

Projekt nr. 2012 – 04

Titel: Forbedring af test- og beregningsmetoder af varmeledningsevnen i
twinrør

Udført af: DTU, Logstor A/S, LP Solution og Teknologisk Institut

Varmeledningsevne i twinrør

Udvikling af forbedret beregningsværktøj

Danmarks
Tekniske Universitet



LP Solution

LOGSTOR



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Januar 2013

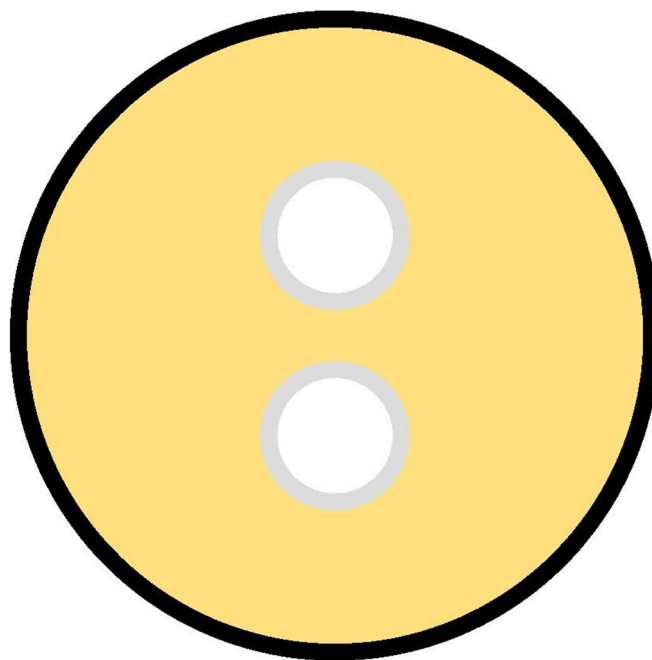
Fjernvarme
FREEM

Dansk
Fjernvarme

Fjernvarme
- når god energi er inde i varmen

Forbedring af test- og beregningsmetoder af varmeledningsevnen i twinrør

Dansk Fjernvarmes F&U-konto nr. 2012-04



Udført af:

LP Solution, Odense

DTU Byg, Kongens Lyngby

Logstor A/S, Løgstør og Fredericia

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

Forord

Måling af varmekonduktiviteten – varmeledningsevnen – for isoleringsmaterialet i præisolerede fjernvarmerør har i Danmark stor fokus. Målingerne foretages i laboratorium på udvalgte rørstykker og udføres i henhold til de gældende standarder herfor. I forbindelse med Dansk Fjernvarmes præ-rørskontrol er det dog nødvendigt at fravige metoderne angivet i standarderne delvist. Fx kan varmeledningsevnen i lige twinrør ikke måles i henhold til standarden, da værdien skal deklareres på et tilsvarende enkeltrør fremstillet med samme skumblanding, hvilket naturligvis ikke er muligt, da udtagningerne i præ-rørskontrollen sker stikprøvevis på hele produkter.

Uanset at enkelte laboratoriemålinger foretages med fravigelser fra standarderne, ændrer det ikke ved det faktum, at målinger af isoleringens varmekonduktivitet udføres på udtagne rørstykker. Den store fokus, der er på varmetabet fra fjernvarmeledninger, er i Danmark en betydelig konkurrenceparameter mellem rørproducenterne.

Måling på udtagne rørstykker udføres på enten nye eller kunstigt ældede rør. I forbindelse med Dansk Fjernvarmes temadage om præ-rør, hvor resultaterne fra Distributionsgruppen under Dansk Fjernvarmes årlige præ-rørskontrol fremlægges, blev der i 2011 fra producenterne stillet spørgsmål om, hvorfor resultaterne for twinrør ligger højere end for enkeltrør, hvilket er årsagen til dette projekts gennemførelse.

For enkeltrørs vedkommende kan en målings resultater anvendes direkte til beregning af varmeledningsevnen i isoleringen. Drejer det sig derimod om twinrør, kan beregningen ikke foretages direkte, men resultatet kan simuleres på forskellig måde med iterative programmer, fx med Finite Element Method (FEM) eller Multipol (MP).

For at belyse, tilrette og verificere de beregningsparametre, der ligger til grund for simulering af twinrør, blev der til projektet fremstillet et enkeltrør og et twinrør med nøjagtig samme skumblanding. Ved måling på enkeltrøret kunne skummets varmeledningsevne således beregnes direkte, og resultatet var derfor på forhånd kendt for twinrørets vedkommende, hvorefter beregningsparametrene blev tilrettet i simuleringsprogrammet og efterfølgende verificeret med nye simuleringer.

Projektet er gennemført på Teknologisk Institut i perioden april 2012 til oktober 2012 med deltagelse af DTU (FEM-simuleringer), Logstor A/S (rørproducent), LP Solution (multipol-simuleringer) og Teknologisk Institut (prøvninger) med civilingeniør Niels Winther som projektleder.

Aarhus, den 30. januar 2013

Allessandro Dalla Rosa
Civilingeniør, Ph.d.
Danmarks Tekniske Universitet

Allan N. Hansen
Teknisk Chef
Logstor A/S

Lasse Elmelund Pedersen
Civilingeniør
LP Solution

Niels Winther
Civilingeniør
Teknologisk Institut

Dansk Fjernvarmes Distributionsgruppe bestod i 2012 af:

Jørgen Eigaard Hansen, VEKS I/S

Karsten Randrup, Verdo Varme A/S

Astrid Birnbaum, Københavns Energi

Nils-Aage Gregersen, Aalborg Kommune

Jakob Storm Rasmussen, Fjernvarme Fyn

Torkild Kjærsgaard, Skanderborg Fjernvarme

Mette Hansen, Dansk Fjernvarme (fra 1/9-2012)

Mogens H. Nielsen, Dansk Fjernvarme (til 31/8-2012)

Indholdsfortegnelse

Forord.....	3
1. Sammendrag og konklusion	6
2. Baggrund	7
3. Varmekonduktivitet.....	8
3.1 Plan isolering.....	8
3.2 Cirkulær isolering.....	8
3.3 Isolering med kompleks geometri	9
3.4 Simulering med Multipol.....	10
4. Middelisoleringstemperatur	11
5. Prøvningsprogram.....	12
5.1 Prøvningsemner.....	12
5.2 Indledende prøvninger	12
5.3 Prøvning på enkeltrør	13
5.4 Prøvning på twinrør	13
6. Forbedret metode til beregning af middelisoleringstemperaturen.....	15
6.1 Formål.....	15
6.2 Fremgangsmåde	15
6.3 Enkeltrørsmetoden.....	15
6.4 Twinrørsmetoden	16
7. Konklusion.....	18
8. Litteratur	19
9. Bilag	20
Bilagsoversigt	20
9.1 Bilag 1 Målskema for enkeltrør	21
9.2 Bilag 2 Målskema for twinrør.....	22
9.3 Bilag 3 Standarder for præisolerede fjernvarmerør.....	23
9.4 Bilag 4: Resultater fra måling i.h.t. DS/EN 253, lige enkeltrør 60,3/140	24
9.4 Bilag 4: Resultater fra måling i.h.t. DS/EN 253, lige twinrør 2×60,3/225.....	28

1. Sammendrag og konklusion

Projektet har haft til formål at forbedre test- og beregningsmetoder af varmeledningsevnen i twinrør ved at belyse, tilrette og verificere de parametre, der ligger til grund for simuleringsprogrammet Multipol (MP), og hvor der som kontrolsimulering er anvendt Finite Element Method (FEM).

Ved at foretage sammenlignende målinger på ensproducerede enkelt- og twinrør har det været muligt at beregne varmeledningsevnen i isoleringen ud fra målingerne på enkeltrøret, og så efterfølgende tilrette beregningsparametrene i simuleringsprogrammet så det gav samme resultat for twinrøret svarende til en verifikation mellem resultaterne for enkelt- og twinrøret.

Inden beregningsparametrene blev tilrettet, var forskellen mellem resultaterne for enkelt- og twinrør på ca. 13 %, og efter tilretning og verifikation var forskellen på ca. 3 %.

Der er således opnået et mere præcist simuleringsværktøj end det, der tidligere var tilgængeligt.

2. Baggrund

Et materials varmekonduktivitet er i større eller mindre grad afhængig af temperaturen. For isoleringsmaterialer til fx byggeri angives værdien ved en middeltemperatur på 10 °C som λ_{10} og for præisolerede fjernvarmerør angives den jf. DS/EN 253:2009 ved en middeltemperatur på 50 °C som λ_{50} .

Beregning af varmetab og isoleringsevne, dvs. varmetransmissionskoefficient (U-værdi) og varmekonduktivitet (λ -værdi) er for enkeltrørs vedkommende, hvor geometrien består af koncentriske cirkler baseret på J. B. J. Fouriers (1768-1830) varmeteorem fra 1824 integreret over arealet. Beregningen foretages da i henhold til standarderne ved lineær regression ud fra måledata, og målingerne foretages ved at registrere forskellen mellem den tilførte energimængde og temperaturerne på indersiden af medierøret og på ydersiden af kapperøret.

