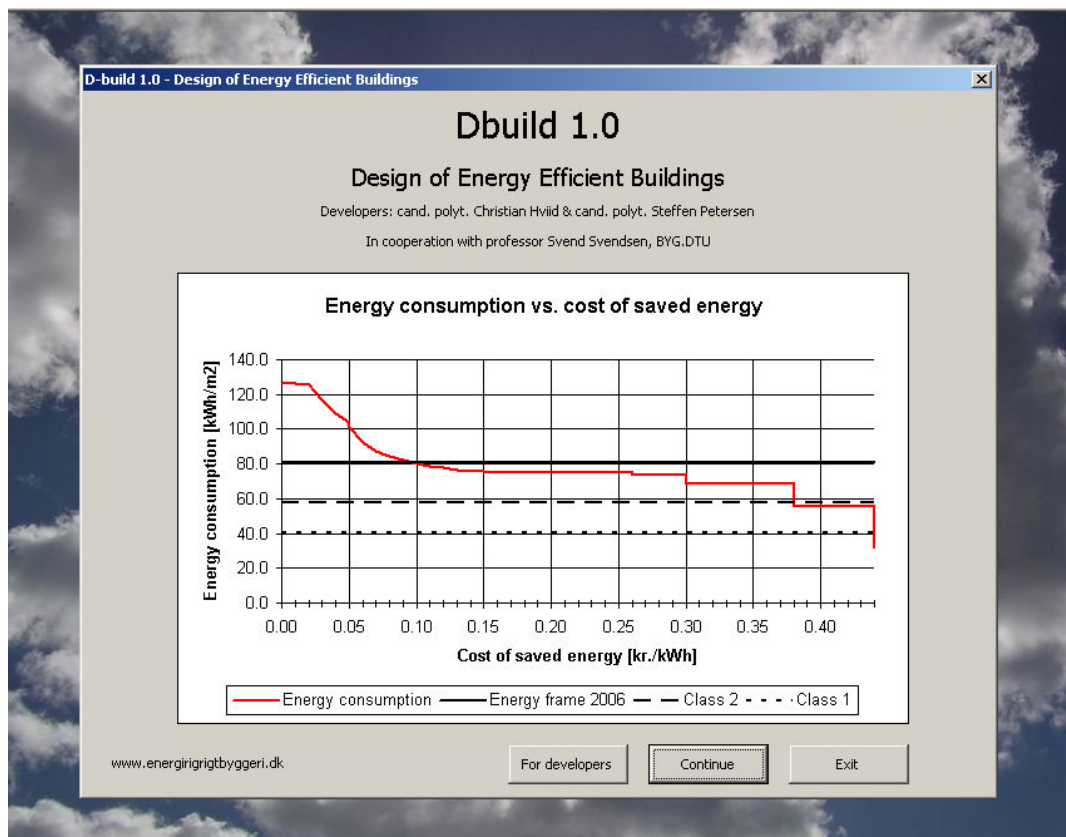


Metode til optimering af nyt lavt boligbyggeri til lavenerginiveau

-Del B: Designguide til energirigtigt byggeri



Eksamensprojekt ved Danmarks Tekniske Universitet,
BYG•DTU

Vejleder: professor Svend Svendsen

Christian A. Hviid, s991170

Steffen Petersen, s001384

Dato: d. 29.07.2005

Indholdsfortegnelse

Del B: Designguide til energirigtigt byggeri	5
1 Beregning af bygningers energiforbrug	6
1.1 Opvarmningsbehov	6
1.2 Varmt brugsvand	9
1.3 Elforbrug	10
1.4 Vedvarende energi	10
2 Geometri	11
2.1 Referencebygning	11
2.2 Grundplanets geometri	12
2.3 Antal etager	15
2.4 Etagehøjde	16
3 Konstruktioner	17
3.1 Transmissionskoefficient, U-værdi	17
3.2 Linietaf, Ψ -værdi	17
4 Vinduer	18
4.1 Vinduets energitilskud	18
4.2 Vinduets orientering og omgivelser	21
4.3 Vinduets basale energidata	24
4.4 Vinduets geometriske parametre	26
4.5 Overophedning og solafskærmning	29
5 Ventilation	30
5.1 Optimal dimensionering	31
5.2 Varmegenvindingsanlæg, VGV	31
5.3 Ventilationsanlæggets el-effektivitet, SEL-værdi	31
6 Internt varmetilskud	32
7 Varmesystem	32
8 Vedvarende energi	34
9 Økonomisk optimering	34
10 Delkonklusion for del B	36

Figurliste

Figur 6.1. Den maksimale bredde af en bolig bør højst være 10 m af hensyn til dagslystilførslen.	14
Figur 6.2 Bruttoenergiforbruget som funktion af grundplanets omkreds-areal forhold for en bygning på 200 m ²	14
Figur 6.3. Bruttoenergiforbruget som funktion af omkreds-areal forholdet for en bygning på 200 m ²	15
Figur 6.4 Bruttoenergiforbruget som funktion af etagehøjden for en bygning på 200 m ² (8 x 25 m).	16
Figur 7.1. Fundamentet er utraditionelt, da det ikke er ført ned til 90 cm dybde under terræn. Der er kun tale om en funderingsdybde på ca. 40 cm, men fundament og dræn er sikret mod frosthævning pga. god vandret isolering mod kulde oppefra. Dertil kommer en effektiv kuldebroafbrydelse mellem inde- og udeklima. Fundamentet er varmeteknisk en særdeles god løsning, og derfor især velegnet ved gulvvarme (Tommerup, 2002).	18
Figur 8.1. Energtilskuddet for standardvinduet orienteret mod hhv. N, NØ/NV, Ø/V, SØ/SV og S. Der er tæt på lineær sammenhæng mellem energitilskud og retning.	21
Figur 8.2. Tv: Referencevinduet energitilskud ved forskellige indbygninger afhængigt af orienteringen. Th: Normalt indbygget vindue; vinkel til fremspring på 10°. For et dybt murhul er fremspringet ca. 20°.	22
Figur 8.3. Tv: Referencevinduet energitilskud ved forskellige udhæng afhængigt af orienteringen. Th: Lille udhæng over vindue; fremspring på ca. 30°. For stort udhæng er fremspringet ca. 50°.	23
Figur 8.4. Tv: Referencevinduet energitilskud ved forskellige konstruktioner på siderne afhængigt af orienteringen. Th: Lille skygge fra konstruktion ved siden af vindue; fremspring på ca. 30°. For stor skygge er fremspringet ca. 50°.	23
Figur 8.5. Når rudens U-værdi falder, falder g-værdi også. Sammenhængen på kurven er logaritmisk. Rudedata fra (www.pilkington.dk), se Tabel 8.3.	24
Figur 8.6. Vinduet energitilskud varierer afhængigt af rudens egenskaber og vinduets orientering. De stiplede, nummererede linier refererer til vinduestype i Tabel 8.3.	25
Figur 8.7. Parameterstudie, hvor bruttoenergiforbruget beregnes ved variation af vinduesandelen i facaderne mod verdenshjørnerne.	27
Figur 8.8. Referencevinduet omkreds-areal forhold er lig med 2,98. Ændres omkreds-areal forholdet ved at forøge vinduets bredde fås et toppunkt, rent tilskudsmæssigt, når vinduets bredde er lig med vinduets højde (kvadratisk vindue, O/A = 2,95). Jo mere rektangulært vinduet bliver, des mindre bliver vinduets energitilskud.	28
Figur 8.9. Referencevinduet andel af ramme/karm (ændring i ramme/karm andel = 0%) hhv. forøges og formindskes, hvilket har indflydelse på vinduets	

energitilskud. Jo større ramme/karm andel, des mindre energitilskud. Der er set bort fra den øgede linietabslængde fra afstandsprofilet ved dannebrogsvinduet i figuren..... 29

Del B: Designguide til energirigtigt byggeri

Denne del af projektet er en designguide til design af nyt lavt boligbyggeri til lavenerginiveau. Designguiden er ment som en vejledning, der skal give læseren et forudgående kendskab til parametre, der er vigtige i relation til energirigtige løsninger. Brugeren kan have nytte af at læse denne designguide inden vedkommende benytter sig af beregningsprogrammet Dbuild, se del C.

Designguiden og Dbuild udgør tilsammen en metode til optimering af nyt lavt boligbyggeri til lavenerginiveau. For at opnå det største udbytte af metoden, bør brugeren:

- *Læse designguiden*; designguiden er informativ i forhold til udvælgelse af energirigtige delløsninger. Desuden indeholder guiden en brugervejledningen til Dbuild.
- *Opnå maksimal frihedsgrad i designprocessen*; et minimum eller ingen restriktioner vedrørende geometri, konstruktioner og installationer.

Designguiden starter med at skitsere de formler og parametre, der har indflydelse på energiforbruget i boliger. Der tages udgangspunkt i den generelle beregningsmetode, som det er implementeret i Be04 (beregningsprogram fra SBI), og som Dbuilds beregningsmotor baserer sig på. Derefter følger en overordnet gennemgang af parametrene og deres indbyrdes forhold med henblik på at nedbringe energiforbruget.

Det tilrådes, at man ved gennemlæsning af designguiden og ved brug af Dbuild har adgang til (DS 418, 2002), da der i forbindelse med konkrete beregninger af en række energitekniske parametre refereres til denne.

1 Beregning af bygningers energiforbrug

En bygnings energibehov er en opgørelse over den forventede nødvendige tilførte energimængde på årsbasis til opfyldelse af de forskellige behov, som er forbundet med normalt brug af en bygning: rumopvarmning, varmt brugsvand, evt. køling, ventilation og belysning. Summen af energiforbruget til opfyldelse af disse behov skal overholde bruttoenergirammen, se del A kapitel **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**

Bygningens energibehov beregnes jf. (Tillæg 9, 2005). Energiforbruget opdeles i 1) varmebehov, herunder rumopvarmning og opvarmning af varmt brugsvand, og 2) elforbrug til drift af installationer, herunder ventilationsanlæg, belysning, pumper mm.

1.1 Opvarmningsbehov

I Be04 beregnes en bygnings varmebehov til rumopvarmning pr. måned som følger:

$$Q_h = Q_l - \eta \cdot Q_g$$

hvor

Q_h er varmebehovet til rumopvarmning og ventilation i MJ/måned

Q_l er varmetabet i MJ/måned

η er udnyttelsesfaktoren

Q_g er det potentielle varmetilskud i MJ/måned

Dermed kan beregningen af bygningers varmebehov fra september til maj deles op i beregning af:

- Varmetab pr. år; summen af varmetab, månederne sept.-maj, Q_l
- Varmetilskud pr. år; summen af varmetilskud, månederne sept.-maj, Q_g

Beregningen af varmebehovet kan derefter sammenlignes med den aktuelle energiramme.

