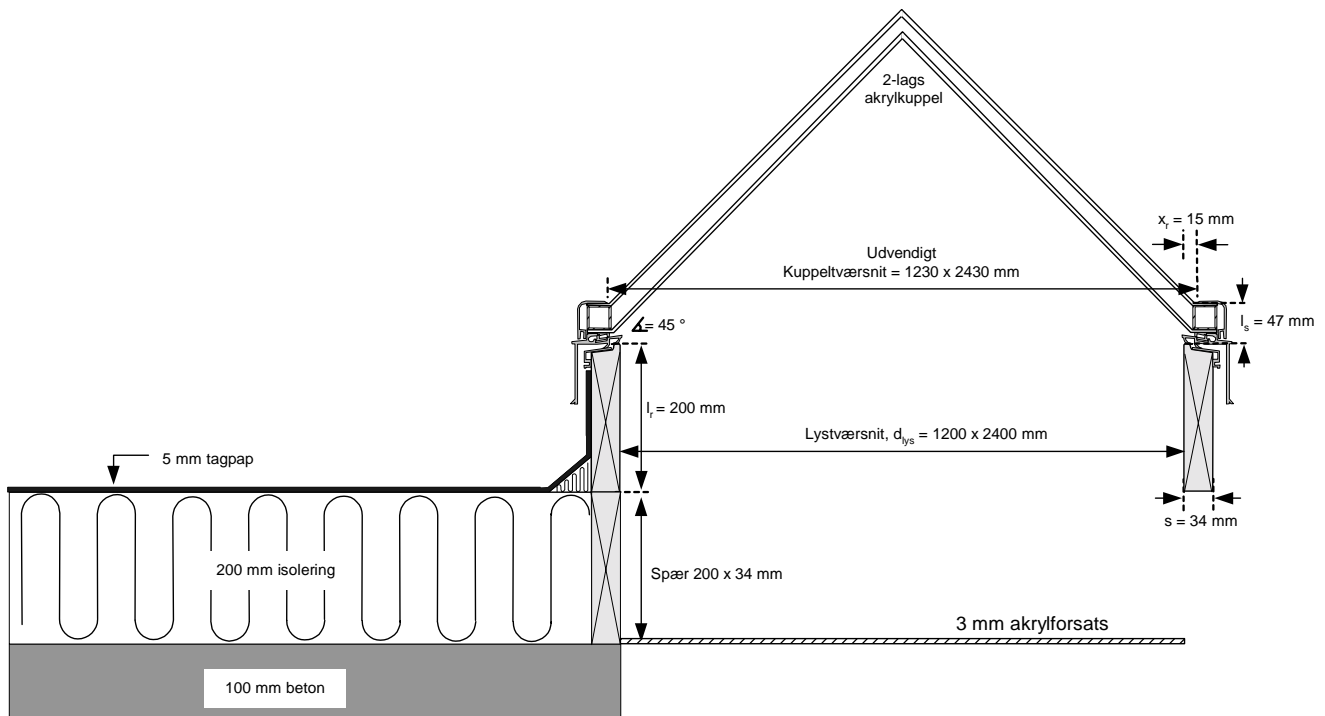


Bilag 1: Beregningseksempel

Nærværende bilag har til formål at vise beregningsproceduren for ovenlys med opdelt hulrum. Der anvendes til eksemplet et specifikt ovenlysprofil med en forsatsløsning som gennemregnes og dokumenteres. Det beregnede ovenlys har et indvendigt lysmål på (L x B) 2400 mm x 1200 mm, hvilket giver et lysareal $A_{lys} = 2,88 \text{ m}^2$.

Den anvendte kuppel er en 2-lags akrylkuppel formet som en aflang pyramide, med en vinkel på 45° fra vandret. Profilet er udført med en standard trækarm på $34 \times 200 \text{ mm}$ ($s \times l_r$), monteret med en 2-delt aluramme.

Nedenstående figur illustrerer opbygningen af det anvendte ovenlys, med angivelse af dimensioner og materialevalg.



