

Projekt nr. 2017 – 05

Titel: On-site måling af varmekonduktivitet i præisolerede fjernvarmerør i drift

Udført af: Teknologisk Institut

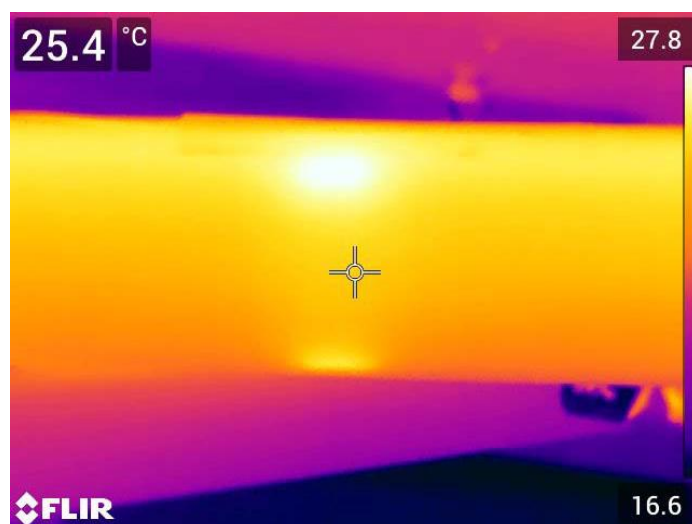
On-site måling af varmekonduktivitet

On-site måling af varmekonduktivitet i præisolerede fjernvarmerør i drift

Juli 2018

On-site måling af varmekonduktivitet i præisolerede fjernvarmerør i drift

Dansk Fjernvarmes F&U-konto nr. 2017-05



Udført af:

Teknologisk Institut, Energi og Klima, Installation og Kalibrering, Aarhus

Illustrationer og fotos: Dennis Dam Sørensen og Niels Winther, Teknologisk Institut



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Forord

Dette projekt har undersøgt muligheden for at foretage on-site-målinger af isoleringens varmekonduktivitet på præisolerede fjernvarmerør i drift, og på den baggrund har Dansk Fjernvarmes F&U-fond støttet dette projekts gennemførelse.

Teknologisk Institut
Aarhus, den 2. juli 2018

Dennis Dam Sørensen
Ph.d.

Niels Winther
Civilingeniør

Indholdsfortegnelse

Forord.....	2
1. Sammendrag.....	4
2. Baggrund.....	5
3. Måling af varmekonduktivitet.....	5
4. Projektets gennemførelse	8
5. Resultater	10
6. Konklusion og fremtidsperspektiver	11

1. Sammendrag

Projektet har haft som formål at udvikle og validere en metode til on-site-måling af isoleringens varmekonduktivitet i præisolerede fjernvarmerør i drift.

Metoden bygger på at måle medierørs- og kapperørstemperaturen sammen med den varmeflux, der strømmer gennem kapperøret.

De indledende laboratoriemålinger, der skulle validere metoden i forhold til måling på et rør med kendt varmekonduktivitet, gav ikke umiddelbart valide resultater, og der er derfor ikke udført målinger on-site, da det ikke ville give mening at udføre dem så længe metoden ikke er trimmet ind i laboratoriet til at give det resultat, som forventes.

2. Baggrund

Varmetabet fra distributionsledningerne udgør for mange værker i omegnen af 15-25 %, og særligt ældre rørledninger med CO₂-skum har et relativt stort varmetab grundet isoleringens relativ høje varmekonduktivitet.

Gennem årene har der fra flere sider været yttret ønske om at kunne måle isoleringens varmekonduktivitet on-site, dvs. uden at skulle udsave et rørstykke til laboratoriemåling med afspærring af forsyningen m.m. til følge.

Ofte er ældre ledninger lagt som isoleringsklasse 1, og når isoleringens varmekonduktivitet gennem årene er steget grundet cellegassernes diffusion, får ledningen et øget varmetab. Med et værktøj til on-site fastlæggelse af varmekonduktiviteten og dermed varmetabet vil det for værkerne være muligt efterfølgende at lave økonomiske beregninger, der viser rentabiliteten af en ledningsrenovering til rør med isolering af lav varmekonduktivitet og høj isoleringsklasse.

Et lavere varmetab fra ledningsnettet giver bedre driftsforhold og økonomi for både værkerne og forbrugerne, og er helt i tråd med den grønne profil, som fjernvarmesektoren står for.