Udnyttelsesfaktoren η angiver hvor stor en del af varmetilskuddet, der nyttiggøres, og

kan udtrykkes om en funktion af varmetilskud og varmebehov samt bygningens tidskonstant. I praksis maksimeres udnyttelsesfaktoren ved at øge bygningens varmekapacitet og/eller mindske varmebehovet.

$$\eta = f(Q_g, Q_l, \tau)$$

1 BEREGNING AF BYGNINGERS ENERGIFORBRUG

1.1.1 Varmetab

Det samlede varmetab pr. måned Q_l for en bygning beregnes som:

$$Q_l = 0,0864 \cdot D \cdot H \cdot (\theta_i - \theta_u)$$

hvor

D er antallet af dage i måneden

H er specifikt varmetab, W/K

θ_i er rumtemperaturen, °C

θ_u er månedsmiddeltemperaturen for udeluften, °C

Faktoren 0,0864 er en omregningsfaktor, der giver energiforbruget i MJ/måned.

Størrelsen af varmetabet afhænger af størrelsen H, da de resterende parametre er konstante. Det specifikke varmetab H er defineret ved summen af de specifikke varmetab gennem klimaskærmen:

$$H = \sum H_T + H_v$$

De specifikke transmissionstab H_T kan beregnes som følger:

H_T for ydervægge, tage, gulv og vinduer er:

$$H_T = A_T \cdot U \cdot b$$

H_T for linietaf for ydervæggsfundamenter, kælderydervæggsfundamenter samt samlinger omkring vinduer og døre er:

$$H_T = l \cdot \psi \cdot b$$

hvor

A_T er transmissionsarealet, m²

U er konstruktionens transmissionskoefficient, W/m²K

l er kuldebroens længde, m

Ψ er linietafet i W/mK

b er temperaturfaktoren for bygningsdelen

Ventilationsvarmetabet H_v beregnes som:

$$H_v = 1210 \cdot q_v$$

hvor

1210 er varmekapaciteten for luft ved 20°C, J/m³K

q_v er den beregningsmæssige ventilation, m³/s

Den beregningsmæssige ventilation q_v for opvarmningssæsonen beregnes som:

$$q_v = 0,001 \cdot A_{br} \cdot [\beta \cdot (q_{vm} \cdot (1 - \eta_{vgv}) + q_{id}) + (1 - \beta) \cdot q_{is}]$$

1 BEREGNING AF BYGNINGERS ENERGIFORBRUG

hvor

A_{br} for boliger er lig med det opvarmede etageareal A_e , m^2

β er den relative driftstid, der beregnes som $T_d / 168$, hvor T_d er driftstiden i timer/uge. For boliger er $\beta = 1$.

q_{vm} er luftstrømmen gennem ventilationsanlægget, l/s pr. m^2 bruttoareal.

η er varmegenvindingens temperaturvirkningsgrad, -

q_v er den beregningsmæssige ventilation, m^3/s

q_{id} er infiltrationen i driftstiden, l/s pr. m^2 bruttoareal

q_{is} er infiltrationen med stoppede anlæg, l/s pr. m^2 bruttoareal. For boliger er q_{is} uden betydning idet $\beta = 1$

0,001 er en faktor, der omsætter liter til m^3 , m^3/l

For boliger er bruttoarealet lig det opvarmede etageareal.

For ventilation om sommeren, hvor anlægget ikke er i drift, kan formlen for luftskiftet reduceres til:

$$q_v = 0,001 \cdot A_{br} \cdot q_{id}$$

Bygningens varmetab afhænger dermed direkte af følgende parametre:

- U-værdien for konstruktionsdelen; lavere U-værdi medfører mindre energitab.
- Ψ -værdien for konstruktionsdelen; lavere Ψ -værdi medfører mindre energitab.
- Transmissionsarealet A ; et formindsket transmissionsareal medfører mindre energiforbrug – dog gælder der specielle forhold for vinduers areal, da vinduer også giver et varmetilskud.
- Kuldebroernes længde l ; kortere længde medfører lavere energiforbrug.
- Det opvarmede etageareal A_e ; større etageareal medfører større ventilationstab (og større transmissionstab).
- Varmegenvindingens temperaturfaktor η ; bedre genvinding medfører mindre ventilationstab.
- Luftskiftet og infiltrationens størrelse, q_{vm} , q_{id} , q_{is} ; lavere luftskifte og infiltration medfører mindre ventilationstab (i opvarmningssæsonen).

1.1.2 Varmetilskud

Beregning af en bygnings samlede potentielle varmetilskud beregnes som:

$$Q_g = Q_s + Q_i$$

hvor

Q_s er solindfaldet i MJ/måned

Q_i er internt varmetilskud i MJ/måned

1 BEREGNING AF BYGNINGERS ENERGIFORBRUG

Solindfald, Q_s

Solindfaldet Q_s gennem vinduer og yderdøre samt glaspartier og ovenlysvinduer kan beregnes som :

$$Q_s = A_T \cdot F \cdot I_s$$

hvor

A_T er transmissionsarealet, m^2

F er reduktionsfaktoren, -

I_s er solindfaldet gennem en referencerude med den pågældende orientering, MJ/måned

Reduktionsfaktoren F bestemmes som:

$$F = F_s \cdot F_a \cdot F_g$$

hvor

F_s er skyggefaktoren

F_a er arealfaktoren

F_g er glasfaktoren

Dermed er bygningens varmetilskud fra solindfaldet afhængigt af følgende parametre:

- Transmissionsarealet A_T ; optimal størrelse af A_T er afhængigt af vinduets samlede tilskud (samlet tilskud = $Q_1 - Q_s$)
- Reduktionsfaktoren F ; F_s er afhængigt af en række geometriforhold for vinduet og vinduets omgivelser. F_a angiver rudens andel af vinduet og F_g er afhængigt af rudens g -værdi.
- Vinduets orientering; beskrevet ved I_s .

1.2 Varmt brugsvand

Udover varmebehovet til rumopvarmning er der et varmebehov til opvarmning af varmt brugsvand. Det årlige forbrug af varmt brugsvand i boliger antages jf. (Be05, 2005) til mindst at være 250 liter pr. m^2 opvarmet etageareal. Forbruget antages normalt jævnt fordelt over året.

Som forbehold antages der dog et årligt forbrug af varmt brugsvand på min./maks. 15/60 m^3 pr. boligenhed, svarende til mindst en person og maksimalt fire personer pr. boligenhed. Det varme brugsvand antages opvarmet til mindst 55°C (Be05, 2005).

Eksempelvis beregnes opvarmningen af brugsvandet fra 10 til 55°C i et hus på 200 m^2 som følger:

$$E = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

1 BEREGNING AF BYGNINGERS ENERGIFORBRUG

hvor

E svarer til energiforbruget til opvarmningen af brugsvandet, kJ

V svarer til volumen af brugsvandet, 50 m^3

ρ svarer til densiteten for vand, 1000 kg/m^3

c_p svarer til den specifikke varmekapacitet for vand, 4.2 kJ/kgK

ΔT svarer til temperaturforskellen fra start til slut, $55-10 = 45 \text{ K}$

Energiforbruget til opvarmning af brugsvand bliver dermed 9360 MJ/år , svarende til 2600 kWh/år .

I forbindelse med det varme brugsvand kan der i bygningen være behov for en varmtvandsbeholder. Denne vil have et varmetab, der dels indgår som tilskud, dels som tab i bygningens bruttoenergiforbrug, se appendiks **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**

1.3 Elforbrug

Al elforbrug til drift af bygningen medtages i beregningen af bygningens bruttoenergiforbrug med en faktor 2,5. El til bygningsdrift inkluderer alle de elbehov, der er nødvendige for at bygningens funktion er sikret. For boliger ses dog bort fra belysning.

1.4 Vedvarende energi

Energi fra vedvarende energikilder på bygningen modregnes i bruttoenergiforbruget jf. del A kapitel **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**. Derfor kan det være fordelagtigt at benytte sig af vedvarende energikilder:

- Solvarme; til opvarmning af brugsvand.
- Solceller; til produktion af el.

El-produktion fra vedvarende energikilder modregnes med en faktor 2,5 i bruttoenergiforbruget, ligesom elforbrug fra den konventionelle produktion medtages med en faktor 2,5.

2 Geometri

Udformningen af bygningen (bygningens geometri) har stor indflydelse på bygningens samlede energiforbrug. Bygningens geometri definerer transmissionsarealet for delkonstruktionerne, dvs. gulv-, tag- og facadearealet samt længden af kuldebroen for ydervægsgulvkonstruktionen. Jf. afsnit 1.1 har disse størrelser direkte betydning for bygningens varmetab, og en minimering af disse vil medføre et lavere energiforbrug.

En bygning er ofte opført ud fra et krav om et etageareal på x antal kvadratmeter. Disse kvadratmeter fordeles sig på en eller flere etager med en vis rumhøjde. Størrelsen af transmissionsarealerne for hhv. tag- og gulvkonstruktion bestemmes jf. (DS418, 2002) afsnit 3.6.

Er grundplanets størrelse og udformning bestemt, kan transmissionsarealet for facaden udtrykkes som følger:

$$A_{\text{facade}} = O_{\text{br}} \cdot e \cdot h_e$$

hvor

A_{facade} er facadens areal, m²

O_{br} er grundplanets omkreds, m

e er antallet af etager, -

h_e er etagehøjden, m

Facadens areal er dermed direkte afhængig af grundplanets geometri, dvs. bygningens omkreds, antal etager og etagehøjde.

2.1 Referencebygning

For at illustrere den energimæssige effekt ved at variere hhv. bygningens omkreds, antal etager og etagehøjde foretages der et parameterstudie på en bygning med følgende data som udgangspunkt (referencebygning):

- Etageareal; 200 m²
- Etagehøjde; 2,6 m
- Fastholdt vinduesandel på 22% af etagearealet (44 m²)

I parameterstudiet forudsættes det for nemheds skyld, at referencebygningen har opvarmet kælder (krybekælder). Det vil sige, at $A_e = A_{\text{tag}}$ for én etage. Transmissi-

2 GEOMETRI

onskoefficienterne for konstruktionsdelene svarer til niveauerne for renovering i (Tillæg, 2005), se Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Transmissionskoefficienter for konstruktionsdelene

<i>Konstruktionsdel</i>	<i>Transmissionskoefficient</i>
Tag	0,15 W/m ² K
Væg	0,20 W/m ² K
Gulv	0,15 W/m ² K
Vinduer	1,50 W/m ² K

Det samlede vinduesareal på 44 m² fordeler sig orienteringsmæssigt som i Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Fordeling af vinduesarealer (U-001,2003).

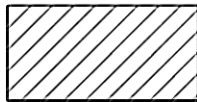
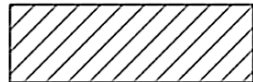
<i>Orientering</i>	<i>Andel</i>
Nord:	26%
Syd:	41%
Øst/Vest:	33%

Regnearket Be04 benyttes til beregning af bruttoenergiforbruget. I beregningen antages det, at huset er beboet af 4 personer med dertil hørende internt varmetilskud.

