

BYG · DTU

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET



Henrik Tommerup

Energibesparelse for ”Ventilationsvinduet”

Sagsrapport
BYG · DTU SR-05-01
2005
ISSN 1601 - 8605

Forord

Denne sagsrapport er udarbejdet af BYG-DTU i januar 2005 for firmaet PC Vinduer og Døre A/S.

Konklusion

Energiberegninger på en prototype af Ventilationsvinduet (1,23 x 1,48 m) med almindelige ventiler og en konstant luftstrøm på 20 m³/h viser, at der kan opnås en årlig energibesparelse på 95 kWh for en sydvendt placering, når referencen er et tilsvarende vindue med almindelige friskluftventiler og med samme konstante luftstrøm, men ingen forvarmning af den tilførte udeluft. Energibesparelsen er omkring 85-90 kWh for øst, vest og nordvendte vinduer.

Sammenlignes referencen med Ventilationsvinduet med automatiske ventiler og variabel luftstrøm på 8-25 m³/h afhængig af den opnåelige indblæsningstemperatur, hvor luftstrømmen er væsentligt reduceret på især kolde og solfattede dage, viser beregningerne at energibesparelsen er ca. 425 kWh for alle fire hovedorienteringer af vinduet.

De ovenfor angivne energibesparelser er baseret på beregninger af U- og g-værdierne for hver enkelt time i fyringssæsonen. De beregnede gennemsnitlige værdier for fyringssæsonen er angivet nedenfor:

Vindue	Reference	Ventilationsvinduet Automatiske ventiler	Ventilationsvinduet Almindelige ventiler
U_{trans} [W/m ² K]	1,79	2,15	2,44
U_{vent} [W/m ² K]	6,24	1,77	4,75
$g_{direkte}$ [-]	0,31	0,32	0,33
g_{diffus} [-]	0,65	0,66	0,67

Energibesparelsen for Ventilationvinduet er betragtelig, da referencen er dårlig (ingen varmegenvinding på ventilationsluften). Referencen er dog rimelig set i forhold til at man ved vinduesudskiftning og nybyggeri oftest anvender mekanisk udsugning og traditionelle vinduer med almindelige friskluftventiler.

1 Formål

Formålet er at beregne den årlige energibesparelse for en prototype af ”Ventilationsvinduet” med automatisk spalteventiler i overkarm og standard CEN-mål (123x148cm) set i forhold til et tilsvarende Ventilationsvindue med almindelig ventiler og et traditionelt vindue med almindelig ventiler. Besparelsen beregnes på baggrund af detaljerede beregninger af de effektive U-og g-værdier inkl. effekt af ventilationsforhold samt beregninger af energitilskuddet ud fra vejrdata for fyringssæsonen.

Beregningerne udføres baseret på en model af ventilationsvinduet i programmet WIS (Window Information System) [1]. Der foretages beregninger af g- og U-værdierne for forskellige relevante kombinationer af solbestrålingsstyrke, udetemperatur og luftmængde, således at de nævnte tre tilfælde er dækket ind:

- A. Referencevindue: Traditionelt vindue med almindelige ventiler (konstant luftstrøm på 20 m³/h, ude-ind)
- B. Ventilationsvindue med automatiske ventiler (varierende luftstrøm på 8 – 25 m³/h / indblæsningstemperatur på 13,5 – 30,0 °C, ude-ind via mellemrum)
- C. Ventilationsvindue med almindelige ventiler (konstant luftstrøm 20 m³/h, ude-ind via mellemrum)

Regressionsudtryk for g og U findes vha. af programmet Datafit [2], hvor de relevante parametre indgår som udtrykkets variable. Udtrykkene for g og U benyttes herefter sammen med vejrdata fra det danske referenceår DRY (timeværdier) til at beregne det summerede energitilskud for fyringssæsonen for de tre nævnte tilfælde og fire hovedorienteringer af lodrette vinduer, således at den årlige energibesparelse kan bestemmes.

