BYG DTU

Henrik Tommerup
Jørgen Rose

Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner

Del 2: Måling af opvarmningsbehov

Byggesystem: Lette ydervægselementer i stålskelet

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET

Rapport
BYG•DTU R-065
2003
ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-127-7

Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner
Del 2: Målinger af opvarmningsbehov

Byggesystem: Lette ydervægs-elementer i stålskelet

Henrik Tommerup
Jørgen Rose



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

2003

FORORD

Denne rapport beskriver målinger af energiforbrug og indeklima for et højisoleret enfamilieshus med lette ydervægselementer. Huset har et forventet energiforbrug til rumopvarmning på ca. 40 % af den nugældende energiramme, som er 280 MJ/m^2/år, jf. Bygningsreglement for Småhuse [1]. I rapporten "Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner, Del 1: Konstruktioner og systemer, Byggesystem: Lette ydervægselementer i stålskelet" [2] er husets konstruktioner og systemer beskrevet, og der er lavet detaljerede simuleringer af husets energiforbrug samt indeklima. I nærværende rapport sammenlignes disse resultater med detaljerede målinger foretaget i huset i perioden fra 6/3-2003 til 1/4-2003.

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 arkitekt Svend Aage Jensen fra Lemvig i samarbejde med byggefirmaet SHS BYG, Lemvig, og er opbygget af komponenter fra følgende firmaer:

Danogips A/S (ydervægselementer og indervægge)
Sundolitt A/S (fundamenter og terrændæk)
Rationel Vinduer A/S (vinduer og døre)
Technor APS (ventilationsanlæg, varmeveksler er fra Air-Wex)
Nørre Nissum Maskinværksted (varmeanlæg)

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, august 2003.

RESUMÉ

Huset beskrevet i denne rapport er et blandt flere huse der indgår som forsøgshuse i projektet "Forsøgsbygninger med nye typer klimaskærmskonstruktioner"; et projekt under energiforskningsprogram 2000 (EFP2000). Huset er beliggende i Lemvig i det nordvestlige Jylland, og er opført af SHS BYG A/S og arkitekt Sv. Aa. Jensen, Lemvig, der er selvstændige firmaer, som i samarbejde har udviklet et lavenergi-koncept for bl.a. opførelse af enfamiliehuse.

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.

Nærværende rapport omhandler målinger af husets energiforbrug og indeklima. Rapporten indledes med en kortfattet gennemgang af projektets baggrund og formål.

Derefter beskrives de måleresultater som er opnået, dvs. primært måleresultater for udetemperatur, solindfald, indetemperatur, effektivitet af ventilationsanlæggets varmeveksler og energiforbrug. Udetemperaturen og solindfaldet er kun målt i en kortere periode, idet dette måleudstyr anvendes i forbindelse med målinger for samtlige huse, og således flyttes fra sted til sted.

Målingerne er foretaget for en periode på 27 døgn, fra d. 6/3 2003 til den 1/4 2003. I denne periode har huset været beboet og der er brugt 370 kWh til opvarmning (gulvvarme). Der er tilført 443 kWh fra solindfald og middel inde- og udetemperaturen har været hhv. 21,2 °C og 4,6 °C. Ventilationsanlæggets temperaturvirkningsgrad har gennemsnitligt været ca. 90 %. Husets infiltrationstab er skønnet til 0,15 h^{-1}.

I rapportens kapitel 3 foretages der sammenligninger mellem hhv. simplificerede og detaljerede beregninger af energiforbrug og målte energiforbrug. De simplificerede beregninger af husets opvarmningsbehov foretages på baggrund af husets varmetabskoefficient, mens de detaljerede beregninger foretages vha. bygningssimuleringsprogrammet BSIM. Sammenligningerne viser at der er en god overensstemmelse mellem det beregnede (forventede) og målte energiforbrug.

I rapportens kapitel 4 er gennemgået de overordnede konklusioner, som kan drages på baggrund af gennemførte målinger, beregninger og simuleringer, der er beskrevet i rapporten. Det konkluderes at huset vil have et årligt opvarmningsbehov, som svarer til ca. 40 % af den nu gældende energiramme.

Projektets oprindelige mål var at udvikle huse med et energiforbrug til opvarmning, der ligger under 67 % af den nugældende energiramme, og derfor må det konkluderes at målsætningen er opfyldt.

SUMMARY

Report R-065: Experimental building with new types of building envelope structures.
Part 2: Measurements of heating demand.

Building system: Prefabricated lightweight external wall components incorporating a load bearing steel 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 Programme 2000 (EFP2000). The house is standing in Lemvig, and is built by Danogips A/S, SHS BYG A/S and the arkitect Sv. Aa. Jensen, Lemvig, which are independent firms that, among other things, have collaborated in developing a low-energy draft for the building of single-family houses.

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 report deals with measurements of energy consumption and indoor climate. The report begins with a brief summary of the background and objectives of the project.

