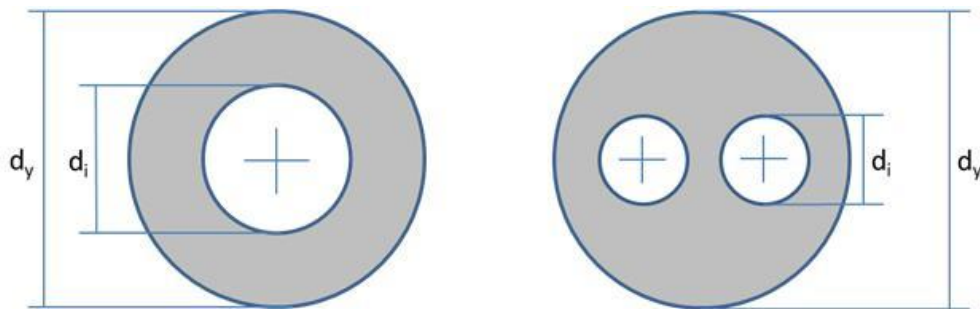
Stål är och har varit det absolut vanligaste materialet hos fasta medierör, men även plast och koppar har använts [7]. Stålrör är relativt billiga och har flera viktiga fördelar, exempelvis beträffande skarvbarhet och temperaturbeständighet vid höga tryck och temperaturer [8]. Användningen av flexibla rör av koppar och krossbunden polyetylen (PEX) ökar i mindre system med lägre tryck och temperatur [9]. Ur ett termiskt perspektiv spelar medieröret i det aktuella sammanhanget en underordnad roll, och vidare diskussion av medierör genomförs därför inte.

Några vanliga kulverttyper beskrivs här och fokus ligger på termiska egenskaper och risk för skador med läckage av värme och vatten som följd. Beskrivningen här är av naturliga skäl inte fullständig, utan belyser några

vanligen förekommande konstruktionsprinciper, vilka är väsentliga för det aktuella projektet. Exempelen innefattar de tre typerna *skummade plastmantelrör, betongkulvert och asbestcementkulvert*.

3.1.1 Skummade plastmantelrör

Rörtypen består i normalfallet av ett medierör i stål, en isolering i form av polyuretanskum (PUR-skum) och ett hölje/mantelrör av polyeten (PE). Rörtypen förekommer både som enkelrör och dubbelrör, se Figur 3.1. Dubbelrör har generellt mindre värmeförluster, och kostnaderna för grävarbete/läggning blir dessutom lägre [10].



Figur 3.1: Geometri för skummade plastmantelrör; enkelrör till vänster och dubbelrör till höger.

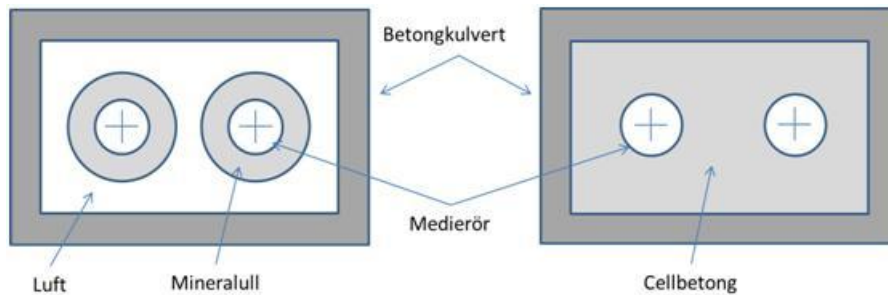
Rör isolerade med PUR introducerades på 1960-talet, och PUR har sedan dess gradvis ökat i användning för att alltsedan 1990-talet vara det totalt dominerande isolationsmaterialet i fjärrvärmerör [11]. Bland fördelarna märks kombinationen av låg värmekonduktivitet och bra lastbärande egenskaper. PUR-skum består av en matris av PUR, och celler (blåsor) av någon lämplig fyllnadsgas. Omkring 90 % av cellerna är slutna. PUR-skum för fjärrvärmerör har en högre densitet än vad som är vanligt för andra tillämpningar (60-80 kg/m³ jämfört med 30-40 kg/m³). Fram till 1980-talet användes CFC (Chlorofluorocarbons, t.ex. Freon) som fyllnadsgas, vilket gav en extra låg värmekonduktivitet (0.011 W/mK) [12]. Sedan CFC förbjöds har flera andra gaser tagit över som fyllnadsgas – idag används ofta blandningar av cyclopentane och koldioxid [9]. Cyklopentane har $k=0.12$ W/(mK) [11] vilket motsvarar hälften av värdet för luft ($k=0.027$ W/(mK)), och koldioxid ($k=0.019$ W/(mK)) vid 50°C. För skum för isolationsändamål brukar man med värmekonduktivitet mena den *effektiva* värmekonduktiviteten för matris och fyllnadsgas. Det innebär att man vid bestämning av den faktiska värmekonduktiviteten inkluderar såväl värmeflödet i matrismaterialet som värmeflödet i fyllnadsgasen. Det senare bidraget kommer från värmeledning i fyllnadsgasen samt strålning och eventuell konvektion i cellerna. I normalfallet är det senare bidraget mycket litet och kan försummas [13]. För ytterligare beskrivning av värmetransport i PUR-skum hänvisas till [1]

Diffusion i skummet och ut genom mantelröret/skarvar gör att gassammansättningen förändras med tiden. Koldioxid och cyclopentane ersätts med luft från atmosfären, vilket med tiden leder till en ökad värmekonduktivitet hos skummet [14]. Den relativt höga densiteten i aktuella material bidrar till att göra diffusionen långsam, men på några månaders/års sikt förändras de värmeisolerande egenskaperna märkbart. Eftersom rörens förväntade livslängd är flera tiotal år är materialförändringar på några års sikt av väsentlig betydelse. Påverkan av ackumulerade värmeförluster under 50 års drifttid har analyserats [10]. Det konstaterades bland annat att man måste använda ett medelvärde av värmekonduktiviteten under den aktuella tidsperioden för att kunna göra rättvisa jämförelser, eftersom den effektiva värmekonduktiviteten kan öka med så mycket som 50 % under rörens livslängd.

Det är värt att notera är att diffusionen av vattenånga är av storleksordningen 10^4 gånger effektivare än diffusionen av t.ex. koldioxid eller cyklopentan [1]. Mantelröret för PUR-isolerade fjärrvärmerör består ofta av polyeten (PE), vilket är vattentätt och har ett stort diffusionsmotstånd. Vid skada på mantelröret eller dess skarvar kan vatten i ång- och/eller vätskefas tränga in i PUR-isoleringen. Inläckage av vattenånga innebär oftast inga större problem, eftersom förhållandena i närheten av det varma medieröret ger en mycket låg relativ fuktighet [9]. Betydligt allvarigare är läckage av vatten i vätskefas, oavsett om vattnet kommer från medieröret eller från omgivande grundvatten. I fallet grundvatten kan också den så kallade ”andningseffekten” ha stor betydelse [15]. Dels ger detta en betydande risk för korrosion, och dels försämras isoleregenskaperna högst väsentligt. En svag länk är skarven mellan två rörsegment. Olika skarvmetoder finns, och deras beständighet mot läckage beror bl.a. på hur väl skarvningen utförs och hur skarvarna skyddas mot åverkan samt det fyllnadsmaterial som används. Se vidare t.ex. [16].

3.1.2 Betong- och asbestcementkulvert

Kulvertar av betong användes tidigare i stor utsträckning, inte minst för större dimensioner. Två typer var vanliga, antingen där medierören var isolerade med mineralull och omkringliggande luft, eller med medierören inbäddade i cellbetong se Figur 3.2. I exempelvis Göteborg byggdes dessa typer av kulvertar från 1950-talet till slutet av 1980-talet [17].

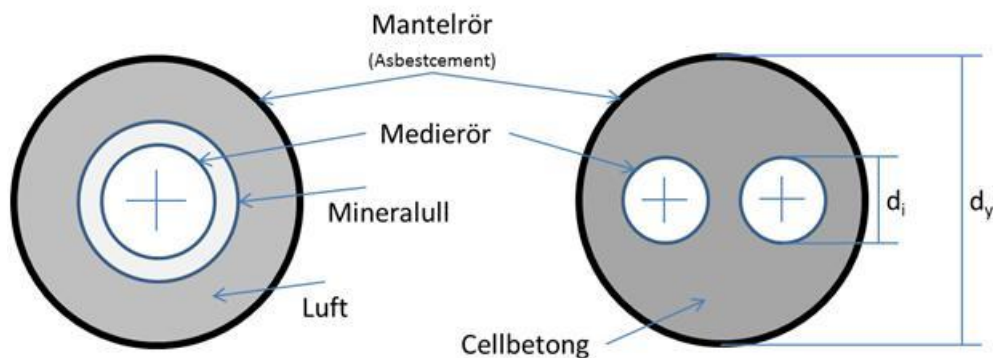


Figur 3.2. Exempel på två olika typer av betongkulvertar

Eftersom det med tiden alltid blir sprickor i kulvertarna är det viktigt med bra dränering och gärna lutning på kulverten för att eventuellt inläckande vatten ska kunna rinna undan.

Mineralull är ett bra isolermaterial ($k=0.03 - 0.04 \text{ W/mK}$), men samtidigt känslig då den har mycket låg mekanisk hållfasthet och lätt blir fuktig. Fuktig mineralull ger en mycket korrosiv miljö och är svår att torka [17]. Cellbetong är ett förhållandevis dåligt isoleringsmaterial ($k=0.16 \text{ W/(mK)}$), men det har å andra sidan mycket bra mekaniska egenskaper.

Kulvertar av asbestcement avser kulvertar med ett hölje (mantelrör) av asbestcement, och denna typ av kulvertar användes från 1950-talet fram till slutet av 1970-talet. Isoleringen kan bestå av mineralull, PUR-skum eller cellbetong. Kulvertarna finns både i en- och tvårörsutföranden. Exempel på två olika varianter visas i Figur 3.3.



Figur 3.3. Kulvertar innehållande asbestcement.

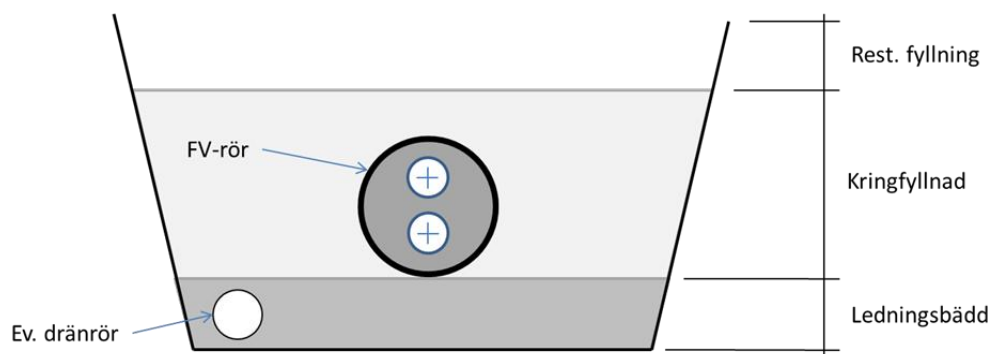
Uppbyggnaden av betong- och asbestcementkulvertar påminner om varandra, och man kan dra paralleller beträffande risk för skador. Kulverttyperna är förknippade med en relativt stor risk för korrosion på medieröret. Korrosion har i en tidigare studie visat sig stå för över hälften av kostnaden för skador på fjärrvärmeledningar i Sverige. Uppkomna skadefall har visat på risken med inläckande vatten, både vatten som droppar ner på rören/isoleringen, och vatten som blir stående i kulverten. Risken är särskilt stor i anslutning till vägar där vägsalt kan skapa en korrosiv miljö, och tung trafik kan skapa

sättningar i marken, vilket bland annat kan leda till sprickor i höljet, se till exempel [18].

3.2 Kulvertgrav

För att fjärrvärmerör ska fylla sin funktion under lång tid ställs höga krav på kulvertgraven där de läggs. Innan skummade plastmantelrör började dominera marknaden fanns ett flertal typer av kulvertar och kulvertgravar med variation beträffande bl.a. kulvertgravens djup och bredd, FV-rörens läggningsdjup, val av återfyllnadsmassor [17]. I vissa fall användes kulvertar som var mindre känsliga för fyllnadsmassornas egenskaper, t.ex. betongkulvertar. Under denna tid var inte heller kunskapen lika stor som idag om de krav som ställs påläggning av fjärrvärmerör. Skador som kan leda till vatten- och värmeläckage kommer ofta gradvis och/eller är svåra att upptäcka, vilket i sin tur leder till att det tar lång tid att bygga upp erfarenheter om vilka rör- och kulvertvarianter som fungerar bra. Sammantaget ledde detta till en stor variation av hur rör och kulvertar lades, och hur kulvertgravarna återfylldes.

Graven och dess återfyllnad måste ha bärighet och stabilitet för att t.ex. kunna ta upp trafiklast, dränering anpassad till grundvattennivå och fuktbelastning, och förhindra för höga punktlaster på rören. Riktlinjer och anvisningar finns utgivna av Svensk fjärrvärme AB för hur läggning av fjärrvärmerör bör göras [19]. Läggningsanvisningarna uppdateras med viss regelbundenhet. Figur 3.4 visar en principskiss över en kulvertgrav enligt [19]. Om två enkelrör används läggs de vanligen sida vid sida med ett visst specificerat avstånd mellan rören enligt specifikationen. Andra läggningssvarianter förekommer, se till exempel [20].



Figur 3.4. Principskiss över en kulvertgrav enligt [19]

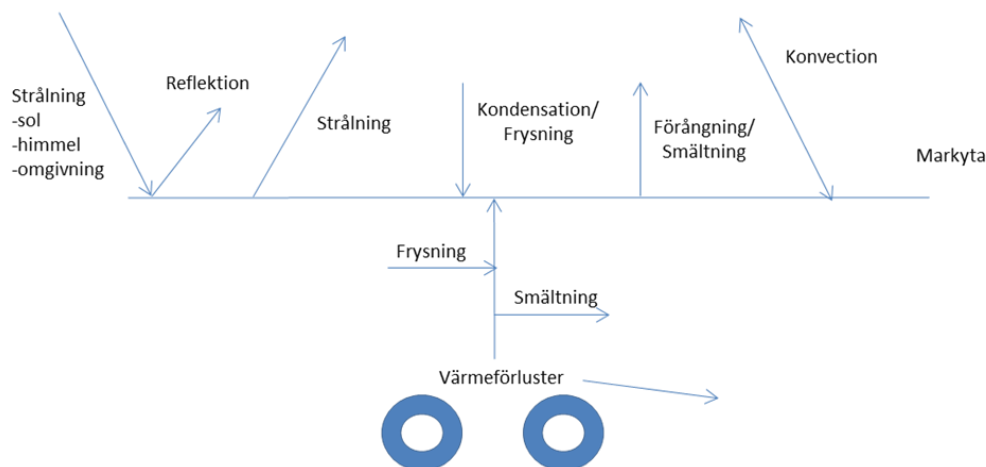
Valet av kring- och återfyllnadsmassor beror bl.a. på om förläggningen sker under en gata/väg där risk för sättning måste beaktas, eller om markförhållandena kräver att kulvertgraven dräneras. Flera skäl talar för en återanvändning av uppgrävt material i så stor utsträckning som möjligt, under förutsättning att FV-rörens är tillräckligt skyddade. Kostnaden för läggning kan minskas med så mycket som 10-20 % i parkmark eller motsvarande mark där

fyllnadsmassorna kan lagras på plats under arbetets gång [21]. I städer blir besparingen normalt mindre eftersom fyllnadsmassorna måste transporteras bort och mellanlagras innan de kan användas för återfyllnad. Vid en lämplig teknik kan även betydande miljömässiga fördelar erhållas enligt en livscykelanalys [22]. En utförlig analys av återanvändning av återfyllnadsmassor finns i [23].

Hur kulverten utformas påverkar också värmeförlusterna från FV-rören. Förutsatt att isoleringen är oskadad och torr står marken för ett värmemotstånd på omkring 20 % [11] Markens värmemotstånd beaktas normalt inte vid val av t.ex återfyllnadsmassor, och omnämns inte heller i lägningsanvisningarna [19]. Anledningen är sannolikt att man betraktar rörisoleringen som tillräcklig, och att det i praktiken är svårt att öka det totala värmemotståndet eftersom urvalet av kring- och överfyllnadsmaterial är starkt begränsat. Det är också svårt att bestämma värmemotståndet i återfyllnadsmassorna.

3.3 Värmeförluster från fjärrvärmerör

Värmeförluster från fjärrvärmerör beror på många faktorer och inte minst hur *samverkan* mellan dessa faktorer påverkar värmeförlusterna. Figur 3.5 ger en överblick över de värmeflöden som påverkar värmeförlusten. Värme leds från rören till marken, och en del av denna värme når markytan. Hur mycket värme som når markytan, och hur markytans temperatur påverkas beror på sambandet mellan aktuella värmeflöden, liksom markens termiska egenskaper. Eventuell förekomst av grundvattenströmning och frysning i marken eller förångning på markytan är några andra faktorer som påverkar värmeflödet. Om marken fryser eller tinar förändras värmeledningsegenskaperna, samtidigt som värme avges eller tas upp. Detsamma gäller frost eller kondens på markytan. Vinden påverkar värmetransporten, liksom solinstrålning och strålningsutbyte med omgivning och atmosfären.



Figur 3.5. Överblick över de värmeflöden som påverkar värmeförlusten

Värmetransporten i rören och i marken kan i huvudsak betraktas som ren värmeledning och beskrivs av ekvation 1.

$$\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q' \quad (1)$$

där ρ är densitet (kg/m^3), c ($\text{J}/(\text{kgK})$) är specifik värmekapacitet, k ($\text{W}/(\text{mK})$) värmekonduktivitet, T ($^{\circ}\text{C}$) temperatur, t (s) tid och Q' (W/m^3) en källterm som kan användas för att hantera t. ex. frysning i marken och värmetransport vid markytan.