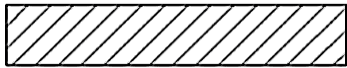
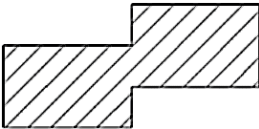
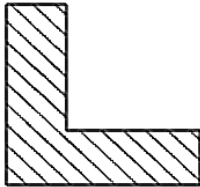
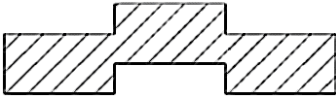
2.2 Grundplanets geometri

Udformningen af grundplanet er ikke helt uvæsentlig for bygningens energiforbrug. Facadens areal, og dermed energiforbruget, er direkte afhængigt af grundplanets geometri. For at illustrere dette introduceres begrebet *omkreds-areal forhold* (O/A), defineret som omkredsen af bygningen divideret med etagearealet, se Tabel 2.3. Bygningens omkreds defineres som ved måltagningen til bestemmelse af den lineære kuldebros længde i forbindelse med ydervæggsfundamentet i (DS418, 2002) afsnit 3.7.

Tabel 2.3 Eksempler på forskellige udformninger af et grundareal på 200 m² med de tilhørende omkreds-areal forhold.

<i>Geometri af grundplan</i>	<i>Mål</i> <i>[b x l]</i>	<i>Omkreds-areal</i> <i>forhold [m/m²]</i>
	10 x 20 m	$\frac{60}{200} = 0,30$
	8 x 25 m	$\frac{66}{200} = 0,33$

2 GEOMETRI

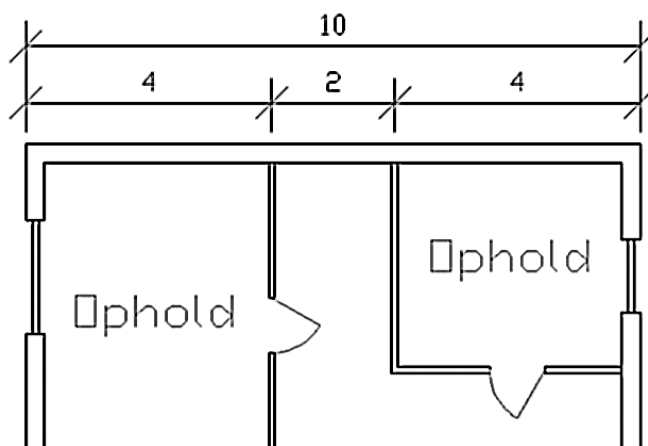
	6 x 33,3 m	$\frac{72}{200} = 0,36$
	8 x 12,5 m med 4 m spring i facade	$\frac{72}{200} = 0,36$
	6 x 19,67 m udvendige mål på længer	$\frac{78,7}{200} = 0,39$
	6 x 11,11 m med 3 m spring i facade	$\frac{80}{200} = 0,40$

For en bygning på f.eks. 100 m² med målene 10 x 10 m, vil O/A-forholdet være 0,4. Mindre huse har dermed som udgangspunkt et højere O/A-forhold.

Udformningen af grundplanet har også stor indflydelse på dagslystilførslen i huset. Jf. (www.at.dk) bør dagslystilførslen i arbejdsrum være så stor, at der på opholdspladserne i rummene mindst er en dagslysfaktor på 2% (det vil sige at belysningsniveauet bestemt af dagslyset er 2 % af det udendørs niveau målt på en vandret flade). Ved en rumhøjde på 2,5 m vil en rumdybde på 4 m være rimelig ved ensidigt belyste rum.

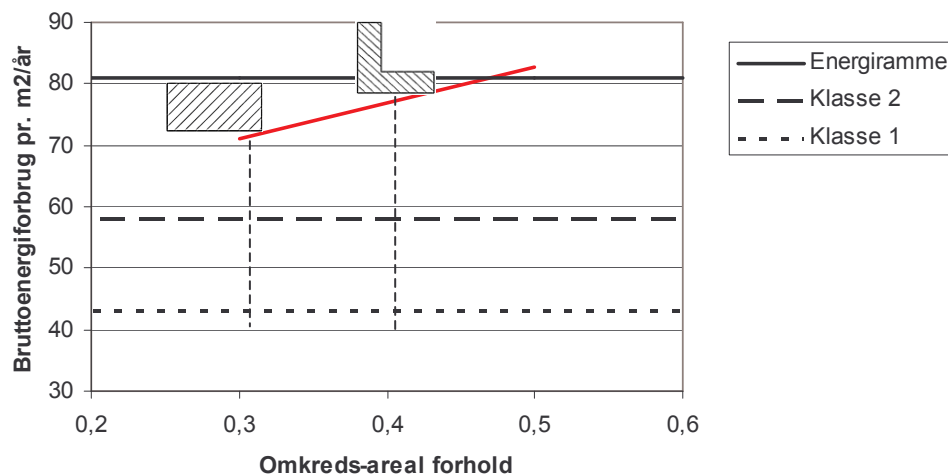
Disse anbefalinger om rimelig dagslystilførsel kan overføres til boliger. Antages det, at der i en bolig er noget gangareal, der ikke udnyttes som opholdsrum, kan der antages en maksimal bredde af boligen af hensyn til dagslystilførslen. Den maksimale bredde antages til at være 10 m, se Figur 2.1.

2 GEOMETRI



Figur 2.1. Den maksimale bredde af en bolig bør højst være 10 m af hensyn til dagslystilførslen.

Omkreds-areal forholdet i Tabel 2.3 er et udtryk for hvor kompleks grundplanets geometriske udformning er. Mere kompleks geometri medfører højere omkreds-areal forhold. Bruttoenergiforbruget som funktion af omkreds-areal forholdet er vist i Figur 2.2.



Figur 2.2 Bruttoenergiforbruget som funktion af grundplanets omkreds-areal forhold for en bygning på 200 m².

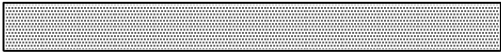

Figur 2.2 viser, at det er muligt at energioptimere huset gennem hensigtsmæssig udformning af bygningens grundplan. En simpel geometri er energimæssigt at foretrække frem for mere komplekse geometrier. Specielt i en designproces af lavenergiklasse 1 bygninger bør geometrien og udformningen overvejes grundigt ud fra et energimæssigt perspektiv, da dette kan være en afgørende faktor mht. overholdelse af energirammen. Derudover vil en geometrioptimering på et tidligt stadie i designprocessen udgøre et gratis energitiltag.

2.3 Antal etager

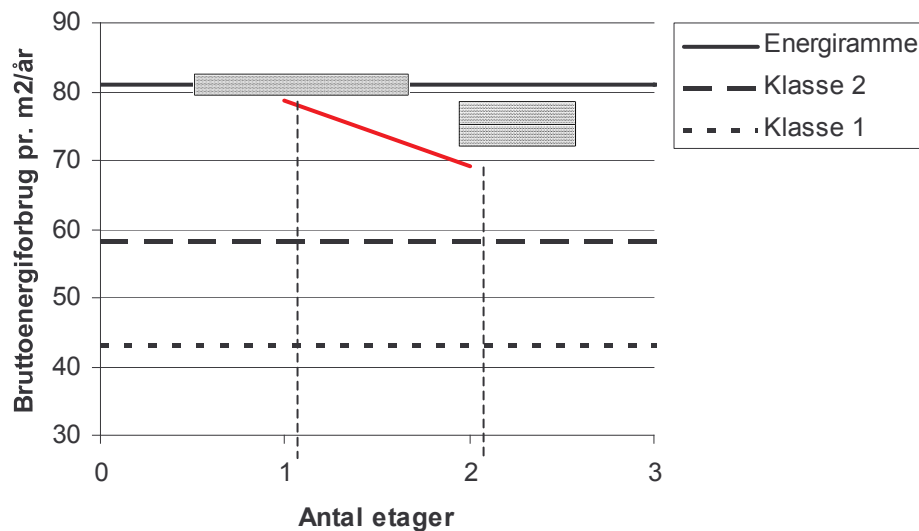
For et fastsat etageareal har antallet af etager indflydelse på varmetabet via størrelserne A_{tag} , $A_{\text{terræn}}$ og A_{facade} . A_{facade} ændrer sig jf. kapitel 2, og er dermed også afhængig af bygningens omkreds og etagehøjde.

I Tabel 2.4 ses omkreds-areal forholdet for referencebygningen, når dens bredde fastholdes til 8 meter og bygningens etageareal fordeles på hhv. 1 og 2 etager.

Tabel 2.4. Antallet af etager varieret med et fastholdt etageareal på 200 m² og en bredde på 8 m.

<i>Etagearealets fordeling på antal etager</i>	<i>Mål [h x l]</i>	<i>Omkreds-areal forhold [m/m²]</i>
1 etage 	2,6 x 25 m	$\frac{66}{200} = 0,33$
2 etager 	5,2 x 12,5 m	$\frac{41}{100} = 0,41$

Det beregnede bruttoenergiforbrug som funktion af omkreds-areal forholdene i Tabel 2.4 er vist i Figur 2.3.



Figur 2.3. Bruttoenergiforbruget som funktion af omkreds-areal forholdet for en bygning på 200 m².

Figur 2.3 viser, at et fastholdt etageareal fordelt på 2 etager rent energimæssigt er at foretrække frem for 1 etage. Ved projektering af lavenergiklasse 1 bygninger bør der overvejes løsninger indeholdende 2 etager, da dette kan være en afgørende faktor

2 GEOMETRI

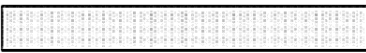

mht. overholdelse af energirammen. Dertil kommer at en justering af antallet af etager på et tidligt stadie i designprocessen vil udgøre et gratis energitiltag.

2.4 Etagehøjde

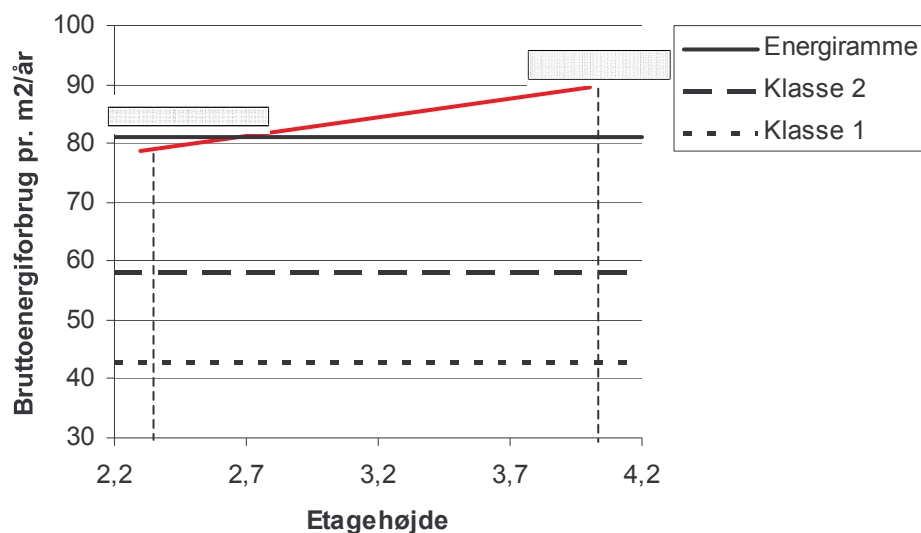
Med et fastsat etageareal i 1 etage og en fast geometri for grundplanen har etagehøjden indflydelse på bruttoenergiforbruget via størrelsen A_{facade} .

