Danmarks Tekniske Universitet



# Optimering af bygningers varmeisolering

Afgangsprojekt januar 2011





Udarbejdet af:

Simon Jacobsen, S070152

Andreas Schjørring Jørgensen, S072584

Vejleder:

Professor Carsten Rode

# Indholdsfortegnelse

1.	Bilagsoversigt 4					
2.	Forord 5					
3.	Indledning6					
4.	Resu	ume	7			
5.	Abst	tract	8			
6.	Sym	bolliste	9			
7.	Gru	ndlæggende teori ved varmetransmission	10			
7.	.1.	Ledning	12			
7.	.2.	Konvektion	16			
7.	.3.	Stråling	21			
7.	.4.	Fugt	29			
7.	.5.	Teori - Opbygning af Excel-ark	31			
8.	Reg	neeksempel	34			
8.	.1.	Ledning	35			
8.	.2.	Konvektion	37			
8.	.3.	Stråling	39			
8.	.4.	Fugtberegninger	10			
9.	Bere	egningsmodellens 5 forsøgsopstillinger4	12			
10.	Н	eat beregningsprogram	13			
11.	N	låleteknik	17			
1	1.1.	Måleusikkerhed	18			
12.	Fo	orsøg	52			
1	2.1.	Forsøgsformål	52			
1	2.2.	Materialer	52			
1	2.3.	Forsøgsopstillinger	53			
13.	Fo	orsøgsresultater	51			
1	3.1.	Fejlkilder	57			
14.	D	iskussion	59			
14	4.1.	Dokumentation af U-værdi	59			
14	14.2.   Besparelse i forhold til Rockwool   70					
15.	K	onklusion	73			

Appen	dix	76
17.	Bilag	75
16.	Litteraturliste	74

## 1. Bilagsoversigt

- Bilag 1 Beregningsmodel for 1 lag Aluthermo
- Bilag 2 Beregningsmodel for 2 lag Aluthermo
- Bilag 3 Beregningsmodel for 8 lag Aluthermo
- Bilag 4 Beregningsmodel for A-murbatts med reflekterende overflader
- Bilag 5 Beregningsmodel for referencevæg
- Bilag 6 Aluthermo brochure danish
- Bilag 7 Aluthermo\_dansk\_beregning af U-værdi
- Bilag 8 Samlevejledning til fosøgskasse med 1 lag Aluthermo
- Bilag 9 Samlevejledning til fosøgskasse med 2 lag Aluthermo
- Bilag 10 Samlevejledning til forsøgskasse med 8 lag Aluthermo
- Bilag 11 Samlevejledning til forsøgskasse med A-murbatts med reflekterende overflader
- Bilag 12 Beregning af dokumentation
- Bilag 13 Aluthermo dokumentations-beregning
- Bilag 14 Rockwool og Aluthermo grafer

# 2. Forord

Denne rapport dokumenterer afgangsprojekt udført af Andreas S. Jørgensen og Simon Jacobsen på retningen Diplom Bygning ved Institut for byggeri og anlæg, DTU. Rapportens omfang svarer til 20 ECTS-point pr. person og er udarbejdet over 20 uger med afslutning 3. januar 2011. Vejleder på projektet er professor Carsten Rode, sektionsleder på BYG•DTU.

Andreas Schjørring Jørgensen

Simon Jacobsen

# 3. Indledning

De globale klimaforandringer, samt en snarlig nedgang i mængden af olie og gas betyder at energiforbruget over hele verden skal reduceres betragteligt. Opvarmning af bygninger udgør i Danmark 40 % af det samlede energiforbrug<sup>1</sup>, så der er basis for at opnå en stor del af besparelsen her. Der findes allerede i dag lav-energi huse og passivhuse, der har et minimalt opvarmningsbehov, men de er kendetegnet ved nærmest metertykke mure. Dette har visse ulemper. Blandt andet meget store, dybe vindueskarme, og mindre nettoareal i boligen, da klimaskærmen udgør en større del af det bebyggede areal. Desuden opstår der visse begrænsninger i de arkitektoniske muligheder.

En optimering af klimaskærmens isoleringsevne i forhold til dens tykkelse, vil derfor være et effektivt middel i kampen for at få bedre isolerede boliger. De gængse isoleringsmaterialer virker primært ved at mindske ledning og konvektion. En anden type isolering, som har været kendt i et stykke tid, men som de senere år er blevet mere udbredt, er den såkaldte refleksive isolering. Den findes i flere former, men generelt er det opbygget af ca. 10 mm polyethylen belagt med et tyndt lag refleksivt materiale, for eksempel aluminium. Refleksiv isolering virker ved at reflektere varmestrålingen, for på den måde at mindske varmetabet ud igennem væggen. Det er nødvendigt at etablere et hulrum på hver side af det refleksive lag for at varmestrømmen kan omdannes til stråling

Importørerne af denne refleksive isolering lovpriser produktet og angiver, at disse 10 mm plus de to mindre hulrum på hver side, kan erstatte 200 mm rockwool. Der har gennem de sidste par år været en diskussion blandt fagfolk om produktets isoleringsevne og der er en udbredt skepsis omkring virkningen..

Undertegnede har derfor fundet det interessant, at arbejde med denne type materialer i bestræbelsen på at skabe konkrete beviser som kan vurdere materialets isoleringsevne i en typisk anvendelsessituation.

Først i rapporten gennemgås teorien omhandlende varmetransmission hvor også fugtforhold berøres. På baggrund af teorien er der opbygget en beregningsmodel, hvor forskellige konstruktioner er gennemtestet for deres isoleringspotentiale.

4 forsøgsopstillinger samt et referenceforsøg blev sat i stand for at eftervise isoleringevnen af de givne konstruktioner. Resultaterne har ledt til en sammenligning mellem importørens dokumenterede R-værdi og den R-værdi der ville optræde, hvis Aluthermo'en blev benyttet i praksis.

Derudover undersøger rapporten om en øget isoleringsevne kan opnås ved at kombinerer flere lag reflekterende lag i samme vægkonstruktion. Samtidig undersøges virkningen af reflekterende overflader i kombination med traditionel masseisolering.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> <u>http://www.sbi.dk/miljo-og-energi/energibesparelser/sadan-kan-der-spares-energi-i-bygninger</u>

## 4. Resume

Rapporten påviser effekten af Aluthermo Quattro. Aluthermo Quattro er en refleksiv isoleringstype, som bryder med traditionen for masseisolering i Danmark. Effekten er påvist ved avancerede beregninger, simuleringer og måling på 4 forsøgsopstillinger. Herunder er uddybet de enkelte processer i projektet.

Teorien bag varmeoverførsel i byggematerialer gennemgås grundigt, for at forklare de grundlæggende principper som projektet omhandler. For at forstå beregningerne, og hele ideen bag refleksiv isolering, er det vigtigt at have et indgående kendskab til ledning, konvektion og stråling. Teorien implementeres i et Excel-regneark, som tager højde for blandt andet emissivitet. Regnearket benytter en iterativ proces, hvor resultater bruges til at udregne mere præcise resultater. Der foretages en grundig gennemgang af regnearket. Dette sker i form af et eksempel på beregning af U-værdi for en forsøgsopstilling. Eksemplet viser brugen af den forudgående teori sammen med de virkelige værdier for varmeledning, tykkelser af lag osv.

For at bekræfte resultaterne af udregningen, er anvendt simuleringsprogrammet Heat. Heat2 er brugt til at simulere alle forsøgsopstillinger. U-værdierne bliver sammenlignet med resultaterne fra Excel, hvilket påviser beregningsmetoden. Heat3, som kan lave 3D-simuleringer af forsøgsopbygningerne, er anvendt til kontrol af forsøgsarealets størrelse. Simuleringerne viser, at forsøgsarealet er stort nok til at opnå 1-dimensionelle strømninger i midten af opstillingen.

En gennemgang af de anvendte måleinstrumenter, samt måleusikkerheden giver et billede af hvilken fejlprocent der kan forventes at opstå. Måleusikkerheden på U-værdien bestemmes til  $\pm$ 0,0044 W/(m<sup>2</sup>K)

Efter alle de teoretiske overvejelser afprøves teorien i et forsøgshus. Formålet med forsøgene er primært at bevise de forventede U-værdier praktisk. I alt 5 forsøg er beskrevet. Først er en referenceopstilling, som er den oprindelige ydervæg. 3 forsøg er baseret på Aluthermo Quattro i 1, 2 og 8 lag. Dertil kommer et forsøg hvor 95 mm Rockwool har fået refleksive overflader i form af almindeligt aluminiumsfolie.

Forsøgene efterviste de teoretiske beregninger og bekræfter forventningen om at Aluthermo Quattro langt fra lever op til hvad producenten lover. En sammenligning mellem Aluthermos dokumentation for den påståede R-værdi og de teoretiske og praktiske udledninger viser en reel Rværdi der er over 4 gange dårligere end den påståede.

Effekten af flere lag refleksive materialer er begrænset i forhold til hvis den selvsamme væg var fyldt ud med almindelig mineraluldsisolering. Den største forskel der opnås er på ca. 3,5 W/m<sup>2</sup> for konstruktionen med 1 lag Aluthermo, i forhold til samme konstruktion med mineraluld. Desuden ses det at effekten af de reflekterende materialer stiger med voksende temperaturforskel. Prismæssigt er Aluthermo underlegen i forhold til almindelig mineraluldsisolering, og da isoleringsforbedringen er minimal under de givne forhold, kan det ikke anbefales at benytte denne type isolering medmindre andre særlige forhold gør sig gældende

# 5. Abstract

The report demonstrates the effect of Aluthermo Quattro. Aluthermo Quattro is a reflective insulation type, which breaks with the tradition of mass insulation in Denmark. The effect has been demonstrated by advanced calculations, simulations and measurements on 4 experimental setups. Below is explained the different processes in the project.

The theory behind heat transfer in building materials is thoroughly reviewed to explain the basic principles of the project. To understand the calculations, and the whole idea behind reflective insulation, it is important to have a good understanding of conduction, convection and radiation. The theory is implemented in an Excel spreadsheet that takes emissivity into account among other things. The spreadsheet uses an iterative process where results are used to calculate more accurate results.

A thorough walk-through of the spreadsheet is conducted. This takes the form of an example of calculating the U-value for an experimental setup. The example shows the use of theory with the real values of thermal conductivity, thickness of layers, etc.

To confirm the results of the calculation a simulation program, Heat, is used. Heat2 is used to simulate all experimental setups. U-values are compared with results from Excel, which shows the calculation method. Heat3, which can create 3D simulations of the experimental setup is used to control the test-size. The simulations show that the experimental area is large enough to obtain a 1-dimensional heat flux in the middle of the test area.

A review of the measurement instruments and measurement uncertainty provides an image of what percentage of errors are likely to arise. The error of the U-value is determined to be  $\pm$  0.0044 W / (m<sup>2</sup>K)

After all the theoretical considerations, the setup is tested in a test housse. The purpose of the experiments is primarily to demonstrate the expected U-values practically. A total of 5 experiments are described. First is a reference experiment, which is the original outer wall. 3 experiments are based on Aluthermo Quattro in 1, 2 and 8 layers. In addition, an experiment where 95 mm Rockwool have reflective surfaces in the form of ordinary aluminum foil.

The experiments demonstrated the theoretical calculations and confirmed the expectation that Aluthermo Quattro comes to short of what the manufacturer promises. A comparison between Aluthermo documentation of the alleged R-value and the theoretical and practical emissions show a real R-value is over 4 times worse than the alleged.

The effect of multiple layers of reflective materials is limited compared to if that same wall was filled with ordinary mineral wool insulation. The biggest difference obtained is around. 3.5 W/m<sup>2</sup> for the structure with 1 layer Aluthermo, compared to the same construction with mineral wool. Also, it is seen that the effect of the reflective materials increases with increasing temperature difference. Price wise, Aluthermo is inferior compared with conventional mineral wool insulation, and as insulation improvement is minimal under the circumstances, it is not recommended to use this type of insulation unless other special circumstances apply.

# 6. Symbolliste

A [m <sup>2</sup> ] Areal		Areal
В	[m]	Bredde
С	[J/K)	Varmekapacitet
С	[J/(kg·K)]	Specifikke varmekapacitet
d	[m]	Tykkelse
h	[W/(m <sup>2</sup> ·K)	Varmeovergangskoefficient
L	[m]	Karakteristisk længde
I	[m]	Længde
3	[W/(m·K)	Varmeledningsevne
Λ	[m]	Bølgelængde
m	[kg]	Masse
Φ	[W] eller [J/s]	Varmestrøm
Q	[1]	Varmemængde
q	[W/m <sup>2</sup> ]	Varmestrømstæthed
R	[(m <sup>2</sup> ·K)/W]	Isolans
r	[m]	Radius
	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densitet
ρ	-	Reflektans
	ра	Damptryk
Т	[K] eller [°C]	Temperatur
t	[s]	Tid
U	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Transmissionskoefficient, U-værdi
u	[m/s]	Hastighed
V	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
β	[1/K]	Termisk udvidelseskoefficient
$\nabla^2$		Laplace-operatoren
η	[Pa·s]	Dynamiske viskositet
ν	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematisk viskositet
3	-	Emissiviteten
σ	[J/(s·m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )]	Strålingstal
E	[W/m2]	Energitæthed, strålingsintensiteten
α	-	Absorptans
τ	-	Transmittans
F	-	Vinkelforholdet
Z	(GPa·m <sup>2</sup> s)/kg	Diffusionsmodstand

## Indices

i	Inde (internal)
Si	Indvendig overflade
E	Ude (external)
Se	Udvendig overflade
L	Ledning
К	Konvektion
S	Stråling

# 7. Grundlæggende teori ved varmetransmission

Dette afsnit introducerer de faktorer der er gældende ved varmeoverførsler. Afsnittet er en sammenfatning af undervisningsnotatet 'Varmetransmission' af Carsten Rode 2010, men der vil også inddrages andre kilder.

Overførsel af varme mellem to områder kaldes varmetransmission. Denne vil altid finde sted mellem områder med forskellige temperatur idet disse vil udveksle energi fra det varme område til det kolde.

Varmetransport finder almindeligvis sted på følgende måder

**Varmeledning** er overførsel af energi ved tilfældige stød mellem de atomare partikler i materialet. Partiklerne bevæger sig ikke gennem materialet, så varmeoverførslen sker uden stoftransport

**Konvektion** er varmeoverførsel gennem et fluid, der bevæger sig mellem et varmt og et koldt legeme. Her overføres varmen altså ved stoftransport igennem en gas eller væske.

Varmestråling er overførsel af varme ved elektromagnetisk stråling.

På figur 1 er vist de tre varmetransportmekanismer



Disse tre varmetransmissions-mekanismer vil blive beskrevet mere indgående senere i afsnittet.

Ud over de 3 ovenstående varmetransmissions-mekanismer kan varmen også transporteres ved gennemstrømning af et varmebærende medium som for eksempel i radiatorer, ved fordampning og ved kondensation. Disse er dog ikke relevante i forhold til dette projekt og vil derfor ikke blive uddybet yderligere.

Varmetransmissionen i et lag vil ofte bestå af enten ledning eller kombineret konvektion og varmestråling. Ledningen finder sted i faste materialer, mens konvektion og stråling gør sig gældende hulrum fyldt med gasser eller væsker. I mange isoleringsmaterialer, der umiddelbart opfattes som et fast materiale, foregår dog alle tre varmetransmissionsmekanismer. Ledningen foregår i selve det faste materiale, mens konvektionen og strålingen foregår i de små hulrum, isoleringsmaterialet indeholder. I praksis benyttes en samlet værdi for varmeledningsevnen gennem materialet, hvori alle tre mekanismer er indregnet.

#### Isolans

De enkelte materialer og hulrum vil hver især yde en modstand mod varmestrømningen, opgivet ved den såkaldte R-værdi. Jo højere denne værdi er, jo bedre isolerer materialet.

Hvis de enkelte lag eller isolanser ligger efter hinanden i varmestrømmens retning kan den samlede isolans for den vej varmestrømmen bevæger sig angives med

$$R_{1+2} = R_1 + R_2 \tag{0.1}$$

Dette kaldes seriekoblede isolanser.

I tilfælde hvor isolanserne er parallelkoblede, som når transmissionsvejen går gennem et hulrum, hvor der både findes konvektion og stråling, er den samlede isolans for hulrummet bestemt ved

$$R_{K+S} = \frac{1}{\frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_S}}$$
(0.2)

Isolansen for luftlaget, samt for de to materialer kan nu regnes som serieforbundne og dermed er den samlede isolans for disse tre lag da givet ved

$$R_m = R_{1+2} + R_{K+S} \tag{0.3}$$

#### U-værdi

I almindeligt byggeri omtales den samlede isolans ikke særlig ofte. I stedet benyttes den såkaldte transmissionskoefficient, når en bygningsdels isoleringsevne skal beskrives.

