

Projekt nr. 2013-02

Titel: Forbedring af test- og beregningsmetoder af
varmeledningsevnen i twinrør, del II

Udført af: DTU, Logstor, LP Solution og Teknologisk Institut

Varmeledningsevne i twinrør

Udvikling af forbedret beregningsværktøj

Danmarks
Tekniske Universitet



LOGSTOR



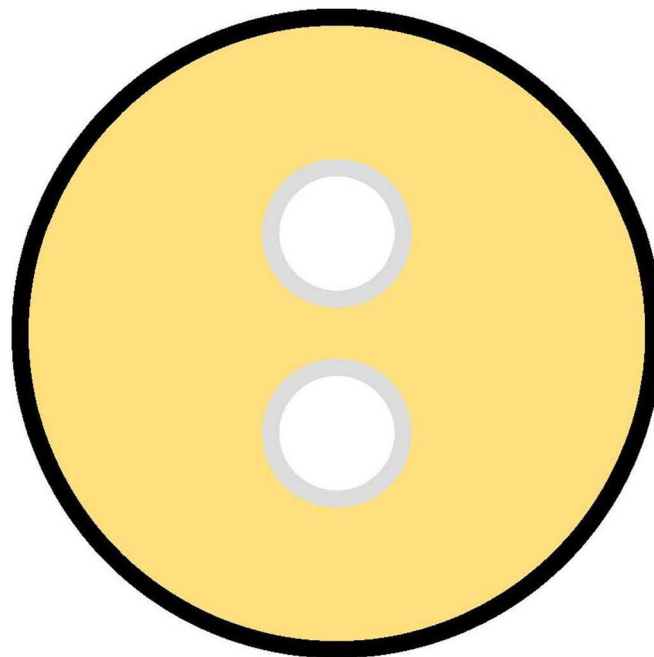
LP Solution

TEKNOLOGISK
INSTITUT

 **DANSK
FJERNVARME**

Forbedring af test- og beregningsmetoder af varmeledningsevnen i twin-rør, del II

Dansk Fjernvarmes F&U-konto nr. 2013-02



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

Dette projekt er en opfølgning på Dansk Fjernvarmes F&U-konto 2012-04, hvorfor det hedder Forbedring af test- og beregningsmetoder af varmeledningsevnen i twinrør, del II.

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.

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 jf. prøvningsstandarderne DS/EN 253 og DS/EN 15632-1. 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).

I projektets del I (F&U 2012-04) blev der på baggrund af de dengang udførte rørmålinger udledt en empirisk formel til beregning af varmekonduktiviteten i twinrør, og dette projekt har forbedret nøjagtigheden af denne formel ved yderligere målinger samt implementeret formelen i en opdateret version af Multipol, kaldet MP II.

Der blev til projektet fremstillet et enkeltrør og et twinrør. Rørene blev produceret på et aksial konti-anlæg hvor det flydende PUR-skum har en meget kort og kontrolleret flydevej, og hvor der er fuld kontrol med alle procestemperaturene. Produktionsmetoden giver et meget ensartet PUR-skum hvilket betyder, at afvigelsen på to rør produceret på samme anlæg og med samme receptur vil være meget lille. Ved at måle og beregne lambdaværdien på enkeltrøret vil man med rette kunne antage, at lambdaværdien på twinrøret vil være det samme, og det er derfor muligt at verificere FEM-beregningen af twinrøret med den målte lambdaværdi. De to testrør blev produceret med meget kort interval.

Der blev 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 juni 2013-januar 2014 med deltagelse af DTU (FEM-simuleringer), Logstor A/S (rørproducent), LP Solution (opbygning af revideret Multipol-program) og Teknologisk Institut (prøvninger) med civilingeniør Niels Winther som projektleder.

Aarhus, den 31. januar 2014

Hongwei Li
Senior Researcher
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 2013 af:

Jørgen Eigaard Hansen, VEKS I/S
Karsten Randrup, Verdo Varme A/S
Jakob Storm Rasmussen, Fjernvarme Fyn
Torkild Kjærsgaard, Skanderborg Fjernvarme
Rasmus Bundgaard Eriksen, Dansk Fjernvarme
Nils-Aage Gregersen, Aalborg Forsyning, Varme
Astrid Birnbaum, HOFOR / Dansk Fjernvarme (fra 1/9-2013)

Indholdsfortegnelse

Forord.....	2
1. Sammendrag og konklusion	5
2. Baggrund	6
3. Varmekonduktivitet.....	7
3.1 Plan isolering.....	7
3.2 Cirkulær isolering.....	7
3.3 Isolering med kompleks geometri	8
3.4 Simulering med Multipol.....	9
4. Middelisoleringstemperatur	10
5. Prøvningsprogram.....	11
5.1 Prøvningsemner.....	11
5.2 Prøvning på enkeltrør	11
5.3 Prøvning på twinrør	11
6. Forbedret metode til beregning af middelisoleringstemperaturen	12
6.1 Formål.....	12
6.2 Fremgangsmåde	12
6.3 Enkeltrørsmetoden.....	12
6.4 Twinrørsmetoden	14
7. Konklusion.....	16
8. Litteratur	17
9. Bilag	18
Bilagsoversigt	18
9.1 Bilag 1: Målskema for enkeltrør	19
9.2 Bilag 2: Målskema for twinrør.....	20
9.3 Bilag 3: Standarder for præisolerede fjernvarmerør.....	21
9.4 Bilag 4: Samlede måledata, lige enkeltrør 60,3/140	22
9.5 Bilag 5: Samlede måledata, lige twinrør 2×60,3/225.....	31
9.6 Bilag 6: Resultater fra FEM-simuleringer 2×60,3/225.....	41

1. Sammendrag og konklusion

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

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. 3 %, og efter tilretning og verifikation var forskellen på ca. 0,8 %.

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

2. Baggrund

Et materiales varmekonduktivitet er temperaturafhængig. 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 og 2012-04.

På Dansk Fjernvarmes temadage om præisolerede præ rør i december 2011, hvor resultaterne fra årets præ rørs kontrol 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. Rørene blev produceret på et aksial konti-anlæg hvor det flydende PUR-skum har en meget kort og kontrolleret flydevej, og hvor der er fuld kontrol med alle procestemperaturene. Produktionsmetoden giver et meget ensartet PUR-skum hvilket betyder, at afvigelsen på to rør produceret på samme anlæg og med samme receptur vil være meget lille.

Ved at måle og beregne lambdaværdien på enkeltrøret vil man med rette kunne antage, at lambdaværdien på twinrøret vil være det samme, og det er derfor muligt at verificere FEM-beregningen af twinrøret med den målte lambdaværdi. De to testrør blev produceret med meget kort interval.

Efter målingerne var afsluttet, blev beregningsparametrene tilrettet i simuleringsprogrammet og efterfølgende verificeret med nye simuleringer.

Inden beregningsparametrene blev tilrettet, var forskellen mellem resultaterne for enkelt- og twinrør på ca. 3 %, og efter tilretning og verifikation var forskellen på ca. 0,8 %. De forbedrede overensstemmelse er i projektet baseret på flere målinger og flere temperaturkombinationer i medierørene end det var tilfældet med det forrige F&U-projekt 2012-04.

3. Varmekonduktivitet

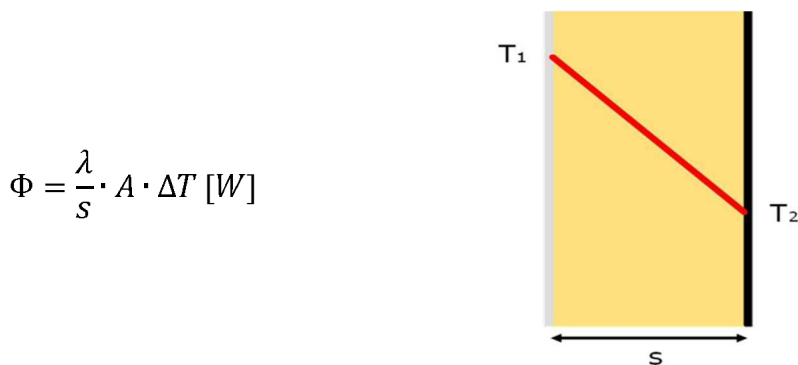
Et materiales evne til at lede varme angives ved dets *varmekonduktivitet*, *varmeledningsevne* eller *varmeledningstal* og udtrykkes ved *lambdaværdien* λ målt i $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

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 1:

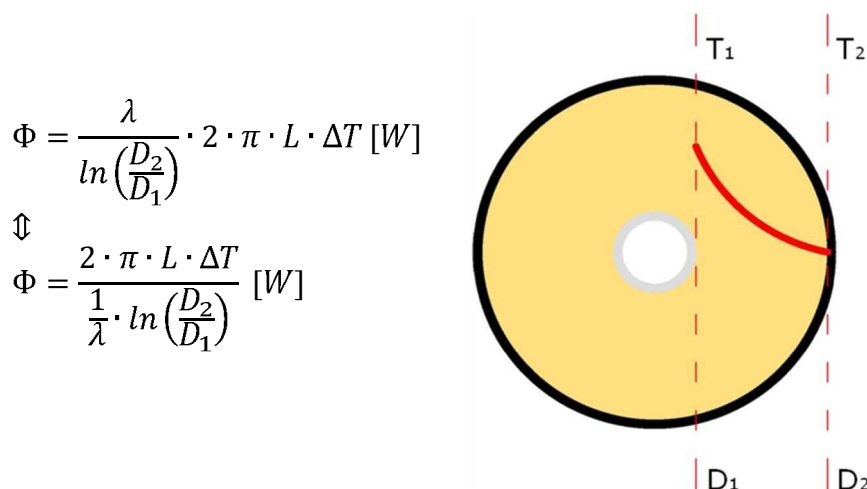


Figur 1: Temperaturgradient gennem plan isolering

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 radiale fra centrum som angivet på figur 2:



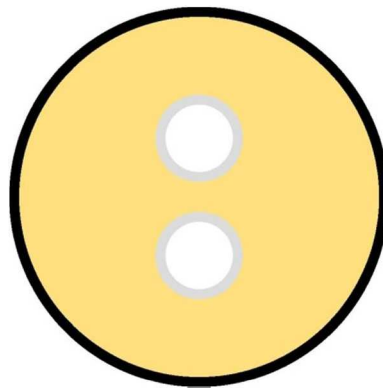
Figur 2: Temperaturgradient gennem cirkulær isolering

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.

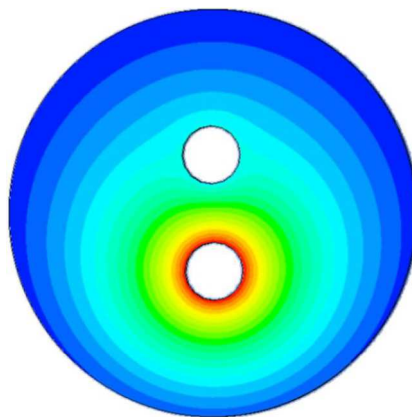
3.3 Isolering med kompleks geometri



Figur 3: 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 4:



Figur 4: 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

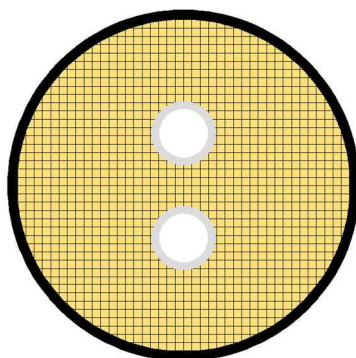
Multipol er baseret på analogien mellem elektromagnetisme og varmestrøm i homogene materialer. I varmestrømsteorien er 'kilde potentialer' = 'fluxkilder', og der er dobbelt så mange kilder, som der er medierør i systemet. Det skyldes, at den ene halvdel af kilderne er placeret i et geometrisk forhold 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 den geometriske middelisoleringstemperatur 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 5:



Figur 5: 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.