Figur 1 Tværsnit af ovenlys med akrylforsats, med angivelse af de benyttede dimensioner

Beregning af arealer og længder

Til start beregnes ovenlysets arealer, samt længder tilhørende de lineære transmissionskoefficienter, som anvendes under beregningerne.

Der anvendes i beregningerne to definitioner af perimeterlængder kaldet, l_{ψ_1} og l_{ψ_2} . Perimeteren l_{ψ_1} er baseret på det indvendige lysareal:

$$l_{\psi_1} = 2 \cdot (L + B) = 2 \cdot (2,4 + 1,2) = 7,2 \text{ m}$$

$l_{\psi 2}$ er perimeteren af kuplens grænse til samlingen med rammen. Praktisk beregnes $l_{\psi 2}$ som perimeteren af det indvendige karmmålt med et tillæg, x_r .

$$l_{\psi 2} = 2 \cdot (L + B + 4 \cdot x_r) = 2 \cdot (2,4 + 1,2 + 4 \cdot 0,015) = 7,32 \text{ m}$$

Af arealer anvendes der for ovenlys med opdelt hulrum to arealbetrægtninger. De to arealer er baseret på hhv. indvendigt lysareal der regnes som:

$$A_{l_{ys}} = L \cdot B = 2,4 \cdot 1,2 = 2,88 \text{ m}^2$$

Og udvendigt varmetransmitterende areal A' der beregnes som $A' = A_g + A_r + A_s$. De tre delarealer findes som:

A_g er det udvendige areal af kuplen baseret på målene fra det indvendige lysareal plus rammetillægget, x_r . Der findes ikke en generel ligning til udregning af arealet, som afhænger af ovenlysets design. Arealet er regnet som værende en aflang pyramide med grundmålene 2430 mm x 1230 mm med en hældning på 45° fra vandret.

$$A_g = 4,23 \text{ m}^2 \text{ (fundet ved simpel geometribetrægtning af aflangpyramide)}$$

Arealet af den øvre trækarm med kontakt til udeklimaet regnes som:

$$A_r = 2 \cdot (L + B + 4 \cdot s) \cdot l_r = 2 \cdot (1,2 + 2,4 + 4 \cdot 0,034) \cdot 0,2 = 1,49 \text{ m}^2$$

Arealet af samlingen, som medregnes i det udvendige varmetransmitterende areal, regnes som:

$$A_s = 2 \cdot (L + B + 4 \cdot s) \cdot l_s = 2 \cdot (1,2 + 2,4 + 4 \cdot 0,034) \cdot 0,047 = 0,35 \text{ m}^2$$

Det totale udvendige varmetransmitterende areal findes derved til.

$$A' = 6,07 \text{ m}^2$$

Opbygning af model

Det anvendte ovenlys opbygges i simuleringssprogrammet "Therm" til gennemførelse af de nødvendige beregninger. Karm, ramme og samling opbygges efter det oprindelige design og indbygges i tagkonstruktionen. Der medtages som minimum et homogent udsnit af taget på 500 mm. Udsnit af hhv. kuppel og forsats l_g , og l_f , medtages i et omfang så der opnås én-dimensionelle varmestrømme.

Transmissionskoefficienten, U_g , for kuplen beregnes iht. DS 418/Til 1, 1.udg. 1997 "Beregning af bygningers varmetab. Tillæg omhandlende vinduer og yderdøre", hvor U-værdien korrigeres for anvendelse af akryl i stedet for glas, dvs. isolansen af akrylpladerne erstatter isolansen for tilsvarende plader af glas.