Ved twinrør er geometrien kompleks, og en direkte eksakt beregning lader sig ikke udføre. Den klassiske beregningsmodel for fastlæggelse af varmeledningsevne er således ikke anvendelig ved twinrør, hvis geometri naturligt afviger fra enkeltrør. Ved at anvende numeriske metoder som Multipol (MP) eller Finite Element Method (FEM) kan varmekonduktiviteten fastlægges ud fra en iterativ simulering, hvor grænseværdierne herfor er opnået gennem prøvning i laboratoriet. En nærmere beskrivelse af denne metode fremgår fx af Dansk Fjernvarmes F&U-projekt 2009-03.

På Dansk Fjernvarmes temadage om præisolerede prærør i december 2011, hvor resultaterne fra årets prærørskontrol blev fremlagt, blev der fra producenterne stillet spørgsmål om, hvorfor resultaterne for twinrør ligger højere end for enkeltrør, hvilket er årsagen til dette projekts gennemførelse.

For at belyse, tilrette og verificere de beregningsparametre, der ligger til grund for simulering af twinrør, blev der til projektet fremstillet et enkeltrør og et twinrør med nøjagtig samme skumblanding. Ved måling på enkeltrøret kunne skummets varmeledningsevne således beregnes direkte, og resultatet var derfor på forhånd kendt for twinrørets vedkommende, hvorefter beregningsparametrene blev tilrettet i simuleringsprogrammet og efterfølgende verificeret med nye simuleringer

Inden beregningsparametrene blev tilrettet, var forskellen mellem resultaterne for enkelt- og twinrør på ca. 13 %, og efter tilretning og verifikation var forskellen på ca. 3 %.

3. Varmekonduktivitet

Et materiales evne til at lede varme angives ved dets *varmekonduktivitet*, *varmeledningsevne* eller *varmeledningstal* og udtrykkes ved *lambdaværdien* λ målt i $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

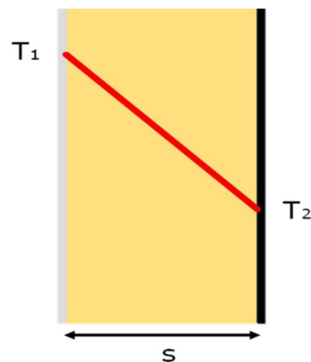
Varmekonduktivitet angiver det antal joule, der pr. sekund passerer gennem 1 m^2 af materialet med en tykkelse på 1 m , når der er en temperaturforskel mellem fladerne på 1 K . En høj værdi for λ angiver således en høj varmekonduktivitet og dermed en dårlig varmeisoleringssevne.

Stillestående gas/luftarter er fremragende isolatorer, og giver relativt lave værdier af λ , mens metaller er fremragende varmeledere med høje værdier af λ . Varmekonduktiviteten øges generelt med stigende temperatur og er således ikke en rent lineær funktion.

3.1 Plan isolering

Ved plan, homogen isolering og moderate temperaturer opstår der en teoretisk set lineær temperaturgradient gennem materialet som angivet på figur 4:

$$\Phi = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot \Delta T \text{ [W]}$$



Figur 4: Temperaturgradient gennem plan isolering

Varmetabet (Φ) er således en funktion af isoleringens varmekonduktivitet (λ), tykkelse (s) og areal (A) samt temperaturforskellen (ΔT) mellem de to sider.

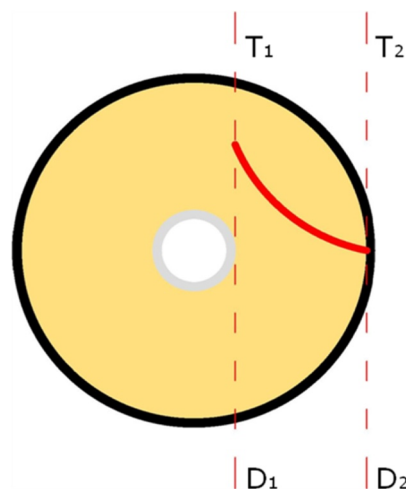
3.2 Cirkulær isolering

Ved cirkulær isolering opstår der ved moderate temperaturer en teoretisk set eksponentiel aftagende temperaturgradient radialt fra centrum som angivet på figur 5:

$$\Phi = \frac{\lambda}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

⇕

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \Delta T}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} \text{ [W]}$$



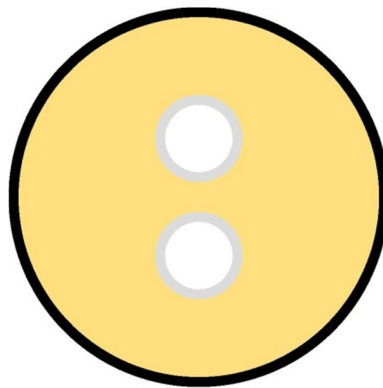
Figur 5: Temperaturgradient gennem cirkulær isolering

Varmetabet (Φ) er således en funktion af isoleringens varmekonduktivitet (λ), længde (L) og forholdet mellem ydre (D_2) og indre (D_1) isoleringsdiameter samt temperaturforskellen (ΔT) mellem disse.

Består det cirkulære tværsnit af flere lag, hvilket naturligvis gælder for præisolerede rør med medierør inderst, kapperør yderst og isolering mellem disse, udvides formelen i nævneren blot til at omfatte flere led for den reciprokke varmekonduktivitet for de enkelte lag multipliceret med forholdet mellem de enkelte lags diametre.

I praksis består isoleringen af uendelig mange lag med hver sin varmekonduktivitet, da denne er temperaturafhængig, og den vil således være et uendeligt antal koncentriske cirkler omkring medierøret.

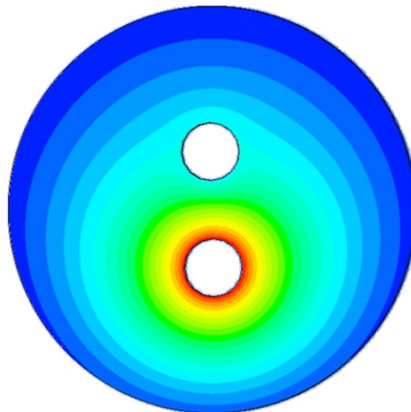
3.3 Isolering med kompleks geometri



Figur 6: Rørtværsnit med to ens medierør (twinrør)

I rør med mere end ét medierør bliver temperaturfordelingen og dermed varmetabet en kompleks funktion af geometrien og kan ikke løses eksakt med direkte formeludtryk.

Temperaturfordelingen vil, hvis det antages at det nederste medierør er det varmeste, få en dråbeformet profil som angivet på figur 7:



Figur 7: Eksempel på temperaturfordeling i twinrør

Der er udviklet forskellige numeriske og tilnærmede metoder til beregning af sådanne geometrier, og fælles for dem er, at de er baseret på iteration. I projektet er anvendt Multipol (MP), der kort omtales i det følgende.

3.4 Simulering med Multipol

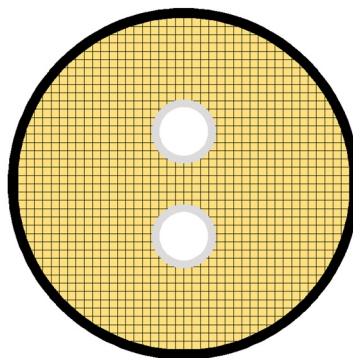
Multipol er baseret på analogien mellem elektromagnetisme og varmestrøm i homogene materialer. I varmestrømsteorien er 'kilde potentialer' = 'fluxkilder', og der er dobbelt så mange kilder, som der er medierør i systemet. Det skyldes, at den ene halvdel af kilderne er placeret i et geometrisk forhold til hinanden, som medierørerne vil være, og den anden halvdel vil være placeret som spejlet i et imaginært halvplan. Kilderne i det imaginære plan har modsat fluxfortegn i forhold til spejlkilden. Det iterative loop justerer kildernes styrke, så randbetingelserne bliver opfyldt. Randbetingelserne vil være medierørens temperaturer i en bestemt afstand fra kilden samt den omgivende temperatur. Når loopet konvergerer, kan varmetabet for rørene aflæses som kildernes styrke.

Til dette projekt blev anvendt en invers Multipol, som beregner varmekonduktivitet ud fra kendte randbetingelser og varmetab.

Til beregning af middelisoleringstemperaturen opdeles tværsnittet i et antal små, kvadratiske elementer. Temperaturen beregnes i knudepunkter, og der foretages iteration indtil der er opnået konvergens mellem grænseværdier og den ubekendte.

Erfaring har vist, at opdeling i en matrix på 40×40 elementer giver resultater, som afviger mindre end 1 % end ved opdeling i en matrix på 200×200 . Gevinsten er til gengæld en markant hurtigere iterationsproces, hvorfor denne metode er anvendt.

Et eksempel på opdelingen i små elementer er angivet i figur 8:



Figur 8: Opdeling i 40×40 matrix ved Multipol

Invers Multipol (IMP) beregner endvidere middeltemperaturen og den konvektion, som sker omkring kapperøret ved prøvning i luft. Overgangskoefficienten er her fastlagt som Zhukauskas relation anført i "Introduction to heattransfer" af Frank P. Incropera og David P. de Witt.