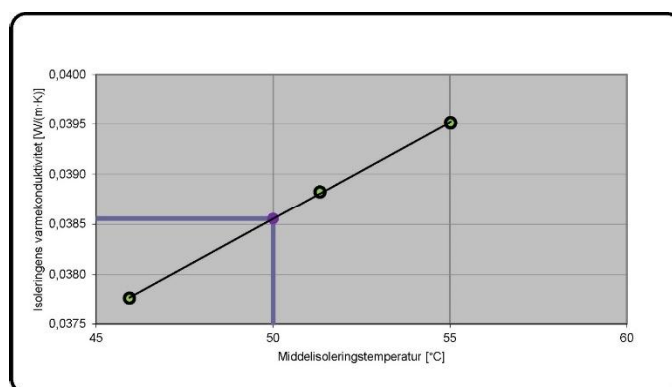
På den baggrund har Dansk Fjernvarmes F&U-fond støttet dette projekts gennemførelse.

3. Måling af varmekonduktivitet

Alle stoffer og dermed materialer har unikke egenskaber for fx densitet og varmeledningsevne, og det er normalt, at disse måles med standardiserede og dermed repetérbare metoder under kontrollerede forhold i laboratoriet.

Skal varmeledningsevnen af isoleringen i et præisoleret fjernvarmerør fastlægges, sker det normalt på mindre rørstykker på fx 3 m i laboratoriet, hvor der tilføres en kendt energimængde til medierøret, som giver en kendt varmeflux radialt, dvs. ud mod kapperøret, og samtidig måles medie- og kapperørstemperaturen.

Normalt gennemføres en varmekonduktivetsmåling med tre forskellige medierørstemperaturer, der resulterer i tre forskellige varmekonduktiviteter for isoleringen, da de er temperaturafhængige, og ved lineær regression interpoleres varmekonduktiviteten så ved en middelisoleringsstemperatur på 50 °C. På billedet ses, hvorledes dette sker.

