

Henrik Tommerup
Jørgen Rose

Forsøgshus med nye typer
klimaskærmskonstruktioner
Del 1: Konstruktioner/systemer

Byggesystem: Lette ydervægselementer i
træskelet

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET



Rapport
BYG•DTU R-054
2003

ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-114-5

Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner Del 1: Konstruktioner/Systemer

Byggesystem: Lette
ydervægselementer i træskelet

Henrik Tommerup
Jørgen Rose



Department of Civil Engineering
DTU-bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
<http://www.byg.dtu.dk>

2003

FORORD

Denne rapport beskriver konstruktioner og systemer samt varmetabsberegninger og simuleringer af energiforbrug for et højisoleret enfamilieshus med lette ydervægselementer. Huset har et forventet energiforbrug til rumopvarmning på 84 % af den nugældende energiramme ($280 \text{ MJ/m}^2/\text{år}$), jf. Bygningsreglement for Småhuse [1].

Rapporten er udarbejdet af BYG•DTU i forbindelse med projektet ”Forsøgsbygninger med nye typer klimaskærmskonstruktioner” (j. nr. 1213/00-0011), der hører under Energistyrelsens Energiforskningsprogram 2000 (EFP 2000). Projektet er udført i samarbejde mellem BYG•DTU og By og Byg (Statens Byggeforskningsinstitut).

Huset beskrevet i rapporten, er et blandt flere huse, der indgår i projektet. De andre huse beskrives i separate rapporter. For alle huse gælder at der bliver udført detaljerede målinger af energiforbrug mm., og disse redegøres der for i særskilte rapporter.

Huset er opført af Danhaus Production A/S (boligdivisionen), Esbjerg. Vinduer og døre er leveret af følgende firmaer:

Vrøgum Vinduer A/S (vinduer og døre)
Velux A/S (ovenlysvinduer)

Rapportens forfattere er:
Jørgen Rose, forskningsadjunkt, BYG•DTU.
Henrik Tommerup, forskningsadjunkt, BYG•DTU.

Professor Svend Svendsen, BYG•DTU, har været projektleder.

Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, Maj 2003.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	1
INDHOLDSFORTEGNELSE	3
RESUMÉ	5
SUMMARY	7
1 PROJEKTETS BAGGRUND OG FORMÅL	9
1.1 Baggrund	9
1.2 Formål	9
2 BEREKNING AF VARMETABSKOEFFICIENTER MM.	11
2.1 Beskrivelse af konstruktioner og systemer	11
2.2 Beskrivelse af samlingsdetaljer	13
2.3 Beregning af konstruktioner, U-værdier	13
2.4 Beregning af samlingsdetaljer, Ψ -værdier	18
2.5 Sammenfatning af resultater	21
3 BEREKNING AF ENERGIFORBRUG OG INDEKLIMA	25
3.1 Beskrivelse af bygningsmodel	25
3.2 Simulering	26
3.3 Resultater	28
4 ØKONOMISK VURDERING AF ENERGIBESPARENDE TILTAG	35
4.1 Pris- og energimæssig sammenligning	35
4.2 Vurderingsmetode	37
4.3 Beregningsforudsætninger	38
4.4 Resultater	39
4.5 Sammenfatning og diskussion af resultater	40
5 KONKLUSION	43
5.1 Varmetab og kuldebroer	43
5.2 Opvarmningsbehov og indeklima	43
5.3 Økonomi	44
6 REFERENCER	45

RESUMÉ

Huset beskrevet i denne rapport er et blandt flere huse der indgår som forsøgshus i projektet ”Forsøgsbygninger med nye typer klimaskærmskonstruktioner”; et projekt under energiforskningsprogram 2000 (EFP2000). Huset er beliggende i Hillerød, og er opført af Danhaus, Esbjerg.

Projektets ene formål er at demonstrere, at det er muligt at bygge typiske enfamilieshuse med et energiforbrug der opfylder forventede skærpede krav i bygningsreglementet, og at det kan ske byggeteknisk forsvarligt og indenfor fornuftige økonomiske rammer. Det er således også formålet at medvirke til at styrke udviklingen af bedre klimaskærmskonstruktioner ved blandt andet at vise gode eksempler på integration af vinduer og installationer. Projektets andet formål er at foretage detaljerede målinger af energiforbrug mm., således at den varmetekniske ydeevne for fremtidens klimaskærmskonstruktioner underbygges.

Huset beskrevet i nærværende rapport lever ikke op til de forventede skærpede krav i bygningsreglementet. Den primære årsag til dette er, at der anvendes naturlig ventilation i huset, og hvis man i stedet benytter effektiv varmegenvinding for ventilationsluften, vil huset kunne leve op til fremtidens energirammekrav. Danhaus’ typehus er normalt udstyret med varmegenvinding, men i netop dette tilfælde er det valgt at udelade denne foranstaltning for at reducere anlægsudgifterne. Derfor er det, på trods af en forventning om et opvarmningsbehov som ikke lever op til projektets formål, alligevel valgt at medtage huset i projektet.

Rapporten omhandler husets konstruktive udformning og energisystemer samt varmetabsberegninger og forventede energiforbrug.

Rapporten indledes med en kortfattet gennemgang af projektets baggrund og formål.

Derefter beskrives konstruktioner og samlingsdetaljer samt varme- og ventilationsanlæg, der sammen med det detaljerede tegningsmateriale vedlagt bagerst i rapporten, giver et overblik over husets konstruktive opbygning.

I rapportens kapitel 2 gennemgås varmetabsberegningerne. Disse er foretaget dels vha. de detaljerede beregningsprogrammer HEAT2 [2], HEAT3 [3] og THERM [4] til beregning af kuldebroeffekter, dvs. linie- og punkttabskoefficienter, mens U-værdier for konstruktioner med homogene lag er beregnet ud fra reglerne angivet i DS418 [5]. Derefter sammenfattes resultaterne af beregningerne og der opstilles en beregning af husets forventede dimensionerende varmetab samt den samlede kuldebroandel.

Der foretages ligeledes simuleringer af husets opvarmningsbehov og indeklima ved brug af simuleringsprogrammet BSIM2000 [6]. Resultaterne der præsenteres er husets energibalance og den forventede operative temperatur i udvalgte rum.

Der gennemføres også en række parameteranalyser. I den forbindelse undersøges betydningen af et mindre internt varmetilskud, en mindre effektiv varmegenvinding, en mindre infiltration (mere lufttæt klimaskærm) og gulvvarmeslangernes temperatur.

By og Byg (Statens Byggeforskningsinstitut) har ultimo 2001 udsendt et oplæg til nye energibestemmelser i det forventede Bygningsreglement år 2005 [7]. Heri er lagt op til at bygninger skal opfylde krav til det samlede energiforbrug (energiebehovet til opvarmning, ventilation og køling i form af både varme og el), og altså ikke som nu kun varmekonsumet til

opvarmning og ventilation. Derfor har det været relevant at undersøge om huset opfylder de kommende krav. Beregningen er mere en illustration af metoden (hvordan det samlede energiforbrug beregnes) end en konkret eftervisning af at bruttoenergirammen er overholdt, da der er tale om et første udkast til nye bestemmelser.

Der foretages desuden en økonomiske vurdering af de energibesparende tiltag, som er anvendt i huset. Referencen er et tilsvarende fuldmuret hus med et isoleringsniveau svarende til krav i det nuværende bygningsreglement.

Slutteligt redegøres for de konklusioner der kan drages af de beregninger og simuleringer der er beskrevet i rapporten.

SUMMARY

Report R-054: Experimental building with new types of building envelope structures. Part 1: Structures / Systems.

Building system: Prefabricated lightweight external wall components incorporating a load-bearing wooden frame.

The house described in this report is one of several experimental houses forming part of the project “Experimental buildings with new types of building envelope structures” (Forsøgsbygninger med nye typer klimaskærmskonstruktioner), which is a project under the Energy Research Program 2000 (EFP2000). The house is placed in Hillerød, and is built by Danhaus, Esbjerg.

One purpose of the project is to demonstrate that it is possible to build typical single-family houses with an energy consumption that meets anticipated intensified requirements of the building regulations, and that it can be made securely from the point of view of construction technology and within reasonable financial limits. Thus, the purpose is also to contribute to strengthen the development of better building envelope structures, for example by showing good examples of integration of windows and installations. The other purpose of the project is to carry out detailed measurements of energy consumption etc. to validate the thermal performance of future building envelope structures.

The house described in this report does not meet the future requirements of building regulations. The primary reason for this is the fact that natural ventilation is used in the house. If an efficient heat recovery unit were installed instead, the house would be able to meet the requirements. Danhaus’ houses are normally equipped with heat recovery, but in this case it has been left out in order to reduce the total cost of the house. Though the house will not meet the future energy demands it is still included in this project, as it could have done so with just this simple change in the ventilation system.

The report deals with the constructive design and energy systems of the house plus heat loss calculations and expected energy consumption.

The report begins with a brief summary of the background and object of the project.

Then construction and assembling details and heating system and ventilation system are described, which, together with the detailed plan material enclosed at the back of the report, give a survey of the construction of the house.

In chapter 2 of the report, heat loss calculations are gone through. These have been made partly by means of the detailed calculation programs HEAT2 [2], HEAT3 [3] and THERM [4] for calculation of thermal bridge effects, i.e. line and point heat loss coefficients, whereas U-values for constructions with homogeneous layers have been calculated from the rules stated in DS418 [5]. Then the results of the calculations are summarized and a calculation is made of the expected dimensioned heat loss of the house plus the total thermal bridge part.

Equally, simulations are made of the heating demand and indoor climate of the house by means of the simulation program BSIM2000 [6]. The results are the energy balance of the house and the expected operative temperature in selected rooms.

A number of parameter analyses are also carried out. In that connection the influence of a smaller internal heat supplement, a less efficient heat recovery unit, a smaller infiltration (more airtight building envelope) and the temperature of the floor heating pipes are investigated.

At the end of 2001 By og Byg (the Danish Building Research Institute) published a proposal for new energy regulations in the prospective Building Regulations in 2005 [7]. This sets the scene for buildings to meet the requirements for the total energy consumption (the energy requirement for heating, ventilation and cooling in the form of both heating and electricity), i.e. not as now just the heat consumption for heating and ventilation. It has therefore been relevant to investigate whether the house meets the future requirements. The calculations are an illustration of the method (how the total energy consumption is calculated) rather than a concrete demonstration of the fact that the gross energy limits has been observed, as it is the first draft of new regulations.

Furthermore, an economical estimation is made of the energy-saving measures that are used in the house. The reference is a similar house with a cavity wall and with an insulation level conforming to requirements in the present building regulations.

Finally, an account is given of the conclusions that can be drawn from the calculations and simulations that are described in the report.

1 PROJEKTETS BAGGRUND OG FORMÅL

1.1 Baggrund

I Energi 2000 (handlingsplan for en bæredygtig udvikling fra 1990) [8] forpligtede regeringen sig til at arbejde for, at nybyggeriets varmebehov reduceres til 50 % af det daværende niveau frem til år 2000. Bygningsreglementet, der kom i 1995, medførte en reduktion på 25 %. Før en yderligere skærpelse iværksættes, gennemføres de nødvendige udredninger og forsøgsprojekter, der belyser de økonomiske, byggetekniske, indeklima- og komfortmæssige konsekvenser. Målsætningen er i år 2005 at nedbringe energibehovet i nybyggeriet til et niveau, der svarer til 50 %-målsætningen i Energi 2000, dvs. med yderligere 33 %.

For at kunne opfylde de skærpede krav er der et stort behov for udvikling af nye klimaskærmskonstruktioner med større isoleringstykkelser og mindre kuldebroer.

I 1998 startede 2. fase af EFP-projektet ”Klimaskærm til fremtidens nybyggeri og energirenovering”, og projektet afsluttedes år 2000. Projektet, som blev gennemført ved Institut for Bygninger og Energi (nu BYG•DTU) på Danmarks Tekniske Universitet i samarbejde med SBI (nu By og Byg), havde til formål at udvikle nye klimaskærmskonstruktioner, som gør det muligt at opfylde de forventede skærpede krav. De udviklede konstruktioners varmetekniske ydeevne er dog udelukkende underbygget ved detaljerede beregninger.

For at igangsætte processen mht. at implementere de udviklede konstruktionstyper er der et stort behov for at underbygge konstruktionernes ydeevne under realistiske forhold, da byggebranchen må have sikkerhed for at grundlaget er i orden før ideerne indføres. Derfor er der et behov for både at vise de nye konstruktioner i en realistisk sammenhæng samtidig med at deres beregnede ydeevne underbygges ved realistiske in-situ målinger.

Danske typehusproducenter har vist interesse for projektet, hvilket har gjort det muligt at opføre rigtige forsøgshuse. Gennem samarbejde, udvikling og projektering direkte med typehusproducenter og underleverandører i en realistisk sammenhæng, foregår implementeringen af de nye konstruktioner derved på en hensigtsmæssig måde.

For huset beskrevet i denne rapport, har BYG•DTU dog ikke medvirket ved udvikling, projektering og opførelse af huset. Imidlertid er der anvendt nogle nye typer højisolerede klimaskærmskonstruktioner i huset (især ydervægge og fundamenter/terrændæk), som betyder at dette med fordel kan indgå i projektet.

1.2 Formål

Projektets overordnede formål er at dokumentere den varmetekniske ydeevne for fremtidens klimaskærmskonstruktioner således at det eftervises at de forventede skærpelser til bygningsreglementet kan udføres byggeteknisk forsvarligt og indenfor fornuftige økonomiske rammer.

Det er hensigten at projektet skal medvirke til at styrke udviklingen af bedre klimaskærmskonstruktioner ved blandt andet at vise gode eksempler på integration af vinduer i de nye typer klimaskærmskonstruktioner samt illustrere hvordan husets systemer (gulvvarme- og ventilationsanlæg) kan udnyttes bedst muligt og derved medvirke til at nedbringe husets varmebehov. Desuden er det formålet at underbygge disse konstruktioners

varmetekniske ydeevne ved at foretage detaljerede målinger af energiforbrug mv. Målingerne beskrives i særskilt rapport.

2 BEREGNING AF VARMETABSKOEFFICIENTER MM.

I dette kapitel gennemgås baggrunden for og resultaterne af de detaljerede beregninger af konstruktioner og samlingsdetaljer varmetabskoefficienter. Først gives en kortfattet beskrivelse af de enkelte konstruktioner og samlingsdetaljer samt varmesystemet. Herefter foretages beregninger af varmetabskoefficienter for hhv. konstruktioner og samlingsdetaljer, og der opstilles en samlet oversigt over resultaterne. Med hensyn til varmetabskoefficienterne foretages der beregninger af alle konstruktioner som indgår i huset samt alle de vigtigste samlingsdetaljer, dvs. de detaljer som indeholder de største kuldebrobidrag til det samlede transmissionstab.

Varmetabsberegninger er gennemført på baggrund af indvendige mål, idet samtlige betydende kuldebroer medtages i beregningerne. Derfor er det ikke nødvendigt at bruge udvendige mål som angivet i DS418.

Huset er et 1½ plans én-familiehus på 153 m². Stueetagen består af en stor vinkelstue, køkken, bryggers, WC og entré mens 1. salen består af soveværelse, 2 værelser, bad, depotrum og en gang. I bilagssektionen er vist plantegninger af stueetage og 1. sal, facader, lodret snit gennem huset samt en beliggenhedsplan.

2.1 Beskrivelse af konstruktioner og systemer

Konstruktioner og varmesystemet beskrives kort i det følgende. I bilagssektionen er der vist tegninger af typehuset.

2.1.1 Terrændæk

Konstruktionen består, regnet nedefra, af 200 mm komprimeret afrettet sand ($\lambda=2,000$ W/mK), 200 mm armeret betonplade ($\lambda=1,600$ W/mK), 225 mm ekspanderet polystyren ($\lambda=0,042$ W/mK), 100 mm betonklaplag ($\lambda=1,600$ W/mK) med gulvvarmeslanger og armeringsnet og 15 mm gulvbelægning/klinker. Gulvvarmeslangerne er beliggende i den nederste tredjedel af betonlaget.

2.1.2 Fundament

Fundamentet er opbygget (ovenfra – ned) af 2 stk. 150 x 200 mm Lecablokke ($\lambda=0,25$ W/mK) med 50 mm isolering ($\lambda=0,039$ W/mK) imellem, herunder 2 stk. tilpassede 150 x 125 mm Lecablokke ($\lambda=0,25$ W/mK) med 50 mm isolering ($\lambda=0,039$ W/mK) imellem. Den resterende del af fundamentet er beton ($\lambda=1,600$ W/mK). Mellem betondækket og øverste indvendige Lecablok er påforet 10 mm isolering ($\lambda=0,039$ W/mK) som kuldebroafbrydelse.

2.1.3 Ydervæg

Ydervæggen består som basis af et træskelet med 145 mm + 75 mm isolering ($\lambda=0,039$ W/mK). Indvendig er der afsluttet med 15 mm fibergipspladebeklædning ($\lambda=0,316$ W/mK). Dampspærren er beliggende umiddelbart bag fibergipspladerne. Udvendigt er afsluttet med et 50 mm ventileret hulrum og en 110 mm skalmur ($\lambda=0,780$ W/mK).