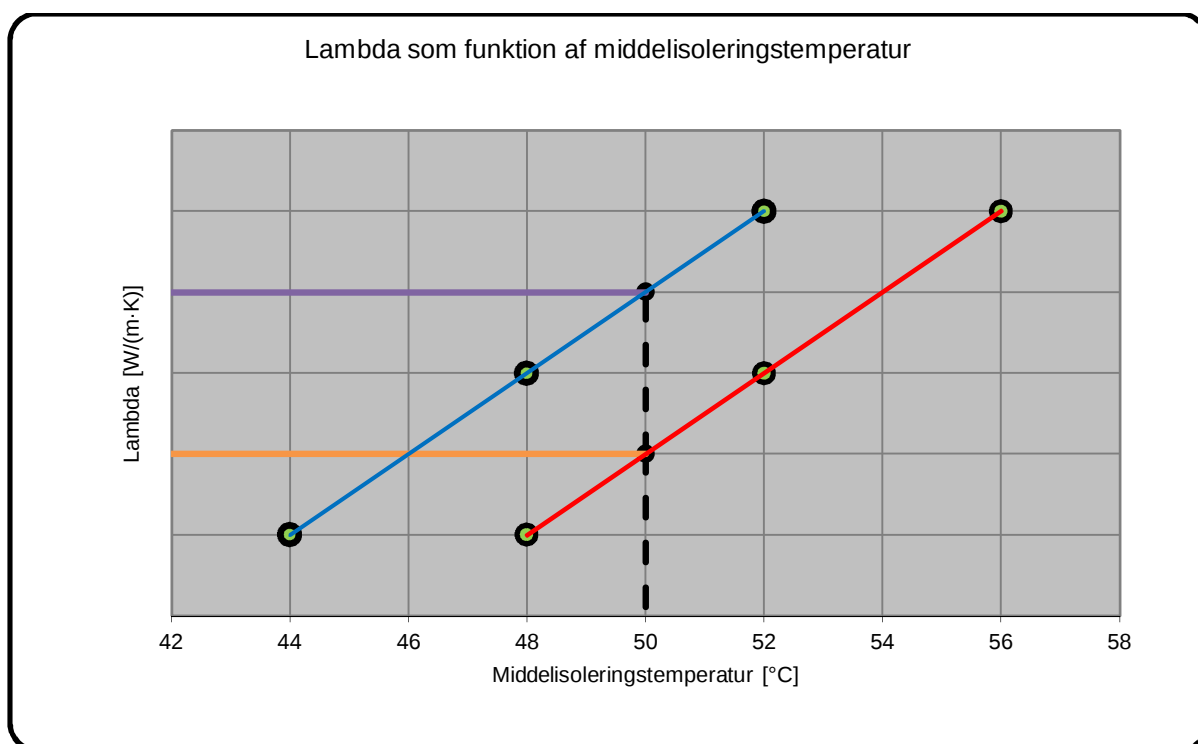
Middelisoleringstemperaturen er da en matematisk middelværdi, der ikke tager højde for, at varmekonduktiviteten er temperaturafhængig. I dette projekt er anvendt en fysisk middelisoleringstemperatur T_{imf} , som tager højde for, at varmekonduktiviteten er temperaturafhængig ud gennem de uendelige, tynde isoleringslag med individuelle varmekonduktiviteter.

4. Middelisoleringstemperatur

Begrebet middelisoleringstemperatur anvendes bl.a. inden for beregning af varmekonduktivitet, og for præisolerede rør betyder det, at denne skal beregnes ved en middelisoleringstemperatur på 50 °C og betegnes da λ_{50} .

Middelisoleringstemperaturen defineres i henhold til DS/EN 253 til at ligge midt i isoleringen, da den beregnes som $\frac{T_2+T_3}{2}$ altså gennemsnittet af temperaturerne på inder- og ydersiden af isoleringsskiven. Jf. 3.2. er temperaturgradienten ikke lineær gennem isoleringen, og middelisoleringstemperaturen ligger derfor ikke præcis i midten. Beregnes middelisoleringstemperaturen ikke korrekt, giver det en forkert værdi for varmekonduktiviteten ved den temperatur, hvor denne skal deklareres; for præisolerede rør ved 50 °C.

På figur 9 ses det, at såfremt middelisoleringstemperaturen er beregnet for lav (blå kurve), giver det en værdi for varmekonduktiviteten, som er for høj (lilla linje), mens det for en middelisoleringstemperatur, der er beregnet for høj (røde kurve), giver en værdi for varmekonduktiviteten, som er for lav (orange linje):



Figur 9: Middeltemperatures betydning for λ_{50}

Det er således afgørende, at middeltemperaturen beregnes eller simuleres så korrekt som muligt, da det har stor indflydelse på den deklarerede værdi for varmekonduktiviteten, hvilket har været formålet med projektet.

Ved at anvende den fysiske middelisoleringstemperatur som beskrevet i 3.4 opnås mere nøjagtige resultater, således at λ_{50} kan beregnes mere præcist.

5. Prøvningsprogram

Projektets prøvningsprogram har været baseret på et lige enkeltrør som reference og et lige twinrør. Begge er fremstillet af Logstor A/S med nøjagtig samme skum.

5.1 Prøvningsemner

Rørene var et lige enkeltrør 60,3/140 mm og et lige twinrør 2×60,3/225 mm, begge á 3000 mm.

5.2 Indledende prøvninger

Inden de egentlige prøvninger på enkelt- og twinrøret blev påbegyndt, blev der udført en serie indledende prøvninger for at fastslå betydningen af sensorerne på kapperørets placering og montage. Til måling af temperaturerne i såvel medie- som kapperøret anvendes normalt thermocouplere type T, og de fastgøres med sort PE-tape, for at denne skal have samme termiske egenskaber, som det materiale, der måles på, dvs. varmekonduktivitet og refleksion er ens for både tape og kapperør. Det blev efter nøje overvejelse besluttet at afprøve forskellen mellem at montere sensorerne med tape alene eller med tape og varmeledende pasta. Endvidere blev der, for at eliminere de temperaturforskelle der på kapperøret kan opstå på grund af rumlige variationer i temperaturen omkring røret, anvendt en ventilator, der blæste i aksial retning hen over kapperøret, som angivet på billede 1:

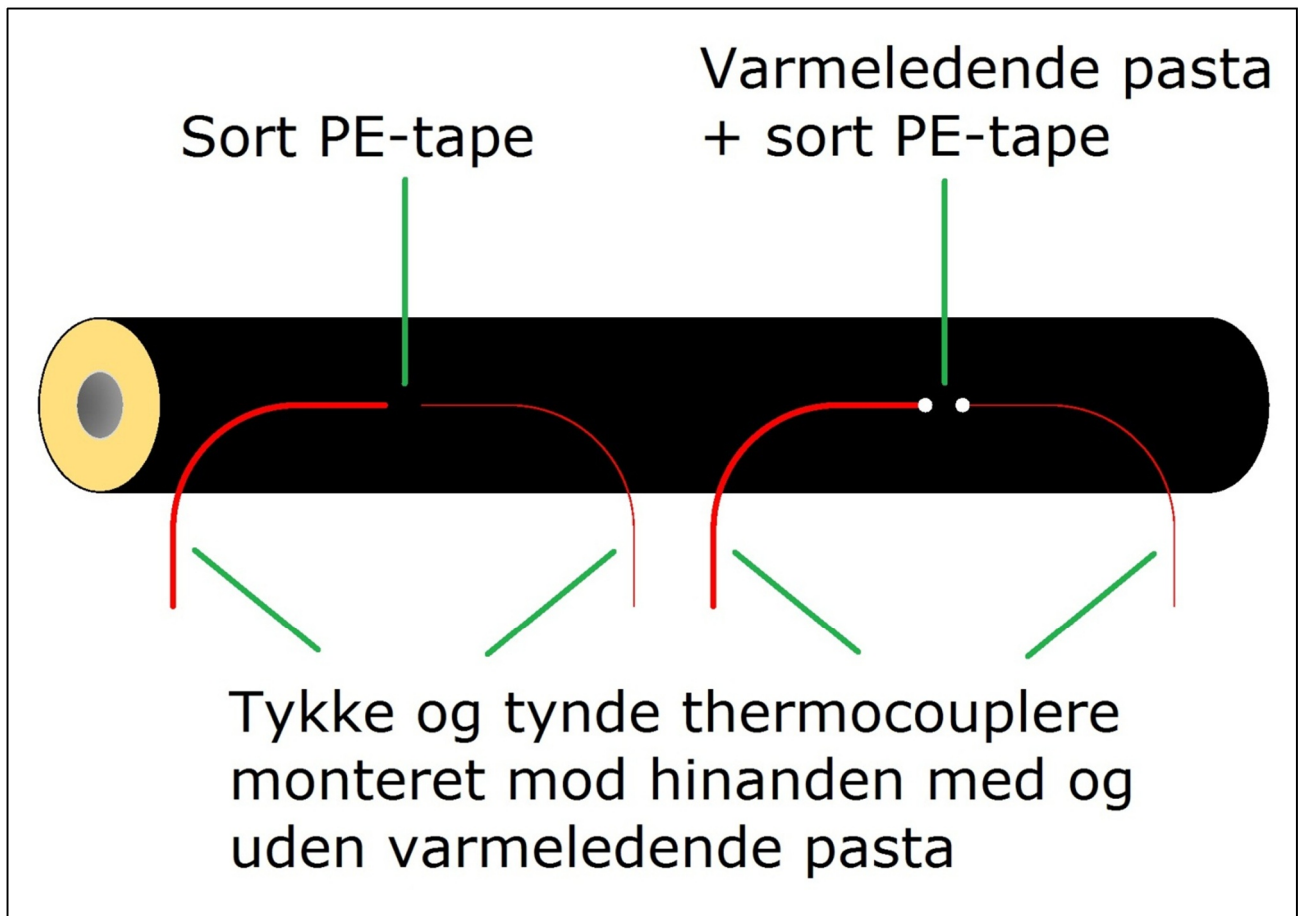


Billede 1: Blæser til aksial luftstrøm omkring overfladefølere

Fordelene ved at anvende ventilation omkring røret er, at den naturlige konvektion udlignes, men for at denne kan være effektiv, skal der ventileres jævnt i hele rørets aksiale retning; en ventilering kun fra den ene rørende vil ikke udligne temperaturerne i den anden ende, og der vil opstå aksiale temperaturforskelle, mens der ved ventilering fra siden vil opstå tangentielle temperaturforskelle. En fuldstændig ventilering vil derfor kræve nøje studier af de opnåede lufthastigheder.