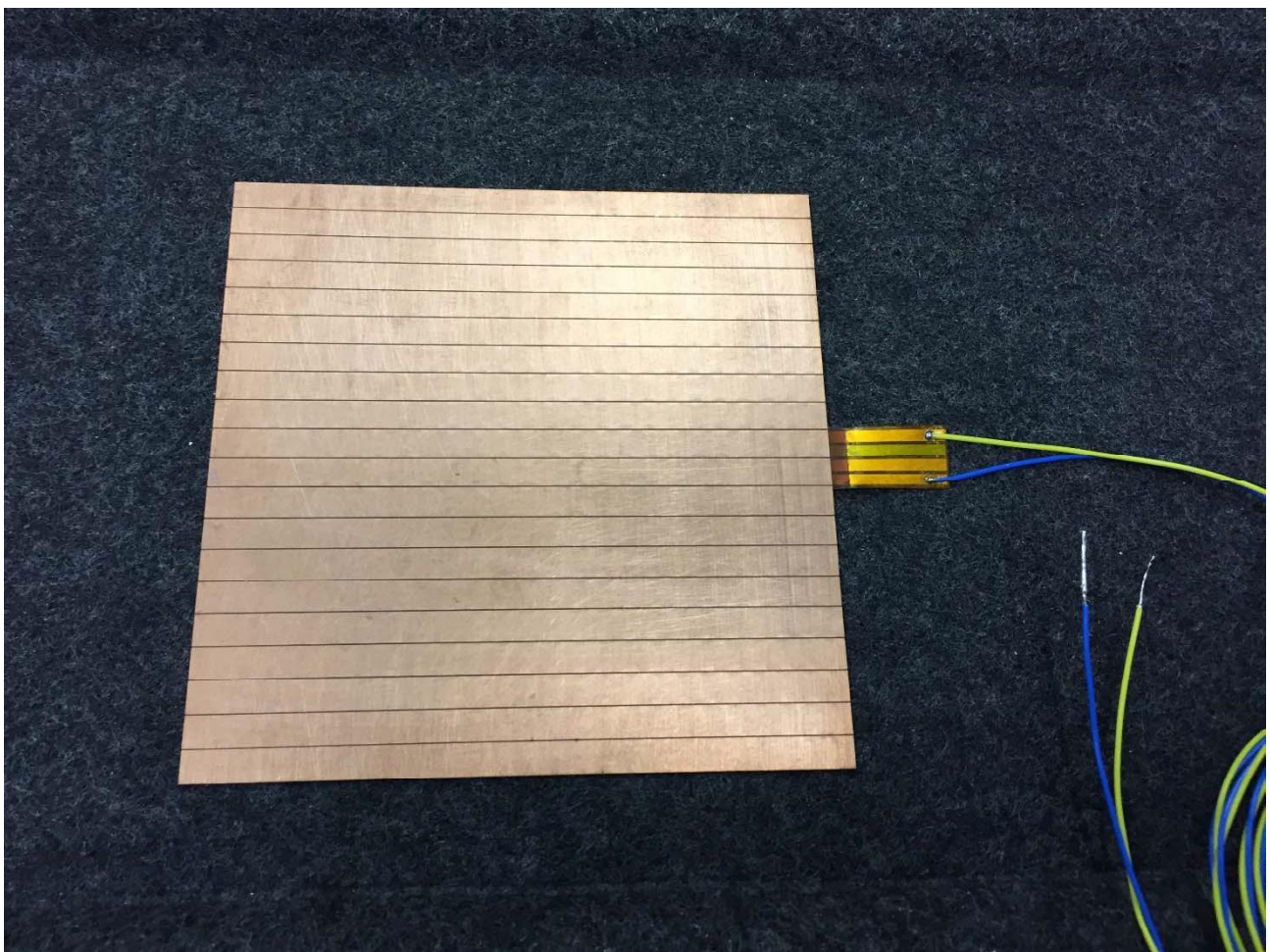


Figur 1: Fastlæggelse af isoleringens varmekonduktivitet ved en middelisoleringsstemperatur på 50 °C foretages ved interpolation mellem tre målepunkter. Eksempel fra måling på uforseglet ældet referencerør med CO₂-skum

Når fastlæggelse af isoleringens varmekonduktivitet sker on-site på rør i drift, er der ikke mulighed for at opnå tre forskellige medierørstemperaturer med en rimelig spredning, og en løsning kan da være at måle på frem- og returløbsrørene samtidig, hvilket vil give to målepunkter, idet det forudsættes, at rørenes isolering er ens. To målepunkter giver dog alt andet lige en større usikkerhed end tre målepunkter, men er den eneste farbare vej ved on-site måling på rør i drift.

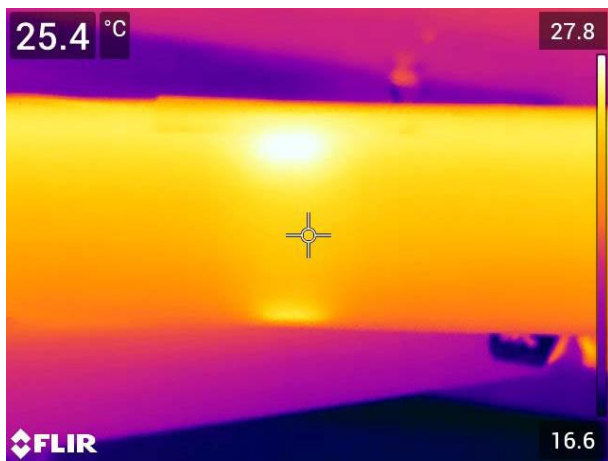
Når varmeledningsevnen skal måles on-site, er den indefra tilførte energimængde ikke kendt og veldefineret, hvorfor der på kapperørets yderside i stedet for anbringes en varmefluxmåler, der er et termoelement med en udgangsspænding proportional med temperaturdifferencen mellem dens over- og underside.

De til projektet indkøbte to varmefluxmålere har dimensionerne 100×100 mm med en fra producenten kalibreret udgangsspænding på $66 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$. Til validering af metoden blev der i laboratoriet anvendt et rør med kendt varmekonduktivitet, og med fx 70°C i medierøret gav det et output fra varmefluxmåleren på ca. 2 mV, så det er således ganske små spændinger, der skal måles på.