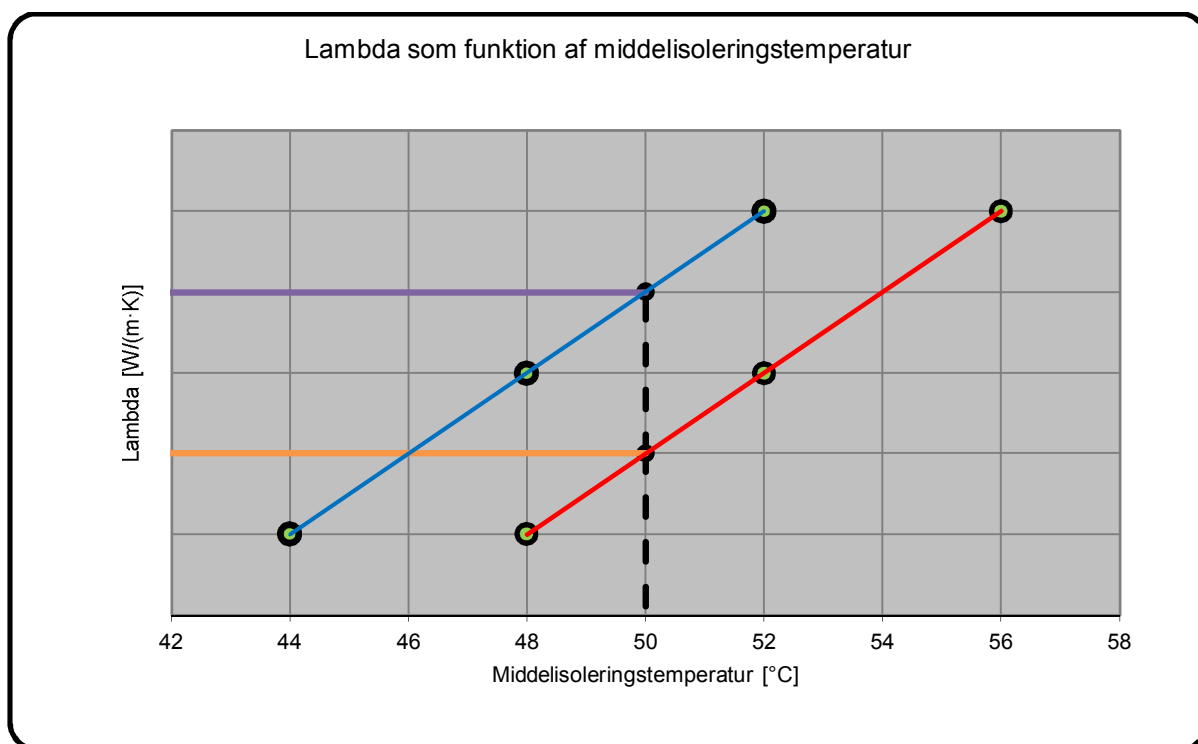
Middelisoleringstemperaturen er da en matematisk middelværdi, der ikke tager højde for, at varmekonduktiviteten er temperaturafhængig. I dette projekt er anvendt en fysisk middelisoleringstemperatur T_{inf} , som tager højde for, at varmekonduktiviteten er temperaturafhængig ud gennem de uendelige, tynde 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 6 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 (rød kurve), giver en værdi for varmekonduktiviteten, som er for lav (orange linje):



Figur 6: 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 skumblanding.

5.1 Prøvningsemner

Til projektet blev der af Logstor A/S fremstillet et enkeltrør 60,3/140 mm og et twinrør 2×60,3/225 mm med nøjagtig samme skumblanding. Begge rør blev leveret som 12 m længder, og efterfølgende udskåret til prøvningslængder på 3 m. 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.

Prøvningerne blev udført med flere forskellige måleserier, idet en måleserie altid består af tre forskellige temperaturer i medierøret/medierørene. Den første måleserie var helt konventionel i henhold til DS/EN 253 med medierørstemperatur på 80 ± 10 °C. I den anden måleserie var temperaturintervallet udvidet til 70 ± 20 °C. I den tredje og fjerde måleserie, som kun blev udført på twinrøret, var temperaturerne 50 ± 10 °C og 80 ± 10 °C, idet der blev byttet om på disse mellem øverste og nederste medierør i den sidste måleserie.

Hver måleserie blev gentaget fire gange på enkeltrøret og to gange på twinrøret, så der samlet blev udført 16 måleserier. I tabel 1 ses en samlet oversigt over de anvendte medierørstemperaturer.

°C	Serie nr.	1			2			3			4		
Enkeltrør		70	80	90	50	70	90						
Twinrør	Øverste medierør	70	80	90	50	70	90	40	50	60	70	80	90
	Nederste medierør	70	80	90	50	70	90	70	80	90	40	50	60

Tabel 1: De anvendte medierørstemperaturer

5.2 Prøvning på enkeltrør

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

Prøvningerne blev udført i henhold til tabel 1. Resultatet viste en varmekonduktivitet på 0,023 W/(m·K).

I bilag 1 ses geometrien for enkeltrøret og i bilag 4 ses resultatet af målingerne på enkeltrøret.

5.3 Prøvning på twinrør

Prøvningsserierne på twinrøret blev udført for at fastslå varmekonduktiviteten af skummet ud fra en simulering med den hidtidige version af Multipol.

Prøvningerne blev udført i henhold til tabel 1.

Resultatet viste en varmekonduktivitet på 0,027 W/(m·K) med den hidtidige Multipol og 0,023 med den tilrettede Multipol.

I bilag 2 ses geometrien for twinrøret og i bilag 5 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:

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

hvor

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:

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

hvor

T_j er lagtemperaturerne, vektor

T_i er medierørstemperaturen

T_o er kapperørsdiameteren

n er antal laginddelinger

Middeltemperaturen beregnes for det enkelte lag:

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

hvor

$T_{m,k}$ er lagmiddeltemperaturen

T_k er lagtemperaturerne, vektor

Den karakteristiske modstand for de individuelle lag beregnes nu med varmeledningss ligningen, hvor varmeledningskoefficienten er givet ved den lokale middeltemperatur:

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

hvor

R_k er den termiske modstand, vektor

D_k er lagdiameteren, vektor

T_m er lagmiddelttemperaturen, vektor

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

De enkelte lagmodstande akkumuleres nu til en total modstand:

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

hvor

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

R_k er den termiske modstand, vektor

Den gennemsnitlige varmeledningskoefficient kan nu beregnes:

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

hvor

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:

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

hvor

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:

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

hvor

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.

$$D_{iod} = \frac{D_i}{d} \quad (9)$$

hvor

D_{iod} er diameterforholdet
 D_i er indvendig kapperørsdiameter
 d er udvendig medierørsdiameter

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

hvor

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

$$T_a = \frac{T_{i1} - T_{i2}}{2} \quad (11)$$

hvor

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

$$T_{mdT} = \frac{(T_s - 50)}{100} \cdot T_a \quad (12)$$

hvor

T_{mdT} er middelværdikorrektion
 T_s er symmetrisk temperatur
 T_a er kapperørstemperatur

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

$$T_{imf,tw} = T_{imf,si} + Korr \quad (13)$$

hvor

$T_{imf,tw}$ er twinrørs T_{imf}
 $T_{imf,si}$ er enkeltrørs T_{imf}
 $Korr$ er den empiriske korrektion

hvor

$$Korr = T_{ma} + T_{mb} \cdot T_m + T_{aa} + T_{ab} \cdot T_a + dT_a + dT \cdot (dT_b + dT \cdot dT_c) + (0,14464 \cdot T_{mdT} - 0,807385) \cdot T_{mdT} \quad (14)$$

hvor

$$T_{ma} = (-0,002657 \cdot D_{iod} + 0,049415) \cdot D_{iod} - 0,35425$$

$$T_{mb} = (0,000667 \cdot D_{iod} - 0,009582) \cdot D_{iod} + 0,045891$$

$$T_{aa} = (-0,005507 \cdot D_{iod} + 0,077847) \cdot D_{iod} - 0,378415$$

$$T_{ab} = (-0,000551 \cdot D_{iod} + 0,007785) \cdot D_{iod} - 0,037842$$

$$dT_a = (-0,000001 \cdot D_{iod} - 0,000492) \cdot D_{iod} + 0,003451$$

$$dT_b = (0,00062 \cdot D_{iod} - 0,000824) \cdot D_{iod} + 0,002583$$

$$dT_c = (0,000002 \cdot D_{iod} - 0,000092) \cdot D_{iod} + 0,013921$$

$$T_{mdT}, \text{ se (12)}$$

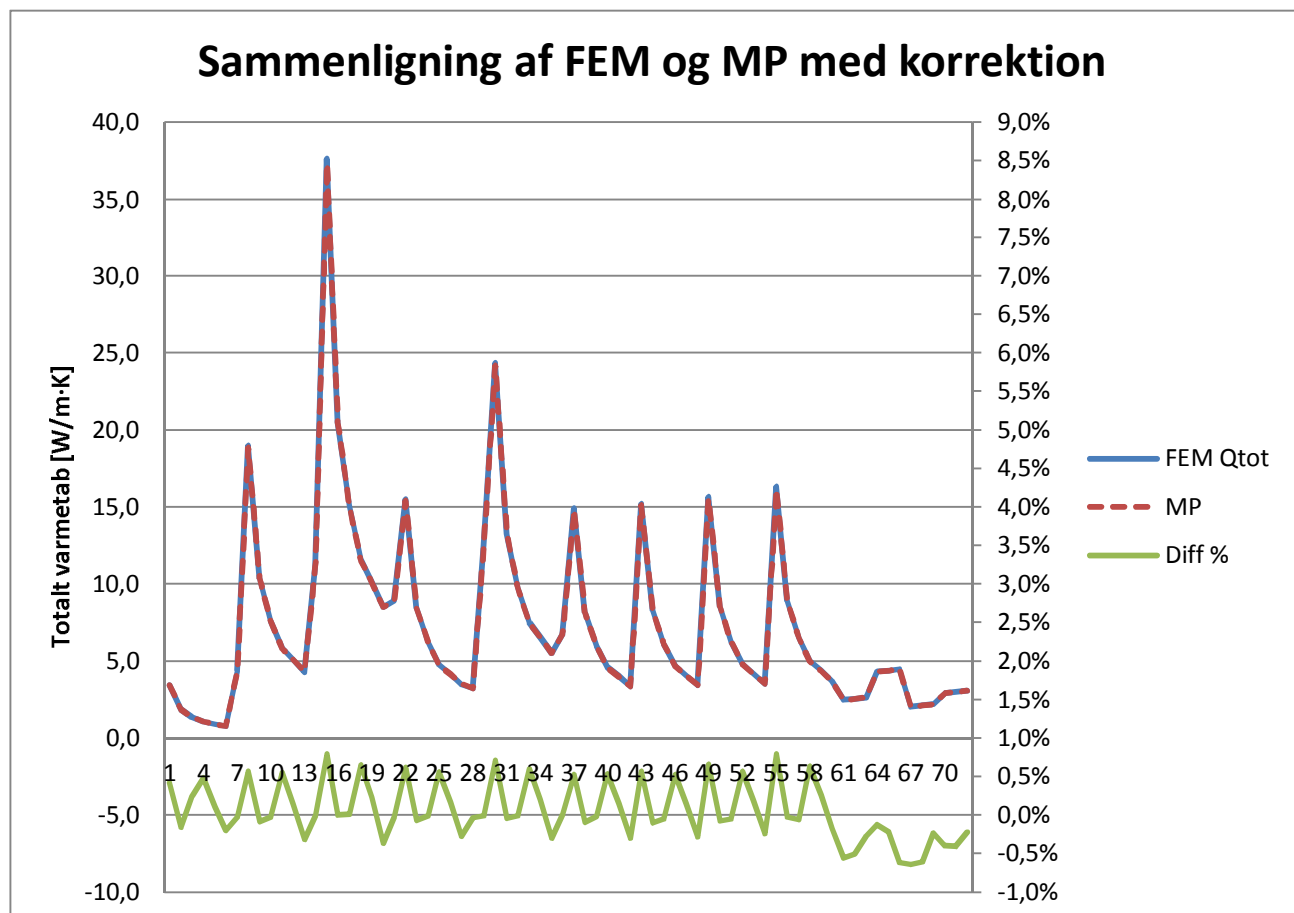
Til beregning af varmetabet for twinrørssystemet benyttes nu MP for de givne geometri- og temperaturbetingelser, og resultatet korrigeres endeligt for et offset.

$$Q_{tot} = MP(\text{geometri}, \text{temperatur}, T_{imf.tw}) \cdot \left(1 + \frac{0,146}{D_{iod}} + 0,005 \cdot D_{iod} - 0,0506\right) \quad (15)$$

hvor

Q_{tot} er totalt varmetab.

(14) og (15) er udledt ved at sammenligne forskellen mellem resultaterne fra FEM og Multipol svarende til figur 7:



Figur 7: Forskellen mellem FEM og Multipol. Bemærk sammenfaldet mellem den blå og den røde kurve

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 temperaturnafhængige varmekonduktivitet føre tilbage til en temperatur defineret som ”isoleringens fysiske middeltemperatur”, T_{imf} .