Værdien aflæses for en rude med en 45° hældning til $U_{g,glas} = 2,95 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Der korrigeres for anvendelsen af akryl:

$$U_g = \left(2,95^{-1} - 2 \cdot \frac{0,003}{1} + 2 \cdot \frac{0,003}{0,2} \right)^{-1} = 2,75 \text{ W/m}^2\text{K}$$

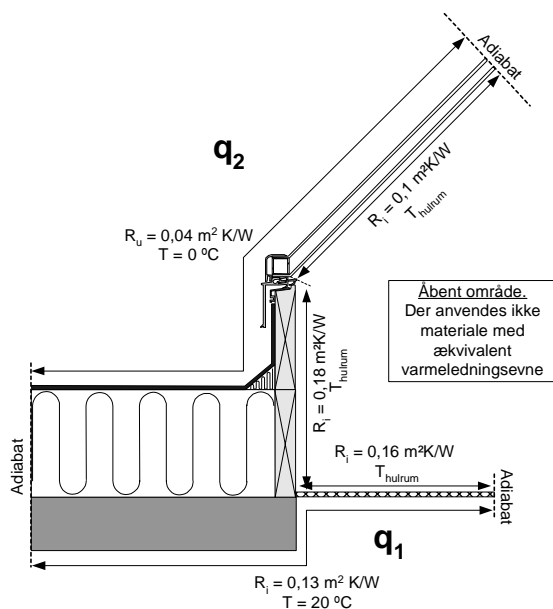
Kuplens isoleringsevne implementeres i beregningsmodellen ved at indsætte en ækvivalent varmeledningsevne i hulrummet:

$$\lambda_{\text{æk}} = \frac{d_g}{U_g^{-1} - R_i - R_u - 2R_{\text{plade}}}$$

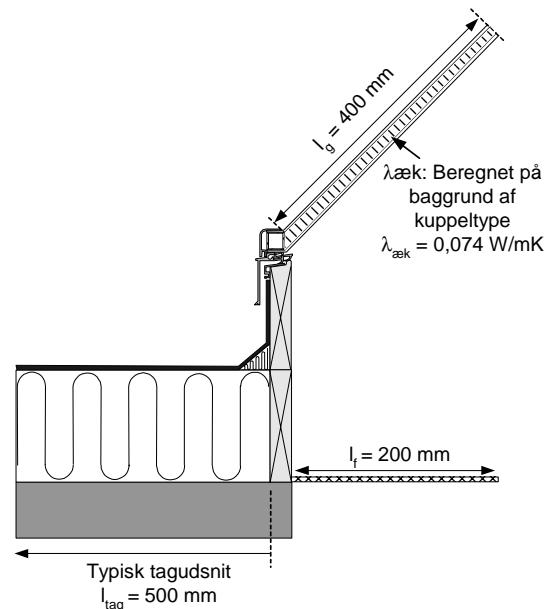
$$\lambda_{\text{æk}} = \frac{0,014}{2,75^{-1} - 10^{-1} - 23^{-1} - 2 \frac{0,003}{0,2}} = 0,074 \text{ W/mK}$$

Modellen opbygges i beregningsprogrammet, under anvendelse af de udregnede dimensioner, den ækvivalente varmeledningsevne af kuplen, samt under anvendelse af randbetingelserne foreskrevet i beregningsproceduren.

Modellen er vist i nedenstående figurer



Figur 2 Randbetingelser



Figur 3 Anvendte dimensioner

Beregninger af varmestrømme

Beregninger på ovenlys med opdelt hulrum kræver kendskab til hulrumstemperaturen for at eksakte energimærkningsdata kan udregnes. Beregningen af T_{hulrum} findes på baggrund af en varmebalance som indeholder forskellige led hvori T_{hulrum} indgår. De enkelte led findes derfor i første omgang, hvorved varmebalancen kan opstilles.

Alle beregninger er foretaget for $T_{hulrum} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ for at demonstrere beregningsprincippet. Det pointeres at dette ikke er ligevægtstemperaturen.

Varmestrøm gennem homogent tagudsnit

Den én-dimensionelle varmestrøm gennem det homogene tag, U_{tag} findes enten ved en simpel beregning, eller udsnittet kan modelleres i "Therm".