Transmissionskoefficienten, eller U-værdien, er givet ved den reciprokke værdi af den totale isolans

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \tag{0.4}$$

Det noteres, at jo lavere U-værdi, jo bedre isoleringsevne. Der skelnes her mellem R<sub>m</sub>, der er den samlede isolans for selve materialerne og R<sub>tot</sub>, hvor de såkaldte overgangsisolanser er medregnet. Disse introduceres senere i rapporten.

#### Stationær og ikke-stationær varmestrøm

Ved regning med varmestrømme skelnes mellem stationære og ikke-stationære varmestrømme. Ikke-stationære varmestrømme er tidsafhængige, mens stationære varmestrømme er uafhængige af tiden. Stationære varmestrømme er kendetegnet ved at den mængde energi der strømmer ind i systemet, kommer ud i den anden ende. Fuldstændige stationære tilstande opnås sjældent i bygningskonstruktioner, da der altid vil ophobes varmeenergi i bygningsdelene, samtidig med at især udetemperaturen ændrer sig hele tiden.

## 7.1. Ledning

Al varmeledning er styret af termodynamikkens 1.- og 2. lov. Termodynamikkens første lov omhandler energiens konstans også kendt fra mekanikken og den grundlæggende fysik. Den varme der strømmer ind i et system er lig med forøgelsen af systemets indre energimængde fratrukket det arbejde, der udføres af systemet. Energien kan altså omdannes fra én form til en anden, men kan ikke skabes eller ødelægges<sup>2</sup>.

Termodynamikkens anden lov fortæller at al energi kan omdannes til varme men ikke omvendt. Det er umuligt at omdanne varme fuldstændig tilbage til den energiform den kom fra. Varmeenergi kan altså betragtes som energi af en lavere kvalitet.<sup>3</sup>

Varmeledning foregår i alle materialer og gasser (legemer), og er drevet af temperaturdifferencen mellem to områder i legemet. Ledningen foregår indtil de to områder har opnået samme temperatur. Retningen af varmeledningen kan kun foregå fra det varme område mod det kolde område.

Ledningen sker ved flere processer. Den mest almindelige er på det atomare niveau. Her har atomerne i det varme område en større kinetisk energi end atomerne i de kolde områder. Atomerne støder ind i naboatomet og derved overføres kinetisk energi atomerne imellem. Atomerne bevæger sig ikke rundt i materialet, men deres energi gør.

En mere effektiv ledning, der især foregår i metaller, er hvor elektronerne forlader deres atomkerne og vandrer gennem metallet. Denne energioverførsel er meget effektiv og metaller er derfor meget velegnede som varmeledere. Det er bedst illustreret ved, at et stykke metal føles koldere end et

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Schmidt F.W., 1993 kapitel 4

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Schmidt F.W., 1993 kapitel 4

stykke træ, selvom de har samme temperaturer. Dette skyldes metallets meget bedre varmeledningsevne, der leder varmen væk fra huden mere effektivt end træet gør.

Nedenstående figur viser et varmeledende materiale med tværsnitsarealet A, hvor enderne har temperaturerne  $T_1$  og  $T_2$ . Materialet tænkes omkranset af en adiabatisk grænseflade, så der ikke forekommer varmetab ud af siderne.



figur 2. Varmstrøm gennem materiale med adiabatisk grænseflade

Når en mængde varme, dQ, ledes gennem materialet til tiden dt, fås varmestrømmen,  $\Phi$ , betegnet ved

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \tag{0.5}$$

#### **Fouriers lov**

Hvis legemet er en tynd homogen plade eller et legeme med konstant tykkelse og uendelig udbredelse kan varmestrømstætheden *q* bestemmes ved hjælp af Fouriers lov. Den blev formuleret af den franske fysiker Joseph Fourier og er givet ved

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \tag{0.6}$$

Hvor dQ er den varmemængde, der inden for tidsrummet dt, strømmer gennem arealet af pladen med tykkelsen dx ved en temperaturforskel dT.

Matematisk kan udtrykket også omformes til varmeledningsligningen<sup>4</sup>, hvor densiteten og materialets specifikke varmekapacitet indgår.

$$\nabla^2 T = -\frac{\rho c_v}{\lambda} \frac{dT}{dt} \tag{0.7}$$

Hvis varmestrømmen er stationær, er temperaturen et givent sted i materialet kun bestemt af de rumlige koordinater. Herved er  $\nabla^2$  bestemt som

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$
(0.8)

4

http://www.denstoredanske.dk/It, teknik\_og\_naturvidenskab/Fysik/Udbredelse, ledning, k%C3%B8ling\_og\_o pvarmning/Fouriers\_lov - 10. november 2010

Ligning (0.8) er betegnet Laplace-ligningen og  $\nabla^2$  er kendt som Laplace-operatoren<sup>5</sup>. Denne er meget brugbar når varmestrømmen skal behandles i tre dimensioner. Laplace-operatoren vil dog ikke blive uddybet yderligere i denne rapport, da fokus her vil være på den en-dimensionale varmestrøm, der som forklaret senere er tilstrækkelig til at beskrive de tilfælde, denne rapport behandler.

## Endimensionel stationær varmestrøm gennem homogent lag

I alle materialer vil varmestrømmen foregå i de tre rumlige dimensioner,(x,y, z). I et homogent materiale med uendelig udstrækning vil varmestrømmen være endimensional vinkelret på fladens overflade.

Varmestrømmen gennem et homogent lag, er som al anden varmestrøm drevet af temperaturforskellene på hver side af materialet. Ved en stationær strømning vil temperaturen ikke udjævnes da varmen blot forsvinder når den er strømmet ud gennem materialet, og varmestrømmen er dermed konstant i alle punkter i materialet vinkelret på overfladen. Denne antagelse er kun mulig, da der ikke ophobes eller afgives energi i bygningsdelen.



Varmestrømmen  $\Phi$ , gennem et homogent lag med fladearealet A og varmestrømstætheden q er

$$\Phi = q \cdot A \tag{0.9}$$

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Schmidt, F.W., 1993 s. 299

Varmestrømstætheden bestemmes som tidligere vist af Fouriers lov (0.6), der for en endimensionel, stationær strømning kan reduceres til

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \tag{0.10}$$

hvor  $\lambda$  er varmeledningsevnen W/(m·K), T er temperaturen i kelvin og dx er afstanden fra den ene overflade og ind i materialet

Fouriers lov fortæller, at varmestrømstætheden *q* gennem en plade er proportional med temperaturforskellen og omvendt proportional med pladens tykkelse. Proportionalitetsfaktoren afhænger af materialets termiske egenskaber.

Varmeledningsevnen er en materialeegenskab, der er defineret som mængden af varme Q, overført per tidsenhed t over afstanden L, i retningen vinkelret på tværsnitsarealet A under en stationær temperaturbetragtning. Varmeledningsevnen er teoretisk kun forstået til bunds i gasser ved lave temperaturer, hvor sammenhængen mellem gassens egenskaber og dets varmeledningsevne er givet af

$$\lambda = \frac{a \cdot v \cdot C_v}{M} \tag{0.11}$$

hvor v er mediets viskositet, Cv er den molære varmekapacitet, M er molekylemassen og a er en konstant med værdien a = 2,5.

Dette hører under den kinetiske gas-teori og vil ikke blive behandlet yderligere.

For de fleste materialer gælder, at  $\lambda$ -værdinen skal findes eksperimentelt. Varmeledningsevnen er oftest temperatur- og fugtafhængig, og man operere derfor med en deklareret værdi og en designværdi.

Sammenkoblingen af varmeledningsevnen og tykkelsen giver materialets isolans bestemt ved

$$R = \frac{d}{\lambda} \tag{0.12}$$

Temperaturvariationen gennem væggen kan bestemmes ved omskrivelse af udtrykket (0.10)

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{q}{\lambda} \tag{0.13}$$

Desuden ses det at for den endimensionale varmestrømning er varmestrømstætheden *q* konstant gennem hele væggen, og altså uafhængig af x. Kun i specielle tilfælde ændrer *q* sig i strømningsretningen. For eksempel afgiver beton varme når det hærder og derved vil der ske en temperaturtilvækst inde i væggen.

Ved at integrere (0.13) og indsætte T =  $T_{si}$  som randbetingelse for x = 0 fås

$$T = -\frac{q}{\lambda}x + T_{si} \tag{0.14}$$

Ved at indsætte den anden randbetingelse T =  $T_{se}$  for x = d fås

$$T_{se} = -\frac{q}{\lambda}d + T_{si} \tag{0.15}$$

Varmestrømstætheden kan da bestemmes som

$$q = \lambda \frac{T_{si} - T_{se}}{d} \tag{0.16}$$

Ved at indsætte isolansen for et homogent materiale  $R = \frac{d}{\lambda}$  er q givet ved

$$q = \frac{T_{si} - T_{se}}{R_m} \tag{0.17}$$

Hvor  $T_{si}$  og  $T_{se}$  er overfladetemperaturen på hver side af materialet.

Ved at udnytte at temperaturen aftager lineært gennem det homogene materiale kan temperaturen i et bestemt punkt i materialet bestemmes

$$\Delta T_x = R_x \cdot \frac{T_{si} - T_{se}}{R} \tag{0.18}$$

#### 7.2. Konvektion

Konvektion er varmeledning ved hjælp af bevægelse af en masse af en luftart eller væske, fra et område til et andet. Konvektion opdeles i tvungen konvektion, der er drevet af f.eks. pumper eller ventilation, og naturlig konvektion hvor fluidets bevægelse sker på baggrund af ændringen i densiteten som følge af temperaturforskelle over for eksempel et hulrum. Når fluidet bliver varmere, bliver det lettere og dermed falder dets densitet og det stiger til vejrs. Koldere fluid strømmer til, og der starter et kredsløb, der optager varme fra den varme side og overfører det til den kolde. Den effekt der overføres via den naturlige konvektion afhænger blandt andet af temperaturforskellen mellem siderne, fluidets fysiske egenskaber og hulrummets geometri.

I selve det varmebærende fluid, hvad enten konvektionen er tvungen eller naturlig foregår der samtidig en varmestrømning ved ledning. Denne ledning er dog oftest meget lille i forhold til bidraget fra selve konvektionen, og er altid indregnet heri.

Alle forhold vedrørende konvektionens størrelse er samlet i faktoren det konvektive varmeovergangstal,  $h_k$ .

Den samlede isolans som konvektionen bidrager med er givet ved

$$R = \frac{1}{h_k} \tag{0.19}$$

Det konvektive varmeovergangstal er meget vanskeligt at finde, da det hverken kan udledes teoretisk eller bestemmes ved hjælp af computersimuleringer (CFD, Computational Fluid Dynamics). Derfor baserer man sig på eksperimentelt bestemte resultater, der ved indsættelse i nogle empiriske fundne formeludtryk kan give et bud på konvektionen for en række typiske tilfælde.

Herunder er givet en gennemgang af de benyttede modeltal der gælder for tvungen, såvel som naturlig konvektion.

#### **Reynolds tal**

Reynolds tal benyttes til at bestemme om en strømning er laminar eller turbulent. Tallet afhænger af fluidets hastighed, samt dets viskositet. Jo mere tyktflydende fluidet er, jo vanskeligere har det ved at blive en turbulent strømning. Desuden har den omkringliggende geometri også en betydning for tallets størrelse.

Med fluidets hastighed bestemt ved u (m/s) en karakteristisk længde L (m) og fluidets kinematiske viskositet betegnet med v m<sup>2</sup>/s er Reynolds tal givet ved det dimensionsløse tal

$$\operatorname{Re} = \frac{u \cdot L}{v} \tag{0.20}$$

Den karakteristiske længde afhænger af hvilken geometri strømningen er omgivet af. For strømninger over en plade benyttes pladens længde som den karakteristiske længde, mens der for strømninger i cylindriske rør benyttes rørets diameter, hvor hastigheden er strømningens middelhastighed over rørets tværsnit. For strømning over en plade ligger overgangen mellem laminar og turbulent strømning når Re er mellem 300.000 og 500.000 mens det i cylindriske rør gælder at strømningen er turbulent når Re er større end 2300.

Et fluids kinematiske viskositet er givet ved dets dynamiske viskositet  $\eta$  over dets massefylde  $\rho$ 

$$v = \frac{\eta}{\rho} \tag{0.21}$$

#### Nusselt-tallet

En anden dimensionsløs størrelse, Nusselt-tallet, introduceres i beregningerne. Denne skal opfattes som et generelt dimensionsløst overgangstal, hvori den omkringliggende geometri og fluidets egenskaber indgår i form af det konvektive varmeovergangstal.

$$Nu = \frac{h_k \cdot L}{\lambda} \tag{0.22}$$

hvor  $\lambda$  er fluidets stillestående varmeledningsevne i  $W/(m^2 \cdot K)$ 

Det ses at når Nusselt-tallet er kendt, kan det konvektive varmeovergangstal bestemmes og dermed konvektions-isolansen.

Ved benyttelse af Nusselt-tallet, er det vigtigt at være opmærksom på, om tallet angiver den lokale værdi ét bestemt sted på fladen, eller om der er tale om en gennemsnitlig værdi for hele fladen. Hvis der henvises til ét bestemt punkt x, benyttes oftest  $Nu_x$ , mens hvis der er tale om middelværdien for hele fladen benyttes  $\overline{Nu}$ .

For typisk forekommende geometriske tilfælde findes der erfaringsmæssige formeludtryk til bestemmelse af Nusselt-tallet. I denne rapport tages der dog kun udgangspunkt i Nusselt-tallet for den naturlige konvektion mellem to tætliggende flader, og derfor vil Nusselt-tallet kun blive beskrevet med hensyn til denne geometri. For yderligere gennemgang af Nusselt-tallet for andre geometrier henvises til undervisningsnotat '*Varmetransmission*<sup>-6</sup>

For at finde Nusselt-tallet er det nødvendigt at introducerer endnu nogle dimensionsløse størrelser:

## Prandtl-tallet

Prandtl-tallet angiver et fluids evne til at overføre bevægelse gennem sig ved viskose kræfter i forhold til dets evne til at overføre en varmestrøm ved ledning.

$$\Pr = \frac{v}{a} \tag{0.23}$$

Hvor a er den termiske diffusivitet bestemt ved

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \tag{0.24}$$

Her er  $\rho$  massefylde, kg/m<sup>3</sup> og c<sub>p</sub> er fluidets massespecifikke varmekapacitet, J/(kg · K)

Prandtl-tallet er for vand og andre flydende væsker meget temperaturafhængigt, mens det for luft og andre gasser ligger omkring 0,7 uanset temperaturen.

## Dimensionsløse størrelser ved naturlig konvektion

Ved naturlig konvektion er der yderligere et par størrelser, der skal gennemgås før det er muligt at bestemme Nusselt-tallet.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Vej-Hansen, C.og Rode, C., 2010

#### Grashof-tallet

Ved naturlig konvektion har opdriftskræfterne i fluidet stor indflydelse på mængden af varme overført ved konvektion. Dette skal ses i forhold til de viskose kræfter i fluidet, og dermed introduceres Grashof-tallet Gr

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{v^2}$$
(0.25)

hvor g er tyngdeaccelerationen, m/s<sup>2</sup> og  $\beta$  er den termiske udvidelseskoefficient, K<sup>-1</sup>.

Den termiske udvidelseskoefficient kan for idealgasser bestemmes som

$$\beta = T^{-1} \tag{0.26}$$

For ikke idealgasser henvises til tabelværdier.

#### **Rayleigh-tallet**

Rayleigh-tallet Ra er produktet af de to dimensionsløse tal Prandtl-tallet og Grashof-tallet.

$$Ra = Gr \cdot \Pr \tag{0.27}$$

I hulrum i mure og vinduer, antages der kun at forekomme naturlig konvektion. I sådanne tilfælde er den føromtalte karakteristiske længde, L, afstanden mellem de to flader og H er længden eller højden af fladerne.