Det skal bemærkes at det kun er selve glasdelen af vinduet der behandles. Varmetabet fra ramme-karm delen vil tilnærmelsesvis være det samme i de undersøgte tilfælde, og beregnede energibesparelser vil derfor også omtrent gælde for vinduet som helhed.

2 Modellering

Prototypen af Ventilationsvinduet er udført som et Dannebrogsvindue med 4 indvendige og 4 udvendige udadgående rammer med stort luftmelletrum. Den udvendige ramme er forsynet med 3 mm kittet jernfattigt glas for optimal solenergitransmittans, den indvendige ramme er forsynet med 4 mm glas med en hård lavemissionsbelægning. Vinduets mål er 1,23 x 1,48 m (b x h), svarende til standard CEN-mål, og de tilsvarende transparente mål er 0,929 x 1,179 m.

Den transparente del af vinduet antages med bl.a. baggrund i udleverede tegninger at have følgende opbygning (udfra – ind):

3 mm jernfattigt glas (type Pilkington OptiWhite)
68 mm luftfyldt hulrum
4 mm lavenergi glas (type Pilkington K Glass)

Vinduet egenskaber i form af U- og g-værdierne ændrer sig med omgivelserne forhold svarende til temperatur, intensitet af og indfaldsvinkel for solstråling. Desuden vil størrelsen af luftmængden mellem glaslagene have betydning for egenskaberne.

2.1 Beregningsforudsætninger og definitioner i WIS

Beregningerne foretages som omtalt i programmet WIS [1].

Varmetabet i tilfælde med ventilerede hulrum beregnes i WIS som summen af tre bidrag:

Konvektive tab fra rummet til vinduessystemet (U_{conv})
Strålingsmæssige tab fra rummet til vinduessystemet (U_{ir})
Ventilationstab fra rummet til vinduessystemet (U_{vent})

U-værdierne defineres i WIS som mørke værdier, dvs. uden påvirkning af solstrålingen.

Varmetransmissionskoefficienten U_{trans} er summen af U_{conv} og U_{ir} , mens U_{vent} kan beskrives som den varmetilførsel, der er nødvendig for at opvarme den luft der forlader hulrummet (forvarmet) til indetemperatur. Det vil sige at genvindingseffekten af varmetransmissionstabt gennem ruden indgår i U_{vent} .

Varmetransmissionstabt beregnes ud fra nedenstående udtryk:

$$Q_{gl,trans} = (h_{ci} + h_{ri}) \cdot A_{gl} \cdot (T_i + T_{gl,i})$$

Hvor:

h_{ci} er konvektionskoefficienten indvendigt [W/m^2K]

h_{ri} er strålingskoefficienten indvendigt [W/m^2K]

A_{gl} er glasarealet [m^2]

T_i er indetemperaturen

$T_{gl,i}$ er overfladetemperaturen på indersiden af glasset [$^{\circ}C$]

Ventilationstabt beregnes ud fra nedenstående udtryk:

$$Q_{gl,vent} = \rho \cdot c_p \cdot q_v \cdot W \cdot (T_i - T_{gab,out})$$

Hvor:

ρ er densiteten af luft [kg/m^3]

c_p er den specifikke varmekapacitet af luft [J/kgK]

q_v er luftstrømmen i hulrummet pr. meter hulrum [$\text{m}^3/\text{s m}$]

W er bredden af hulrummet [m]

$T_{\text{gab,out}}$ er temperaturen af den forvarmede luft der forlader hulrummet.

U-værdierne beregnes i WIS ud fra temperaturforskellen mellem inde- og udetemperaturen (T_i og T_e). De to U-værdier defineres således:

$$U_{\text{trans}} = \frac{Q_{\text{gl,trans,dark}}}{A_{\text{gl}} \cdot (T_i - T_e)}$$

$$U_{\text{vent}} = \frac{Q_{\text{gl,vent,dark}}}{A_{\text{gl}} \cdot (T_i - T_e)}$$

Det skal bemærkes, at når der trækkes udeluft via hulrummet mellem glaslagene og ind i rummet, kortsluttes den isolerende effekt. I dette tilfælde vil den beregnede U-værdi afhænge betydeligt af udetemperaturen og luftmængden, som begge bestemmer varmemstrømmen fra rum til udeklima. Dette kan medføre meget høje U-værdier.