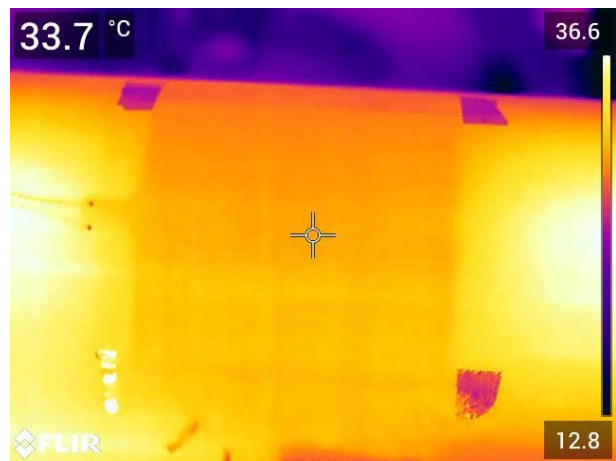


Billede 1: En 100×100 mm varmefluxmåler. De tynde kobberlameller gør, at måleren kan bøjes svarende til krumningen på et kapperør, hvor den fastgøres heldækkende med tape, der har samme emissivitet som kapperøret

Sammen med varmefluxen måles medierørets temperatur med en sensor anbragt på ydersiden gennem et lille hul i kapperøret og isoleringen, som efterfølgende lukkes, samt på kapperøret, begge i umiddelbar nærhed af varmefluxmåleren. Til validering af kapperørstemperaturen, samt ikke mindst for at undgå at måle oven på en afstandsholder (spacer) inde i isoleringen, valideres temperaturen med et infrarødt (IR) kamera (Flir E95).



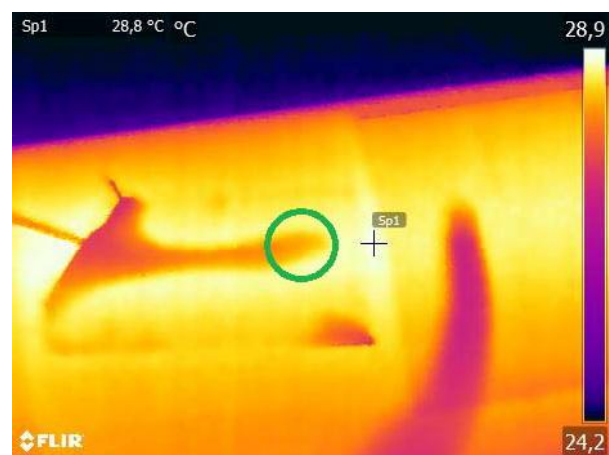
Billede 2: Eksempel på IR-detektion af en afstandsholder (spacer) inde i isoleringen



Billede 3: IR anvendt på den monterede varmefluxmåler

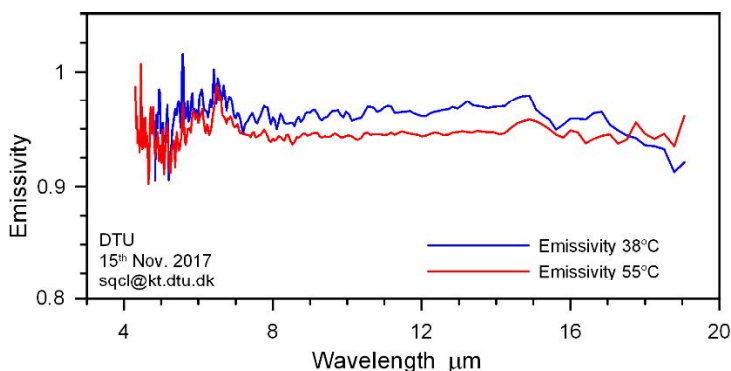
TC	IR
[°C]	
28,6	28,4
28,6	28,5
28,8	28,9
28,8	28,8
28,9	29,0
29,1	29,3

Tabel 1: Samhørende temperaturer målt med thermocoupler (TC) svarende til den grønne cirkel hhv. infrarødt kamera (IR)



Billede 4: TC (grøn cirkel) under tape

Et afgørende punkt for nøjagtige, absolutte temperaturmålinger med infrarødt udstyr er, at den anvendte emissionskoefficient for overfladen der måles på er korrekt. Der var ingen kendte emissionskoefficienter for de sorte PE kapperør, hvorfor det var nødvendigt at få dem målt. To prøver blev sendt til det danske referencelaboratorium indenfor berøringsløs temperaturmåling ved DTU, hvor emissionskoefficient blev målt til at være ret konstant i bølgelængdeområdet relevant for mange infrarøde sensorer (7-14 μm). For en overfladetemperatur på hhv. 38 °C og 55 °C blev emissionskoefficienten bestemt til hhv. ca. 0,96 og ca. 0,95.