I marken är temperaturen mer komplex, och en mer fullständig analys kräver att bland annat grundvattenströmning och masstransport av fukt i marken beaktas. För fjärrvärmeapplikationer verkar det saknas forskning som tar hänsyn till dessa aspekter, men andra sammanhang finns flera arbeten som beaktar dessa faktorer, se exempelvis [24-27].

3.3.1 Rör och isolering

Värmeförlusterna från moderna fjärrvärmerör är relativt små, och rörens isolering står för omkring 80 % av motståndet mot värmeförluster [28]. Termiska egenskaper och funktion hos fjärrvärmerör och deras ingående material är mycket väl utredda och analyserade. Material i såväl moderna som gamla fjärrvärmerör har under lång tid varit vanligen förekommande även i olika verksamheter utanför fjärrvärmebranschen. Exempelvis är isolerförmåga och dess variation med ålder, temperatur, gaser som används för blåsning av skum etc. av ett stort allmänt intresse och en mängd publikationer finns, se t.ex. [3, 29].

Vissa specifika tillämpningar finns inom fjärrvärmebranschen, men även dessa får anses vara väl utredda. Termiska långtidsegenskaper för PUR-skum i fjärrvärmerör har undersökts i [11]. Även hållbarheten av mekaniska och termiska egenskaper har studerats ingående i [9], som är ett arbete som bland annat fokuserar på rörskarvar och inverkan av fukt.

De mest centrala faktorerna är värmeflöden som påverkar värmeförlusten från fjärrvärmerör. I allmänhet kan variationerna över dygn, årstid och med väderlek vara mycket stora. Värmeförluster och miljöpåverkan har undersökts i [11]. Intressanta slutsatser är bl a att dubbelrör har mindre värmeförluster än enkelrör, och att en ansevärd mängd av blåsgasen cyclopentan i PUR-skum finns lagrad i PUR-matrisen, vilket bland annat påverkar diffusionshastigheten.

Mot bakgrund av den omfattande analysen av egenskaper hos fjärrvärmerör och ingående material, är det förvånansvärt lite studier som gjorts på skadade rör och framför allt på skadad isolering. De allra flesta studier av värmeförluster från fjärrvärmerör förutsätter oskadad och torr isolering. Problemet angrips till viss del i [30, 31], men endast med utgångspunkt från

antaganden av skadans betydelse för de termiska egenskaperna och inte på mätning av faktiska egenskaper. I [32] görs ett intressant experiment med ett oisolerat rör som hölls i en omgivningstemperatur på 25 oC för att simulera värmeförluster vid fjärrvärmerör. Fokus i studien var att studera total värmeförlust från ett fjärrvärmerör under vissa förutsättningar, och alltså inte isoleringens betydelse i sig.

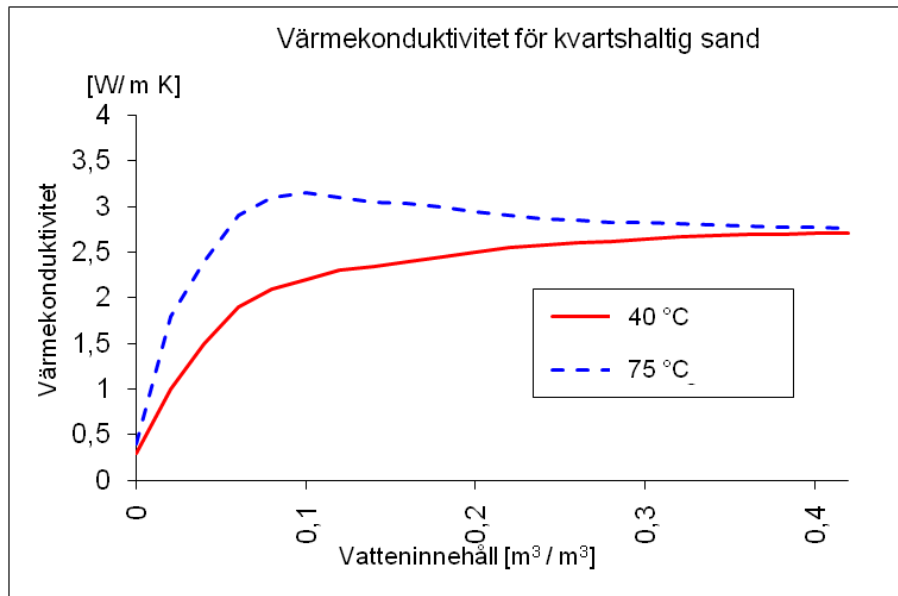
Om isoleringen blir skadad minskar värmemotstånd kraftigt samtidigt som värmeförlusterna ökar avsevärt vilket ligger i linje med resultaten i [30, 32]. Resultaten av våra simuleringar visar dock att markens termiska egenskaper får relativt sett större betydelse vid skadad/våt isolering jämfört med oskadad/torr isolering.

3.3.2 Värmetransport i mark

Marken kan bestå av olika material som sand, lera, morän, stenkross etc. Dessa beståndsdelar har olika egenskaper, som tillsammans bidrar till markens egenskaper. Studier som innefattar hur markens egenskaper påverkar värmeförluster från fjärrvärmerör har uteslutande fokuserat på att bestämma värmeförlusternas storlek – inte att minimera dem. De allra flesta studierna har dessutom fokuserat på förluster från rör med intakt isolering, och med den förutsättningen blir naturligtvis påverkan från markens termiska egenskaper på värmeförlusterna liten. Vid skadad isolering kan resultatet bli helt annorlunda.

Markens fukthalt kan avsevärt påverka isoleringsegenskaperna, särskilt för de material som tar upp fukt/vatten och som har kapillärsugande egenskaper. Även markens packningsgrad påverkar; dels en direkt påverkan på de termiska egenskaperna, men också indirekt via den förändring av fuktning/torkning och fukttransport som följer av olika packningsgrad. Markens packningsgrad påverkas också med tiden.

Markfukt tenderar att öka både densitet, värmekapacitet och värmekonduktivitet. För exempelvis sand baserad på kvarts beror värmekonduktiviteten på fukthalten enligt Figur 3.6 [33]. Fukt brukar normalt öka värmekonduktiviteten, men som figuren visar inverkar även temperaturen, vilket gör sambandet mer komplext.



Figur 3.6. Diagram över värmekonduktivitet för sand vid 40 °C respektive 75°C.

Mätning av värmekonduktivitet hos olika beståndsdelar i mark måste nästan uteslutande göras i laboratorium, och det är mycket svårt att återskapa likartade förhållanden som i mark beträffande exempelvis packningsgrad och fukthalt. I en studie av värmeförluster från FV-rör i Danmark [34] gjordes mätningar på morän och grov sand. Mätningarna visade att moränmaterialets värmekonduktivitet varierade från 1.0 till 2.5 W/(mK) med ökande fuktighet, och för grov sand från 0.5 till 3.2 W/(mK). Det framkom också att spridningen vid olika mättillfällen var relativt stor.

Även densiteten (ρ) och specifika värmekapaciteten (c) beror av markens fukthinnehåll. En ofta använd överslagsmässig metod att ta hänsyn till markens olika innehåll är att summera markens beståndsdelar enligt följande uttryck

$$\rho c = 1.9x_m + 2.5x_o + 4.2x_w \quad (10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1})$$

där x_m , x_o och x_v är volymsfraktionerna av mineral, organisk materia respektive vatten. Fuktens inverkan är i högsta grad icke linjär. I porösa material såsom mark med både temperatur- och fuktgradienter krävs samtidig lösning av de kopplade differentialekvationerna för värmeledning och fukttransport, se t.ex. [25]. Tillämpningar på mark och olika jordmaterial finns beskrivna i [35-37]

Frysning och upptining av marken påverkar markens värmeledningsförmåga och därmed värmetransporten. Värme avges under frysningen och krävs för tiningen. Eftersom det bara är vattnet i marken som fryser/tinar är fukthalten en avgörande faktor. I fjärrvärmesammanhang har en kortfattad

analys av denna påverkan gjorts i [31], där man använt en modell för tining/frysning ur Hagentoft 1983.

3.4 Markytan och väderförhållanden

Markens temperatur påverkas av markytans temperatur, som i sin tur påverkas av vilka väderförhållanden som råder ovanför markytan. Faktorer som påverkar markytans temperatur är bland annat lufttemperatur och vindhastighet, solinstrålning och strålningsutbyte mellan markytan och omgivningen/atmosfären. Energibalansen mellan markyta och dess omgivning kan tecknas

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k_1}{\rho c_p} \left(\alpha_{sun} E_{sun} + \alpha_{sky} E_{sky} - \varepsilon \sigma T^4 - h(v)(T - T_a) - k_2(T - T_0) \right) + \dot{Q}$$

där E_{sun} and E_{sky} är solens och himlens irradians på markytan, α_{sun} är markytans absorptivitet med avseende på solinstrålning, α_{sky} är markytans långvågiga absorptionskoefficient, ε är bakgrundsemissiviteten, T är markytans temperatur, T_a är omgivningens temperatur, och $h(v)$ är värmeövergångskoefficienten som funktion av vindhastigheten. T_0 är den konstanta temperatur som råder på ett sådant djup i marken att den inte påverkas av dygnsvariationer. k_1 and k_2 är konstanter, ρ och c_p är densitet och specifik värmekapacitet för marken, och \dot{Q} är en källterm. Alla temperaturer anges i Kelvin, allt är även i SI-enheter.

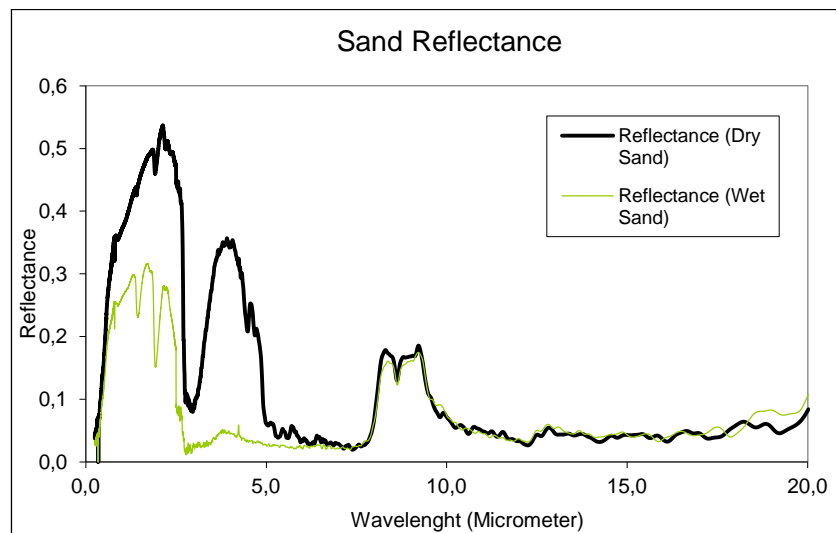
3.4.1 Lufttemperatur och konvektion

Värmeutbytet mellan markytan och den omgivande luften påverkas bland annat av lufttemperatur och vindförhållanden. Den lokala vindhastigheten beror i hög grad på hur omgivningen ser ut och det är ofta omöjligt att i detalj ta hänsyn till alla sådana geometriska aspekter – approximationer måste göras. Uppskattningar av värmeövergångskoefficienten (h) är svåra att göra. Flera modeller som delvis bygger på uppmätta data finns. För horisonella ytor kan h exempelvis approximeras med “McAdams plate model” som definieras som $h = C_1 + C_2 \cdot v$ där $C_1 = 5.7$, $C_2 = 3.8$ och v är vindhastigheten. Det bör noteras att sådana uppskattningar bygger på antaganden som sällan förekommer i verkligheten. Detta gör att sambanden måste användas med försiktighet.

3.4.2 Solinstrålning

Den effekt som solen strålar in mot markytan beror bland annat på hur högt solen står över horisonten. Andelen av solinstrålningen som absorberas av

markytan definieras som α_{sun} , vilket kan uttryckas som $\alpha_{sun} = 1 - r$ där α_{sun} är den våglängdsberoende absorptionskoefficienten och r är den våglängdsberoende reflektiviteten hos markytan. Reflektiviteten kan mätas, och som Figur 3.7 visar är den starkt beroende av fukthalten. Vid mätningen användes normalt två hemisfärintegrerande spektrofotometrar, i intervallet 0,2 - 2,5 mikrometer t. ex. ett Cary 5G system och i intervallet 2,5 - 20 mikrometer exempelvis en Bruker IFS 55 FT-IR. Reflektivitetsparametrar kan bl.a. hämtas från [38].



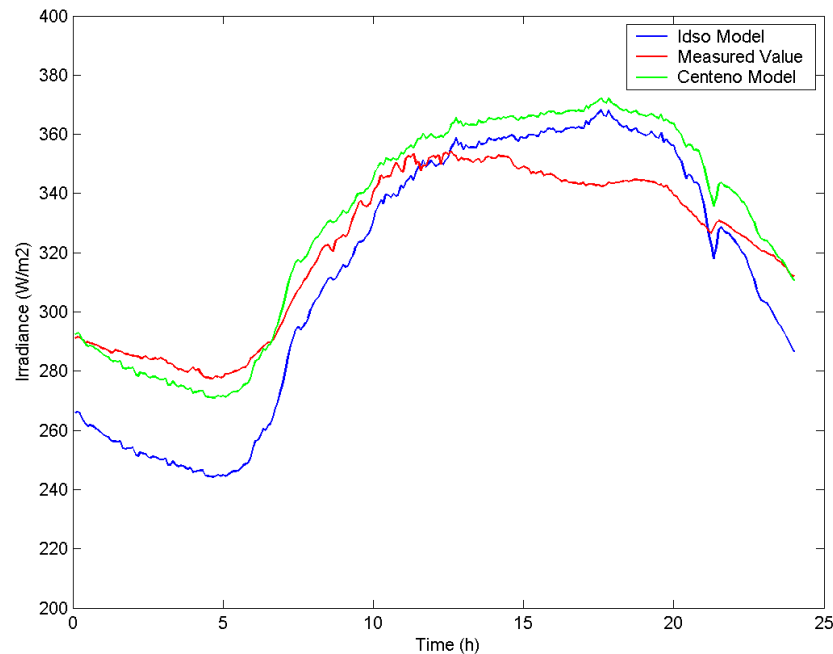
Figur 3.7. Uppmätt reflektivitet för våt och torr sand.

3.4.3 Himlens emissivitet

Modeller som beskriver himlens emissivitet ϵ_{sky} har presenterats av bland andra Centeno respektive Idso [39, 40]. Båda modellerna är semiempiriska och baseras delvis på uppmätta atmosfäriska egenskaper. Som ett exempel formuleras modellen av Centeno som:

$$\epsilon_{sky} = \left(1 - N \right) \left[0.0001 \cdot \left(1.7723 + 0.9555 \cdot \left(0.6017 \right)^Z \cdot H^{0.0665} \cdot T_a^{1.189} \right) + N \cdot \left(0.000 + 1751 \cdot Z^{0.652} \right) \cdot H^{-1.5} \cdot T_a^{-1.4} \right]$$

där N är himlens nebulositet. När $N=0$ är himlen klar och utan störningar från exempelvis dimma, och när $N=1$ är himlen helt mulen. Z är höjden över havet i kilometer och H är relativa fuktigheten. Andra modeller är både mer komplexa och innehåller fler parametrar. Figur 3.8 visar irradiansen på marken från långvågig strålning enligt de två modellerna och mätningar. Som figuren 3.8 visar erhöles en relativt bra uppskattning med Centeno-modellen i förhållande till uppmätta värden.



Figur 3.8. Himlens irradians på marken från långvågig strålning enligt de två modellerna och mätningar under ett dygn. Mätningar utfördes på Forsvarsmaktens övningsfält i Kvarn, Motala 2003-06-03.

3.4.4 Nederbörd, kondensation och förångning

Nederbörd i form av regn och snö kan drastiskt förändra markytans temperatur på kort tid, och därmed också värmeutbytet mellan mark och omgivning [41]. Nederbörd kan också leda till en ökad fukthalt i marken, antingen direkt (regn) eller vid smältning (snö). Kondensation (dagg) och förångning av vatten/fukt på eller nära markytan innebär direkt en energitransport till respektive från marken, vilket kan påverka temperaturen avsevärt [30]. Även om mängden vatten ofta är relativt liten kan ändå effekten av denna mängd vara påtaglig eftersom förångningsvärmens för vatten är stor.

Markens beskaffenhet och eventuell ytbeläggning är avgörande för påverkan från nederbörd. För dränerande material kan effekten av nederbörd vara kortvarig, medan t.ex. lerjordar kan hålla kvar fukten under lång tid. I stadsmiljö är vanligtvis en stor del av marken ovanför fjärrvärmerör belagd med asfalt. Ett intakt asfaltskikt hindrar effektivt befuktning av marken.

Studier av kopplingen mellan nederbörd, värmeförluster och deras detektion förefaller att saknas, liksom studier avseende inverkan från kondensation och förångning. En djupgående studie av dessa effekter blir mycket omfattande, och en sådan undersökning ligger sannolikt utanför vad som kan anses rimligt ur ett fjärrvärmeperspektiv. Däremot är det mycket intressant att med hjälp av mätningar studera dessa effekter och deras inverkan

på möjligheten att använda flygburen IR. En fråga är t.ex. hur lång tid efter regn som man behöver vänta innan tillförlitliga IR-mätningar kan göras.

3.5 IR-teknik för detektion av värmeförluster från fjärrvärmerör

I början av 1980-talet inleddes en serie studier av möjligheten att använda IR-teknik för att detektera värmeläckage från fjärrvärmenät. IR-tekniken för civilt bruk var vid denna tid relativt ny och den ansågs lovande på grund av möjligheten att skanna av stora områden utan att behöva gräva upp rören eller göra andra ingrepp.

Anledningen till det ökade intresset för värmeläckage var bland annat de drastiskt ökande energipriserna – en rörisolering som på 1950- och 1960-talen ansågs fullt tillräcklig var inte längre acceptabel. Samtidigt ökade antalet skador på fjärrvärmerören, vilket delvis berodde på otillfredsställande konstruktion, läggning eller skarvning av rören. I vissa fall blev värmeförlusterna avsevärt större än väntat, vilket exempelvis kunde bero på skadad isolering och/eller våt isolering.