Taget består af:

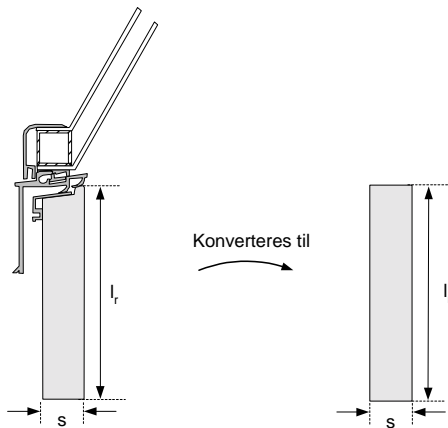
1. 5 mm tagpap, $\lambda = 0,2 \text{ W/mK}$
2. 200 mm isolering, $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$
3. 100 mm beton, $\lambda = 1,6 \text{ W/mK}$

Varmetransmissionskoefficienten beregnes til:

$$U_{tag} = 0,1857 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Beregning af transmissionskoefficienten, U_r , for karm

Beregning af karmens transmissionskoefficient foretages ved at opbygge en simpel model af karmen for et homogent udsnit, som vist på figur 4.



Figur 4 Definition af én-dimensionel varmestrøm gennem karm

Karmens transmissionskoefficient, U_r , beregnes til:

$$U_r = \left(5,56^{-1} + 23^{-1} + \frac{0,034}{0,13} \right)^{-1} = 2,06 \text{ W/m}^2$$

Transmissionskoefficient for kuppel/forsats

Transmissionskoefficienten, U_f , for forsatsanordningen beregnes ud fra kendskab til varmeoverføringskoefficienter og det anvendte materiale. Der er i eksemplet anvendt 3 mm akryl:

$$U_f = \left(6,25^{-1} + 8^{-1} + \frac{0,003}{0,2} \right)^{-1} = 3,33 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Beregninger foretaget ved indvendig betragtning

Den indvendige lineære varmetransmissionskoefficient, Ψ_1 , findes på baggrund af de anvendte randbetingelser på $T_i = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ og $T_u = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ og den senere beregnede temperatur af hulrummet. Beregningen er her udført med en hulrumstemperatur på $8 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\psi_1(T_{\text{hulrum}}) = \frac{(U_{\text{tot}} \cdot l_{\text{tot}})_1 \cdot (T_i - T_u) - U_{\text{tag}} \cdot l_{\text{tag}} \cdot (T_i - T_u) - U_f \cdot l_f \cdot (T_i - T_{\text{hulrum}})}{(T_i - T_{\text{hulrum}})}$$
$$\psi_1(8^\circ\text{C}) = \frac{(0,6732 \cdot 0,834) \cdot (20 - 0) - 0,1857 \cdot 0,5 \cdot (20 - 0) - 3,33 \cdot 0,2 \cdot (20 - 8)}{(20 - 8)} = 0,1143 \text{ W/mK}$$

hvor $(U_{\text{tot}} \cdot l_{\text{tot}})$ er den samlede varmestrøm, der beregnes i "Therm" og som udskrives som separate U_{tot} - og l_{tot} - værdier.

Beregninger foretaget ved udvendig betragtning

Den udvendige lineære transmissionskoefficient, ψ_2 , findes som:

$$\psi_2(T_{\text{hulrum}}) = \frac{(U_{\text{tot}} \cdot l_{\text{tot}})_2 \cdot (T_i - T_u) - U_{\text{tag}} \cdot l_{\text{tag}} \cdot (T_i - T_u) - U_r \cdot l_r \cdot (T_{\text{hulrum}} - T_u) - U_g \cdot l_g \cdot (T_{\text{hulrum}} - T_u)}{(T_{\text{hulrum}} - T_u)}$$
$$\psi_2(8^\circ\text{C}) = \frac{(0,5871 \cdot 1,259) \cdot (20 - 0) - 0,1857 \cdot 0,5 \cdot (20 - 0) - 2,06 \cdot 0,2 \cdot (8 - 0) - 2,75 \cdot 0,4 \cdot (8 - 0)}{(8 - 0)}$$
$$\psi_2(8^\circ\text{C}) = 0,101 \text{ W/mK}$$