Det er vigtigt at forstå hvordan g-værdien (den total solenergitransmittans) er defineret, når der er ventilerede hulrum i vinduessystemet. g-værdien består af fire bidrag:

$$g = \tau_{\text{direct}} + g_{\text{conv}} + g_{\text{ir}} + g_{\text{vent}}$$

Hvor:

T_{direct} er den direkte transmitterede solstråling (direkte og diffus solstråling) gennem vinduessystemet

g_{conv} , g_{ir} og g_{vent} er de indirekte transmitterede solstrålingsbidrag.

Disse indirekte solstrålingsbidrag beregnes ud fra to beregninger:

Situation A: Uden solstråling. Alle temperaturer og varmemstrømme i systemet beregnes.

Situation B: Med solstråling. Alle temperaturer og varmemstrømme i systemet beregnes.

g_{conv} er defineret som forskellen mellem den konvektionsrelaterede varmemstrøm til rummet i situation B og situation A.

g_{ir} er defineret som forskellen mellem den strålingsrelaterede varmemstrøm til rummet i situation B og situation A.

g_{vent} er defineret som forskellen mellem den ventilationsrelaterede varmemstrøm til rummet i situation B og situation A.

Udeluftstrømmen gennem vinduet og til rummet i de to situationer A og B er konstant. Luften i hulrummet bliver opvarmet af solen i situation B og derfor vil varmemstrømmen til rummet pga. ventilationen være større i situation B end i situation A. Derfor vil g_{vent} være positiv og repræsenterer den andel af solenergien, der rammer vinduet, som transporteres ind i rummet i kraft af luftstrømmen i systemet.

De enkelte bidrag til g-værdien, idet konvektion og strålingsbidrag sammenlagt benævnes g_{trans} (transmitteret) kan beskrives ved følgende formler:

$$g_{direct} = \frac{Q_{gl,sol,direct,m.sol}}{A_{gl} \cdot I_{sol}}$$

$$g_{trans} = \frac{Q_{gl,trans,dark} - Q_{gl,trans,m.sol}}{A_{gl} \cdot I_{sol}}$$

$$g_{vent} = \frac{Q_{gl,vent,dark} - Q_{gl,vent,m.sol}}{A_{gl} \cdot I_{sol}}$$

I_{sol} er den udvendige solbestrælingsstyrke fra direkte, diffus og reflekteret solstråling.

3 Beregning af U- og g-værdier

Udgangspunktet for at kunne bestemme de energimæssige egenskaber er beregninger af U- og g-værdier for forskellige kombinationer af de parametre som U- og g-værdier afhænger af, svarende til udetemperatur, luftmængde, solbestrålingsstyrke og indfaldsvinkel for solstråling. I Tabel 1 er vist hvilke værdier af disse parametre, der er anvendt i beregningerne.

Tabel 1. Parametre der påvirker U- og g-værdierne og overordnede anvendte værdier for disse.

Parameter	Symbol	Enhed	Værdier
Indetemperatur	T_i	$^{\circ}\text{C}$	20
Udetemperatur	T_u	$^{\circ}\text{C}$	-20; -10; 0; 8; 20; 30
Luftmængde	q_v	m^3/h	8; 12; 16; 20; 25
Solbestrålingsstyrke	I	W/m^2	20; 200; 400; 700; 1000
Indfaldsvinkel	i	$^{\circ}$	0; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90

3.1 Referencevindue

Referencevinduet er et traditionelt vindue med almindelige friskluftventiler. Referencevinduet varmetekniske egenskaber kan beregnes i WIS ud fra en enkelt beregning (med luftmængde på $0 \text{ m}^3/\text{h}$). Resultatet af denne beregning fremgår nedenstående Tabel 2.

Tabel 2. Beregnede U-værdier for referencevinduet.