2.1.4 Skunkvæg

Skunkvæggen består, regnet indefra, af 10 mm fibergipsplade ($\lambda=0,316$ W/mK), 50 mm mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem 38 x 56 mm forskalling, dampspærre, 200 mm mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem 50 x 220 mm skunkstolper og udvendigt er afsluttet med 12 mm asfaltimprægneret byggeplade ($\lambda=0,250$ W/mK).

2.1.5 Skråvæg

Skråvæggen består, regnet indefra, af 10 mm fibergipsplade ($\lambda=0,316$ W/mK), 50 mm mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem 24 x 48 mm + 38 x 56 mm forskalling, dampspærre, 200 mm mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem 50 x 220 mm skunkstolper og udvendigt er afsluttet med 12 mm asfaltimprægneret byggeplade ($\lambda=0,250$ W/mK).

2.1.6 Indervæg

Indvendige skillevægge består af 15 mm fibergipsplade ($\lambda=0,316$ W/mK), 65 mm mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem 45 x 70 mm stolper og 15 mm fibergipsplade ($\lambda=0,316$ W/mK).

2.1.7 Bjælkelag (etageadskillelse)

Bjælkelaget er opbygget, regnet nedefra, af 10 mm fibergipsplade ($\lambda=0,316$ W/mK), 24 x 100 mm forskalling, 100 mm mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem 45/50 x 200 mm mellem-bjælker og 22 mm spånplader ($\lambda=0,100$ W/mK).

2.1.8 Loft-/tagkonstruktion (hældning 40°)

Konstruktion består, regnet nedefra, af 10 mm fibergipsplade ($\lambda=0,316$ W/mK) fastgjort til 24 x 48 mm + 38 x 56 mm forskalling, dampspærre, 200 mm isolering ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem 50 x 200 mm hanebånd, 100 mm ubrudt mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) over hanebånd, undertag, 38 x 56 mm lægter og betontagsten.

Alt træ forudsættes at være konstruktionstræ med en densitet på 450 kg/m³ ($\lambda=0,120$ W/mK).

2.1.9 Vinduer og døre

Vinduer og døre er af træ (type Vrøgum AD-vinduer og ID-døre). Ruden er type Silverstar Neutral fra Euroglas, der består af (regnet ude fra): 4 mm glas, 14 mm 90/10 argon/luft mellemrum og 4 mm glas med lavemissionsbelægning på udvendig side. Til at holde afstand mellem de to glaslag er anvendt et afstandsprofil af aluminium. Ruden har en center U-værdi på 1,10 W/m²K og en total solenergitransmittans på 63 %. U-værdier for ramme-karm og Ψ -værdier for rudekant er der redegjort for i afsnit 2.3.4.

I tabel 1 nedenfor er vist en oversigt over de enkelte vinduer og døre. Det samlede areal af vinduer og døre er 34,7 m², svarende til ca. 21 % af det opvarmede etageareal.

Tabel 1. Oversigt over vinduer og døre.

Vindues-/dørtype	Antal [stk.]	Bredde [m]	Højde [m]	A _f [m ²]	A _g [m ²]	l _g [m]	A [m ²]	Samlet Areal [m ²]
Vindue/dør A	5	1,488	1,098	0,59	1,04	8,24	1,63	8,17
Vindue/dør B	1	1,788	1,188	0,68	1,44	9,80	2,12	2,12
Vindue/dør C	1	0,588	1,188	0,29	0,41	3,62	0,70	0,70
Vindue/dør D	1	0,888	1,188	0,35	0,70	4,82	1,05	1,05
Vindue/dør E	1	2,178	2,118	1,30	3,31	22,17	4,61	4,61
Vindue/dør E1	1	2,178	2,118	1,30	3,31	22,17	4,61	4,61
Vindue/dør F	1	1,688	2,118	2,41	1,17	5,33	3,58	3,58
Vindue/dør G	1	0,948	2,118	0,66	1,35	6,59	2,01	2,01
Vindue/dør H	1	0,888	2,118	0,63	1,25	9,21	1,88	1,88
Vindue/dør I	1	2,828	2,118	1,18	4,81	30,41	5,99	5,99
I alt								34,72

2.1.10 Varmeanlæg

Varmen til huset produceres vha. et gasanlæg. Gulvvarme er installeret i alle rum i stueetagen og i badet på første sal, øvrige rum på første sal er radiatoropvarmede.

2.1.11 Ventilation

Ventilationen af huset sker vha. aftrækskanaler i køkken, bryggers og bad. Der er mekanisk udsugning fra WC og køkken (emhætte). Der er herudover frisklufttilførsel via ventiler i vinduer, døre og ydervæg (værelser 1. sal). Dette er en meget belastende løsning i forhold til husets opvarmningsbehov. Typisk vil man i lavenergibyggeri benytte varmegenvinding på ventilationsluften, således at ventilationstab for huset minimeres samtidig med at man undgår gener pga. træk eller enten utilstrækkeligt luftskifte eller for stort luftskifte. Danhaus benytter oftest varmegenvinding i deres huse, men i netop dette tilfælde har man af økonomiske grunde valgt en løsning uden varmegenvinding. I de efterfølgende beregninger og simuleringer vil der, udover beregningen af den aktuelle løsning, ligeledes foretages beregninger og simuleringer som belyser hvad effekten af at benytte en effektiv varmegenvinding på ventilationsluften ville være.

2.2 Beskrivelse af samlingsdetaljer

I bilagssektionen er vist et snit i bygningen som giver en idé om samlingsdetaljernes opbygning.

2.3 Beregning af konstruktioner, U-værdier

Beregningerne foretages på baggrund af den nye DS418 6. udgave (Beregning af bygningers varmetab). Standarden er netop blevet revideret, således at beregningen af U-værdien tager udgangspunkt i den deklarerede varmeledningsevne for isoleringsmaterialet bestemt ifølge de harmoniserede europæiske produktstandarder. Disse harmoniserede produktstandarder er trådt i kraft 1. marts 2002 og skal anvendes indenfor et år fra denne dato. Der er desuden sket ændring af beregningen af U-værdien i relation til bl.a. varmeledningsevnen for andre byggematerialer, ventilerede og uventilerede hulrum, luftspalter i isoleringslaget og korrektionen for bindere for at bringe DS 418 i overensstemmelse med den tilsvarende europæiske standard.

Som nævnt er det tilstræbt at følge de nye regler i denne rapport, men da langt de fleste materialer ikke på nuværende tidspunkt har oplysninger om deres deklarerede varmeledningsevne, bruges traditionelle værdier for den praktiske varmeledningsevne. Dette betyder at der for det konkrete hus er regnet med lidt for høje værdier for isoleringsmaterialer og lidt for lave værdier for betonen i fundament og terrændæk.

Detaljerede beregninger af vinduer og døre er foretaget vha. beregningsprogrammet THERM. For ovenlysvinduerne har producenten (VELUX A/S) stillet værdierne til rådighed.

2.3.1 Terrændæk

I huset anvendes gulvvarme. I henhold til DS418 skal materialelag og overgangsisolanser over varmeafgiveren, svarende til gulvvarmeslangerne i betonlaget, ikke regnes med i U-værdien. Gulvvarmeslangerne er placeret i den nederste del af betonlaget, og som en forenkling ses der derfor bort fra betonlaget. U-værdien er beregnet i tabel 2.

Tabel 2. U-værdi for terrændæk.

	s [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Isolans for jord			1,500
Isolering, EPS	0,225	0,042	5,357
Armeret betonplade	0,200	2,300	0,087
Afrettet vibreret sand	0,200	2,000	0,100
		$\Sigma R =$	7,044
Ukorrigeret varmetabskoefficient, U'			0,142
Korrektion for luftspalter (Anneks A: Niveau 0: Isolering i to lag)			0,000
U-værdi			0,142

2.3.2 Ydervæg

Ydervæggene indeholder kun kuldebroer i begrænset omfang, idet gennembrydninger af konstruktionen er foretaget med træ som kun leder varmen ca. 3 gange bedre end isoleringen.

Først foretages en beregning af U-værdien for ydervæggen uden kuldebroer. Herefter foretages der, vha. beregningsprogrammet HEAT2, en detaljeret beregning af linietabskoefficienten for træstolperne i ydervæggen. Ved at fastlægge hvor mange løbende meter træstolpe der er i ydervæggen i alt, kan der fastlægges et tillæg til U-værdien for væggen uden kuldebroer. Tillægget beregnes til: 0,022 W/m²K. Den samlede gennemsnitlige U-værdi er beregnet i Tabel 3.

Tabel 3. Samlet gennemsnitlig U-værdi for ydervægge.

Ydervæg	s [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans			0,170
Fibergips	0,015	0,316	0,047
Isolering, mineraluld	0,145	0,039	3,718
Asfaltimprægneret byggeplade	0,012	0,250	0,048
Isolering, mineraluld	0,075	0,039	1,923
50 mm ventileret hulrum + skalmur	-	-	0,300
		$\Sigma R =$	6,206
Ukorrigeret varmetabskoefficient, U'			0,161
Korrektion for luftspalter (Anneks A: Niveau 0: Isolering m. forskudte samlinger)			0,000
Korrektion for kuldebroer (træstolper)			0,022
U-værdi			0,183

2.3.3 Skunkvæg

Skunkvæggene indeholder, ligesom ydervæggene, kun kuldebroer i begrænset omfang, idet gennembrydninger af konstruktionen er foretaget med træ.

Beregningen af skunkvæggens U-værdi foretages analogt med beregningen af U-værdien for ydervæggen. Tillægget beregnes til: 0,027 W/m²K. Den samlede gennemsnitlige U-værdi er beregnet i tabel 4.

Tabel 4. Samlet gennemsnitlig U-værdi for skunkvægge.

Skunkvæg	s [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans			0,170
Fibergips	0,010	0,316	0,032
Isolering, mineraluld	0,050	0,039	1,282
Isolering, mineraluld	0,200	0,039	5,128
Luft, 20 mm	-	-	0,180
Asfaltimprægneret byggeplade	0,012	0,250	0,048
		$\Sigma R =$	6,840
Ukorregeret varmetabskoefficient, U'			0,146
Korrektion for luftspalter (Anneks A: Niveau 0: Isolering m. forskudte samlinger)			0,000
Korrektion for kuldebroer (træstolper, forskalling)			0,027
U-værdi			0,173

2.3.4 Skråvæg

Skråvæggene indeholder, ligesom ydervæg og skunkvæg, kun kuldebroer i begrænset omfang, idet gennembrydninger af konstruktionen er foretaget med træ. Beregningen af U-værdien foretages analogt med de to foregående beregninger.

Tillægget beregnes til: 0,045 W/m²K. Den samlede U-værdi er beregnet i tabel 5.

Tabel 5. Samlet gennemsnitlig U-værdi for skråvægge.

Skråvæg	s [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans			0,170
Fibergips	0,010	0,316	0,032
Luft, 50 mm	-	-	0,180
Isolering, mineraluld	0,220	0,039	5,641
Luft, 20 mm	-	-	0,180
Tagdækning	-	-	-
		$\Sigma R =$	6,203
Ukorregeret varmetabskoefficient, U'			0,161
Korrektion for luftspalter (Anneks A: Niveau 0: Isolering m. forskudte samlinger)			0,000
Korrektion for kuldebroer (træstolper, forskalling)			0,045
U-værdi			0,206

2.3.5 Skillevægge

Skillevæggen er, ligesom husets øvrige vægge, opbygget med træ og isolering. Beregningerne foretages analogt med de øvrige U-værdiberegninger for vægge. Den samlede gennemsnitlige U-værdi for skillevæggene er beregnet i tabel 6.

Tabel 6. Samlet gennemsnitlig U-værdi for skillevægge.

Skillevæg	s [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans			0,260
Fibergips	0,010	0,316	0,032
Isolering, mineraluld	0,065	0,039	1,667
Fibergips	0,010	0,316	0,032
		$\Sigma R =$	1,991
Ukorrigeret varmetabskoefficient, U'			0,502
Korrektion for luftspalter (Anneks A: Niveau 0: Isolering m. forskudte samlinger)			0,000
Korrektion for kuldebroer (træskelet)			0,087
U-værdi			0,589

2.3.6 Bjælkelag

Etageadskillelsen i huset er opbygget med 50 x 220 mm bjælkelag.

U-værdien for bjælkelaget bestemmes analogt med tidligere beregninger af konstruktioner indeholdende træstolper. Tillægget for træstolperne beregnes til: 0,016 W/m²K. Den samlede gennemsnitlige U-værdi er beregnet i tabel 7.

Tabel 7. Samlet gennemsnitlig U-værdi for bjælkelaget.

Bjælkelag	s [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans			0,260
Spånplade	0,022	0,120	0,183
Luft, 120 mm	-	-	0,160
Isolering, mineraluld	0,100	0,039	2,564
Luft, 25 mm	-	-	0,160
Fibergips	0,010	0,316	0,032
		$\Sigma R =$	3,359
Ukorrigeret varmetabskoefficient, U'			0,298
Korrektion for luftspalter (Anneks A: Niveau 0: Isolering m. forskudte samlinger)			0,000
Korrektion for kuldebroer (bjælkelag, forskalling)			0,016
U-værdi			0,314

2.3.7 Loft-/tagkonstruktion

U-værdien for loftskonstruktionen bestemmes analogt med tidligere beregninger af konstruktioner indeholdende træ. Tillægget for spærene beregnes til: 0,006 W/m²K. Den samlede gennemsnitlige U-værdi er beregnet i tabel 8.

Tabel 8. Samlet gennemsnitlig U-værdi for loft ved hanebånd.

Loft	s [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans			0,140
Fibergips	0,010	0,316	0,032
Luft, 25 mm	-	-	0,16
Isolering, mineraluld	0,300	0,039	7,692
Ventileret tagrum + tagdækning	-	-	0,300
		$\Sigma R =$	8,324
Ukorrigeret varmetabskoefficient, U'			0,120
Korrektion for luftspalter (Anneks A: Niveau 0: Isolering m. forskudte samlinger)			0,000
Korrektion for kuldebroer (forskalling, spær)			0,006
U-værdi			0,126

2.3.8 Vinduer og døre

Der er foretaget detaljerede beregninger af de forskellige snit der forekommer i de enkelte vinduer- og døres ramme-karm konstruktion. Resultatet af beregninger af et bestemt snit er en U-værdi for ramme-karm (U_f) og en linietafsværdi for rudekanten (Ψ_g). På baggrund af disse beregninger er der beregnet en gennemsnitlig U_f - og Ψ_g -værdi for hvert vindue/dør, hvorefter en samlet U-værdi er bestemt. Beregningerne er foretaget med programmet THERM og ud fra metoder beskrevet i Vindueskompendium 3 [9] omhandlende detaljerede metoder til bestemmelse af energimærkningsdata. Resultatet af beregningerne fremgår af nedenstående tabel 9. Arealer af rude og ramme-karm samt længde af rudekant fremgår af tabel 1.

Den samlede U-værdi beregnes på følgende måde:

$$U = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + \Psi_g \cdot l_g}{A_g + A_f}$$

I kolonnen ”g total” længst til højre er angivet hvor mange procent af den solstråling der rammer vinduet som transmitteres ind i rummet, baseret på vinduets udvendige mål.

Ψ_g varierer kun ganske lidt fra snit til snit, og derfor er det valgt at benytte en gennemsnitlig værdi i forbindelse med fastlæggelsen af U-værdierne for vinduer og døre.

Tabel 9. Beregnede varmetekniske data for vinduer og døre.

Vindues- /dørtype	Bredde [m]	Højde [m]	U_g [W/m ² K]	U_f [W/m ² K]	Ψ_g [W/mK]	U [W/m ² K]	g total [%]
Vindue/dør A	1,488	1,098	1,10	1,57	0,089	1,716	0,40
Vindue/dør B	1,788	1,188	1,10	1,57	0,089	1,659	0,43
Vindue/dør C	0,588	1,188	1,10	1,53	0,089	1,739	0,37
Vindue/dør D	0,888	1,188	1,10	1,54	0,089	1,652	0,42
Vindue/dør E	2,178	2,118	1,10	1,58	0,089	1,661	0,45
Vindue/dør E1	2,178	2,118	1,10	1,58	0,089	1,661	0,45
Vindue/dør F	1,688	2,118	1,10	1,56	0,089	1,889	0,42
Vindue/dør G	0,948	2,118	1,10	1,55	0,089	1,539	0,42
Vindue/dør H	0,888	2,118	1,10	1,55	0,089	1,685	0,42
Vindue/dør I	2,828	2,118	1,10	1,44	0,089	1,590	0,52

For ovenlysvinduerne har fabrikanten (Velux) stillet U-værdien til rådighed. Værdien er oplyst som en samlet U-værdi for hele vinduet til ca. 1,50 W/m²K totalt.

2.4 Beregning af samlingsdetaljer, Ψ -værdier

Beregninger af samlingsdetaljer foretages vha. de detaljerede beregningsprogrammer HEAT2 og HEAT3. I hvert af de efterfølgende afsnit er der givet en kortfattet gennemgang af hvordan beregningerne er gennemført (forudsætninger, randbetingelser osv.)

2.4.1 Terrændæk/ydervæg (kuldebro ved fundament)

I huset findes to typiske snit i fundamentet. Det ene er ved døre og høje vinduespartier og det andet er ved ydervæg. Sidstnævnte udgør langt hovedparten af fundamentets længde. Beregning af varmetabet foretages ved at opbygge en model efter retningslinierne givet i anneks D til DS418. I tabel 10 er angivet mellemresultaterne for beregningen af fundament ved ydervæg.