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. Nøjagtigheden for nuværende udtryk er i forhold til FEM inden for 0,8 % 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

SBI-meddelelse 7, Dimensionering af rørisolering, 1981

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

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

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

Danvak, Varme- og klimateknik, Grundbog, 1997

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

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

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

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

Dansk Fjernvarmes F&U-konto, projekt nr. 2012-04, Teknologisk Institut, Allan Hansen, Lasse Elmelund Pedersen, Alessandro Dalla Rosa, Niels Winther, 2013

9. Bilag

Bilagsoversigt

Bilag 1: Målskema for enkeltrør

Bilag 2: Målskema for twinrør

Bilag 3: Standarder for præisolerede rør

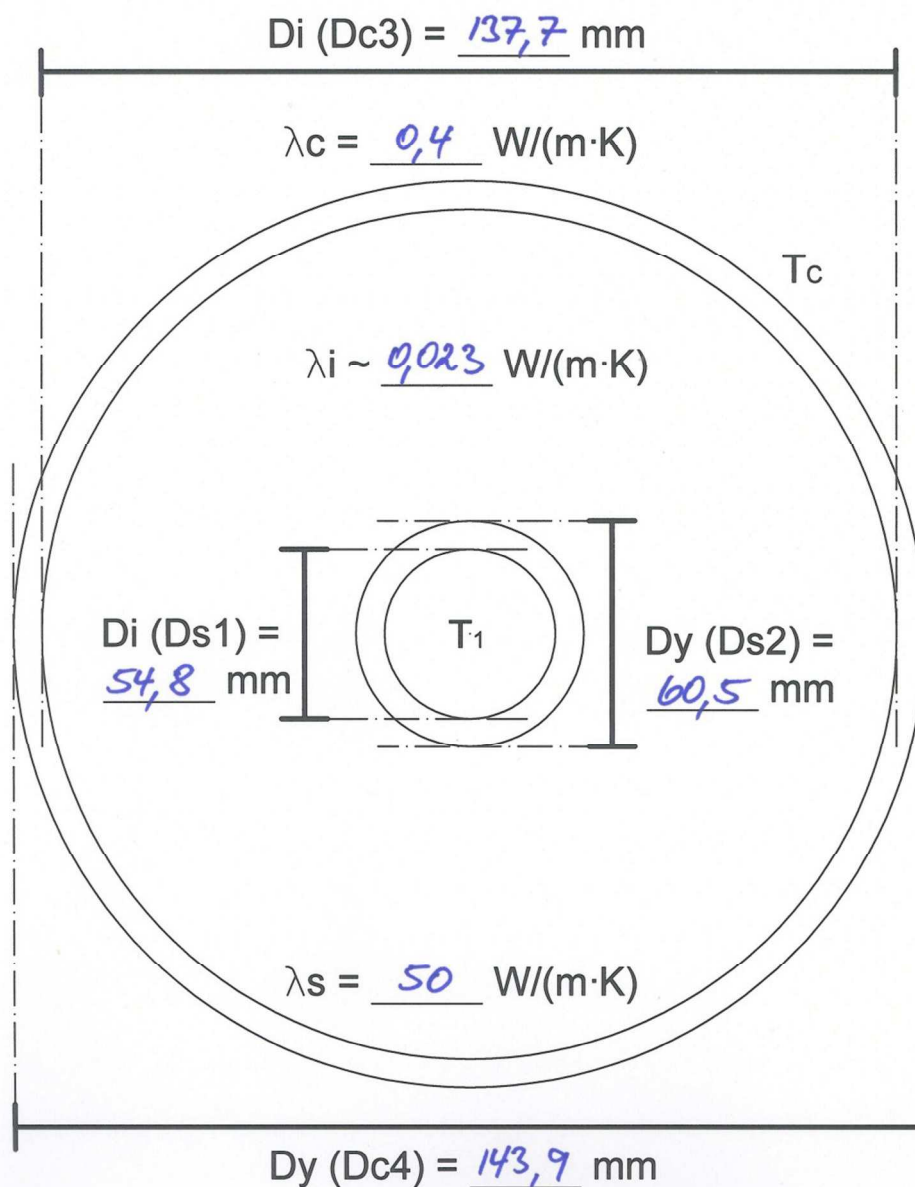
Bilag 4: Samlede måledata, lige enkeltrør 60,3/140

Bilag 5: Samlede måledata, lige twinrør 2×60,3/225

Bilag 6: Resultater fra FEM-simuleringer 2×60,3/225

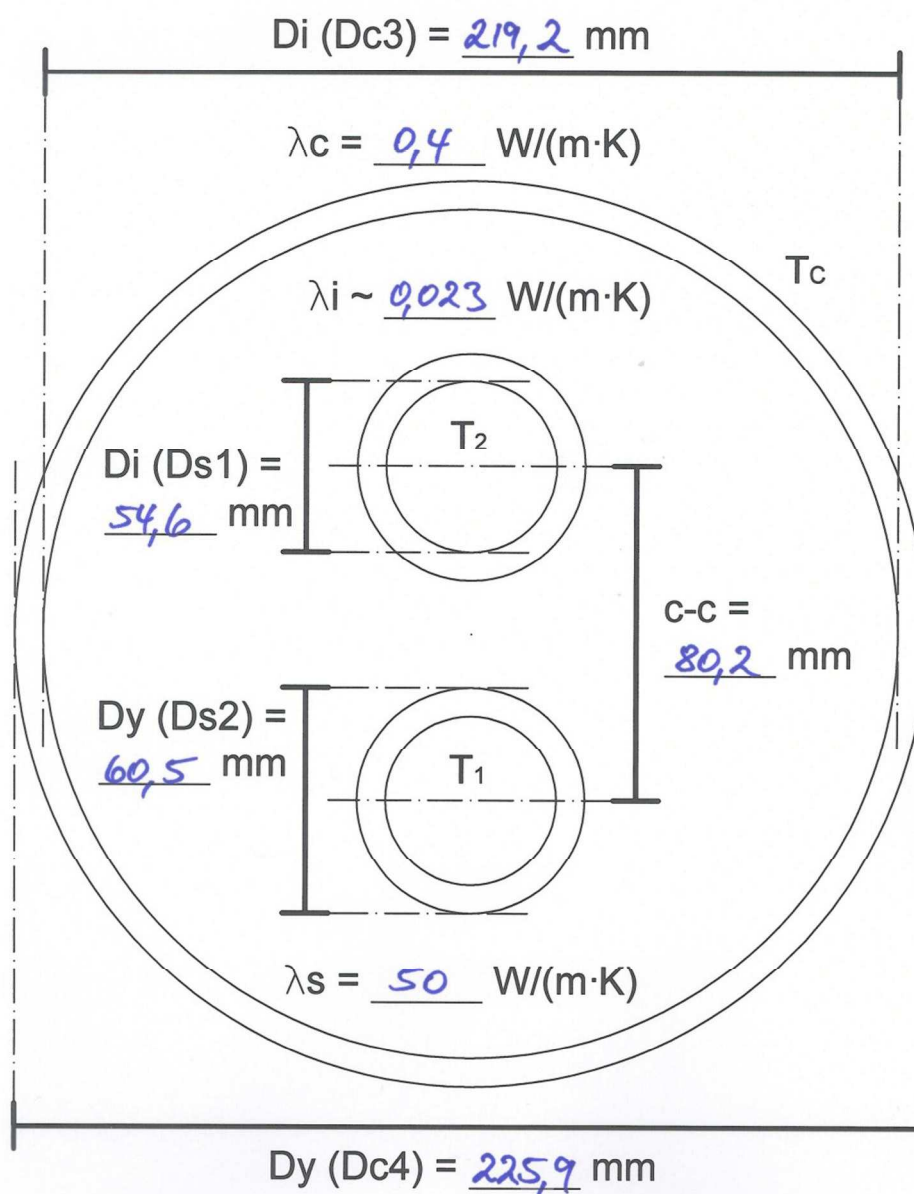
9.1 Bilag 1: Målskema for enkeltrør

Producent: LOGSTOR A/S
Dimension: 60,3 / 140
Type: LIGE ENKELTRØR
Længde: 3,008 m
Dato: 19 / 6 2013



9.2 Bilag 2: Målskema for twinrør

Producent: LOGSTOR A/S
 Dimension: 2x60,3 / 225
 Type: LIGE TWINRØR
 Længde: 3,004 m
 Dato: 13 / 8 2013

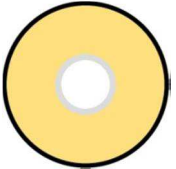
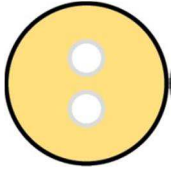


9.3 Bilag 3: Standarder for præisolerede fjernvarmerør

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 tabel 2.

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	

Tabel 2: Oversigt over tilknyttede standarder ved måling af varmekonduktivitet i præisolerede fjernvarmerør

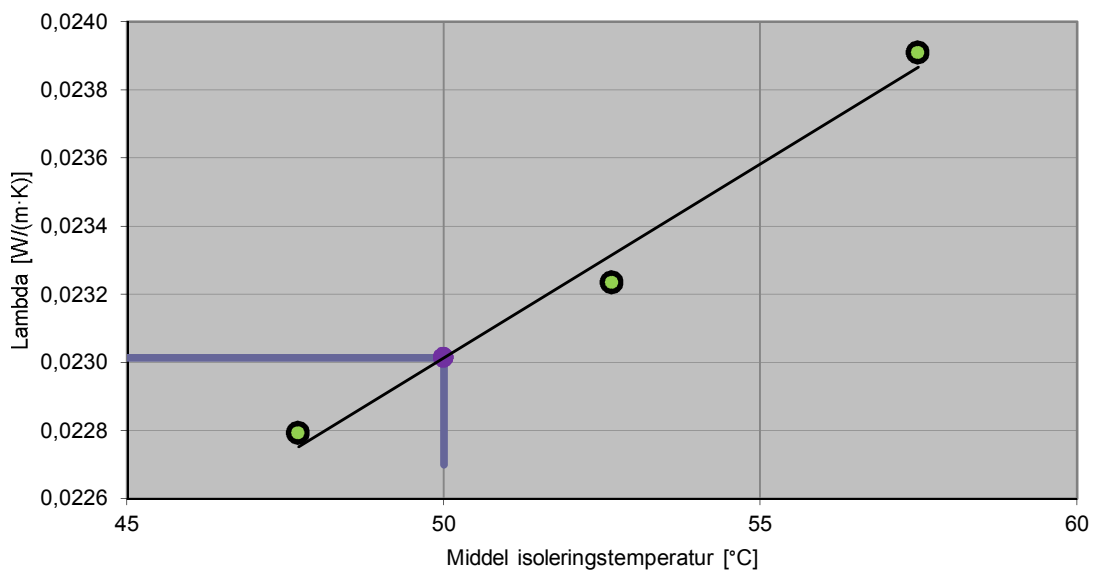
Udtagningen af rør til Dansk Fjernvarmes årlige præørskontrol foregår stikprøvevis, hvorfor λ_i (λ_{50}) ikke kan deklareres i henhold til standarderne for de fleksible rørs vedkommende, da de foreskriver måling på plader opskummet af samme blanding, som rørene fremstilles med. Den stikprøvevise udtagning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