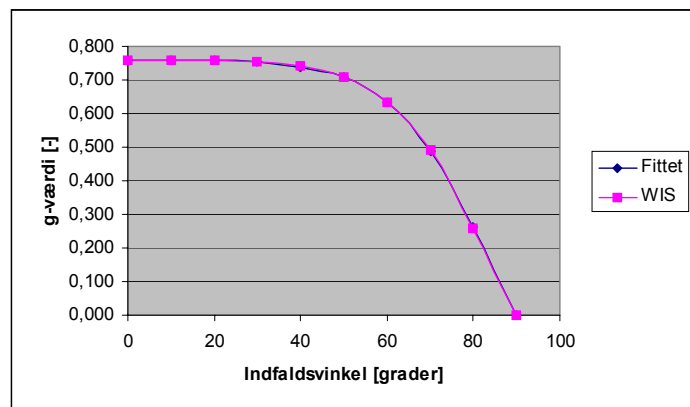
Uconv	0,702
Uir	1,090
Uvent	0,000
Utrans	1,792

Ventilationstabet beregnes ud fra sammen luftmængde som Ventilationsvinduet med almindelige ventiler og med konstant luftmængde svarende til $20 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabel 3. Beregnede g-værdier som funktion af indfaldsvinkel.

i	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Diffus
g	0.759	0.759	0.758	0.753	0.740	0.708	0.635	0.490	0.260	0.000	0.648

Der er behov for at finde et funktionsudtryk, der udtrykker sammenhængen mellem indfaldsvinkel og g-værdi på bedst mulig måde. En regressionsanalyse i programmet Datafit viser at et 6 grads polynomium er et passende funktionsudtryk, hvor afvigelser mellem de beregnede værdier og de ”fittede” værdier er lille - jf. Figur 1.



Figur 1. g-værdiens afhængighed af indfaldsvinklen, beregnet i WIS og Datafit.

3.2 Ventilationsvindue med variabel luftstrøm

Luftmængden bestemmes ud fra oplyste samhørende værdier af luftmængde og lufttemperatur (indblæsningstemperatur) på de forskellige friskluftmængder der tilføres gennem Ventilationsvinduet til det bagvedliggende rum, som resultat af den automatiske 3 vejs-ventil i vinduet (se Tabel 4). For indblæsningstemperaturer under 13,5°C antages en luftmængde på 8 m³/h.

Tabel 4. Forudsatte samhørende værdier af luftmængde og lufttemperatur/indblæsningstemperatur på den friske luft, der ledes ind i bunden af kassevinduet, op gennem luftmellemrummet og videre ind i bygningen.

q _v [m ³ /h]	8	12	16	20	22,5	25
T _{ind} [°C]	13,5	16,7	19,8	23	26,5	30

Luftmængden afhænger altså af indblæsningstemperaturen, som afhænger af udetemperaturen (T_u) og solbestrålingsstyrken (I_{sol}).

For at bestemme et funktionsudtryk er der foretaget beregninger for forskellige solbestrålingsstyrker og luftmængder. For hver kombination af disse to parametre er udetemperaturen tilpasset så den tilhørende indblæsningstemperatur opnås. Der er efterfølgende foretaget regressionsanalyser, der har resulteret i følgende funktionsudtryk for varmetabet med to variable og med en acceptabel nøjagtighed:

$$U_{\text{trans}} = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_1^2 + d \cdot x_1^3 + e \cdot x_1^4 + f \cdot x_2 + g \cdot x_2^2 + h \cdot x_2^3 + i \cdot x_2^4 + j \cdot x_2^5$$