Tabel 10. Resultater. Linietabskoefficient for fundament ved ydervæg. Opvarmningsperioden er defineret som september til maj.

Måned -	T_{ude} [°C]	T_{ref} [°C]	$\Phi_{2-D, tot}$ [W/m]	$\Phi_{1-D, væg}$ [W/m]	$\Phi_{1-D, terr.}$ [W/m]	$\Psi_{fund} \cdot T$ [W/m]
Januar	-0,21	11,65	13,00	5,04	5,58	2,37
Februar	-0,21	11,10	13,57	5,04	5,58	2,95
Marts	1,99	10,61	13,22	4,49	5,58	3,14
April	5,80	10,30	12,04	3,54	5,58	2,92
Maj	10,20	10,26	10,35	2,44	5,58	2,33
Juni	14,01	10,50	8,61	1,49	5,58	1,53
Juli	16,21	10,96	7,27	0,95	5,58	0,74
August	16,21	11,51	6,70	0,95	5,58	0,17
September	14,01	12,00	7,05	1,49	5,58	-0,03
Oktober	10,20	12,31	8,22	2,44	5,58	0,19
November	5,80	12,35	9,91	3,54	5,58	0,79
December	1,99	12,10	11,66	4,49	5,58	1,58
Middel for opv. per.	5,54	11,41	11,00	3,61	5,58	1,80

T_{ude} svarer til lufttemperaturen ude.

T_{ref} svarer til temperaturen i referencepunktet. Referencepunktet er beliggende umiddelbart under det kapillarbrydende lag, 4 m fra den indvendige side af ydervæggen. T_{ref} aflæses direkte af den 2-dimensionale beregning.

$\Phi_{2-D, tot}$ svarer til det samlede varmetab gennem samlingsdetaljen (dvs. 1,5 m ydervæg og 4,0 m terrændæk) i W/m. $\Phi_{2-D, tot}$ aflæses direkte af den detaljerede 2-dimensionale beregning.

$\Phi_{1-D, væg}$ svarer til det rene 1-dimensionale varmetab gennem ydervæggen. Varmetabet bestemmes ved at fastlægge ydervæggens U-værdi (0,166 W/m²K), og gange denne med højden af væggen (1,5 m) og temperaturforskellen mellem inde og ude for hver enkelt måned. U-værdien angivet her afviger en smule fra den som er beregnet i afsnit 2.3.2, idet der i fradragsberegningen benyttes den U-værdi som svarer til den modellerede ydervæg.

$\Phi_{1-D, \text{ terr}}$ svarer til det rene 1-dimensionale varmetab gennem terrændækket (4,0 m). Varmetabet bestemmes ved at fastlægge terrændækkets U-værdi uden at medtage jordisolansen (0,162 W/m²K), og gange denne værdi med bredden af terrændækket (4,0 m) og den gennemsnitlige temperaturforskel mellem indeluft og referencepunktet. I denne forbindelse tages temperaturen i referencepunktet som middelværdien for opvarmningsperioden, og derfor vil dette varmetab være konstant over året. U-værdien angivet her afviger en smule fra den som er beregnet i afsnit 2.3.1, idet der i fradragsberegningen benyttes den U-værdi som svarer til det modellerede terrændæk.

$\Psi_{\text{fund}} \cdot T$ fastlægges som forskellen på det 2-dimensionale og 1-dimensionale varmetab. Fundamentsløsningens linietafskoefficient kan herefter bestemmes ved at fastlægge middelværdien for $\Psi_f \cdot T$ for opvarmningsperioden (september – maj) og dividere denne størrelse med den gennemsnitlige temperaturdifferens mellem inde og ude for opvarmningsperioden (20 – 5,54 = 14,46 °C).

Linietafskoefficienten for fundament ved ydervæg: $\Psi_{\text{fund}} = 0,125 \text{ W/mK}$

Linietafskoefficienten for fundament ved døre og høje vinduespartier beregnes på tilsvarende vis: $\Psi_{\text{fund, åbninger}} = 0,123 \text{ W/mK}$

2.4.2 Skillevæggsfundament

Beregningen af linietafskoefficienten for skillevæggsfundamentet foretages på baggrund af en simplificeret 2-dimensional beregning. Der opbygges en model hvor der medtages 1 m på hver side af skillevæggen, 1 m af skillevæggen over gulvet, og 2 m af jorden under fundamentet. 2 m under fundamentet antages temperaturen at være 10 °C.

Først gennemføres en beregning hvor varmetabet gennem skillevæggsfundamentet og terrændækket fastlægges. Herefter fratrækkes varmetabet gennem terrændækket, dvs. svarende til en situation hvor skillevæggsfundamentet ikke er til stede. Forskellen mellem de to beregninger divideres med temperaturforskellen inde og ude (jord), dvs. 20 °C – 10 °C.

På denne baggrund fastlægges linietafskoefficienten til: $\Psi_{\text{skillevæggsfund}} = 0,073 \text{ W/mK}$

2.4.3 Etageadskillelse

I forbindelse med etageadskillelsens samling med ydervæggen vil der forekomme en kuldebro. Beregningen af linietafskoefficienten foretages ved at der opbygges en 2-dimensional model af samlingen. Først gennemføres en beregning af den samlede detalje hvoraf den samlede varmestrøm bestemmes. Herefter foretages en beregning af fradraget, som i dette tilfælde svarer til varmetabet gennem den rene ydervæg. Idet der benyttes indvendige mål i beregningerne skal fradraget udelukkende dække det indvendige areal af ydervæggen, og således svarer referencen til at etageadskillelsen samt den del af ydervæggen som er udfor denne fjernes fra beregningen.

På denne baggrund fastlægges linietafskoefficienten til: $\Psi_{\text{etageadskillelse}} = 0,044 \text{ W/mK}$

2.4.4 Vinduestilslutninger (kuldebro ved fals)

Beregning af linietafskoefficienter foretages ved at opbygge en model efter retningslinierne givet i annek C til DS418. Der foretages en beregning af overfals, sidefals og underfals. Der opbygges modeller af hhv. lodrette og vandret snit i samlingerne mellem vindue og ydervæg.

Der foretages beregninger for tre forskellige situationer, svarende til at vinduet er placeret i hhv. ydervæg, skunkvæg eller skråvæg.

Følgende antagelser anvendes i beregningerne:

Der anvendes en ækvivalent varmeledningsevne for glassdelen af vinduet svarende til at glassdelen har en U-værdi på 1,10 W/m²K.

I modellen medtages 200 mm af glasset og 500 mm af ydervæggen.

Først gennemføres en beregning af den fulde detalje og herudfra fastlægges varmestrømmen. Dernæst foretages en beregning af en tilsvarende model, hvor der indlægges et adiabatisk snit hvor vinduet grænser op til den øvrige konstruktion. Herved bortskæres kuldebroeffekterne som opstår pga. geometrien i samlingen, og da der allerede er taget højde for de konstruktive kuldebroer i samlingen/ydervæggen, er alle effekter dækket ind. Differensen mellem resultaterne divideret med temperaturforskellen (20 °C) svarer til linietafskoefficienten for samlingen.

Samlinger vindue/ydervæg:

Linietafskoefficienten for overfals:

$$\Psi_{\text{overfals}} = 0,079 \text{ W/mK}$$

Linietafskoefficienten for sidefals:

$$\Psi_{\text{sidefals}} = 0,060 \text{ W/mK}$$

Linietafskoefficienten for underfals:

$$\Psi_{\text{underfals}} = 0,057 \text{ W/mK}$$

Samlinger vindue/skunkvæg:

Linietafskoefficienten for overfals:

$$\Psi_{\text{overfals}} = 0,042 \text{ W/mK}$$

Linietafskoefficienten for sidefals:

$$\Psi_{\text{sidefals}} = 0,077 \text{ W/mK}$$

Linietafskoefficienten for underfals:

$$\Psi_{\text{underfals}} = 0,042 \text{ W/mK}$$

Samlinger vindue/skråvæg:

Linietafskoefficienten for overfals:

$$\Psi_{\text{overfals}} = 0,039 \text{ W/mK}$$

Linietafskoefficienten for sidefals:

$$\Psi_{\text{sidefals}} = 0,039 \text{ W/mK}$$

Linietafskoefficienten for underfals:

$$\Psi_{\text{underfals}} = 0,039 \text{ W/mK}$$

2.4.5 Ydervæg/ydervæg (kuldebro ved ydervægshjørne)

Der opbygges en 2-dimensional model af et typisk udsnit af samlingen ved ydervægshjørnet. Af ydervæggen modelleres 0,5 m op til hjørnet (indvendige mål).

Først gennemføres en beregning af den fulde detalje og varmestrømmen fastlægges. Dernæst foretages en beregning af en tilsvarende model, hvor der indlægges to adiabatiske planer, så hele hjørnet i samlingen bortskæres fra beregningen. Herved bortskæres kuldebroeffekterne som opstår pga. geometrien i samlingen. Ved at tage differensen mellem resultaterne af de to beregninger fremkommer linietaf for samlingen.

Linietafskoefficienten for ydervægshjørne:

$$\Psi_{\text{hjørne}} = 0,040 \text{ W/mK}$$

På analog måde fastlægges linietafskoefficienten for hjørnet af skunkvæggen.

Linietafskoefficienten for skunkvægshjørne:

$$\Psi_{\text{hjørne}} = 0,048 \text{ W/mK}$$

2.5 Sammenfatning af resultater

På baggrund af varmetransmissionskoefficienterne fastlagt i de foregående afsnit, kan der nu gennemføres en beregning af husets samlede varmetabskoefficient, og samtidig kan det dimensionerende varmetab bestemmes. I tabel 11 er den samlede varmetabskoefficient for huset beregnet og i tabel 12 er det dimensionerende varmetab beregnet. I sammenfatningen af resultaterne i tabel 11 er størrelsen af vinduer og døre angivet som murhulsmål, da fugen mellem ydervæg og vindue/dør iht. DS418 kan tillægges samme U-værdi som vinduet/døren. Der er regnet med en fugebredde på ca. 10 mm.

Tabel 11. Sammenfatning af resultater af varmetabsberegninger.

Konstruktioner	U [W/m ² K]	A [m ²]	U·A [W/K]
Terrændæk	0,142	69,65	9,89
Ydervæg	0,183	76,46	13,99
Skunkvæg	0,173	18,31	3,16
Skråvæg	0,206	41,35	8,52
Loft-/tagkonstruktion	0,126	41,75	5,26
Vindue/dør A (5 stk.)	1,716	8,46	14,51
Vindue/dør B (1 stk.)	1,659	2,19	3,63
Vindue/dør C (1 stk.)	1,739	0,74	1,28
Vindue/dør D (1 stk.)	1,652	1,10	1,82
Vindue/dør E (1 stk.)	1,661	4,74	7,87
Vindue/dør E1 (1 stk.)	1,661	4,74	7,87
Vindue/dør F (1 stk.)	1,889	3,69	6,96
Vindue/dør G (1 stk.)	1,538	2,09	3,22
Vindue/dør H (1 stk.)	1,685	1,96	3,30
Vindue/dør I (1 stk.)	1,602	6,03	9,67
		ΣUA =	100,96
Samlinger	Ψ [W/mK]	l [m]	Ψ·l [W/K]
Fundament	0,125	22,59	2,82
Fundament ved døre/høje vinduespartier	0,123	11,20	1,38
Skillevægsgfundament	0,073	9,34	0,68
Etageadskillelse	0,044	33,38	1,47
Overfals, facade + gavl	0,079	20,57	1,63
Sidefals, facade + gavl	0,060	42,00	2,52
Underfals, facade + gavl	0,057	9,37	0,53
Overfals, ovenlys	0,042	1,56	0,07
Sidefals, ovenlys	0,077	5,60	0,43
Underfals, ovenlys	0,042	1,56	0,07
Overfals, kvist	0,039	1,49	0,06
Sidefals, kvist	0,039	2,22	0,09
Underfals, kvist	0,039	1,49	0,06
Ydervægshjørne, 1. sal	0,048	2,80	0,13
Ydervægshjørne, stuen	0,040	9,36	0,37
		ΣΨl =	12,30
		ΣUA+Ψl =	112,26

Huset samlede varmetabskoefficient er altså 112,26 W/K. Opgjort pr. m² opvarmet etageareal fås ca. 0,70 W/m²K. Den sidstnævnte værdi er relevant hvis huse af forskellig størrelse skal sammenlignes.

Tabel 12. Dimensionerende varmetab (rumtemperatur på 20°C overalt).

Konstruktioner	U·A [W/K]	ΔT [°C]	Φ [W]
Terrændæk	9,89	30-10	197,80
Ydervæg	13,99	20-(-12)	447,68
Skunkvæg	3,16	20-(-12)	101,25
Skråvæg	8,52	20-(-12)	272,64
Loft-/tagkonstruktion	5,26	20-(-12)	168,32
Vindue/dør A (5 stk.)	14,51	20-(-12)	464,30
Vindue/dør B (1 stk.)	3,63	20-(-12)	116,27
Vindue/dør C (1 stk.)	1,28	20-(-12)	41,08
Vindue/dør D (1 stk.)	1,82	20-(-12)	58,21
Vindue/dør E (1 stk.)	7,87	20-(-12)	251,99
Vindue/dør E1 (1 stk.)	7,87	20-(-12)	251,93
Vindue/dør F (1 stk.)	6,96	20-(-12)	222,78
Vindue/dør G (1 stk.)	3,22	20-(-12)	102,91
Vindue/dør H (1 stk.)	3,30	20-(-12)	105,75
Vindue/dør I (1 stk.)	9,67	20-(-12)	309,37
ΣKonstruktioner =			3112,25
Samlinger	Ψ·l [W/K]	ΔT [°C]	Φ [W]
Fundament	2,82	30-(-12)	118,44
Fundament ved døre/høje vinduespartier	1,38	30-(-12)	57,96
Skillevæggsfundament	0,68	30-10	13,60
Etageadskillelse	1,47	20-(-12)	47,00
Overfals, facade + gavl	1,63	20-(-12)	52,00
Sidefals, facade + gavl	2,52	20-(-12)	80,64
Underfals, facade + gavl	0,53	20-(-12)	17,09
Overfals, ovenlys	0,07	20-(-12)	2,10
Sidefals, ovenlys	0,43	20-(-12)	13,80
Underfals, ovenlys	0,07	20-(-12)	2,10
Overfals, kvist	0,06	20-(-12)	1,86
Sidefals, kvist	0,09	20-(-12)	2,77
Underfals, kvist	0,06	20-(-12)	1,86
Ydervægshjørne, 1. sal	0,13	20-(-12)	4,30
Ydervægshjørne, stuen	0,37	20-(-12)	11,98
ΣSamlinger =			427,50
Σkonstruktioner + samlinger =			3539,75
Ventilationstab $0,34 \cdot 0,50 \text{ h}^{-1} \cdot 303 \text{ m}^3 \cdot (20-(-12)) \text{ °C} =$			1648,32
Dimensionerende varmetab			5188,07

Ventilationstabet beregnet ud fra den tilnærmede formel: $\Phi_v = 0,34 \cdot n \cdot V \cdot (\theta_i - \theta_e)$. Der er forudsat naturlig ventilation med et luftskifte på 0,5 h⁻¹ (afsnit 3.1).

Det fremgår af tabel 12 at det dimensionerende varmetab er ca. 5200 W. Det fremgår ligeledes at det dimensionerende transmissionstab udgør ca. 3560 W, mens samlingernes andel heraf er ca. 430 W.

Kuldebroandelen af det dimensionerende transmissionstab er større end samlingernes andel, da kuldebroerne i vinduer (rudekant) og ydervægge, skunkvægge, skråvægge og loft (træstolper, forskalling mv.) ikke er medtaget heri. Kuldebrobidraget fra rudekanten eller nærmere betegnet termorudens afstandsprofil (udtrykt ved Ψ_g) dækker den samlede to-dimensionale varmestrøm igennem afstandsprofilet og samlingen mellem rude og karm, ramme eller sprosse. Kuldebrobidraget fra træstolper, forskalling mv. i ydervægge, skunkvægge, skråvægge og loft er taget direkte fra beregningen af U-værdierne for de enkelte bygningsdele, og det samlede kuldebrobidrag beregnes som tillægget til U-værdien for kuldebroerne ganget med det totale areal af den pågældende bygningsdel.

Den samlede kuldebroandel kan herefter bestemmes, se tabel 13.

Tabel 13. Kuldebroandel (samlinger inkl. effekt af rudekant og krydsfiner-/træskelet). Rudekant-andelen for hver vindues-/dørtype er beregnet som $\Psi_g \cdot l_g \cdot \text{antal vinduer/døre}$.

Kuldebroandel		Φ [W]
Samlinger (tabel 12)		427,50
Afstandsprofiler	$115,84 \text{ m} \cdot 0,089 \text{ W/m} \cdot (20 - (-12))^\circ\text{C}$	329,91
Ydervæg	$76,46 \text{ m}^2 \cdot 0,022 \text{ W/m} \cdot (20 - (-12))^\circ\text{C}$	53,83
Skunkvæg	$18,31 \text{ m}^2 \cdot 0,027 \text{ W/m} \cdot (20 - (-12))^\circ\text{C}$	15,82
Skråvæg	$41,35 \text{ m}^2 \cdot 0,045 \text{ W/m} \cdot (20 - (-12))^\circ\text{C}$	59,54
Loft	$41,75 \text{ m}^2 \cdot 0,006 \text{ W/m} \cdot (20 - (-12))^\circ\text{C}$	8,02
Total		894,62

Det samlede dimensionerende transmissionstab er som nævnt ca. 3560 W, mens kuldebroerne udgør ca. 895 W heraf, svarende til ca. 25 %. Dette er en relativt høj kuldebroandel, som dog ikke er overraskende, idet der er tale om et meget velisoleret hus.