9.4 Bilag 4: Samlede måledata, lige enkeltrør 60,3/140

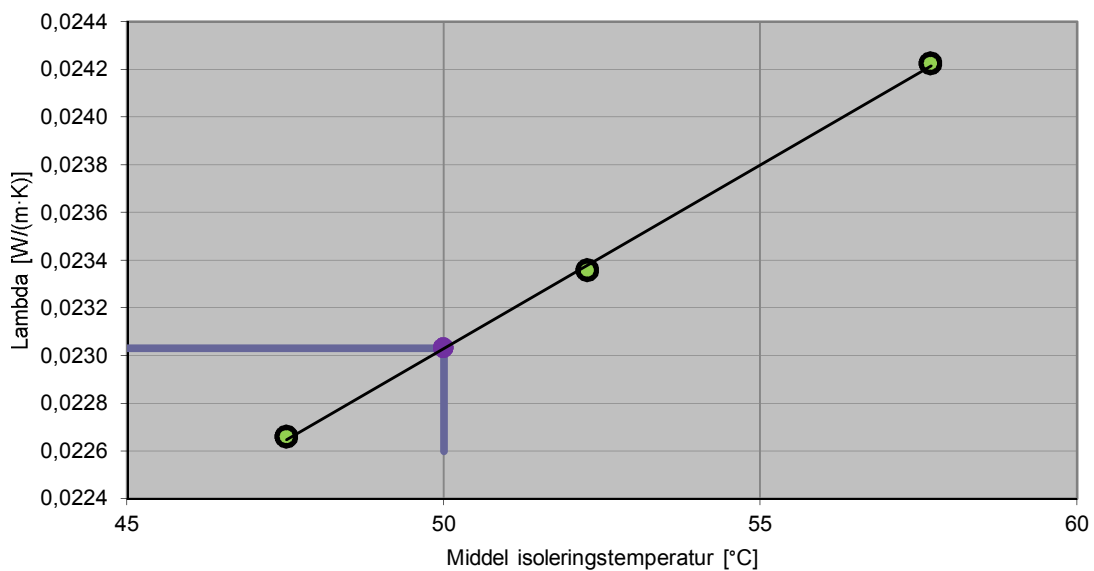
Test nr.	1			2			3			4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Serie nr.												
Medierør - top [°C]	71,32253	80,91004	90,55580	71,41191	80,89957	90,43557	71,42336	80,83292	90,55851	71,33009	80,64966	90,56221
Medierør - side 1 [°C]	70,19837	79,68160	89,11200	70,29136	79,60844	89,09082	70,52293	79,74788	89,13264	70,33633	79,42228	89,17958
Medierør - side 2 [°C]	70,73465	80,32277	89,89624	70,82213	80,29562	89,87120	70,86882	80,24216	89,86943	70,86023	80,12225	89,91209
Medierør - bund [°C]	70,09023	79,41745	88,78368	69,93170	79,33279	88,76024	69,93496	79,20234	88,68792	69,96255	79,11691	88,68948
Medierør - gennemsnit [°C]	70,58644	80,08296	89,58693	70,61427	80,03411	89,53946	70,68752	80,00632	89,56212	70,62230	79,82778	89,58584
Medierør - effekt [W/m]	7,96746	9,73590	11,72259	7,99578	9,90789	11,78494	8,07543	10,05269	11,84033	8,03560	10,07484	11,84697
Kapperør - top [°C]	25,15577	26,04879	26,00477	25,15422	24,60337	26,41505	24,78803	24,48943	25,91446	25,93236	22,90973	26,30701
Kapperør - side 1 [°C]	24,59244	24,64731	24,60646	23,79429	24,40880	25,45430	25,12289	24,80803	24,66066	24,49156	22,97756	24,78287
Kapperør - side 2 [°C]	24,62891	24,87859	25,10596	24,18352	24,17805	25,41284	24,08662	23,69451	24,87044	24,57303	22,69577	24,90880
Kapperør - bund [°C]	24,36000	24,64541	25,04012	23,98488	24,12358	25,29415	23,96613	23,83200	24,68781	24,25943	22,95915	24,64090
Kapperør - gennemsnit [°C]	24,68428	25,05503	25,18932	24,27922	24,32845	25,64409	24,49092	24,20599	25,03334	24,81470	22,88555	25,15989
Rum [°C]	23,42327	23,10939	23,02345	22,73147	22,31175	23,27436	22,56619	21,84805	22,76914	23,10668	20,58133	22,60896
Lambda 50 [W/(m·K)]	0,02302			0,02303			0,02329			0,02321		

Test nr.	5			6			7			8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Serie nr.												
Medierør - top [°C]	50,98305	70,30062	90,19480	50,89944	71,03979	90,12603	51,25495	70,85486	90,63206	51,23315	70,99664	90,44352
Medierør - side 1 [°C]	50,48564	69,35118	88,75300	50,40980	70,13594	88,79189	50,74967	69,97840	89,23381	50,74245	70,13496	89,12544
Medierør - side 2 [°C]	50,84437	69,87317	89,58010	50,74318	70,64981	89,57294	50,99941	70,53021	89,89761	50,99206	70,64770	89,82571
Medierør - bund [°C]	50,25388	69,00696	88,39258	50,11933	69,75546	88,41204	50,42041	69,61325	88,70825	50,41570	69,75439	88,66917
Medierør - gennemsnit [°C]	50,64174	69,63298	89,23012	50,54294	70,39525	89,22572	50,85611	70,24418	89,61793	50,84584	70,38342	89,51596
Medierør - effekt [W/m]	4,65992	8,04482	12,17631	4,90400	8,31040	12,07891	4,62149	8,38117	11,92193	4,56748	8,27584	11,99925
Kapperør - top [°C]	22,60151	23,46965	24,09721	21,80609	23,16962	23,98826	24,02690	22,61707	26,67377	23,26029	23,39531	25,20410
Kapperør - side 1 [°C]	22,18544	23,29080	23,41422	21,28875	22,83227	23,15353	23,16249	22,28055	25,26677	22,87833	23,05185	24,70435
Kapperør - side 2 [°C]	22,11826	23,04349	23,09324	21,17377	22,70004	23,04565	23,11622	22,07454	25,15649	22,84116	22,88535	24,61456
Kapperør - bund [°C]	22,12205	23,09254	23,35190	21,26411	22,67297	23,09162	22,79531	22,19824	24,78644	22,68416	22,89791	24,49901
Kapperør - gennemsnit [°C]	22,25681	23,22412	23,48914	21,38318	22,84373	23,31976	23,27523	22,29260	25,47087	22,91598	23,05760	24,75551
Rum [°C]	21,43156	21,38053	20,78723	20,31593	21,01776	20,59013	22,54220	20,39489	22,91908	22,12189	21,29953	22,20602
Lambda 50 [W/(m·K)]	0,02337			0,02339			0,02347			0,02335		

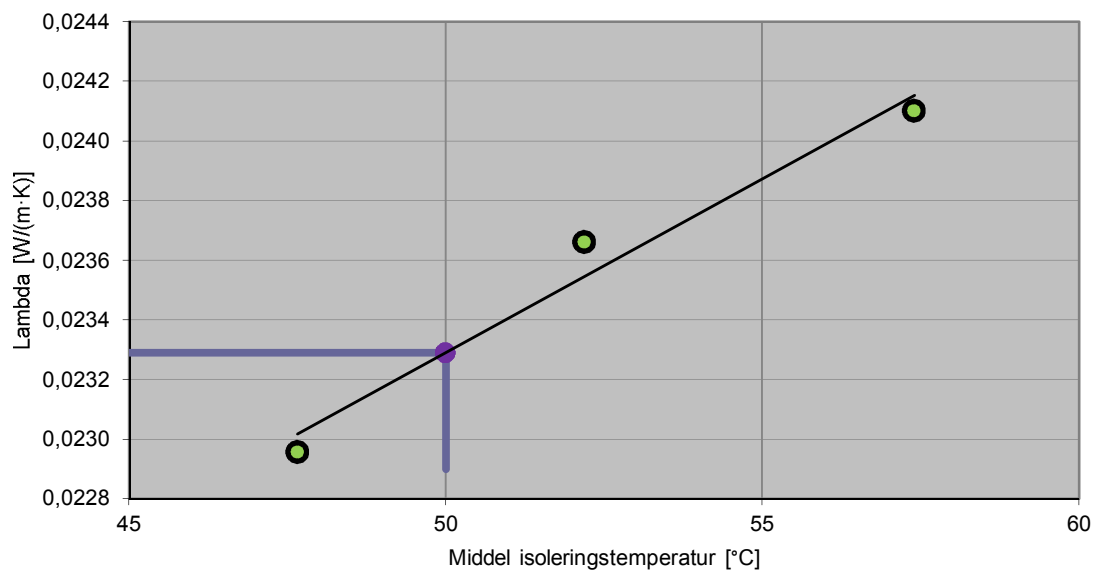
Resultatskema			Fra: 19-06-13 22:15		Til: 21-06-13 01:45	
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
23,42	70,59	24,68	47,70	04:30:23	7,97	0,0228
23,11	80,08	25,06	52,65	04:30:00	9,74	0,0232
23,02	89,59	25,19	57,49	04:29:30	11,72	0,0239
Beregnet lambda 50: 0,023 W/(m·K) Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)						
U-værdi: 0,178 W/(m·K)						



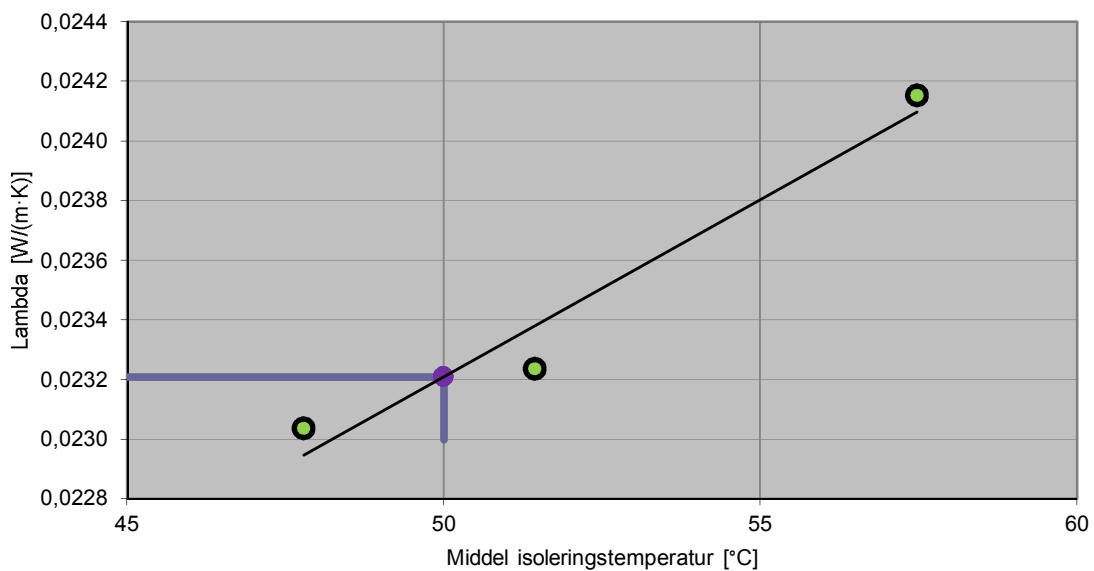
Resultatskema		Fra: 21-06-13 14:30		Til: 22-06-13 18:00		
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
22,73	70,61	24,28	47,52	04:30:00	8,00	0,0227
22,31	80,03	24,33	52,27	04:30:00	9,91	0,0234
23,27	89,54	25,64	57,69	04:30:00	11,78	0,0242
Beregnet lambda 50:			0,023 W/(m·K)	Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)		
U-værdi:			0,178 W/(m·K)			



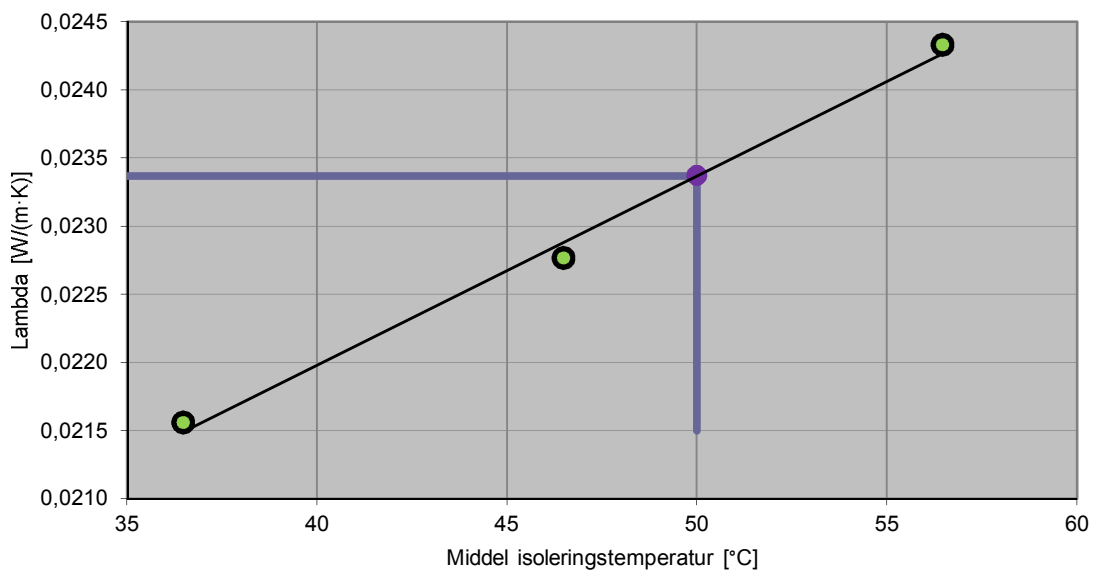
Resultatskema			Fra: 23-06-13 19:30		Til: 24-06-13 23:00	
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
22,57	70,69	24,49	47,66	04:30:00	8,08	0,0230
21,85	80,01	24,21	52,19	04:30:00	10,05	0,0237
22,77	89,56	25,03	57,40	04:30:00	11,84	0,0241
Beregnet lambda 50:			0,023 W/(m·K)	Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)		
U-værdi:			0,179 W/(m·K)			