Intresset för IR-teknik var vid den tiden särskilt stort i Sverige och Danmark, men även i resten av Skandinavien, Tyskland och USA var intresset stort. Parallellt med IR-tekniken användes också andra metoder för att mäta värmeförluster. Anledningen var dels att analysera möjligheterna med den nya IR-tekniken, men också att avgöra storleken på värmeförlusterna för olika typer av rör/rörisolering. Man var också mycket intresserad av att mäta faktiska förluster från rör under drift. Några av de mest centrala studierna med direkt eller indirekt anknytning till IR-teknik är, i kronologisk ordning:

- ”Simulation of Heat Losses and Ground Temperatures for District-heating Culverts: Comparison with Field Experiments for Well Insulated, Damaged and Extra Insulated Culverts”, Hagentoft, 1986, [31]
- ”Termografering af fjernvarmeledninger”, Rasmussen, 1987, [42]
- ”Termografering av fjärrvärmenät; Västeråsprojektet – en metodstudie”, Ljungberg m.fl., 1987, [43]
- “Bestämning av värmeförluster i fjärrvärmenät med termografi - simuleringsmodell för noggrannare bildanalys”, Perers och Schmeling, 1989, [44]
- ”Värmeförlustmätning i fjärrvärmenät med termografi”, Perers och Jönsson, 1990, [41]
- ”Quantitative Heat Loss Analysis of Heat and Coolant Distribution Pipes by Means of Thermography”, Jönsson, Zinko, m.fl., 1992, [30]
- ”A comparison of different methods for in-situ determination of heat losses from district heating pipes”, Böhm och Borgström, 1996, [45]
- “Quantitative Heat Loss Determination by Means of Infrared Thermography - The TX model”, Zinko m.fl., 1996, [32]

- “Termo Technology Program – Final report 1993-1997”, Finnish District Heating Association, 1998, [46]

Efter Hagentofts studie 1986 [31] stod det klart att framför allt äldre kulvertar ofta var förknippade med våt och/eller skadad isolering som avsevärt ökade värmeförlusterna. Studien visade att markens termiska egenskaper har stor betydelse för temperaturdistributionen i ett stort område omkring rören, och därmed också för värmeförlusterna, så snart isoleringen inte är felfri. I studien gjordes också en ansats att ta hänsyn till frysning och smältning av snö samt tjäle.

Det sammanfattande målet med att använda IR-teknik i studierna ovan var i första hand att på ett kostnadseffektivt sätt kunna utföra *statuskontroll och detektera skador/värmeläckage* på fjärrvärmerör. I Danmark användes IR-teknik under tidigt 1980-tal [42] för att leta efter läckor, men det är oklart vilken teknik som användes och vad undersökningarna resulterade i. Den första större studien var också dansk [42], och den presenterades 1987. Studien syftade till att undersöka den praktiska användbarheten av IR-teknik. Mätningar genomfördes på parallella oisolerade stålrör speciellt nedgrävda för ändamålet, med möjlighet att reglera tillförd effekt. Mätningarna kompletterades med simuleringar för att kunna jämföra yttemperaturer och avgiven effekt. Trots kontrollerade förhållanden visade resultaten på en stor osäkerhet vid jämförelse mellan faktisk och beräknad värmeförlust.

Senare samma år presenterades ”Västeråsprojektet” [43], vilket var ett intressant pionjärbete eftersom flygburna system introducerades (värmekamera och svepradiometer monterade på helikopter respektive flygplan). Värmekamera monterades även på bil med teleskopmast. En stor del av rapporten ägnas åt beskrivning av mätningarna, rutiner för flygningar och datainsamling, och för analys av vädrets inverkan på mätningarna. Även om dåtidens teknik kraftigt begränsade möjligheterna för flygburen IR-teknik, lyckades man ändå hitta några större värmeläckage. Studien indikerade vissa intressanta slutsatser, exempelvis tecken på att olika rörkonstruktioner kan ge olika termisk signatur på markytan, att förslitning av t.ex. asfalt på markytan kan ge märkbar påverkan på ytans emissivitet, och att stabila väderförhållanden är mycket viktiga för att ge tillförlitliga mätningar.

Studierna av Perers, Schemilng och Jönsson 1989-90 [41, 44] kan ses som ett försök att utöka Hagentofts studie med användning av IR-teknik. Enbart markbaserad kortvågig IR-teknik användes, vilket resulterade i en stor inverkan av ytans vinkelberoende emissivitet. Tillsammans med mycket ogynnsamma väderbetingelser (sträng kyla, pågående frysning av mark och därmed närmast isoterm markyta) resulterade detta i att syftet med studien - att studera möjligheten att kvantifiera läckage med IR-teknik - inte kunde uppfyllas.

I de följande studierna [30, 32, 45, 46] gjordes ytterligare mätningar under väl kontrollerade former, men bara med markbaserad IR-teknik kompletterad med simuleringar. Man konstaterade att det fanns en möjlighet att använda den

s.k. TX-modellen för att kvantifiera värmeläckage med hjälp av IR-teknik, även om slutsatsen endast gällde ideala förhållanden under väl kontrollerade experiment. (Värt att kommentera TX-modellen ytterligare?) Slutsatserna i studierna klargör att potentialen med kvantifiering av värmeläckage från fjärrvärmerör med IR-teknik finns. Samtidigt konstateras att kunskap saknas för flera mycket viktiga områden som således behövde utredas och analyseras ytterligare för att göra metodiken praktiskt tillämpbar. Den slutliga rekommendationen i [32] är att ”ytterligare utvärdera” metoden i kommande studier syftande till att integrera mätning och tolkningshjälpmedel, för att på så sätt göra metoden praktisk applicerbar. Exempel på områden där kunskapen är otillräcklig är, enligt studierna [30, 32, 45, 46]

- Inverkan från ojämnheter i markytan
- Vegetation på markytan
- Väderförhållanden timmar och dagar före mätningen
- Markens värmekonduktivitet och inverkan av fukt
- Nederbörd
- Kondensation och förångning
- Vindförhållanden timmarna innan mätning
- Inverkan över tid från solstrålning och långvågig strålning från atmosfären/omgivningen

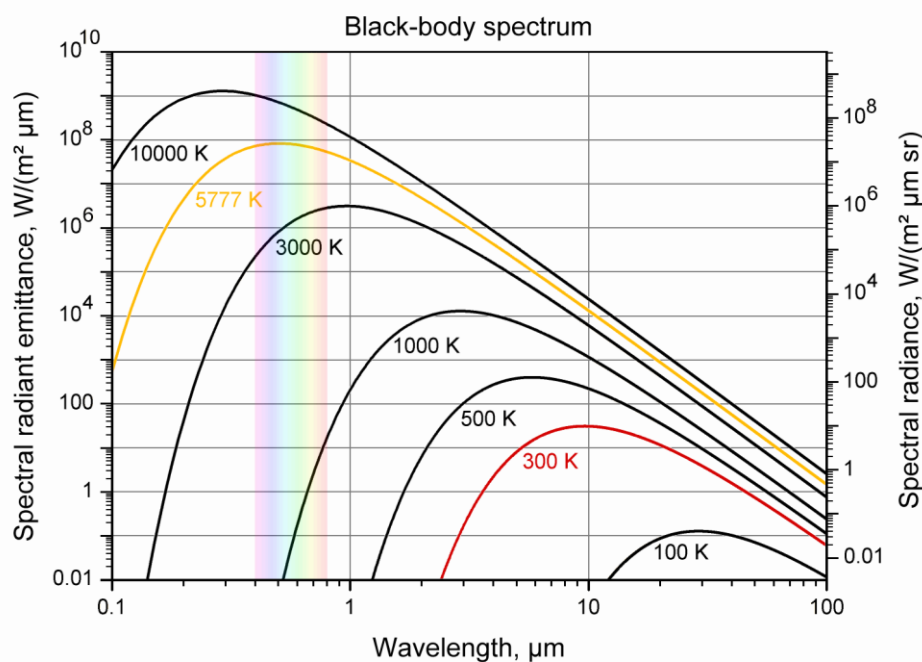
3.6 Fjärrkyla

En viktig skillnad mellan fjärrvärme och fjärrkyla är den ”omvända temperaturgradienten” och den här till kopplade kondensationsproblematiken. Om mantelröret inte är helt tätt så kommer temperaturgradienten att ge en fuktransport in genom mantelröret med kondensation i isoleringen som följd. Detta leder till en avsevärd försämring av isolerförmågan och dessutom stor risk för korrosion [9]. I tidigare experiment har konstaterats att temperaturdifferensen på markytan oftast är för liten för att ge en säker detektion [30]. Man bör notera att slutsatsen har dragits utgående från resultat baserade på dåtidens teknik med väsentligt sämre temperatur- och spatial upplösning.

4 BESKRIVNING AV IR-TEKNIKEN

4.1 IR-strålning

Termografi, även kallad värme- eller termofotografering, är en metod där man omvandlar ett objekts infaröda strålning (IR-strålning) till en värmebild. Vid termografering används en så kallad värmekamera som registrerar den infraröda strålning som ett objekt avger. Värme eller infraröd energi är strålning som inte är synligt eftersom våglängden är för lång för att upptäckas av det mänskliga ögat. Den infraröda strålningen är en del av det elektromagnetiska spektrum som vi upplever som värme. Till skillnad från vanligt ljus avger alla objekt som är varmare än absoluta nollpunkten strålning i infraröda våglängdsområdet. Även mycket kalla objekt, till exempel isbitar, avger infraröd strålning. I Figur 4.1 visas strålningens natur. Ett objekt med en temperatur på exempelvis 300 K, röd kurva, emitterar strålning ned till ca 2,5 mikrometer. Det mänskliga ögat är känsligt mellan 0,35 till 0,75 mikrometer, just där solen strålar som mest. Det betyder också att ett objekt behöver ha en temperatur på omkring 600 K för att det mänskliga ögat ska kunna uppfatta den emitterade strålningen.

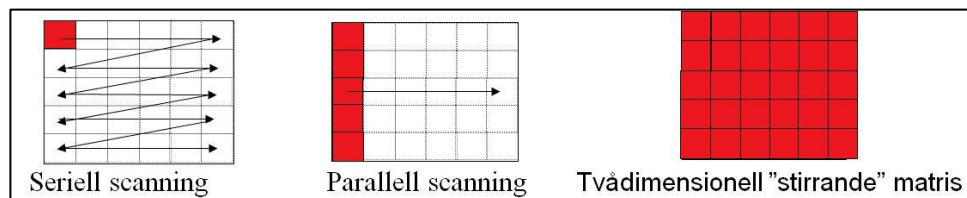


Figur 4.1. Bild från litteraturen som beskriver strålningens natur. Ett objekt med exempelvis en temperatur på 300 K, röd kurva, emitterar strålning ned till ca 2,5 mikrometers våglängd.

4.2 IR-kameratekniken

En värmekamera är ett beröringsfritt mätinstrument som registrerar IR-strålning (värmestrålning) och omvandlar informationen till en elektronisk signal som processas till en värmebild med temperaturuppgifter. Värme som registrerats av värmekameran kan bli noggrant kvantifierad vilket gör det möjligt att övervaka termisk prestanda och också identifiera och utvärdera graden av värmerelaterade problem. Metoden att med en värmekamera registrera värmestrålning och omvandla den till en värmebild med temperaturuppgifter kallas för termografi eller värmefotografering. Bilden som sparas kallas även en radiometrisk bild eller IR-bild. Idag är hela proceduren normalt helt digital och bilden är ofta upplöst i 16 bitars information.

IR-kameror, eller värmekameror, har varit kommersiellt tillgängliga sedan 1960-talet. Mätande värmekameror för flygburna applikationer har i praktiken endast varit tillgängliga i drygt ett decennium. Det är framförallt tekniken med matrisdetektorer där hela bilden registreras samtidigt som medfört detta. Tidigare fanns scannande system med 1-pixel eller en hel pixelrad vilket medförde stora krav på positioneringsutrustningen för att möjliggöra ett acceptabelt resultat från flygburna system, se figur 4.2.

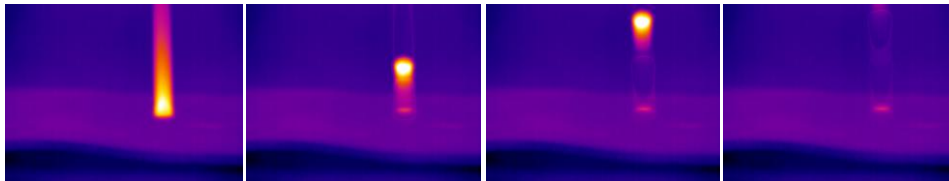


Figur 4.2. Skillnader mellan hur olika mätande IR-kameratekniker registrerar sina bilder. Från vänster en 1-pixel teknik med speglar som läser in bilden, mitten en rad-detektor, den högra är den modernaste sk FPA- eller matrisdetektorn.

Dagens matrisdetektorer kan byggas i storlekar upp till 1-Megapixel-storlek. Typiska detektorstorlekar är 320*240 pixlar eller 640*512 pixlar, även storlekar upp till 1280*1024 pixlar finns numera i mätande värmekameror.

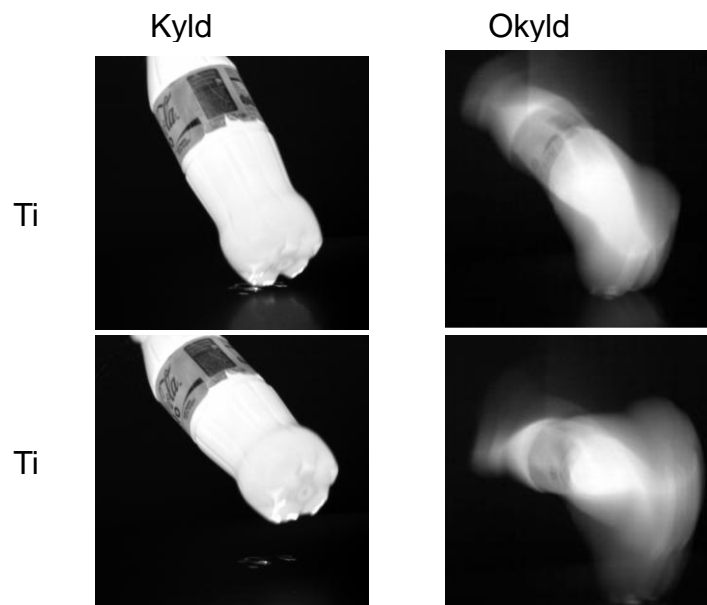
En annan skillnad mellan värmekamerorna är på detektornivå där det finns två huvudfamiljer, fotondetektorn och bolometer-detektorn. Före år 2000 var det fotondetektorn som var vanligast. Fotondetektorn är normalt nedkyld till ca -73 K (-200°C), vilket ger den överlägsen prestanda men även ett tillhörande kylsystem som kan innebära praktiska nackdelar. Bolometerdetektorn är en okyld teknik som fungerar utan kylsystem i rumstemperatur, vilket gör den lämplig till mindre kostsamma och handhållna system. En stor nackdel med bolometer-tekniken är dess tidskonstant för bildinläsning av en bild. Ett vanligt värde ligger runt 10 millisekunder per bild och är konstant, att jämföra med fotondetektorns integrationstid som är variabel ned till mikrosekundnivåer.

Detta ger bolometer tekniken en kraftig begränsning när man rör kameran eller objektet rör sig vid registreringen. I Figur 4.3 visas hur en bolometerkamera uppfattar när man släpper en varm stålkula från 1m höjd mot ett golv. En motsvarande bildserie med en fotondetektor hade blivit knivskarp.



Figur 4.3. Bildserie som visar en varm stålkula som släpps från 1m och träffar golvet och därefter studsar upp. Notera rörelseoskärpan som okylda kameror och dess bolometerdetektor ger.

Nedan i figur 4.4 visas skillnaden när en kyld fotonkamera och en okyld bolometerkamera samtidigt registrerar en flaska som släpps från en viss höjd och strax därefter studsar upp från ett bord.



Figur 4.4. Skillnaden när en kyld fotonkamera och en okyld bolometerkamera samtidigt registrerar en flaska som släpps från en höjd och strax därefter studsar upp från ett bord.

För att kunna analysera IR-bildmaterial och kunna behålla god kvalitet på bildens radiometriska information bör man alltså vid flygtillämpningar, med en hög relativ hastighet relativt marken, använda en fotondetektor.

Temperaturkänsligheten hos båda detektortyperna är god. Man kan med en bra bolometerkamera urskilja temperaturskillnader i bilden ned till ca 30 mK och för en bra fotonkamera ned till ca 15 mK. I båda fallen är känsligheten ingen faktor som begränsar tillämpningar inom området fjärrvärmeapplikationer.

4.3 Mätprincip vid flygburna registreringar

Ett flyguppdrag planeras utifrån hur många kilometer fjärrvärmeledning som man skall undersöka. Parametrar som bl.a. behöver bestämmas är antalet flygstråk, flyghöjd och flyghastighet. Speciell hänsyn tas till krav som kan ställas på det registrerade materialet ur analysynpunkt. Ombord flygplanet är monterat värmekamera samt datorer för styrning av datainsamlingen och för lagring av värmebilder. Det finns även system för lagring av planets position och vinklar vid varje bild. Utrustning för att mäta väder, marktemperatur och värmestrålning (något oklart – precisera ev) bör placeras på någon lämplig plats eller lämpliga platser på marken. För att säkerställa bra mätförhållanden är det angeläget att marken är fri från snö och frodig växtlighet. Vid genomförandet bör ambitionen vara att datainsamlingen utförs under gynnsamma förhållanden, vilket ofta är under natten eller tidig morgon. Ett normalt förfarande är att man förprogrammerar de positioner i luften som man önskar registrera en bild ifrån för att säkerställa att hela det aktuella området registreras och låter flygplanet, via sitt GPS-system, skicka en trigg-signal till IR-systemet att registrera en bild och dess positioneringsdata. Det går även att låta registreringen rulla fritt, men då ökar efterbearbetningen då en stor mängd data registreras i onödan.