I Tabel 2.5 ses facadens areal afhængigt af referencebygningens etagehøjde.

Tabel 2.5. Etagehøjden varieret med et fastholdt etageareal på 200 m^2 ($8 \times 25 \text{ m}$) i 1 etage samt fast geometri.

<i>Facade med forskellige etagehøjder</i>	<i>Etagehøjde [m]</i>	<i>Facadeareal [m²]</i>
	2,6	158
	4,0	264

Bruttoenergiforbruget som funktion af etagehøjderne i Tabel 2.5 er vist i Figur 2.4.



Figur 2.4 Bruttoenergiforbruget som funktion af etagehøjden for en bygning på 200 m^2 ($8 \times 25 \text{ m}$).

Figur 2.4 viser, at den mindst mulige etagehøjde rent energimæssigt er at foretrække. Fastsettelse af etagehøjden bør indgå i overvejelserne ved projektering af lavenergi-

3 KONSTRUKTIONER

klasse 1 bygninger, da dette kan være en afgørende faktor mht. overholdelse af energirammen. Dertil kommer at en justering af etagehøjden på et tidligt stadie i designprocessen udgør et gratis energitiltag.

3 Konstruktioner

Ud over størrelserne af transmissionsarealerne og længden af kuldebroen ved fundamentet som beskrevet i kapitel 2, har delkonstruktionernes U-værdi og linietafet ved fundamentets Ψ -værdi en væsentlig betydning for bygningens varmetab.

3.1 Transmissionskoefficient, U-værdi

U-værdien afhænger af varmeledningsevnen og tykkelsen for det enkelte materialeglag i konstruktionen. En konstruktions U-værdi bestemmes jf. (DS418, 2002) afsnit 6.1.

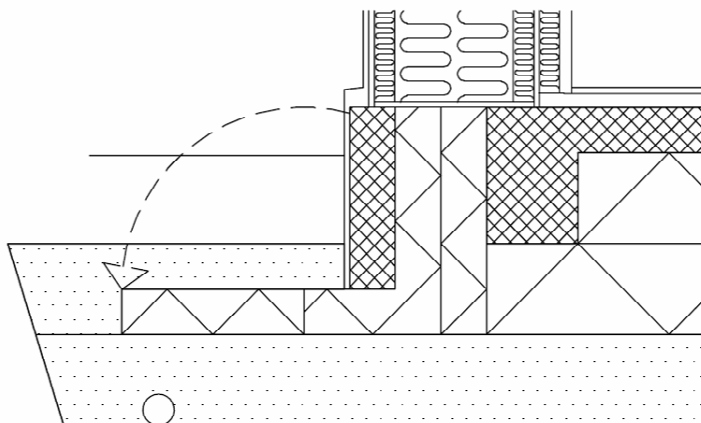
Beregningen af en konstruktions U-værdi kan være en kompliceret affære, da konstruktionen ofte er inhomogen (består af mange forskellige materialer med forskellige varmeledningsevner) og har kuldebroer, der forårsager linie- eller punkttab. For nærmere information, se (DS418, 2002) afsnit 6.7.

I forbindelse med lavenergiklasse 1 er det vigtigt at optimere den samlede U-værdi for de enkelte konstruktionsdele, herunder minimering af kuldebroer.

3.2 Linietafet, Ψ -værdi

Linietafet for ydervægsgundamenter kan bestemmes jf. (DS418, 2002) kapitel 6.13. Der findes fundamentskonstruktioner, der ikke fremgår af de generelle tabeller i afsnittet. Deres linietafet kan beregnes vha. (DS418, 2002) annek D.

En god fundamentsløsning for et gulv uden gulvvarme som i Figur 3.1 har en Ψ -værdi på 0,089 W/mK (Tommerup, 2002).



Figur 3.1. Fundamentet er utraditionelt, da det ikke er ført ned til 90 cm dybde under terræn. Der er kun tale om en funderingsdybde på ca. 40 cm, men fundament og dræn er sikret mod frosthævning pga. god vandret isolering mod kulde oppefra. Dertil kommer en effektiv kuldebroafbrydelse mellem inde- og udeklima. Fundamentet er varmeteknisk en særdeles god løsning, og derfor især velegnet ved gulvvarme (Tommerup, 2002).

4 Vinduer

Energiteknisk har vinduer stor indflydelse på en bygnings energiforbrug. Vinduer har en meget ringere isoleringsevne end ydermuren, hvori de sidder, og giver dermed et større varmetab (transmissionstab). Andre negative virkninger som følge af vinduer i klimaskærmen er overophedning, kuldenedfald og fugtansamlinger. En positiv virkning er at vinduet bidrager med et væsentligt energitilskud i form af den solstråling (solindfald), der kommer ind i bygningen via vinduet.

Et energirigtigt valg af vinduesløsning er derfor afgørende for husets samlede energiforbrug og for beboernes komfort. De følgende afsnit er en designguide til udvælgelse og projektering af energirigtige og hensigtsmæssige vinduesløsninger.

4.1 Vinduets energitilskud

Vinduets samlede energimæssige egenskab udtrykkes ved vinduets *energitilskud* (der kan være positivt eller negativt). Energitilskuddet er en opgørelse af vinduets solindfald minus varmetab over fyringssæsonen:

$$E = Q_s - Q_T$$

4 VINDUER

hvor

E er vinduets energitilskud, kWh/år

Q_s er solindfaldet, kWh/år

Q_T er varmetabet (transmissionstabet), kWh/år

Beregningen af Q_s sker jf. afsnit 1.1.2. Transmissionstabet Q_T beregnes som:

$$Q_T = U_{\text{samlet}} \cdot A_T \cdot 90,36$$

hvor

U_{samlet} er den samlede U -værdi for ruden jf. (DS418, 2002) afsnit 6.8

A_T er vinduets transmissionsareal

90,36 er antal gradtimer i fyringssæsonen (U-001, 2003)

På baggrund af ovenstående formler afhænger størrelsen af vinduets energitilskud af parametrene opstillet i Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Parametre der indgår i beregningen af vinduets energitilskud.

<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Enhed</i>	<i>Forklaring</i>
Orientering	-	f.eks. N,S,Ø,V	Vinduets placering i forhold til verdenshjørnerne.
Indbygning/ placering	F_s	-	Vinduets skyggeforhold som følge af placeringen i ydervæggen.
U -værdi	U_g, U_f	W/m^2K	Transmissionskoefficient for hhv. rudens centerværdi og ramme/karmen.
Rudens soltransmittans	g	-	g -værdi, angives som forholdet mellem den solenergi, der afgives til rummet bag ruden, og den samlede solenergi, der påvirker rudearealet udefra.
Psi-værdi	Ψ_g	W/mK	Linietabet for rudens afstandsprofil.
Vinduets andel af facadearealet	-	%	Arealet af vinduer på en facade med en given orientering divideret med facadens samlede areal
Rudeandel	-	%	Rudens arealandel af det samlede vindue (= 1 – ramme/karm andel)
Vinduets omkredsareal forhold	O/A	m	Vinduets ydre omkreds i forhold til dets areal

Dertil kommer muligheden for ekstra solafskærmning, der kan vælges til efter behov.

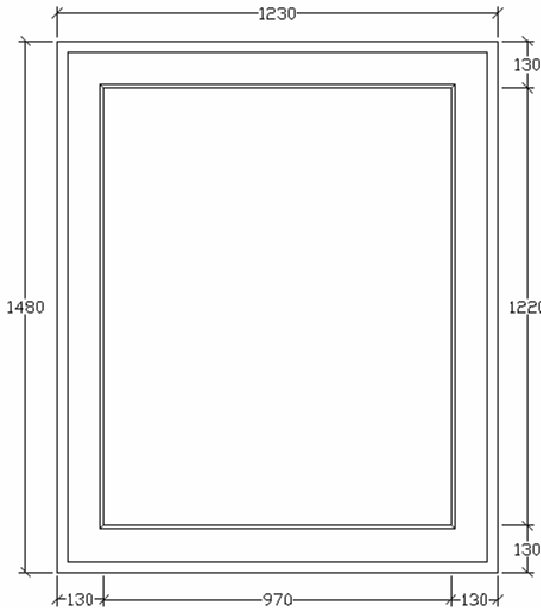
Optimering af vinduets energitilskud kan deles op i optimering af:

4 VINDUER

- Vinduets orientering og omgivelser (F_s og orientering)
- Vinduets basale energidata (U_g , U_f , g og Ψ_g)
- Vinduets geometriske parametre (vinduets andel af facadearealet, rammeandel og O/A)

I det efterfølgende beskrives ovenstående punkters betydning for vinduers energitilskud. Til dette formål defineres der et referencevindue med dimensioner og egenskaber som i Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Referencevinduets dimensioner og egenskaber.

<i>Data for referencevindue</i>	<i>Referencevinduets geometri</i>	
<i>Vinduets dimension</i>		
Højde		1,48 m
Bredde		1,23 m
Samlet areal		1,82 m ²
<i>Ramme/karm profil</i>		
Bredde		0,13 m
U_f		1,60 W/m ² K
<i>Rudeegenskaber</i>		
U_g		1,20 W/m ² K
Ψ_g		0,10 W/mK
g	0,63	
<i>Vinduets placering</i>		
F_s	0,90	
<i>Vinduesdata</i>		
U_{samlet}	1,58 W/m ² K	
Rudeandel	65 %	

Energitilskuddet beregnes ud fra afsnit 4.1. Beregningerne af energitilskuddet er baseret på solindfaldsdata fra beregningsprogrammet Be04, fordi beregningsprogrammet Dbuild er baseret herpå.

Energitilskuddet er desuden simpelt beregnet med en udnyttelsesfaktor lig 1 for alt solindfald. Dette bevirker, at der ikke er tale om faktiske størrelser for energitilskuddene. Da formålet med parameterstudiet er at illustrere de relative forhold mellem energitilskuddene ved en parametervariation, er det ikke væsentligt, at energitilskuddene ikke er faktiske størrelser.