I tilfælde hvor hulrummet står lodret og Rayleigh-tallet ligger i intervallet  $10^3 - 10^7$ , bestemmes Nusselt-tallet som

$$\overline{Nu_{L,90^{\circ}}} = max \begin{cases} 0,0605 \cdot Ra_{L}^{\frac{1}{3}} \\ \left(1 + \left(\frac{0,104 \cdot Ra_{L}^{0,293}}{1 + \left(\frac{6310}{Ra_{L}}\right)^{1,36}}\right)^{3}\right)^{\frac{1}{3}} \\ 0,242 \cdot \left(\frac{Ra_{L}}{\frac{H}{L}}\right)^{0,272} \end{cases}$$
(0.28)

For Ra<sub>L</sub> < 10<sup>3</sup> er den naturlige konvektion så lille at der ses bort fra denne, og der regnes derfor kun med ledning i fluidet. Dette betyder at konvektionsisolansen vokser betragteligt for luftspalten, og det er derfor hensigtsmæssigt at udforme luftspalterne således at Rayleigh-tallet holdes nede omkring de Ra = 1000. Der er dog tale om en balancegang. For hvis konvektionen er ikke eksisterende er det en fordel at gøre afstanden mellem fladerne i hulrummet så stor som muligt for derved at få en større 'tykkelse' og udnytte stillestående lufts fremragende isoleringsevne. Ved stigende afstand mellem fladerne følger stigende konvektion og på et tidspunkt vil denne varmetransmission overstige den opnåede 'besparelse' fra ledningen. Den optimale afstand mellem fladerne i den henseende afhænger af de aktuelle fladetemperaturer, samt af overfladeegenskaberne, da strålingsisolansen også vil påvirke resultatet.

Hvis hulrummet har en hældning, som for eksempel hulrummet i et tagvindue benyttes nedenstående, hvis vinklen er 60°.

$$\overline{Nu_{L,60^{\circ}}} = \max\left\{ \left( 1 + \left( \frac{0,0936 \cdot Ra_{L}^{0,314}}{1 + \frac{0,5}{\left(1 + \left(\frac{Ra_{L}}{3160}\right)^{20,6}\right)^{0,1}}} \right)^{7} \right)^{\frac{1}{7}} \right.$$

$$\left( 0.29 \right) \\ \left( 0,104 + \frac{0,175}{\frac{H}{L}} \right) Ra_{L}^{0,283}$$

For hældninger mellem 60° og 90° interpoleres mellem de to udtryk (0.28) og (0.29)

For hældninger  $\theta$  mellem 0° og 60° i forhold til vandret benyttes

$$\overline{Nu_{L,\theta<60^{\circ}}} = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708}{Ra_{L} \cdot \cos(\theta)}\right) \left(1 - \frac{1708(\sin(1,80\cdot\theta))^{1,6}}{Ra_{L} \cdot \cos(\theta)}\right) + \left(\left(\frac{Ra_{L}\cos(\theta)}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right) \quad (0.30)$$

I tilfælde af negative led i parenteserne i (0.30) erstattes disse med tallet 0. Udtrykket gælder kun for  $Ra < 10^5$  og kun i tilfælde hvor den nedre flade er varmere end den øvre.

For den aktuelle geometri bestemmes det konvektive overgangstal af (0.22)

$$Nu = \frac{h_k \cdot L}{\lambda} \ll h_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \tag{0.31}$$

Hvilket, som tidligere vist, resulterer i en isolans for hulrummet på

$$R = \frac{1}{h_k} \tag{0.32}$$

## 7.3. Stråling

Den tredje måde, der kan foregå varmeoverførsel ved, er varmestråling. I modsætning til de to andre varmeoverførende mekanismer, behøver varmestråling ikke et medie at bevæge sig i. Faktisk overføres varmestrålingen bedst i vakuum, hvor der ikke noget stof til at absorbere strålingen.

Varmestråling er elektromagnetiske bølger i intervallet 0,1 μm – 100 μm<sup>7</sup>. Ved at kaste et kig i figur 4 ses det da, at varmestråling består af strålingstyperne ultraviolet stråling, synligt lys og infrarød stråling.



figur 4. Stråling og dets bølgelængder angivet i m. Rode, C. Varmetransmission

Alle legemer med en temperatur over 0 K udsender stråling. Effekten af denne stråling afhænger af legemets temperatur, samt dets overfladeegenskaber. Overfladeegenskaben beskrives med emissiviteten, der ligger i intervallet mellem 0 og 1. Et absolut sort legeme har emissiviteten 1 og udstrålingen fra dette afhænger derfor udelukkende af temperaturen. For et absolut sort legeme er sammenhængen mellem udstrålingseffekten og den absolutte temperatur følgende

$$E_s = \sigma_s \cdot T^4 \tag{0.33}$$

Hvor  $E_s$  er det sorte legemes egenstråling i W/m<sup>2</sup> og  $\sigma_s$  er Stefan-Boltzmann konstant = 5,6697 · 10^-8 W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Varmtransmission, Rode, C. 2010 s. 56

Men ikke kun strålingsintensiteten ændrer sig ved ændrede temperaturer. Strålingens bølgelængde forskydes også. Dette illustreres bedst ved at betragte et stykke metal der opvarmes. På et tidspunkt vil det blive rødglødende, da bølgelængden kommer ind i det synlige område. Ved yderligere opvarmning vil den ende med at udsende hvidt lys. Bølgelængden har altså forskudt sig fra en højere bølgelængde i det røde spektrum til en lavere bølgelængde i det hvide område jævnfør figur 4.

Dette kan fysisk beskrives ved Wiens forskydningslov

## Wiens Forskydningslov

Intensiteten af udstrålingen fra et givent legeme ændrer sig ved ændrede bølgelængder. Bølgelængden afhænger af temperaturen, og den bølgelængde hvor den maksimale strålingsintensitet forekommer ved en given temperatur er givet ved Wiens forskydningslov

$$\lambda_{\max} = \frac{0,002897K}{T} \tag{0.34}$$

#### **Plancks lov**

Strålingsintensiteten fra et sort legeme, som funktion af temperaturen og bølgelængden er givet ved Plancks lov

$$E_{s,\lambda} = \frac{3,742 \cdot 10^8 Wmm^4 / m^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{1,439 \cdot 104 mmK}{\lambda \cdot T}} - 1\right)}$$
(0.35)

Plancks lov har enheden W/m<sup>3</sup>. Sammenhængen mellem strålingsintensiteten og bølgelængden ved forskellige temperaturer kan ses i figur 5.



figur 5. Sammenhængen mellem strålingsintensiteten og bølgelænden. Rode, C. Varmetransmission

Stråling, der rammer et legeme, vil blive absorberet, reflekteret og/eller transmitteret igennem. Oftest sker en kombination af flere ting, og mængden af de enkelte dele afhænger af materialets struktur og egenskaber.

Evnen til at absorbere stråling kaldes absorptansen  $\alpha$ . Absorptansen er evnen til at forvandle den indkomne strålingsenergi til varmeenergi.

Reflektansen ρ, er den andel af den indstrålede energi, der tilbagekastes fra legemets overflade. Transmittansen t er den del af strålingen der transmitteres gennem legemet. Dette giver anledning til udtrykkene

$$\alpha = \frac{\text{absorberede strålig}}{\text{indfaldne stråling}}$$
(0.36)

$$\rho = \frac{\text{reflekterede stråling}}{\text{indfaldne stråling}}$$
(0.37)

$$\tau = \frac{\text{transmitterede stråling}}{\text{indfaldne stråling}}$$
(0.38)

Summen af absorptans, reflektans og transmittans er lig den indkomne stråling, altså 1.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{0.39}$$



figur 6. Reflektans, tranismittans og absorptans

Det skal dog bemærkes at farvede materialers absorptans afhænger af den spektrale sammensætning (sammensætningen af bølgelængderne) af det indfaldne lys. Er dette tilfælde angives den *spektrale absorptans*.

I de fleste tilfælde er kun to af faktorerne gældende. Eksempelvis vil transmittansen gennem en træplade være lig 0 således at udtrykket her bliver

$$\alpha + \rho = 1 \tag{0.40}$$

Og i luft, hvor reflektansen er lig 0, fås

$$\alpha + \tau = 1 \tag{0.41}$$

Emissiviteten er legemets evne til at omdanne varmeenergi til strålingsenergi. Dette kan også beskrives ved forholdet mellem udstrålingseffekten fra et vilkårligt legeme og et absolut sort legeme. Så jo højere emissivitet, jo større del af varmen vil blive omsat til strålingsenergi og stråle væk fra legemet.

Retningen af udstrålingen har stor indflydelse på den indbyrdes overførsel af energi ved stråling. Derfor introduceres vinkelforholdet. Det angiver forholdet mellem den energimængde, der udstråles fra den ene flade (A1) til den anden (A2), og den samlede energimængde, der udstråles mod en enhedshalvkugle over A1, med denne i centrum af halvcirklen. Begge overflader regnes som diffuse og med en uendelig lille størrelse.

Da vinkelforholdet er meget kompliceret at beregne, er der udviklet forskellige vinkelforholdsdiagrammer, hvori vinkelforholdet kan aflæses. Dette kræver at arealerne af de enkelte flader er kendt, samt deres placering i forhold til hinanden.



figur 7. Vinkelforholdet fra et fladeelement til et dermed parallelt rektangel. Rode, C. Varmetransmission

Strålingsudvekslingen mellem to vilkårlige flader er givet ved

$$F_{1-2} \cdot A_1 = F_{2-1} \cdot A_2 \tag{0.42}$$

hvor  $F_{1-2}$  er vinkelforholdet fra flade 1 til flade 2 og  $F_{2-1}$  er vinkelforholdet fra flade 2 til flade 1, og  $A_1$  og  $A_2$  er de to fladers arealer.

Hvis begge ovenstående flader anses som sorte og  $T_1$  og  $T_2$  angiver fladernes overflade temperatur, er den resulterende varmestråling mellem flade 1 og 2 givet ved

$$\Phi_{1-2} = F_{1-2} \cdot A_1 \cdot \sigma_s (T_1^4 - T_2^4) \tag{0.43}$$

#### Strålingsudveksling mellem grå overflader

Som tidligere beskrevet, er emissiviteten forholdet mellem udstrålingseffekten fra et vilkårligt legeme og fra et absolut sort legeme

$$\varepsilon = \frac{E}{E_s} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\sigma_s \cdot T^4} = \frac{\sigma}{\sigma_s}$$
(0.44)

For grå overflader gælder der, at de udover at absorbere stråling også reflektere en del af strålingen diffust. Da der for grå overflader gælder at emissiviteten er tæt på 1, og der dermed er en begrænset refleksion, kan der ses bort fra absorptionen af den reflekterede stråling fra den anden flade. Herved

kan den resulterende strålingsudveksling mellem to grå overflader kaldet flade 1 og flade 2 opskrives på formen

$$\Phi_{1-2} = F_{1-2} \cdot A_1 \cdot \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_s} (T_1^4 - T_2^4)$$
(0.45)

Hvor arealerne og temperaturerne af de to overflader er henholdsvis A<sub>1</sub>, T<sub>1</sub> og A<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>.

Byggematerialer kan overfor langbølget stråling, (varmestråling) almindeligvis betragtes som grå legemer med en emissivitet  $\varepsilon$  = 0,9 og en reflektans  $\rho$  = 0,10.

Overfor kortbølget stråling kan ovenstående tommelfingerregel ikke benyttes da reflektansen her varierer fra 0,05 til 0,9. Kortbølget stråling stammer først og fremmest fra solstråling og har derfor ikke relevans i forhold til varmestråling og isoleringsevne i hulrum<sup>8</sup>.

#### Strålingsisolans

Ligesom for konvektion og ledning, findes også en isolans for strålingsbidragene mellem de forskellige flader. Udtrykkene afhænger af om fladerne er sorte eller grå. Desuden er listet et udtryk i tilfælde af vilkårlige overflader

Herunder er vist udtrykkene for strålingsisolansen mellem forskellige overflader

Strålingsisolans mellem to sorte overflader

$$R_{s,1-2} = A_1 \frac{T_1 - T_2}{F_{1-2} \cdot A_1 \cdot \sigma_s \cdot (T_1^4 - T_2^4)} = \frac{T_1 - T_2}{F_{1-2} \cdot \sigma_s \cdot (T_1^4 - T_2^4)}$$
(0.46)

Strålingsisolans mellem to grå overflader

$$R_{s,1-2} = A_1 \frac{T_1 - T_2 - 2}{F_{1-2} \cdot A_1 \cdot \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_s} \cdot (T_1^4 - T_2^4)} = \frac{T_1 - T_2}{F_{1-2} \cdot \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_s} \cdot (T_1^4 - T_2^4)}$$
(0.47)

Strålingsisolans mellem vilkårlige overflader

$$R_{s,1-2} = A_1 \frac{T_1 - T_2}{F_{1-2} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma_s \cdot (T_1^4 - T_2^4)} = \frac{T_1 - T_2}{F_{1-2} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma_s \cdot (T_1^4 - T_2^4)}$$
(0.48)

For alle ovenstående tilfælde gælder at vinkelforholdet skal kendes for at kunne beregne udtrykkende.

Hvis den eksakte værdi for varmestrømmen  $\Phi_s$  også kaldet strålingsudvekslingen er kendt kan strålingisolansen bestemmes af nedenstående sammenhæng

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Varmetransmission, Rode, C. 2010

$$\Phi_{1-2} = \frac{A_1(T_1 - T_2)}{R_{s,1-2}} \tag{0.49}$$

Dette giver en strålingsisolans på

$$R_{s,1-2} = \frac{A_1(T_1 - T_2)}{\Phi_{1-2}} \tag{0.50}$$

Den resulterende strålingsudvekslingen mellem to legemer kan i specielle tilfælde opskrives som

$$\Phi_{1-2} = \frac{A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma_s}\right)}$$
(0.51)

Denne sammenhæng gælder når det antages at al stråling udgående fra flade 1 netop også vil ramme flade 2. Dette gælder for eksempel ved udstrålingen fra et legeme omkranset af et andet legeme som illustreret i figur 8.



figur 8. Strålingsudveksling mellem et konvekst legeme 1 og en konkavt legeme 2.

Dette gælder også i tilfælde hvor fladerne er tætliggende parallelle og der gælder at  $A_1 \cong A_2$ '. Her simplificeres (0.51) til

$$\Phi_{1-2} = \frac{A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma_s}}$$
(0.52)

For at finde den samlede strålingsisolans R<sub>1</sub> fra flade 1 til de omkringliggende flader, er det nødvendigt at summere de enkelte strålingsmodstande på samme måde som ved parallelkoblede modstande.

$$R_{s} = \left(\sum_{j=2}^{n} \frac{1}{R_{s,j-1}}\right)$$
(0.53)

Teorien bag de tre varmetransmissionsmekanismer er nu gennemgået, og udtrykkene for deres isolanser er angivet. Tilslut introduceres overgangsisolanserne, der gør sig gældende i overgangen mellem inder- og ydersiden af konstruktionen til den omkringliggende luft.

#### Overgangsisolanser

Medregnet i den totale isolans af en konstruktionsdel hører overgangsisolanserne. I henhold til udtryk (0.17) angiver T<sub>si</sub> og T<sub>se</sub> temperaturerne af de to overflader af væggen, og altså ikke luftens temperatur. Hvis overfladerne og luften havde samme temperatur, ville der ikke være den fornødne drivkraft for varmeoverførsel mellem lagene. Den varme indeluft vil afgive varme til den lidt koldere inderside af væggen. I takt med varmeafgivelsen til væggen vil luften afkøles og synke ned, mens ny varm luft vil komme til og afgive ny varme. Væggens inderside vil samtidig afgive varmestråling til rummets andre vægge, men vil modtage en større mængde stråling, da de andre vægge er varmere og dermed afgiver mere stråling. Der vil altså være en resulterende varmetransport ud gennem væggen.

Disse effektoverførsler kan beskrives på formen for henholdsvis den indvendige og udvendige overgang

$$q = h_i \left( T_i - T_{si} \right) = \frac{T_i - T_{si}}{R_{si}}$$
(0.54)

$$q = h_e \left( T_{se} - T_e \right) = \frac{T_{se} - T_e}{R_{se}}$$
(0.55)

Hvor *h* er varmeovergangskoefficienten, W/(m<sup>2</sup>·K), R er overgangsisolans (m<sup>2</sup>·K)/W også givet ved R =  $h^{-1}$ 

Ved at løse (0.54), (0.55) og (0.17) med hensyn til højresiderne fås

$$T_i - T_e = q \left( R_m + R_{si} + R_{se} \right) \Longrightarrow q = \frac{T_i - T_e}{R_{si} + R_m + R_{se}}$$
(0.56)

Hvor R<sub>si</sub> og R<sub>se</sub> er henholdsvis den indvendige og udvendige overgangsisolans

Overgangsisolanserne er, som navnet antyder, den isolans som overgangen mellem den inderste og yderste konstruktionsdel til den omgivende indendørs og udendørs luft yder. Overgangsisolanserne er, da de foregår i luft, sammensat af alle tre varmetransmissionsmekanismer. Men da ledningen er

medregnet i konvektionens størrelse, er der herved tale om en parallelkobling og den udvendige overgangsisolans er da givet ved

$$R_{si} = \frac{1}{\frac{1}{R_{si,s}} + \frac{1}{R_{si,k}}}$$
(0.57)

Disse beregninger er dog relativt omfattende, og da overgangsisolanserne kun udgør en mindre del af den samlede isolans, er det mere hensigtsmæssigt at benytte de tabelværdier, angivet i tabel 1.