Den lineære transmissionskoefficients afhængighed af T_{hulrum}

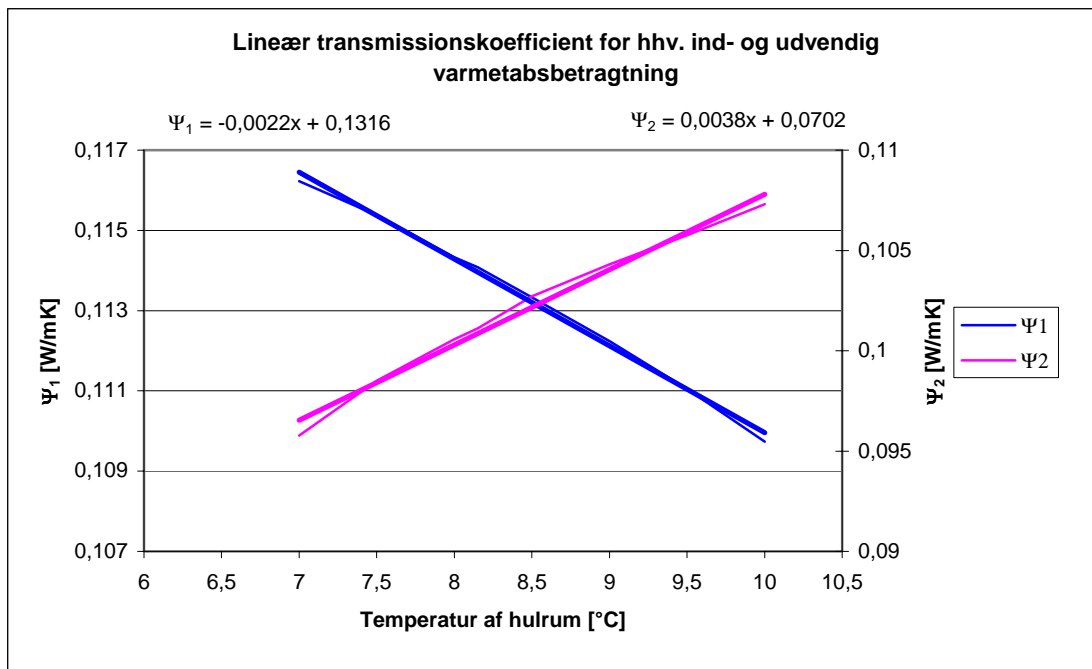
Resultaterne fra de viste beregninger, samt fra beregningerne foretaget ved de andre hulrumstemperaturer, anvendes til at opskrive den generelle sammenhæng mellem hulrumstemperaturen og de lineære transmissionskoefficienter. Der er i dette tilfælde foretaget beregninger i intervallet 7 °C – 10 °C.

Følgende resultater er fremkommet:

Tabel 1 Ψ_1 og Ψ_2 som funktion af hulrumstemperaturen

T_{hulrum}	7 °C	8 °C	9 °C	10 °C
Ψ_1	0,116 W/mK	0,0,114 W/mK	0,112 W/mK	0,110 W/mK
Ψ_2	0,096 W/mK	0,101 W/mK	0,104 W/mK	0,107 W/mK

Resultaterne er afbilledet i nedenstående figur:



Figur 5 ψ_1 og ψ_2 som funktion af hulrumstemperaturen, samt angivelse af tilhørende lineære ligninger

Som det se er der en god lineær sammenhæng. Ψ_1 og Ψ_2 kan, som angivet i figuren, beskrives ud fra ligningerne.

$$\psi_1 = -0,0022 \cdot T_{hulrum} + 0,1316$$

og

$$\psi_2 = 0,0038 \cdot T_{hulrum} + 0,0702$$

Ligevægtstemperaturbestemmelse

For at finde de endelige varmetekniske egenskaber af det betragtede ovenlys skal T_{hulrum} findes som funktion af ovenlysets størrelse. Dvs. at nedenstående ligning altid skal løses for T_{hulrum} hvis de lineære transmissionskoefficienter og den samlede varmetransmissionskoefficient skal bruges for andre dimensioner af ovenlyset end de her anvendte 1,2 m x 2,4 m.