4.2 Vinduets orientering og omgivelser

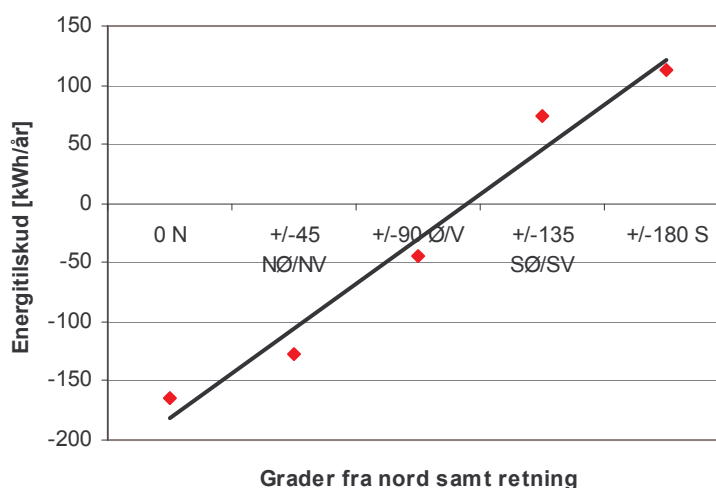
Vinduets orientering og omgivelser har grundlæggende betydning for vinduets energitilskud. Beregningsmæssigt kan det koncentreres til følgende:

- Orientering mod verdenshjørnerne
- Skyggepåvirkninger af vinduet, skyggefaktoren F_s

I design af energirigtigt byggeri er det hensigtsmæssigt at tage højde for disse parametre, da de kan medvirke til at øge vinduets samlede energitilskud og dermed sænke bygningens samlede energiforbrug.

Orientering mod verdenshjørnerne

En helt afgørende betydning for et vindues energitilskud er dets orientering mod verdenshjørnerne. I Figur 4.1 er energitilskuddet for standardruden (Tabel 4.2) beregnet, når den er orienteret hhv. mod nord, øst/vest og syd. Forudsætningerne er beskrevet i afsnit 4.1.



Figur 4.1. Energitilskuddet for standardvinduet orienteret mod hhv. N, NØ/NV, Ø/V, SØ/SV og S. Der er tæt på lineær sammenhæng mellem energitilskud og retning.

Af Figur 4.1 ses det, at der er mest energitilskud at hente for vinduer mod syd i forhold til de andre orienteringer. Figuren viser også, at det er muligt med visse forbehold at interpolere mellem retningerne.

Skyggefaktoren F_s

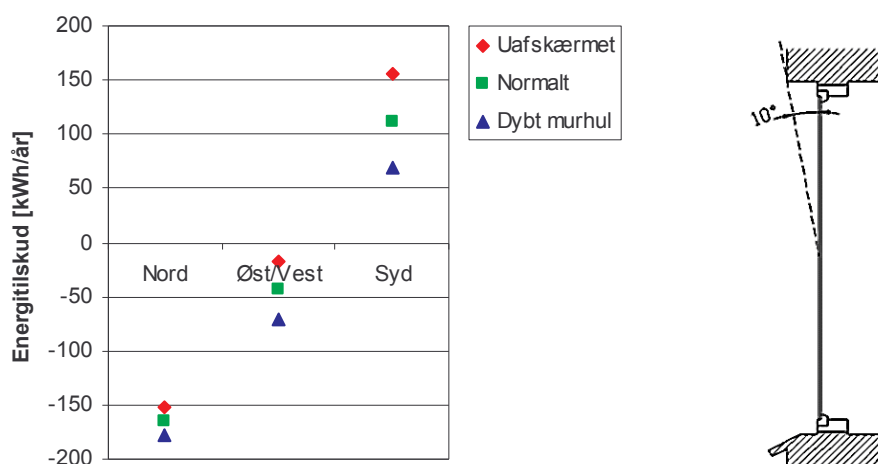
Skyggefaktoren F_s er defineret i afsnit 1.1.2 og benyttes i udregningen af vinduets solindfald (Q_s) til at korrigere for skyggepåvirkningerne fra bygningens omkringliggende miljø. Skyggefaktoren er lig 1,0 hvis vinduet har fri horisont og i øvrigt er uafskærmet.

4 VINDUER

F_s korrigeres for vinduets placering i ydervæggen og skyggende omgivelser, herunder:

- Indbygning; der skelnes mellem uafskærmet og dybt murhul.
- Tagudhæng; der skelnes mellem lille og stort udhæng.
- Konstruktioner på siderne; der skelnes mellem lille og stor skygge.

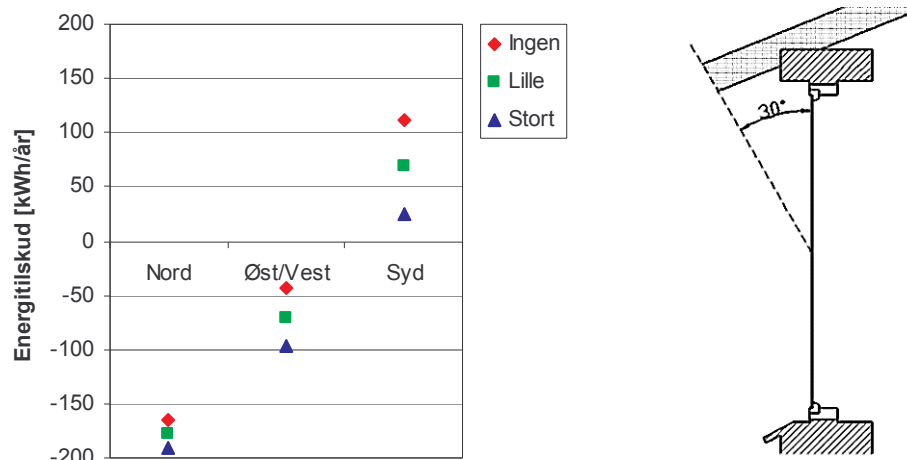
I det følgende undersøges de tre ovenstående korrektioners indflydelse på energitilskuddet for referencevinduet i forhold til vinduets placering mod verdenshjørnerne. Resultaterne ses i Figur 4.2, Figur 4.3, og Figur 4.4.



Figur 4.2. Tv: Referencevinduet energitilskud ved forskellige indbygninger afhængigt af orienteringen. Th: Normalt indbygget vindue; vinkel til fremspring på 10° . For et dybt murhul er fremspringet ca. 20° .

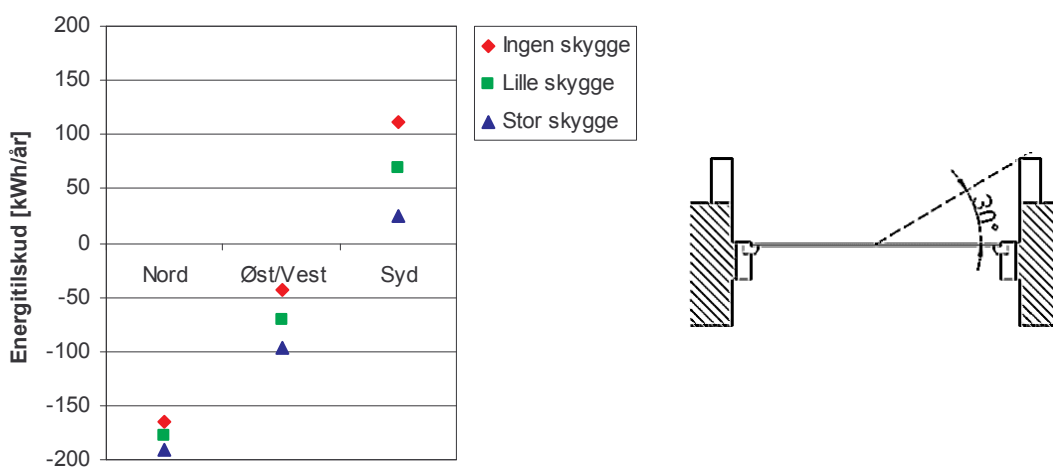
Figur 4.2 viser, at det uafhængigt af orienteringen er mest hensigtsmæssigt med et uafskærmet vindue. Effekten af et uafskærmet vindue er størst mod syd og mindst mod nord.

4 VINDUER



Figur 4.3. Tv: Referencevinduet's energitilskud ved forskellige udhæng afhængigt af orienteringen. Th: Lille udhæng over vindue; fremspring på ca. 30°. For stort udhæng er fremspringet ca. 50°.

Figur 4.3 viser, at energitilskuddet reduceres jo større udhæng bygningen har – uafhængigt af orienteringen. Effekten er størst for vinduer mod syd og mindst for vinduer mod nord.



Figur 4.4. Tv: Referencevinduet's energitilskud ved forskellige konstruktioner på siderne afhængigt af orienteringen. Th: Lille skygge fra konstruktion ved siden af vindue; fremspring på ca. 30°. For stor skygge er fremspringet ca. 50°.

Figur 4.4 viser, at energitilskuddet uafhængigt af orienteringen reduceres, hvis referencevinduet har konstruktioner på siden. Effekten er størst for vinduer mod syd og mindst mod nord.

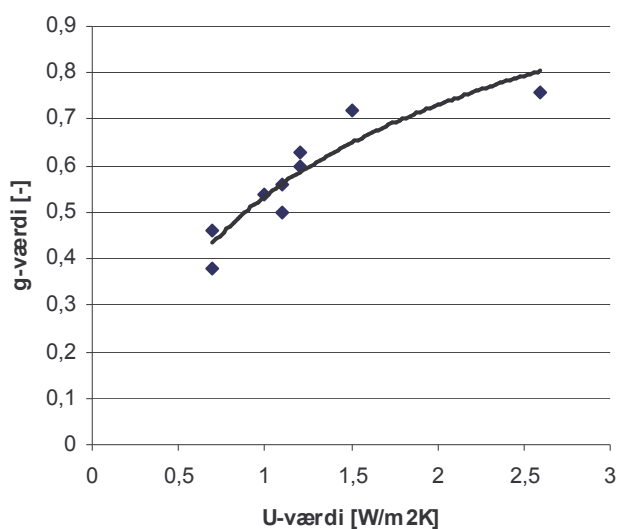
4.3 Vinduets basale energidata

Vinduets samlede U-værdi (U_{samlet}) kan bestemmes jf. (DS418) afsnit 6.8, og er afhængig af følgende energidata:

- Rudens U-værdi, U_g
- Rudens soltransmittans, g-værdi
- Linietalet for rudens afstandsprofil, Ψ_g
- Ramme/karmens U-værdi, U_f

4.3.1 U- og g-værdi

En lav værdi af U_{samlet} og en høj værdi af rudens g-værdi vil give et vindue med et positivt, maksimeret energitilskud. Rudens U-værdi og g-værdi er imidlertid to tæt knyttede parametre med et indbyrdes forhold, der gør, at rudens g-værdi falder, når U-værdien falder. Dette er illustreret i Figur 4.5, hvor forskellige ruders g-værdi er plottet som funktion af rudens U-værdi.



Figur 4.5. Når rudens U-værdi falder, falder g-værdi også. Sammenhængen på kurven er logaritmisk. Rudedata fra (www.pilkington.dk), se Tabel 4.3.

Sammenhængen på Figur 4.5 er logaritmisk, men hvis der ses bort fra U-værdier, der ikke anvendes i praksis (2,6), er sammenhængen lineær.