In chapter 2 the measurements are described, e.g. measurements of outside temperature, solar gains, inside temperature, efficiency of the heat recovery unit and energy consumption. Outside temperature and solar gains were only measured for a short time-period due to the use of the measurement equipment in other houses. Measurements were performed for a period of 27 days, from march 6th 2003 to April 1th 2003. During this period the single-family house was occupied and used 370 kWh for heating. 443 kWh were gained from solar radiation, and the mean inside and outside temperatures were 21.2 °C and 4.6 °C respectively. The temperature efficiency of the ventilation system was approximately 90 %. An infiltration of 0.15 h^{-1} was estimated.

In chapter 3 the measured results are compared to calculated results. Calculations are performed using both simple formulae and detailed simulations. Simple calculations are based on the heat loss coefficients of the building, whereas the detailed simulations are performed using the building simulation program BSIM. The comparisons show an agreement between calculated and measured heating demands.

In chapter 4 the conclusions that can be drawn from the measurements, calculations and simulations described in this report are given. It is concluded that the yearly heating demand of the house will correspond to approximately 40 % of the present energy frame specified in the building regulations.

The original goal of the project was to go below 67 % of the present energy frame and it can therefore be concluded that the goal has been achieved.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD **1**

RESUMÉ **3**

SUMMARY **5**

INDHOLDSFORTEGNELSE **7**

1 PROJEKTETS BAGGRUND OG FORMÅL **9**

1.1 BAGGRUND 9
1.2 FORMÅL 9

2 GENNEMGANG AF MÅLERESULTATER **11**

2.1 LUFTSKIFTE 11
2.2 UDETEMPERATUR 12
2.3 SOLINDFALD 15
2.4 INDETEMPERATUR 18
2.5 EFFEKTIVITET AF VARMEVEKSLER 19
2.6 ENERGIFORBRUG OG INTERNT VARMETILSKUD 22
2.7 SAMMENFATNING AF RESULTATER 23

3 SAMMENLIGNING BEREGNINGER/MÅLINGER **25**

3.1 MÅLINGER SAMMENLIGNET MED SIMPLIFICEREDE BEREGNINGER 25
3.2 MÅLINGER SAMMENLIGNET MED DETALJEREDE BEREGNINGER 26
3.3 SAMMENFATNING OG DISKUSSION AF RESULTATER 29
3.4 MÅLINGER AF ÅRLIGT VARMEFORBRUG 31

4 KONKLUSION **33**

4.1 BEREGNINGSMODEL VS. MÅLINGER 33
4.2 OPVARMNINGSBEHOV FOR FYRINGSSÆSON 33

5 REFERENCER **35**

BILAG **36**

1 PROJEKTETS BAGGRUND OG FORMÅL

1.1 Baggrund

I Energi 2000 (handlingsplan for en bæredygtig udvikling fra 1990) [3] 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, medfører 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 mere isolering og færre 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 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 er udviklet som princip-løsninger under klimaskærmsprojektet, og 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.

2 GENNEMGANG AF MÅLERESULTATER

I dette kapitel gennemgås de målinger som er foretaget. Først og fremmest er der foretaget målinger af energiforbrug samt inde- og udeklima. Disse målinger benyttes til sammenligning med de tidligere gennemførte simuleringer af huset, for at undersøge hvorvidt der er overensstemmelse mellem det teoretisk beregnede varmebehov og det målte varmebehov.

Der er målt data for i alt 27 døgn. Måleperioden er påbegyndt d. 6. marts 2003 og afsluttet d. 1. april 2003.

2.1 Luftskifte

Umiddelbart før måleperiodens start blev der foretaget en indregulering af ventilationsanlægget. Luftmængden blev indstillet til 165 m^3/h svarende til et luftskifte på 0,58 h^{-1}, og dertil kommer den naturlige luftinfiltration gennem utætheder i klimaskærmen (omtales senere i dette afsnit). Dette luftskifte er lidt større end bygningsreglementets krav til naturlig ventilation (0,5 h^{-1}) og lidt mindre end kravet til mekanisk ventilation (køkken 20 l/s, baderum 15 l/s og bryggers 10 l/s), som er 216 m^3/h svarende til 0,76 h^{-1}. Det havde været ønskeligt at undersøge et luftskifte svarende til kravet i bygningsreglementet, men det har ikke været muligt, da beboerne af støjmæssige grunde følte sig generet ved denne luftmængde.

Der er i Tabel 1 redegjort for målte luftmængder i udsugning og indblæsning.

Tabel 1. Indblæste og udsugede luftmængder i de enkelte rum i måleperioden.