Strømretning	opad	vandret	nedad		
R <sub>si</sub>	0,10	0,13	0,17		
R <sub>se</sub>	0,04	0,04	0,04		
tabel 1. Overgangsisolanser <sup>9</sup>					

Den primære årsag til at den udvendige overgangsisolans er så lille i forhold til den indvendige, er fordi det udendørs klima let får blæst varmen væk fra ydersiden af væggen.

Overgangsisolanserne adderes på konstruktionens samlede R-værdi som serieforbundne værdier, og bygningsdelens samlede isolans er da

$$R_{tot} = \sum R_m + R_{si} + R_{se} \tag{0.58}$$

## 7.4. Fugt

Fugtforholdene i bygninger og bygningskonstruktioner har stor indflydelse på isoleringsevne, levetid og indeklimaet. Derfor udgør viden om fugt en vigtig bestanddel i udførslen af nye bygninger og isoleringsmaterialer.

Nedenfor er listet nogle af de problemer et højt fugtindhold giver forskellige byggematerialer

- Skimmelsvamp kan opstå i byggematerialer, blandt andet mange isoleringstyper.
- Stål uden korrosionsbeskyttelse ruster
- Beton, tegl og andre stenprodukter tåler at blive helt vandmættede. I kombination med frostvejr er der dog risiko for frostsprængninger. Desuden kan et højt fugtindhold føre til krystallisering af salte til stor skade for armeringen samt fører til alkali-kisel reaktioner<sup>10</sup> i betonen
- Materialer ændrer dimension. Især træ er sårbart over for dette.
- Den biologiske nedbrydning af især træ foregår hurtigere ved højere fugtindhold
- Nogle limsamlinger tåler ikke høje fugtbelastninger
- Forringelse af isoleringsevnen for visse isoleringsmaterialer
- Dårligere indeklima

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Tabelværdier angivet efter Dansk Standard, DS418

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Ekspansive kemiske reaktioner, der kan forekomme i beton, der indeholder amorf kisel (SiO2) og alkaliholdig væske.

Vanddampsdiffusionen gennem en væg kan beregnes med Glasers beregningsmetode. Denne er velegnet, da den let kan kombineres med de isolans- og temperaturberegninger den øvrige teori lægger op til. Da temperaturen spiller en stor rolle for de aktuelle fugtforhold, tages der udgangspunkt i temperaturudviklingen gennem væggen. Hertil tilføjes der data vedrørende damppermeabilitet  $\delta$  og/eller diffusionsmodstand Z

Et materiales modstand mod fugt kan betegnes med både damppermeabilitet og diffusionsmodstand. Sammenhængen er bestemt af

$$Z = \frac{d}{\delta}$$
(0.59)

hvor d er tykkelsen af materialet.

Mætningsdamptrykket for hvert lag bestemmes på baggrund af den fundne temperatur. Enten ved hjælp af en mætningsdamptrykstabel<sup>11</sup>, men kan også beregnes ved nedenstående udtryk<sup>12</sup>

$$P_s = e^{\left(23,5771 - \frac{4042.9}{\theta + 235,57}\right)} \tag{0.60}$$

hvor  $P_s$  er vanddamps partialtryk ved mætning og  $\theta$  er temperaturen i grader celsius. Udtrykket har en afvigelse på 0,15 % i intervallet fra 0 – 80 °C.

Damptryksforholdene i væggen beregnes stort set efter samme metode som temperaturberegningen. Den samlede diffusionsmodstand bestemmes, og denne benyttes derved til at beregne damptryksfaldet i de enkelte lag.

$$\Delta \rho = \frac{Z}{\sum Z} \left( \rho_{ude} - \rho_{inde} \right) \tag{0.61}$$

Damptryksfaldende kan da summeres op på samme måde som temperaturerne for at finde det aktuelle damptryk i et givent lag. Hvis damptrykket overstiger mætningsdamptrykket i beregningerne, vil der ske kondensation i lagovergangen. Et højere damptryk end mætningsdamptrykket er selvfølgelig ikke fysisk muligt. Dermed skal beregningerne udføres på ny, med den nye forudsætning, at den relative luftfugtighed sættes til 100 % i den laggrænse hvor der i første omgang blev fundet kondens. Damptrykket sættes altså lig med mætningsdamptrykket, og der udregnes på ny damptryksfordelingen. Denne gang udføres beregningen med udgangspunkt i kondensområdet og ud til begge sider i væggen proportionalt med lagenes diffusionsmodstande.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Fugttransport, Rode, C. 1998

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> DANVAK, Appendiks A.05.01 s. 504

# 7.5. Teori - Opbygning af Excel-ark

Den føromtalte teori er blevet omsat til et excel-regneark, der er i stand til at udregne den præcise varmestrømstæthed gennem forskellige vægkonstruktioner. Dette afsnit indeholder en beskrivelse af og eksempler på hvorledes disse udregninger er udført i Excel-dokumentet.

I henhold til det teoretiske afsnit introduceres visse rimelige antagelser.

- Varmestrømmen antages at være endimensional gennem hele væggen
- Konstruktionen består kun af lette materialer, og der ophobes ingen varmeenergi i de enkelte dele. Varmestrømmen er altså stationær.
- Ved beregningen af varmestrømstætheden gennem referencevæggen, antages hulrummet at være lukket, således at der kun forefindes naturlig konvektion. Hulrummene i de opstillede forsøg er ligeledes konstrueret således, at også her kun forefindes naturlig konvektion.
- De fysiske og termiske egenskaber for luften gælder kun for tør luft og i temperaturintervallet fra -100 til 100 °C.
- Fladerne på hver side af hulrummet er så nærliggende, at vinkelforholdet ingen betydning har.
- De faste materialer er homogene og deres varmeledningsevne er uafhængig af temperatur og fugtindhold
- Det enkelte faste parallelle homogene lag er i så tæt kontakt med hinanden, at der på hver side af grænsefladerne er den samme temperatur
- Luftens temperatur i hulrummene er ens i hele hulrummet.

Excelarket er opbygget således at de enkelte lag i væggen står i den første kolonne, mens beregningsværdierne befinder sig i de øvrige kolonner. På denne måde er det nemt og overskueligt at følge beregningerne af de forskellige parametre.

Dokumentet består af to regneark. Hoved-arket indeholder alle beregningerne vedrørende ledning, konvektion og stråling, mens det andet ark kaldet "data for tør luft", indeholder beregninger af luftens termiske og fysiske egenskaber.

De brugte data for luftens fysiske og termiske egenskaber er vist i nedenstående tabel, og er hentet i Danvak<sup>13</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Danvak 2006, appendiks A.00.04

		specifik			kinematisk	
temperatur	densitet	varmekapa.	varmeledningsevne	udvidelseskoefficient	viskositet	Prandts tal
t	р	C <sub>p</sub>	λ	β	ν	-
-100	2,046	1010	0,0158	5,82	5,7	0,748
-50	1,584	1007	0,02	4,51	9,2	0,731
0	1,293	1006	0,0241	3,67	13,3	0,715
20	1,205	1007	0,0257	3,43	15,1	0,71
40	1,127	1008	0,0273	3,2	16,9	0,705
60	1,06	1009	0,0288	3	18,9	0,701
80	1,00	1011	0,0303	2,83	20,9	0,696
100	0,946	1012	0,0317	2,68	23	0,693

tabel 2. Tør lufts termiske og fysiske egenskaber ved forskellige temperaturer.

I hovedarket er beregningerne delt op i de tre dele, der har indflydelse på varmestrømmen, nemlig ledning, konvektion og stråling.

Som bemærket er både strålingen og konvektionen temperaturafhængige. Strålingen og konvektionen er direkte afhængig af overfladetemperaturen af de to flader. Desuden vil luftens egenskaber i luftspalten ændrer sig tilsvarende ved skiftende temperaturer, så konvektionens størrelse er også indirekte temperaturafhængig.

I praksis benyttes den fundne temperaturfordeling i væggen, til på ny at beregne de temperaturafhængige variable igen. Dette udmønter sig i et sæt nye R-værdier, der angiver anledning til en ny temperaturfordeling i væggen. Denne proces gentages indtil U-værdien er konvergeret mod en konstant værdi.

U-værdien er altså baseret på et antal gennemregninger. Jo flere iterationer, jo mere præcist resultat. Stopkriteriet vælges på baggrund af den ønskede præcision. Da præcisionen af de udførte målinger hurtigt vil danne en begrænsning, skal præcisionen af beregningerne blot være mindst ligeså god.

En grafisk udformning af regneprocessen ses nedenfor i figur 9.



Figur 10

# 8. Regneeksempel

Regneeksemplet tager udgangspunkt i vores referencevæg, der er opbygget som vist i nedenstående figur 11.



figur 11. vandret snit af referencevæg

Væggen består udefra og ind af 12 mm, krydsfiner med brædder, 25 mm luftspalte, vindpap, 195 mm rockwool isolering, dampspærre og inderst en 9 mm krydsfinerplade.

De forestående beregninger på opstillingen udført i Excel-dokumentet, er ligeledes beregnet ved hjælp af Pc-programmet Heat2. Heat2 er i stand til at beregne varmestrømmen i 2 dimensioner, og er benyttet til at kontrollere resultaterne fra Excel-regnearket er korrekte. En mere fyldestgørende forklaring findes i afsnittet "Heat beregningsprogram".

## 8.1. Ledning

Isolansen i de faste materialer er bestemt som nedenstående. Der er benyttet de beregningsmæssige  $\lambda$ -værdier for de enkelte materialer. Varmeledningsevnen er ligeledes uafhængig af temperatur og fugtindhold<sup>14</sup>

 $\lambda\text{-}v\text{ardier}$  for de faste materialer er angivet nedenfor

Materiale	λ-værdi [W/(mK)]			
Yderplade, krydsfiner	0,13 <sup>15</sup>			
Rockwool A-murbatts	0,037 <sup>16</sup>			
Dampspærre	0,20 <sup>17</sup>			
Inderplade, krydsfiner	0,13			
tabal 2. Lawbda wandian fan da fasta watavialan				

tabel 3. Lambda-værdier for de faste materialer

Isolansen for de faste materialer hvor der kun regnes med ledning er fundet nedenfor.

Krydsfiner med brædder: 
$$R_{yderplade} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,012 \, m}{0,13W / (m \cdot K)} = 0,0923 \, (m^2 \cdot K) / W$$
 (0.62)

Rockwool, A-murbatts: 
$$R_{A-murbatts} = \frac{0,195 m}{0,037 W / (m \cdot K)} = 5,270 (m^2 \cdot K) / W$$
 (0.63)

Dampspærre

$$R_{dampspærre} = \frac{0,0002m}{0,2W/(m \cdot K)} = 0,001(m^2 \cdot K)/W$$
(0.64)

Krydsfinerplade:

$$R_{inderplade} = \frac{0,009\,m}{0,13W\,/\,(m\cdot K)} = 0,0692(m^2\cdot K)\,/\,W \tag{0.65}$$

## Første gennemregning

Ved første gennemregning benyttes de fysiske og termiske egenskaber for luft ved 0 grader. Desuden, ses der her bort fra konvektion og stråling og luften regnes derfor med en varmeledningsevne på 0,024 W/(m·K). Desuden er de faste materialers termiske egenskaber antages at være uafhængig af temperatur og fugtindhold<sup>18</sup>. Der regnes med en ude- og indetemperatur på 0 °C og 25 °C.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Dufour, J. og Rode, C. 2001

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>Varmeledningsevnen for krydsfiner med densiteten 500 kg/m3. BuildDesk U 3.2. 15. januar 2008 <sup>16</sup> <u>http://guiden.rockwool.dk/produkter/bygningsisolering/a-murbatts</u>

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Icopal håndbog 9, kapitel 11 (tabeller og diagrammer)

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> INDSÆT REFERENCE FOR FUGTINDHOLDETS MANGLENDE INDFLYDELSE PÅ ISOLERINGSEVNEN

Første gennemregning giver således anledning til en R-værdi for begge luftspalter på

$$R_{luftspalte} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0.025}{0.024} = 1.042(m^2 \cdot K) / W$$
(0.66)

Dette giver en samlet isolans for væggen på

$$R_{\text{samlet}} = 0,04 + 0,0923 + 1,042 + 5,270 + 0,001 + 0,0692 + 0,13 = 6,645(m^2 \cdot K)/W$$
(0.67)

Det er således muligt at beregne temperaturfordelingen i væggen. Som eksempel er nedenfor vist temperaturen i lag-grænsen mellem yderpladen og luftspalten.

Først beregnes temperaturfaldet gennem det givne lag. I dette tilfælde yderpladen af træ.

$$\Delta T_{lag} = \frac{R \cdot (T_{inde} - T_{ude})}{R_{tot}} = \frac{0.0923(m^2 \cdot K) / W \cdot (25^\circ C - 0^\circ C)}{6.645(m^2 \cdot K) / W} = 0.347^\circ C$$
(0.68)

Herefter summeres temperaturforskellen op med temperaturen i den tidligere lag-grænse således at temperaturen i grænselaget mellem yderste træplade og luftspalten er

$$T_{lag1-2} = T_{lag0-1} + \Delta T_{lag1} = 0,151^{\circ}C + 0,347^{\circ}C = 0,498^{\circ}C$$
(0.69)

tabel 4 viser temperaturudviklingen gennem væggen ved 1. gennemregning

		Temperaturfald	Temperatur gennem væggen	Temperatur gennem væggen	Middeltemperatur i laget
		ΔC	Т	Т	T <sub>luft</sub>
		°C	°C	К	°C
Udvendig	0,04	0,1505	0,00	273,15	
overgangsisolans			0,15	273,30	
Krydsfiner	0,092	0,35			
Riyüsinici			0,50	273,65	
Luftspalte	1,042	3,92			2 46
Europuite			4,42	277,57	2,40
∆-murhatts	5,270	19,83			
A marbatts			24,25	297,40	
Damnsnærre	0,001	0,004			
Dampspacific			24,25	297,40	
Krydsfiner	0,069	0,260			
Riyusiilei			24,51	297,66	
Indvendig	0,13	0,489			
overgangsisolans			25,00	298,15	

tabel 4. Første temperatur-gennemregning

Temperaturerne er angivet i grænsefladerne mellem de enkelte lag. For at bestemme luftens termiske egenskaber, samt konvektionens størrelse antages det at luftens temperatur i hulrummet er konstant i hele hulrummet. Denne er bestemt som middelværdien af de to overfladers temperatur.
### 8.2. Konvektion

Ved første gennemregning skønnes en varmeledningsevne i luftspalten til  $\lambda$  = 0,024 W/(m·K) Når en temperaturfordeling i væggen er defineret, beregnes luftens varmeledningsevne i luftspalten ved interpolation mellem værdierne for varmeledningsevnen mellem -100 og 100 grader hentet i data-arket "Data for tør luft".

$$\lambda = 0,00008 \cdot 2,46^{\circ}C + 0,0241 = 0,0243W / (m \cdot K)$$
(0.70)

Hvor 0,00008 og 0,0241 udgør værdierne a og b i den lineære interpolation mellem -100 og 100 °C.

Det er kun varmeledningsevnen der udvikler sig lineært efter temperaturen i hele intervallet -100 til + 100 °C, og dermed kun behøver ét beregningsudtryk i hele intervallet. For de resterende fysiske egenskaber er det nødvendigt at benytte lineær interpolation mellem de enkelte temperaturintervaller. Den udarbejdede beregningsmodel er i stand til, på baggrund af temperaturen i luftlaget, at benytte det korrekte udtryk.