Varmetabet fra rudekanten bidrager væsentligt til denne andel (udgør 39 %), hvilket primært skyldes at der er brugt et traditionelt afstandsprofil af aluminium. Var der i stedet for anvendt et ikke-metallisk profil (f.eks. type Thermix eller Swisspacer), ville rudekanttabet (Ψ_g) kunne være reduceret til ca. det halve. Kuldebroandelen kunne derved reduceres til ca. 680 W, svarende til 21 % af det samlede dimensionerende varmetab.

3 BEREGNING AF ENERGIFORBRUG OG INDEKLIMA

I dette kapitel gennemgås baggrunden for og resultaterne af de detaljerede simuleringer af det forventede energiforbrug og indeklima. Der foretages en simulering af huset som helhed, hvor effekten af effektiv varmekapacitet, solindfald samt detaljerede beskrivelser af de anvendte systemer indgår.

3.1 Beskrivelse af bygningsmodel

Beregningsmodellen opbygges i BSIM2000.

3.1.1 Zoner

Bygningen opdeles i 10 forskellige zoner, svarende til rumopdelingen. Stue og køkken er sammenhængende og defineres derfor som én zone. I hver af de enkelte zoner defineres de omkringliggende konstruktioner svarende til ydervæg, indervæg, terrændæk, loft-/tagkonstruktion, vinduer og døre. Alle rum forudsættes opvarmet til 20 °C, svarende til den normale dimensionerende indetemperatur i boliger.

3.1.2 Kuldebroer

De beregnede kuldebroeffekter, f.eks. ved fundament og vinduestilslutninger, beskriver det ekstra varmetab som opstår i samlingerne set i forhold til en ideel samling, hvor kun U-værdien for vindue, væg, terrændæk og loft/tag indgår. Disse kuldebroer defineres i BSIM2000 i form af en forhøjelse af varmeledningsevnen af isoleringen i ydervæggen. Effekten af vinduernes rudekant kan medtages direkte ved definering af vinduer BSIM2000.

Varmetabet via fundamentet forhøjes med en faktor som tilsvarende forholdet mellem de aktuelle temperaturforhold og de modellerede temperaturforhold (nærmere forklaring i afsnit 3.1.6).

3.1.3 Infiltration/exfiltration

I bygningen benyttes der naturlig ventilation, og derfor defineres der, jf. Bygningsreglementets krav, et luftskifte på 0,5 h⁻¹ i samtlige zoner. Luftskiftet defineres som infiltration i bygningen, idet dette er den nemmeste måde hvorpå den naturlige ventilation kan beskrives korrekt.

3.1.4 Intern varmelast

Den gennemsnitlige interne varmelast fra personer, belysning og el-udstyr fastsættes med udgangspunkt i SBI-anvisning 184 [10] til 5 W/m² opvarmet etageareal i middel for hele den opvarmede del af huset og hele døgnet i fyringssæsonen. Dette er en simpel og rimelig måde at medtage den interne varmelast. En mulighed er også at specificere et normalt brugsmønster for huset, men indvirkningen på opvarmningsbehovet skønnes at være minimal. Ved en ikke-jævn intern varmelast vil der dog kunne forventes en mærkbar indvirkning på indetemperaturen, men da der normalt ikke opholder sig personer i et beboelseshus i de kritiske timer midt på dagen, vil den jævnt fordelte interne varmelast være på den sikre side.

3.1.5 Udluftning

I bygningen antages det at der foretages udluftning (f.eks. ved at åbne vinduer) ved temperaturer over 24 °C. I simuleringen modelleres dette så der så vidt muligt ikke forekommer temperaturer over 24 °C nogen steder i bygningen, svarende til at der i tilfælde af en for høj temperatur igangsættes en udluftning af det pågældende rum med et luftskifte på 5 h⁻¹.

3.1.6 Opvarmning

I samtlige rum defineres opvarmning svarende til en samlet maksimal effekt på ca. 5,2 kW (jf. beregning af dimensionerende varmetab). Programmet BSIM2000 gav ikke, da disse beregninger blev gennemført, mulighed for at definere gulvvarme på en fyldestgørende måde, og i stedet for defineres opvarmningen som radiatoropvarmning.

Gulvvarmeslangerne vil naturligvis have en højere temperatur end rumluften, og derfor defineres zonen under huset (den fiktive zone ”jord”) som havende en temperatur på 0 °C i stedet for de normalt anvendte 10 °C. Den reducerede jordtemperatur svarer altså til at der haves en temperaturdifferens mellem oversiden af betondækket og jorden på 20 °C, som igen svarer til den dimensionerende gulvvarmeslangetemperatur på 30 °C minus jordtemperaturen på 10 °C.

Kuldebroen i forbindelse med fundamentet vil ligeledes skulle fastlægges på baggrund af en temperaturforskel på 30 °C minus udetemperaturen (5 °C). For at medtage dette forhold i beregningerne øges kuldebroens størrelse med en faktor som tilsvarende forholdet mellem de aktuelle temperaturforhold og de modellerede temperaturforhold, svarende til: $(30-5)/(20-5) = 1,67$.

3.1.7 Ventilation

Som tidligere omtalt benyttes der naturlig ventilation i huset. Den naturlige ventilation er defineret som en infiltration, og derfor defineres der ikke en decideret ventilation i bygningen.

Det er ikke muligt at opnå et opvarmningsbehov som lever op til projektets formål (67 % af nu gældende energiramme) hvis der benyttes naturlig ventilation i den pågældende bygning, og derfor er der i forbindelse med de senere beskrevne parametervariationer, foretaget beregninger for en situation hvor der benyttes mekanisk ventilation med varmegenvinding, med en temperaturvirkningsgrad for varmeveksleren på 90 %.

3.2 Simulering

Simuleringen med bygningsmodellen foretages på baggrund af programmets rutiner og der anvendes i denne forbindelse referenceåret Design Reference Year (Danmark.DRY) [11] 1990 som udvendigt klima. Data i Danmark.DRY er identiske med data i Cph.DRY, blot udvidet med information om skydækket om natten og tilføjet vindretningen i alle timer. Førstnævnte informationer er relevante, idet der er regnet med langbølget strålingsudveksling til himlen. Som model for beregning af solindfald er anvendt Perez [12].

Resultaterne som præsenteres i det efterfølgende afsnit 3.3 er værdier for fyringssæsonen, svarende til perioden uge 1 til uge 18 og uge 18 til uge 52, dvs. fra midt i september måned til begyndelsen af maj måned. Der præsenteres dog også resultater fra sommerperioden i forbindelse med analyser af indeklimaet.

3.2.1 Grundmodel

Grundmodellen er en model af huset, som beskrevet ovenfor. Der er tale om en model med vinduer og døre hvor U-værdien ligger på 1,5-1,9 W/m²K, hvor infiltrationen er 0,5 h⁻¹ og hvor det interne varmetilskud er 5 W pr. m² opvarmet etageareal.

Energirammen for huset ifølge gældende regler er følgende:

$$q_r = 160 + \frac{140}{e}$$

hvor q_r er energirammen i MJ/m² pr. år,
 e er antallet af etager

Antallet af etager er et decimaltal, der beregnes som

$$e = \frac{A_e}{A_{byg}} = \frac{153m^2}{85m^2} \approx 1,8$$

dvs. energirammen bliver

$$q_r = 160 + \frac{140}{1,8} = 238MJ / m^2 pr.år$$

hvilket, for bygningen, svarer til

$$Q_r = q_r \cdot A_e = 238MJ / m^2 pr.år \cdot 153m^2 = 36.414MJ / år = 10.115kWh / år$$

Et af projektets formål er at huset skal have et opvarmningsbehov svarende til mindst en reduktion på 33 % ift. energirammen. Målet er derfor:

$$Q_{67\%} = 10115 \cdot 67 \% = 6777 kWh$$

3.2.2 Parametervariationer

Små afvigelser i forudsætningerne kan påvirke resultaterne ganske betydeligt, og derfor er der gennemført en række parametervariationer for at vurdere sådanne ændrings betydning. Samtidig vil det også være interessant at belyse betydningen af at benytte en effektiv varmegenvinding på ventilationsluften, idet dette vil medføre en væsentlig reduktion af opvarmningsbehovet. Der gennemføres derfor parametervariationer hvor det interne varmetilskud ændres, hvor der indføres effektiv varmegenvinding og hvor gulvvarmeslangernes temperatur ændres. I tabel 14 er vist en oversigt og nedenfor en kort forklaring.

Tabel 14. Beskrivelse af parametervariationer.

Modelnavn	Internt Varmetilskud [W/m ²]	VGV effektivitet [%]	Infiltration [h ⁻¹]	Gulvvarme- temperatur [°C]
Grundmodel	5	-	0,50	30
IV 3	3	-	0,50	30
VGV 90	5	90	0,10	30
GV 25	5	-	0,50	25

IV 3: I denne model er det interne varmetilskud reduceret fra 5 W/m² til 3 W/m². En sådan reduktion er realistisk, hvis elforbruget til belysning og el-udstyr reduceres gennem valg af energirigtige apparater. Dette vil naturligvis have en relativt stor betydning for opvarmnings-

behovet, men da man overvejer at skærpe reglerne på dette område, vil det være væsentligt at undersøge husets varmebalance under disse forhold.

VG 90:

Effektiv varmegenvinding på ventilationsluften giver store energimæssige besparelser, og bygningen vil ikke kunne leve op til projektets formål hvis ikke ventilationstabet reduceres væsentligt. Derfor gennemføres der en simulering hvor der indføres et ventilationssystem med effektiv varmegenvinding, således at det kan dokumenteres at dette er tilstrækkeligt til at husets opvarmningsbehov ligger indenfor de forventede skærpede krav. Effektiviteten af varmegenvinderen fastsættes som 90 %, svarende til de bedste produkter på markedet i dag. I Bygningsreglementet kræves at der fjernes 10 l/s fra bryggers, 15 l/s fra badeværelser og 20 l/s fra køkken. For det pågældende hus skal altså sammenlagt fjernes 60 l/s, hvilket svarer til et luftskifte på ca. $0,8 \text{ h}^{-1}$.

GV 25

I denne model forudsættes gulvvarmeslangernes gennemsnitlige temperatur i fyringssæsonen at være 25 °C frem for de oprindelige 30 °C.

3.2.3 Nye energibestemmelser: Bruttoenergiramme

I september 2001 udsendte Statens Byggeforskningsinstitut (By og Byg) et oplæg til energibestemmelser i Bygningsreglement år 2005 (og skitser til bestemmelser i år 2012). Oplægget går kort fortalt ud på, at der ikke kun skal fokuseres på bygningens varmeisolering, men også på energieffektiv bygningsudformning og installationer samt størst mulig udnyttelse af solenergi. Der er derfor lagt op til at energirammen skal beregnes som energibehovet til opvarmning, ventilation og køling, som indeholder varmebehovet til rumopvarmning og varmt brugsvand, energitabet og el-behovet i kedelanlæg, el-behovet til pumper i varme- og varmtvandsanlæg, el-behovet til ventilatorer samt el-behovet til køling. Energiforbruget bestemmes som summen af varmebehovene plus 3 gange summen af el-behovene. Denne faktor 3 svarer nogenlunde til prisforskel og forskel på primær energiforbrug og miljøbelastning ved henholdsvis varme- og elforbrug. Varme- og elproduktion fra solenergianlæg (solvarme- og solcelleanlæg) i bygningen kan modregnes.

Det vil på denne baggrund være relevant at undersøge om huset opfylder den kommende nye bruttoenergiramme, som der altså er lagt op til skal gælde fra år 2005.

3.3 Resultater

I dette afsnit gennemgås resultaterne af de detaljerede simuleringer af det forventede opvarmningsbehov og indetemperaturforhold. Desuden foretages beregning af huset samlede energiforbrug på baggrund af metode i By og Byg's oplæg til nye energibestemmelser 2005.

3.3.1 Grundmodel

Varmebalancen for grundmodellen er vist i tabel 15. I bilag 1 er bidragene til varmebalancen anført på månedsbasis og desuden er månedsmiddeltemperaturen inde og ude anført.

Tabel 15. Resultater for grundmodel.

Varmebalance		kWh pr. år	
		8527	
$Q_{\text{opvarmning}}$	Energiforbrug til rumopvarmning		
$Q_{\text{infiltration}}$	Nettobidrag ved infiltration	-4907	
$Q_{\text{udluftning}}$	Varmetab ved udluftning ($>24\text{ }^{\circ}\text{C}$)	-216	
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	3112	
Q_{intern}	Varme tilført fra personer og udstyr	4543	
$Q_{\text{transmission}}$	Transmissionstab via klimaskærmen	-11060	Heraf vinduer: 6058
Q_{mix}	Ventilationstab til naborum	0	
$Q_{\text{ventilation}}$	Ventilationstab via ventilationsanlæg	0	
I alt		0	

Med baggrund i forudsætningerne vedrørende lufttæthed, udluftning, internt varmetilskud osv., er opvarmningsbehovet bestemt til at være 8527 kWh/år, svarende til 84 % af den nugældende energiramme. Målsætningen om et opvarmningsbehov på 67 % af energirammen er derfor ikke opfyldt, hvilket som tidligere omtalt var forventeligt.

Af tabel 15 fremgår det også at transmissionstabet via vinduer og døre udgør 6058 kWh, svarende til 54 % af det totale transmissionstab, hvilket ikke er en overraskende høj andel, da isoleringstykkelsen i gulv-, væg- og loftfladerne er ca. 225 mm. Vinduer og døres store betydning for transmissionstabet viser også at det vil være på dette område der skal sættes ind, hvis man ønsker at nedbringe opvarmningsbehovet yderligere.

3.3.2 Parametervariationer.

Resultater af parametervariationerne er vist i tabel 16.

Tabel 16. Parametervariationer. Varmebalance for de enkelte modeller. Angivet i kWh pr. år.

	Grundmodel	IV 3	VG 90	GV 25
	8527	10136	5084	8183
$Q_{\text{opvarmning}}$				
$Q_{\text{infiltration}}$	-4907	-4889	-1025	-4912
$Q_{\text{udluftning}}$	-216	-149	-80	-237
Q_{sol}	3112	3112	3112	3112
Q_{intern}	4543	2723	4543	4543
$Q_{\text{transmission}}$	-11060	-10934	-11526	-10690
Q_{mix}	0	0	219	0
$Q_{\text{ventilation}}$	0	0	-328	0

Modellen IV 3 blev simuleret for at undersøge hvilken betydning det ville have for opvarmningsbehovet, hvis det interne varmetilskud reduceredes fra 5 W/m^2 til 3 W/m^2 . Dette har naturligvis en stor effekt, da det interne varmetilskud for grundmodellen næsten svarer til halvdelen af opvarmningsbehovet. Varmebehovet øges med 1600 kWh svarende til ca. 19 %.

Modellen VG 90 viser den store betydning det har for varmebalancen at der benyttes en effektiv varmegenvinding på ventilationsluften. Ved at benytte varmegenvinding på ventilationsluften kan opvarmningsbehovet reduceres med 3443 kWh, hvilket svarer til 40 %. Betydningen af dette tiltag er naturligvis ikke overraskende, idet der ved 90 % effektivitet genvindes mere end 6900 kWh varme. Årsagen til at reduktionen af opvarmningsbehovet kun er ca. halvdelen af den varme der genvindes er, at luftskiftet i grundmodellen er $0,5\text{ h}^{-1}$ mens

det i VGV 90 modellen er næsten $0,8 \text{ h}^{-1}$. Dette misforhold afspejler at reglerne for naturlig og mekanisk ventilation ikke er "retfærdigt" opstillet, og dette bevirker at mekanisk ventilation med varmegenvinding typisk vil synes mindre attraktivt end det faktisk er. Modellen VGV 90 har et opvarmningsbehov som er ca. 50 % af den nu gældende energiramme, og dermed viser modellen at huset uden problemer vil kunne leve op til fremtidens energirammekrav.

Modellen GV 25 viser at gulvvarmeslangernes temperatur har en relativt stor betydning for det samlede opvarmningsbehov. Hvis den gennemsnitlige temperatur er 25°C i stedet for 30°C opnås en besparelse på 344 kWh, hvilket svarer til ca. 4 %. Omvendt vil opvarmningsbehovet naturligvis stige, hvis temperaturen i gulvvarmeslangerne er højere end de dimensionerende 30°C . Besparelsen i opvarmningsbehovet opnås ved et mindsket varmetab gennem terrændæk og fundament.

3.3.3 Energirammeberegning – Bygningsreglement 2005

Energirammen for boliger er i oplægget til nye energibestemmelser fastsat til 266 MJ/m^2 pr. år for den pågældende bygning, hvilket svarer til 11305 kWh pr. år for huset. Det betyder at husets samlede energibehov til opvarmning, varmt brugsvand, ventilation og køling pr. m^2 opvarmet etageareal højst må antage denne værdi.