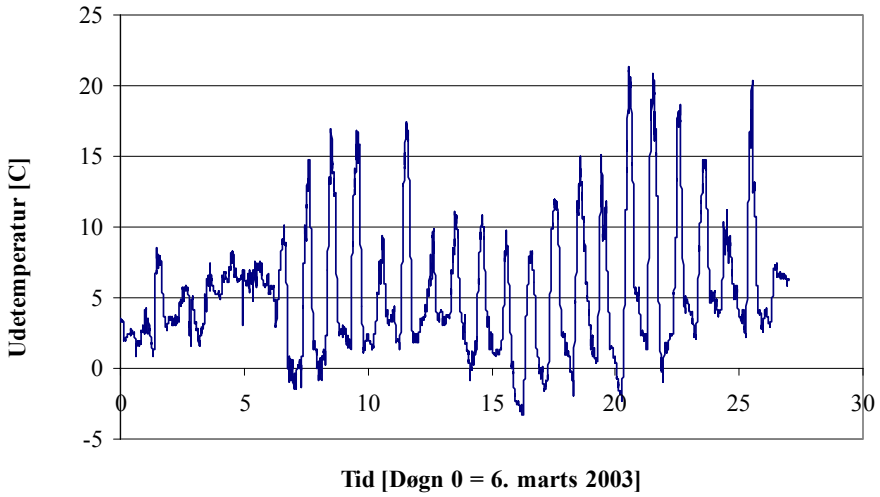
Rum	Indblæsning [m^3/h]	Udsugning [m^3/h]
Bryggers/entre	-	40
Bad v. soveværelse	-	40
Bad ved værelser	-	15
Køkken	-	50
Stue	60	20
Spise/alrum	30	-
Soveværelse	25	-
Værelse tv.	25	-
Værelse th.	25	-
I alt	165	165

Det ses af tabellen at der er en god fordeling af luftmængderne, idet der fjernes luft fra primært de fugtproducerende rum og tilføres luft i opholdsrum.

Som nævnt ovenfor vil der uden om ventilationsanlægget foregå en luftinfiltration og –eksfiltration af udeluft gennem utætheder i klimaskærmen. Målinger på tilsvarende huse, hvor der har været særlig fokus på lufttætheden, er der målt en infiltration på ca. 0,12 h^{-1}. Forsøgshuset kan forventes at have en lufttæthed, der er lidt dårligere, og på denne baggrund regnes der i det følgende med en infiltration på 0,15 h^{-1}. I DS 418, norm for beregning af bygningers varmetab, er til sammenligning angivet en infiltration i normale tilfælde på 0,2 h^{-1} og for særligt tætte huse på 0,1 h^{-1}

2.2 Udetemperatur

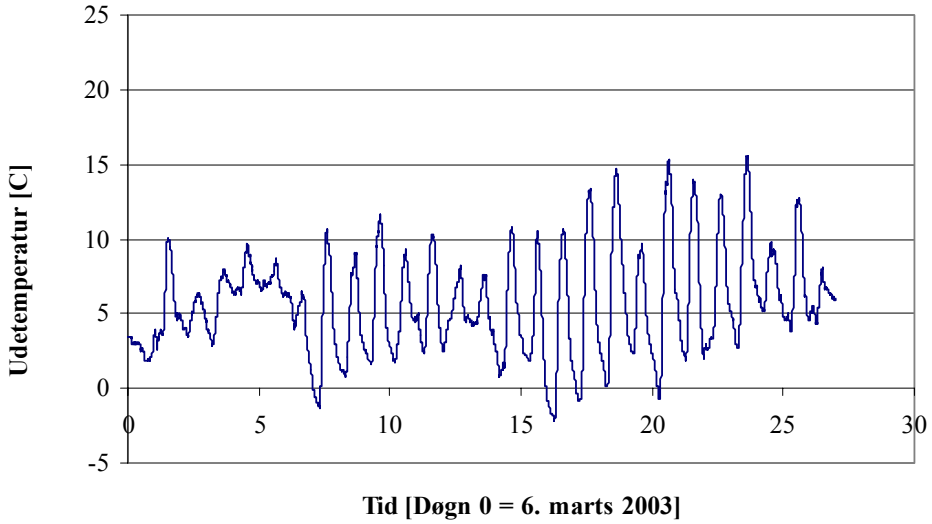
Udetemperaturen er målt vha. et termoelement placeret i en vejrstation, fastgjort til en taghætte på husets tag. Temperaturen gennem perioden er vist i Figur 2.



Figur 1. Udetemperatur målt i vejrstation på tag.

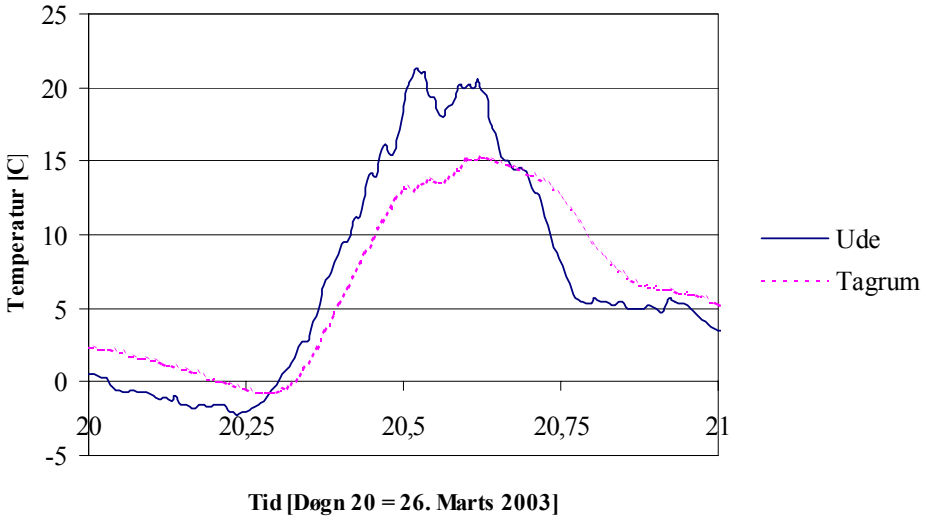
Af figuren fremgår det at der er målt lufttemperaturer på helt op til 20 °C. Dette harmonerer ikke så godt med målinger foretaget af DMI, hvor der i den aktuelle periode er målt en absolut maksimum temperatur på 11,2 °C og 15,1 °C i hhv. Thyborøn og Mejrup, der ligger tæt på Lemvig. Den mest sandsynlige forklaring er udformning af vejrstationen (kvadratisk kasse, åben for oven og til dels for neden), idet den ikke har skærmet termoelementet tilstrækkeligt mod påvirkninger fra solstrålingen. Sidst i marts måned er den maksimale solhøjde ca. 35°, og det skal i øvrigt bemærkes, at der i marts måned 2003 forekom 60 % flere solskinstimer end normalt.