Figur 2: Emissionskoefficienter for sort PE kapperør

4. Projektets gennemførelse

Det har for projektet været essentielt at kunne foretage validerende målinger på et rør med kendt varmekonduktivitet for isoleringen. Når der skal afprøves med nye målemetoder, er det absolut afgørende at vide, om det, man måler, også stemmer, og da er Teknologisk Instituts fuldtædte referencerør DN50/140, oprindeligt produceret med CO₂-skum, særdeles velegnet.

Det var således på forhånd kendt, røret har en varmekonduktivitet for isoleringen på 38,6 W/(m·K), og resultatet med den nye on-site-metode skulle derfor naturligvis give det samme.

Til en måling for at fastlægge et rørs isolerings varmekonduktivitet kræves kendskab til:

- Rørets geometri, dvs. relevante mål for diametre og rørlængden (D_{S1} , D_{S2} , D_{C3} og D_{C4})
- Temperaturen på indersiden af medierøret (T_1)
- Temperaturen på ydersiden af kapperøret (T_4)
- Varmefluxen fra kapperøret (Φ)

Sammenhængen mellem ovenstående ses på følgende formel, hvor de målte temperaturer og varmekraften er angivet med blå:

$$\lambda_i = \frac{\ln\left(\frac{D_{C3}}{D_{S2}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \left((T_1 - T_4) \cdot \frac{L}{\Phi} - \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{D_{S2}}{D_{S1}}\right) - \frac{1}{\lambda_c} \cdot \ln\left(\frac{D_{C4}}{D_{C3}}\right) \right)}$$

Rørets geometri måles let med skydelære, cirkummeter og målebånd. Temperaturen T_1 på indersiden af medierøret kan ved en ikke-destruktiv metode af gode grunde ikke måles, men det kan til gengæld temperaturen T_2 på ydersiden af medierøret, idet der gennem kapperøret bores et lille hul, og med en svejsetråd dannes en lille krum kanal igennem skummet, hvorigennem der injiceres varmeledende pasta og en thermocoupler. Temperaturen T_1 på indersiden af medierøret kan efterfølgende beregnes ud fra T_2 .



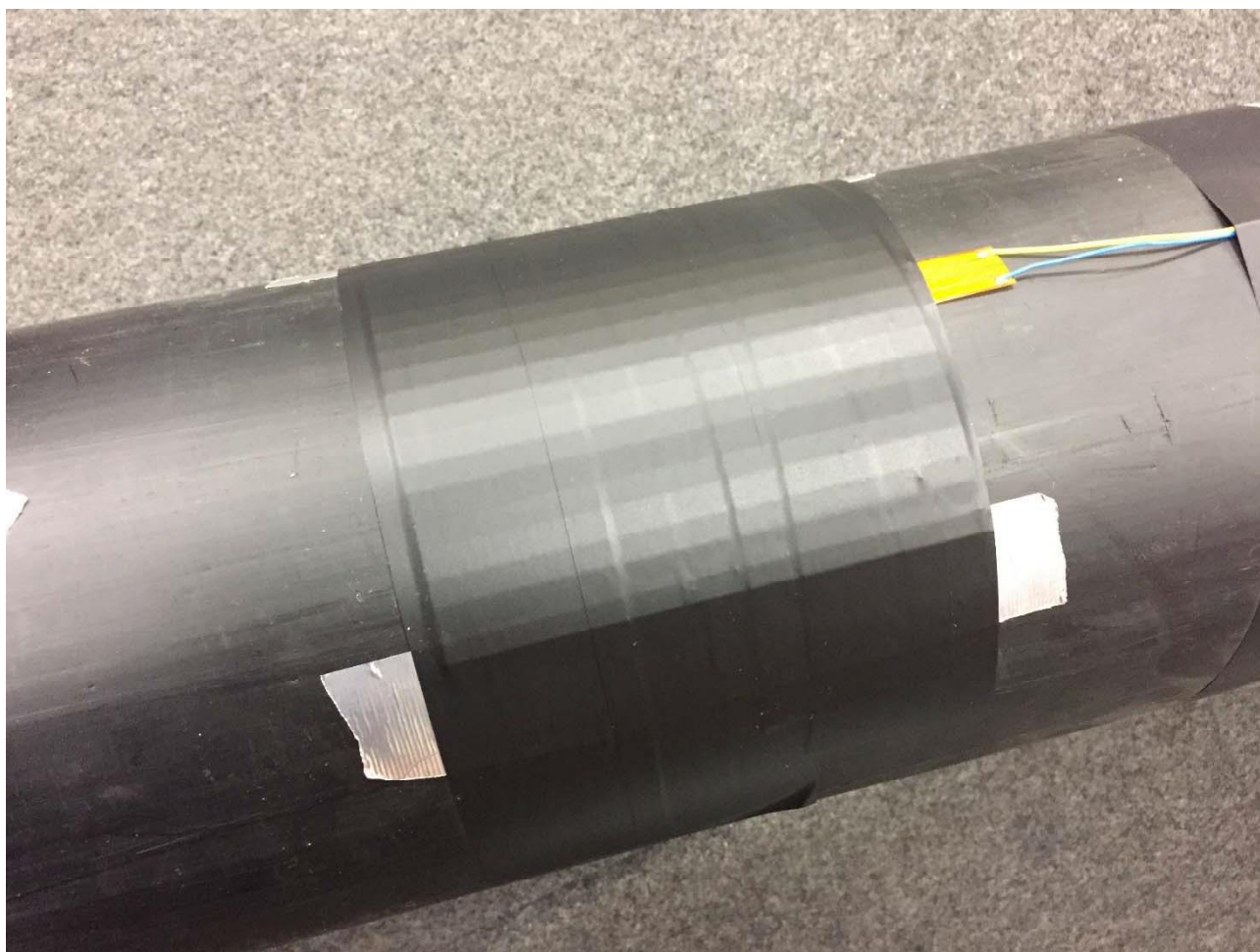
Billede 5: Gennem en kanyle injiceres varmeledende pasta ned til overfladen af medierøret.