I tabel 17 er foretaget en beregning af bruttoenergirammen iht. ovennævnte oplæg. Forudsætningerne for beregninger er beskrevet i detaljer på side 25 og 26 i dette oplæg. Det skal påpeges at der er tale om et udkast til beregningsmetode.

Tabel 17. Beregning af bruttoenergiramme. Alle værdier er angivet i kWh/år. Det skal bemærkes at metoden foreskriver at el-behov indgår med en faktor 3.

Varme- og el-behov	Energi-behov	Energiramme-beregning	Bemærkninger/forudsætninger
Rumopvarmning	8527	8527	Huset opv. behov, se afsnit 3.3.1
Varmt brugsvand (VBV)	2125	2125	$50 \text{ MJ/m}^2/\text{år}$ svarende til 2125 kWh/år, hvilket svarer til 265 liter/ $\text{m}^2/\text{år}$ ved opvarmning fra 10 til 55°C .
Varmetab fra VV-Beholder	673	269	60 % kommer huset til nytte
Varmetab fra VV-rør	0	0	Der regnes ikke med varmetab fra varmerør i den opv. del af bygn.
Varmetab fra VBV-rør	0	0	Ingen VBV cirkulation.
El-behov i varmeanlæg	251	753	45 W pumpe i konstant drift i fyringssæson. Trin 2.
El-behov i kedelanlæg	278	834	Cirkulationspumpe i kedelanlæg 50 W, drifttid fyringssæson.
El-behov i VBV-anlæg	44	132	Cirkulationspumpe i VBV-anlæg 60 W, drifttid 2h/døgn.
El-behov i ventilationsanlæg	25	75	Forbrug: $0,8 \text{ kJ/m}^3 = 34 \text{ W}$, v. luftskifte $0,5 \text{ h}^{-1}$. Drifttid: 2h/døgn.
El-behov køling	0	0	
I alt	-	12715	Energirammekrav : 11305

Det fremgår af tabel 17 at huset ikke opfylder energirammen iht. det nuværende oplæg til energibestemmelser i 2005. Dette skyldes naturligvis primært at der ikke benyttes et energieffektivt ventilationsanlæg med varmegenvinding, og derfor vil det være interessant at

foretage en tilsvarende beregning hvor bygningen forsynes med ventilationsanlæg med energieffektiv varmegenvinding. Med energieffektivt menes, at der benyttes et system hvor ventilatorerne er DC-ventilatorer i stedet for AC-ventilatorer. DC-ventilatorer forbruger kun ca. halvt så meget el som tilsvarende AC-ventilatorer [13], og da el-forbruget vejer tungt i bruttoenergirammen er dette af meget stor betydning.

Tabel 18. Beregning af bruttoenergiramme. Alle værdier er angivet i kWh/år. Det skal bemærkes at metoden foreskriver at el-behov indgår med en faktor 3. Der benyttes ventilationsanlæg med varmegenvinding, 90 % effektivitet.

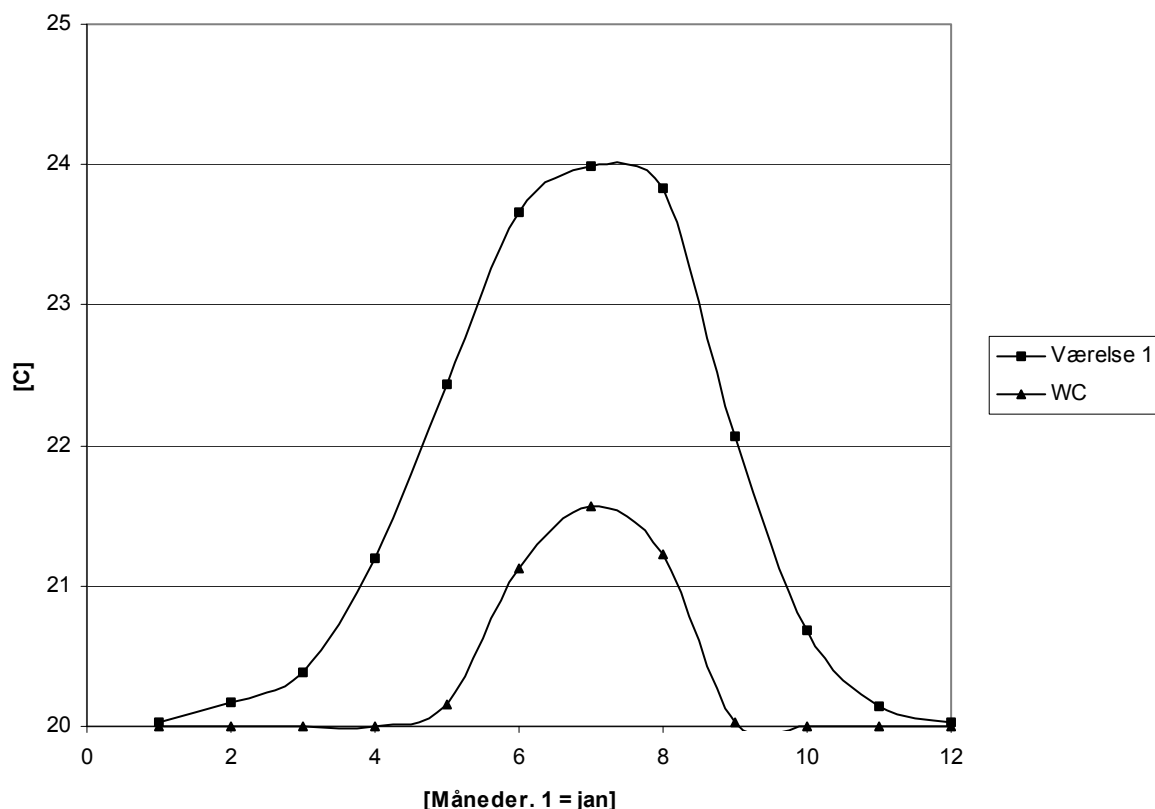
Varme- og el-behov	Energi-behov	Energiramme-beregning	Bemærkninger/forudsætninger
Rumopvarmning	5084	5084	Huset opv. behov, se afsnit 3.3.1
Varmt brugsvand (VBV)	2125	2125	50 MJ/m ² /år svarende til 2125 kWh/år, hvilket svarer til 265 liter/m ² /år ved opvarmning fra 10 til 55 °C.
Varmetab fra VV-Beholder	673	269	60 % kommer huset til nytte
Varmetab fra VV-rør	0	0	Der regnes ikke med varmetab fra varmerør i den opv. del af bygn.
Varmetab fra VBV-rør	0	0	Ingen VBV cirkulation.
El-behov i varmeanlæg	251	753	45 W pumpe i konstant drift i fyringssæson. Trin 2.
El-behov i kedelanlæg	278	834	Cirkulationspumpe i kedelanlæg 50 W, drifttid fyringssæson.
El-behov i VBV-anlæg	44	132	Cirkulationspumpe i VBV-anlæg 60 W, drifttid 2h/døgn.
El-behov i ventilationsanlæg	578	1734	Forbrug: 1,1 kJ/m ³ = 66 W, v. 60 l/s. Drifttid: Hele året.
El-behov køling	0	0	
I alt	-	10931	Energirammekrav : 11305

Det fremgår af tabel 18 at huset opfylder bruttoenergirammen iht. oplægget, og det kan altså konkluderes at man uden videre kan opfylde et kommende energiramme krav, hvis der blot installeres et energieffektivt ventilationsanlæg med varmegenvinding i huset. El-behovet i varmeanlægget kunne muligvis reduceres ved at lade pumpen køre på trin 1 (30 W) i de mindre kolde måneder af fyringssæsonen.

3.3.4 Indeklima

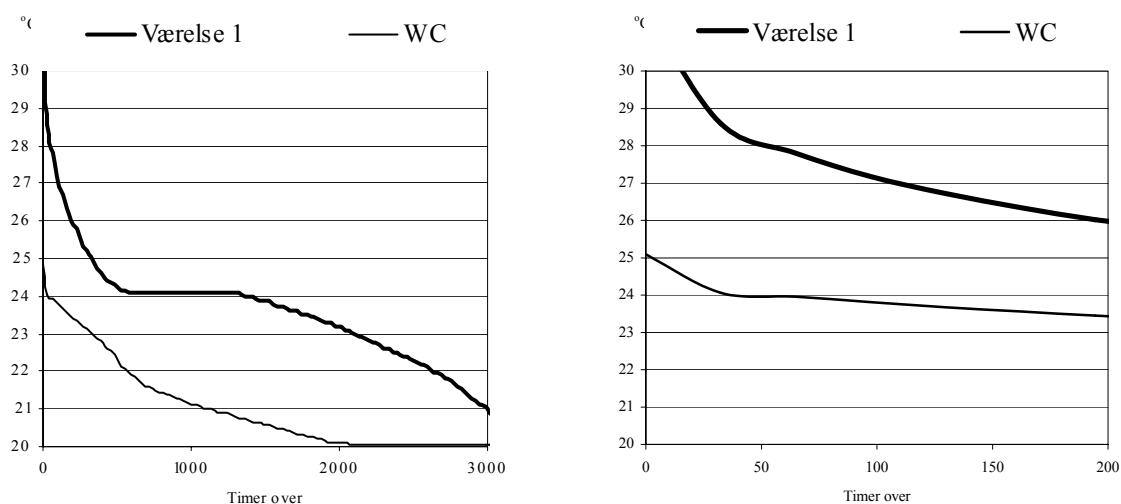
Der er foretaget simuleringer af de forventede temperaturforhold i huset for grundmodellen, og disse sammenholdes med specifikationer i norm vedrørende termisk indeklima. Det er valgt at betragte det mest kritiske rum og mindst kritiske rum, svarende til det sydøstvendte værelse 1 med ovenlys og det nordvendte WC, som kun har ét lille vindue.

I figur 1 er i første omgang vist den gennemsnitlige operative temperaturs variation i disse rum i løbet af et år. Det er tydeligt at værelse 1 har en generelt højere operativ temperatur gennem hele året, og at der i sommerperioden, hvor solindfaldet har en stor betydning, er relativt stor forskel i temperaturen for de to rum.



Figur 1. Månedsmiddelttemperaturen i værelse 1 og WC i løbet af året.

Figur 1 fortæller ikke noget om hvor højt temperaturen når op og hvor længe. Derfor er der i Figur 2 vist to akkumulerede temperaturkurver, der for en given temperatur viser, hvor mange timer temperaturen overstiger denne i sommerperioden. Det ses af figuren, at de høje temperaturer (over 24 °C) faktisk forekommer i et relativt stort antal timer. I værelse 1 overstiger temperaturen f.eks. 26 °C i ca. 200 timer og 27 °C i ca. 100 timer. I fyringssæsonen forekommer der temperaturer over 26 °C værelse 1 i ca. 25 timer.



Figur 2. Viser hvor mange timer indetemperaturen overstiger en given temperatur i sommerperioden (uge 19-37). Kurverne til højre er et udsnit af kurverne til venstre.

Hvis man skal vurdere om der er tale om fornuftige temperaturniveauer, kan man tage udgangspunkt i norm for specifikation af termisk indeklima (DS 474) [14]. Kravene til den operative temperatur for varme dage med let sommerbeklædning og stillesiddende aktivitet kan ifølge denne formuleres som følgende:

>26 °C i højst 100 timer i opholdstiden i løbet af et typisk år.

>27 °C i højst 25 timer.

Opholdstiden defineres som det tidsrum, udover ganske korte tidsrum, hvor mennesker opholder sig i rummet.

I øvrigt angiver normen at det for siddende personer med almindelig indendørsbeklædning kan forventes, at mindre end 10 % af en gruppe personer er utilfredse med det generelle termiske klima, hvis den operative temperatur i opholdszonen ligger mellem 20 og 24 °C. Under sommerforhold, hvor det er normalt med lettere beklædning og hvor bygningen ikke har et opvarmningsbehov, kan en højere operativ temperatur accepteres, svarende til 23-26 °C. Den enkelte person kan naturligvis opnå større grad af tilfredshed ved at tilpasse sin beklædning hensigtsmæssigt.

Sammenligner man ovennævnte krav med de forventede temperaturforhold i værelse 1, ses at hverken kravet til antal timer over 26 °C, eller kravet til timer over 27 °C er overholdt. Det er dog antaget at der opholder sig mennesker i værelse 1 i alle de timer hvor overtemperaturerne forekommer, hvilket i praksis ikke er tilfældet. Antages det at ingen opholder sig i rummet fra kl. 9 til kl.16, overskrides temperaturen 26 °C i kun ca. 75 timer, mens 27 °C overskrides i ca. 25 timer i opholdstiden. Med disse forudsætninger er komfortkravene lige netop overholdt.

På baggrund af analyserne må det konkluderes at huset kan opfylde komfortkravene. Hvis man alligevel ønsker at reducere antallet af timer med overtemperaturer, kunne det overvejes at udskifte glasset i vinduerne for de kritiske rum, således at solenergitransmittansen for vinduet reduceres, eller man kunne benytte en eller anden form for effektiv solafskærmning.

4 ØKONOMISK VURDERING AF ENERGIBESPARENDE TILTAG

Formålet med dette afsnit er at vurdere økonomien i de anvendte konstruktioner/systemer i huset beskrevet i denne rapport (benævnt lavenergihus i det følgende). Som reference betragtes et tilsvarende hus, hvor isoleringstykkelserne er reduceret så de netop opfylder BR95 og varmegenvindingen er fjernet (benævnt referencehus i det følgende). De økonomiske vurderinger er baseret på en opgørelse/beregning af merinvesteringer og forventede energimæssige besparelser.

Det konkrete hus lever ikke op til projektets formål om at opvarmningsbehovet højst må være 67 % af den nu gældende energiramme (dette kan kun ske ved installation af ventilationsanlæg med varmegenvinding). Derfor er der i det efterfølgende valgt at tage udgangspunkt i tilfældet hvor der er installeret effektiv varmegenvinding på ventilationsluften (derfor benævnelsen lavenergihus).

4.1 Pris- og energimæssig sammenligning

I tabel 19 er vist en oversigt over de forskelle der er mellem de to huse. I tabellen er udelukkende medtaget de forskelle som har en betydning for opvarmningsbehovet. Som det fremgår af tabellen er der kun meget små ændringer i isoleringstykkelserne, idet lavenergihusets konstruktioner ca. svarer til kravene i Bygningsreglementet.

Tabel 19. Varmetekniske forskelle mellem lavenergihuset og referencehuset.

Bygningsdel	Lavenergihus	Referencehus
Ydervægge	220 mm mineraluld	200 mm mineraluld
Skunkvægge	250 mm mineraluld	Som i lavenergihus
Skråvægge	220 mm mineraluld	Som i lavenergihus
Terrændæk	225 mm EPS	210 mm EPS
Tag/loft	300 mm mineraluld	245 mm mineraluld
Vinduesfals	Fibergipslysninger med kuldebroafbrydelse	Som i lavenergihus
Fundamentssokkel	~ 1½ skifte isolerede letklinkerblokke	Som i lavenergihus
Vinduer/døre	Trævinduer/-døre $U = 1,68 \text{ W/m}^2\text{K}$ Afstandsprofil i aluminium	Som i lavenergihus
Varmesystem	Gulvvarme + radiatorvarme	Som i lavenergihus
Ventilation	Mekanisk ventilation med varmegenvinding (90%) Luftmængde: 60 l/s ($0,77 \text{ h}^{-1}$)	Naturlig ventilation Luftskifte: $0,5 \text{ h}^{-1}$ (39 l/s)

Der er foretaget en beregning af rumopvarmningsbehovet for referencehuset. De mest betydende kuldebroer er ligesom for lavenergihuset medtaget i beregningerne, og samme forudsætninger vedr. orientering, internt varmetilskud, infiltration, udluftning mm. er anvendt. Det indvendige areal er fastholdt, dvs. at bruttoarealet er reduceret fra ca. 163 til ca. 161 m².

Af hensyn til at kunne foretage en fair sammenligning af de to huse, er der regnet med det samme luftskifte for referencehuset som for lavenergihuset.

Referencehuset opfylder den nugældende energiramme, under forudsætning af et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ (bygningsreglementets krav ved naturlig ventilation). Opvarmningsbehovet ved dette luftskifte er ca. 11208 kWh, og da den nuværende energiramme er $280 \text{ MJ/m}^2 = 12289 \text{ kWh}$, opfylder referencehuset altså energirammen.

I lavenergihuset med varmegenvinding, vil det samlede luftskifte være væsentligt højere end de $0,5 \text{ h}^{-1}$ der benyttes i referencehuset. Dette forhold har en meget stor betydning for de økonomiske vurderinger og giver et forvrænget billede af de reelle besparelser der opnås ved indførslen af mekanisk ventilation med varmegenvinding. Derfor gennemføres der et ekstra sæt beregninger, hvor luftskiftet i referencehuset fastsættes til samme niveau som for lavenergihuset, dvs. $0,77 \text{ h}^{-1}$. Årsagen til at denne forskel overhovedet forekommer er reglerne angivet i det nu gældende Bygningsreglement, hvor man ved naturlig ventilation kræver et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ mens man ved mekanisk ventilation kræver udluftning på 20 l/s for køkken, 15 l/s for bryggers og 10 l/s for badeværelser.

I tabel 20 er resultaterne af beregningerne opstillet til sammenligning. Ref. 1 svarer til Bygningsreglementets forudsætninger mens Ref. 2 svarer til situationen hvor luftskiftet er forøget til samme niveau som for lavenergihuset.