Endvidere blev der udført sammenlignende målinger med to typer thermocouplere; dels den type, som normalt anvendes af Teknologisk Institut ved målinger på præisolerede rør, og dels en type, som var meget tyndere og dermed hurtigreagerende.

Disse blev monteret parvis "tete-à-tete" dvs. "ansigt til ansigt" for at måle i stort set samme punkt, men ved at lade ledningerne gå til hver sin side blev ledningernes forstyrrende varmeledning begrænset til et minimum. På figur 10 ses hvorledes montagen blev udført.



Figur 10: Følermontering "tete-à-tete"

De indledende prøvninger viste, at en hurtigreagerende type thermocouplere ikke giver bedre resultater ved måling af overfladetemperaturen på kapperøret, idet der er en relativ stor masse og dermed træghed i kappematerialet. Til gengæld viste målingerne, at der kan opnås en bedre kontakt mellem sensor og kapperør, hvis der anvendes varmeledende pasta ved montagen af sensoren.

5.3 Prøvning på enkeltrør

Den første prøvningsserie blev udført på enkeltrøret for at fastslå varmekonduktiviteten af skummet for både enkelt- og twinrøret.

Prøvningerne blev udført helt konventionelt i henhold til DS/EN 253 med medierørstemperatur på 80 ± 10 °C, og for ikke at overskride dette interval blev medierørstemperaturerne valgt til ca. 71 °C, 80 °C og 89 °C. Sensorerne på kapperøret var monteret med varmeledende pasta og sort PE-tape.

Resultatet viste en varmekonduktivitet på 0,024 W/(m·K). I bilag 1 ses resultatet af målingerne på enkeltrøret.

5.4 Prøvning på twinrør

Den anden prøvningsserie blev udført på twinrøret for at fastslå varmekonduktiviteten af skummet ud fra en simulering med den hidtidige version af Multipol. I lighed med prøvningen på enkeltrøret blev sensorerne på kapperøret monteret med varmeledende pasta og sort PE-tape.

Prøvningerne blev udført helt konventionelt i henhold til DS/EN 253 med medierørstemperaturer på 80 ± 10 °C, og for ikke at overskride dette interval blev medierørstemperaturerne valgt til ca. 71 °C, 80 °C og 89 °C. Sensorerne på kapperøret var monteret med varmeledende pasta og sort PE-tape. Resultatet viste en varmekonduktivitet på 0,027 W/(m·K). I bilag 2 ses resultatet af målingerne på twinrøret.

6. Forbedret metode til beregning af middelisoleringstemperaturen

6.1 Formål

Formålet er at forbedre beregningsmetoden for bestemmelse af varmetab for præisolerede enkelt- og twinrør samt skabe et fælles grundlag for bestemmelse af middeltemperaturen for præisolerede enkelt- og twinrør. Derved forbedres målemetoden for bestemmelse af varmekonduktiviteten, da den tager udgangspunkt i beregningsmetoden.

6.2 Fremgangsmåde

I afsnit 6.3 og 6.4 bliver der redegjort for to metoder til at beregne en T_{imf} fysisk isoleringsmiddeltemperatur gældende for enkelt- og twinrør, jf. afsnit 3.4.

6.3 Enkeltrørsmetoden

Metoden er reduceret til kun at omhandle isoleringsdelen af et præisoleret fjernvarmerør. Det forudsættes, at isoleringen er homogen, og at varmekonduktiviteten i isoleringen er temperaturafhængig, samt at funktionen for denne afhængighed er kendt.

Isoleringen opdeles i n antal lag med samme isoleringstykkelse:

$$D_j = D_i + \frac{j \cdot (D_o - D_i)}{n} \text{ for } j=0..n \text{ hvor} \quad (1)$$

D_j er lagdiameteren, vektor

D_i er medierørsdiameteren

D_o er kapperørsdiameteren

n er antal laginddelinger

I første iterationsloop startes med at gætte på en temperaturfordeling i de forskellige lag; den vil typisk være en lineær interpolation:

$$T_j = T_i + \frac{j \cdot (T_o - T_i)}{n} \text{ for } j=0..n \text{ hvor} \quad (2)$$

T_j er lagtemperaturerne, vektor

T_i er medierørstemperaturen

T_o er kapperørstemperaturen

n er antal laginddelinger

Middeltemperaturen beregnes for det enkelte lag:

$$T_{m,k} = \frac{T_k + T_{k-1}}{2} \text{ hvor} \quad (3)$$

$T_{m,k}$ er lagmiddeltemperaturen

T_k er lagtemperaturerne, vektor

Den karakteristiske modstand for de individuelle lag beregnes nu med varmeledningsligningen, hvor varmeledningkoefficienten er givet ved den lokale middeltemperatur:

$$R_k = \frac{\ln\left(\frac{D_k}{D_{k-1}}\right)}{\lambda(T_{m,k}) \cdot 2 \cdot \pi} \text{ hvor} \quad (4)$$

R_k er den termiske modstand, vektor

D_k er lagdiameteren, vektor

T_m er lagmiddeltemperaturen, vektor

$\lambda(T_{m,k})$ er lambdafunktionen

De enkelte lagmodstande akkumuleres nu til en total modstand:

$$R_{akk,k} = R_{akk,k-1} + R_k \text{ for } k=1..n \text{ hvor} \quad (5)$$

$R_{akk,k}$ er den akkumulerede modstand, vektor

R_k er den termiske modstand, vektor

Den gennemsnitlige varmeledningskoefficient kan nu beregnes:

$$\lambda_{imf} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{R_{akk,n} \cdot 2 \cdot \pi} \text{ hvor} \quad (6)$$

λ_{imf} er varmeledningskoefficienten for hele isoleringen

D_o er kapperørsdiameteren

D_i er medierørsdiameteren

$R_{akk,n}$ er den totale termiske modstand

Ved invers brug af $\lambda(T)$ kan T_{imf} nu bestemmes:

$$T_{imf} = \lambda^{-1}(\lambda_{imf}) \text{ hvor} \quad (7)$$

T_{imf} er isoleringens fysiske middeltemperatur

$\lambda^{-1}(\lambda_{imf})$ er den inverse lambdafunktion

Den akkumulerede sum af modstande kan nu anvendes til at beregne et nyt og bedre gæt på den rigtige temperatur:

$$T_j = T_i + \frac{R_{akk,j} \cdot (T_o - T_i)}{R_{akk,n}} \text{ hvor} \quad (8)$$

T_j er lagtemperaturen, vektor

T_i er medierørstemperaturen

T_o er kapperørstemperaturen

$R_{akk,j}$ er den akkumulerede modstand, vektor

n er antal laginddelinger

Funktionerne (3) - (8) gentages indtil den numeriske differens på to på hinanden følgende T_{imf} er mindre end den ønskede nøjagtighed.

For at kunne specificere resultatet for enkeltrør tilknyttes et indeks på følgende måde, $T_{imf,si}$.

6.4 Twinrørsmetoden

Der er ikke de samme muligheder for at lave en generel opdeling af isoleringslag for twinrør som for enkeltrør. Løsningen er en empirisk løsning, der tager udgangspunkt i enkeltrørsløsningen, hvor der bliver bygget en korrektion på, som afhænger dels af en dimensionsløs geometridel samt to temperaturoffset.

$$c_d = \frac{2 \cdot D_i}{cc} \text{ hvor} \quad (9)$$

c_d er centeroffsetforholdet
 d_i er medierørsdiameter
 cc er medierørscenterafstanden

$$T_s = \frac{T_{i1} + T_{i2}}{2} \text{ hvor} \quad (10)$$

T_s er symmetrisk temperatur
 T_{i1} er temperaturen i medierør 1
 T_{i2} er temperaturen i medierør 2

$$T_a = \frac{T_{i1} + T_{i2}}{2} \text{ hvor} \quad (11)$$

T_a er asymmetrisk temperatur
 T_{i1} er temperaturen i medierør 1
 T_{i2} er temperaturen i medierør 2

$$dT = T_s - T_o \text{ hvor} \quad (12)$$

dT er symmetrisk temperaturdifferens
 T_s er symmetrisk temperatur
 T_o er kapperørstemperatur