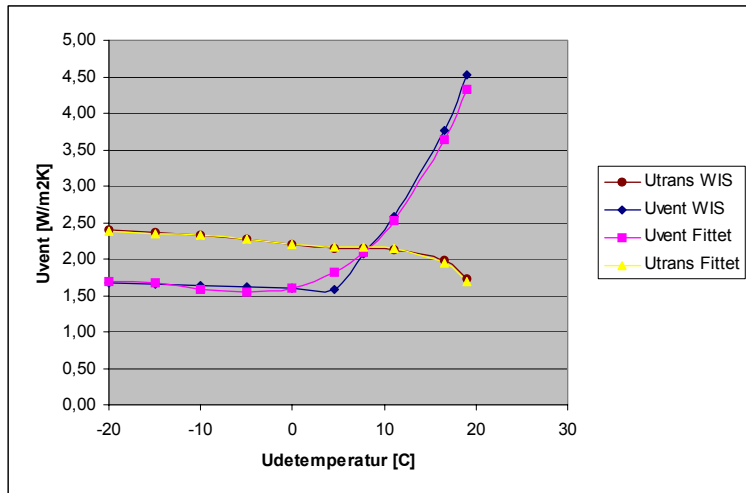
$$U_{\text{vent}} = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_1^2 + e \cdot x_2^2 + f \cdot x_1 \cdot x_2 + g \cdot x_1^3 + h \cdot x_2^3 + i \cdot x_1 \cdot x_2^2 + j \cdot x_1^2 \cdot x_2$$

Hvor

x₁ er solbestrålingsstyrken og

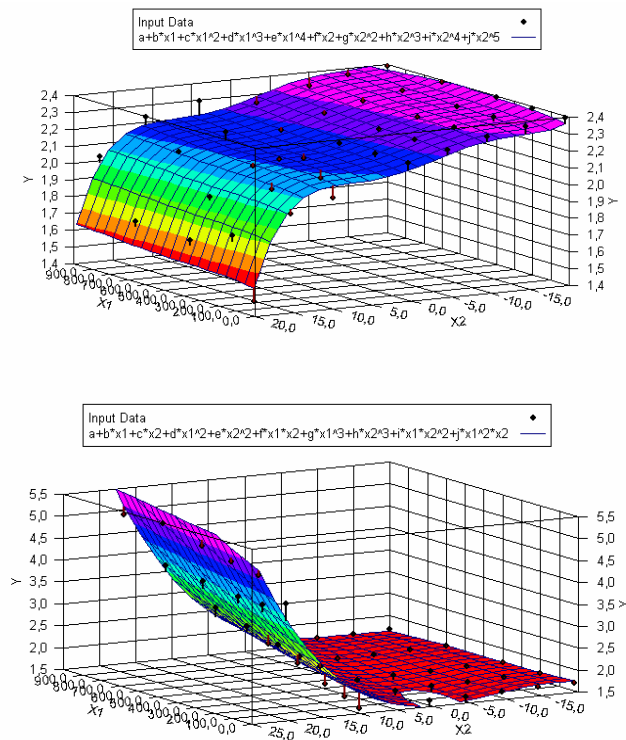
x₂ er udetemperaturen.

I Figur 2 er vist kurver for U-værdiernes afhængighed af udetemperaturen ved en solbestrålingsstyrke på 400 W/m². I Figur 3 er vist 3D afbildinger.



Figur 2. 2D-kurver for transmissions- og ventilationstabs afhængighed af udetemperaturen. Solbestrålingsstyrke $I = 400 \text{ W/m}^2$.

Det ses af Figur 2 at der mht. U_{trans} er tale om et godt "fit", da de to kurver er omtrent sammenfaldende. For U_{vent} er fittet også fint, undtagen i et forholdsvis snævert interval omkring en udetemperatur på 5°C , hvor afvigelsen fra WIS er maksimalt 14%. Hvis der ikke er solbestråling på vinduet ligger intervallet med et dårligt "fit" omkring 10°C . Samlet set vurderes funktionsudtrykket at være tilfredsstillende nøjagtigt, da udetemperatur og solbestrålingsstyrke i meget store dele af fyringssæsonen ikke "ligger" på den mindre nøjagtige del af kurven.



Figur 3. 3D kurver for transmissionstabs (øverst) og ventilationstabet (nederst) afhængighed af udetemperatur og solbestrålingsstyrke.

g-værdien er stort set uafhængig af solbestrålingsstyrken. Udtrykket for g vil derfor have to variable, svarende til indfaldsvinklen og udetemperaturen (luftmængden). g-værdien varierer kun et par procent for fastholdt indfaldsvinkel og udetemperaturer mellem -20 og 20 °C.