Eneste værdi der ikke beregnes på denne måde er den specifikke varmekapacitet  $c_p$ , da der kun er 0,2 % forskel på værdien i intervallet fra 0 til 40 °C. Denne er således fastsat til 1006 J/(kg·K). Den termiske udvidelseskoefficient kan for idealgasser beregnes af udtrykket (0.26), men da luft ikke er en idealgas, interpoleres også her mellem værdierne i de respektive temperatur-intervaller.

tabel 5 viser de beregnede værdier benyttet for konvektionsberegningerne i luftspalten ved 1. gennemregning

Data for atmosfærisk luft	
Varmeledningsevne	$\lambda = 0,0243 W/(m \cdot K)$
kinematisk viskositet	$v = 13,52 \cdot 10^{-6} m^2/s$
specifikke varmekapacitet	$c_p = 1006 J/(kg \cdot K)$
densitet	$\rho = 1,282 \ kg/m^3$
Termisk udvidelseskoefficient	$\beta = 3,641 \cdot 10^{-3}  K^{-1}$

tabel 5. Benyttede termiske og fysiske egenskaber ved første gennemregning

Den termiske diffusivitet er bestemt ved

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{0,0243W / (mK)}{1,282kg / m^3 \cdot 1006J / (kgK)} = 1,884 \cdot 10^{-5}$$
(0.71)

Herefter beregnes Prandtl-tallet til

$$\Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{13,52 \cdot 10^{-6} m^2 / s}{1,884 \cdot 10^{-5}} = 0,718$$
(0.72)

Grashoff-tallet er bestemt ved

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^{3}}{v^{2}}$$
  
=>  $Gr = \frac{9,82m / s^{2} \cdot 3,641 \cdot 10^{-3} K^{-1} \cdot (4,417^{\circ}C - 0,498^{\circ}C) \cdot (0,009m)^{3}}{(13,52 \cdot 10^{-6} m^{2} / s)^{2}} = 11975$  (0.73)

Hvorefter Rayleigh-tallet findes af

$$Ra = Gr \cdot \Pr = 11975 \cdot 0,718 = 8596 \tag{0.74}$$

Da luftspalterne har en lodret position, og der kun forekommer naturlig konvektion, findes *Nusselt-tallet* af (0.75) ved indsættelse af Rayleigh-tallet.

$$\overline{Nu_{L,90}} = max \begin{cases} 0,0605 \cdot Ra_{L}^{\frac{1}{3}} = 1,293 \\ \left(1 + \left(\frac{0,104 \cdot Ra_{L}^{0,293}}{1 + \left(\frac{6310}{Ra_{L}}\right)^{1,36}}\right)^{3}\right)^{\frac{1}{3}} = 1,1959 \end{cases}$$
(0.75)  
$$0,242 \cdot \left(\frac{Ra_{L}}{\frac{H}{L}}\right)^{0,272} = 1,043$$

Det gennemsnitlige Nusselt-tal for hele luftspalten er altså givet ved 1,1959 og dermed er det konvektive varmeovergangstal

$$h_{k} = \frac{Nu_{L,90} \cdot \lambda}{L} = \frac{1,1959 \cdot 0,0243W / (m \cdot K)}{0,009m} = 1,190W / (m^{2} \cdot K)$$
(0.76)

Isolansen for den yderste luftspalte er da

$$R_{k} = \frac{1}{h_{k}} = \frac{1}{1,190W / (m^{2} \cdot K)} = 0,841(m^{2} \cdot K) / W$$
(0.77)

### 8.3. Stråling

Herefter beregnes bidraget fra varmeoverførsel ved stråling i den yderste luftspalte. Da fladerne er to parallelle og tætliggende flader, hvor  $A_1 \cong A_2$ , benyttes udtrykket (0.52) til at finde strålingsudvekslingen mellem fladerne.

Den fundne overfladetemperatur på de to overflader indsættes

$$\Phi_{luftspalte} = \frac{(1m \cdot 1m) \cdot \left((277, 57K)^4 - (273, 65K)^4\right)}{\frac{1}{5,10 \cdot 10^{-8}W / (m^2 \cdot K^4)} + \frac{1}{5,10 \cdot 10^{-8}W / (m^2 \cdot K^4)} - \frac{1}{5,67 \cdot 10^{-8}W / (m^2 \cdot K^4)}} = -15,23W$$
(0.78)

Derefter findes strålingsisolansen som

$$R_{S,luftspalte} = \frac{A_1(T_1 - T_2)}{\Phi_{1-2}} = \frac{(1m \cdot 1m) \cdot (273,65K - 277,57K)}{-15,23W} = 0,257(m^2 \cdot K) / W$$
(0.79)

Da fladerne er tætliggende og med stor udstrækning antages det at der kun findes strålingsudveksling mellem disse to flader, og strålingsisolansen er da som bestemt i (0.79)

Den samlede isolans for hulrummet findes ved at kombinere de parallelforbundne isolanser

$$R_{luftspalte} = \frac{1}{\frac{1}{R_{kon}} + \frac{1}{R_{strå}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,841(m^2 \cdot K)/W} + \frac{1}{0,257(m^2 \cdot K)/W}} = 0,197(m^2 \cdot K)/W \quad (0.80)$$

Hermed kendes den samlede isolans for det yderste hulrum hvor både bidraget fra stråling, konvektion og ledning er indregnet. Luftspalten på indersiden af Aluthermoen beregnes på tilsvarende måde.

Herefter opsummeres isolanserne for alle lagene, inklusive overgangsisolanserne, som serieforbundne og væggens samlede isolans bestemmes.

$$R_{tot} = R_{se} + R_{yderplade} + R_{luftspalte} + R_{A-murbatts} + R_{dampspærre} + R_{inderplade} + R_{si}$$
(0.81)

$$R_{tot} = 0,04 + 0,092 + 0,197 + 5,270 + 0,001 + 0,069 + 0,13 = 5,800(m^2 \cdot K) / W$$
(0.82)

Med den samlede isolans, beregnes en ny temperatur fordeling gennem væggen. Dermed ændres de fysiske og termiske egenskaber af luften, samt fladernes temperatur på hver side af hulrummet, hvormed både konvektionen og strålingen også ændrer størrelse, hvilket resulterer i nye R-værdier. Gennemregningerne fortsættes indtil den samlede R-værdi er konvergeret mod en konstant værdi. Dette sker efter 3. gennemregning hvor R stabiliserer sig på 5,811 (m<sup>2</sup>·K)/W Herefter bestemmes Uværdien ved

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{5,811(m^2 \cdot K)/W} = 0,172W/(m^2 \cdot K)$$
(0.83)

Varmestrømstætheden q er givet ved

$$q = \frac{T_{inde} - T_{ude}}{R_{tot}} = \frac{25^{\circ}C - 0^{\circ}C}{5,811(m^2K)/W} = 4,30W/m^2$$
(0.84)

### 8.4. Fugtberegninger

Mængden af fugt i konstruktionen beregnes som tidligere anvist. Først bestemmes mætningsdamptrykket i de enkelte lag på baggrund af temperaturen. Eksempelvis er mætningsdamptrykket i laget mellem yderpladen og luftspalten bestemt af

$$P_{s} = e^{\left(23,5771 - \frac{4042,9}{\theta + 235,57}\right)} = e^{\left(23,5771 - \frac{4042,9}{0,57^{\circ}C + 235,57}\right)} = 637Pa$$
(0.85)

Den samlede diffusionsmodstand for konstruktionen er 311,6 (Gpa·m<sup>2</sup>·s)/kg. Dermed er damptryksfaldet i den yderste plade givet ved

$$\Delta \rho = \frac{Z}{\sum Z} \left( \rho_{inde} - \rho_{ude} \right) = \frac{6GPa \cdot m^2 \cdot s) / kg}{311,6(GPa \cdot m^2 \cdot s) / kg} \left( 1268Pa - 550Pa \right) = 13,83Pa \quad (0.86)$$

Damptryksfaldene summeres op og det resulterer i nedenstående fugtforhold gennem væggen.

	Mætningsdamptryk	Damppermeabilitet	Diffusionsmodstand	Damptryksfald	Damptryk	Relativ fugtighed
	Ps	δ	Z	Δρ	ρ	RF
	Ра	µg/m·s·Pa	(Gpa·m <sup>2</sup> ·s)/kg	Ра	Ра	%
	611				550	90,0
træ	649	0.002	6	13,830	550	88,9
	745	0,002			564	88,5
luft		0.2	0,125	0,288		
	1210				564	83,0
A-murbatt		0.2	0,2 0,975			
	1595	0,2			566	18,8
Dampsærre	1000	0	300	691,488		
	2440				1258	41,8
træ	2770	0.002	4,5	10,372		
	2692	0,002			1268	41,4
	3170				1268	40,0

figur 12. Fugtforhold i væggen

Det bemærkes at der på intet tidspunkt opstår kondens i konstruktionen. For yderligere kommentarer vedrørende fugtforholdende henvises til forsøgsbeskrivelsen senere i rapporten.

Glasers beregningsmetode har dog visse begrænsninger i sin udnyttelse. For det første antages stationære forhold. Dette er en umulighed da mange konstruktioner er er mange måneder om at nå en ligevægt, og inden da har klimaet ændret sig igen. Desuden omhandler beregningsmetoden kun transport via diffusion, og altså ikke væsketransport eller konvektion. På samme måde som i temperaturberegningerne er mange materialers damppermeabilitet afhængig af det aktuelle fugtindhold. For en korrekt værdi burde udføres iterationsberegninger på denne.

# 9. Beregningsmodellens 5 forsøgsopstillinger

Den opstillede beregningsmodel har ledt til fire væg-konstruktioner samt en referenceopstilling, der er interessante i et isolerings-øjemed.

Konstruktionerne er kort præsenteret herunder, samt hvilke forhold der er gældende med hensyn til isoleringsevne og fugt.

*Opstilling 1 (A):* Forsøgsopbygning med 1 lag Aluthermo opstillet efter importørens anvisning for at eftervise isoleringsevnen. Beregningsmodellen ses i bilag 1. Det ses at Rayleigh tallet i luftspalterne er Ra < 1000 hvilket medfører et Nusselt-tal på 1,000. Herved kan der i praksis ses bort fra konvektionen og varmeoverførslen sker således kun ved ledning gennem luften. Dette giver en høj isolans i luftspalterne, der faktisk er større end i selve Aluthermo'en selvom denne har en større tykkelse.

*Opstilling 2 (C):* Forsøgsopbygning med 2 lag Aluthermo for at vurdere hvilken effekt to lag og 3 luftspalter har på isoleringsevnen. Beregningsmodellen ses i bilag 2. Igen er luftspalterne kendetegnet ved et lavt Rayleigh tal og derved forefindes kun ledning og stråling gennem luften.

*Opstilling 3(B)* Forsøgsopbygning med 8 lag Aluthermo for at vurdere hvilken effekt flere reflekterende lag har på isoleringsevnen. Beregningsmodellen ses i bilag 3. Konvektionen er også her forhindret i luftspalterne og antallet af disse sikrer en god isoleringsevne.

*Opstilling 4 (D):* Forsøgsopbygning med almindelig A-murbatts-isolering påført et reflekterende lag på hver side, for at bestemme hvilken effekt reflekterende materiale har i kombination med almindelig masseisolering. Beregningsmodellen ses i bilag 4. Konvektionen er stoppet i luftspalterne, hvilket giver en høj isolans. Ifølge beregningsmodellen er temperaturfaldet pr. længdeenhed større i luftspalten end i mineralulden, og dermed isolerer luftspalten bedre end mineraluld for den samme tykkelse.

*Opstilling 5 (Ref):* Referenceforsøg med almindelig isoleret væg (195 mm rockwool) Beregningsmodellen ses i bilag 5. Referencevæggen giver mulighed for at sammenligne de målte værdier med en velisoleret let ydervæg. Her er luftspalten 25 mm og uden refleksive overflader, hvilket giver anledning til en mindre isolans i hulrummet.

Generelt for alle opstillingerne vil der ifølge beregningsmodellen ikke forekommen kondens noget sted i konstruktionen. Der skal dog gøres opmærksom på at den relative luftfugtighed i yderste luftspalte i alle opstillingerne er over 70 % og derved er der mulighed for at der kan opstå skimmelsvamp i den yderste træplade. Fugtberegningerne bygger på vinterforhold udendørs, hvilket betyder lav temperatur og høj relativ luftfugtighed. I den varme årstid har konstruktionen mulighed for at udtørre, hvilket er nok til at forhindre skimmelsvamp i at få grobund.

Forsøgsopstilling 2, 3 og 4 er alle kendetegnede ved at have flere lag reflekterende materiale med en meget høj diffusionsmodstand. Lagene fungere som dampspærre, og der bør ikke optræde mere end én dampspærre i en konstruktion. I sådanne tilfælde, vil den fugt der eventuelt dannes mellem de to lag ikke havde mulighed for at undslippe.

## **10.** Heat beregningsprogram

Pc-programmet Heat er lavet til at beregne 2-/ og 3-dimensionelle varmestrømme. Både som tidsafhængige varmestrømme med varierende forhold, og i steady-state situationen.

Der er overordnet to formål med at lave varmeberegninger i Heat:

1. Verificering af beregningsresultater fra Excel.

For at kontrollere beregningerne i Excel laves tilsvarende beregninger i Heat2. Heat2 har således været brugt under hele forløbet til udvikling og fejlfinding. Da der i flere tilfælde benyttes forskellige beregningsmetoder kan det ikke forventes at resultaterne er fuldstændig ens. I stedet vurderes det løbende om der er behov for optimering, eksempelvis med flere iterationer eller andre udvidelser.

2. Kontrol af testmetode ved afprøvning af 3D beregninger. Forsøgshuset har visse begrænsninger, primært afstanden mellem de lodrette stolper. Afstanden mellem stolperne reducerer det mulige forsøgsareal til ca. 0,5 m i bredden. Dette giver en afstand på ca. 25 cm fra målepunktet til sider og stolper, som ikke har samme isolans. Ved at lave 3D beregninger med de faktiske omgivelser, kan det vurderes om der opnås endimensionelle strømninger i midten af forsøgsarealet. Skulle beregningerne vise at dette ikke er tilfældet, vil det give en ide om den påvirkning der så ville være.

Vi antager at kunne bruge stationære beregninger, da der primært bruges lette materialer med en lav varmekapacitet i forsøgene. Havde der i stedet været brugt tunge bygge materialer, som mursten, ville varmestrømmen i højere grad være forsinket gennem væggen og dermed tidsafhængig uagtet af at temperaturen på hver side af væggen er konstant

### 1. Verificering af beregningsresultater fra Excel

Tabel 6 angiver beregnede værdier for henholdsvis Excel og Heat2, samt forskellen mellem de 2. Det er ikke umiddelbart til at sige hvilke beregninger der er mest korrekte. Afrundingsfejl, simplificeringer og forskellige beregningsmetoder er alt sammen med til at ændre resultaterne. Dog kan vi antage, at med de meget små afvigelser, er beregningerne præcise nok til vores formål.

Porognada	Beregnede LL-værdier $W/(m^2,K)$									
beregnede t		II 'N)								
	1 lag	8 lag	2 lag	Isolering						
	Aluthermo	Aluthermo	Aluthermo	m. refleksiv	Reference					
Excel	0,809	0,181	0,541	0,281	0,172					
HEAT2	0,816	0,181	0,556	0,283	0,169					
Afvigelse	0,007	0	0,015	0,002	0,003					
Afvigelse %	0,86 %	0 %	2,69 %	0,71 %	1,74 %					

Tabel 6. Beregnede U-værdier for henholdsvis beregningsmodellen og HEAT2

Varmestrømstætheden gennem væggen varierer i højden. Der opstår 2-dimensionelle strømninger på grund af en indlagt overflade i toppen og bunden. Overfladen er nødvendig for at afgrænse hulrummet, da Heat2 ikke kan behandle visse hulrum afgrænset af en adiabatisk flade.



Figur 13. HEAT2 tegning af varmestrømstætheden

#### 2. Kontrol af testmetode ved afprøvning af 3D beregninger

Forsøgets størrelse er bestemt af afstanden mellem lodrette stolper i væggen. Stolperne er samtidig skyld i, at der opstår 3-dimensionelle varmestrømme i forsøgsområdet. Sammen med forsøgskassens sider udgør de et brud i isoleringen, en kuldebro. Det er derfor relevant at undersøge om kuldebroens påvirkning har indflydelse på måleresultaterne, og i givet fald hvor meget. Dette undersøges ved at opbygge en 3D model af hele forsøgsområdet, inklusiv stolper og isoleringen et stykke i alle retninger. I hjørnerne er der størst påvirkning, idet der både er bidrag fra top/bund og siderne. Derfor er en 2D simulering ikke tilstrækkelig hvis man vil skabe et fyldestgørende billede. Kuldebroens påvirkning af resultaterne er ligeledes afhængig af tykkelsen af forsøget. Tynde forsøg, som 1 lag Aluthermo, påvirkes mindre end tykkere forsøg.