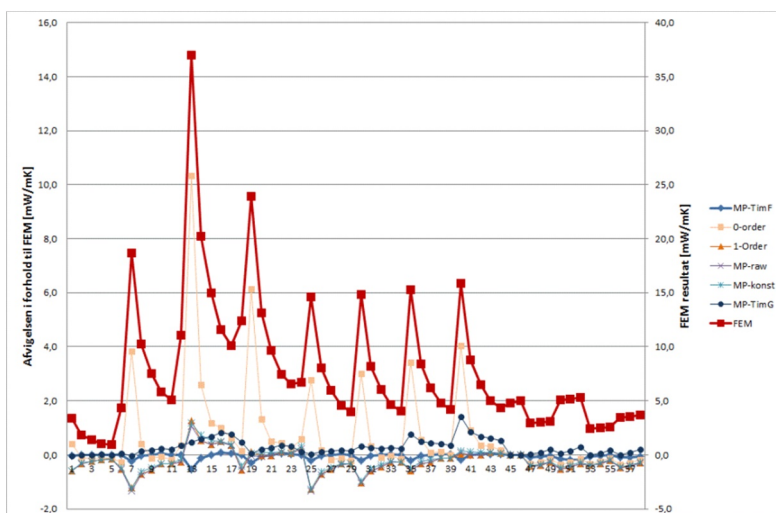
Med ovennævnte parametre kan T_{imf} for twinrør nu beregnes empirisk som:

$$T_{imf} = T_{imf,si} + (cd - 1,329) \cdot (dT \cdot 0,048835 + T_a \cdot 0,08545 - 0,575) + T_a^2 \cdot 0,0136385 \quad (13)$$

hvor

$T_{imf,si}$ er enkeltrørs T_{imf}
 cd er centeroffsetforholdet
 T_s er symmetrisk temperatur
 T_a er asymmetrisk temperatur
 dT er symmetrisk temperaturdifferens

(13) er udledt ved at sammenligne forskellen mellem resultaterne fra FEM og Multipol svarende til figur 11:



Figur 11: Forskellen mellem FEM og Multipol

7. Konklusion

Udgangspunktet for alle beregninger har været FEM-simuleringer. For enkeltrøret, hvor geometrien er konstant, blev der antaget den betingelse, at for et givent varmetab, beregnet med en temperaturafhængig varmekonduktivitet, skal der kunne findes en konstant varmekonduktivitetskoefficient, der giver et tilsvarende varmetab. For denne resulterende, konstante varmekonduktivitetskoefficient kan man med den temperatúrafhængige varmekonduktivitet føre tilbage til en temperatur defineret som "isoleringens fysiske middeltemperatur", T_{ifm} .

Det viser sig, at T_{imf} kan beregnes ved iterativ brug af den simple konduktivitetsformel, hvis man inddeler isoleringen i passende mange underinddelinger, og anvender de respektive varmelednings-evner ved de lokale middeltemperaturer. Nøjagtigheden i forhold til FEM er under 0.01%.

Samme fremgangsmåde er anvendt på twinrør. Der er det ikke lykkedes at finde en simpel beregningsmetode til beregning af T_{imf} , men den kan bestemmes med en ad hoc-metode. Udtrykket kan forfines, hvis datagrundlaget udvides. Nøjagtigheden for nuværende udtryk er i forhold til FEM inden for 3 % nøjagtighed.

For de fleste isoleringsmaterialer er der givet en funktion for varmekonduktiviteten som funktion af temperaturen. Med dette kendskab kan isoleringens middelvarmekonduktivitet beregnes på baggrund af T_{imf} .

8. Litteratur

Danvak, Varme- og klimateknik, Grundbog, 1997

DS/EN 253:2009. Præisolerede fjernvarmerør til direkte nedgravning i jord – Rørsystem af stålmedierør, isolering af polyurethancelleplast og kapperør af polyethylen

DS/EN ISO 8497:1997. Termisk Isolering. Bestemmelse af termiske transmissionsegenskaber for rørisolering ved stationær tilstand

DS/EN 15632-1:2009. Præisolerede fleksible rørsystemer – Del 1: Klassifikation, generelle krav og prøvningsmetoder

DS/EN 12667:2001. Byggematerialers termiske ydeevne – Bestemmelse af isolans ved hjælp af beskyttet varmeplade og varmestrømsmåler – Produkter med høj og middel isolans

DS/EN 15698-1:2009. Fjernvarmerør – Præisolerede dobbelte fjernvarmesystemer til direkte nedgravning i jord – Del 1: Dobbelt rørsystem af stålmedierør, isolering af polyurethancelleplast og kapperør af polyethylen

Introduction to heat transfer, Frank P. Incropera & David P. de Witt, 2nd edition, 1990

On transient heat losses from buried district heating pipes, International Journal of Energy Research, Benny Bøhm, 2000