4.4 Efterbearbetning av data

För att säkerställa att data- och IR underlaget medger att vidare analys är möjlig behöver ett antal kontroller genomföras.

I det första steget efter registreringen bör data kvalitetsgranskas för att säkerställa att de olika sensorerna överensstämmer vad gäller krav på kvalitet. All information från de olika systemen bör vara tidssynkroniserad för att underlätta fortsatt analys. I nästa steg georektifieras samtliga IR-bilder. Det innebär att bilden räknas om till ett lodrätt perspektiv och att markkoordinater bestäms för alla bildpunkter. Efter georektifieringen kan bilderna om så önskas läggas samman till en bildmosaik som möjliggör en bättre översikt över det avbildade området. Man bör vara uppmärksam på att vid georektifiering kan den radiometriska informationen gå förlorad när man manipulerar bilderna. Därför behöver det radiometriska dataunderlaget hanteras med klokhet. Eventuella kompletterande mätsystem, t.ex. markreferensstationer sammanställs och tidssynkroniseras även med IR-materialet.

5 TILLGÄNGLIG TEKNIK

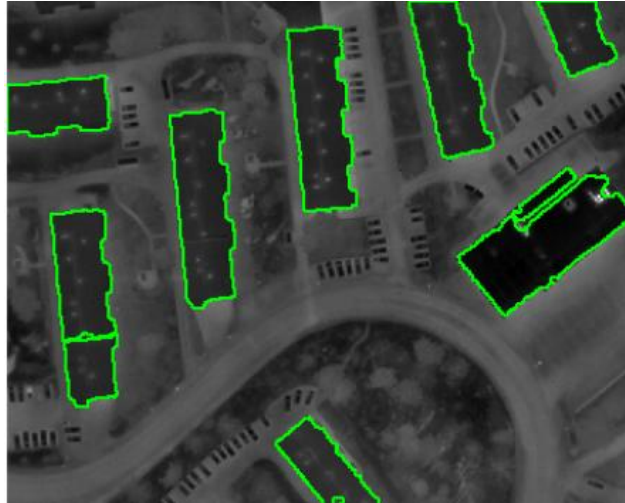
5.1 Teknikens status idag

Allmänt finns idag ett antal metoder för att registrera fjärrvärmeläckage på. Metoder som bygger på förändring av elektrisk impedans eller frekvenssvar används idag i nya rör, fast installerat i PUR isoleringen. Erfarenheten visar dock att tillförlitligheten minskar med tiden, dels på grund av åldring av ingående material, dels beroende på förändringar i FV-nätet t.ex. tillbyggnad och reparationer men också pga skador. Nivåvakter i brunnar är en annan vanlig metod som även relativt lätt går att eftermontera på gamla nät. Andra metoder kan vara akustiska eller kemiska. Det finns även möjligheter att använda markpenetrerande radar, med eller utan doppler. Den sistnämnda är än så länge en relativt ny metod och den befinner sig fortfarande på FoU stadiet. IR-teknik har också en omfattande användning idag. Man använder ofta en enklare handburen värmekamera på plats för att finlokalisera misstänkta läckor. Även fordonsburna IR-system har funnits relativt länge och används fortfarande.

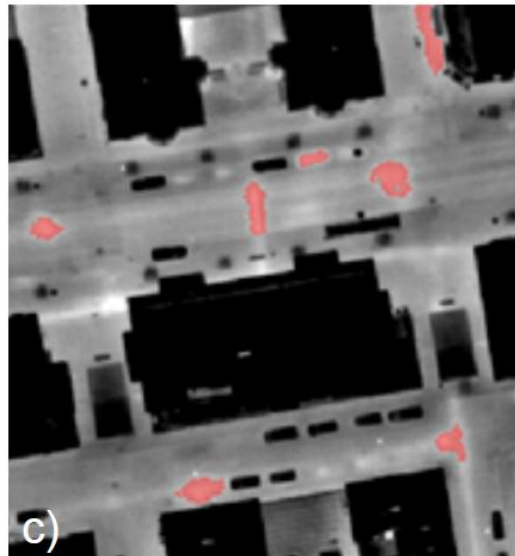
Flera av metoderna har utvecklats under årtionden med flerårig forskning. Många av metoderna ovan är också bra eller t.o.m. mycket bra på att detektera vattenläckor i FV-nätet. Gemensamt för de ovanstående metoderna är dock att de är lokala. Det är mycket svårt och i många fall omöjligt att skapa en helhetsbild av statusen på hela nätet med rimliga resurser.

IR-registrering från luften har däremot möjligheten att registrera hela FV-nätet, oavsett nätets ålder och typ av installerad utrustning. Större läckor som ger en stor övertemperatur på markytan kommer upptäckas omedelbart. Medan de något mindre först behöver ett metodiskt utvärderingsarbete av datamängderna för att upptäckas. Utvecklingen av analysmetoderna befinner sig emellertid i ett tidigt skede men det har redan visat att det finns en stor potential att upptäcka såväl vatten- som energiläckor från hela FV nät. Detektionsalgoritmerna för IR-tekniken kan utvecklas och anpassas för olika områden som exempelvis att upptäcka byggnader, se Figur 5.1 eller för såväl energi- som vattenläckor i FV-nät, se figur 5.2. I båda fallen krävs emellertid ett omfattande utvecklingsarbete.

Fortsättningsvis diskuteras enbart IR-tekniken för fjärrvärmeområdet.



Figur 5.1. En preliminär studie för detektion av byggnader med avancerad IR-teknik [6].



Figur 5.2. En preliminär studie för detektion av energiläckage med avancerad IR-teknik [6].

5.2 Tillgängliga flygburna IR system

Det finns IR-system såväl i satelliterna som bevakar jordens förändringar (t.ex. miljöförändringar) som i flygande laboratorier i statsfinansierade militära och/eller civila projekt. Dessa system är tyvärr inte lämpliga eller ens tillgängliga för fjärrvärmeområdet.

På kommersiell basis finns ett fåtal flygande IR-system i Europa. De flesta använder en helikopterplattform och är utvecklade för andra tillämpningar såsom kraftledningsinspektion eller användning vid miljö- och

naturkatastrofer. Det finns dock några system, men med varierande kvalitet, som är monterade i vanliga flygplan och bl.a. används till att registrera infrastruktur (byggnader, miljö, fjärrvärmenät).

6 ETT EXEMPEL UR VERKLIGHETEN

6.1 Introduktion

Detta kapitel beskriver några av de effekter som är väsentliga för att kunna detektera och kvantifiera värmeförluster från fjärrvärmenät. Detta kapitel är ett exempel på var tekniken befinner sig idag. Det är i huvudsak Termisk Systemtekniks modell som beskrivs. Företaget har en omfattande forskarbakgrund från ett liknande militärt område, där applikationen under åren 1995-2007 var bland annat nedgrävda landminor av olika typer. Tekniken har sedan 2006 anpassats och tillämpats inom helt andra applikationsområden såsom exempelvis tillståndskontroll av hela fjärrvärmenät. Denna applikation skedde initialt i ett gemensamt projekt med Göteborg Energi.

6.2 Genomförandefaser

Ett uppdrag genomförs i två tydliga faser, datainsamling och analys.

6.2.1 Datainsamling

Denna del innebär att sensorer installeras samt att datainsamling planeras och genomförs. Eventuellt behöver gynnsamt väder inväntas. Markbaserade sensorer för väderdata, temperaturreferensdata samt marktemperaturer installeras på plats. Väderdata är till exempel lufttemperatur, luftfuktighet, vindhastighet, vindriktning, solinstrålning och regn. Data från flygburna sensorer utgörs av värmebilder från en kamera monterad i flygplan samt GPS- och positionsdata för flygplanet. Data kvalitetsgranskas och sammanställs.

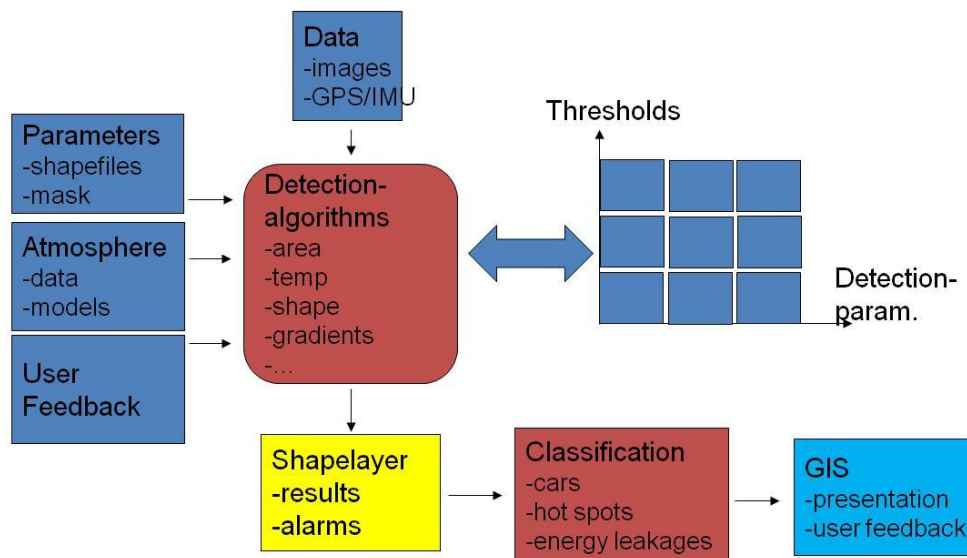
6.2.2 Analys

IR-bilderna georektifieras och sätts samman till en mosaik som i kombination med ett visualiseringsverktyg ger bättre överblick av materialet. Mjukvaran möjliggör ändringar i bildernas dynamik för att framhäva kontrasterna. Befintligt fjärrvärmenät kan importeras från shape-filer (ett standardformat inom GIS-området) och överlagras på bilderna. Visualiseringsverktyget ger ett kraftfullt stöd för manuell/visuell inspektion av hela eller valda delar av IR-mosaiken. Ett antal beräkningar genomförs som utifrån en modellansats tar fram områden som avviker från lokal bakgrund. Algoritmerna bygger på teoretiska modeller av hur värmekamerabilder av energi- eller vattenläckor ser ut. Ett mycket väsentligt resultat är att den tidsödande manuella/visuella inspektionen begränsas till att i huvudsak omfatta de delar av materialet som pekats ut. Resultaten klassas också i olika nivåer och genereras i ett antal shape-lager. Utan denna typ av analysmjukvara är det mycket tveksamt om

metoden är användbar för stora områden.

Varje utpekade område går även att analysera med avseende på temperaturprofil.

Ett antal algoritmer tar fram områden som avviker från den lokala bakgrunden, med avseende på vissa kriterier, och som kan härröra från energi- och/eller vattenläckage. Resultaten sparas som ett antal lager i shape-filer, och kan därefter överlagras det sammanställda IR-materialet eller importeras till mjukvaror som hanterar shape-filer för vidare visualisering eller analys. I figur 6.1 visas schematiskt hur analys och utvärdering hänger samman.

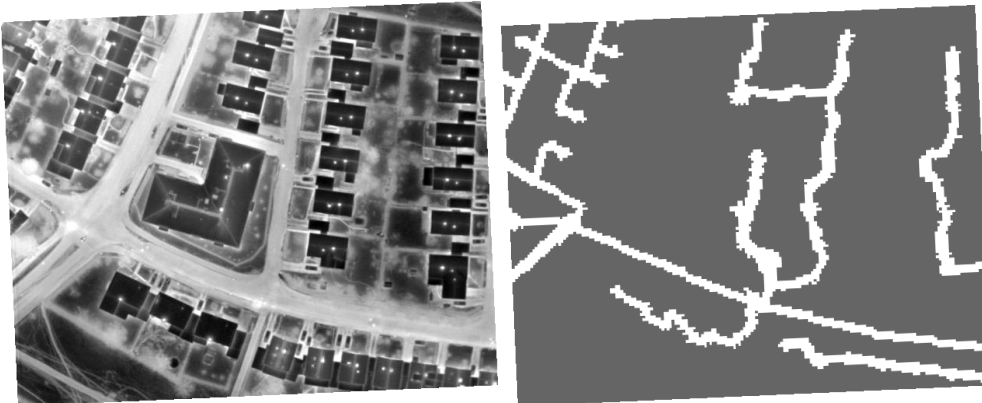


Figur 6.1. Schematisk skiss över en typisk analysmodell.

I Figur 6.1 symboliserar de mörkblå rutorna indata till beräkningarna. I de mörkröda rutorna sker beräkningarna. Den gula rutan är resultatet av alla detekterade områdena som läggs in i ett stort shape-lager. Den ljusblå rutan är resultaten, som efter att falsklarmen reducerats levereras i ett eller flera shape-lager till kundens eget GIS-system eller läggs in i visualiseringsverktyget beskrivet ovan. Algoritmen använder modeller och data för atmosfären för att analysera informationen från IR-data, samtidigt som GPS/IMU används för att exakt positionera IR-informationen ovanpå kartmaterial av fjärrvärmenätets sträckning. Ett antal parametrar används för att förbättra detektionen, och reducera antalet ointressanta träffar från t.ex. varma bilar. Systemet innehåller också möjligheter att rangordna och presentera intressanta ”träffar”.

Vid analysen är det lämpligt att man utifrån vetskapen om var FV-nätet är lokaliserat även analyserar området runt FV-ledningen med en korridor med några meter i bredd. I Figur 6.2 visas en georektifierad IR bild och dess motsvarande maskning av var FV-nätet är lokaliserat. Detta reducerar analyskomplexiteten och tidsåtgången avsevärt. Dessutom kan en mer korrekt

statistisk analys genomförs med förhoppningsvis ett mer träffsäkert detektionsvar.



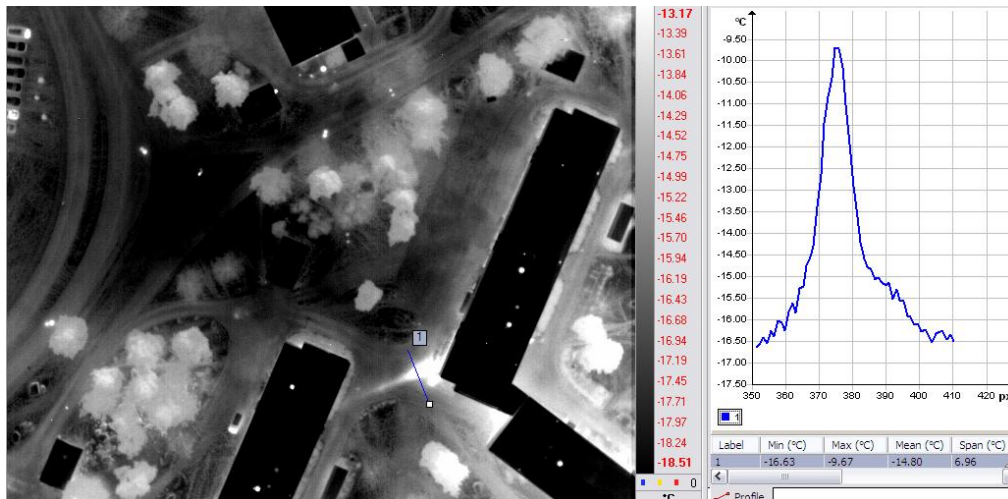
Figur 6.2. Vänster, georektifierad IR-bild och dess motsvarande geo-maskning, höger, av var FV-nätet är lokaliserat. Det är endast inuti maskningen som man behöver analysera.

6.3 Några verkliga IR-bilder

Nedan visas några verkliga radiometriska (kalibrerade) IR-bilder som är registrerade från olika flygningar över svenska städer från 800 m höjd. Med den aktuella optiken avbildar varje pixel ca 25 cm på marken, dvs pixelupplösningen är 25 cm. Denna upplösning är väl avvägd då den ger tillräcklig upplösning för att avgöra och säkerställa vad som exempelvis är brunnslock och bilar m.m.

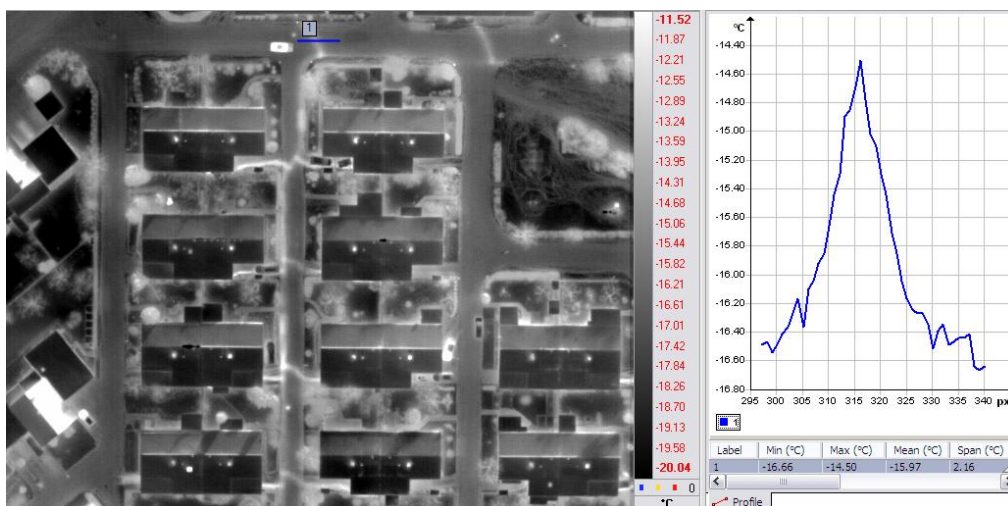
Bilderna visar tydligt områden med temperaturförhöjning som kan indikera ökat värmeläckage, tillsammans med grafer som visar temperaturen längs en linje tvärs över det intressanta området. I IR-bilderna motsvarar ljusa nyanser en hög temperatur och mörka en låg temperatur. Det bör noteras att temperaturskalan är olika i IR-bilderna. I vissa fall kan gråskalan ersättas med en färgskala för enklare tolkning, men temperaturvärdena är dock desamma.

Figur 6.3, visar en kulvert mellan två hus som har en kraftigt förhöjd temperatur ovan kulverten. Grafen till höger i Figur 6.3 visar temperaturprofilen över den blå linje som är utlagd i bilden. Temperaturdifferensen på marken är ca 6,5 °C mellan centrum ovanför kulverten och kanterna några meter bredvid kulverten.