Der er også målt på temperaturen i luftindtaget til ventilationsanlægget. Anlægget tager som udgangspunkt luften fra tagrummet for derved automatisk at opnå en forvarmning af luften, men er udstyret med en termostat og spjældmotor, der aktiverer et by-pass spjæld, hvis temperaturen i luftindtaget overstiger en bestemt temperatur, så luften bliver ledt uden om varmevekleren. By-pass spjældet har ikke været aktiveret i måleperioden. Den nævnte temperaturmåling er foretaget lige før indløb til varmeveksler. Temperaturen gennem perioden er vist i Figur 2.



Figur 2. ”Udetemperatur” målt i luftindtag til ventilationsanlæg.

Af figuren ses at temperaturprofilet som forventet er mere jævnt. For at få et indtryk af hvordan temperaturen i tagrummet og ved den udvendige tagflade variere hen over døgnet, er der i Figur 3 vist temperaturkurver for en varm og solrig dag (d. 26. marts).

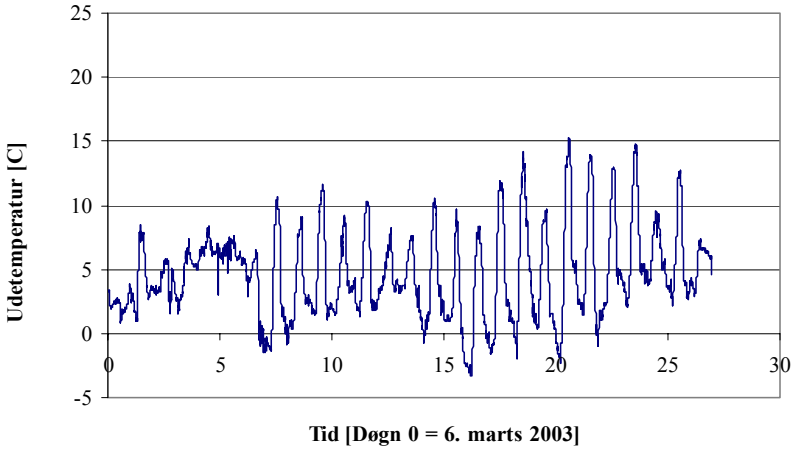


Figur 3. Udetemperatur og temperatur i loftrum. Døgn 20 starter kl.24. Døgn 20,5 svarer til kl. 12.

Det fremgår af figuren at temperaturen i tagrummet som forventet er højere end udetemperaturen i de timer hvor der ikke er solpåvirkning. Midt på dagen er den målte udetemperaturen væsentligt højere end temperaturen i loftrummet, men efterhånden som solbestrålingsstyrken falder, falder udetemperaturen markant, mens der naturligt er en større træghed i temperaturfaldet i tagrummet. For en overskyet dag er konstateret at temperaturen i tagrummet er lidt højere end udetemperaturen hele dagen, hvilket er helt forventeligt.

Der er ovenfor redegjort for to ”udetemperaturmålinger”. Spørgsmålet er nu, hvilken der vil være mest korrekt at benyttes i de efterfølgende beregninger af opvarmningsbehovet. Udetemperaturmå-

lingen i vejrstationen på taget har været påvirket af solstråling, især sidst i perioden, og temperaturen i tagrummet vurderes derfor at være et bedre bud på udelufttemperaturen i solrige perioder. I det følgende anvendes derfor en kombination af de to målte temperaturer, svarende til at temperaturen målt i vejrstationen på taget anvendes så længe denne er lavere end temperaturen i tagrummet. Middeltemperaturen i måleperioden målt i vejrstationen og i tagrummet er hhv. 5,2 °C og 5,6 °C, mens den kombinerede middeltemperatur er 4,6 °C.



Figur 4. Udetemperatur – temperaturen målt i vejrstationen er anvendt så længe denne er lavere end temperaturen i tagrummet.

I måleperioden har været dage med meget mildt vejr, såvel som dage (nætter) med frost. Udetemperaturen varierer fra –3 °C til 15 °C. Den gennemsnitlige udetemperatur for hele perioden kan beregnes til 4,6 °C.

Hvis man beregner døgnmiddeltemperaturerne for perioden fås resultaterne vist i Tabel 2.