SBI-meddelelse 7, Dimensionering af rørisolering, 1981

Steady-state heat loss from insulated pipes, Petter Wallentén, 1991

9. Bilag

Bilagsoversigt

Bilag 1: Standarder for præisolerede fjernvarmerør

Bilag 2: Målskema for enkeltrør

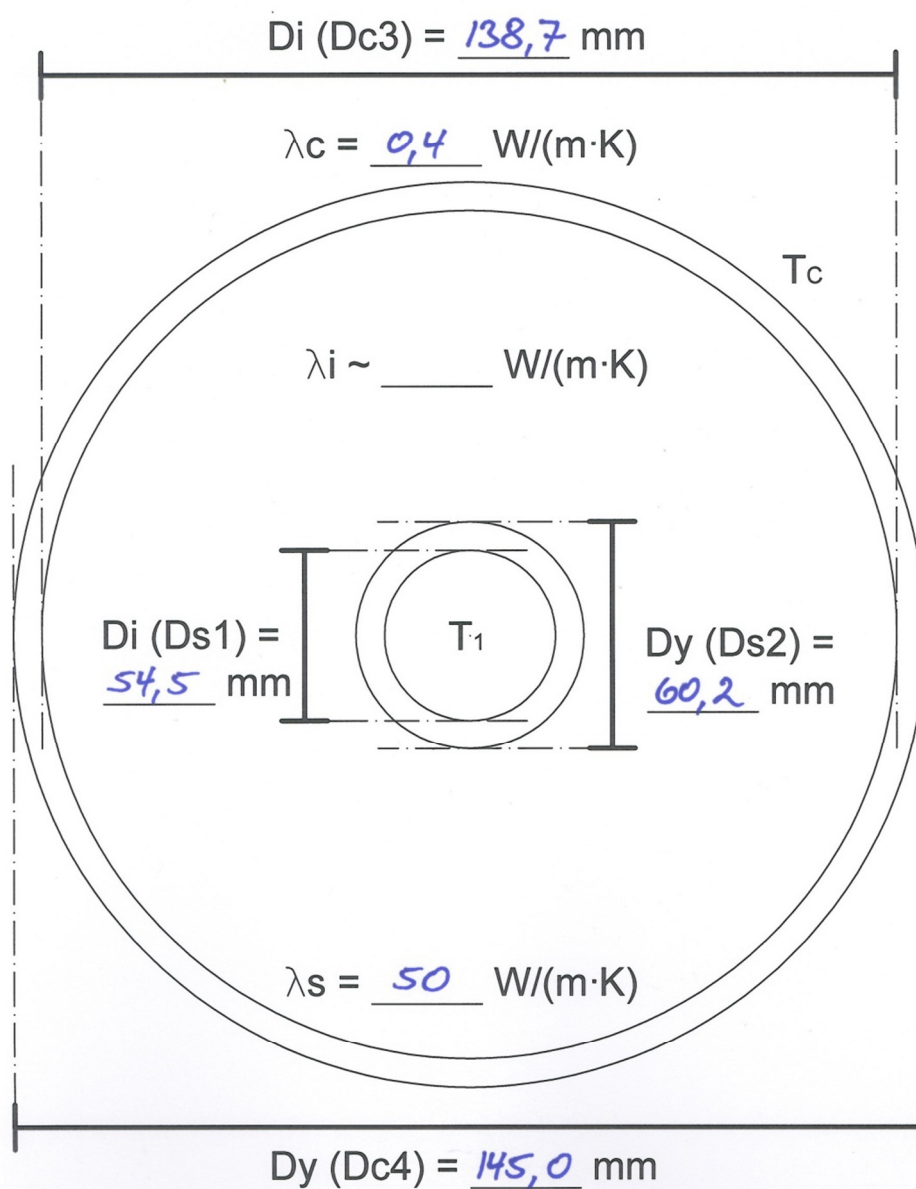
Bilag 3: Målskema for twinrør

Bilag 4: Resultater fra måling i.h.t. DS/EN 253, lige enkeltrør 60,3/140

Bilag 5: Resultater fra måling i.h.t. DS/EN 253, lige twinrør 2×60,3/225

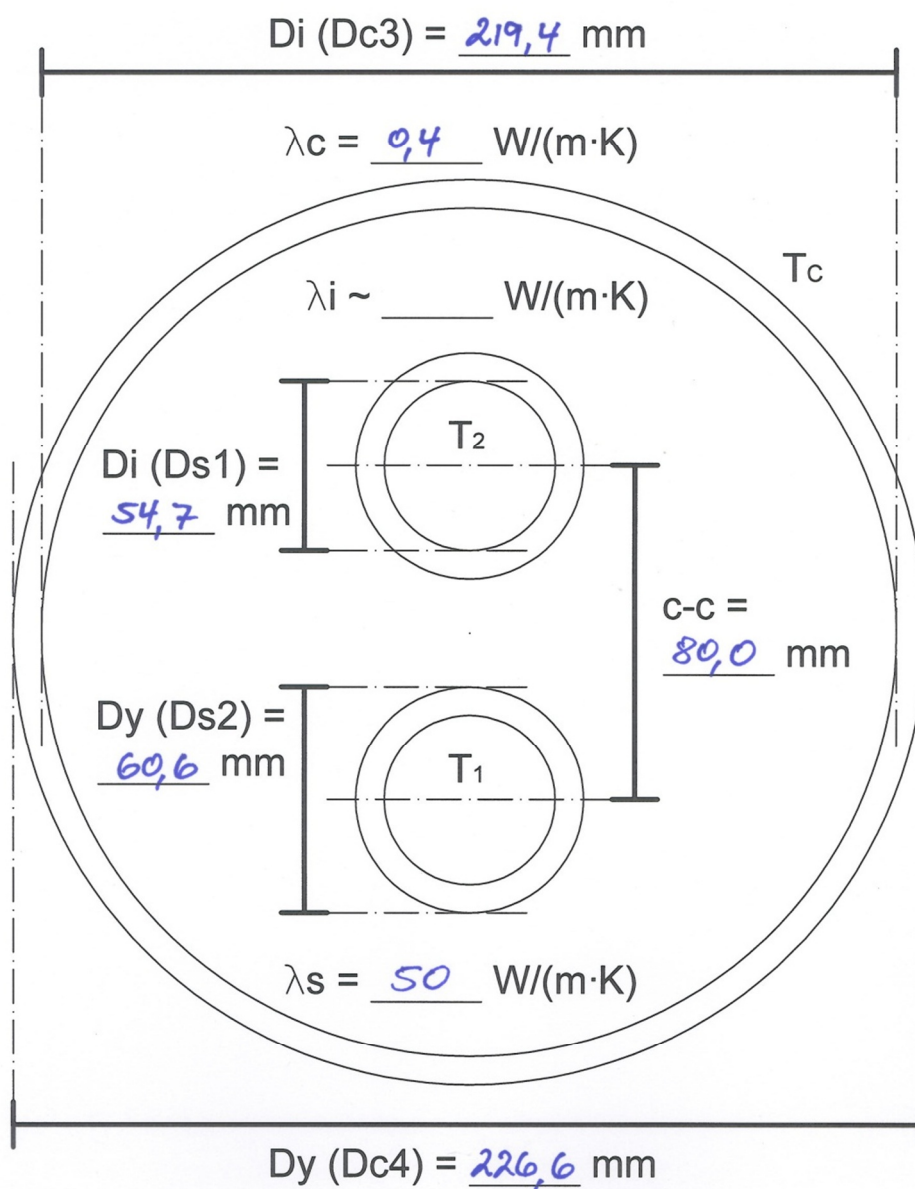
9.1 Bilag 1 Målskema for enkeltrør

Producent: LOGSTOR A/S
Dimension: 60,3 / 140
Type: LIGE ENKELTRØR
Længde: 3,0095 m
Dato: 23 / 8 2012



9.2 Bilag 2 Målskema for twinrør

Producent: LOGSTOR A/S
 Dimension: 2x60,3 / 225
 Type: LIGE TWINRØR
 Længde: 3,004 m
 Dato: 4 / 9 2012

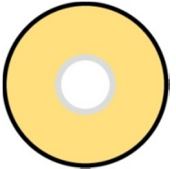
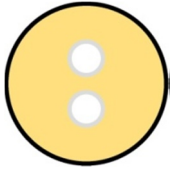


9.3 Bilag 3 Standarder for præisolerede fjernvarmerør

De standarder, der knytter sig til prøvning af varmekonduktivitet i præisolerede fjernvarmerør, er følgende:

- EN 253:2009 – rør med stålmedierør
- EN ISO 8497:1997 – termisk rørisolering
- EN 12667:2001 – byggematerialers termiske ydeevne
- EN 15632-1:2009 – fleksible rør
- EN 15698-1:2009 – lige twinrør med stålmedierør

En samlet oversigt fremgår af figur 11.

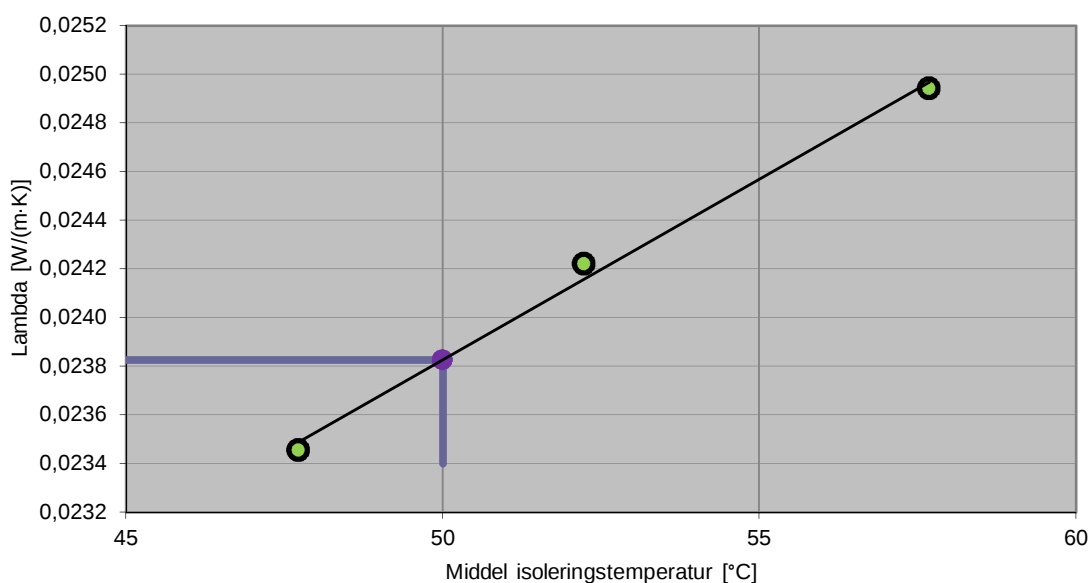
Type	Parameter	Lige rør	Fleksible rør	Note*
	λ_i	EN 253	EN 12667	
	λ_{SPS}	-	EN 15632-1	
	U	-	EN 15632-1	
	λ_i	EN 253*	EN 12667	Baseret på λ_i fra enkeltrør
	λ_{TPS}	-	EN 15632-1	
	U	EN 15698	-	
	U_{TPS}	-	EN 15632-1	

Figur 11: Oversigt over tilknyttede standarder ved måling af varmekonduktivitet i præisolerede fjernvarmerør

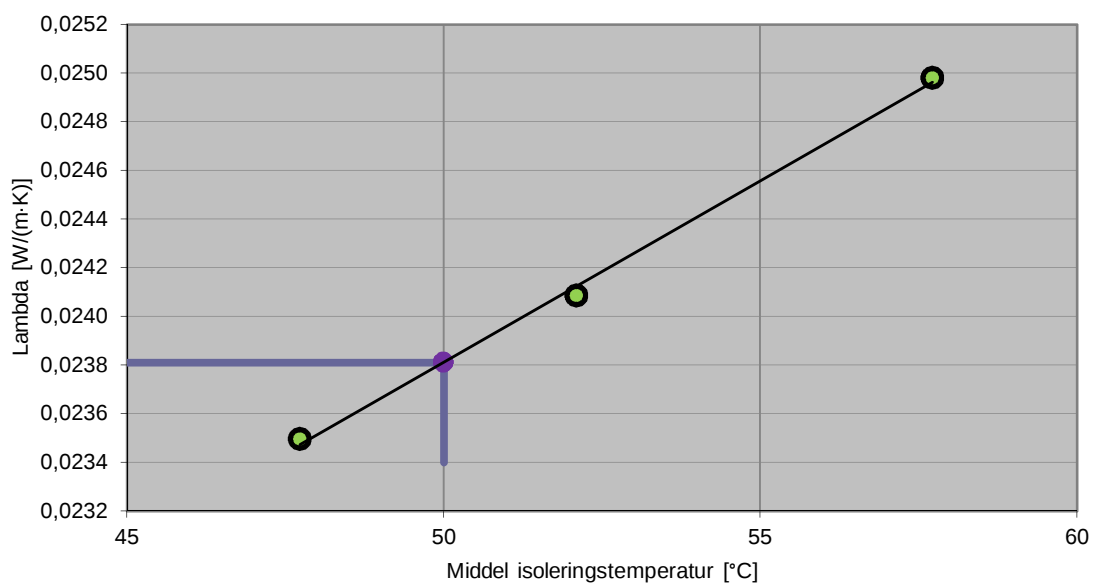
Udtagningen af rør til Dansk Fjernvarmes årlige præørskontrol foregår stikprøvevis, hvorfor λ_i (λ_{50}) ikke kan deklareres i henhold til standarderne for de fleksible rørs vedkommende, da de foreskriver måling på plader opskummet af samme blanding, som rørene fremstilles med. Den stikprøvevise udtagning foretages på hele og færdige produkter.