3D forsøget er opbygget med 100 mm Rockwool isolering i forsøgskassen, hvilket skønnes at give et tilfredsstillende billede af påvirkningen på alle forsøgsopstillinger.

For at mindske kuldebroerne skal man så vidt muligt forsøge at lave isolansen ens inden i og uden for forsøgsarealet. Dette gøres ved at tilpasse isoleringstykkelsen over og under kasserne, så den cirka matcher den forventede isolans af forsøgskassens indhold.

På Figur 14. HEAT3 tegning visende varmestrømstæthed**Error! Reference source not found.** er vist 3D opstillingen. På figuren ses de store variationer af varmestrømstætheden i x-aksens retning. Skalaen går fra 3,3 i det lilla område til 11,6 i det lyserøde. Figuren er primært vist for at illustrere opbygningen.





#### Figur 14. HEAT3 tegning visende varmestrømstæthed

Figur 15 viser et 2D plot af væggen set indefra. Her er spænder farveskalaen over et meget mindre område, således at man kan observere detaljerne bedre. Tallene i ellipsen viser varmestrømstætheden langs hver af de 3 akser i det indtegnede målepunkt i midten af kassen. Det ses at q langs z og y-aksen er i størrelsesordnen 10^-5, hvilket er uden betydning ved disse forsøg.

#### Figur 15. HEAT3 tegning visende varmestrømstæthed

På Figur 16 er zoomet ind på forsøgsområdet. Tallene i ellipsen viser igen varmestrømstætheden, men målepunktet er flyttet ud mod kassens ene side. Det ses at q langs z- og y-aksen er større. Dog stadig lave i forhold til den forventede præcision af forsøget. I Heat kan man samtidig aflæse varmstrømmen langs x-aksen til at ændre sig ca. 0,04, hvilket også er acceptabelt.



Figur 16. HEAT3 tegning visende varmestrømstæthed

Af dette kan vi konkludere, at forsøget ikke påvirkes betydeligt, selvom målepunkternes placering afviger en anelse fra midten af forsøgsområdet. Dette er naturligvis forsøgt undgået. Forsøgsområdet er tilstrækkelig stort til ikke at blive påvirket betydeligt af kuldebroerne der afgrænser det.

# 11. Måleteknik

### Termoelement

Til temperaturmålinger bruges et termoelement type T, hvilket grundlæggende er opbygget som vist på Figur 17.

Termoelementet udnytter, at der opstår en elektromotorisk kraft mellem 2 metaller når de forbindes. Kraften afhænger både af metallernes art, og af temperaturen i kontaktpunkterne. For at kunne beregne temperaturen i målepunktet, skabes en kendt



Figur 17. Principtegning af termoelement

referencetemperatur. Derved opstår der en spændingsforskel, som kan måles med et voltmeter. Typisk bruges referencetemperaturen 0 °C, da denne temperatur let skabes med en blanding af vand og is.

I de fleste nyere dataloggere er funktionen med referencetemperatur indbygget. Denne del af opstillingen er derfor ikke nødvendig, og selve termoelementet består kun af en kobbertråd og en konstantantråd med en lodning i enden. Lodningen er afgørende for at der opstår en stabil kontakt mellem metallerne.

Det er heller ikke nødvendigt at omregne fra spændingsforskel til målt temperatur, da denne funktion ligeledes er indbygget. For at synliggøre hvilke størrelser der arbejdes med, skal det alligevel nævnes, at et termoelement af typen T har følsomhed  $\approx$  43 µV/°C.

Ved brug af termoelementer som temperaturmålere er det vigtigt at have en ide om præcisionen. Målingerne er behæftet med flere fejlkilder, udover dataloggerens begrænsninger. DIN 43710 angiver tilladte tolerancer for type T-elementer på 3 K eller 0,75 % af temperaturen i °C<sup>19</sup>. Med temperaturen menes temperaturforskel mellem målepunkt og referencepunkt. Der kan forventes usikkerheder på ca. 1 K med rimeligt billige instrumenter<sup>20</sup>.

Da måleresultater i vores aktuelle temperaturinterval vil ligge inden for ±5 mV kan der nemt forekomme forstyrrelse udefra. Anvendes der ikke skærmede termoelementledninger skal der holdes en afstand til 230 V-ledninger på minimum 40 cm<sup>21</sup>. Derudover skal man også være opmærksom andre elektriske apparater og omgivelser der kan have indflydelse på de meget følsomme målinger.

Når der måles overfladetemperaturer anbefales det at lade ledningen følge overfladen mindst 500 gange tråddiameteren. Dette sikrer, at ledningen ikke kort fra loddestedet er påvirket af betydeligt højere eller lavere temperaturer. Varmen ville da bevæge sig ad de meget varmeledende metaltråde og forstyrre målingerne.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Danvak 2006, s. 371

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Danvak 2006, s. 371

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Danvak 2006, s. 371

### Varmestrømsmåler – Hukseflux

En varmestrømsmåler bruger samme fysiske egenskaber ved forbundne metaller, til at bestemme varmestrømstætheden gennem en plade med kendt varmeisolans. Konstantan

Typisk forbindes en række termoelementer i serie på begge sider af pladen. Dette sikrer større præcision. Med disse 3 oplysninger; varmeisolans, temperatur underside og

temperatur overside, kan man ved nedenstående formel beregne varmestrømstætheden gennem pladen:

$$q = \frac{\Delta \tau}{R} \tag{0.87}$$

~~~~~~

Kobber

Varmestrømsmålere udnytter at varmestrømstætheden gennem pladen er den samme som gennem hele væggen i strømningsretningen, antaget at strømningen er 1-dimensionel.

Varmeisolansen skal være tilpas lav til, at denne ikke påvirker den samlede isolans uhensigtsmæssigt meget. Isolansen for de anvendte Hukseflux målere er angivet af producenten som  $R_{hukse} < 6.25 \ 10^{-3} \ (K \cdot m^2)/W$ 

Med gode målere skal forventes en afvigelse på op til 5 %, hvilket ikke er uden betydning når resultaterne skal sammenlignes med beregninger lavet med større præcision.

### 11.1. Måleusikkerhed

Dette afsnittet er en sammenfatning af kapitel 12 i DANVAK.

Alle målinger er behæftet med usikkerhed, der dels skyldes selve målingen, men også den indflydelse målingen har på den målte størrelse.

For at sikre at måleinstrumenterne måler korrekt, kræves en jævnlig kalibrering. Her sættes måleinstrumentet op mod et bedre instrument, og der findes en korrektionsværdi.

Den korrigerede måleværdi for de benyttede Hukseflux er

$$x_{re} = x_{m\tilde{a}lt} \cdot \frac{1}{\Delta x} \tag{0.88}$$

Hvor  $x_{re}$  er referenceinstrumentets målte værdi,  $x_{målt}$  er måleinstrumentets målte værdi og  $\Delta x$  er korrektionsværdien, der samtidig sikrer omregningen til enheden W/m<sup>2</sup>.

|             | Benyttet i forsøg | ΔΧ (μV) |
|-------------|-------------------|---------|
| Hukseflux 1 | A og C            | 61,4    |
| Hukseflux 2 | B og D            | 63,4    |
| Hukseflux 3 | Referenceforsøg   | 65,5    |
|             |                   | / -     |

Tabel 7. Kalibreringsværdier for HUkseflux

De enkelte målinger i forsøgsopstillingerne er alle såkaldte usammensatte (direkte) målinger, hvor talværdien fremkommer direkte ved målingen. Ved usikkerhederne på direkte målinger skelnes mellem tilfældige usikkerheder og systematiske usikkerheder.

Tilfældige usikkerheder kan reduceres ved gentagne målinger, hvorpå middelværdien sættes som resultatet af disse. Herfra kan standardafvigelsen på det enkelte måleresultat bestemmes af

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$
 (0.89)

Usikkerheden på den beregnede middelværdi bestemmes da af

$$U_T = \frac{SD}{\sqrt{n}} \tag{0.90}$$

Ved bestemmelse af måleusikkerheden ved (0.90) er sandsynligheden for at enhver måling rammer inden for området  $\overline{x} \pm SD$  lig med cirka 68 %, hvis variablen er normalfordelt. Variablen vil i de fleste tilfælde kunne anses som tilnærmelsesvis normalfordelt.

Systematiske usikkerheder, der ikke kan reduceres ved gentagne målinger kan skyldes instrumentfejl, utilstrækkelig kalibrering eller hysterese, hvor apparatet reagerer forskelligt på en voksende og på en aftagende ydre påvirkning.

Systematiske usikkerheder kan også skyldes metodeusikkerhed, hvor instrumenterne benyttes under andre betingelser, end dem de er kalibreret til, eller at for eksempel temperaturmålerne ikke er i tilstrækkelig termisk kontakt med måleobjektet.

De enkelte bidrag til den systematiske usikkerhed kan indsættes i

$$U_{s} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} U_{i}^{2}}$$
(0.91)

Den resulterende usikkerhed  $U_R$  på middeltallet af en gentagen direkte måling er findes af

$$U_{R} = \sqrt{U_{T}^{2} + U_{S}^{2}}$$
(0.92)

#### Sammensatte målinger

Sammensatte målinger er kendetegnet ved at resultatet først fremkommer efter en udregning af et matematisk indtryk, hvori de direkte målte parametre indgår. Hvis måleresultatet er bestemt som et funktionelt udtryk på formen R = f(x,y,z) er den absolutte usikkerhed bestemt af

$$U = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x} \cdot \overline{U}_{R_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial y} \cdot \overline{U}_{R_y}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \cdot \overline{U}_{R_z}\right)^2}$$
(0.93)

Hvor  $\frac{\partial R}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial R}{\partial y}$  og  $\frac{\partial R}{\partial z}$  angiver de enkelte parameters relative indflydelse på resultatet og  $\overline{U}_{R_x}$ ,  $\overline{U}_{R_y}$ 

og  $\overline{U}_{R_z}$  er den resulterende usikkerhed på de enkelte parametre.

De opstillede forsøg benytter sig af temperaturmålere og Hukseflux til bestemmelse af varmestrømstætheden. Disse benytter direkte målinger, som beskrevet i afsnittet om måleteknik. Uværdien er bestemt på baggrund af ude- og indetemperaturen, samt varmestrømstætheden og er derved kendetegnet ved en sammensat måling.

De systematiske usikkerheder U<sub>t</sub>, tager udgangspunkt i standardafvigelsen fra n antal målinger. Dette kan dog ikke benyttes i denne sammenhæng da de målte værdier har store variationer eftersom især udetemperaturen har en naturlig stor variation.

Derfor ses, der bort fra de tilfældige usikkerheder og den resulterende usikkerhed er da givet ved

$$U_R = U_S \tag{0.94}$$

Måleusikkerheden på termoelementerne er 0,2 K. Usikkerheden på Huksefluxen er opgivet til 5 %. Den højest målte varmestrømstæthed er  $q_{max} = 21,46 \text{ W/m}^2$ , hvilket giver udslag i en måleusikkerhed på 21,46 · 0,05 = 1,073 W/m<sup>2</sup>.

. Der er ingen aflæsningsusikkerhed og intet kendskab til eventuelle usikkerheder i Grant-apparatet. Altså fås følgende resulterende usikkerheder U<sub>R</sub>

$$\overline{U_{R,Tinde}} = U_{S,Tinde} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} U_i^2} = \sqrt{(0, 2K)^2} = 0, 2K$$
(0.95)

$$\overline{U_{R,Tude}} = U_{S,Tude} = \sqrt{(0,2K)^2} = 0,2K$$
 (0.96)

$$\overline{U_{R,hukseflux1}} = U_{S,hukseflux1} = \sqrt{(1,073W/m^2)^2} = 1,073W/m^2$$
(0.97)

Den målte U-værdi består af de tre målinger; varmestrømstætheden, indetemperaturen og udetemperaturen. Skrevet som et funktionelt udtryk fås U =  $f(q, T_i, T_u)$ .

De enkelte parameters relative indflydelse på U-værdien hvor q,  $T_i$  og  $T_u$  er defineret ved en typisk forekommende situation

$$\frac{\partial U}{\partial T_i} = -\frac{q}{\left(T_i - T_u\right)^2} = -\frac{0,80899}{\left(28,8 - 4,5\right)^2} = -0,00137$$

$$\frac{\partial U}{\partial T_u} = \frac{q}{\left(T_i - T_u\right)^2} = \frac{0,80899}{\left(28,8 - 4,5\right)^2} = 0,00137$$
(0.99)

$$\frac{\partial U}{\partial q} = \frac{1}{T_i - T_u} = \frac{1}{28, 8 - 4, 5} = 0,04115$$
(0.100)

Nu kan den absolutte usikkerhed på U-værdien bestemmes af (xx)

$$U = \sqrt{\left(-0,00137 \cdot 0,2\right)^2 + \left(0,00137 \cdot 0,2\right)^2 + \left(0,04115 \cdot 1,073\right)^2} = 0,0044W / (m^2 \cdot K)$$

Dette giver altså en afvigelse på den fundne U-værdi på  $\pm 0,0044W/(m2 \cdot K)$ 

## 12. Forsøg

### 12.1. Forsøgsformål

Formålet med forsøgene at eftervise de isolerende egenskaber af de konstruktioner, der blev udarbejdet i beregningsmodellen. Dette gøres både ved at bestemme U-værdien ved at måle varmestrømstætheden i kombination med en ude- og indetemperatur, men også ved at måle temperaturen vilkårlige steder i konstruktionen for at kunne sammenligne temperaturudviklingen gennem væggen. Dette gøres for bedre at kunne lokalisere eventuelle uoverensstemmelser mellem beregningsmodellen og de målte værdier.

### 12.2. Materialer

Det danske marked for isolering er domineret af masseisolering, eksempelvis Rockwool A-Murbatts. Aluthermo Quattro er et utraditionelt alternativ til dette marked.

Det virker primært ved at reflektere varmestråling, og tykkelsen af laget behøver ikke være mere end 1 cm. Aluthermo Quattro er en videreudvikling af tidligere generationer af refleksiv isolering. Den er sammensat af 7 lag, heraf 4 aluminiumslag med høj reflektans. Imellem aluminiumslagene er 2 lag polyethylen (2 og 6) med 4 mm høje luftbobler. Lag 4 er en polyethylen skum. Lagene af polyethylen er både med for at bære aluminiummet og afstive materialet. Derudover virker det på samme måde som masseisolering, med en varmeledningsevne på ca. 0,04.

Angivelse af brandklassen er ikke mulig, da der er angivet forskellige klasser på Aluthermo.dk. Emnet vil ikke blive behandlet i rapporten.

Yderligere information og data om Aluthermo Quattro kan ses i bilag 6.

Der har været lidt afvigelser i oplysningerne om tykkelse, isolans mv. i løbet af projektet, afhængig af kilden. Nedenstående skema over tekniske data er de gældende værdier gennem hele rapporten. Værdierne er taget fra Bilag 7.



figur 18. Opbygning af Aluthermo Quattro

## Tekniske data

| Varmeledningsevne:  | 0,037 W/(m·K)       |
|---------------------|---------------------|
| Diffusionsmodstand: | 0,975 (GPa·m2·s)/kg |
| Emissivitet:        | 0,9                 |
| Aluthermo Quattro   |                     |
| Varmeledningsevne:  | 0,04 W/(m·K)        |
| Diffusionsmodstand: | 100 (GPa·m2·s)/kg   |
| Emissivitet:        | 0,08                |
| Krydsfiner (9 mm)   |                     |
| Varmeledningsevne:  | 0,13 W/(m·K)        |
| Diffusionsmodstand: | 4,5 (GPa·m2·s)/kg   |
| Emissivitet:        | 0,9                 |
| Krydsfiner (12 mm)  |                     |
| Varmeledningsevne:  | 0,13 W/(m·K)        |
| Diffusionsmodstand: | 6 (GPa·m2·s)/kg     |
| Emissivitet:        | 0,9                 |

## 12.3. Forsøgsopstillinger

#### Forsøgsopbygninger

Efter at have gennemført beregninger i Excel og Heat2, undersøges det, om der er sammenhæng mellem det udarbejde regneark baseret på varmetransmissions teori og de faktiske forhold. For at vurdere dette, opstilledes 4 forsøgsscenarier samt et referenceforsøg til sammenligning.

Til lejligheden blev et forsøgshus renoveret, således at det blev ordentligt isoleret. Tværsnittet af ydervæggen er vist i Figur 19. Denne blev brugt som referencevæg.

Til hvert enkelt forsøg blev konstrueret en kasse, hvori forsøgsopstillingen var bygget ind med alle lag og termoelementer. Ideen var så, at man blot kunne stille kassen ind i det benyttede rum i væggen og derved starte målingerne i en fart.

Hullet i væggen havde dimensionerne 54,5 cm i bredden og 3 m i højden. Da bredden her er den begrænsende faktor laves kasserne med udvendige mål på 54,5 x 54,5 cm.

Gennemgående i forsøgene med Aluthermo er, at hulrummene på hver side af Aluthermo-panelet er 9 mm bredt. Brochuren viser varierende tykkelser af hulrum, og det kan derfor vælges rimelig frit. Så længe beregninger og målinger sammenlignes på samme vilkår.

I det følgende er givet en kort beskrivelse af de enkelte forsøgsopbygninger. For en detaljeret illustreret samlevejledning henvises til bilag 8-11.

### Referenceforsøg

Den eksisterende væg bevares. Dog åbnes der indefra for at placere termoelementer til måling af temperaturforløbet gennem væggen.



Figur 19

Forsøget er bygget ind i en kasse hvori Aluthermoen er monteret ved hjælp af 4 lister med kvadratisk tværsnit på 9 x 9 mm. På forsiden er kassen åben, da denne stilles helt op mod yderpladen i forsøgshuset, mens der på bagsiden er monteret en 9 mm plade med samme egenskaber som den eksisterende indervæg. Termoelementerne og Huksefluxen er placeret som vist i Figur 26.



### 2 lag Aluthermo

Der benyttes samme størrelse kasse som i foregående forsøg. Denne gang er der lavet en ramme af lister, hvorpå der på begge sider er fastsat Aluthermo, der dermed er adskilt af 9 mm luft. Når Aluthermoen er fæstnet på begge sider af rammes tapes der hele vejen langs kanten, for at sikre at hulrummet er fuldstændig lufttæt, så luftspalten kan opfattes som ikke-ventileret. Termoelementerne og Huksefluxen er placeret som vist i Figur 27.





Til dette forsøg benyttes en dybere kasse da denne isoleringsdel har en større tykkelse. De 8 lag Aluthermo er adskilt af lister der sikrer en luftspalte på 9 mm. Til slut tapes det hele sammen i kanterne så opstillingen er fuldstændig lufttæt. og Huksefluxen er placeret som vist i Figur 28.

| 9 mm 9  | Inderplade |
|---------|------------|
| 9 mm 🛉  | Luftspalte |
| 11,2 mm | Aluthermo  |
| 9 mm 🛉  | Luftspalte |
| 11,2 mm | Aluthermo  |
| 9 mm 🔷  | Luftspalte |
| 11,2 mm | Aluthermo  |
| 9 mm    | Luftspalte |
| 11,2 mm | Aluthermo  |
| 9 mm    | Luftspalte |
| 11,2 mm | Aluthermo  |
| 9 mm    | Luftspalte |
| 11,2 mm | Aluthermo  |
| 9 mm 🛉  | Luftspalte |
| 11,2 mm | Aluthermo  |
| 9 mm    | Luftspalte |
| 11,2 mm | Aluthermo  |
| 9 mm    | Luftspalte |
| 12 mm_  | Yderplade  |



### Isolering med reflekterende overflader

Kassen der benyttes i dette forsøg har samme mål som ved 8 lag Aluthermo. Heri placeres 95 mm rockwool påført et reflekterende lag på begge sider. På begge sider er der et mellemrum på 9 mm opretholdt af lister. og Huksefluxen er placeret som vist i Figur 29.



Figur 20.

### Målepunkter

Der er 8 blokke til brug ved logning er måleresultater. Til hver blok kan tilkobles op til 3 termoelementer, 2 varmestrømsmålere eller én af hver.

Grundet begrænsningen i antallet af simultane målinger, opsættes kun 3 forsøg af gangen, hvoraf det ene er referenceforsøget, som kører over hele forsøgsperioden. Da der dermed er tilsluttet 3 varmestrømsmålere, vil der være plads til 19 termoelementer.

. Termoelementer monteres direkte på Alutermoen med reflekterende tape, så emissiviteten af fladen ikke påvirkes. Se figur 22. Ved øvrige placeringer, er der benyttet almindelig gaffer-tape. De første ca. 50 cm af ledningen føres således at den er i berøring med den målte flade. På grund af pladsmangel er der udført den såkaldte spiral-føring som set i figur 23 og figur 24.

Huksefluxen påføres først et lag varmeledende pasta for at sikre god termisk kontakt mellem fladen og Huksefluxen. Herefter klæbes den fast med to stykker tape, der sættes således at måledelen i midten ikke er påvirket. Se figur 21.



figur 21. Fastgørelse af Hukseflux



figur 22. Fastgørelse af termoeelement



figur 23. Ledningsspiral, Hukseflux



figur 24, ledningsspiral, termoelement.

Hvert termoelement har et nummer, for at de er mulige at identificere under databehandlingen. Så vidt muligt er termoelementerne placeret jævnt gennem væggen, eller hvor det kunne være særligt interessant at kende temperaturen.







Figur 26. Målepunkter for 1 lag Aluthermo

2 Lag Aluthermo

### Figur 27. Målepunkter for 2 lag Aluthermo

### 8 Lag Aluthermo



#### Isolering med reflekterende overflader



Figur 29. Målepunkter for A-murbatt med reflekterende overlader

### Opsætning i forsøgshus

Monteringen af forsøgskasserne i forsøgshuset blev gjort over en dag. Kasserne blev sat ind på deres plads over hinanden, med rockwool imellem dem. Ledningerne fra alle målerne blev monteret til Grant'en som vist i Figur 30.

Fire lange ledninger blev ført ud gennem vinduet på østsiden af bygningen og over til ydervæggen. Tre af disse skulle stå for målingerne af overfladetemperaturerne ud for de to forsøgskasser og referencevæggen. Den sidste ledning står for måling af udetemperaturen. Denne blev monteret løsthængende fra spæret, så den havde en vis afstand til væggen. Ledningerne til overflademålingerne blev fastgjort med tape de første 50 cm således at vi var sikre på de blev ført helt op ad væggen, for at sikre korrekte måleresultater. Den resterende ledningsføring blev udført med tape for cirka hver halve meter.



### Eksempel på tilslutning af måleudstyr



Figur 30 viser tilslutningerne for forsøgene A og B i Grant-apparaturet

Figur 30. Tilslutning af udstyr til Grant1600

## 13. Forsøgsresultater

Forsøgsresultaterne består af et større antal målinger af både varmestrøm og temperatur. Sammenligningsgrundlaget mellem teoretiske beregninger og praktiske forsøg består primært af en beregnet U-værdi. Denne kan med et enkelt tal beskrive isoleringsevnen af en væg, og er derfor yderst praktisk til disse forsøg. En U-værdi er beregnet for hver enkelt måling. Derefter er gennemsnittet af de beregnede U-værdier fundet og indsat i tabel 8. Nogle forsøg er rettet til under forsøgsperioden, og visse resultater er derfor fejlbehæftede og ikke medregnet. Fælles for beregninger er, at de alle er baseret på kontinuerte måleperioder.

Temperaturfordelingen gennem væggen er også interessant at kigge på. Med den kan det vurderes om hvert enkelt materiale isolerer som forventet. Idet temperaturen på begge sider af et lag kendes, samt varmestrømmen som passerer, er det muligt at beregne isolansen for et enkelt materiale. Der gælder at et større temperaturfald svarer til en højere isolans.

| Forsøg           | U-værdi målt | Beregnet | Afvigelse | Afvigelse % |
|------------------|--------------|----------|-----------|-------------|
| A: 1 lag         | 0,804        | 0,809    | 0,005     | 0,62 %      |
| Aluthermo        |              |          |           |             |
| B: 8 lag         | 0,219        | 0,181    | -0,038    | -17,35 %    |
| Aluthermo        |              |          |           |             |
| C: 2 lag         | 0,597        | 0,541    | -0,056    | -9,38 %     |
| Aluthermo        |              |          |           |             |
| D: Isolering med | 0,322        | 0,281    | -0,041    | -12,73 %    |
| refleksiv        |              |          |           |             |
| Reference        | 0,182        | 0,172    | -0,01     | 5,49 %      |

tabel 8

En anden måde at kontrollere forsøgsresultaterne med de teoretiske beregninger er ved at sammenligne temperaturerne i de forskellige laggrænser. Herved er det muligt at vurdere, hvor beregningsmodellen eventuelt har regnet forkert med hensyn til isolanserne for de enkelte lag eller hulrum.

For at lave denne sammenligning af temperaturudviklingen, er der udvalgt en målt U-værdi, der ligger så tæt op ad den teoretiske som muligt. Herefter er de målte ude- og indetemperaturer indtastet i excel-arket og den beregnede temperaturfordeling er indtegnet i et x,y-koordinatsystem. Heri er også indtegnet den målte temperaturfordeling, samt de forskellige lag konstruktionen består af.



#### figur 31. Målte og beregnede temperaturudvikling gennem væg med 1 lag Aluthermo

figur 31 viser temperaturfordelingen gennem væggen, illustreret ved to kurver, én for den teoretisk beregnede og én for den målte. 1.-aksen viser den summerede lagtykkelse, mens anden-aksen viser temperaturen. Målepunkterne er angivet som vist i Figur 26. Ude og indetemperaturen er på det givne tidspunkt henholdsvis 3,6 °C og 23,5 °C og varmestrømmen anses for stationær. Der er valgt en målt U-værdi der ligger tættest på den teoretisk beregnede for bedre at kunne sammenligne de to temperaturkurver.

Der gælder at jo større temperaturfald over et lag, jo bedre isoleringsevne. Kurverne ligger pænt oven i hinanden og er tilnærmelsesvis parallelle gennem hele væggen. Der ses dog en mindre afvigelse i luftlagene, hvor temperaturfaldet og dermed isoleringsevnen er bedre ved den teoretiske beregning end den målte. Til gengæld er isoleringsevnen af selve Aluthermo-laget bedre under de praktiske forhold, end beregnet. I to træplader på indersiden og ydersiden er der fin overensstemmelse mellem den teoretiske varmeledningsevne og den målte, da kurverne her ligger parallelle og temperaturfaldet gennem pladerne dermed er relativt ens for de to kurver.

| 1 lag Aluthermo | T <sub>inde</sub> | A6   | A5   | A4   | A3   | A2  | A1  | $T_{ude}$ |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----------|
| Beregnet (°C)   | 25,5              | 21,4 | 20,4 | 15,3 | 10,8 | 5,7 | 4,2 | 3,6       |
| Målt (°C)       | 23,5              | 21,9 | 20,1 | 15,5 | 10,8 | 6,6 | 4,6 | 3,6       |
| Afvigelse (°C)  | -                 | 0,5  | 0,3  | 0,2  | 0    | 0,9 | 0,2 | -         |
| tabal 0         |                   |      |      |      |      |     |     |           |