4.3.2 Rudetype og orientering

I det efterfølgende benyttes referenceruden fra afsnit 4.1 til at illustrere sammenhængen mellem rudens basale energidata og vinduets orientering mod verdenshjør-

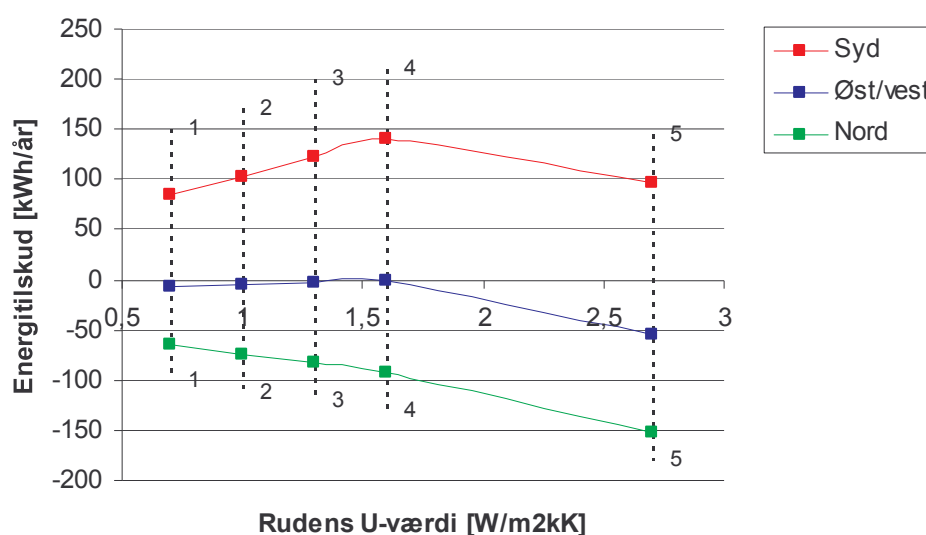
4 VINDUER

nerne. Energiltilskuddet, afhængigt af vinduets orientering, beregnes jf. afsnit 4.1 for vinduerne i Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Alle fem ruder er fra (www.pilkington.dk), og alle er opbygget som 4-15-4 for 2-lags ruder og 4-12-4-12-4 for 3-lags ruder. Rudenumrene refererer til Figur 4.6.

Rude nr.	Rudebetegnelse	U_g	U_{samlet}	g
1	Optitern SN 3-lag, 2 coatings	0,7	1,26	0,46
2	Optitern SN 3-lag, 1 coating	1,0	1,45	0,54
3	Optitern SN 2-lags, 1 coating	1,2	1,65	0,63
4	K-Glass	1,5	1,84	0,72
5	Optifloat Clear	2,6	2,56	0,76

I Figur 4.6 er energiltilskuddet for de fem vinduer i Tabel 4.3 optegnet afhængigt af vinduets orientering.



Figur 4.6. Vinduets energiltilskud varierer afhængigt af rudens egenskaber og vinduets orientering. De stiplede, nummererede linier refererer til vinduestype i Tabel 4.3.

Figur 4.6 viser, at der principielt kan differentieres mellem rudetyperne afhængigt af vinduets orientering for på den måde at få det optimale energiltilskud. For vinduer i en sydvendt og øst/vest-vendt retning, er rude nr. 4 optimal mht. energiltilskud, hvorimod rude nr. 1 er mest optimal for vinduer mod nord. Af hensyn til udsynets ensartethed blander man midlertidigt ikke forskellige rudetyper i praksis. Derfor må udvælgelsen af rudetypen være et kompromis.

4.3.3 Afstandsprofil og ramme/karm

Linietabet for rudens afstandsprofil, Ψ_g og ramme/karmens U-værdi, U_f , har også indflydelse på vinduets energiltilskud. I takt med at rudens materialeparametre bliver

4 VINDUER

bedre får Ψ -værdien for vinduets afstandsprofil en større andel i vinduets samlede varmetab og dermed i vinduets energitilskud. Typisk vil et traditionelt afstandsprofil have en Ψ -værdi på 1,0 W/mK. Med nyere teknologi, en såkaldt varm kantkonstruktion, er det muligt at opnå en Ψ -værdi på 0,06 W/mK (U-011, 2001). Ved tre-lags ruder er det muligt at komme helt ned på 0,033 W/mK, jf. appendiks **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** Det bør bemærkes, at afstandsprofillets linie-tab også er en funktion af den anvendte ramme.

U-værdien for et vindues ramme/karm profil er oftest højere end rudens U-værdi, standard er ca. 1,6 W/m²K. Der findes ramme/karm profiler med en dokumenteret U-værdi på 0,63 W/m²K (U-011, 2001). Samtidig kan ramme/karm-profilet for et vindue udgøre en betydelig del af det samlede vinduesareal.

Dermed er ramme/karmprofilet samlede energitekniske egenskab afhængig af ramme/karmens U-værdi og ramme/karmens bredde (b). For at vurdere den samlede energitekniske egenskab for en ramme/karm profil, sammenholdes U-værdien og b ved at multiplicere b med U . Jo lavere $b \cdot U$, des bedre energiteknisk ramme/karm profil. For eksempel er det ikke givet, at en ramme med en lav U-værdi er den bedste ramme, se Tabel 4.4

Tabel 4.4. To ramme/karm profilers energitekniske egenskab, $b \cdot U$

	U -værdi [W/m ² K]	b [m]	$b \cdot U$ [W/mK]
Passiv ramme	0,63	0,13	0,082
Alm. smal træramme	0,14	0,05	0,070

På trods af at Passivrammen har en lavere U-værdi end trærammen, er den en dårlige energiteknisk løsning.

4.4 Vinduets geometriske parametre

Ud over vinduets orientering og omgivelser samt basale energidata, er der en række geometriske parametre for vinduet, der har en væsentlig betydning for vinduets energitilskud:

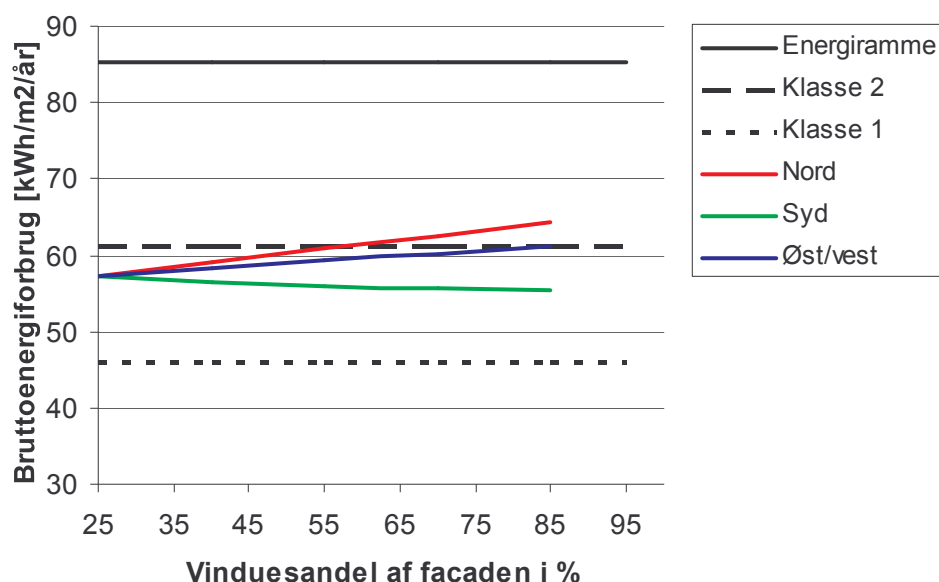
- Vinduets andel af facadearealet
- Vinduets geometri, O/A
- Rudeandelen for vinduet, %

I design af energirigtigt byggeri vil hensigtsmæssige størrelser af disse parametre medvirke til en sænkning af bygningens samlede energiforbrug. I det efterfølgende varieres vinduets andel af facaden, vinduets geometri samt rudeandelen i forhold til referencevinduet. Dertil illustreres parametrenes indvirkning på vinduernes energitilskud for en orientering mod forskellige verdenshjørnerne.

4.4.1 Vinduets andel af facadearealet

Vinduets andel af en facade med en given orientering har stor indflydelse på en bygningens energibalace. I et parameterstudie benyttes et referencehus med materialeparametre for konstruktionerne som i afsnit 2.1. Husets geometri fastsættes til et 1-plans hus, 10 x 14 m i grundplan med en etagehøjde på 2,6 m. Vinduerne er af typen beskrevet i afsnit 4.1 og har en rudeandel på 73%. Som udgangspunkt udgør vinduesarealet 22% af etagearealet.

I parameterstudiet fastholdes vinduesandelen i tre af retningerne, hvorefter der varierer på vinduets andel på den 4. retning. Bruttoenergiforbruget som følge af denne variation beregnes vha. beregningsprogrammet Be04. Konsekvensen for denne variation ses i Figur 4.7.



Figur 4.7. Parameterstudie, hvor bruttoenergiforbruget beregnes ved variation af vinduesandelen i facaderne mod verdenshjørnerne.

Figur 4.7 viser, at for det valgte referencehus vil en forøgelse af vinduesandelen i facader vendt mod syd give et lavere bruttoenergiforbrug for bygningen. En stigende vinduesandel i facader mod hhv. nord, øst og vest giver et større bruttoenergiforbrug. Imidlertid øges risikoen for overophedning også, se afsnit 4.5 for en nærmere udredning.

En anden faktor, der knytter sig til vinduets andel af facaden, er dagslystilførslen. Denne vil normalt være tilstrækkelig, når vinduesarealet ved sidelys svarer til mindst 10% af gulvarealet (ved ovenlys mindst 7%). Vinduesarealet skal forøges forholds-mæssigt ved reduceret lysgennemgang (f.eks. ved tonede vinduer og "energiruder") eller formindsket lysadgang til vinduer (f.eks. ved tætliggende bygninger). Det anbefales, at dagslystilførslen er så stor, at der på opholdspladserne i rummene

4 VINDUER

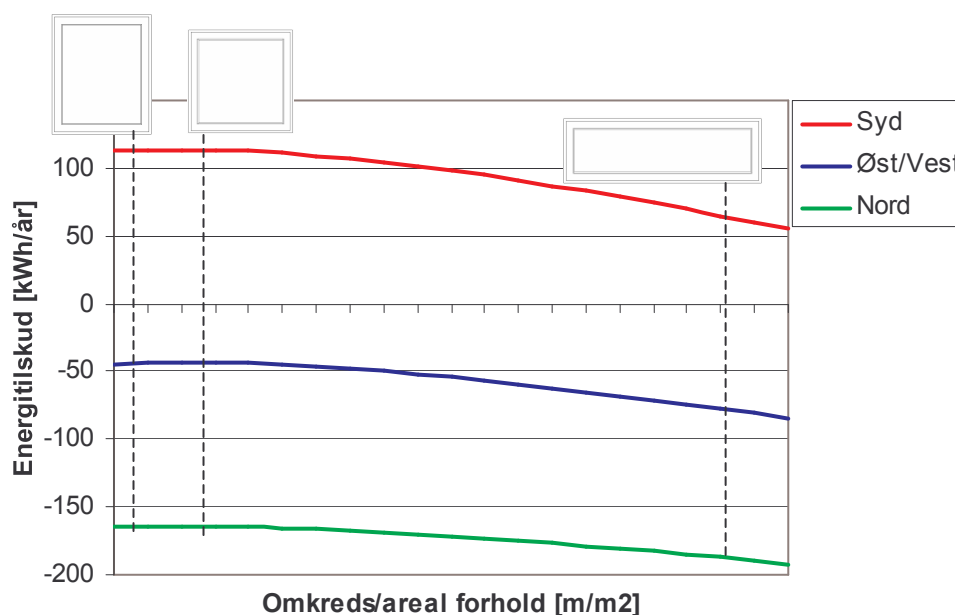
mindst er en dagslysfaktor på 2%. Det vil sige, at belysningsniveauet bestemt af dagslyset er 2 % af det udendørs niveau målt på en vandret flade (www.at.dk).