9.4 Bilag 4: Resultater fra måling i.h.t. DS/EN 253, lige enkeltrør 60,3/140

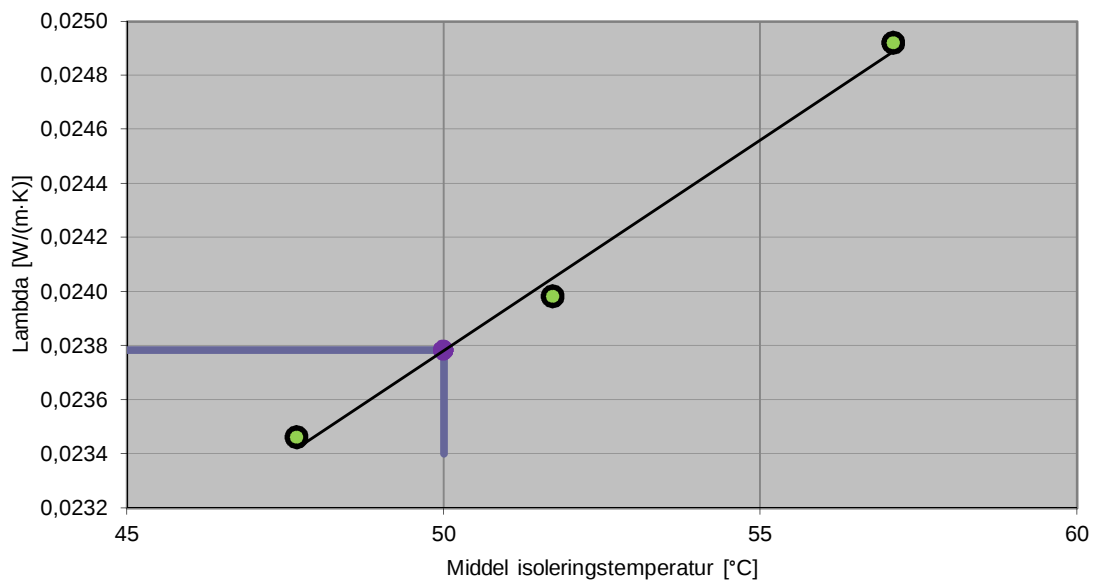
Resultatskema		Fra: 27-08-12 08:47		Til: 28-08-12 16:45		
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	mW/(m·K)
22,16	71,13	24,25	47,76	01:30:00	8,30	23,6
22,06	71,16	24,22	47,76	01:30:00	8,21	23,3
21,90	71,16	24,00	47,65	01:30:00	8,28	23,4
23,05	79,63	24,58	52,19	01:30:00	10,09	24,4
23,58	79,68	25,01	52,43	01:30:00	9,96	24,3
22,12	79,67	24,33	52,09	01:30:00	9,93	23,9
23,67	89,13	25,90	57,62	01:30:00	11,76	24,8
23,66	89,18	26,02	57,70	01:30:00	11,82	25,0
23,62	89,21	26,05	57,73	01:30:00	11,87	25,1
Udregnet lambda 50: 0,024 W/(m·K) Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)						



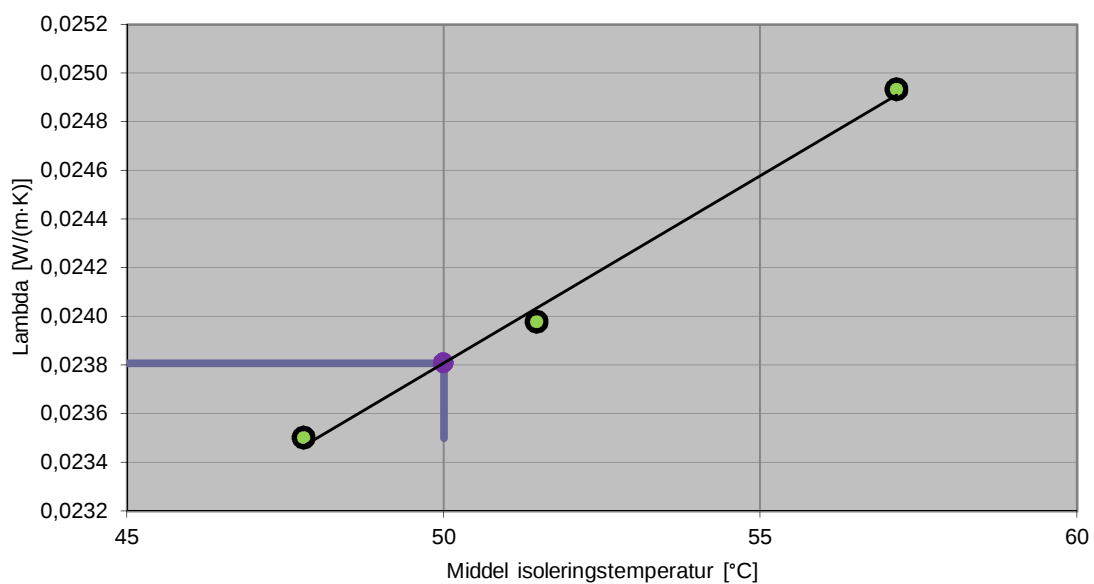
Resultatskema		Fra: 29-08-12 10:24		Til: 30-08-12 18:15		
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	mW/(m·K)
22,41	71,10	24,30	47,77	01:30:00	8,26	23,5
22,02	71,12	24,13	47,70	01:30:00	8,26	23,4
22,09	71,14	24,18	47,73	01:30:00	8,28	23,5
22,00	79,65	24,30	52,06	01:30:00	9,97	24,0
22,75	79,66	24,52	52,17	01:30:00	9,97	24,1
22,40	79,63	24,32	52,06	01:30:00	10,00	24,1
23,56	89,13	25,91	57,62	01:30:00	11,82	24,9
23,64	89,22	26,09	57,76	01:30:00	11,80	24,9
23,80	89,26	26,10	57,78	01:30:00	11,87	25,1
Udregnet lambda 50: 0,024 W/(m·K) Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)						



Resultatskema			Fra: 31-08-12 09:48		Til: 01-09-12 17:45	
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	mW/(m·K)
22,20	71,04	24,05	47,61	01:30:00	8,28	23,5
21,90	71,09	24,45	47,84	01:30:00	8,15	23,3
21,55	71,06	23,99	47,60	01:30:00	8,32	23,6
21,92	79,55	24,24	51,98	01:30:00	9,95	24,0
21,25	79,48	23,64	51,65	01:30:00	10,06	24,0
21,04	79,45	23,45	51,54	01:30:00	10,05	23,9
21,86	88,92	24,56	56,84	01:30:00	12,01	24,9
22,37	88,99	25,04	57,12	01:30:00	11,95	24,9
22,81	89,08	25,44	57,37	01:30:00	11,90	24,9
Udregnet lambda 50: 0,024 W/(m·K) Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)						

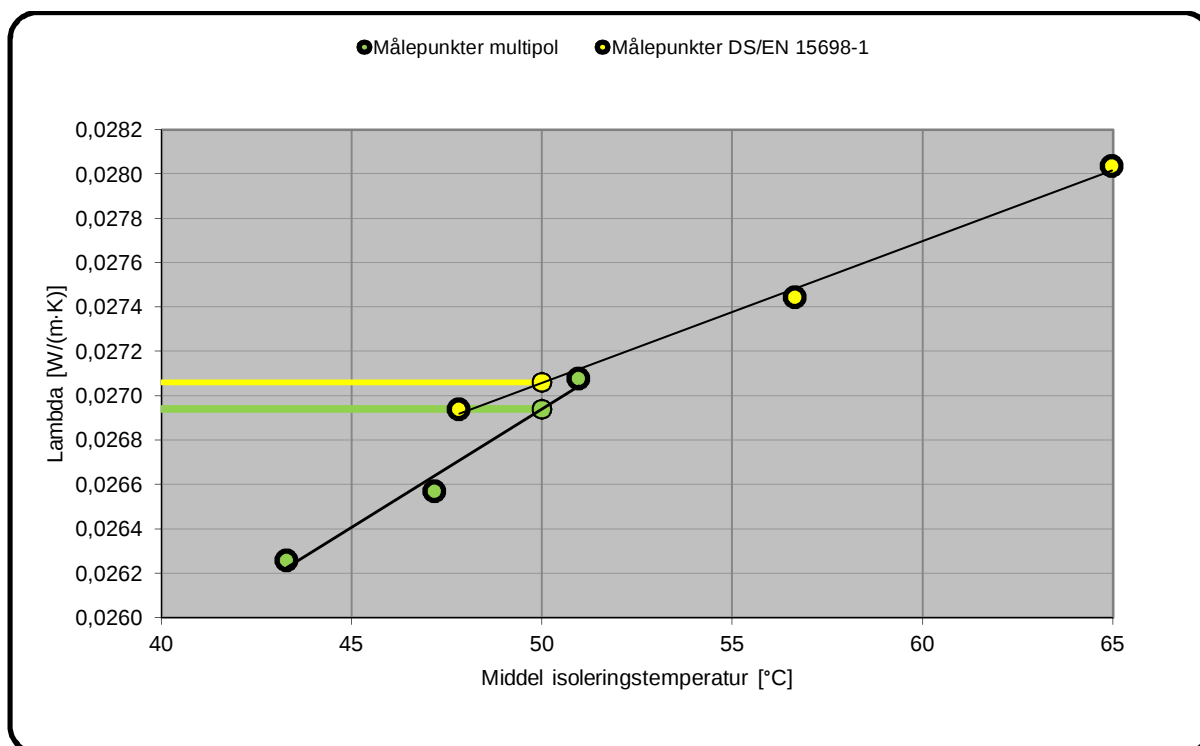


Resultatskema		Fra: 02-09-12 11:44		Til: 03-09-12 19:30		
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	mW/(m·K)
22,71	71,12	24,55	47,90	01:30:00	8,20	23,5
22,50	71,10	24,36	47,80	01:30:00	8,24	23,5
22,27	71,07	24,12	47,67	01:30:00	8,28	23,5
21,16	79,45	23,57	51,60	01:30:00	10,01	23,9
20,78	79,40	23,20	51,38	01:30:00	10,16	24,1
20,95	79,39	23,32	51,44	01:30:00	10,05	23,9
22,08	88,90	24,65	56,88	01:30:00	11,99	24,9
22,64	89,03	25,30	57,27	01:30:00	11,93	25,0
22,74	89,05	25,37	57,31	01:30:00	11,90	24,9
Udregnet lambda 50: 0,024 W/(m·K) Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)						