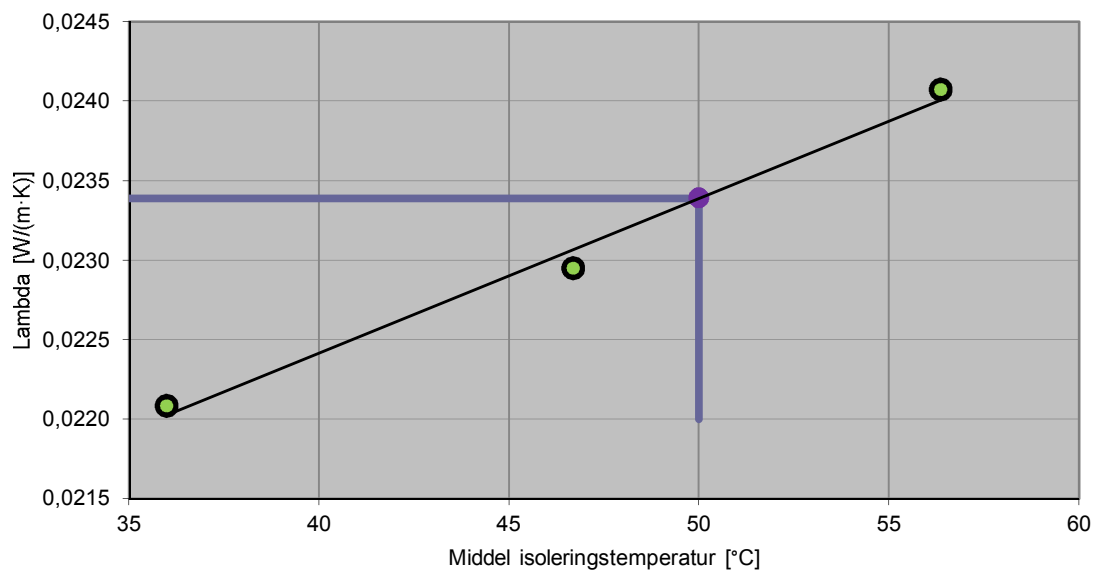
Resultatskema		Fra: 25-06-13 15:30		Til: 26-06-13 19:00		
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
23,11	70,62	24,81	47,79	04:30:00	8,04	0,0230
20,58	79,83	22,89	51,44	04:30:00	10,07	0,0232
22,61	89,59	25,16	57,48	04:30:00	11,85	0,0242
Beregnet lambda 50:			0,023 W/(m·K)	Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)		
U-værdi:			0,179 W/(m·K)			



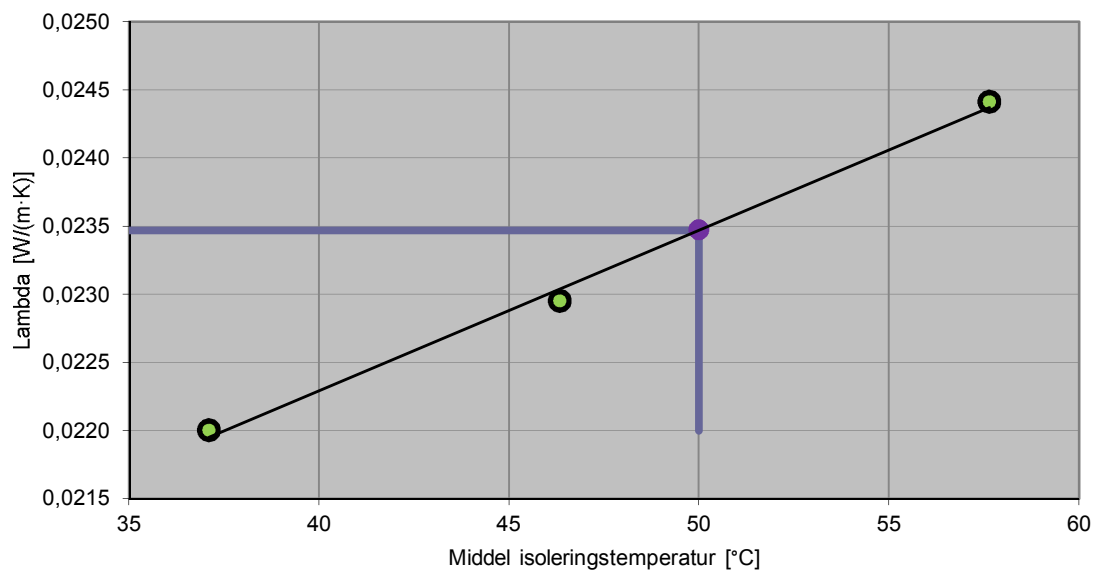
Resultatskema			Fra: 27-06-13 09:00		Til: 28-06-13 13:30	
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
21,43	50,64	22,26	36,49	04:30:00	4,66	0,0216
21,38	69,63	23,22	46,50	04:30:00	8,04	0,0228
20,79	89,23	23,49	56,46	04:30:00	12,18	0,0243
Beregnet lambda 50:			0,023 W/(m·K)	Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)		
U-værdi:			0,174 W/(m·K)			



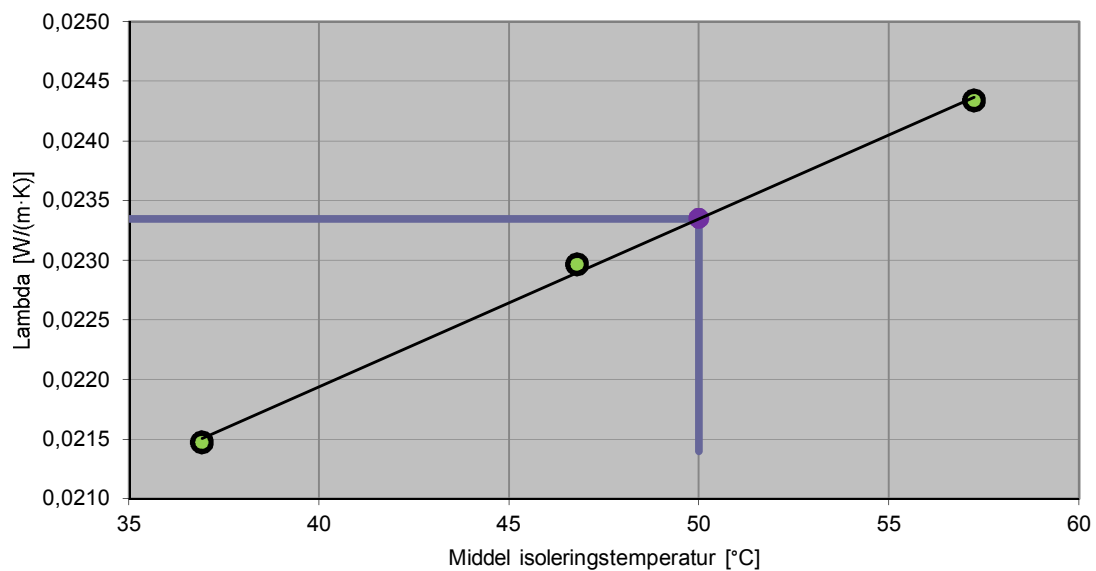
Resultatskema			Fra: 29-06-13 08:30		Til: 30-06-13 15:00	
Måleperioder						
Middel rum-temperatur	Middel medierørs-temperatur	Middel kappe-temperatur	Middel isole-rings-temperatur	Varighed	Afsat effekt	Lambda
°C	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
20,32	50,54	21,38	36,01	04:30:00	4,90	0,0221
21,02	70,40	22,84	46,69	04:30:00	8,31	0,0230
20,59	89,23	23,32	56,38	04:30:00	12,08	0,0241
Beregnet lambda 50:			0,023 W/(m·K)	Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)		
U-værdi:			0,175 W/(m·K)			



Resultatskema			Fra: 01-07-13 16:30		Til: 02-07-13 23:00	
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	W/(m·K)
22,54	50,86	23,28	37,11	04:30:00	4,62	0,0220
20,39	70,24	22,29	46,34	04:30:00	8,38	0,0230
22,92	89,62	25,47	57,65	04:30:00	11,92	0,0244
Beregnet lambda 50:			0,023 W/(m·K)		Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)	
U-værdi:			0,176 W/(m·K)			



Resultatskema		Fra: 03-07-13 18:00		Til: 05-07-13 00:30		
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	W/(m·K)
22,12	50,85	22,92	36,92	04:30:00	4,57	0,0215
21,30	70,38	23,06	46,79	04:30:00	8,28	0,0230
22,21	89,52	24,76	57,24	04:30:00	12,00	0,0243
Beregnet lambda 50:				0,023 W/(m·K)	Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)	
U-værdi:				0,175 W/(m·K)		