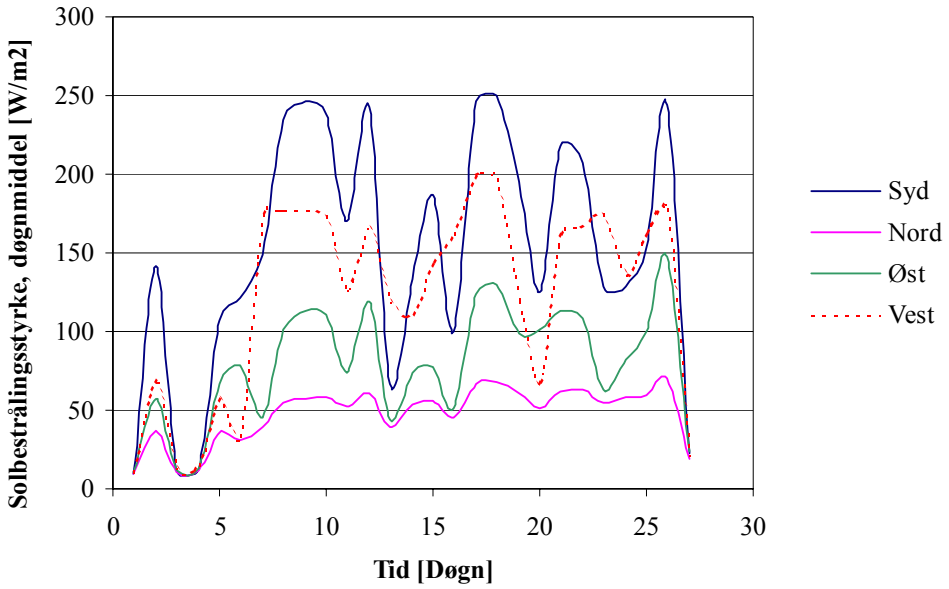
Tabel 2. Gennemsnitlige udetemperaturer for hvert enkelt døgn i perioden.

Dag [-]	Udetemperatur [°C]	Dag [-]	Udetemperatur [°C]	Dag [-]	Udetemperatur [°C]
06.03.2003	2,3	15.03.2003	4,8	24.03.2003	5,4
07.03.2003	4,2	16.03.2003	4,2	25.03.2003	3,8
08.03.2003	4,2	17.03.2003	4,8	26.03.2003	5,5
09.03.2003	4,5	18.03.2003	4,5	27.03.2003	5,4
10.03.2003	6,5	19.03.2003	4,5	28.03.2003	5,7
11.03.2003	6,4	20.03.2003	3,8	29.03.2003	7,0
12.03.2003	3,9	21.03.2003	2,5	30.03.2003	6,1
13.03.2003	3,0	22.03.2003	1,9	31.03.2003	5,9
14.03.2003	3,4	23.03.2003	4,1	01.04.2003	5,5

2.3 Solindfald

Solpåvirkningen af huset bestemmes vha. fire pyranometre monteret på vejrstationen. De fire pyranometre vender således at de korresponderer med husets facader og gavle, således at de målte værdier svarer til solindfaldet på husets fire retninger. Husets orientering fremgår af bilag 2.

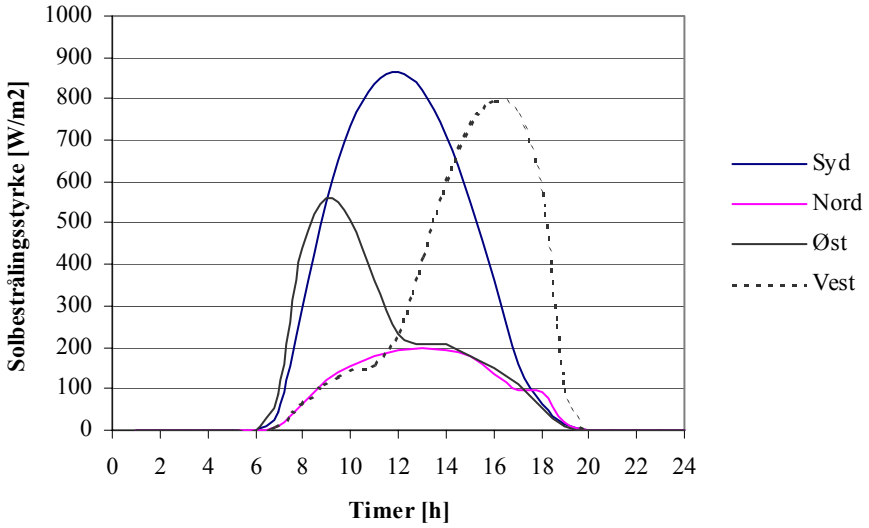
I måleperioden er der målt solbetrålingsstyrker (døgnmiddel) som vist i Figur 5.



Figur 5. Solbetrålingsstyrker på husets facader og gavle.