Tabel 20. Resultater vedrørende simulering af opvarmningsbehov.

Varmebalance (bidrag i kWh pr. år)		Lavenergi	Ref. 1	Ref. 2
Q_{Opv}	Energiforbrug til rumopvarmning	5084	9133	11710
Q_{Inf}	Nettobidrag ved infiltration	-1025	-5015	-7678
Q_{Udl}	Varmetab ved udluftning ($>24 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	-80	-205	-148
Q_{Sol}	Energi tilført ved solindfald	3112	3142	3142
Q_{Intern}	Varme tilført fra personer & udstyr	4543	4543	4543
Q_{Trans}	Transmissionstab via klimaskærmen*	-11526	-11599	-11572
Q_{Mix}	Ventilationstab til naborum	219	0	0
Q_{Vent}	Ventilationstab via ventilationsanlæg	-328	0	0
I alt		0	0	0

* Heraf vinduer: -6058

Det ses af tabel 20 at opvarmningsbehovet for det aktuelle lavenergihus er væsentligt reduceret ift. referencehuset. Størstedelen af besparelsen skyldes varmegenvindingen i ventilationsanlægget, som dog forbruger en del el til lufttransport. Målinger af elforbruget (omtalt i afsnit 3.3.3) viser at dette udgør ca. 66 W ved en volumenstrøm på 60 l/s, svarende til ca. 578 kWh årligt ved konstant drift hele året.

Det har naturligvis krævet en merinvestering at opnå besparelserne. Firmaet der har opført huset, har lavet et overslag over denne merudgift – der henvises til bilag 2. Herefter kan de samlede energibesparelser og merinvesteringer bestemmes (se tabel 21 og tabel 22).

Tabel 21. Overordnede energimæssige konsekvenser – lavenergihus vs. referencehus.

	Energibesparelse ift. Ref. 1 [kWh/år]	Energibesparelse ift. Ref. 2 [kWh/år]
Tiltag vedrørende klimaskærmen	73	46
Mekanisk ventilation med VGV	3976	6580
El-forbrug i ventilationsanlæg	-578	-578
Alle tiltag	3471	6048

Det er af tabel 21 tydeligt at tiltagene vedrørende klimaskærmen kun udgør en meget lille del af den samlede besparelse. I denne forbindelse skal det dog nævnes at den beregnede besparelse er påvirket af at der samtidig indføres mekanisk ventilation med varmegenvinding, idet indetemperaturen herved påvirkes væsentligt. Den omtrentlige besparelse ved at gennemføre ændringerne vedrørende klimaskærmen alene, kan på baggrund af ændringen i varmetabskoefficienterne bestemmes til ca. 250 kWh/år.

Drift af et ventilationsanlæg kræver vedligeholdelse. I den forbindelse er der primært tale om udskiftning af filtre. Typisk skal disse skiftes én gang årligt, og et standard filter (type EU6) koster 125 kr. inkl. moms. Derudover regnes der ikke med udgifter til vedligeholdelse eller service. Anlægget indeholder to filtre, og den årlige vedligeholdelsesudgift bliver så 250 kr.

Ved sammenligning af naturlig ventilation og mekanisk ventilation skal der foretages fradrag for vægventiler og aftrækskanaler, der er nødvendige for at den naturlige ventilation kan etableres. Et stort typehusfirma oplyser at der omtrentlig kan regnes med en udgift til vægventiler på 1000 kr. og 4000 kr. til aftrækskanaler (inkl. arbejds løn, men ekskl. moms).

Tabel 22. Samlede merinvesteringer og levetider – lavenergihus vs. referencehus.

	Merinvestering [Tusinde kr.]	Levetid [år]
Tiltag vedr. klimaskærm	3,0	100
Ventilationsanlæg ekskl. kanaler mm.	20,5	20
Kanaler mm.	26,3	100
Fradrag for vægventiler	-1,0	20
Fradrag for aftrækskanaler	-4,0	100
I alt ekskl. moms	44,8	
I alt inkl. moms	56,0	

4.2 Vurderingsmetode

I beregningerne er anvendt simpel tilbagebetalingstid og nuværdi som økonomisk målestok/kriterium. Den simple tilbagebetalingstid er defineret som den samlede investering divideret med den årlige besparelse. Ved investering i energitiltag i bygninger kan det normalt antages, at de årlige besparelser er konstante over bygningsdelens levetid eller ind til større genopretning er påkrævet. Nuværdien (også kaldet Net Present Value) måler den totale værdiforøgelse, som ”projektet” genererer udover den opnåede (valgte) forrentning. Inflationseffekten er medtaget gennem valg af realrente og en konsekvent anvendelse af dagspriser.

Nuværdien over en vis periode afhænger af bygningsdelens levetid og realrenten. Ved bestemmelse af nuværdien opgøres alle omkostninger og besparelser til periodens start med den reelle kalkulationsrente (realrente efter skat). Realrenten kan tilnærmet beregnes som:

$$r_r = r_n \cdot (1 - s) - i_e$$

hvor	r_n	Er den nominelle rente i pct./år
	i_e	Er energiprisens stigningstakst i pct./år
	s	Er beskatningen af renter som decimalbrøk

Realrenten har siden 1990 ligget konstant på mellem 2 og 3 pct./år og derfor vil det være rimeligt at regne med en realrente på 2,5 pct./år. Renteniveau, inflation og energiprisens stigningstakt er normalt sammenkoblede økonomiske størrelser, således at de stiger og falder i samme takt. Den normale sammenkobling kan selvfølgelig blive forrykket, hvis der i bygningsdelens levetid sker væsentlig ændring af afgifts- eller beskatningsforhold, f.eks. på energi.

For anlæg – som bygninger – med levetid over 20 år kan regnes med lineær afskrivning og indregning af restværdi (scrapværdi). For en bygningsdel med en levetid på f.eks. 100 år er det ensbetydende med at 30 % af investeringen regnes afskrevet over en 30-årig periode, og at restværdien er 70 % af investeringen opgjort i nutidigt prisniveau.

4.3 Beregningsforudsætninger

Priser er generelt angivet i år 2002 niveau. Energipriser er inkl. moms og afgifter.

Opvarmning af de danske boliger foregår primært med fjernvarme eller varme fra olie- og naturgasfyr. I fremtiden må det forventes at olie erstattes af mere miljøvenlige brændsler (såsom naturgas). Priser på naturgas er baseret på typiske priser indhentet i september 2002. Individuelle naturgaskedler er typisk kondenserende med en årsnyttevirkning på ca. 100 % i forhold til den nedre brændværdi på 39,6 MJ/m³. Prisen på fjernvarme er baseret på oplysninger fra Danske Fjernvarmeværkers Forening og gældende september 2002. Prisen er et landsgennemsnit vægtet i forhold til de enkelte fjernvarmeværkers salg af varme og er naturligvis ekskl. faste afgifter (som udgør ca. 25 %). Der er altså tale om den gennemsnitlige marginalpris. Denne pris ligger på ca. 0,50 kr./kWh. Det konkrete hus i denne rapport opvarmes med et naturgasfyr.

Elprisen er baseret på normaltariffer, hvor elprisen er uafhængig af leveringstidspunktet. Elprisen kan dog variere hen over året. Dette skyldes for det første, at andelen af miljøvenlig el/PP (prioriteret produktion) varierer måned for måned. For det andet skyldes det, at prisen på el, der bliver indkøbt på markedsvilkår, afhænger af prisudviklingen på el-børsen. Der anvendes en skønnet gennemsnitlig elpris (ekskl. abonnement) baseret på markedspris og afgifter i september 2002 samt med hensyntagen til den varierende andel af miljøvenlig el.

I tabel 23 er vist en oversigt over energipriser for boliger.

Tabel 23. Energipriser for boliger afhængig af opvarmningsform.

Opvarmningsform	Energipris [kr./kWh]
Naturgas	0,55
Fjernvarme	0,50
El	1,50

De totaløkonomiske vurderinger foretages over en 30-årig periode. I den forbindelse er prognoser for energipriser og realrente forbundet med store usikkerheder, blandt andet fordi det tidsmæssige perspektiv er så langt. Mht. energipriser er der en klar tendens til at disse vil stige i de kommende år. Det er valgt at betragte tre scenarier mht. energipriser og realrente (se tabel 24). Scenarie 1 svarer omtrent til de nuværende økonomisk forhold. Scenarie 2 svarer til

dobbelt så høje energipriser, mens scenarie 3 er en variant af scenarie 2, idet realrenten er reduceret fra 2,5 til 0 % p.a. (et større skattefradrag vil kunne realisere en sådan rente).

Tabel 24. De tre økonomiske scenarier der betragtes.

Scenarie	Elpris [kr/kWh]	Varmepris [kr/kWh]	Realrente [% p.a.]	Beregningsperiode [år]
1	1,5	0,5	2,5	30
2	3,0	1,0	2,5	30
3	3,0	1,0	0	30

Levetiden for klimaskærmens sættes til 100 år, hvilket tilnærmelsesvis vil gælde for isoleringen og det bærende element i klimaskærmen. For ventilationsanlæggets vedkommende er antaget en levetid for aggregatet på 20 år, mens kanalsystemet har en væsentligt længere levetid. Kanalsystemet antages at have samme levetid som klimaskærmen.

4.4 Resultater

Der giver kun mening at beregne simpel tilbagebetalingstid for tiltag, hvor de indgående delelementer har samme levetid. Derfor er der kun foretaget en sådan beregning for tiltaget vedrørende forbedret isolering af klimaskærmen. For at fastlægge besparelsen ved dette tiltag, er der foretaget en sammenligning af opvarmningsbehovet for lavenergihuset med naturlig ventilation og referencehuset med naturlig ventilation. Forskellen i opvarmningsbehovet er 2200 kWh/år. Herefter kan tilbagebetalingstiden bestemmes for scenarie 1 (for scenarie 2 og 3 halveres tilbagebetalingstiden). I tabel 25 og 26 er opstillet resultater for nuværdiberegninger.

$$\text{Tilbagebetalingstid i år: } \frac{3000kr}{73kWh / \text{år} \cdot 0,50kr. / kWh} = 82, \text{ i forhold til reference 1.}$$

$$\text{Tilbagebetalingstid i år: } \frac{3000kr}{46kWh / \text{år} \cdot 0,50kr. / kWh} = 130, \text{ i forhold til reference 2.}$$

Tabel 25. Totaløkonomisk besparelse over 30 år udtrykt som nuværdi, reference 1.

Tiltag i lavenergihus	Besparelse over 30 år [tusinde kr.]		
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Forbedret isolering af klimaskærm*	-1,2	-0,5	1,3
Mekanisk ventilation med VGV	-16,1	7,3	33,6
Alle tiltag i huset	-17,3	6,8	34,9

*Bedre isolering af loft, ydervægge, terrændæk og fundament

Tabel 26. Totaløkonomisk besparelse over 30 år udtrykt som nuværdi, reference 2.

Tiltag i lavenergihus	Besparelse over 30 år [tusinde kr.]		
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Forbedret isolering af klimaskærm*	-1,5	-1,0	0,5
Mekanisk ventilation med VGV	11,1	61,8	111,7
Alle tiltag i huset	9,6	60,8	112,2

*Bedre isolering af loft, ydervægge, terrændæk og fundament

Af tabel 25 og 26 fremgår det at den forbedrede isolering af klimaskærmen kun resulterer i en besparelse set over 30 år for scenarie 3.

Af tabel 25 fremgår det endvidere at indføringen af mekanisk ventilation med varmegenvinding kun giver en besparelse over 30 år hvis de økonomiske forhold bliver som for scenarie 2 eller 3. Som tidligere omtalt er der ved denne sammenligning et misforhold mellem luftskiftet i hhv. lavenergihuset og referencehuset, og den mest reelle belysning af besparelsen ved indføring af mekanisk ventilation med varmegenvinding illustreres i tabel 26. Af denne tabel er det tydeligt at den mekaniske ventilation med varmegenvinding er en rigtig god investering uanset hvilket scenarie der betragtes. For scenarie 1 vil denne foranstaltning medføre en besparelse over 30 år på ca. 11.000 kr.

4.5 Sammenfatning og diskussion af resultater

Beregningerne udført i dette afsnit viser at totaløkonomien i det aktuelle lavenergihus svarer nogenlunde til totaløkonomien i et traditionelt fuldmuret hus opført efter energikravene i det nuværende bygningsreglement, hvis der antages økonomiske forhold som i dag (scenarie 1). Foretages sammenligningen på baggrund af nu gældende Bygningsreglements krav til luftskifte kan man forvente at det koster ca. 17.000 kr. mere over 30 år at opvarme lavenergihuset i forhold til det traditionelle hus.

Denne sammenligning er dog ikke helt retfærdig, idet man må forvente at det vil være nødvendigt at have samme luftskifte, uanset om der er mekanisk ventilation eller ej, og man må forvente at denne "skævhed" rettes op i forbindelse med udformningen af et nyt Bygningsreglement i 2005. Det er derfor mere reelt at betragte sammenligningen med referencehus 2, hvor man af tabel 26 kan se at dette kan forventes at give en samlet besparelse på ca. 10.000 kr. over 30 år.

Hvis de økonomiske forhold ændrer sig svarende til scenarie 2 eller 3, vil den mekaniske ventilation med varmegenvinding medføre besparelser over 30 år uanset hvordan man vælger at se på det. Sammenlignes med referencehus 2, bliver disse besparelser hhv. ca. 62.000 kr. og 112.000 kr.

Ud fra beregningerne kan det således konkluderes at investeringen i et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding er rentabel når der benyttes et reelt sammenligningsgrundlag, og hvis energipriserne udvikler sig negativt vil dette tiltag endog være særdeles rentabelt.

Udover det rent økonomiske er der en række fordele forbundet med at have mekaniske ventilation med varmegenvinding, idet indeklimaet alt andet lige forbedres. Der er mulighed for behovsstyring, luften bliver filtreret og friskluften forvarmet inde den blæses ind i boligen, hvilket betyder at træk ikke vil være et problem med dagens effektive varmevekslere. Desuden vil risikoen for skimmelsvamp være mindsket betydeligt.

Den samlede merudgift for lavenergihuset er opgjort til 56.000 kr. (se tabel 22 og bilag 2), hvor referencen er et tilsvarende hus med naturlig ventilation. For dette beløb har det været muligt at reducere rumopvarmningsbehovet svarende til et niveau på ca. 50 % af den nugældende energiramme. Den samlede byggeudgift er opgjort til ca. 1,3 mio. kr., hvilket

KONKLUSION

betyder at merudgiften svarer til ca. 4,3 %. Det er således muligt for en forholdsvis lille merudgift at fremtidssikre et hus energimæssigt.

5 KONKLUSION

Denne rapport har beskrevet de konstruktive løsninger i et højisoleret enfamilieshus med ydervægge bestående af lette ydervægselementer i træskelet. Herudover er der foretaget detaljerede beregninger af varmetab og simuleringer af opvarmningsbehov. Desuden er der foretaget beregning og vurdering af temperaturforholdene i huset.

5.1 Varmetab og kuldebroer

Huset samlede varmetabskoefficient er 114 W/K. Opgjort pr. m² opvarmet etageareal fås 0,70 W/m²K (denne koefficient er relevant ved sammenligning med andre huse).

Det dimensionerende transmissionstab er på 3600 W, hvoraf de 900 W vedrører de 1- og 2-dimensionale kuldebroeffekter. Kuldebroernes andel udgør derfor 25 %, hvilket er en forholdsvis høj andel, men ikke overraskende da huset har nogle meget velisolerede gulv-, væg- og loftflader (> 220 mm isolering) samt lavenergiruder ($U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$).

5.2 Opvarmningsbehov og indeklima

Der er foretaget en simulering af opvarmningsbehovet i programmet BSIM2000. Denne beregning viser at der kan forventes et opvarmningsbehov på ca. 8500 kWh, svarende til 84 % af den nugældende energiramme på 10100 kWh. Projektets formål var at nå ned under 67 % af den nu gældende energiramme, og dette er altså ikke opfyldt. Derfor er der ligeledes gennemført en simulering hvor der benyttes effektiv varmegenvinding (90%). Denne simulering giver et opvarmningsbehov på 5100 kWh, hvilket svarer til ca. 50 % af energirammen, og hermed er det vist at huset kan opfylde projektets formål hvis der benyttes effektiv varmegenvinding.

Beregningerne viser at det samlede transmissionstab udgør 11500 kWh i fyringssæsonen. Heraf udgør transmissionstabet via vinduer og døre 6100 kWh, hvilket svarer til en andel på ca. 53 %. Dette er en relativ stor andel i betragtning af at arealet af vinduer og døre kun er ca. 34,7 m² svarende til 21 % af det opvarmede etageareal.

Der er også foretaget simuleringer af indetemperaturforholdene. Simuleringerne viser overordnet at der ikke er problemer med at opfylde kravene vedrørende den operative temperatur specificeret i DS 474 (termisk indeklima), hvis man betragter de perioder hvor der befinder sig personer i huset.

Der er udsendt et oplæg til nye energibestemmelser i Bygningsreglement 2005. Kort fortalt drejer dette sig om at kravene ændres fra bygningsdeles varmetabskoefficient til bygningens samlede bruttoenergiforbrug, dvs. der bliver fokus på energieffektive bygningsudformninger og installationer samt udnyttelse af solenergi. Bruttoenergirammen skal beregnes som energibehovet til opvarmning, ventilation og køling.