Billede 6: En thermocoupler anbringes på oversiden af medierøret. Under tapen ses til højre en tilsvarende anbragt på oversiden af kapperøret

Den sidste parameter at måle er varmekraften, og det sker med en varmekraftmåler anbragt på ydersiden af kapperøret. Her er det vigtigt, at denne er dels monteret tæt til kapperøret, dels at den har en overfladeemission så tæt på kapperørets som muligt.

Da kapperøret er fremstillet af sort PE, blev varmekraftmåleren monteret med sort PE-tape.



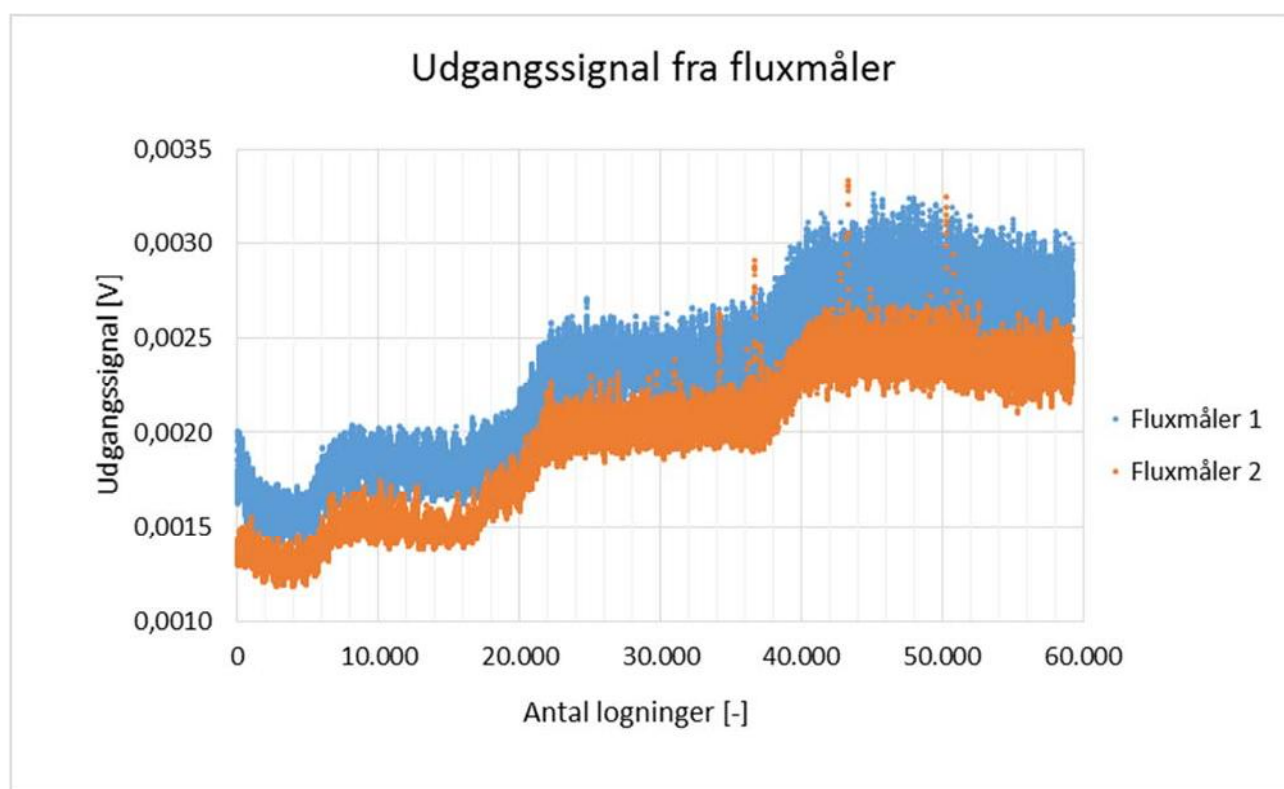
Billede 7: Varmekraftmåleren monteret på kapperøret med sort PE-tape