Figuren er kun medtaget for at vise solbestrålingsstyrkens variation på de enkelte orienteringer. Det ses, at solstrålingen som forventet er størst på sydfacaden, mens den nordlige facade, som ikke får direkte stråling, ligger på et konstant lavt niveau. Der er i en stor del af måleperioden væsentlig forskel på solstrålingen på de øst- og vestvendte gavle (mindre på øst), hvor man burde forvente en større grad af overensstemmelse. Dette skyldes dels at den benævnte øst-facade nærmere er orienteret nordøst, hvilket giver en nedsat solpåvirkning ift. vest-facaden, og dels at der mod øst er skyggegivende træer og et nabobohus tæt ved huset, hvilket ikke er tilfældet for vest-facaden. En anden forklaring kan blot være at skydækket generelt har været mere udbredt først på dagen end sidst på dagen.

I Figur 6 er vist målte solbetrålingsstyrker for de 4 retninger for 18. døgn, dvs. 23. marts 2003.



Figur 6. Solbetrålingsstyrke på husets facader og gavle for 18. døgn (23.marts 2003)

Af figuren er det tydeligt at solen står op lidt efter kl. 6.00 og rammer hhv. syd- og østfacaden ca. samtidig. Når solen ikke længere rammer østfacaden rammes i stedet vestfacaden (kl. ca. 11.30). Nordfacaden rammes tydeligvis ikke af direkte solstråling. Det ser dog ud til at nordfacaden rammes af direkte solstråling sidst på dagen (omkring kl. 18), hvilket kan forklares ved at nordfacaden ikke er orienteret direkte mod nord, men vender lidt mod vest (se bilag 2). Alt i alt ser de målte data fornuftige ud, og afspejler hvad man kan forvente i marts måned.

For at fastlægge det samlede solindfald i perioden, skal solbetrålingsstyrkerne for de respektive retninger ganges med arealet af glaspartierne for de tilsvarende facader og gavle i huset. Der tages udgangspunkt i metoden beskrevet i "Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Kompendium 1. Grundlæggende energimæssige egenskaber" [4], hvilket betyder at der ydermere tages højde for glassets solenergitransmittans samt eventuelle skyggefaktorer. Følgende formel anvendes:

$$g_{korrigeret} = g_0 \cdot F_s$$

hvor $g_{korrigeret}$ er den korrigerede solenergitransmittans
g_0 er den totale solenergitransmittans ved en indfaldsvinkel på 0 °, og
F_s er skyggefaktoren

For at tage højde for g-værdiens vinkelafhængighed anvendes der ved bestemmelsen af det totale solindfald i den betragtede periode en korrektionsfaktor på 0,9. Faktoren er overslagsmæssigt fastlagt med korrektionsfaktor for diffus solstråling på f = 0,86 og vinkelafhængighedsfaktor p = 3 (jf. [4] s. 49). Ruderne som er anvendt har en solenergitransmittans på 52 %.

I henhold til metoden i SBI-anvisning 184, Bygningers energibehov [5], antages skyggefaktoren F_s som udgangspunkt at være 0,8 for øst, syd og vest facade, og 0,9 for nordvendt facade, idet højdevinklen til det omgivende terræn, bebyggelse mm omtrent er 10 °. Udhænget på huset er minimalt og vinduer og døre er placeret helt ude i facaden, så der er ikke nære skygger af betydning. For vinduerne korrigeres F_s derfor ikke yderligere.

De korrigerede solenergitransmittanser kan nu beregnes som:

$g_{korrigeret} = 0{,}52 \cdot 0{,}80 \cdot 0{,}90 = 0{,}37$ for øst, syd og vest facade

$g_{korrigeret} = 0{,}52 \cdot 0{,}90 \cdot 0{,}90 = 0{,}42$ for facade mod nord

Glasarealerne for de fire facader kan opgøres til følgende:

$A_{øst} = 0{,}48\ m^2$
$A_{syd} = 7{,}84\ m^2$
$A_{vest} = 2{,}70\ m^2$
$A_{nord} = 5{,}00\ m^2$

Det ses hermed at en stor del af glasarealet er orienteret mod syd, og at glasarealet mod øst og vest er meget beskedent, mens glasareal mod nord er forholdsvis stort. Selve huset og husets vinduer/døre er derfor ikke orienteret bedst muligt i forhold til at udnytte solenergien.

Målingerne, som er foretaget vha. pyranometre, bliver aflæst i W/m^2, og disse værdier kan nu ganges med de respektive arealer samt de korrigerede solenergitransmittanser.

$$Q_{total} = \left(Q_{s,øst} \cdot A_{øst} + Q_{s,syd} \cdot A_{syd} + Q_{s,vest} \cdot A_{vest} + Q_{s,nord} \cdot A_{nord}\right) \cdot g_{korrigeret}$$

Herved fås et samlet energitilskud fra solen på 443 kWh for den betragtede periode. Ligesom for udetemperaturen, bestemmes også det daglige soltilskud for hver enkelt dag i perioden. Resultaterne er vist i Tabel 3.

Tabel 3. Tilskud af solenergi til huset for hvert enkelt døgn i perioden.