Der er i rapporten foretaget en sådan beregning med baggrund i den metode og de forudsætninger der er angivet i oplægget. Der er beregnet et samlet bruttoenergiforbrug på 11692 kWh, og da energirammen er 256 MJ pr. m² = 10880 kWh, er energirammen altså ikke overholdt (tabel 17). Analyser viser at man ved at benytte effektiv varmegenvinding (90 %) monteret med energieffektive DC-ventilatorer, kan opfylde de skitserede fremtidige krav, der er lagt op til at skulle indføres fra 2005.

5.3 Økonomi

Der er foretaget en økonomisk sammenligning af det aktuelle lavenergihus (med varmegenvinding) og et tilsvarende referencehus med naturlig ventilation, og lidt reducerede isoleringstykkelser i enkelte dele af klimaskærmen. Generelt viser beregningerne at totaløkonomien set over 30 år er god for lavenergihuset. Hvis energipriserne forbliver som i dag sparer man således ca. 10.000 kr. over 30 år. Udvikler disse sig i retning af højere energipriser, hvilket man må forvente, vil totaløkonomien for lavenergihuset være væsentligt bedre end for referencehuset.

Forskellene vedrørende klimaskærmen fra referencehuset til lavenergihuset er meget små, og derfor er de økonomiske gevinster ligeledes meget små.

Beregningerne viser endvidere, at mekanisk ventilation med energieffektiv varmegenvinding vil være en rigtig god investering, specielt hvis energipriserne, som forventeligt, stiger i fremtiden. Det skal herudover også bemærkes, at der er en række andre fordele forbundet med mekanisk ventilation med varmegenvinding sammenlignet med naturlig ventilation, og som er svære at kapitalisere, herunder mulighed for behovsstyring, forvarmet friskluft, filtrering af luften og mindsket risiko for skimmelsvamp.

Merudgiften for lavenergihuset ift. det typisk hus er opgjort til ca. 56.000 kr., hvilket skal ses i forhold til en samlet byggeudgift på ca. 1,3 mio. kr. Merudgiften svarer altså til en forøgelse på kun 4,3 % og besparelsen der opnås herved er ca. 6000 kWh pr. år.

6 REFERENCER

- [1] Bygningsreglement for småhuse inkl. tillæg 1 (BRS 98). Boligministeriet, Bygge- og Boligstyrelsen. København. 1998.
- [2] HEAT2 (version 5.0). PC-program til beregning af 2-dimensionale varmemstrømme (differens-metode). Blomberg, Afdelingen for Bygningsfysik, Universitetet i Lund.
- [3] HEAT3 (version 3.00). PC-program til beregning af 3-dimensionale varmemstrømme (differens-metode). Blomberg, Afdelingen for Bygningsfysik, Universitetet i Lund.
- [4] THERM 2.1a. Finite Element program til beregning af to-dimensionale varmemstrømme. Lawrence Berkeley National Laboratory (USA), 2001.
- [5] Dansk Standard DS418: Beregning af bygningers varmetab. 6. udgave. 2002-04-03.
- [6] BSIM2000: Et integreret EDB-værktøj til termisk analyse af bygninger og installationer (afløseren for Tsb3). Statens Byggeforskningsinstitut, 2002.
- [7] Oplæg til energibestemmelser i Bygningsreglement år 2005 og skitser til bestemmelser i år 2012. Udkast. Søren Aggerholm, By og Byg, August 2001.
- [8] Energi 2000. Handlingsplan for en bæredygtig udvikling. Energiministeriet, april 1990.
- [9] Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Vindueskompendium 3: Detaljerede metoder til bestemmelse af energimærkningsdata. Rapport U-003, Version 3. BYG-DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 2001
- [10] SBI-anvisning 184: Bygningers energibehov. Statens Byggeforskningsinstitut, 1995.
- [11] Design Reference Year, DRY – et nyt dansk referenceår. Meddelelse nr. 281. Jerry Møller Jensen & Hans Lund. Laboratoriet for varmeisolering, DTU, oktober 1995.
- [12] 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.
- [13] Olsen, H., Drivsholm, C., Christiansen, J., Jensen, J. S., Nielsen, T. R. og Svendsen, S. (2003) Udvikling og optimering af et energieffektivt straightner ventilationsaggregat med indbygget chopper varmeveksler, Teknologisk Institut (TI), udkast 2003.
- [14] DS 474 – Norm for specifikation af termisk indeklima. 1. udgave, december 1993.

REFERENCER

Bilag 1: Varmebalance mm. for grundmodellen. Varmebalancebidrag er i kWh.

		Total	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Sept	Okt	Nov	Dec
Dage		232	31	28	31	30	6	14	31	30	31
Q _{opv}	Energiforbrug til opvarmning	8527	1832	1541	1224	593	5	58	503	1113	1658
Q _{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-4907	-815	-756	-734	-583	-72	-179	-448	-586	-735
Q _{udl}	Varmetab ved udluftning (>24 C)	-216	0	-1	-5	-70	-111	-16	-13	0	0
Q _{sol}	Energi tilført ved solindfald	3112	197	338	527	776	240	264	409	224	138
Q _{intern}	Varme tilført fra personer og udstyr	4543	607	548	607	588	118	274	607	588	607
Q _{trans}	Transmissionstab via klimaskærm*	-11060	-1822	-1670	-1619	-1304	-180	-401	-1057	-1339	-1667
Total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T _{ude}	Udetemperatur, månedsmiddel	5,1	-0,5	-1	1,7	5,6	13,5	11	9,1	4,8	1,5
T _{operativ}	Indetemperatur, månedsmiddel	20,5	20	20,1	20,1	20,5	22,4	20,7	20,3	20	20

*heraf vinduer og døre: 6058 kWh (54 %)

REFERENCER

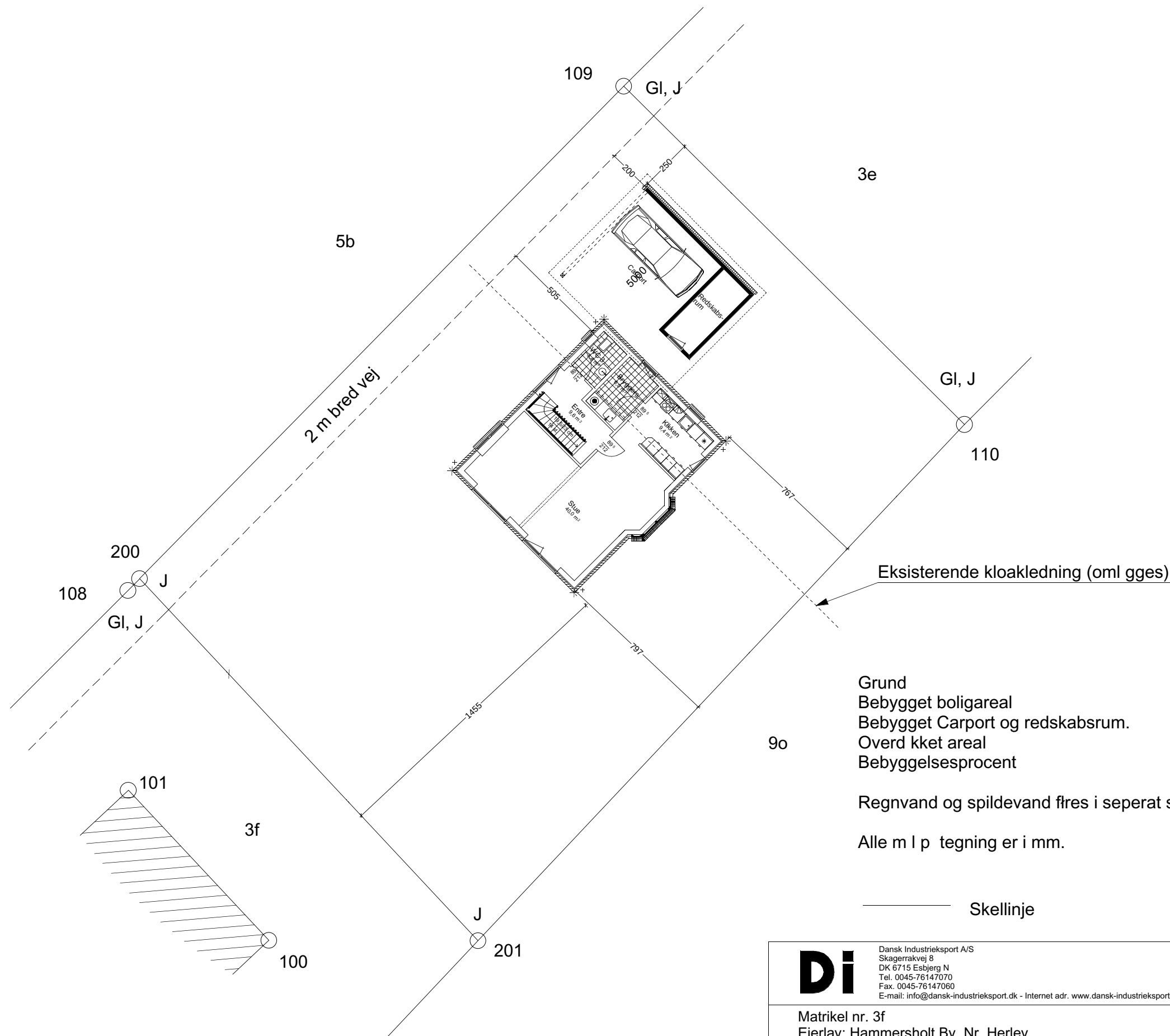
Bilag 2: Merpriser for lavenergihus.

Overslagspriser på lavenergihus og et tilsvarende referencehus^{*)} med isoleringstykkelser som lige netop lever op til BR95 og uden varmegenvinding. Priserne er angivet i tusinde kr. De to huse har samme opvarmede areal.

		Referencehus
1. - 9.	Husleverance	520,3
-	Jord-, indvendigt kloak- og betonarbejde	80,9
-	Flisearbejde	21,4
10. - 15.	Murerarbejde	122,2
-	Vandinstallation	40,9
-	Fjernvarme	71,1
-	El-installationer	56,9
-	Gulvbelægning	17,9
-	Køkken-, badeværelse- og garderober	50,9
-	Indvendigt malerarbejde	57,4
16.	Mekanisk ventilation med varmegenvinding	0,0
I alt, ekskl. Moms		1039,9
25 % moms		260,0
I alt (i tusinde kr.)		1299,9
		Lavenergihus ^{**)}
1. - 9.	Husleverance	523,3
-	Jord-, indvendigt kloak- og betonarbejde	80,9
-	Flisearbejde	21,4
10. - 15.	Murerarbejde	122,2
-	Vandinstallation	40,9
-	Fjernvarme	71,1
-	El-installationer	56,9
-	Gulvbelægning	17,9
-	Køkken-, badeværelse- og garderober	50,9
-	Indvendigt malerarbejde	57,4
16.	Mekanisk ventilation med varmegenvinding	41,8
I alt, ekskl. Moms		1084,7
25 % moms		271,2
I alt (i tusinde kr.)		1355,9
Afvigelse i pris mellem referencehuset og lavenergihuset		56,0

^{*)} Det skal bemærkes at Danhaus ikke kan/vil udføre en bygning svarende til reference-situationen, og at ovenstående priser er angivet som rent teoretisk regneeksempel.

^{**) Kilde: Frede Rasmussen, firmaet Danhaus Production A/S, Esbjerg (december 2002 og januar 2003)}



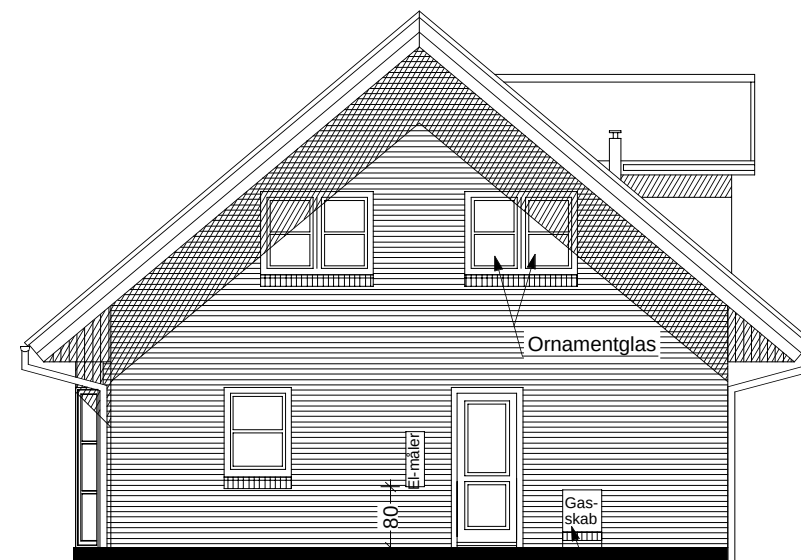
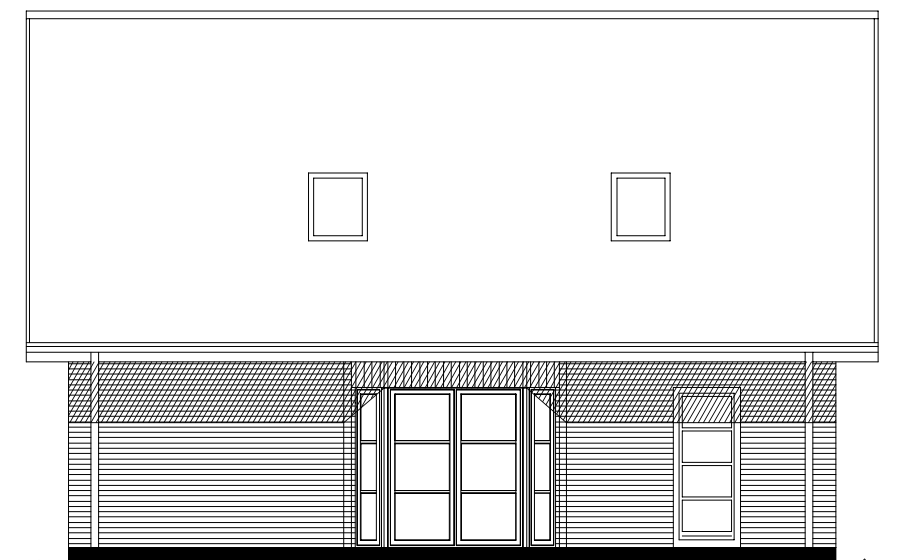
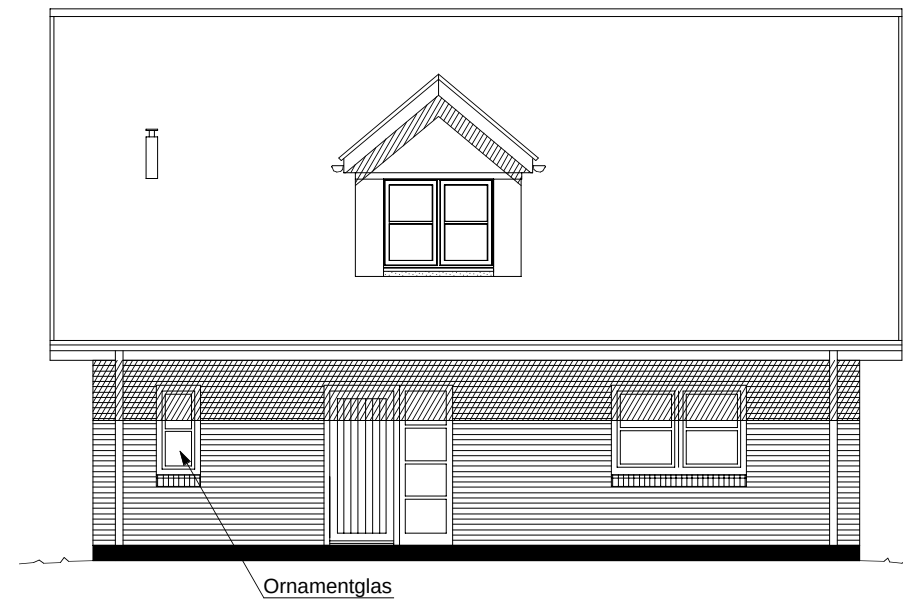
Grund	763 m ²
Bebygget boligareal	153 m ²
Bebygget Carport og redskabsrum.	44 m ²
Overdækket areal	0 m ²
Bebyggelsesprocent	20,05%

Regnvand og spildevand føres i separat system og udføres af autoriseret kloakmester.

Alle mål på tegning er i mm.