Sammenholdes den teoretiske temperatur i en laggrænse med den målte ser det ud som i tabel 9

tabel 9



#### Figur 32

Ved to lag Aluthermo ser temperaturfordelingen ud som vist i Figur 32. Igen er den beregnede isolans af hulrummet overvurderet i forhold til den isolans der opnås i virkeligheden, hvorimod selve Aluthermo-laget isolerer bedre i praksis end i teorien. Det skal desuden bemærkes at der kun er et begrænset antal målepunkter i konstruktionen, så kurven for målepunkterne viser et lineært fald på tværs af forskellige lag, hvilket naturligvis ikke vil være tilfældet i virkeligheden.

2 lag Aluthermo C5 C6 C4 C3 C2 C1  $T_{ude}$ Tinde Beregnet (°C) 21,6 16,2 11,2 28,3 26,4 5,8 -1,5 -2,9 Målt (°C) 28,3 26,1 19,7 15,1 9,4 4,7 -2,2 -2,9 Afvigelse (°C) 1,9 0,7 -0,5 1,1 1,8 1,1 -

Temperaturerne er  $T_{inde}$  = 28,3 grader og  $T_{ude}$  = -2,9 grader.

tabel 10



figur 33

| 8 lag Aluthermo | T <sub>inde</sub> | C7   | C6   | C5   | C4   | C3   | C2  | C1  | T <sub>ude</sub> |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|------------------|
| Beregnet (°C)   | 28,2              | 27,4 | 26,0 | 22,3 | 17,0 | 11,8 | 6,5 | 4,8 | 4,6              |
| Målt (°C)       | 28,2              | 26,3 | 23,7 | 18,8 | 14,2 | 10,1 | 6,5 | 5,2 | 4,6              |
| Afvigelse (°C)  | -                 | 1,1  | 2,3  | 3,5  | 2,8  | 1,7  | 0   | 0,4 | -                |

Temperaturfordelingen ved 8 lag Aluthermo er vist i Figur 33. T<sub>inde</sub> = 21,3 °C og T<sub>ude</sub> er 3,7 °C. Her ligger den målte kurve et pænt stykke under den beregnede. Dette skyldes den mærkbart bedre indvendige overgangsisolans, der giver sig til udtryk i det store temperaturfald mellem overfladetemperaturen af inderpladen og den indvendige temperatur. Den mærkbart større overgangsisolans betyder at hele kurven "forskydes" til venstre og der derved vil opstå koldere temperaturer inde i væggen.

### A-murbatts med reflekterende overflader



#### figur 34

| Rockwool m. refleksiv | T <sub>inde</sub> | D5   | D4   | D3   | D2  | D1   | $T_{ude}$ |
|-----------------------|-------------------|------|------|------|-----|------|-----------|
| Beregnet (°C)         | 28,4              | 27,3 | 26,6 | 23,7 | 1,8 | -2,0 | -2,3      |
| Målt (°C)             | 28,4              | 25,5 | 24,4 | 23,9 | 1,3 | -1,4 | -2,3      |
| Afvigelse (°C)        | -                 | 1,8  | 2,2  | 0,2  | 0,5 | 0,6  | -         |

Konstruktionen med 95 mm rockwool påført et reflekterende lag på begge sider har temperaturudviklingen som i figur 34. Udetemperaturen er 28,4 °C og indetemperaturen -2,3 °C.

Her noteres det igen at den indvendige overgangsisolans giver et markant temperaturfald fra indetemperaturen til indervæggen. Dette opvejes dog af den dårligere isoleringsevne i luftspalten end beregnet, hvorefter kurverne følges pænt ad gennem rockwool'en.

### Referencemur



figur 35

| Referencevæg   | T <sub>inde</sub> | R4   | R3   | R2  | R1  | $T_{ude}$ |
|----------------|-------------------|------|------|-----|-----|-----------|
| Beregnet (°C)  | 21,0              | 20,6 | -    | 4,9 | 4,3 | 3,9       |
| Målt (°C)      | 21,0              | 20,0 | 12,1 | 5,0 | 4,6 | 3,9       |
| Afvigelse (°C) | -                 | 0,6  | -    | 0,1 | 0,3 | -         |

Temperaturfordelingen i referenceforsøget er på baggrund af inde- og udetemperaturen givet ved  $T_{inde} = 21,2$  °C og  $T_{ude} = 3,9$  °C.

Den indvendige overgangsisolans er større i praksis, hvilket medfører at temperaturkurven er "forskubbet" mod venstre. Det resulterer i lavere målte temperaturer i de efterfølgende lag indtil de udlignes af luftspalten, der igen har en dårligere isolans end først beregnet, denne gang dog i mindre grad end ved de smallere luftspalter benyttet i de andre forsøg.

### Overgangsisolanserne

Gennemgående for de ovenstående kurver er at temperaturspændet mellem inderpladens overflade og den indvendige rumtemperatur er større end den beregnede kurve. Det betyder at den indvendige overgangsisolans er markant større end den teoretisk benyttede på 0,13 (m<sup>2</sup>K)/W.

Den højere overgangsisolans kan skyldes at der er en meget begrænset luftcirkulation i rummet, da lokalet ikke benyttes til andre formål og der derfor ikke befinder sig mennesker, der ville kunne skabe noget cirkulation. Derved opnås en meget stillestående luft i lokalet, og overgangsisolansen vokser.

#### **Reviderede R-værdier**

Ved enkelte af forsøgene hvor der er placeret en temperaturmåler på hver overflade af et lag, er det muligt på baggrund af den målte temperaturforskel samt varmestrømstætheden, at bestemme en nøjagtig værdi for varmeledningsevnen for et materiale under de givne forhold.

Isolansen for et lag kan opskrives som

$$R = \frac{\Delta T}{q} \tag{0.101}$$

I forsøget med A-murbatts med reflekterende overflader, er der placeret temperaturmålere på hver side af mineralulden. I kombination med varmestrømstætheden er det derved muligt at beregne en R-værdi for mineralulden. Den bedste præcision opnås ved et større temperaturspænd, da afrunding og målefejl vil påvirke små temperaturspænd mere. Derfor vælges netop denne forsøgsopstilling.

Temperaturen på hver side er henholdsvis T<sub>1</sub> = 1,3 °C og T<sub>2</sub> = 23,9 °C. Varmestrømmen er målt til 8,754 W/m<sup>2</sup>.

$$R = \frac{\Delta T}{q} = \frac{23,9^{\circ}C - 1,3^{\circ}C}{8,754W/m^2} = 2,582(m^2K)/W$$
(0.102)

Med en tykkelse på 95 mm fås varmeledningsevnen til

$$\frac{0,095m}{2,581(m^2 \cdot K)/W} = 0,0368W/(m \cdot K)$$
(0.103)

Denne værdi ligger meget tæt på den opgivne på 0,037 W/(m⋅K).

Hermed er både beregningsmetoden og den opgivne varmeledningsevne af A-murbatts verificeret.

## 13.1. Fejlkilder

Ved alle forsøg kan der være fejlkilder som er med til at påvirke resultatet. Kender man disse fejlkilder kan man imidlertid forsøge at forhindre disse fejl. Derfor er det vigtigt tidligt i forløbet at gennemgå sine forsøgsopstillinger så fejlende kan rettes inden de opstår. Herunder er listet de væsentligste fejlkilder i forsøgsopbygningerne, og hvordan de er forsøgt undgået.

### Opbygningen:

Hulrum: Ved samling af forsøgskasserne er luftspalterne lavet ved hjælp af afstandslister som er skruet /tapet på Aluthermo isoleringen. Da isoleringen er sammentrykkelig er det ofte en vurderingssag om afstanden er præcis 9 mm. Aluthermo har en ujævn overflade som påvirker tykkelsen af luftspalten over hele overfladen. Vigtigst er det dog at der overhovedet er en luftspalte, således at de reflekterende overflader har en virkning på den termiske stråling. Dette kan sikres ved inspektion løbende under opbygningen.

**Lufttæthed**: For at kunne betragte luftspalterne som lukkede hulrum er det vigtigt at hulrummene er helt tætte. Selv små sprækker kan ændre forholdende for konvektion, således at en dårligere isolans opnås. Lufttæthed er forsøgt opnået ved at tape alle dele sammen, hvilket skulle lukke alle revner. Dette er også måden beskrevet i montagevejledningen for Aluthermo.

**Begrænsninger af måleudstyr**: Præcisionen af måleudstyret er beskrevet i afsnittet "Måleteknik". Forkert montering af termoelementer og varmestrømsmålere er ligeledes en kilde til fejl. Termoelementer skal have god kontakt med den overflade den måler. Varmestrømsmåleren skal ligeledes have god kontakt. Dette kan sikres med varmeledende pasta som sikrer optimal kontakt over hele fladen.

**Stationær tilstand kan ikke opnås**: Da forsøgshuset står i et klima som hele tiden forandrer sig, er det umuligt at opnå en fuldstændigt stationær tilstand. Idet temperaturen ændrer sig på den ene side af væggen, vil varmestrømmen tilpasse sig efter lidt tid. Men der har temperaturen igen ændret sig, og sådan fortsætter det. U-værdien, som beregnes ved hjælp af temperaturforskel og varmestrøm, vil derfor hele tiden være lidt ved siden af. Afvigelsen er forsøgt udlignet ved at tage en gennemsnitlig U-værdi af mange målinger.

## 14. Diskussion

## 14.1. Dokumentation af U-værdi

Aluthermo Quattro har ifølge salgsmaterialet en isolans på R = 5,70 m<sup>2</sup>K/W. Dette svarer til lidt over 210 mm Rockwool A-murbatts. På Aluthermo's hjemmeside, aluthermo.dk, ligger adskillige dokumenter der kan belyse hvorledes dette tal er fremkommet, samt troværdigheden af den påståede isolans.

For at kende forudsætningerne, er det vigtigt at vide hvorledes produktet skal monteres. Bilag 6 viser nogle få anvendelsesmuligheder. Flere kan ses på hjemmesiden. Det noteres, at Aluthermo Quattro monteres på spærene, hvorefter lægter og derefter tag monteres. Oversiden af Aluthermoen er ventileret til det fri, hvilket også er beskrevet i salgsmaterialet som udleveres på papir (ikke vedlagt). Undersiden af Aluthermoen vender direkte mod det (formodede) opvarmede luftrum. Det kan derfor forventes at der vil forekomme en betydelig naturlig konvektion i loftrummet.

Ovenstående betragtninger er afgørende for gennemgangen af det, der af Aluthermo beskrives som "dokumentation af effekt" på deres hjemmeside. Se bilag 7. Dokumentet vil ikke blive gennemgået fra start til slut. I stedet fokuseres på den mest betydningsfulde fejl i materialet.

For at beregningsgangen kan følges, er denne vist i et Maple worksheet, se bilag 12. Dette regnedokument er opbygget på nøjagtig samme måde, som de resterende. Eneste forskel er udregningen af Nusselt-tallet, der her bygger på udtrykket for en skrå konstruktion. Resultatet er det samme som dokumentationen viser, hvilket bekræfter at beregningsmetoden er den samme. Denne er dog præget af fejlagtige antagelser.

Den afgørende fejl er forudsætningen af at varmeoverførslen udelukkende foregår ved stråling. Dette beskrives i afsnit '3. Betingelsesligninger'. En meget fordelagtig antagelse for Aluthermo, men også direkte forkert. Som beskrevet adskillige gange tidligere i rapporten, foregår varmeoverførslen i hulrum altid ved stråling, konvektion og ledning. Betydningen af at negligere konvektion og ledning vil senere blive belyst ved et beregningseksempel med alle varmetransportmekanismer inkluderet.

Bilag 6, side 2, viser ventilationshuller i tagpladerne. Det forventes altså at isoleringen er ventileret på oversiden, hvilket også er et krav i det udleverede papirmateriale. Dette modsiger fuldstændigt antagelserne i dokumentationen.

For at forstå betydningen af konvektion og ledning i dette regningseksempel, er opstillet en model som også indeholder dette. Beregningerne er foretaget i Excel og kan ses i bilag 13. Resultatet tegner et helt andet billede af Aluthermo Quattro. Der er brugt de optimale betingelser for Aluthermo, idet følgende forenklinger er lavet med fordel for Aluthermo: • Ingen tvungen konvektion

Oversiden af isoleringen er udelukkende påvirket af naturlig konvektion. Tvungen konvektion havde haft stor betydning for isolansen, som ville falde markant.

• Afskærmet loftrum

I stedet for at følge anvisningen i brochuren, følges i stedet dokumentationen som beskriver en bagplade. Hulrummet er således på 4 cm.

- Gipsplader bidrager til isolans
   Gipspladernes isolans er medregnet på begge sider af isoleringen. Da vi får beregnet en Uværdi, vil det være mest korrekt at medregne alle isolanser
- Overgangsisolans medtages
   Overgangsisolansen er heller ikke medtaget i dokumentationen. Denne skal naturligvis også regnes med.

Med ovenstående forudsætninger, som alle er til fordel for Aluthermo, er den samlede isolans, R<sub>12</sub> = 1,350. U-værdien bliver således U = 0,741. R-værdien for opsætningen beregnet i den udarbejdede beregningsmodel er altså over 4 gange dårligere end angivet af Aluthermo.

Ud fra disse tal er det mere end svært at acceptere de fejlagtige beregninger som ligger til grund for den påståede U-værdi.

## 14.2. Besparelse i forhold til Rockwool

Indtil videre er effekten af Aluthermo Quattro blevet vurderet i forhold til producentens påståede Uværdi. Det er mindst lige så aktuelt at vurdere, om en lavere U-værdi kan opnås med Aluthermoen end ved rockwool. Forudsætningen her er, at væggen skal have samme tykkelse. Med udgangspunkt i de allerede definerede forsøg, undersøges dette ved at erstatte hulrum og Aluthermo med Rockwool. Der bruges samme type Rockwool, A-murbatts, som ved tidligere forsøg.

figur 36 viser varmestrømstætheden gennem en væg med 1 lag Aluthermo, og den tilsvarende væg fyldt med Rockwool, som funktion af temperaturdifferensen, ΔT. T1 fastholdes på 0 °C mens T2 øges. Flere interessante ting kan ses af figuren. Varmestrømstætheden med Aluthermo er over hele det plottede interval lavere end den tilsvarende varmestrømstæthed for Rockwool. Hvad angår pladsudnyttelse, er Aluthermo altså bedre, hvis de kun vurderes på U-værdi. U-værdien er naturligvis lavere hvis varmestrømstætheden er lavere ved samme ΔT. Andre vurderingsgrundlag kommenteres senere.

### Varmestrømstæthed 1 Lag Aluthermo





En anden ting, der skal bides mærke i er, at varmestrømstætheden for Aluthermo udvikler sig eksponentielt. For at fremhæve dette, viser figur 37 forskellen mellem q for de 2 tænkte opstillinger. Af denne figur kan endnu flere ting belyses. Først og fremmest ses den eksponentielle udvikling af q for Aluthermo, idet Rockwool udvikler sig lineært. Samtidig gives et billede af optimeringens størrelse. Det forventes at den største forbedring sker ved ca. 65 °C temperaturdifferens. Besparelsen her, målt i varmestrømstæthed, er omkring 3,5 w/m<sup>2</sup> ved en samlet q på ca. 50 w/m<sup>2</sup>. En optimering på ca. 7 %.

I Danmark vil ΔT aldrig nå op på 65 °C. Ved mere realistiske 10-30 °C difference er besparelsen 1-2,5 w/m<sup>2</sup>, eller 8-10 %.



## Varmestrømstæthed difference

figur 37. Differencen i varmestrømstætheden for A-murbatts og 1 lag Aluthermo som funktion af temperaturforskellen.

Billedet er det samme for de øvrige forsøg i rapporten. Bilag 14 indeholder tilsvarende grafer for 2 lag og 8 lag Aluthermo, samt mineraluld med refleksiv overflade og hulrum. Tendensen for de øvrige forsøg er, at jo flere lag, jo mindre besparelse. Skal man derfor op i mange lag, vil besparelsen skrumpe ind. Det samme gælder ved temperaturdifferencer over 65 °C. Besparelsen mht. varmestrømstæthed er forsvindende lille ved forsøget med Rockwool og refleksive overflader.

Ovenstående betragtninger tager ikke højde for prisen. Prisen er ofte afgørende for, hvilken type isolering man vælger. Den langsigtede pris afhænger af levetiden og isoleringsevnen, samt muligheden for udskiftning. Da levetiden for Aluthermo Quattro ikke kendes, og ikke kan skønnes ud fra leverandørens oplysninger, vil den langsigtede pris ikke blive behandlet. Til gengæld kendes indkøbsprisen for begge materialer. A-murbatts findes ikke i denne lille tykkelse, derfor sammenlignes med en Flexi A-Batts 45 mm. Den har bedre isolans end 29,2 mm A-murbatts.

Umiddelbart en fordel for Aluthermo, da et tyndere produkt sandsynligvis havde været billigere.

Pris for 1 lag Aluthermo Quattro pr. m<sup>2</sup> inkl. Moms.: 148,75,-<sup>22</sup>

Pris for Flexi A-batts 45 mm pr. m<sup>2</sup> inkl. Moms.: 15,27,-<sup>23</sup>

På trods af, at Rockwool yder en bedre isolans, koster den kun ca. 1/10 af Aluthermo Quattro.

Prisen pr. m<sup>2</sup> øges heller ikke lige med tykkelsen. Nedenfor er eksemplet lavet for 8 lag Aluthermo:

Pris for 8 lag Aluthermo Quattro pr. m<sup>2</sup> inkl. Moms.: 1190,-

Pris for Flexi A-batts 170 mm pr. m<sup>2</sup> inkl. Moms.: 59,38,-

Prisen for denne løsning er altså 20 gange dyrere i indkøb.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Priser fra <u>www.2tbyg.dk</u> pr. 22. december

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Priser fra www.billigbyg.dk pr. 22 december
## 15. Konklusion

Beregninger af isolansen af Aluthermo Quattro i beregningsmodellen fra Excel viser en markant ringere R-værdi end den producentens salgsmateriale fortæller. Fejlen viser sig at bero på fejlagtige antagelser i producentens dokumentationsberegninger. Forsøgsopstillingen med 1 lag Aluthermo bekræftede den forventede ringe isolans. Diskussionsafsnittet viser at Aluthermo Quattro isolerer marginalt bedre end Rockwool ved samme vægtykkelse. Til gengæld koster den refleksive isolering langt mere, hvilket betyder at Aluthermo Quattro ikke er pengene værd som almindelig bygningsisolering med mindre specielle forhold gør sig gældende.

Måleusikkerheden på den søgte U-værdi i forsøgene blev bestemt til  $\pm 0,0044$  W/m<sup>2</sup>, så målemetoden er bestemt anvendelig i den benyttede udformning.

Forsøg på at optimere isolansen, i forhold til tykkelsen af væggen gav samme problemstilling som nævnt ovenfor. Isolansen var marginalt bedre ved flere lag Aluthermo og opnåede højest en forbedring på varmestrømstætheden på 3,5 W/m<sup>2.</sup>. Den største effekt af refleksiv isolering opnås ved store temperaturdifferencer og denne maksimale opnåelige effekt indtraf ved netop en temperaturforskel på 60 °C, hvilket er uopnåeligt under danske klimatiske forhold. Desuden er materialeomkostningerne meget højere når væggen isoleres med Aluthermo i forhold til almindelig mineraluldsisolering.

Forsøg med kombinationen af reflekterende overflader almindelig A-Murbatts bekræftede ligeledes de teoretiske beregninger for isolansen. Isolansen var tilnærmelsesvis ens ved forsøg med reflekterende overflader og hulrum i forhold til at fylde hele væggen med A-murbatts. Der er således mulighed for at spare isolering svarende til hulrummene, her 18 mm. Besparelsen vil dog være begrænset omregnet i kroner og ører.

Grundlæggende isolerer Aluthermo marginalt bedre end den tilsvarende tykkelse mineralisolering og er et alternativ hvis der ikke er mulighed for store isoleringstykkelser. Kombinationen af flere lag Aluthermo har tilsvarende effekt, men her er der stor risiko for fugtproblemer som følge af flere diffusionstætte lag.

Tanken om reflekterende overflader som en del af isoleringen i boliger er derfor realistisk, men produkterne på det danske marked er endnu ikke gode nok til at kunne konkurrere med den dominerende og væsentlige billigere masseisolering.

## 16. Litteraturliste

### Bøger

Isachenko, V., 1969, Heat transfer, Mir publishers, Moskva,

Schmidt, F.W., 1993, Introduction to thermal sciences : Thermodynamics. Fluid dynamics. Heat transfer, Wiley, New York.

Kays, W.M., 1993, Convective heat and mass transfer, McGraw-Hill., New York

Muralidhar, K., 1995, Computational fluid flow and heat transfer, Narosa, New Delhi

Blomberg. T., 1996, Heat conduction in two and three dimensions : Computer modelling of building physics applications, Lund

Hansen, H.E m.fl., 2006, Varme- og Klimateknik, Danvak, Vojens

Kreith, F., 1986, Principles of heat transfer, Harper and Row, Cambridge

#### Undervisningsnotater

Petersen, B.H., 2002, Stationær Varmetransmission, BYG•DTU

Gudum, C. og Rode, C., 1998 (Rev. 2005), Stråling, BYG•DTU

Rode, C., 1998 (Rev. 2005) Varmetransmission ved konvektion, BYG•DTU

Rode, C., 1998, Fugttransport, BYG•DTU

Rode, C., 2010 Varmetransmission, BYG•DTU

#### Artikler

Rode, C. og Dufour, J. Designværdier for isoleringsmaterialers varmeledningsevne, publiceret i Danvak Magasinet nr. 11. 2001

#### Hjemmesider:

SBI

http://www.sbi.dk/miljo-og-energi/energibesparelser/sadan-kan-der-spares-energi-i-bygninger - Citeret 2. januar 2011

Aluthermo http://www.aluthermo.dk/ 17. Bilag

# Appendix

På medfølgende Cd-rom findes rapporten i digitalt format. Derudover findes:

- Bilag digitalt
- Fotodokumentation af projektarbejdet
- Data fra målinger