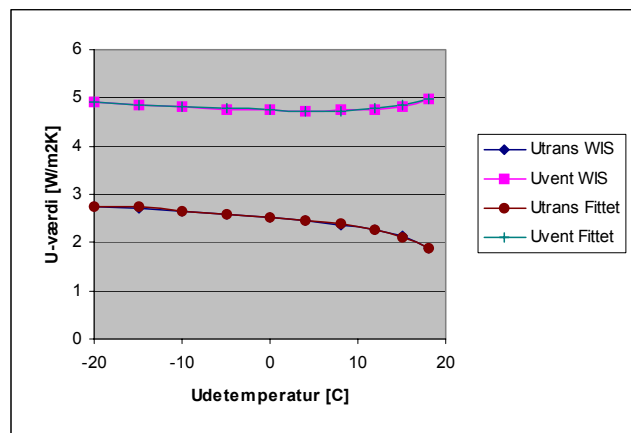
Funktionsudtrykket findes for en repræsentative/gennemsnitlig solbestrålingsstyrke på 400 W/m². Et 5 grads polynomium beskriver bedst sammenhængen mellem indfaldsvinkel og udetemperatur.

g-værdien for diffus stråling er beregnet til 0,667, svarende til middelværdien for luftmængder på 8-20 m³/h.

3.3 Ventilationsvindue med konstant luftstrøm

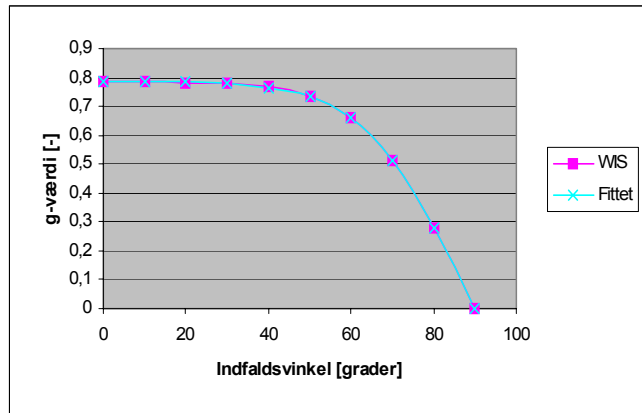
Der regnes med en konstant luftmængde på 20 m³/h. U-værdier er konstante ved ændringer i solbestrålingsstyrken (mørke værdier). U-værdierne afhænger derfor kun af udetemperaturen, der vil indgå som eneste variable i udtrykket for U-værdierne. En regressionsanalyse viser at et 4 ordens polynomium er et passende funktionsudtryk for U-værdier.

Kurverne for U-værdiernes afhængighed af udetemperaturen er vist i Figur 4. Det ses at der er god overensstemmelse mellem WIS og funktionsudtrykkene.



Figur 4. Kurver for transmissions- og ventilationstabets afhængighed af udetemperaturen ved konstant luftstrøm på 20 m³/h.

g-værdien er stort set uafhængig af solbestrålingsstyrken og udetemperaturen. Udtrykket for g vil derfor kun have indfaldsvinklen som variabel, og beregnes for en repræsentative/gennemsnitlig solbestrålingsstyrke (400 W/m²) og udetemperatur (8 °C). g-værdien for diffus stråling er beregnet til 0,673.



Figur 5. g-værdiens afhængighed af indfaldsvinklen, beregnet i WIS og ud fra regressionsudtryk for en solbestrålingsstyrke på 400 W/m^2 og en udetemperatur på $8 \text{ }^\circ\text{C}$.

4 Beregning af energitilskud

På baggrund af de beregnede U- og g-værdier samt DRY vejrdata (timeværdier) kan der beregnes energitilskud for fyringssæsonen for de tre undersøgte vinduer og fire hovedorienteringer (syd, vest, øst, nord). Herved kan Ventilationvinduet energibesparelse ved hhv. variabel (vindue B) og konstant luftstrøm (vindue C) bestemmes. Som fyringssæson er antaget perioden 24/9 – 13/5.