Skellinje

Di Dansk Industrieksport A/S Skagerrakvej 8 DK 6715 Esbjerg N Tel. 0045-76147070 Fax. 0045-76147060 E-mail: info@dansk-industrieksport.dk - Internet adr. www.dansk-industrieksport.dk	Tegning nr: 90XXX	
	Type: Beliggenhedsplan	
Matrikel nr. 3f Ejerlav: Hammersholt By, Nr, Herlev	Sags nr. 90100	
	Sign: OLP	MI: 1 : 200
	Format: A-3	Dato: 06.03.2002 Rev: 00.00.2002
Denne tegning tilhører Dansk Industrieksport A/S. Eftertryk kun tilladt efter skriftelig godkendelse fra Dansk Industrieksport A/S		



Højdeplacering af gasskab:

1 skifte samt 1 rulleskifte gennem-
gående under gasskab

Murhul: HxBxD = 56x51x15,5 cm



Dansk Industrieksport A/S
Skagerrakvej 8
DK 6715 Esbjerg N
Tel. 0045-76147070
Fax. 0045-76147060

DI-Arkitekt
Merkurvej 1
DK 7100 Vejle
Tel. 0045-76409240
Fax. 0045-76409250



Bygherre
adresse
postnr. og
by

Dansk Industrieksport A/S
Gl. Frederiksborgvej 70 A
3400 Hillerød

Type : Danhaus 163

Dato : 11.03.2002

Mål : 1-100

Sign : OLP

Tegning - nummer :

90100-90

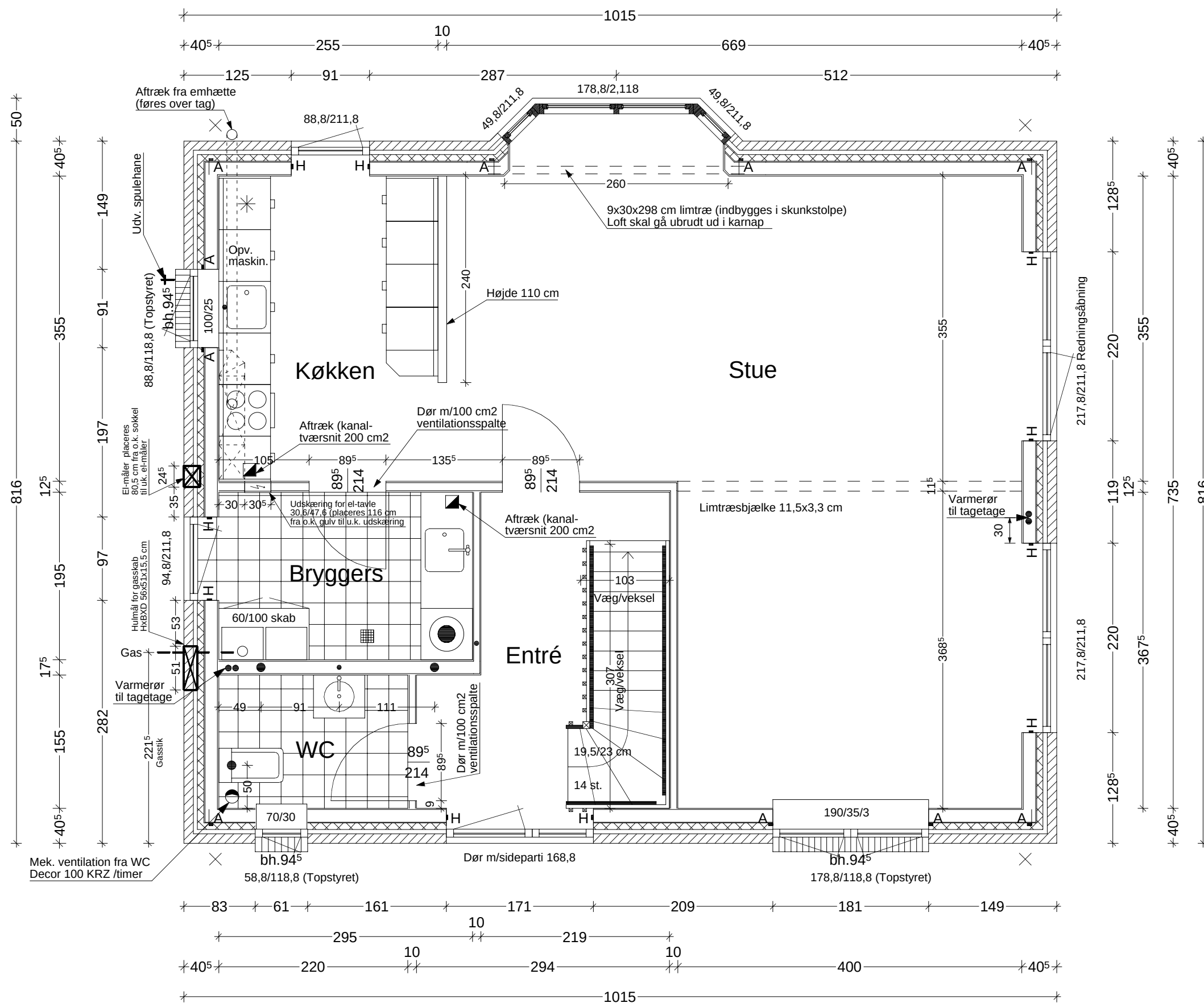
Forslag nr.:

Rev. :

13.03.2002-JG'
12.04.2002-OLP
23.04.2002-OLP
14.05.2002-OLP

Type-Kode : 240/235/70 cm., 40°

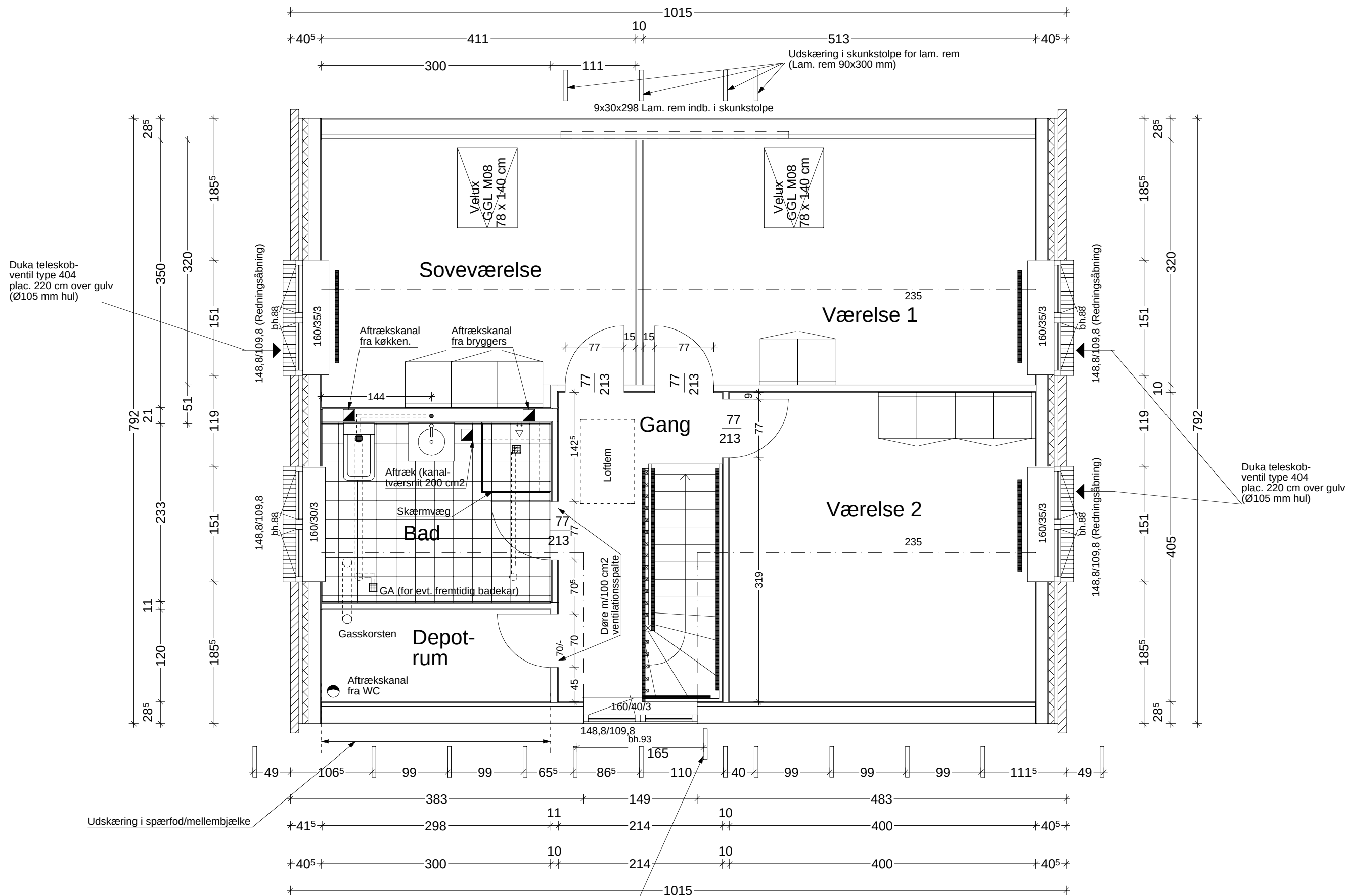
Denne tegning tilhører Dansk Industrieksport A/S. Eftertryk kun tilladt efter skriftlig godkendelse fra Dansk Industrieksport A/S



Se tegn nr. 90100-21 samt statik 90100-30

Grundplan

 Dansk Industrieksport A/S Skagerrakvej 8 DK 6715 Esbjerg N Tel. 0045-76147070 Fax. 0045-76147060		DI-Architekt Merkurvej 1 DK 7100 Vejle Tel. 0045-76409240 Fax. 0045-76409250			
Bygherre:	Dansk Industrieksport A/S	Type :	Danhaus 163	Sag nr.	Rev. : 21.03.2002 12.04.2002-OLP 23.04.2002-OLP 14.05.2002-OLP
		Dato :	11.03.2002		
		Mål :	1:50		
Bygge- adresse	Gl. Frederiksborgvej 70 A 3400 Hillerød				
Typ-Kode :	240/235/70 cm., 40°	Sign.	OLP		
Denne tegning tilhører Dansk Industrieksport A/S. Eftertryk kun tilladt efter skriftlig godkendelse fra Dansk Industrieksport A/S					

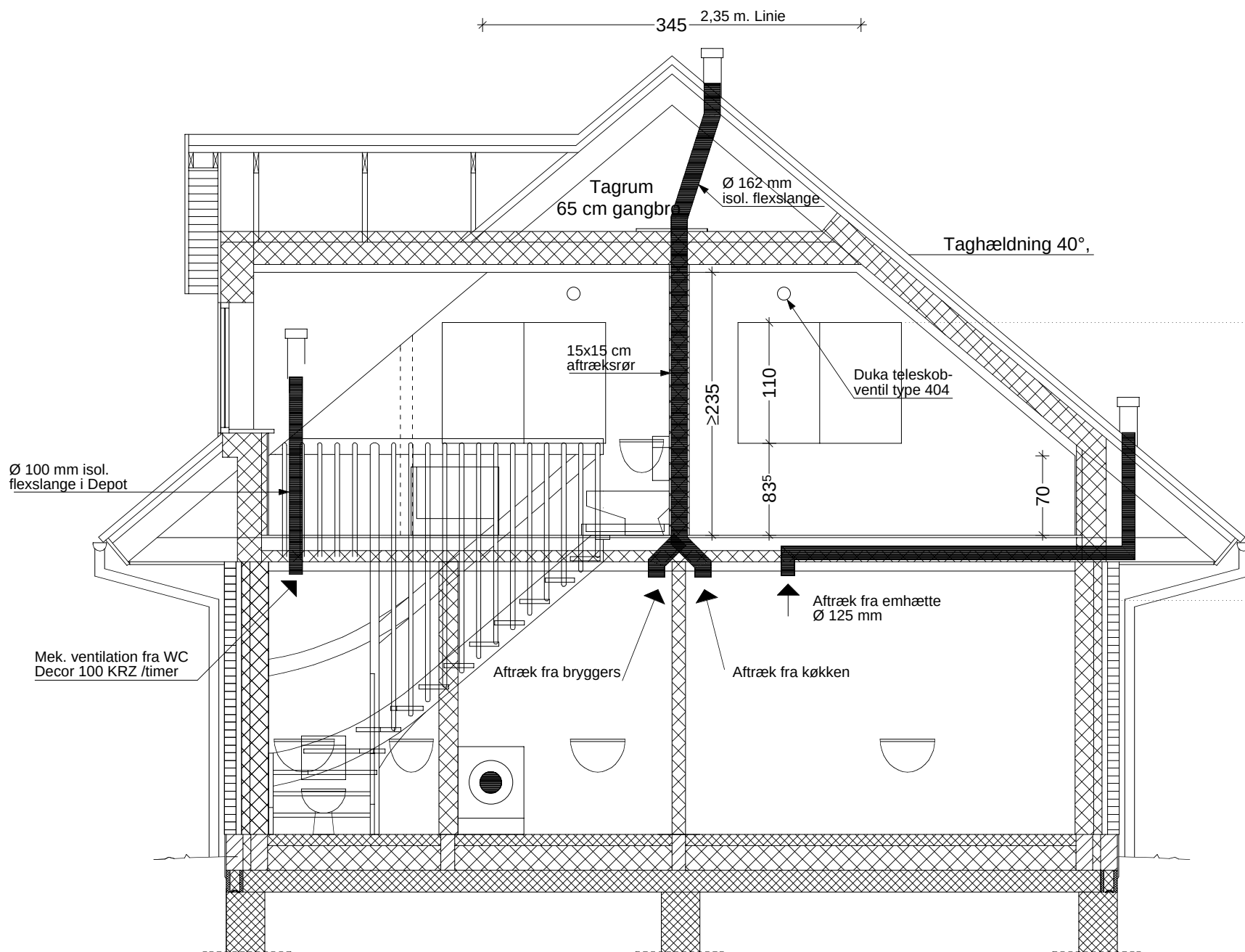


Tagplan

Hjælpepær ved kvist

	Dansk Industrieksport A/S Skagerrakvej 8 DK 6715 Esbjerg N Tel. 0045-76147070 Fax. 0045-76147060	DI-Architect Merkurvej 1 DK 7100 Vejle Tel. 0045-76409240 Fax. 0045-76409250	
Bygherre:	Dansk Industrieksport A/S	Type :	Danhaus 163
Bygge-adresse	Gl. Frederiksborgvej 70 A 3400 Hillerød	Dato :	11.03.2002
		Mål :	1:50
Typ-Kode :	240/235/70 cm., 40°	Sign.	OLP
Denne tegning tilhører Dansk Industrieksport A/S. Eftertryk kun tilladt efter skriftlig godkendelse fra Dansk Industrieksport A/S			

Sag nr.	Rev. :
90100-2	21.03.2002
	12.04.2002-OLP
	23.04.2002-OLP



Snit

Fundamenter:

Fundermenter incl. midterfundament føres til fast bund iht. geoteknisk rapport. - Øverst afsluttes med lecablokke/isolering. - Der indstøbes anker jvf.. fundamentsplan.

Terrændæk, u-værdi 0,15 W/m2K:

Gulvbelægning
100 mm beton
225 mm pladeisolering
20 cm armeret betonplade (selvbærende)
Afrettet vibreret sand.
Der udføres radonsikring

Ydervægge, u-værdi 0,18 W/m2K:
110 mm skalmur
50 mm ventileret hulrum
75 mm Rockwool
12 mm asfaltimpregneret byggeplade
45 x 145 mm træskelet a ≤ 400 mm
145 mm Rockwool
0,2 mm PE-Folie som dampspærre
15 mm Fermacell

Skillevægge:
15 mm Fermacell
45 x 70 mm træskelet a ≤ 400 mm
65 mm Rockwool
15 mm Fermacell

Vinduer og udvendige døre:
Præfabrikerede vinduer og døre
U-værdi på glas 1,1 W/m2K

Bjælkelag:
22 mm spånplade
50 x 220 mm Bjælkelag
100 mm Rockwool, fastholdt
Forskalling
10 mm Fermacell

Skunk, u-værdi ca. 0,15 W/m2K:
12 asfaltimpregneret byggeplade
50 x 220 mm skunkstolpe
200 mm Rockwool
Dampspærre
50 mm Rockwool
Forskalling
10 mm Fermacell

Skråvægge, u-værdi ca. 0,18 W/m2K:
50 x 220 mm spærhoved
220 mm Rockwool
Dampspærre
Forskalling
10 mm Fermacell

Loft ved hanebånd, u-værdi 0,12 W/m2K:
300 mm Rockwool
0,2 mm Dampspærre
Forskalling
10 mm Fermacell

Tagkonstruktion:
Betontagsten
38 x 56 mm godkendte lægter
Trykimp. klemplister
Diffusionsåbent undertag
40° fabriksfremstillet Hanebåndsspær
Forankring/ afstivning efter SBI-Anvisning 189 og
spærproducentens anvisninger.

Alle rum udluftes efter gældende regler

+710

o.k. kip

+539⁵

o.k. hanebånd

+466⁶

o.k. vindue

Skæring ydervæg/tagflade

+370

o.k. gulv tagetage

+273

+213³ o.k. vindue

o.k. gulv

±0

-20

o. k. terræn



Dansk Industrieksport A/S
Skagerrakvej 8
DK 6715 Esbjerg N
Tel. 0045-76147070
Fax. 0045-76147060

DI-Architect
Merkurvej 1
DK 7100 Vejle
Tel. 0045-76409240
Fax. 0045-76409250



Bygherre:	Dansk Industrieksport A/S	Type :	Danhaus 163	Sag nr.	Rev. :
		Dato :	11.03.2002		
Bygge- adresse	Gl. Frederiksborgvej 70 A 3400 Hillerød	Mål :	1:50	90100-5	12.04.2002-OLP 23.04.2002-OLP
Typ-Kode :	240/235/70 cm., 40°	Sign.	OLP		

Denne tegning tilhører Dansk Industrieksport A/S. Eftertryk kun tilladt efter skriftlig godkendelse fra Dansk Industrieksport A/S