For at sikre, at målingerne ikke blot blev udført som øjebliksværdier, blev temperaturerne og varmekraften registreret via en datalogger, så alle målinger efterfølgende kunne midles over et vist tidsrum, især fordi det hurtigt kunne konstateres, at udgangssignalet fra varmekraftmålerne var stærkt fluktuerende.

5. Resultater

Målingerne i laboratoriet blev udført på et uforseglet ældet DN50/140 referencerør, hvor isoleringens varmekonduktivitet var kendt på forhånd. Rørets isolering har en relativ høj varmekonduktivitet, da det er et ældre rør med CO₂-skum, som har været ældet, og derfor er helt stabilt uden termiske ændringer.

Det kunne hurtigt konstateres, at udgangssignalet fra varmemfluxmålerne var meget fluktuerende, hvorfor en direkte aflæsning på det tilsluttede voltmeter ikke var optimal, og der blev koblet en datalogger på, så resultaterne kunne midles over et givet tidsrum efterfølgende. På nedenstående graf ses fluxmålerens udgangssignal som funktion af tiden, og der blev logget hvert sekund. Den ene fluxmåler blev placeret på undersiden af røret vendende mod det køligere gulv, og den anden på oversiden af røret vendende mod det varmere loft, hvilket er den primære årsag til de to forskellige udgangssignaler, men de fluktuerer tydeligvis begge meget uanset placeringen.