Dag [-]	Soltilskud [kWh]	Dag [-]	Soltilskud [kWh]	Dag [-]	Soltilskud [kWh]
06.03.2003	1,4	15.03.2003	24,4	24.03.2003	20,1
07.03.2003	13,7	16.03.2003	18,0	25.03.2003	13,5
08.03.2003	1,7	17.03.2003	24,7	26.03.2003	22,9
09.03.2003	1,9	18.03.2003	9,8	27.03.2003	22,3
10.03.2003	11,0	19.03.2003	15,2	28.03.2003	16,3
11.03.2003	11,3	20.03.2003	19,8	29.03.2003	15,6
12.03.2003	16,9	21.03.2003	13,5	30.03.2003	18,3
13.03.2003	24,0	22.03.2003	26,2	31.03.2003	25,7
14.03.2003	25,0	23.03.2003	26,4	01.04.2003	3,2

2.4 Indetemperatur

Indetemperaturen er målt vha. termofølere som er placeret på indvendige vægge i samtlige rum (med undtagelse af gangen). Målingerne er hjemtaget som døgnmiddel med en halv grads opløsning. Der er derfor en vis usikkerhed forbundet med målingerne og de angivne indetemperaturer.

Middelværdierne af indetemperaturen for hvert enkelt rum er opstillet i Tabel 4.

Tabel 4. Middeltemperatur og areal for hvert rum i huset.

Rum [-]	Middeltemperatur [°C]	Areal af rum [m^2]
Entre/bryggers	21,1	10,3
Spise/alrum	21,2	24,0
Stue	21,3	20,8
Værelse syd	20,5	9,3
Børnebad	22,4	4,8
Værelse nord	21,0	9,3
Køkken	20,9	15,0
Forældrebad	23,0	6,3
Soveværelse	20,8	13,0

Ved at gange areal og middeltemperatur for hvert enkelt rum, summere disse resultater og dividere med summen af de indgående arealer bestemmes husets middeltemperatur. Resultatet af denne beregning bliver 21,2 °C.

Bestemmes den arealvægtede middeltemperatur for hvert enkelt døgn i perioden får man resultaterne opstillet i Tabel 5.

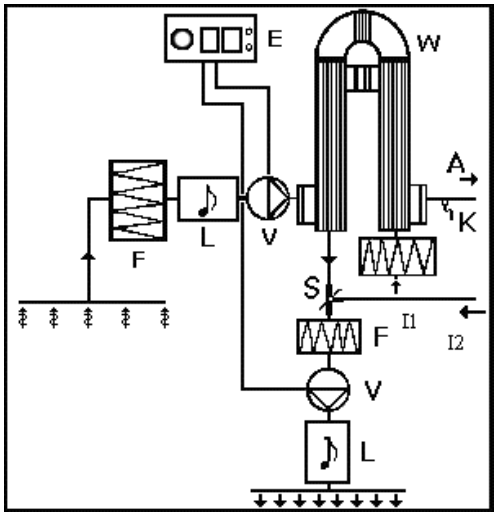
Tabel 5. Middeltemperaturer i huset for hver enkelt døgn i perioden.

Dag [-]	Middeltemp. [°C]	Dag [-]	Middeltemp. [°C]	Dag [-]	Middeltemp. [°C]
06.03.2003	20,8	15.03.2003	21,8	24.03.2003	21,2
07.03.2003	21,8	16.03.2003	21,3	25.03.2003	20,6
08.03.2003	20,8	17.03.2003	21,2	26.03.2003	21,9
09.03.2003	21,6	18.03.2003	21,3	27.03.2003	21,9
10.03.2003	21,1	19.03.2003	20,3	28.03.2003	21,4
11.03.2003	21,2	20.03.2003	20,8	29.03.2003	21,4
12.03.2003	21,5	21.03.2003	20,7	30.03.2003	21,0
13.03.2003	21,3	22.03.2003	21,0	31.03.2003	21,5
14.03.2003	21,2	23.03.2003	21,2	01.04.2003	20,0

2.5 Effektivitet af varmeveksler

Effektiviteten af varmeveksleren eller temperaturvirkningsgraden, kan bestemmes ud fra tre temperaturmålinger, svarende til temperaturen af den luft som hentes udefra, den luft som hentes indefra og den luft som blæses ind. Temperaturvirkningsgraden er defineret som forholdet mellem den opnåede temperaturstigning i veksleren og den højest mulige temperaturstigning.

I det aktuelle ventilationsanlæg, er de to ventilatorer placeret, så varmeveksleren kan udnytte den varme de udvikler (se Figur 7).



- W Varmeveksler
- I 1 Internt luftindtag
- I 2 Externt luftindtag
- V Ventilator
- L Lydsluse
- F Filter
- S Bypass spjæld
- K Kondensdræn
- E Kontrolpanel
- A Luftafkast
- ⇢ Luftudsugning
- → Luftindblæsning

Figur 7. Skematisk oversigt over ventilationsanlægget.

Derfor er det relevant, at dele den nævnte temperaturvirkningsgrad op i to, nemlig brutto- og netto-temperaturvirkningsgraden. Brutto-temperaturvirkningsgraden er normalt den, der bliver benævnt temperaturvirkningsgraden af ventilationsfirmaer m.fl.