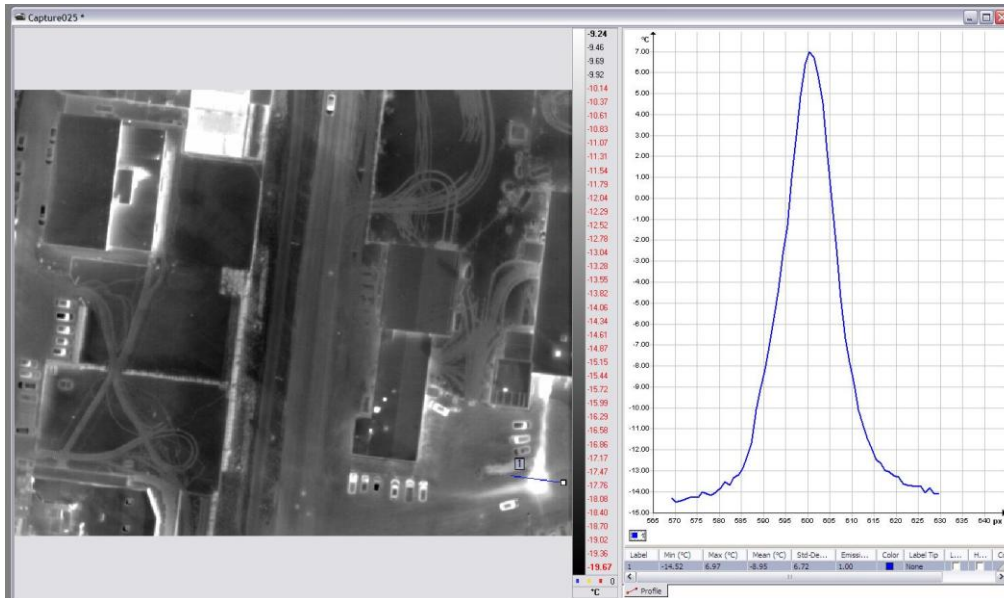
Figur 6.3. IR-bild och tillhörande graf som visar temperaturen längs en linje tvärs över det intressanta området (ljusa delen vid hörnet på huset). Temperaturen rakt ovanför röret är ca 6,5 °C högre än marken bredvid röret.

I Figur 6.4 visas ett klenare FV-nät, troligen av typen aquarör, som tydligt påverkar ytttemperaturen ovan kulverten. Den motsvarande temperaturdifferensen är här ca 2,0 °C.



Figur 6.4. IR-bild och tillhörande graf som visar temperaturen längs en linje tvärs över det intressanta området (beläget i överkanten av bilden). Temperaturen rakt ovanför röret är ca 2 °C högre än marken bredvid röret.

I Figur 6.5 visas ett bekräftat stort medialäckage i ett rörsystem med uppskattningsvis en rördiameter på ca 40 mm. Här är temperaturdifferensen längs den blå linjen ca 21 °C.



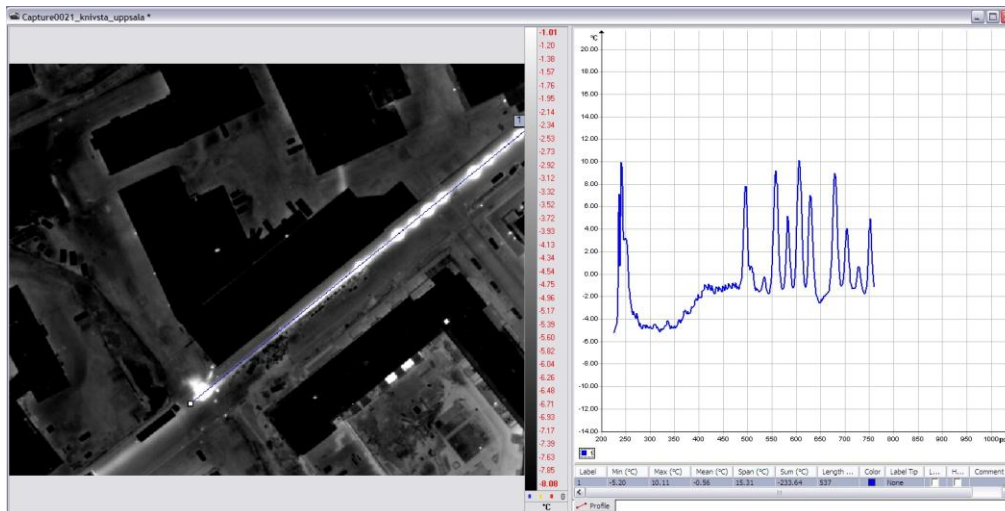
Figur 6.5. IR-bild och tillhörande graf som visar temperaturen längs en linje tvärs över det intressanta området (beläget i ovankant av bilden). Temperaturen rakt ovanför röret är hela 21 °C högre än bredvid röret.

Den tydliga temperaturförhöjningen enligt profillinjen i Figur 6.5 visade sig vid grävning vara ett rejält medialäckage på ledningen, se Figur 6.6.



Figur 6.6. Uppgrävning av det varma området.

Figur 6.7 visar en dåligt isolerad ångledning som avger stora mängder energi. Bitvis kan varje skarv detekteras med en temperaturdifferens på ca 15-20 °C.



Figur 6.7. IR-bild och tillhörande graf som visar temperaturen längs en linje tvärs över det intressanta området (ljusa delen vid hörnet på huset). Temperaturen rakt ovanför röret är ca 6,5 °C högre än marken bredvid röret.

6.4 Modellering och simulering av

temperaturdifferenser ovan ledning

En väl beprövad simuleringsmodell, som bland annat har använts i minspaningsprojektet, har använts för att analysera vilka IR-nivåer som förväntade fel såsom fuktig isolering och rena vattenläckage kan ge upphov till. Modellerna är implementerade och lösta i Matlab och Comsol Multiphysics. Modellerna används idag som stöd vid framtagning och nivåbestämning av de parametrar som används i detektionsalgoritmerna. Modelleringen och simuleringen genomförs med Finita elementmetoden (FEM), vilket är ett mycket effektivt matematiskt verktyg för att studera komplexa värmeproblem med olinjära randvillkor [47, 48].

Ett antal simuleringar har genomförts för att påvisa och ”ringa in” de förväntade IR-kontraster som kan förväntas vid såväl fungerande ledning som ledning med värme- och/eller vattenläckage. Vid dessa simuleringar har endast några parametrar studerats. Som tidigare påpekats i rapporten finns det därför ett mycket stort behov av ytterligare forskning för att utreda och implementera andra faktorer som ännu inte har beaktats. Det saknas helt enkelt mätdata för att kunna teoribilda kring de fenomen som ger upphov till en temperaturdifferens. I nästa steg är visionen att kunna uppskatta kostnaden för ett motsvarande läckage i form av energi och/eller vatten.

I rapporten exemplifieras ett fåtal simuleringar för att schematiskt indikera hur förläggingsdjup och fukthalt i isolering kan påverka den uppkomna temperaturdifferensen på markytan och därmed möjligheten att framgångsrikt utnyttja IR-tekniken. För mer utförliga beskrivningar av modeller och simuleringar med verifierande mätningar hänvisas till ex. [26, 47], där två

andra tillämpningsområden än fjärrvärmeområdet har behandlats. Följande simuleringar visar temperaturfördelningen i rörens isolering, kulverten, marken och markytan. De preliminära simuleringsmodellerna är uppsatta för att efterlikna relevanta situationer och används tillsammans med modeller för att beskriva bl.a. inverkan av väder/vind och markens beskaffenhet. De i kapitel 3 redovisade ekvationerna är grunden i modellerna.

Den FEM-modell som används i simuleringarna visas i Figur 6.8 med exempel på tillhörande isotermer. Modellen har de yttre måtten 5m i bredd och 4m i djup innehållande antingen en betongkulvert eller en PUR-isolerad ledning. Några av de använda konstanterna och variablerna för modellen redovisas i Tabell 6.1.

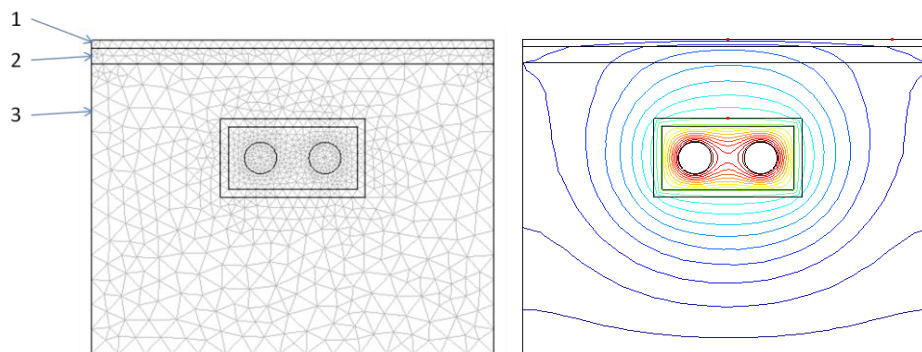
Tabell 6.1. Typiska grundvärden använda vid simuleringar med FEM-modellen [36].

Parameter	Värde
Densitet (kg/m ³)	1600
Specifik värme (kJ/kgK)	837,2
Värmeledning (W/mK)	2,51
Initial temperatur (°K)	283,15
Densitet (kg/m ³)	2200
Specifik värme (kJ/kgK)	880
Värmeledning (W/mK)	1,3
Stefan Boltzmans konstant	5,67E-08
Ytans absorptionskoefficient	0,62
Parametar vid beräkning av konvektiv värmeövergångskoefficient	5,7
Parametar vid beräkning av konvektiv värmeövergångskoefficient	3,8
Markens emissivitet	0,9
Himlens emissivitet	0
Densitet (kg/m ³)	1,21
Specifik värme (kJ/kgK)	1007
Värmeledning (W/mK)	0,026
Densitet (kg/m ³)	999
Specifik värme (kJ/kgK)	4180
Värmeledning (W/mK)	0,6
Vindhastighet (m/s)	4
Luften Temperatur (°C)	5 till 11
Himlens temperatur (°K)	363,15
Densitet (kg/m ³)	0,029
Specifik värme (kJ/kgK)	59
Värmeledning (W/mK)	1400
Fjärrvärmevattnets temperatur (°K)	373

Många förenklingar måste införas för att hålla komplexiteten nere på en acceptabel nivå. T.ex. antas att det vid markytan sker ett konvektivt

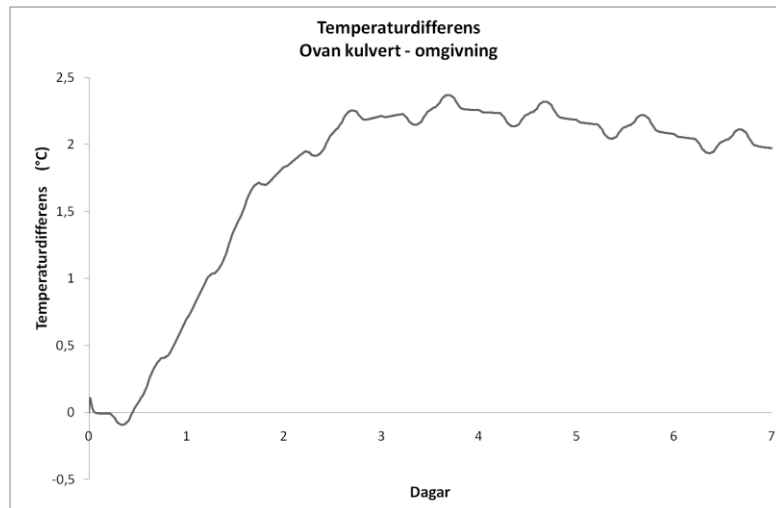
energiutbyte med en konstant vind med hastigheten 3 m/s. Detta antagande är givetvis en förenkling av verkligheten, men det ger ändå acceptabla svar vid simuleringen. Vidare antas att lufttemperaturen varierar sinusformat mellan en låg nattetemperatur och en högre dagtemperatur t.ex. 5°C och 11°C med högst temperatur mitt på dagen. Temperaturen på fjärrvärmvattnet i rören, är satt till 100°C. Sidorna i modellen antas ha ett kontinuitetsrandvillkor. (Ev bör begynnelsevillkoret beskrivas bättre och vad som händer med tiden)

I Figur 6.8 visas ett exempel för en betongkulvert och hur nodtätheten varierar över tvärsnittet. Modellen består av ca 1000 element och ca 3000 noder. Nodtätheten ökar gradvis från modellens kanter in mot rören för att ge en tillräcklig spatiell upplösning och noggrannhet. Ett tidssteg på 300 s har använts i simuleringarna. Till höger visas ett principiellt exempel på hur temperaturfördelningen i form av ett antal isotermer ser ut efter 6 dygns simulering.



Figur 6.8. Pil 1: Ytmaterial (0,1 m asfalt). Pil 2. Packad sand/grus (0,2 m). Pil 3. Fyllnadsmaterial (sand/grus). Modellens botten är på 4 m djup och bredden 5 m.

För att bestämma hur lång tid modellen behöver för att svänga in sig till en acceptabel noggrannhet genomfördes en simulering av betongkulverten ovan under 7 dygn. Modellen startar ifrån ett jämviktsläge och förväntas efter några dygn inta ett nytt jämviktsläge. Efter 4-5 dygn noteras att simuleringen uppnått ett nytt läge, där temperaturfältet kan betraktas som acceptabelt. I Figur 6.9 visas hur simuleringen har gått från en jämvikt till en annan. Figuren visar differensen i temperatur från en punkt på markytan rakt ovan kulverten med en punkt 2 m bredvid kulverten.

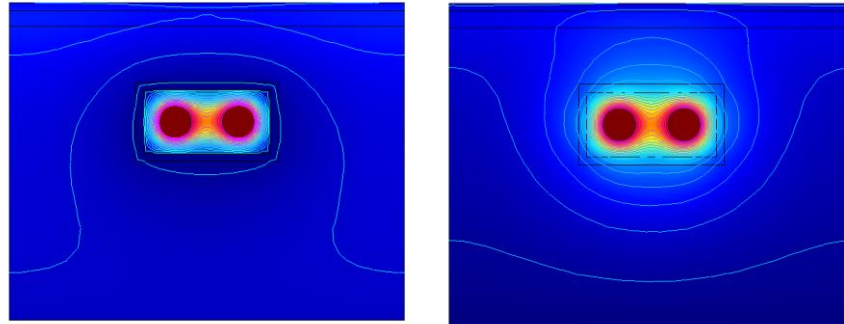


Figur 6.9. Kurvan visar temperaturdifferensen under en 7 dygns simulering mellan en punkt på markan rakt ovan kulverten och en punkt på marken 2 m bredvid kulverten under en 7 dygns simulering. Modellen startar i ett "0-läge" och behöver 4-5 dygn att svänga sig in mot en ny nivå.

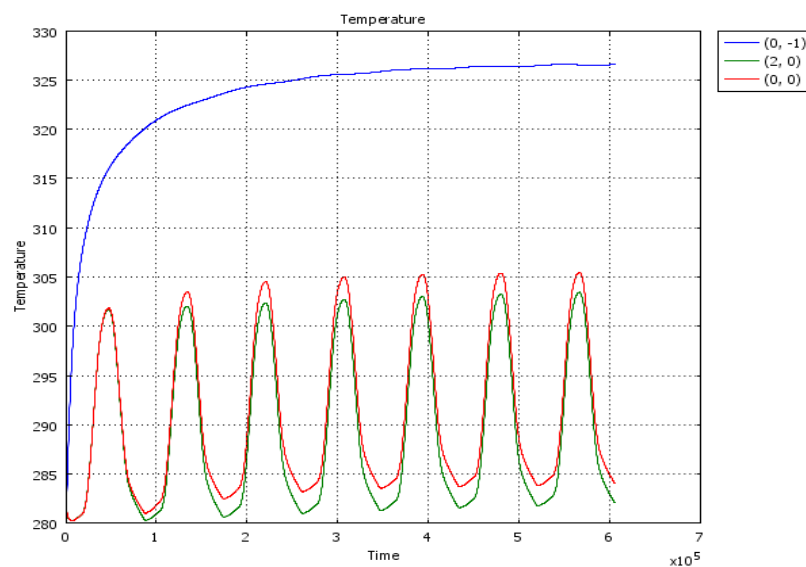
6.4.1 Exempel 1: Betongkulvert

Det första exemplet visar vad som händer om en betongkulvert vattenfylls, vilket är ett i högsta grad relevant exempel. Om ett värmeläckage uppträder tar det en viss tid (storleksordningen några dagar) innan markytan har värmts upp. Figur 6.10 visar hur temperaturfördelningen i kulverten och dess omgivning har ändrats efter 6 dygn från det att kulverten vattenfylldes. Kortslutningen av isoleringen som det inträngande vattnet åstadkommer ger som resultat en mycket stor skillnad i markens temperatur.

I Figur 6.11 visas ett kurvorna på det simulerade resultatet, under 6 dygn, där markytans temperatur räknats fram för en punkt ovanför kulverten (röd) och för en punkt på marken 2 m bredvid kulverten (grön). Skillnaden mellan dessa kurvor motsvarar den kontrast som kan förväntas i en IR-bild. Den blå kurvan är en punkt ovanför kulverten 1 m under markytan och kan användas för att åskådliggöra när marken runt kulverten når jämvikt. I figuren syns tydligt att temperaturen är rejält förhöjd både i och utanför kulverten. Den stora förändringen av ytans temperatur som ett så omfattande värmeläckage ger upphov till kan idag upptäckas och klassificeras utan större problem.



Figur 6.10. Felfri betongkulvert med två rör (till vänster i figuren) och motsvarande kulvert som har vattenfyllts (till höger). De ljusa kurvorna i figuren är 5°C isotermer.



Figur 6.11. Exempel på temporalt resultat under en 6-dygns simulering. Tidsaxeln har enheten sekunder. Temperaturerna på markytan visar en dygnsvariation, men temperaturen 1 m under markytan uppvisar i princip ingen dygnsvariation.