$$U_f \cdot A_{lys} \cdot (T_i - T_{hulrum}) + (a \cdot T_{hulrum} + b)_{\psi_1} \cdot l_{\psi_1} \cdot (T_i - T_{hulrum}) = \\ U_g \cdot A_g \cdot (T_{hulrum} - T_u) + U_r \cdot A_r \cdot (T_{hulrum} - T_u) + (a \cdot T_{hulrum} + b)_{\psi_2} \cdot l_{\psi_2} \cdot (T_{hulrum} - T_u)$$

Eller med de kendte størrelser:

$$3,33 \cdot 2,88 \cdot (20 - T_{hulrum}) + (-0,0022 \cdot T_{hulrum} + 0,1316)_{\psi_1} \cdot 7,2 \cdot (20 - T_{hulrum}) = \\ 2,75 \cdot 4,23 \cdot (T_{hulrum} - 0_u) + 2,06 \cdot 1,49 \cdot (T_{hulrum} - 0) + (0,0038 \cdot T_{hulrum} + 0,0702)_{\psi_2} \cdot 7,32 \cdot (T_{hulrum} - 0)$$

Ligningen løses for T_{hulrum} , der bestemmes til 8,05 °C.

Hvis energimærkningsdata ønskes for det specifikke ovenlysprofil med den anvendte forsatsløsning i andre dimensioner, løses ovenstående ligning blot med anvendelse af nye arealer og perimeter størrelser.

Resultater

Under anvendelse af den beregnede ligevægtstemperatur, og de tidligere beskrevne sammenhænge beregnes de endelige resultater for ovenlyset, påsat en 3 mm akrylforsats, i dimensionen 1,2 x 2,4 m.

Indvendigt

Den lineære transmissionskoefficient, Ψ_1 , findes som:

$$\psi_1 = -0,0022 \cdot 8,05 + 0,1316 = 0,114 \text{ W/mK}$$

Den samlede varmestrøm, Q_1 , findes som:

$$Q_1 = U_f \cdot A_{lys} \cdot (T_i - T_{hulrum}) + (a \cdot T_{hulrum} + b)_{\psi_1} \cdot l_{\psi_1} \cdot (T_i - T_{hulrum}) \\ Q_1 = 3,33 \cdot 2,88 \cdot (20 - 8,06) + (-0,0022 \cdot 8,06 + 0,1316)_{\psi_1} \cdot 7,2 \cdot (20 - 8,06) = 124,5 \text{ W}$$

Varmetransmissionskoefficienten, U , baseret på lysarealet findes som:

$$U = \frac{Q_1}{A_{lys} \cdot (T_i - T_u)} = \frac{124,5}{2,88 \cdot (20 - 0)} = \underline{\underline{2,16 \text{ W/m}^2\text{K}}}$$

Udvendigt

Den lineære transmissionskoefficient, Ψ_2 , findes som:

$$\psi_2 = 0,0038 \cdot 8,05 + 0,0702 = 0,101 \text{ W/mK}$$

Den samlede varmestrøm, Q_2 , findes som:

$$Q_2 = U_g \cdot A_g \cdot (T_{hulrum} - T_u) + U_r \cdot A_r \cdot (T_{hulrum} - T_u) + (a \cdot T_{hulrum} + b)_{\psi_2} \cdot l_{\psi_2} \cdot (T_{hulrum} - T_u)$$

$$Q_2 = 2,75 \cdot 4,23 \cdot (8,05 - 0_u) + 2,06 \cdot 1,49 \cdot (8,05 - 0) + (0,0038 \cdot 8,05 + 0,0702)_{\psi_2} \cdot 7,32 \cdot (8,05 - 0) = 124,5 \text{ W}$$

Varmetransmissionskoefficienten, U , baseret på lysarealet findes som:

$$U = \left(\frac{Q_2}{A' \cdot (T_i - T_u)} \right) = \frac{124,5}{6,07 \cdot (20 - 0)} = \underline{\underline{1,03 \text{ W/m}^2\text{K}}}$$

Hvor

A' totale udvendige varmetransmitterende areal