4.4.2 Vinduets geometri, O/A

Vinduets geometri har indflydelse på vinduet energitilskud, da vinduets omkreds indgår i beregningen af Q_T , jf. afsnit 4.1. Større omkreds medfører mindre energitilskud på grund af følgende forhold:

- En del af vinduets transmissionstab sker ved et linietaf gennem rudens afstandsprofil, jf. (DS418, 2002) afsnit 6.8.
- Rammeandelen øges, hvilket medfører en forringelse af vinduets samlede U-værdi.
- Solindfaldet mindskes.

Konsekvensen for referencevinduet energitilskud ved variation af omkreds-areal forholdet ses i Figur 4.8.



Figur 4.8. Referencevinduet omkreds-areal forhold er lig med 2,98. Ændres omkreds-areal forholdet ved at forøge vinduets bredde fås et toppunkt, rent tilskudsmæssigt, når vinduets bredde er lig med vinduets højde (kvadratisk vindue, $O/A = 2,95$). Jo mere rektangulært vinduet bliver, des mindre bliver vinduets energitilskud.

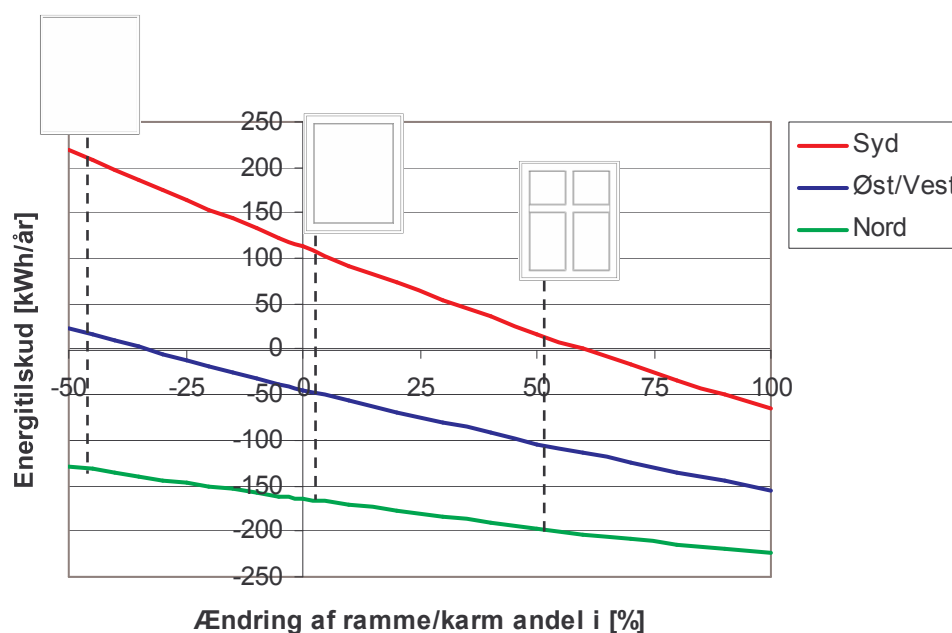
4.4.3 Rammeandelen for vinduet, %

Rammeandelen af et vindue er lig ($100\% - \text{rudeandelen, \%}$). Andelen (herunder sprosser) i forhold til vinduets samlede areal har en væsentlig indflydelse på vinduets energitilskud. Andelen har indflydelse både i beregning af Q_T (transmissionstab) og i Q_s (solindfaldet):

4 VINDUER

- Ved større ramme/karm andel vokser transmissionstabet Q_T
- Ved større ramme/karm andel falder solindfaldet Q_s
- Større ramme/karm andel kan medføre ekstra linietaf i form af en større mængde afstandsprofiler.

Konsekvensen for referencevinduet energitilskud ved at variere andelen af ramme/karm arealet ses i Figur 4.9.



Figur 4.9. Referencevinduet andel af ramme/karm (ændring i ramme/karm andel = 0%) hhv. forøges og formindskes, hvilket har indflydelse på vinduets energitilskud. Jo større ramme/karm andel, des mindre energitilskud. Der er set bort fra den øgede linietafslængde fra afstandsprofilen ved dannebrogsvinduet i figuren.

4.5 Overophedning og solafskærmning

I kapitel 4 er det beskrevet hvordan det er muligt at maksimere energitilskuddet med vinduerne, men det blev ikke omtalt hvordan de har indflydelse på risikoen for eventuel overophedning.

I beregningen af bruttoenergiforbruget indgår overophedningen, dvs. indetemperaturer over 26°C , som et 'virtuelt' kølebehov, der øger energiforbruget, også selvom der ikke er installeret køling i bygningen.

Det er derfor hensigtsmæssigt i forbindelse med optimering af vinduerne at medtage overophedningen som parameter.

Et stort sydvendt vinduesparti har potentiale til at forårsage overtemperaturer om sommeren, men yder samtidig et væsentlig positivt energitilskud om vinteren.

Løsningen er derfor at afskærme solen i det omfang, der er behov for det. For at

afskærmningen skal reducere overophedningen effektivt, bør den monteres udvendigt, så solenergien ikke afsættes inden døre. I sammenhæng opnås samlet set et lavere bruttoenergiforbrug.

5 Ventilation

Bygningsreglementet BR-S 98 (Tillæg 9, 2005) dikterer, at der i ethvert beboelsesrum, og i huset totalt set, skal være et luftskifte på mindst 0,5 gang i timen. Dette svarer til 0,3 l/s pr. m² jf. (Be05, 2005). Luftskiftet kan opretholdes ved tilførsel af udeluft gennem åbninger direkte til det fri, mekanisk udsugning eller med balanceret ventilationsanlæg (mekanisk ventilation). Ved mekanisk ventilation tilføjes der en infiltration på 0,13 l/s pr. m² med mindre andet ikke kan dokumenteres (Be05, 2005).

De fleste danske boliger opføres med naturlig ventilation. Den energimæssige ulempe ved naturlig ventilation er et stort ventilationstab, da den varme luft i boligen udskiftes med koldere udeluft, der skal varmes op til den ønskede indetemperatur. Dette varmetab udgør en stor andel af bygningens samlede varmetab. I del D afsnit **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** er det dokumenteret, at ventilationstabet i en 200 m² bolig, der er opført i 2005, udgør op til 35% af bygningens samlede varmetab.

Derudover er naturlig ventilation en forholdsvis usikker måde at opretholde et konstant luftskifte på 0,5 h⁻¹. En undersøgelse af en række bygningers luftskifte viser, at huse opført efter reglerne i BR 82 og BR-S 85 (også mindst 0,5 h⁻¹) har et gennemsnitligt luftskifte på 0,35 h⁻¹, spænd i måleresultater fra 0,17-0,68 h⁻¹ (SBI 236, 1994).

For at opnå et lavenergibyggeri kan det være helt nødvendigt at reducere ventilationstabet. Dette sker ved at installere et balanceret mekanisk ventilationssystem med varmegenvinding (VGV), der samtidigt sørger for et konstant anbefalet luftskifte. I forhold til lavenergibyggeri jf. reglerne i (Tillæg 9, 2005) bør følgende energiforhold indgå i overvejelserne vedrørende et mekanisk ventilationsanlæg:

- Korrekt dimensionering; ventilationsanlægget skal projekteres optimalt.
- Temperaturvirkningsgraden; hvor meget af varmen fra indeluften, der overføres til den koldere udeluft.
- Ventilationsanlæggets eleffektivitet, SEL-værdi (specifikt elforbrug til lufttransport); indeksværdien SEL angiver elforbruget pr. m³ flyttet luft i J/m³.

5.1 Optimal dimensionering

Der kan spares en del energi til drift af ventilationsanlægget, hvis det dimensioneres optimalt til den aktuelle bygning. Dimensioneringen af et optimalt ventilationsanlæg indebærer følgende:

- Anlægget tilfører kun lige nøjagtigt den luftmængde, der er påkrævet.
- Kortest mulige føringsveje.
- Minimering af tryktab i kanalsystem og armaturer.
- Føring af kanaler; føring af kanaler med varmt luft holdes *inden* for klimaskærmen og kanaler med kold luft bør holdes *uden* for klimaskærmen.
- Placering af ventilationsaggregat; indenfor klimaskærmen og eller tilstrækkeligt isoleret.
- Kortslutning; indblæsning og udsugning skal placeres hensigtsmæssigt i forhold til hinanden både indendørs og indendørs.

Endvidere er det i praksis vigtigt, at ventilationsanlægget er korrekt indreguleret så unødigt elforbrug og infiltration/eksfiltration undgås og at systemet er lufttæt.

5.2 Varmegenvindingsanlæg, VGV

Et VGV-anlæg minimerer bygningens samlede energiforbrug. VGV-anlægget sikrer, at varmen fra indeluften overføres til udeluften. Der findes forskellige former for teknologier til VGV, der alle har fordele og ulemper. Det afgørende er temperaturvirkningsgraden for varmeveksleren, der kan være op til ca. 90% (Tommerup, 2004).

Ydermere bør ventilatorerne være placeret på den varme side af veksleren, så bidraget fra motorer og ventilatorer udnyttes bedst muligt. Dog med det forbehold, at luftstrålen (fra udsugningsventilatoren) rammer hele veksleren, så den bibeholder sin effektivitet (Tommerup 2004).

5.3 Ventilationsanlæggets el-effektivitet, SEL-værdi

Et ventilationsanlægs elforbrug indgår jf. (Tillæg 9, 2005) i beregningen af bygningens samlede energiforbrug med en faktor 2,5. Ventilationsanlæggets elforbrug er karakteriseret af anlæggets SEL-værdi. Lavere SEL-værdi medfører lavere samlet energiforbrug. Ventilationsanlæggets SEL-værdi beregnes som følger:

$$SEL = \frac{\sum P}{q_v}$$

hvor

$\sum P$ er den samlede effekt, der tilføres ventilatoren, W

q_v er luftstrømmen, som ventilatoren skaber, m³/s

6 INTERNT VARMETILSKUD

Jævnfør (Tillæg 9, 2005) må et ventilationsanlæg, uanset om det har konstant luftydelse (CAV) eller variabel ydelse (VAV), ikke overstige en SEL-værdi på 1200 J/m^3 . Dermed kan man beregne den maksimale effekt, som ventilatorerne i anlægget må optage (eksempel):

I et hus med et volumen på 350 m^3 , og et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ må effekten, der tilføres ventilationsaggregatet (2 ventilatorer), maksimalt være $1200 \text{ J/m}^3 \cdot 2 \cdot 0,05 \text{ m}^3/\text{s} = 115 \text{ W}$.