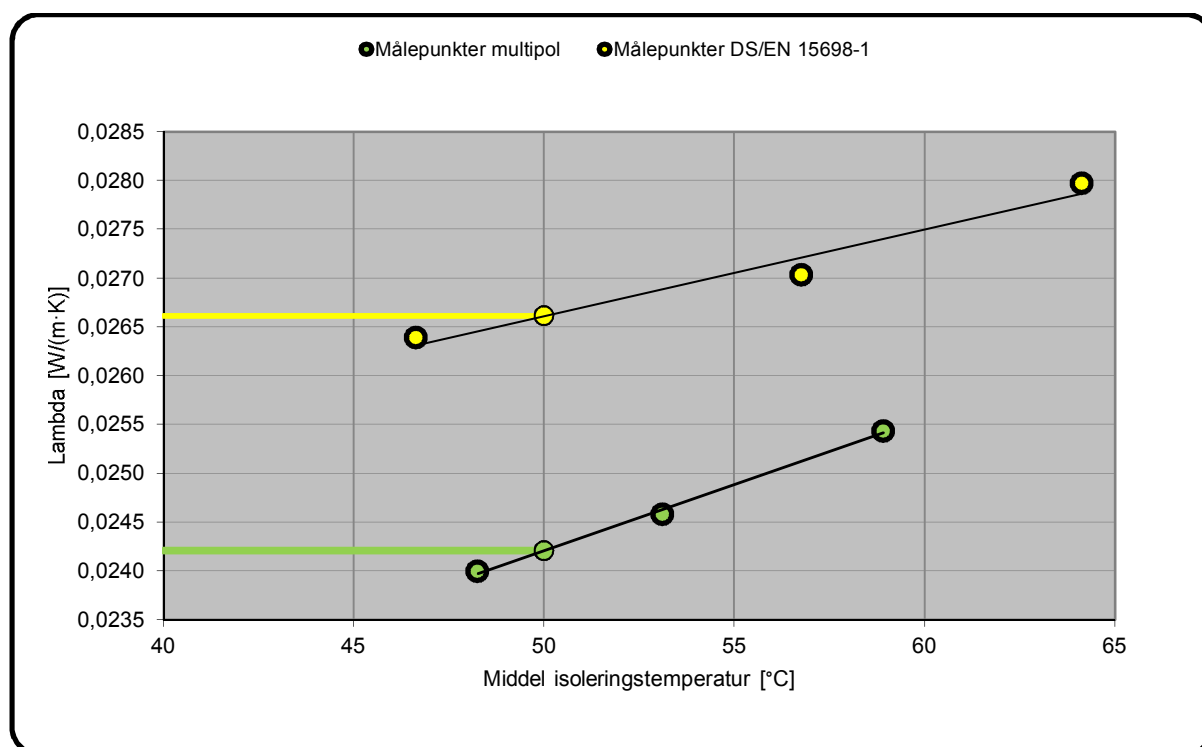


9.5 Bilag 5: Samlede måledata, lige twinrør 2×60,3/225

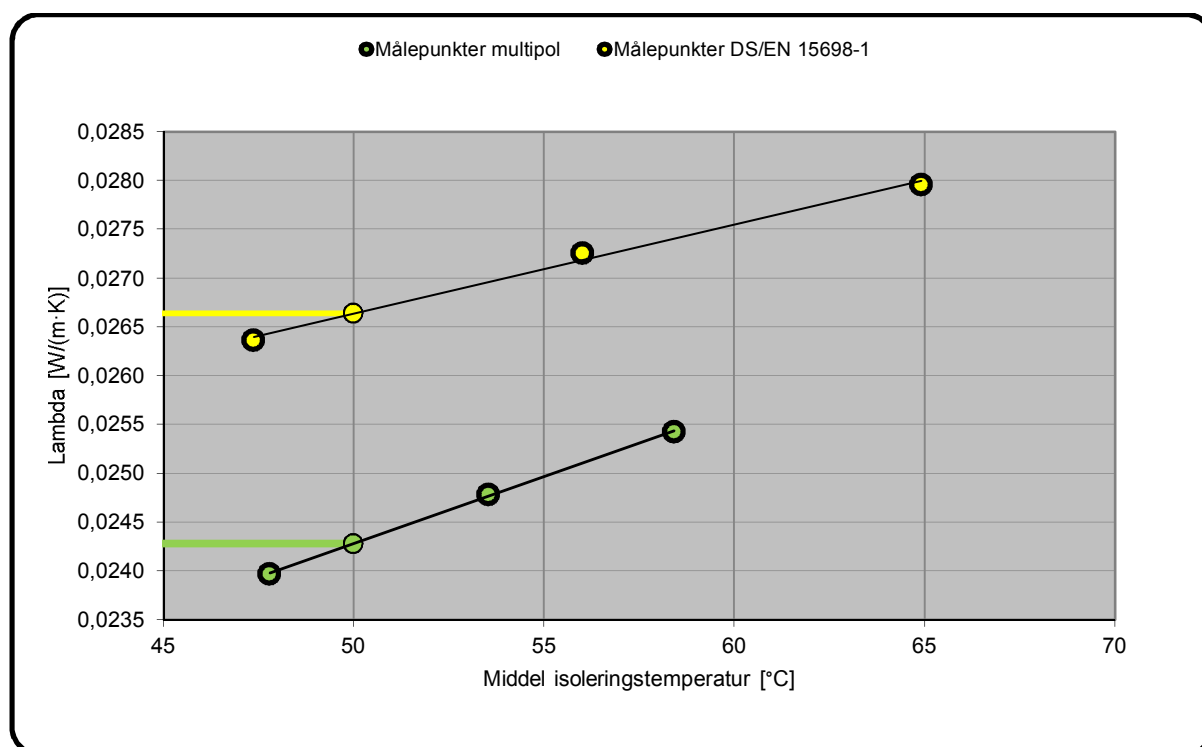
Test nr.	1			2			3			4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Serie nr.												
Medierør - top [°C]	71,80166	81,09046	90,59998	71,60838	81,18184	90,40554	51,87430	70,81149	90,46784	51,84035	70,83578	90,45823
Medierør - side 1 [°C]	71,01937	80,16164	89,56804	70,86718	80,28645	89,39486	51,41639	70,08176	89,43167	51,40499	70,07777	89,42183
Medierør - side 2 [°C]	70,48219	79,50334	88,72625	70,37164	79,61031	88,59371	51,14050	69,58646	88,60040	51,14922	69,56909	88,59265
Øverste medierør	69,85418	78,82402	87,90758	69,74804	78,88726	87,78528	50,73894	68,96068	87,80600	50,76430	68,95111	87,79156
Medierør - bund [°C]	70,78935	79,89487	89,19921	70,64881	79,99146	89,04484	51,29253	69,86010	89,07648	51,28971	69,85844	89,06607
Medierør - gennemsnit [°C]	4,91558	6,25202	7,21553	4,97937	6,22740	7,25784	2,88971	5,04863	7,30431	2,86996	5,10105	7,30346
Medierør - effekt [W/m]	71,20554	81,44319	89,91063	71,06739	81,42338	89,78720	51,46399	71,01025	89,76589	51,36674	70,92722	89,70571
Medierør - top 1 [°C]	70,70098	80,75025	89,24419	70,64402	80,76917	89,19182	51,23398	70,60011	89,12194	51,19937	70,55055	89,08040
Medierør - side 1 [°C]	70,82804	80,82362	89,30565	70,74310	80,82668	89,22121	51,34226	70,67114	89,15386	51,27248	70,60842	89,10258
Medierør - side 2 [°C]	69,35462	79,14125	87,42183	69,30186	79,14614	87,34752	50,96684	69,24128	87,30579	50,39206	69,19798	87,26567
Nederste medierør	70,52229	80,53958	89,97057	70,43909	80,54134	88,86694	51,11077	70,38069	88,83687	51,05766	70,32704	88,78859
Medierør - gennemsnit [°C]	5,00325	6,11599	7,24232	5,08392	6,07432	7,36816	2,88895	4,91008	7,40319	2,90783	5,01420	7,45212
Kapperør - effekt [W/m]	25,39585	24,20420	26,38780	23,69002	25,66888	24,83246	23,43125	24,24715	24,90913	23,31087	23,85034	24,34277
Kapperør - top [°C]	23,74189	23,11908	24,53084	22,84645	23,91620	23,61246	22,37586	23,13435	23,39765	22,60204	22,77063	23,00739
Kapperør - side 1 [°C]	22,96142	22,62406	23,67894	22,64500	23,09425	23,31676	21,93567	22,73287	22,88267	22,35116	22,37453	22,71756
Kapperør - side 2 [°C]	23,94445	23,82178	25,18697	23,50129	24,34555	24,44779	22,40017	23,64558	24,18314	22,93367	23,33617	23,98382
Kapperør - bund [°C]	24,07090	23,44228	24,94614	23,17069	24,25622	24,05237	22,53574	23,43999	23,84315	22,79946	23,08292	23,51289
Rum [°C]	22,51200	21,69596	23,00244	21,75867	22,44419	22,42191	21,57813	21,86074	21,54116	22,11021	21,54616	21,28873
Lambda værdi [W/(m·K)]	0,023998	0,024583	0,025436	0,023971	0,024783	0,025425	0,022753	0,024071	0,025485	0,02298	0,024283	0,025451
Lambda 50 [W/(m·K)]	0,02421			0,02428			0,02440			0,02452		

Test nr.	5			6			7			8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Serie nr.												
Medierør - top [°C]	43,90122	53,43290	63,52183	41,41826	50,74243	60,19483	74,83281	84,02355	94,32575	74,86215	83,95287	94,47406
Medierør - side 1 [°C]	44,13099	53,49358	63,38177	41,79575	50,94276	60,24183	73,49778	82,51862	92,59258	73,52183	82,41134	92,72884
Medierør - side 2 [°C]	44,03633	53,34969	63,15104	41,73997	50,85786	60,06337	72,76313	81,60282	91,48460	72,79179	81,48059	91,62854
Øverste medierør	43,77445	52,96120	62,70334	41,51311	50,52440	59,62366	72,01942	80,79911	90,54523	72,04031	80,63144	90,66385
Medierør - bund [°C]	43,96075	53,30934	63,18950	41,61677	50,76686	60,03092	73,27828	82,23602	92,23704	73,30402	82,11906	92,37382
Medierør - gennemsnit [°C]	6,55725	7,64992	8,86249	7,02553	8,16725	9,57438	-0,08876	0,11628	1,02542	-0,08800	0,26804	0,92938
Medierør - effekt [W/m]	68,97756	78,46093	87,60510	70,56047	79,97535	89,92022	43,48748	49,03671	58,27746	43,44487	48,95380	58,45732
Medierør - top [°C]	68,83498	78,17942	87,37691	70,48486	79,77609	89,83416	42,97377	48,42489	57,62783	42,91908	48,35965	57,73750
Medierør - side 1 [°C]	68,68188	77,98355	87,13006	70,30539	79,53520	89,51510	43,27281	48,76773	57,98773	43,21864	48,69324	58,12061
Medierør - side 2 [°C]	67,52033	76,59922	85,61722	69,10384	78,11617	87,93597	42,38135	47,72859	56,61843	42,33400	47,57005	56,75816
Nederste medierør	68,50369	77,80578	86,93232	70,1364	79,35070	89,30136	43,02865	48,48948	57,62786	42,97915	48,39418	57,76840
Medierør - bund [°C]	0,44486	1,22659	2,39162	-0,08026	0,70390	1,58951	7,55906	9,00913	10,54171	7,57061	9,15543	10,47343
Medierør - gennemsnit [°C]	22,16090	24,17329	23,51122	23,29330	22,98896	23,88880	23,77127	24,46017	24,68142	24,15830	23,41907	25,64097
Kapperør - top [°C]	22,04412	23,64886	23,06100	22,89374	22,82290	23,35216	22,45440	22,90554	22,67188	22,73644	21,74727	23,70556
Kapperør - side 1 [°C]	21,95451	23,12839	22,92165	22,51583	22,64731	23,09108	22,23588	22,71440	22,36399	22,46000	21,54884	23,27679
Kapperør - side 2 [°C]	23,10434	24,44829	24,46249	23,66975	24,02831	22,66128	22,26482	22,81381	22,53992	22,47277	21,66625	23,54185
Kapperør - bund [°C]	22,31597	23,84971	23,48909	23,09316	23,12437	23,74832	22,68159	23,22348	23,06430	22,95687	22,09536	24,04129
Rum [°C]	21,61611	22,83288	22,02528	22,41436	22,02424	22,12252	21,79226	21,79226	21,79226	21,92510	21,92510	21,92510
Lambda værdi [W/(m·K)]	0,023304	0,024021	0,024628	0,023923	0,023876	0,024746	0,023759	0,02443	0,025159	0,023997	0,024632	0,025209
Lambda 50 [W/(m·K)]	0,02448			0,02444			0,02422			0,02442		

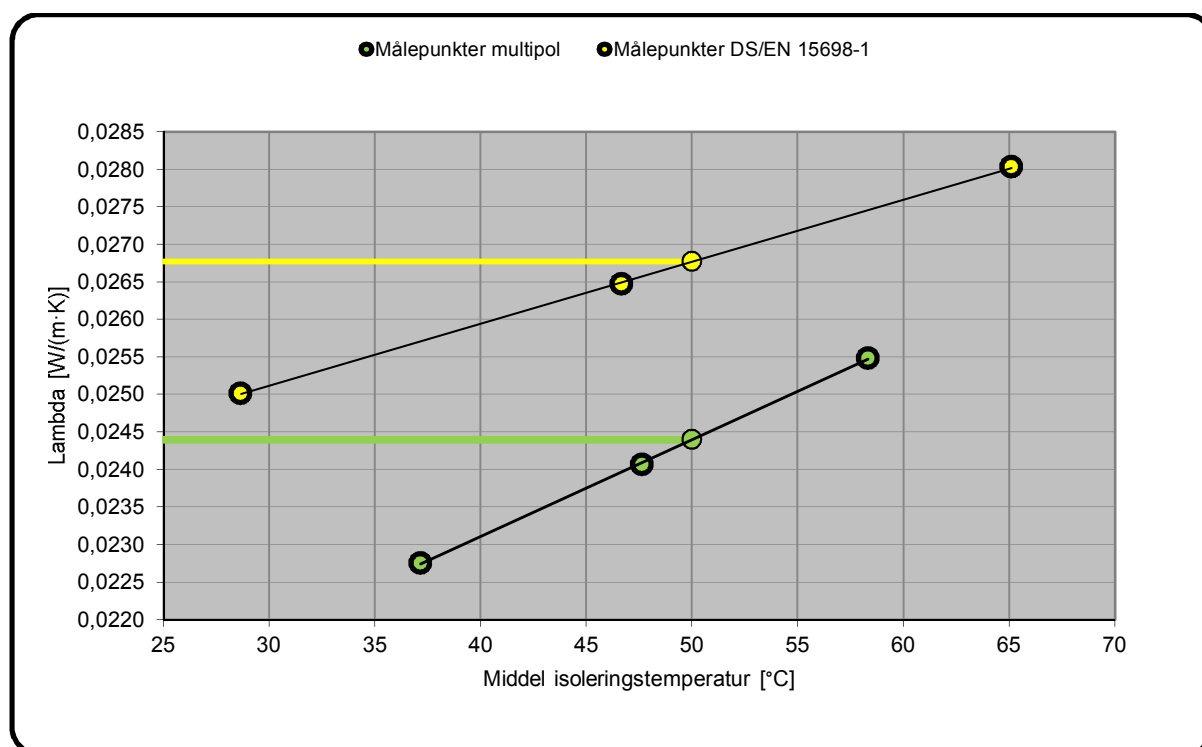
Resultatskema		Fra: 16-08-13 13:00				Til: 17-08-13 17:00			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
70,52	4,92	70,79	5,00	22,51	24,01	48,26	06:00:00	9,92	0,0240
80,54	6,25	79,89	6,12	21,70	23,44	53,12	06:00:00	12,37	0,0246
88,97	7,22	89,20	7,24	23,00	24,95	58,92	06:00:00	14,46	0,0254
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:				0,024 W/(m·K)					
U-værdi:				0,219 W/(m·K)					