6.4.2 Exempel 2: Olika förläggningsdjup

För att belysa hur påverkan av yttre omständigheter ger olika temperaturdifferenser ovanför kulverten redovisas nedan några modeller och med simuleringar av värmeflödet i marken runt kulverten. Denna modell gäller för PUR-isolerade rör med diametern 400 mm. Samma randvillkor används som i tidigare exempel.

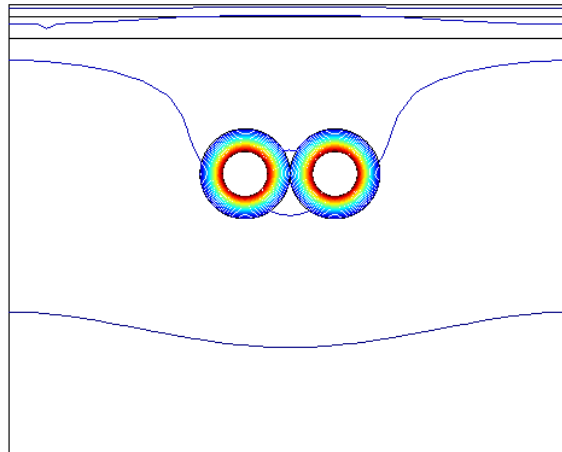
Resultaten nedan är från några simuleringar som belyser olika status på kulverten och dess förläggningsdjup = Z (m). DeltaT är temperaturdifferensen mellan punkten rakt ovanför kulvert och en punkt på marken 2 m åt sidan.

Simuleringen avser stationärfallet. Det är DeltaT som går att mäta med hög noggrannhet från ett flygplan med en värmekamera. DeltaT är också indirekt ett mått på energiläckaget.

6.4.3 Felfritt PUR-rör

I Figur 6.12 visas isotermer som uppkommer runt en oskadad felfri PUR-ledning.

Fall 1. Förläggningsdjup till ovansida Z = 0,5 m.	DeltaT = 0,7°C
Fall 2. Förläggningsdjup till ovansida Z = 0,8 m.	DeltaT = 0,5°C
Fall 3. Förläggningsdjup till ovansida Z = 1,1 m.	DeltaT = 0,3°C

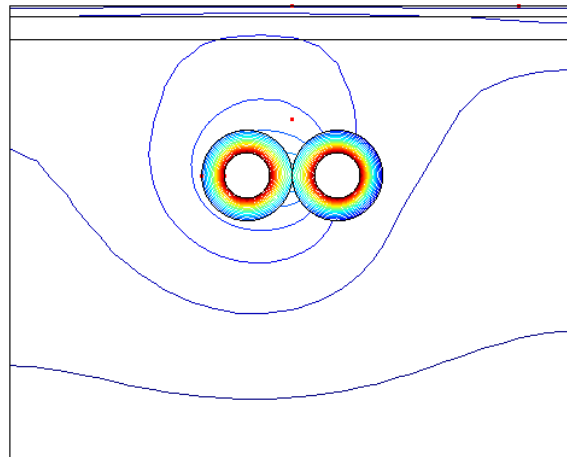


Figur 6.12. PUR-isolerade rör med felfri isolering med normal isolationsförmåga. Bilden visar det principiella temperaturfältet.

6.4.4 PUR rör med förhöjd fukthalt

I Figur 6.13 visas isotermer som uppkommer runt en PUR-ledning med förhöjd fukthalt.

Fall 4. Förläggningsdjup till ovansida Z = 0,5 m.	DeltaT = 1,8°C
Fall 5. Förläggningsdjup till ovansida Z = 0,8 m.	DeltaT = 1,3°C
Fall 6. Förläggningsdjup till ovansida Z = 1,1 m.	DeltaT = 0,8°C

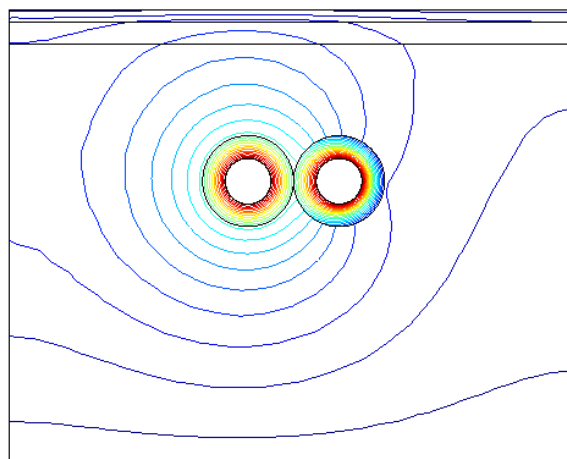


Figur 6.13. PUR isolering med förhöjd fukthalt i vänster rör. Bilden visar det principiella temperaturfältet.

6.4.5 PUR-rör med simulerad vattenläcka

I Figur 6.14 visas isotermerna som uppkommer runt en PUR ledning med simulerad vattenläcka.

Fall 7. Förläggningsdjup till ovasida Z = 0,5 m.	DeltaT = 3,7°C
Fall 8. Förläggningsdjup till ovasida Z = 0,8 m.	DeltaT = 2,8°C
Fall 9. Förläggningsdjup till ovasida Z = 1,1 m.	DeltaT = 1,9°C



Figur 6.14. PUR-isolering med simulerad vattenläcka i vänster rör. Bilden visar det principiella temperaturfältet.

På motsvarande sätt kan man med en genomtänkt modelleringsplanering variera de olika randvillkoren och de fysikaliska parametrarna och simulera olika relevanta fall. Väderparametrarna är kanske de svåraste att simulera eftersom de uppträder stokastiskt och är svåra att parameterisera. Erfarenheter

visar att det krävs ett omfattande experimentell arbete för att förstå samverkan mellan väder och markytans temperatur mm.

6.5 Ett flyguppsdrag

Detta exempel beskriver ett generellt uppdrag och den metodik som Termisk Systemteknik använder idag. Metoden baseras på tidigare forskning under två decennier för lokalisering av nedgrävda landminor. Sedan år 2006 har applikationen anpassats till tillståndskontroll av hela FV-nät, initialt tillsammans med Göteborg Energi. Det finns idag flera andra företag som erbjuder tjänster med flygburna värmekameror. Det verkar dock inte som om man använder ett adekvat analysystem för automatisk detektion och klassifikation av det registrerade IR-materialet för hela FV-nät. Den metodik som beskrivs i den aktuella rapporten grundar sig naturligtvis på vår egen forskning och utveckling avseende såväl minspaning och fjärrvärme-applikationer. De två forskningsområdena uppvisar både stora likheter och stora skillnader. Vi anser oss vara mycket långt framme såväl nationellt som internationellt. I Figur 6.15 visas hur installationen av en IR-kamera med hjälpsystem kan se ut i en Cessna.



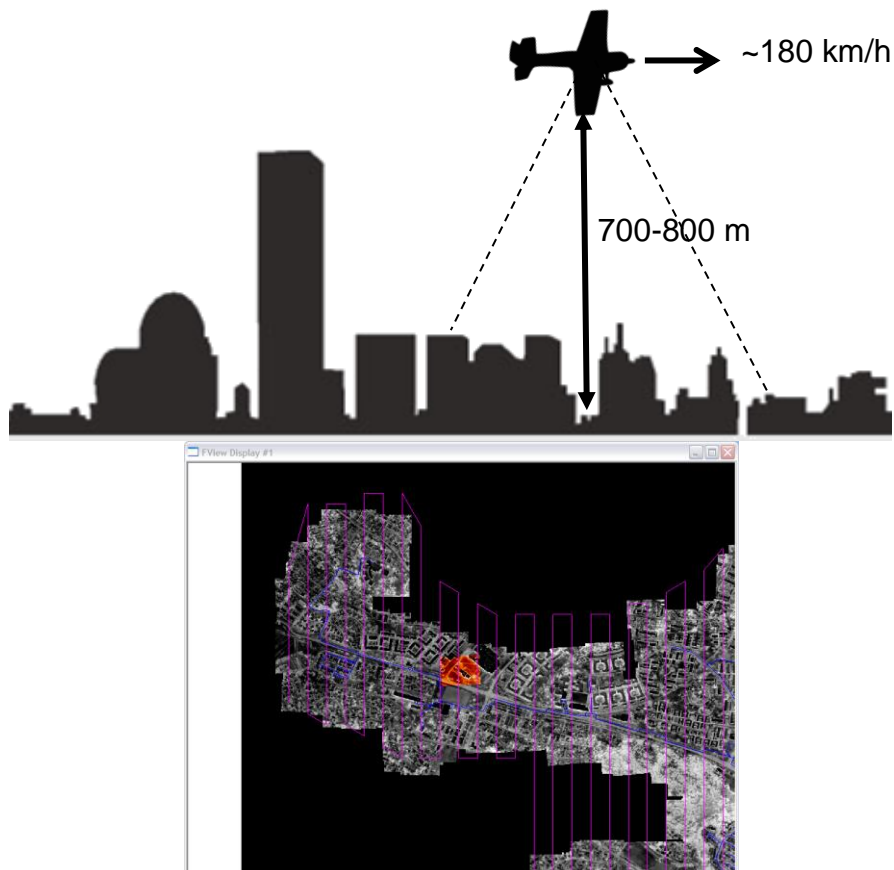
Figur 6.15. Exempel på en IR-kamerainstallation med hjälpsystem i en Cessna. IR-kameran är av typen "fotondetektor-kamera".

6.5.1 Varför datoriserad analys

För en större stad i Norden kan antalet IR-bilder uppgå till ca 20 000 bilder. En människa klarar endast av att analysera ett begränsat antal bilder med bibehållen koncentration, men det räcker inte på långa vägar för denna omfattande datamängd. Ett läckage kan dessutom anta en stor variation av både spatiell och temporal utformning. Det medför också att det är svårt att formulera en enkel matematisk beskrivning som skiljer mellan verkliga läckage och andra varma områden. Därför har en anomalidetektor utvecklats för att upptäcka spatiella variationer och temperaturdifferenser med extremvärden, som kan vara potentiella läcko.. Det är en stor fördel om en erfaren person, med praktisk kunskap från det aktuella fjärrvärmesystemet, kan delta vid tolkningen av de utpekade områdena. Detta är nödvändigt eftersom det krävs kunskap om det aktuella tillståndet hos nätet och även en ”känsla” av var läckage ”brukar” inträffa. Det bästa är förmodligen en kombination av en automatisk och en mänsklig screening. Det mänskliga sinnet har en enastående tolkningsförmåga avseende den lokala scenen och dess sammanhang, men det har också mycket stora problem att hantera större datamängder med bibehållen koncentrationsförmåga.

6.5.2 Flygningen

Flyguppdraget planeras utifrån hur många kilometer fjärrvärmekulvert som skall undersökas. Parametrar som behöver bestämmas är antalet flygstråk, flyghöjd, flyghastighet, m.fl. Speciella hänsyn måste tas till de krav som skall ställas på materialet ur analysynpunkt. Ombord flygplanet är värmekamera samt datorer för styrning av datainsamlingen och för lagring av värmebilder monterade, liksom system för lagring av planets position och orientering av varje bild. Utrustning för att mäta väder, marktemperatur och värmestrålning placeras på en eller flera lämpliga platser på marken. För att säkerställa bra mätförhållanden är det angeläget att marken är fri från snö och frodig växtlighet. Vid genomförandet är ambitionen att flygningarna skall utföras under gynnsamma förhållanden, vilket ofta är under natten eller under tidig morgon. Figur 6.16 visar hur flygstråken ligger över en del av en stad.

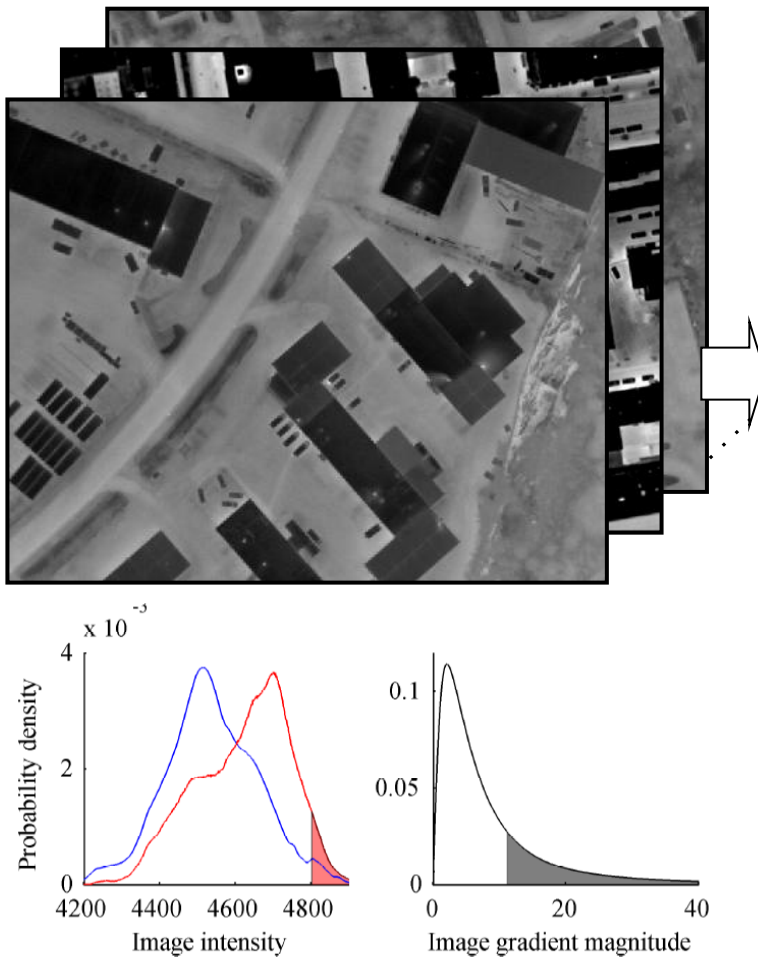


Figur 6.16. Flygningen planeras i förbestämda stråk (röda linjer) för att garantera 100% yttäckning. Även positionen där bilden ska registreras är förprogrammerad. Det är vanligt att den efterkommande analysen ställer krav på hur det insamlade materialet skall registreras.

6.5.3 Sammanställningen

När flygdelen har genomförts sammanställer och kontrollerar man alla data med avseende på kvalitet. Därefter genomförs georektifieringen av alla IR-bilder såsom beskrevs tidigare i kapitel 6. Ett av de första stegen i analysen är att beräkna relevant statistik för såväl hela underlaget som de enskilda bilderna. I Figur 6.17 visas hur några statistiska mått kan se ut.

Därefter sammanställs de georektifierade IR-bilderna med ledningsnätet och statistiken. Beräkningarna av anomalierna kan nu påbörjas. Detta steg i analysen kan ta några dagar för en modern PC. När anomalidetektionen är färdig kan ev. en serie tester genomföras för att ta bort irrelevanta anomalier såsom varma bilar m.m. De kvarvarande områdena som ej går att finna rimliga förklaringar till antas vara kandidater för läckage.



Figur 6.17. En stor mängd statistiska mått beräknas.

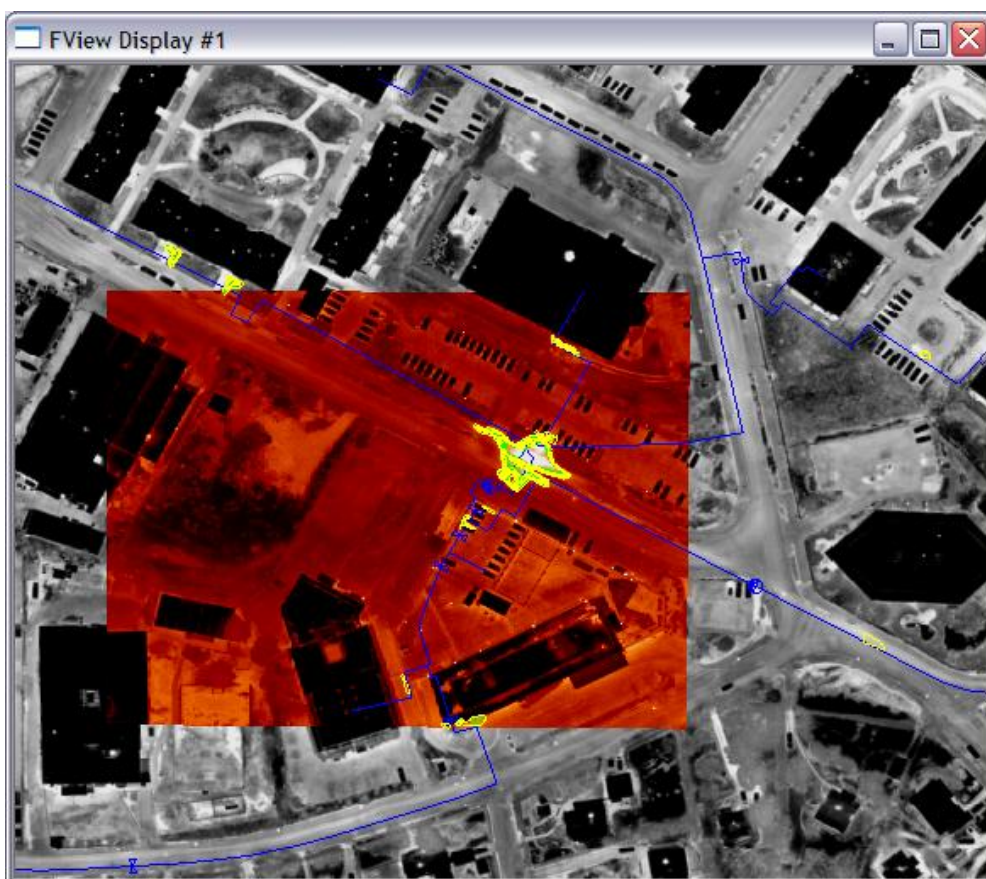
6.5.4 Visualiseringsverktyget FView

För att möjliggöra en enkel interaktion med resultatet har en speciell visualiserings- och analysmjukvara utvecklats för att åskådliggöra alla resultat på ett och samma ställe. Här kan man överlagra den georektifierade mosaiken med detektionerna, ledningsnätet och den högupplösta enskilda bilden, se Figur 6.18 (vänster).