Konverteringen fra DRY soldata til solbestrålingsstyrker (direkte, diffus og reflekteret stråling) på de enkelte flader er foretaget ved at anvende Perez solalgoritmer [3]. Den reflekterede stråling beregnes som 20% af vandret globalstråling. Det er antaget en lodret vinduesplacering.

Der er kun foretaget beregninger for den transparente del af ventilationsvinduet. Det kan dog antages at varmetabet fra ramme-karm delen tilnærmelsesvis er det samme for de undersøgte vinduer, hvorved de beregnede energibesparelser gælder for vinduet som helhed.

Beregningsresultaterne i form af effektive U- og g-værdier, energitilskud og energibesparelser er vist i Tabel 5, Tabel 6 og Tabel 7.

Tabel 5. Effektive U- og g-værdier (gennemsnitlige værdier for fyringssæsonen).

Vindue	A	B	C
U_{trans} [W/m ² K]	1,79	2,15	2,44
U_{vent} [W/m ² K]	6,24	1,77	4,75
$g_{direkte}$ [-]	0,31	0,32	0,33
g_{diffus} [-]	0,65	0,66	0,67

Det ses af Tabel 5 at transmissionstabet U_{trans} ("mørk værdi") som forventet er større for Ventilationsvinduet svarende til vindue B og C på grund af luftstrømmen mellem glaslagene. Det ses også at ventilationstabet naturligvis er mindre for ventilationsvinduet og at ventilationstabet for Ventilationsvinduet med automatiske ventiler og varierende luftstrøm er betydeligt mindre end for det tilsvarende med almindelige ventiler og konstant luftstrøm. Det ses endvidere at der er tale om relativt små forskelle mellem de beregnede g-værdier for de enkelte vinduer. Effekten af solen på transmissions- og ventilationstab er indregnet i g-værdierne.

Tabel 6. Energitilskud (inkl. ventilationstab).

Vindue	kWh/m ²			kWh		
	A	B	C	A	B	C
syd	-396	-5	-309	-434	-5	-339
vest	-555	-165	-475	-608	-181	-520
øst	-546	-156	-464	-598	-171	-509
nord	-647	-259	-570	-709	-283	-624

Tabel 7. Energibesparelse i forhold til referencevindue (vindue a).

Vindue	kWh/m ²			kWh		
	A	B	C	A	B	C
syd	0	391	87	0	429	95
vest	0	390	81	0	427	89
øst	0	390	81	0	427	89
nord	0	389	77	0	426	85

Det fremgår af Tabel 7, at prototypen af Ventilationsvinduet med almindelige friskluftventiler og en konstant luftstrøm på 20 m³/h giver anledning til en energibesparelse på 95 kWh for en sydvendt placering, når reference er et tilsvarende vindue med almindelige ventiler i overkarmen og altså ingen forvarmning af den tilførte udeluft. Det skal bemærkes at energibesparelsen er omtrent den samme for øst, vest og nordvendte vinduer. Sammenlignes referencen med Ventilationsvinduet med automatiske ventiler og variabel luftstrøm, hvor luftstrømmen er væsentligt reduceret på især kolde og solfattede dage, viser beregningerne at energibesparelsen konstant er ca. 425 kWh for alle orienteringer af vinduet.

Det skal bemærkes at energibesparelsen for Ventilationvinduet netop er betragtelig, da referencen er dårlig (ingen varmegenvinding), men referencen er dog realistisk, set i forhold til at alternativet til et ventilationsvindue ved vinduesudskiftning og nybyggeri, som for nuværende ofte er vinduer med almindelige friskluftventiler i huse med mekanisk udsugning.

5 Referencer

- [1] WIS, version 3.01. Frit tilgængeligt på www.windat.org.
- [2] Datafit, version 8.0.32. Frit tilgængelig på www.curvefitting.com.
- [2] Perez, R., Ineichen, P. og Seals, R. (1990) Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, vol. 44, p. 271-289.