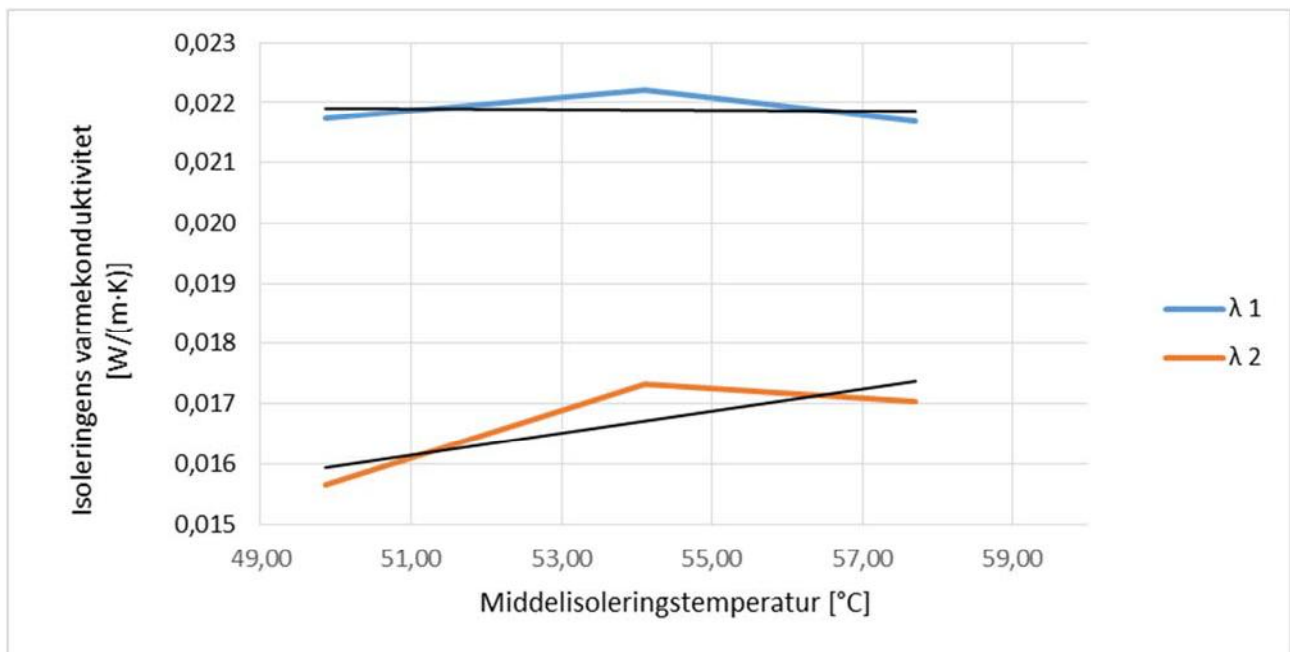


Figur 3: Udgangssignalet fra varmemfluxmålerne var meget fluktuerende. Bemærk de tre niveauer, der skiller ved ~20.000 og ~40.000 logninger svarende til tre forskellige medierørstemperaturer

Sammen med den målte medie- og kapperørstemperatur skulle det nu i princippet være muligt at beregne isoleringens varmekonduktivitet på samme måde som prøvninger i laboratoriet generelt.

Normalt giver målingerne tre punkter på en ret linje, hvilket trods adskillige forsøg slet ikke lod sig gøre i projektmålingerne, og endvidere ramte ingen af interpolationerne den kendte varmekonduktivitet på 38,6 W/(m·K).

Idet laboratoriemålingerne ikke gav det forventede resultat, blev det besluttet, at målinger on-site, dvs. på rør i drift, ikke som sådan ville være formålstjenlig, når metoden ikke kan give det rigtige resultat i laboratoriet.



Figur 4: Målingerne resulterede ikke i tre punkter på en ret linje, og ramte heller ikke λ_{50} på 38,6 W/(m·K)

Til at sikre en repræsentativ varmefluxmåling burde den dækkende tape have overfladeegenskaber sammenlignelig med det sorte PE kapperør. Den til projektet anvendte tape var så tæt på som muligt, men det kan ikke udelukkes, at den kan have haft en betydning for den manglende korrelation mellem resultaterne.

6. Konklusion og fremtidsperspektiver

I projektforsøget er der gjort mange erfaringer i forhold til at anvende IR og varmefluxmålere til bestemmelse af et præisoleret fjernvarmerørs isolerings varmekonduktivitet, og der er stadig udfordringer, bl.a. i forhold til at give varmefluxmåleren en emission svarende til et sort kapperør af PE.

Metoden er som sådan egnet, men vil stille store krav til, hvordan målingerne reelt skal udføres on-site, hvor klimatiske påvirkninger som især vind og sol vil nødvendiggøre en form for overdækning af målestedet i udgravningen. Målinger i koldt vejr vil give den største varmeflux, mens en varm sommerdag med sol vil reducere udgangssignalet fra varmefluxmåleren væsentligt og dermed øge usikkerheden.

I projektet F&U 2011-01 blev on-site-måling af isoleringens varmekonduktivitet prøvet med en sonde, der, når den var placeret i isoleringen gennem et lille hul i kapperøret, udsendte en varmepuls, og derefter registrerede den tid, som temperaturrelaksationen varede, og på den baggrund kunne varmekonduktiviteten beregnes. Uheldigvis var metoden ikke egnet, da den store varmeflux fra medierøret forstyrrede målingerne totalt, og metoden ville derfor kræve måling på rør, der midlertidig var taget ud af drift og kølet ned til omgivelsestemperatur, hvilket sjældent er muligt.

Selv om den i dette projekt anvendte metode bygger på et ganske andet princip, er resultaterne så usikre, at vi dels ikke har fundet metoden egnet til at måle on-site, dels at metoden kræver meget mere grundforskning ud over de givne økonomiske projektrammer for at kunne anvendes til valide målinger.