Ett annat exempel på ett kraftigt läckage visas i Figur 6.19, där både mosaik, enskild IR-bild, ledningsnät samt detektioner överlagrats. Analysverktyget, FView, medger även att det går att ”flyga” runt i hela staden i ett mjukt och följsamt tempo och stanna för att zooma in vid detektionerna. För varje detektion går det även att avläsa area och temperatur samt ett antal statistiska mått.



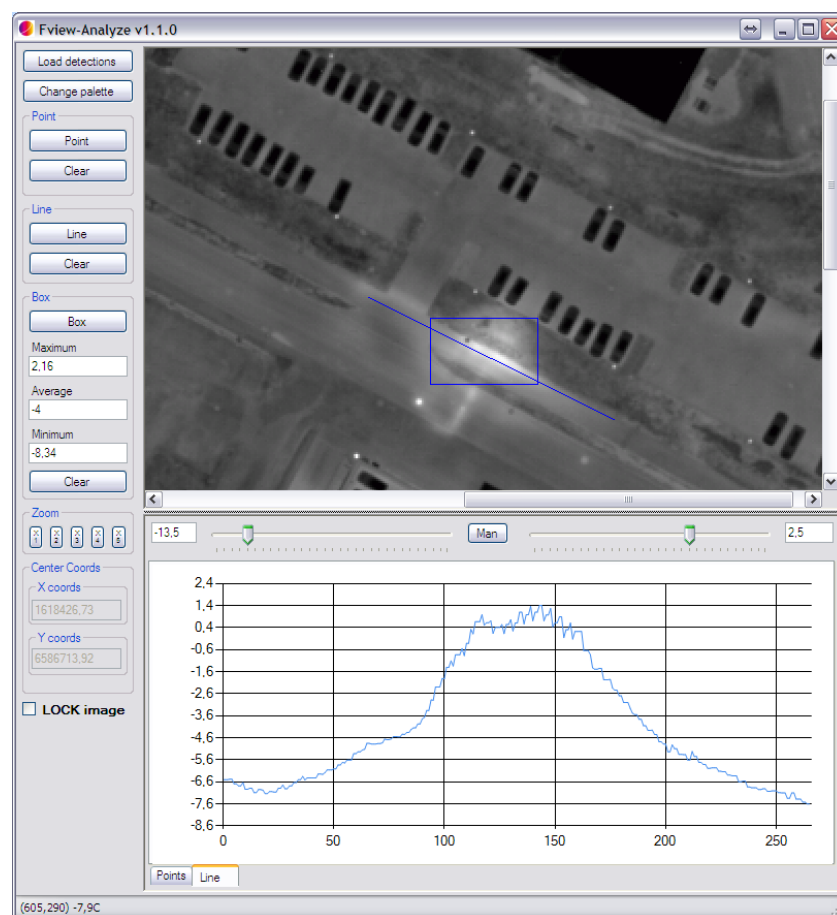
Figur 6.18. Vänster: Exempel på resultat som sammanställts. Den gröna och röda polygonen visar potentiella läckage. Höger: Resultatet efter uppgrävning.



Figur 6.19. Exempel på hur det ser ut när all information samlas i en bild. Den gul/gröna markeringen var ett bekräftat stort läckage. Den falskfärgade röda bilden representerar en högupplöst IR-bild som är överlagrad den stora grå mosaiken.

6.5.5 Analysverktyget FView-Analyze

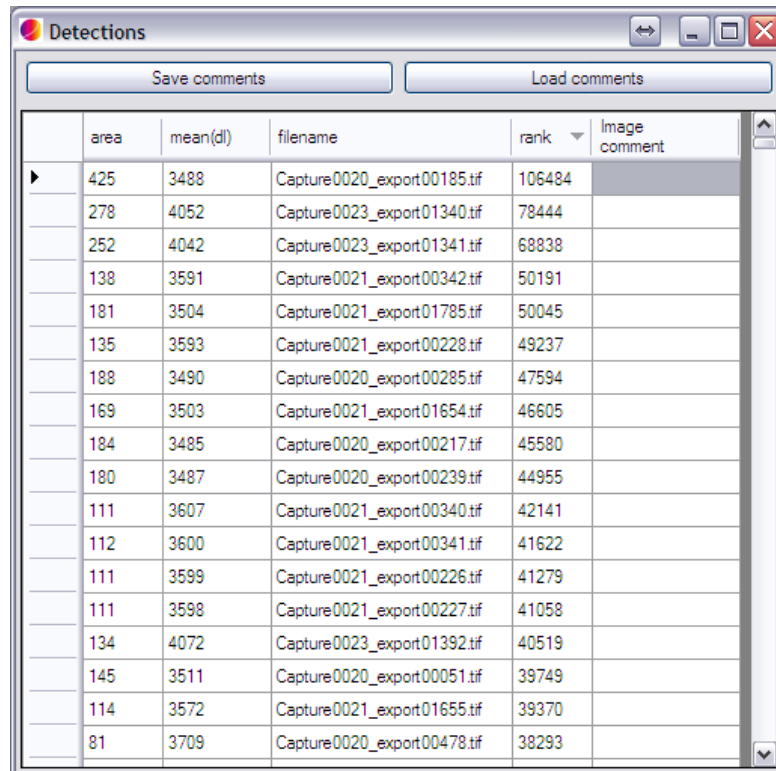
Den radiometriska informationen går delvis förlorad vid georektifieringen så de radiometriska IR-bilderna bör därför hanteras separat. Man bör även kompensera för den atmosfärspåverkan som flygningen medför. Detta görs parallellt med FView så man hela tiden har den aktuella radiometriska IR-bilden av det aktuella området i ett parallellt analysfönster. Om man i exemplet ovan öppnar analysfönstret ser man en uppsättning analysverktyg. Det går att lägga ut linjer för att studera profiler eller boxar för att läsa av max- och mintemperaturer, se Figur 6.20.



Figur 6.20. Bild av analysfönstret med den aktuella bilden. En boxruta visar max-, min-, och medelvärde inom rutan. Linjen visar temperaturprofilen längs linjen.

Alla detekterade områden har, som nämnts, ett antal beräknande egenskaper exempelvis area och temperatur över bakgrunden. En ytterligare funktion är att det går att beräkna ett värde som viktar "allvarlighetsgraden" för det aktuella området. Detta gör det möjligt att tilldela varje yta ett rankingvärde och därigenom producera en prioriteringslista, se Figur 6.21 över stadens alla detekterade områden med potentiella läckor. Kommentarer från operatören

kan också sparas för varje detekterad läcka.



	area	mean(dl)	filename	rank	Image comment
▶	425	3488	Capture0020_export00185.tif	106484	
	278	4052	Capture0023_export01340.tif	78444	
	252	4042	Capture0023_export01341.tif	68838	
	138	3591	Capture0021_export00342.tif	50191	
	181	3504	Capture0021_export01785.tif	50045	
	135	3593	Capture0021_export00228.tif	49237	
	188	3490	Capture0020_export00285.tif	47594	
	169	3503	Capture0021_export01654.tif	46605	
	184	3485	Capture0020_export00217.tif	45580	
	180	3487	Capture0020_export00239.tif	44955	
	111	3607	Capture0021_export00340.tif	42141	
	112	3600	Capture0021_export00341.tif	41622	
	111	3599	Capture0021_export00226.tif	41279	
	111	3598	Capture0021_export00227.tif	41058	
	134	4072	Capture0023_export01392.tif	40519	
	145	3511	Capture0020_export00051.tif	39749	
	114	3572	Capture0021_export01655.tif	39370	
	81	3709	Capture0020_export00478.tif	38293	

Figur 6.21. Rankning av detektioner.

6.6 Diskussion

Detta kapitel har översiktligt beskrivit de relativt komplexa fenomen som detektion av fjärrvärmeläckor innebär, men som ändå på ett överskådligt och begripligt sätt kan levereras till kunder för vidare manuell tolkning tillsammans med exempelvis kundens eget underhållssystem.

En annan anledning till att skapa datoriserad analys av hela det registrerade IR-materialet är att vid ett senare tillfälle kunna genomföra en förändringsanalys vid återkommande registreringar, med exempelvis några års mellanrum. Då erbjuds möjligheten att se hur intressanta områden har utvecklats, med en accelererad förändring eller en obetydlig förändring eller ingen förändring alls. Detta är en mycket lovande metod som förhoppningsvis kommer att kunna utvecklas ytterligare framöver.

Leveranskonceptet med mjukvarorna till kunder och nätägare är framtaget och anpassat i en dialog med ett tiotal nordiska nätägare och konceptet får anses fungera bra. Det kunderna ytterligare önskar är att kunna få en kvantifiering av vilken typ av läcka det handlar om, energi eller vatten. Man skulle också vilja veta vilken kostnad som de detekterade läckorna innebär. Vidare önskar man ett planeringsverktyg för att möjliggöra en prognos av framtida underhållsinsatser i rätt tid och till rätt kostnad.

7 FRAMTIDA UTVECKLING

I detta kapitel utgår vi från visioner och mål från användarsynpunkt och kopplar dem till vilka förmågor ett framtida system bör ha för att kunna uppfylla målen. Förmågorna kopplas i sin tur till vilka områden som behöver studeras för att förmågorna ska kunna (vidare)utvecklas.

7.1 Vision och mål från en användares synvinkel

Vi har undersökt hur företrädare för distributionsnät av fjärrvärme ser på mål och visioner för ett framtida system för att finna läckage. Vi fann bland annat följande resultat.

Mål

Utveckla lösningar för strategisk planering, effektivt underhåll, läcksökning och statusbestämning. Knyt ihop information om historik, nuläge, framtidsprognoser och risker i nya arbetssätt och verktyg. Prioriteringar av områden för underhållsåtgärder beroende på kostnad och effektivitet

Vision

Minska kostnaderna för underhåll och höja kvaliteten på leveransen. Erhålla en validerad och accepterad uppskattning av den extra värmeförlusten per dag i de upptäckta och klassificeras områden. Säkerställa att effektivt underhåll kan utföras även om personalresurser internt och externt är begränsade.

7.2 Önskade förmågor

För att uppnå ovanstående mål måste flera tekniska förmågor utvecklas:

7.2.1 Läcksökning

För att upptäcka läckor och, framförallt, att kunna särskilja dem från falsklarm krävs utveckling på algoritmsidan. Man måste också kunna skilja på energiläckage och vattenläckage. Falsklarm kan bland annat orsakas av andra källor till förhöjd marktemperatur än läckande fjärrvärmerör, och för att karakterisera dem krävs en omfattande analys av insamlade mätdata från olika omgivningar och dessutom insamlade under olika förhållanden.

Karakteristiken hos faktiska läckor kan modelleras och simuleras till viss del, liksom antagligen ett fåtal vanligt förekommande falsklarm. Det stora flertalet falsklarm kan dock endast modelleras rent statistiskt utgående från empiriska mätningar. Sådana statistiska modeller kan kopplas till detektionsalgoritmer för att åstadkomma förbättrad prestanda.

7.2.2 Statusbestämning

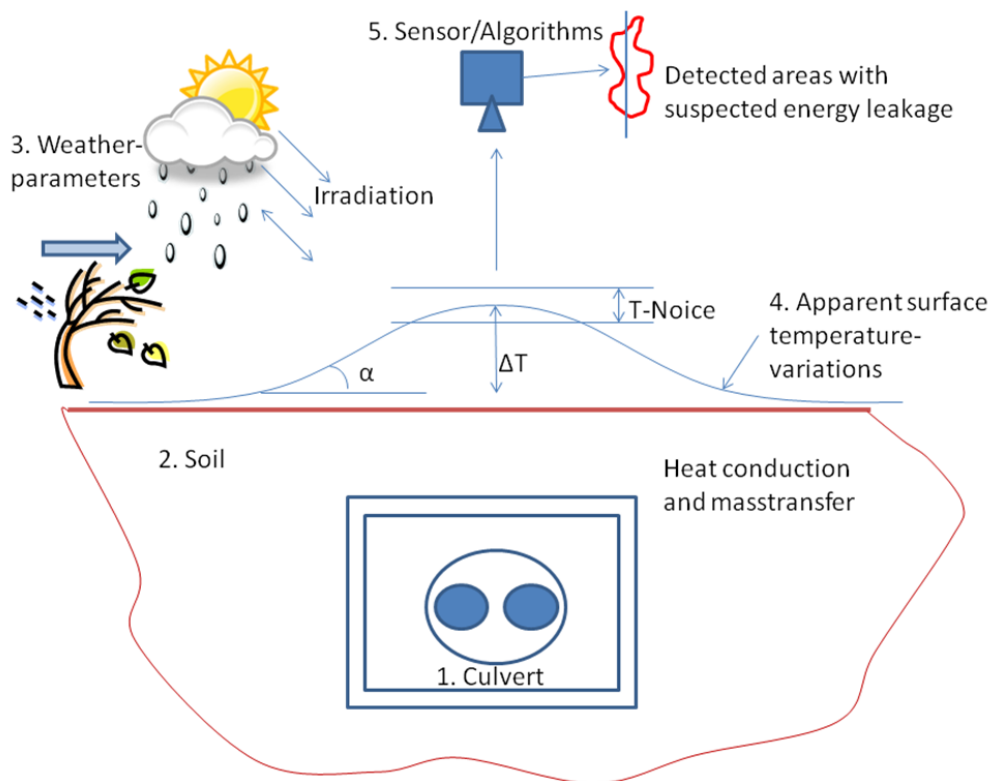
För att bestämma status hos ett nät vill man inte bara upptäcka läckor, men vill även kunna uppskatta deras storlek och kostnad, det vill säga hur mycket energi respektive vatten som faktiskt läcker ut från ledningen i en viss position. För att kunna göra sådana uppskattningar måste man kunna prediktera temperaturer och temperaturgradienter på markytan och relatera prediktionen till en gjord mätning. Detta kräver i sin tur att man kan modellera olika typer av kulvertar och rör, hur temperaturen sprider sig upp till markytan, samt hur markytans temperatur påverkas av omgivningen. Tyvärr har man inte bedrivit så mycket forskning eller utveckling inom detta område.

7.2.3 Historik, nuläge och framtidsprognos

För att knyta ihop med historik måste man kunna bestämma status enligt ovanstående och dessutom få in tidsdimensionen för att kunna göra relevanta jämförelser vid ett annat tillfälle. En sådan fråga är: Hur mycket mer energi läcker ett segment nu jämfört med vid den förra mätningen för, säg, två år sedan? Om man har en historik kan man sedan göra framtidsprognoser.

7.3 Problemområdenas nuläge och önskade utveckling

Låt oss nu sammanfatta teknikläget i de fem olika problemområden som beskrevs i Kapitel 1, och knyta an till de önskade förmågorna ovan. I Figur 7.1 nedan illustreras problemområdena igen.



Figur 7.1: Några områden som påverkar fjärrtermografering av FV-nät.

7.3.1 Område 1: Kulvert och rör

Några befintliga typer av kulvertar och rör har studerats och redovisats i tidigare kapitel. Utveckling av kulvertar och rör ligger i princip utanför ämnet för detta projekt. Däremot kan modellering och simulering av både redan studerade och ännu icke studerade kulvertar och rör behöva genomföras.

7.3.2 Område 2: Markfysik

Här har stora studier redan genomförts av flera grupper, däribland personerna och företagen bakom denna rapport. Interaktionen mellan markyta-jordvolym och kulvertar-rör är i hög grad en viktig förutsättning för det aktuella projektet.

7.3.3 Område 3 och 4: Miljöfaktorer och markytans temperaturvariationer

Studier och teoribildning har genomförts, men det gäller i huvudsak för andra tillämpningsområden. Vidare studier, inkluderande såväl mätningar över årstiderna som fysikalisk modellering och simulering, är därför nödvändiga för att komma fram till användbara resultat. Förslagsvis genomför man under

kommande projekt såväl empiriska mätningar över årstiderna och under olika väderförutsättningar som fysikalisk modellering/simulering av de fenomen som uppträder. Detta är en av de förutsättningar som ger detekterbara kontraster, vilka kan skiljas från falsklarm. Denna teknik måste utformas så att det är möjligt att prediktera de förväntade kontrasterna vid flygning med IR-sensor och därmed ge förbättrad detektion av energiläckage .

7.3.4 Område 5: Sensor och dataanalys

Själva sensortekniken är idag tillräckligt långt utvecklad för att uppfylla kraven för flygburen termografi av FV-nät. En modern, kyld IR-kamera är både snabb, högupplöst och tillräckligt känslig för att utan rörelseoskärpa registrera marktemperatur med god noggrannhet. Detta var tyvärr inte fallet då IR-teknik började användas i försök att detektera och kvantifiera läckage från FV-nät på 1980- och 1990-talen. Detta kan vara en av orsakerna till att man inte fann att tekniken var speciellt användbar. Givetvis kommer sensorerna bli ännu bättre i framtiden, men det kommer inte att påverka denna tillämpning i någon högre grad. Enligt vår uppfattning är det inte frågan om något tekniksprång under de närmaste åren.

I nuläget är tekniken tillräckligt utvecklad för att ge ett acceptabelt användarstöd och möjlighet att lokalisera energi- och vattenläckor i näten. Både algoritmer för detektion av läckor och mjukvaruverktyg, där användare kan studera materialet, finns tillgängliga på marknaden. Det saknas emellertid flera önskade förmågor:

1. Förmågan att automatiskt sortera bort falsklarm kan förbättras avsevärt.
2. Förmågan att knyta ihop analysresultat med resultat från tidigare mätningar är inte utvecklad.
3. Förmågan att bedöma kostnader för vatten- och energiläckor är inte utvecklad.

Den första förmågan kan, som nämnts, förbättras genom en statistisk analys av tidigare insamlade mätdata. Vidare krävs en avancerad modellering av en förväntad energiförlust och därmed uppvärmning av markytan i olika scenarier (kulvertar & rör, omgivningsparametrar mm).

Den andra förmågan kräver någon form av kvantifiering av tillståndet för varje del av nätet. Problemet är snarare ett forsknings- än ett utvecklingsproblem.