6 Internt varmetilskud

Det interne varmetilskud i en bolig består af varmetilskud fra personer, apparaturer og belysning. Størrelsen af disse tre varmekilder antages jf. (Be05, 2005) til at være som i Tabel 6.1. I boliger og andre bygninger med overnatning dækker varmetilskuddet fra apparaturer også belysningen.

Tabel 6.1. Intern last i boliger og andre bygninger med overnatning (Be05, 2005).

<i>Varmekilde</i>	<i>Varmetilskud</i> <i>[W pr. m² opvarmet etageareal]</i>
Pr. person	1,5
Apparaturer	3,5

Som forbehold for størrelserne i Tabel 6.1 antages der i (Be05, 2005) et varmetilskud på min./maks. 90/360 W fra personer pr. boligenhed og min./maks. 210/840 W fra apparaturer pr. boligenhed, svarende til mindst en person og maksimalt fire personer pr. boligenhed. Det interne varmetilskud må kun indeholde det elforbrug, der evt. nyttiggøres.

7 Varmesystem

Grundlæggende kan man vælge mellem følgende opvarmningssystemer:

- Radiatorer / konvektorer
- Gulvvarme
- Varmeflade i ventilationsanlæg
- Varmepumpe, ofte integreret i ventilationsanlægget

APPENDIKS FEJL! INGEN TEKST MED DEN ANFØRTE TYPOGRAFI I DOKUMENTET. FEJL! INGEN TEKST MED DEN ANFØRTE TYPOGRAFI I DOKUMENTET.

Gulvvarme har indenfor de seneste år erstattet radiatorer som den oftest forekommende opvarmningsform i nybyggede 1-plans boliger. Årsagen angives ofte til at være øget komfort og fraværet af synlige radiatorer (Produktudvikling, 2004).

Imidlertid har gulvvarme også ulemper i forhold til konventionel radiatoropvarmning.

Et dimensionerende varmetab (transmissionstab) gennem et terrændæk kan jf. (DS418, 2002) beregnes som:

$$\begin{array}{ll} \text{Konventionel opvarmning:} & q_{\text{konv}} = U \cdot (\theta_i - \theta_j) \text{ [W/m}^2\text{]}, \theta_i = 20^\circ\text{C} \\ \text{Gulvvarme:} & q_{\text{gulv}} = U \cdot (\theta_g - \theta_j) \text{ [W/m}^2\text{]}, \theta_g = 30^\circ\text{C} \end{array}$$

θ_j er i begge tilfælde 10°C . Antages det, at konstruktionen ikke ændres uanset opvarmningskonceptet, ses det, at transmissionstabet er en faktor 2 højere ved gulvvarme. Desuden vil fundamentets linietaf også øges.

I rapporten (Weitzmann, 2003) beskrives det hvorledes et energieffektivt gulvvarmesystem bør udføres og styres. Rapportens hovedkonklusioner er som følger:

- Terrændækket udføres med en U-værdi på maks. $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Fundamentet udføres med et linietaf der maks. er $0,12 \text{ W/mK}$.
- Der benyttes ventilation med effektiv varmegenvinding.
- Let gulvvarme anbefales (hvor det er muligt) frem for tung gulvvarme grundet en hurtigere reaktionstid og derved bedre styring af rumtemperaturen.
- Fremløbstemperaturen til gulvvarmen indstilles ved en så lav temperatur, at rumtemperaturen netop kan opretholdes i kolde perioder. Fx. 30°C til 35°C .
- Styringen af gulvvarmesystemet kan med fordel udføres med en udetemperaturstyring frem for en konstant fremløbstemperatur hele året.
- I rum, der ikke benyttes regelmæssigt, kan rumtemperaturen med fordel nedsættes. For hver grad rumtemperaturen nedsættes spares der 10 - 15% i varmemeforbrug i rum opvarmet med gulvvarme.

Alternativet til de konventionelle opvarmningssystemer er varmeaflede og/eller varmepumpe i ventilationsanlægget. Især i forbindelse med lavenergibyggeri er de interessante alternativer, fordi varmetabet er så lille, at det fint kan dækkes med et lille varmesystem.

Men de små varmesystemer har også negative sider. De er elforbrugende og indgår derfor med en faktor 2,5 i udregningen af bruttoenergiforbruget. Desuden anvender de opvarmning af luft, som ikke er et optimalt transportmedium af varme.

På nuværende tidspunkt eksisterer der ingen konventionelle varmesystemer, der kan udnytte fordelene ved lavenergibyggeri. Der foregår et igangværende udviklingsarbejde vedrørende lavtemperatur-gulvvarmeanlæg, hvor fremløbstemperaturen kun er nogle få grader over den dimensionerende temperatur. På den måde opnås fordelene

APPENDIKS FEJL! INGEN TEKST MED DEN ANFØRTE TYPOGRAFI I DOKUMENTET. FEJL! INGEN TEKST MED DEN ANFØRTE TYPOGRAFI I DOKUMENTET.

ved gulvvarme frem for radiatorer og ulemperne ved forøget varmetab og forøget elforbrug undgås.

8 Vedvarende energi

Vedvarende energikilder modregnes i beregningen af bygningens bruttoenergiforbrug, jf. (Tillæg 9, 2005). Vedvarende energikilder kan omfatte:

- Solvarme; opvarmning af varmt brugsvand.
- Solceller; produktion af el.

El-produktion fra vedvarende energikilder modregnes med en faktor 2,5 i bruttoenergiforbruget – lige som elforbrug fra den konventionelle produktion medtages med en faktor 2,5.

Et solvarmeanlæg kan omtrent dække 60% af en families varmtvandsforbrug på 2600 kWh/år, se afsnit 1.2, hvis det opstilles optimalt med en 45° hældning mod syd. Med den opstilling kan en familie på fire nøjes med 4 m² solfanger. Solvarmeanlægget har imidlertid et elforbrug til solvarmepumpen på ca. 150 kWh/år som skal modregnes i bruttoenergiregnskabet med en faktor 2,5. Bruttoenergisparelsen bliver derfor omtrent 1185 kWh/år.

Varmetabet fra varmtvandsbeholderen er inkluderet i ydelsen på 60%.

Solceller kan producere ca. 100 kWh el pr. år pr. m² solcelle (www.iet.auc.dk/~sbk).

9 Økonomisk optimering

Nedbringelse af energiforbruget for en bygning opnås som regel ved en kombination af forbedrede delkonstruktioner og – løsninger, specielt for lavenergiklasserne. Udfordringen ligger i at finde den kombination af deltiltag, der billigst muligt sikrer en overholdelse af energirammen.

En metode til dette er *energispareprisen* (CSE) som er prisen for at spare 1 kWh [kr./kWh]. For de alternative energimæssige tiltag beregnes der en energisparepris, og så længe denne energisparepris er mindre end den aktuelle energipris i kr./kWh, bør energitiltaget medtages i den samlede løsning. Metoden er desuden anvendelig til økonomisk optimering af bygninger i lavenergiklasserne. For at opnå disse lavenergiklasser kan der være behov for energitekniske løsninger med en energispare-

APPENDIKS FEJL! INGEN TEKST MED DEN ANFØRTE TYPOGRAFI I DOKUMENTET. FEJL! INGEN TEKST MED DEN ANFØRTE TYPOGRAFI I DOKUMENTET.

pris højere end den aktuelle energipris. Ud fra en rangordning af de energitekniske løsnings energisparepris, er det muligt at udvælge den mængde af ”dyre” løsninger, der lige netop skal til for at opnå lavenergiklasserne.

Den generelle formel for beregning af CSE er som følger:

$$CSE = \frac{I_{\text{tiltag}}}{n_t \cdot \Delta E_{\text{årlig}}}$$

hvor

CSE er energispareprisen, kr./kWh

I_{tiltag} er investeringsomkostningen (anlægsudgiften) for et energitiltag, kr.

n_t er den tekniske levetid, -

$\Delta E_{\text{årlig}}$ er den årlige energibesparelse, kWh/år

Da investeringen for energibesparelsen er knyttet til boliglånet, som tilbagebetales med årlige afdrag plus renter, annuiseres investeringsomkostningerne som i afsnit **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** med en annuitetsfaktor, $a(n,r)$. CSE udregnes nu som en årlig investering divideret med en årlig energibesparelse som følge af investeringen:

$$CSE = \frac{a(n,r) \cdot I_{\text{tiltag}}}{\Delta E_{\text{årlig}}}$$

Ligesom for annuitetsberegninger i afsnit **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** kan der for investeringen regnes med en restværdi, der er afhængig af investeringens *tekniske og økonomiske* levetid. Dette fører til en CSE udtrykt som:

$$CSE = \frac{\frac{n}{n_t} \cdot a(n,r) \cdot I_{\text{tiltag}}}{\Delta E_{\text{årlig}}}$$

hvor

n er den økonomiske levetid, år

Dermed er der en restværdi på:

$$\text{Restværdi} = \left(1 - \frac{n}{n_t}\right) \cdot I_{\text{tiltag}}$$

For energitiltag der kræver et vist vedligehold eller bruger en vis mængde energi under drift (f.eks. et ventilationsanlæg), beregnes CSE som følgende:

APPENDIKS FEJL! INGEN TEKST MED DEN ANFØRTE TYPOGRAFI I DOKUMENTET. FEJL! INGEN TEKST MED DEN ANFØRTE TYPOGRAFI I DOKUMENTET.

$$\text{CSE} = \frac{\frac{n}{n_t} \cdot a(n, r) \cdot I_{\text{tiltag}} + \text{VO}_{\text{årlig}}}{\Delta E_{\text{årlig}} - 2,5 \cdot E_{\text{drift,el,årlig}}}$$

hvor

$\text{VO}_{\text{årlig}}$ er de årlige vedligeholdelsesomkostninger, kr.

$E_{\text{drift,el,årlig}}$ er det årlige energiforbrug til drift, kWh

10 Delkonklusion for del B

Når man energioptimerer er det vigtigt at gøre sig fri af udformningsmæssige restriktioner og opnå maksimal frihedsgrad i designprocessen. Designguiden er ment som vejledning, der beskriver og illustrerer de parametre, der er vigtige i relation til lavenergiboliger.

Guiden skitserer de formler og parametre, der har indflydelse på energiforbruget i boliger, og derefter følger en overordnet gennemgang af parametrene og deres indbyrdes forhold med henblik på at nedbringe energiforbruget.

Herved kan den projekterende opnå et forudgående kendskab til energirigtige løsninger.