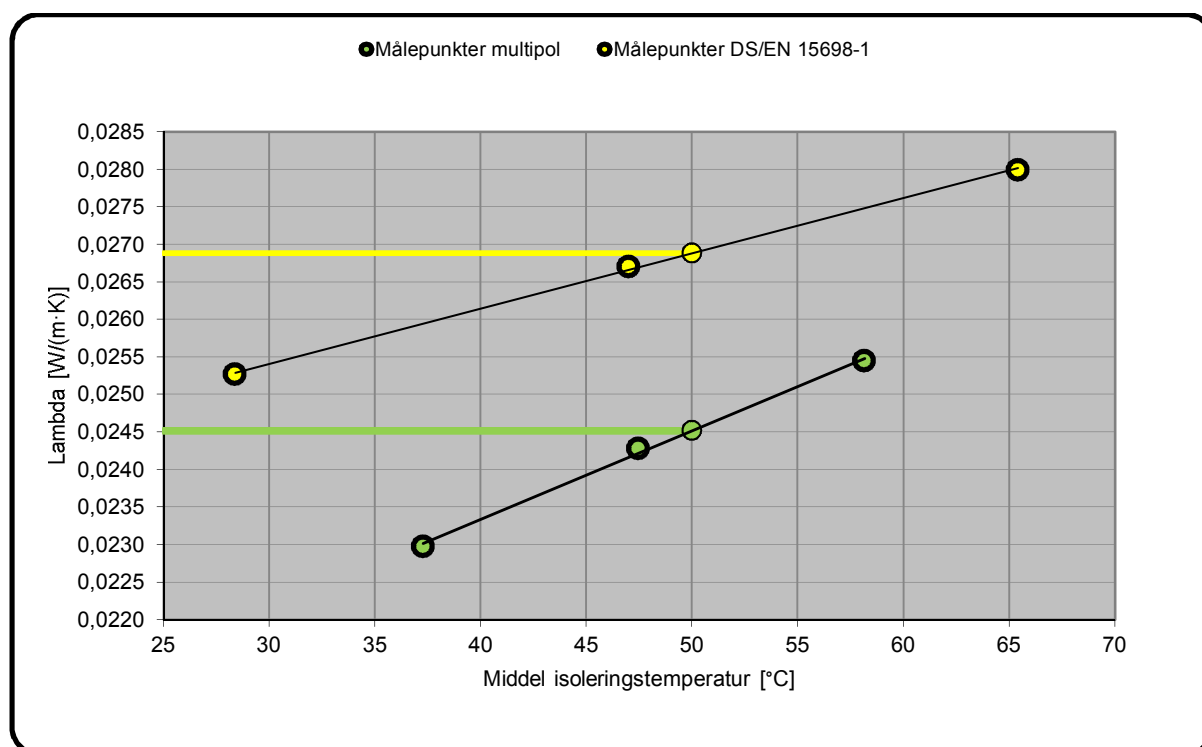
Resultatskema		Fra: 19-08-13 02:45				Til: 20-08-13 06:45			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
70,44	4,98	70,65	5,08	21,76	23,17	47,79	06:00:00	10,06	0,0240
80,54	6,23	79,99	6,07	22,44	24,26	53,55	06:00:00	12,30	0,0248
88,89	7,26	89,04	7,37	22,42	24,05	58,42	06:00:00	14,63	0,0254
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:				0,024 W/(m·K)					
U-værdi:				0,219 W/(m·K)					



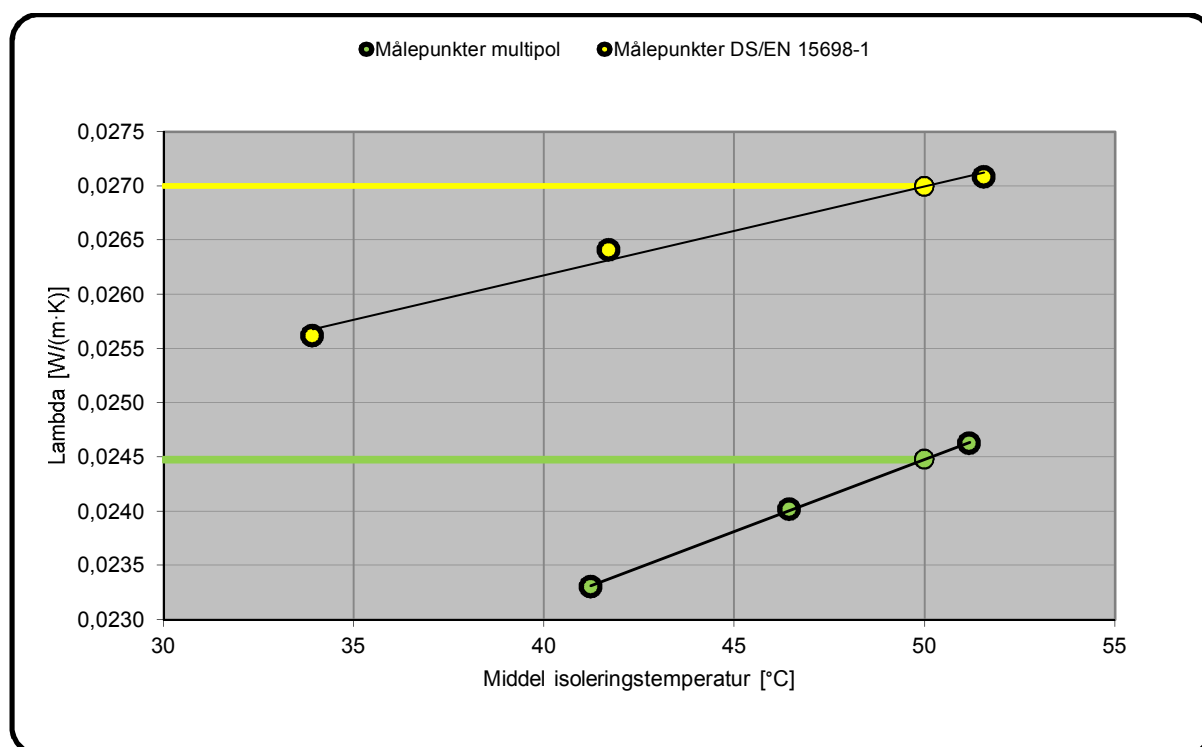
Resultatskema		Fra: 22-08-13 16:00				Til: 24-08-13 00:00			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
51,11	2,89	51,29	2,89	21,58	22,54	37,17	06:00:00	5,78	0,0228
70,38	5,05	69,86	4,91	21,86	23,44	47,63	06:00:00	9,96	0,0241
88,84	7,30	89,08	7,40	21,54	23,84	58,33	06:00:00	14,71	0,0255
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:				0,024 W/(m·K)					
U-værdi:				0,214 W/(m·K)					



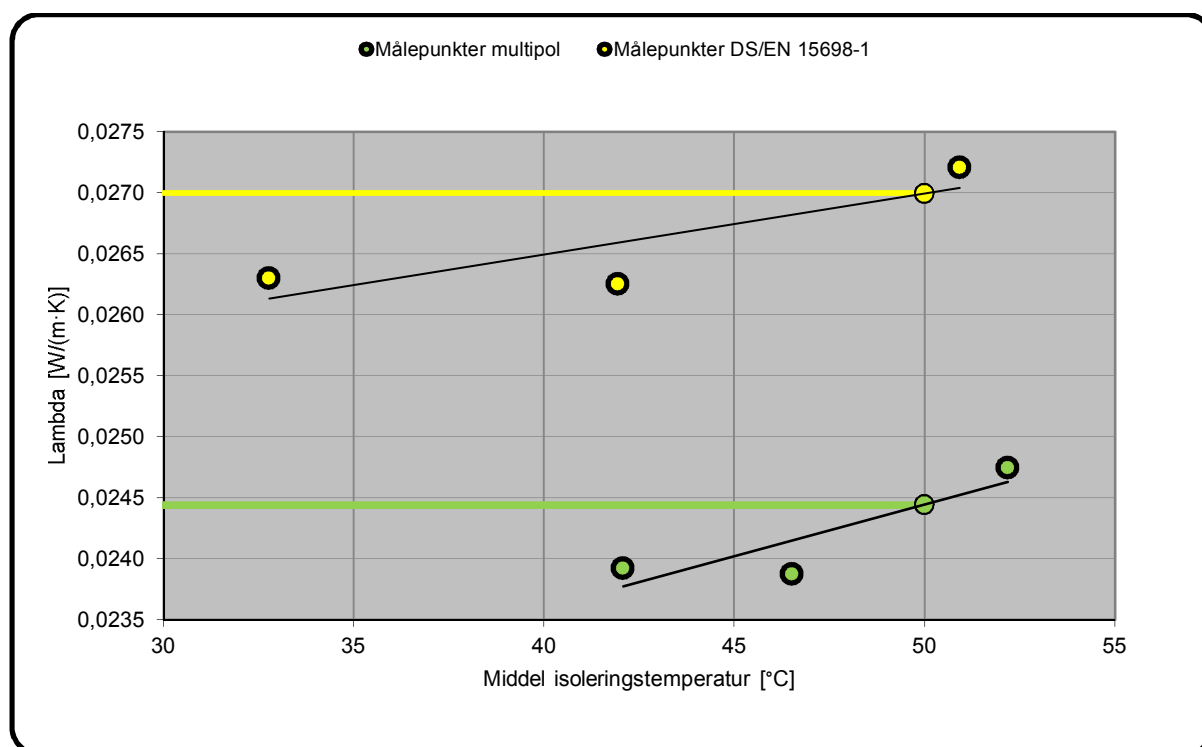
Resultatskema		Fra: 25-08-13 06:15				Til: 26-08-13 11:15			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
51,06	2,87	51,29	2,91	22,11	22,80	37,28	06:00:00	5,78	0,0230
70,32	5,10	69,86	5,01	21,55	23,08	47,45	06:00:00	10,12	0,0243
88,79	7,30	89,07	7,45	21,29	23,51	58,16	06:00:00	14,76	0,0255
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:				0,025 W/(m·K)					
U-værdi:				0,215 W/(m·K)					



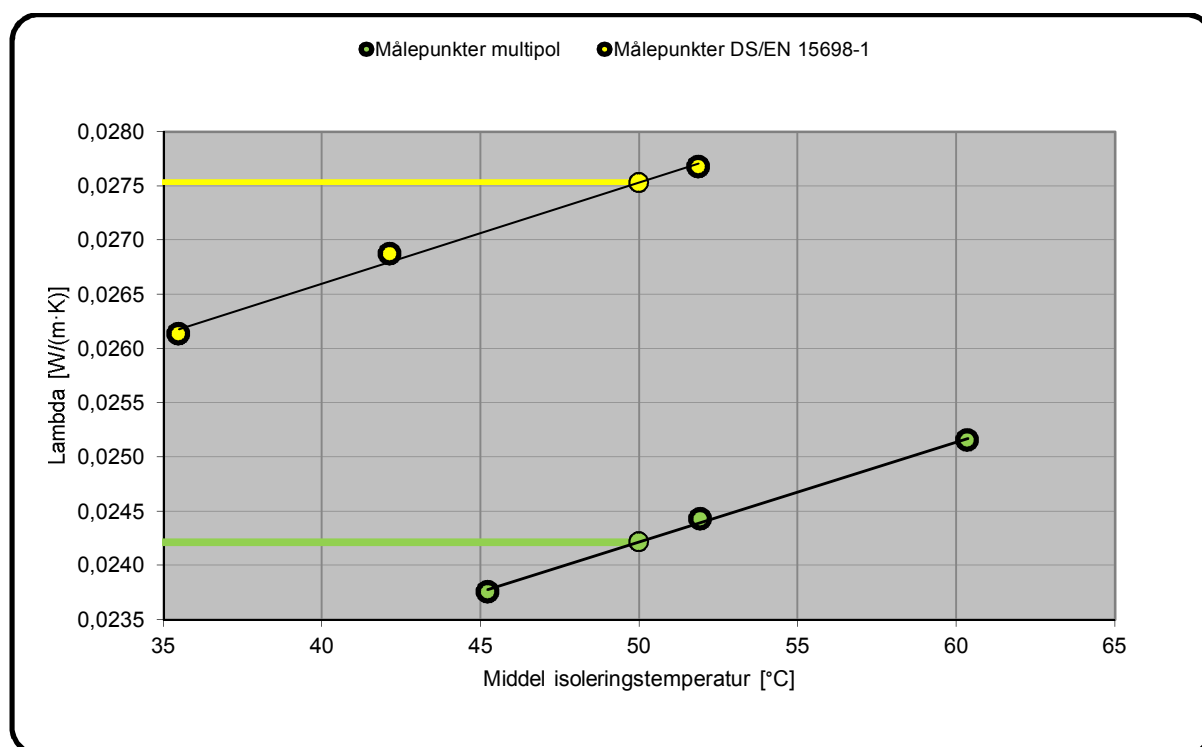
Resultatskema		Fra: 27-08-13 04:00				Til: 28-08-13 09:00			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
68,50	6,56	43,96	0,44	21,62	22,32	41,23	06:00:00	7,00	0,0233
77,81	7,65	53,31	1,23	22,83	23,85	46,45	06:00:00	8,88	0,0240
86,93	8,86	63,19	2,39	22,03	23,49	51,18	06:00:00	11,25	0,0246
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:				0,024 W/(m·K)					
U-værdi:				0,213 W/(m·K)					