Den tredje förmågan hänger helt på resultat från framtida studier inom problemområden 1- 4.

7.4 Slutsatser och förslag på framtida arbete

Tekniken är användbar redan idag, men det finns stora möjligheter att utveckla den till ett mycket kraftfullt verktyg för ägare och användare av FV-nät. Man kan dels förbättra nuvarande förmågor avsevärt dels utveckla helt nya förmågor.

För att utveckla eller vidareutveckla önskade förmågor krävs studier, forsknings- och utvecklingsprojekt inom bland annat området dataanalys. På kort sikt gäller det att förbättra detektionsprestanda och på lång sikt gäller det att utveckla nya förmågor. Det senare kräver i sin tur modellering och simulering av såväl markfysik, miljöfaktorer, kulvertar och rör.

Framtagna modeller bör kompletteras med mätningar i olika scenarier för att validera modellernas giltighet. Sådana mätningar är ofta kostsamma projekt, vilket gör att data från såväl genomförda som framtida mätningar bör samutnyttjas till forskningsprojekt (användandet av tidigare insamlade mätdata kan reducera men knappast eliminera behovet av mätdata).

8 PROJEKTETS FORTSÄTTNING – VAD BÖR GÖRAS OCH HUR?

Fortsättningen på projektet befinner sig på planeringsstadiet. Fokus är riktat en vidareutvecklad och förbättrad analys samt värdering av såväl de viktigaste mark- och väderparametrarna som deras samverkan med algoritmer för detektion och klassifikation av potentiella energi- och vattenläckage. Förstudiens resultat och slutsatser kommer att ligga till grund för de långtidsstudier och den systematiska utveckling av hela konceptet som är tänkt att äga rum inom ramen för fortsättningsprojektet. Verksamheten kommer att innefatta försök i både experimentmiljö och i fullskala med flygburen IR-teknik, samt modellering och simulering. Arbetet kommer att vara omfattande och ligga på en hög teknisk nivå, vilket gör att det är både lämpligt och nödvändigt att utnyttja en doktorandtjänst för att kunna genomföra projektet. Tjänsten placeras lämpligen vid institutionen för Ekonomisk och industriell utveckling, IEL, vid LiU. Fortsättningsprojektet förväntas leda till att metoden med flygburen tillståndskontroll dels ska bli mer robust genom att bli bättre på att upptäcka även små läckor samtidigt som falsklarm undviks dels kunna kvantifiera värmeläckage från fjärrvärmerör. Målet med fortsättningsprojektet är även att erhålla en verifierad uppskattning av den extra energi och det vatten som förloras per dygn i de detekterade områdena. Dessa förbättringar uppfattar vi som starkt efterfrågade av de FV-ägare som vi har varit i kontakt med.

Dessutom kommer det fortsatta arbetet att inriktas mot att utveckla lösningar för strategisk planering, effektivt underhåll, läcksökning, statusbestämning. Ett annat angeläget område är att knyta ihop information om historik, nuläge, framtidsprognoser och risker i nya arbetssätt och verktyg

8.1 Förslag till projektbeskrivning – fortsättningsprojekt

Förstudien har visat att det finns mycket stor potential för vidareutveckling av det Flygburna Systemet för Läckagekvantifiering av energi via IR-teknik (FSL-IR). Flera viktiga aspekter har lyfts fram där kunskapen ännu inte är tillräcklig för att fullt ut kunna utnyttja dagens och morgondagens tekniska möjligheter.

Fortsättningsprojektets övergripande mål är att möjliggöra klassificering och kvantifiering av värmeläckage från fjärrvärmenät – helt enkelt att sätta en siffra på läckaget i t.ex. W/m fjärrvärmerör, kWh eller kronor/år. Med denna information skulle nätägaren få ett avgörande beslutsunderlag för beslut och prioritering av insatser såsom underhåll och/eller reparation.

För att uppnå målet krävs att flera av de aspekter som lyfts fram i förstudien prioriteras. Av de 5 områden enligt figur 1 som har varit ett genomgående tema genom hela rapporten, är det framför allt 3 områden som kräver ytterligare arbete: Modellering av markens egenskaper (område 2), samspelet mellan markyta och väder-/klimatförhållanden (områdena 2 och 3), samt algoritmer för att maximalt kunna utnyttja markytans temperaturfördelning (område 4 och delvis område 5). Kulvertens egenskaper (område 1) får i princip anses färdigutredda, och dessutom är ingående material mycket väl analyserade bland annat områden utanför fjärrvärmeområdet. Sensorns egenskaper och dess koppling till algoritmer hanteras av ett annat pågående projekt, FOCUS-projektet.

I det planerade fortsättningsprojektet kommer det att vara centralt att förbättra algoritmerna som idag används för *detektion* av värmeförluster, till att också kunna hantera *klassificering* och *kvantifiering*. Ett område som dessutom visat stor möjlig potential är, givet en historik och nulägesstatus av fjärrvärmenätet, att kunna göra framtidsprognoser av hur förändringar utvecklas och därmed vara ett beslutsstöd. Metoder för att ge denna prognos och beslutsstöd kommer vara ett centralt område i ett fortsättningsprojekt. Dessa utvecklingsområden borde vara fullt möjliga med dagens teknik, men viss nödvändig kunskap saknas tyvärr. Att extrahera information för klassificering och kvantifiering innebär att mer ”intelligens” byggs in i IR-systemet. Samtidigt måste denna intelligens vara baserad på modeller av faktiska egenskaper, vilket kräver att ovan nämnda områden och samspel klargörs. Detta är ett stort arbete som nödvändiggör experiment både i laboratoriemiljö och på riktiga fjärrvärmeinstallationer tillsammans med modellering, simulering och analys. Samspelet mellan de olika områdena/faktorerna gör att det är centralt med ett angreppssätt där alla faktorer hanteras tillsammans.

8.2 Projektplan

Projektet föreslås pågå under 4 år och vara ett samarbete mellan Svensk Fjärrvärme, Linköpings universitet (institutionen för Ekonomisk och industriell utveckling, IEI), Termisk Systemteknik AB samt några nätägare. Delresultat från projektet kommer att presenteras kontinuerligt på bland annat Fjärrvärmedagarna och vid vetenskapliga konferenser samt i tidskrifter. Resultaten kommer också att kontinuerligt implementeras i FSL-IR.

En preliminär projektplan kan sammanfattas enligt Tabell 8.1

Tabell 8.1

Delprojekt	Beskrivning
DP1	Utökad (från förstudien) analys av parametrar, och samspel mellan parametrar, att inkludera i modellering/simulering
DP2	Skadad och/eller fuktig isolering (experiment)
DP3	Kondensering och förångning vid markytan
DP4	Frysning/tining av marken (tjäle/tjällossning)
DP5	Modell för väderpåverkan via vind, sol och moln (Implementering, test och verifiering)
DP6	Förhållanden (väder och årstid) som underlättar klassificering av energiläckage (Analys)
DP7	Metoder för att ge framtidsprognoser, för strategisk planering, effektivt underhåll och beslutsstöd
DP9	Kontinuerlig verifiering och implementering av resultat i simuleringsmodellen
DP10	Implementering av resultat i FSL-IR, inklusive verifiering

Delprojekt	År 1	År 2	År 3	År 4
DP1	○ M1			
DP2	○ M2			
DP3	○ M3			
DP4	○ M3			
DP5	○ M4			
DP6	○ M4			
DP7	○ M4			
DP9	○ M5			
DP10	○ M5			

Milstenar	Description
M1	Samspel mellan viktigaste parametrar utredda
M2	Effekt av skadad och/eller fuktig isolering klargjord.
M3	Effekt av fasomvandling (kondens, frysning etc.) på markytan och i marken klargjord
M4	Väder och årstidspåverkan klargjord samt metoder för prognoser
M5	Implementering och verifiering av FSL-IR klar

Leverans/Rapportering	Beskrivning
L1	
L2	
L3	
L4	
L5	

Cost (in kSEK)	År 1	År 2	År 3	År 4	Total
Doktorand Liu	600	620	640	660	2520
Övrig personal Liu	200	200	200	200	800
Personal Termisk systemteknik	250	250	250	250	1000
Resor, publicering etc.	75	75	75	75	300
Datorer, programvara, mätutrustning	150	50	50	50	300
Total	1275	1195	1215	1235	4920

9 REFERENSER

1. Olsson, M.E., *Long-Term Thermal Performance of Polyurethane-Insulated District Heating Pipes*. 2001, Chalmers University of Technology: Göteborg.
2. Fröling, M., *Environmental and Thermal Performance of District Heating Pipes*. 2001, Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden.
3. Kabayama, M.A., *Long-Term Thermal Resistance Values of Cellular Plastic Insulations*. *Journal of Thermal Insulation*, 1987. **10**(April).
4. Sjökvist, S., Linderhed A, Nyberg S, Uppsäll M, *Optical Methods for Detection of Minefields*, in *FOI-R--1331--SE*. 2004. p. 112.
5. FOI. *Centre for Advanced Sensors, Multisensors and Sensor Networks (FOCUS)*. 2007-2012 [cited; Available from: www.foi.se/FOCUS/]
6. Friman, O., Follo, P., Ahlberg, J., Sjökvist, S. *Remote Thermography - Detection of Leakages in Local District Heating Pipes*. in *Swedish Society for Automated Image Analysis*. 2012.
7. Fröding, H., *Miljöbedömning, hantering av utskrotad fjärrvärmekulvert i mark*. 2001, Mälardalens Högskola: Stockholm.
8. Ahlgren, J, F., M., Svanström, M. Berlin. L., *Nya material for fjärrvärmerör -- En förstudie/litteiaturstudie*. 1998, Svensk fjärrvärmeförening: Stockholm.
9. Nilsson, S., *Durability of District Heating Pipes*. 2003, Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden.
10. Jarfelt, U., *Jämförelse mellan dubbel- och enkelrör -- Ackumulerade värmeförluster under 50 års deiftid*. 2002, Svensk fjärrvärmeförening: Stockholm.
11. Holmgren, C., *District Heating Pipes -- Heat losses and environmental impacts*. 2004, Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden.
12. Makita, T., Tanaka, Y., Morimoto, Y., Noguchi, M., and Kubota, H., *Thermal Conductivity of Gaseous Fluorocarbon Refrigerants R 12, R 13, R 22, and R 23, Under Pressure*. *International Journal of Thermophysics*, 1981. **2**(3).
13. olsson_smidt_daugaard_1997.
14. Wang, J.K.a.H., C-E., *A Simplified Model for Ageing of Gas-filled Thermal Insulation Foams*. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 1998. **22**(2).
15. Nilsson, S., Bergström, G., *Groundwater leakage in Pipe Joints due to Temperature Variations*. *Euroheat and Power - Fernvärme International*, 2002. **31**(1-2).
16. Bergström, G., Nilsson, S., Sällberg, S-E., *Utvändiga skydd hos fjärrvärmerörsskarvar*. 2002, Svensk fjärrvärmeförening.
17. Åkerström, Å., *Reinvesteringsmodell för befintligt fjärrvärmenät*. 2004, Lunds tekniska högskola: Lund.
18. Sund, G., *Utvändig korrosion på fjärrvärmerör*. 2002, Svensk fjärrvärmeförening.
19. Svensk Fjärrvärme AB, *Läggningsanvisningar för fjärrvärme- och fjärrkylrör D:211*, in *Tekniska bestämmelser*. 2006, Svensk Fjärrvärme AB.
20. Schmitt, F., Hoffman, H-W., *New Ways of Installing District Heating Pipes*. 1999: T3.2 International Energy Agency (IEA) District Heating and Cooling.

21. Molin, J., Bergström, G., Nilsson, S., *Laying of District Heating Pipes using Existing Soil Material*, in *In Reuse of Excavated Materials*, IEA 1999: T3.3. 1999, International Energy Agency (IEA) District Heating and Cooling.
22. Fröling, M., *Environmental and thermal performance of district heating pipes*. 2002, Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden.
23. Schmitt, F., Hoffman, H-W., *Reuse of Excavated Materials*. 1999: T3.3, International Energy Agency (IEA) District Heating and Cooling
24. Hartley, J.G., ed. *Coupled Heat and Moisture Transfer in Soils -A Review*. Advances in Drying. Vol. 4. 1987, Hemisphere Publishing Corporation.
25. Kaviani, M., *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. 2 ed. 1999, Ann Arbor, Michigan: Springer Verlag. 709.
26. Sjökvist, S., R. Garcia-Padron, and D. Loyd. *Heat Transfer Modelling Of Solar Radiated Soil, Including Moisture Transfer*. in *Third Baltic Heat Transfer Conference*. 1999: IFFM Publishers.
27. Sjökvist, S., et al. *Simulation of Thermal Contrast on Solar Radiated Sand Surfaces Containing Buried Minelike Objects*. in *Second International Conference on The Detection of Abandoned Land Mines*. 1998. Edinburgh: The Institution of Electrical Engineers, IEE.
28. holmgren_2.
29. Muhlenkamp, S.P., Johnson, S.E., . *In-Place Thermal Ageing of Polyurethane Foam Roof Insulations*. in *Seventh conference on Roofing Technology*. April 1983: National Bureau of Standards/National Roofing Contractors Association.
30. Jönsson, B.Z., H. , *Quantitative Heat Loss Analysis of Heat and Coolant Distribution Pipes by Means of Thermography*. 1992, International Energy Agency (IEA) District Heating.
31. Hagentoft, C.-E., *Simulation of Heat Losses and Ground Temperatures for District-heating Culverts: Comparison with Field Experiments for Well Insulated, Damaged and Extra Insulated Culverts*. 1986, Swedish Council for Building Research.
32. Zinko, H.B., J.; Bjurström, H.; Borgström, M.; Bøhm, B.; Koskelainen, L.; Phetteplace, G., *Quantitative Heat Loss Determination by Means of Infrared Thermography - The TX model*. 1996, International Energy Agency (IEA) District Heating and Cooling.
33. Jacobs, P., *Infrared Characterization of Targets and Background*. Tutorial Texts in Optical Engineering, ed. D.C. Shea. Vol. TT26. 1996: Spie Optical Engineering Press.
34. Luppsecu, P.A., *Måling av varmetab fra fjernvermeledninger, in aboratoriet för värme och klimatteknik*. 1988, Danmarks Tekniska Högskola: Köpenhamn.
35. de Vries, D.A., *Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media*. Transactions American Geophysical Union, 1958. **39**(5): p. 909-916.
36. de Vries, D.A., *Thermal Properties of Soil*, in *Physics of Plant Environment*, W.R. van Wijk, Editor. 1963, John Wiley & Sons: New York. p. 210-235.
37. Jansson, P.-E., *Simulation Model for Soil Water and Heat Conditions*. 1996, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences: Uppsala. p. 79.
38. Accetta, J.S. and D. L.Shumaker, eds. *The Infrared and Electro-Optical*

- Systems Handbook*. 1993, SPIE Optical Engineering Press.
39. Centeno, M.V., *New Formulae for the Equivalent Night Sky Emissivity*. Solar Energy, 1982. **28**(6): p. 489-498.
 40. Idso, S.B. and R.D. Jackson, *Thermal Radiation From the Atmosphere*. Journal of Geophysical Research, 1969. **5397**(74).
 41. Perers, B., Jönsson, B, *Värmeförlustmätning i fjärrvärmenät med termografi*. 1990, Studsvik Energy.
 42. Höjlund Rasmussen, B., *Termografering af Fjernvermeledninger*, in *Projektrapport 32*. 1987, Danske Fjernvermevaerkeres Forening.
 43. Ljungberg, S.-Å., *Termografering av fjärrvärmenät; Västeråsprojektet – en metodstudie*. 1987, Värmeverksföreningen och Statens institut för byggnadsforskning.
 44. Perers, B., Schmeling, P., *Bestämning av värmeförluster i fjärrvärmenät med termografi - simuleringsmodell för noggrannare bildanalys*. 1989, Studsvik Energy.
 45. Bøhm, B., Borgström, M., *A comparison of different methods for in-situ determination of heat losses from district heating pipes*. 1996, Technical University of Denmark, Dept. of Energy Eng.: Köpenhamn.
 46. *Termo Technology Program – Final report 1993-1997*. 1998, Finnish District Heating Association.
 47. Sjökvist, S., *Heat Transfer Modelling and Simulation in Order to Predict Thermal Signatures -The Case of Buried Land Mine*, in *Applied Thermodynamics and Fluid Mechanics*. 1999, Linköping University, Institute of Technology: Linköping. p. 86.
 48. Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method*. 1977, London: McGraw-Hill.



Forskning som stärker fjärrvärme och fjärrkyla, uppmuntrar konkurrenskraftig affärs- och teknikutveckling och skapar resurseffektiva lösningar för framtidens hållbara energisystem. Kunskap från Fjärrsyn är till nytta för fjärrvärmebranschen, kunderna, miljön och samhället i stort. Programmet finansieras av Energimyndigheten tillsammans med fjärrvärmebranschen och omsätter cirka 19 miljoner kronor om året. Mer information finns på www.fjarrsyn.se

KVANTIFIERING AV VÄRMELÄCKAGE

Läckor av vatten och värme från fjärrvärmenät är vanligt och förväntas öka eftersom många fjärrvärmenät i Sverige är 50 år eller äldre. Detta leder bland annat till stora kostnader och en onödig miljöpåverkan.

Läckor kan bero på att rörisoleringen har åldrats eller skadats och att värmeläckaget därmed ökar. Men det kan också bero på att korrosion och erosion har skadat rören så att de läcker vatten. Läckor förekommer också i nyare konstruktioner på grund av sättningar i marken eller otillfredsställande tätning av skarvar.

Möjligheten att bedöma rörsystemens status har fram tills helt nyligen varit begränsad – man vet att rören läcker, men inte var och inte hur mycket. Här har värmeläckor identifierats med hjälp av flygburen IR-teknik.

Den här metoden har flera viktiga fördelar, till exempel att stora områden kan studeras på kort tid och att temperaturen har en direkt koppling till de värme- och vattenläckage man vill kunna upptäcka. Tekniken är användbar redan nu, men det finns också stora möjligheter att utveckla den till ett mycket kraftfullt verktyg för alla som äger och förvaltar fjärrvärmenät.