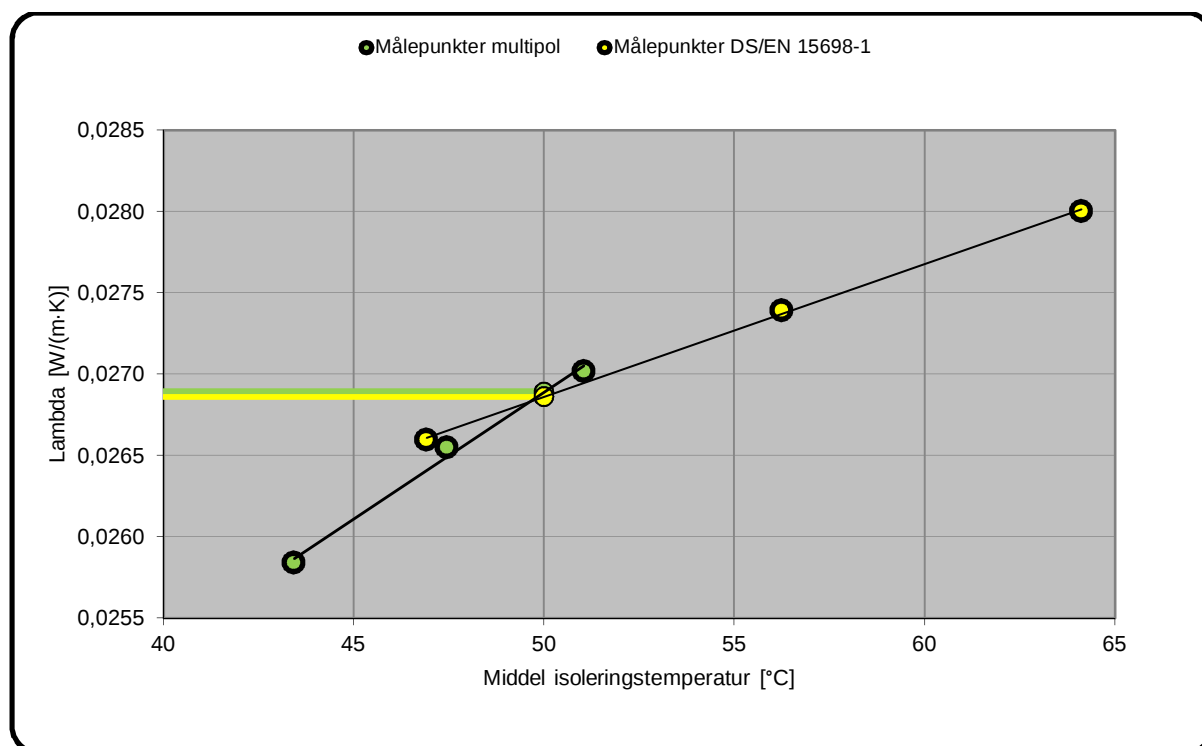


9.4 Bilag 4: Resultater fra måling i.h.t. DS/EN 253, lige twinrør 2×60,3/225

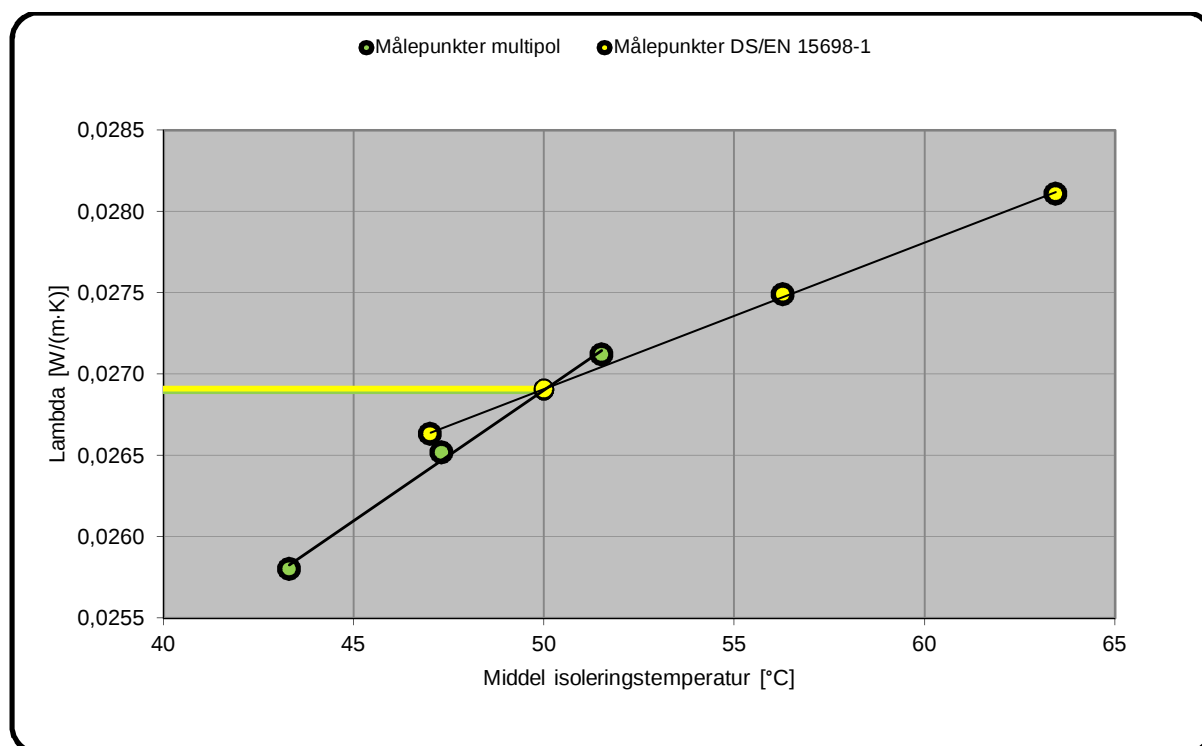
Resultatskema									
Fra: 05-09-12 21:30				Til: 07-09-12 01:30					
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
71,21	5,13	71,21	5,22	22,52	23,39	43,29	06:00:00	10,35	0,0263
80,50	6,19	80,44	6,30	22,39	23,82	47,17	06:00:00	12,49	0,0266
89,71	7,39	88,80	7,25	22,43	24,28	50,97	06:00:00	14,64	0,0271
Beregnet lambda 50 iht. DS/EN 15698-1:				0,027 W/(m·K)					
Usikkerhed:				0,0004 W/(m·K)					
Simuleret lambda 50 med 8. ordens multipol:				0,027 W/(m·K)					



Resultatskema		Fra: 07-09-12 18:30				Til: 08-09-12 22:30			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
70,53	4,85	71,30	5,17	23,02	24,00	43,44	06:00:00	10,03	0,0258
80,50	6,14	80,44	6,24	22,86	24,22	47,44	06:00:00	12,38	0,0266
88,88	7,20	88,86	7,23	22,85	24,74	51,04	06:00:00	14,43	0,0270
Beregnet lambda 50 iht. DS/EN 15698-1:				0,027 W/(m·K)		Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)			
Simuleret lambda 50 med 8. ordens multipol:				0,027 W/(m·K)					



Resultatskema									
Fra: 09-09-12 19:15 Til: 10-09-12 23:15									
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
70,55	4,87	71,31	5,19	22,79	23,91	43,31	06:00:00	10,06	0,0258
80,51	6,16	80,51	6,28	22,51	24,23	47,31	06:00:00	12,43	0,0265
88,95	7,13	88,92	7,20	23,59	25,50	51,51	06:00:00	14,33	0,0271
Beregnet lambda 50 iht. DS/EN 15698-1: 0,027 W/(m·K) Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)									
Simuleret lambda 50 med 8. ordens multipol: 0,027 W/(m·K)									



Resultatskema				Fra: 11-09-12 14:30		Til: 12-09-12 18:30			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
70,54	4,85	71,13	5,17	22,51	23,90	43,15	06:00:00	10,03	0,0257
80,42	6,15	80,23	6,32	21,91	23,55	46,84	06:00:00	12,47	0,0264
88,75	7,17	88,55	7,32	23,07	24,72	51,08	06:00:00	14,48	0,0273
Beregnet lambda 50 iht. DS/EN 15698-1:				0,027 W/(m·K)		Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)			
Simuleret lambda 50 med 8. ordens multipol:				0,027 W/(m·K)					