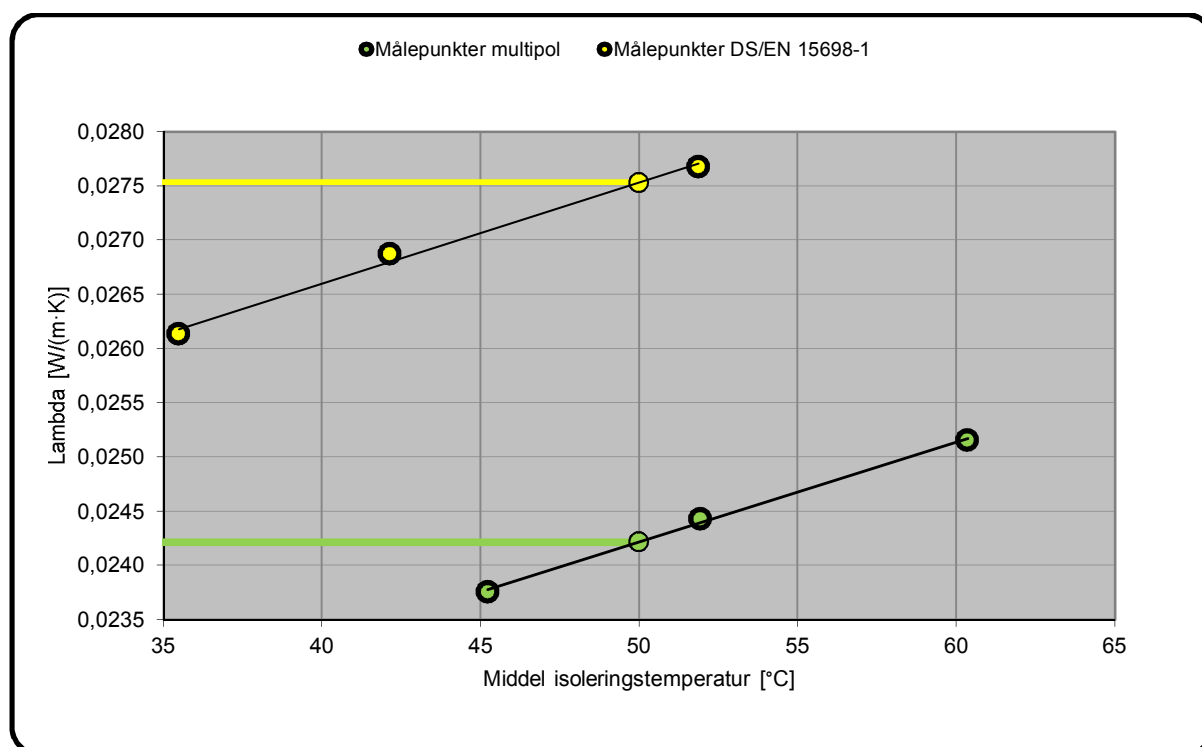
Resultatskema		Fra: 29-08-13 09:45				Til: 30-08-13 12:45			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
70,11	7,03	41,62	-0,08	22,41	23,09	42,08	04:00:00	6,95	0,0239
79,35	8,17	50,77	0,70	22,02	23,12	46,51	04:00:00	8,87	0,0239
89,30	9,57	60,03	1,59	22,12	23,75	52,18	04:00:00	11,16	0,0247
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:				0,024 W/(m·K)					
U-værdi:				0,214 W/(m·K)					



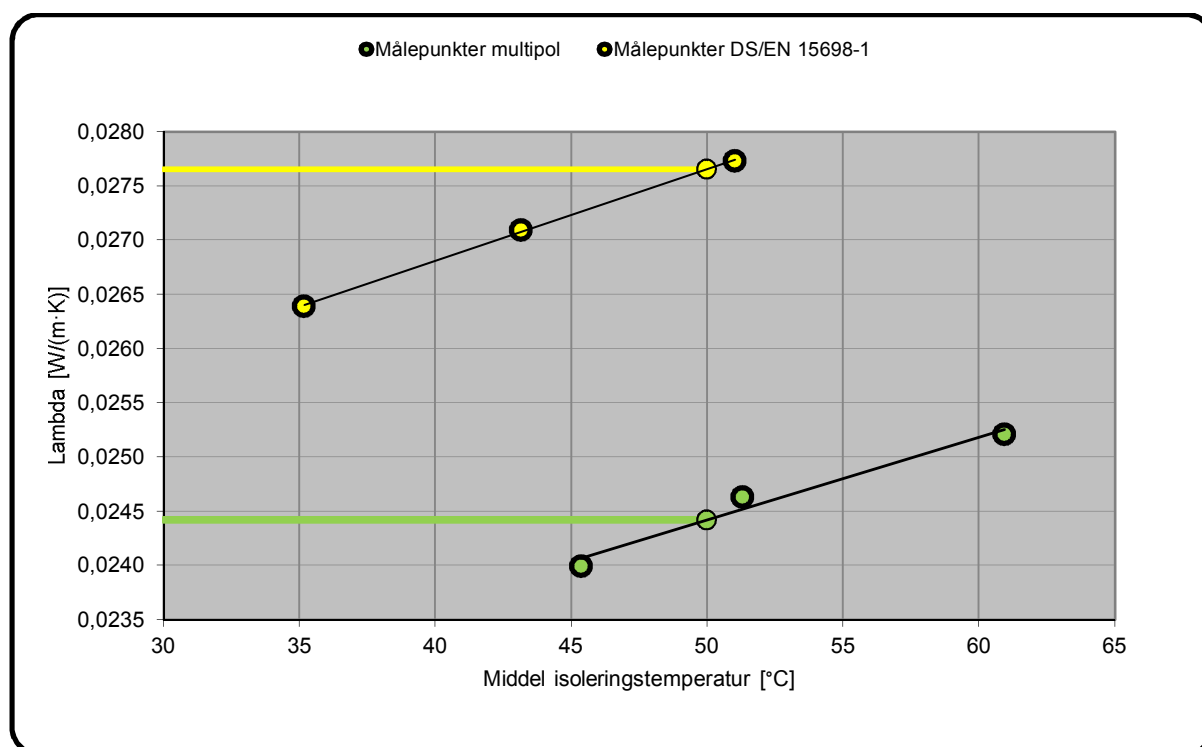
Resultatskema		Fra: 02-09-13 18:45				Til: 01-09-13 13:45			
Medierør 1		Medierør 2		Fælles					
Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel medierørs-temperatur	Middel afsat effekt	Middel rum-temperatur	Middel kapperørs-temperatur	Middel isolerings-temperatur	Varighed	Middel samlet afsat effekt	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
43,03	-0,09	73,28	7,56	21,79	22,68	45,23	06:00:00	7,47	0,0238
48,49	0,12	82,24	9,01	21,88	23,22	51,94	06:00:00	9,13	0,0244
57,63	1,03	92,24	10,54	21,51	23,06	60,36	06:00:00	11,57	0,0252
Beregnet lambda 50 iht. DS/EN 15698-1:				0,028 W/(m·K)		Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)			
Simuleret lambda 50 med 8. ordens multipol:				0,024 W/(m·K)					
U-værdi:				0,217 W/(m·K)					



Resultatskema		Fra: 02-09-13 18:45				Til: 01-09-13 13:45			
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	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
43,03	-0,09	73,28	7,56	21,79	22,68	45,23	06:00:00	7,47	0,0238
48,49	0,12	82,24	9,01	21,88	23,22	51,94	06:00:00	9,13	0,0244
57,63	1,03	92,24	10,54	21,51	23,06	60,36	06:00:00	11,57	0,0252
Beregnet lambda 50 iht. DS/EN 15698-1:				0,028 W/(m·K)		Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)			
Simuleret lambda 50 med 8. ordens multipol:				0,024 W/(m·K)					
U-værdi:				0,217 W/(m·K)					



Resultatskema		Fra: 03-09-13 17:00				Til: 04-09-13 23:00			
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	Middel lambda
°C	W/m	°C	W/m	°C	°C	°C	tt:mm:ss	W/m	W/(m·K)
42,98	-0,09	73,30	7,57	21,93	22,96	45,37	06:00:00	7,48	0,0240
48,39	0,27	82,12	9,16	20,92	22,10	51,31	06:00:00	9,42	0,0246
57,77	0,93	92,37	10,47	22,57	24,04	60,94	06:00:00	11,40	0,0252
Beregnet lambda 50 iht. DS/EN 15698-1:				0,028 W/(m·K)		Usikkerhed: 0,0004 W/(m·K)			
Simuleret lambda 50 med 8. ordens multipol:				0,024 W/(m·K)					
U-værdi:				0,218 W/(m·K)					



9.6 Bilag 6: Resultater fra FEM-simuleringer 2×60,3/225

FEM-resultater

Test nr.	1			2			3			4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Serie nr.												
Medierør - top [°C]	70,78935	79,89487	89,19921	70,64881	79,99146	89,04484	51,29253	69,86010	89,07648	51,28971	69,85844	89,06607
Medierør - top [W/m]	4,99317	6,07101	7,15495	5,05306	6,01182	7,21572	2,93258	4,88281	7,24620	2,91042	4,92019	7,27947
Medierør - bund [°C]	70,52229	80,53958	88,97057	70,43909	80,54134	88,88694	51,11077	70,38069	88,83687	51,05766	70,32104	88,78859
Medierør - bund [W/m]	4,92382	6,24643	7,09042	4,99867	6,16150	7,17126	2,88914	5,01820	7,17860	2,85495	5,04123	7,20116
Sum [W/m]	9,91733	12,31738	14,24557	10,05207	12,17370	14,38738	5,82194	9,90135	14,42519	5,76559	9,96248	14,48103

Test nr.	5			6			7			8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Serie nr.												
Medierør - top [°C]	43,96075	53,30934	63,18950	41,61677	50,76686	60,03092	73,27828	82,23602	92,23704	73,30402	82,11906	92,37382
Medierør - top [W/m]	0,51141	1,29856	2,41336	-0,07011	0,81028	1,63146	7,44710	8,79025	10,23679	7,42890	8,88081	10,16223
Medierør - bund [°C]	68,50369	77,80578	86,93232	70,11364	79,35070	89,30136	43,02885	48,48948	57,62786	42,97915	48,39418	57,76840
Medierør - bund [W/m]	6,52010	7,54109	8,72276	6,89699	8,80807	9,39974	-0,02174	0,19211	1,03568	-0,05821	0,29216	0,95639
Sum [W/m]	7,03151	8,83965	11,13612	6,82688	9,61835	11,03120	7,42536	8,98236	11,27247	7,37069	9,17297	11,11862

Fejl %

Test nr.	1			2			3			4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Serie nr.												
Medierør - top [W/m]	-0,20186	-0,74087	-1,22107	-0,61080	-1,03960	-2,11267	1,48772	-0,55842	-2,16658	0,08884	-1,91073	-2,37180
Medierør - bund [W/m]	0,16735	-0,08950	-1,76445	0,38614	-1,06946	-1,20736	-0,01976	-0,56649	-1,75121	-0,52578	-1,18668	-1,42059
Sum [W/m]	-0,01512	-0,41103	-1,49010	-0,11164	-1,05156	-1,65859	0,74336	-0,55906	-1,95711	-0,21169	-1,53350	-1,89595

Test nr.	5			6			7			8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Serie nr.												
Medierør - top [W/m]	13,01207	5,54225	0,90091	-14,4802	13,12875	2,57123	-1,50344	-2,49005	-2,97869	-1,90753	-3,09232	-3,06237
Medierør - bund [W/m]	-0,56981	-1,44317	-1,60191	-1,86373	7,27540	-1,85787	-308,300	39,47187	0,99061	-51,1795	8,25568	2,82396
Sum [W/m]	0,41802	-0,41700	-1,05951	-1,73416	7,76850	-1,20283	-0,60519	-1,59259	-2,61400	-1,51840	-2,73088	-2,55604