Brutto-temperaturvirkningsgrad (system):

$$\eta_{brutto} = \frac{\left(T_{indblæsning} - T_{udeluft}\right)}{\left(T_{indeluft} - T_{udeluft}\right)} \quad \eta_{brutto} \geq 0$$

Indblæsningsluftens temperatur ($T_{indblæsning}$) måles efter indblæsningsmotoren og temperaturen $T_{udeluft}$ og $T_{indeluft}$ er hhv. ude- og indeluftens temperatur.

Brutto-virkningsgraden er dog ikke en god målestok for varmeveksleren, da den viser hele systemets virkningsgrad, og ikke selve varmeveksleren.

Netto-temperaturvirkningsgrad (varmeveksler):

$$\eta_{netto} = \frac{\left(T_{indblæsnig,korr.} - T_{indtag}\right)}{\left(T_{udsugning} - T_{indtag}\right)} \quad 0 \leq \eta_{brutto} \geq 1$$

$T_{indblæsning,\ korr.}$ er indblæsningsluftens temperatur målt før indblæsningsventilatoren, som er bestemt ud fra måling af temperaturen efter ventilatoren og en beregning af temperaturstigningen over ventilatoren. Temperaturstigningen kan under forudsætning af en volumenstrøm på 165 m^3/h og et ef-

fektoptag på 40 W beregnes til ca. 0,7 °C. $T_{udsugning}$ er udsugningsluftens temperatur målt efter udsugningsventilatoren, mens T_{indtag} er udeluftens temperatur lige før indløbet til varmeveksleren, som har været lidt højere end udetemperaturen, idet friskluften tages fra tagrummet.

I den betragtede periode har der kunne måles følgende middeltemperaturer:

$T_{udeluft}$	=	4,6 °C
T_{indtag}	=	5,6 °C
$T_{indeluft}$	=	21,2 °C
$T_{udsugning}$	=	23,3 °C
$T_{indblæsning}$	=	19,7 °C
$T_{indblæsning, korr.}$	=	19,0 °C

Det ses af de målte temperaturer, at der er en forskel på ca. 2 °C på indelufttemperaturen, målt på indervægge i de enkelte rum i ca. 1,5 m højde, og udsugningsluftens temperatur, der er målt lige før indløbet til varmeveksleren. Dette skyldes dels temperaturstigningen over ventilatoren, og dels at den udsugede rumluft tages fra det øvre luftvolumen, hvor der må forventes en højere temperatur end f.eks. midt i rummet. Ved gulvvarme vil temperaturlagdelingen dog være forholdsvis beskeden. Varmetabet fra kanalsystemet på stykket fra udsugningsventiler og frem til varmeveksler, der i øvrigt er indbygget i loftisoleringen, vil betyde et mindre temperaturfald. Alt i alt er de målte temperaturer nogenlunde fornuftige.

Det antages at indblæsningstempraturen, der er målt lige efter ventilatoren, svarer til den indblæste temperatur, idet der ses bort fra varmetab fra kanaler.

Den gennemsnitlige brutto-temperaturvirkningsgrad kan således bestemmes:

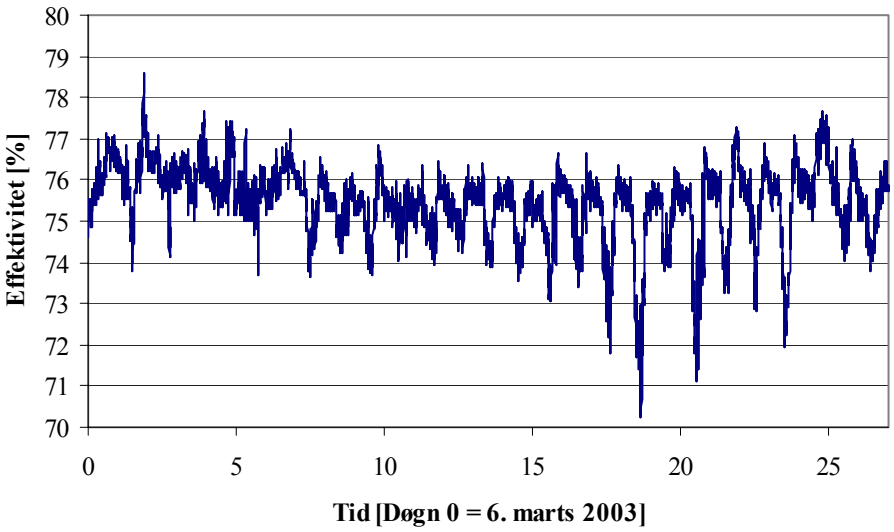
$$\eta_{brutto} = \frac{\left(T_{indblæsning} - T_{udeluft}\right)}{\left(T_{indeluft} - T_{udeluft}\right)} = \frac{19{,}7 - 4{,}6}{21{,}2 - 4{,}6} = 0{,}91 = 91\%$$

Den gennemsnitlige netto-temperaturvirkningsgrad bliver:

$$\eta_{netto} = \frac{\left(T_{indblæsnig,korr.} - T_{indtag}\right)}{\left(T_{udsugning} - T_{indtag}\right)} = \frac{19{,}0 - 5{,}6}{23{,}3 - 5{,}6} = 0{,}76 = 76\%$$

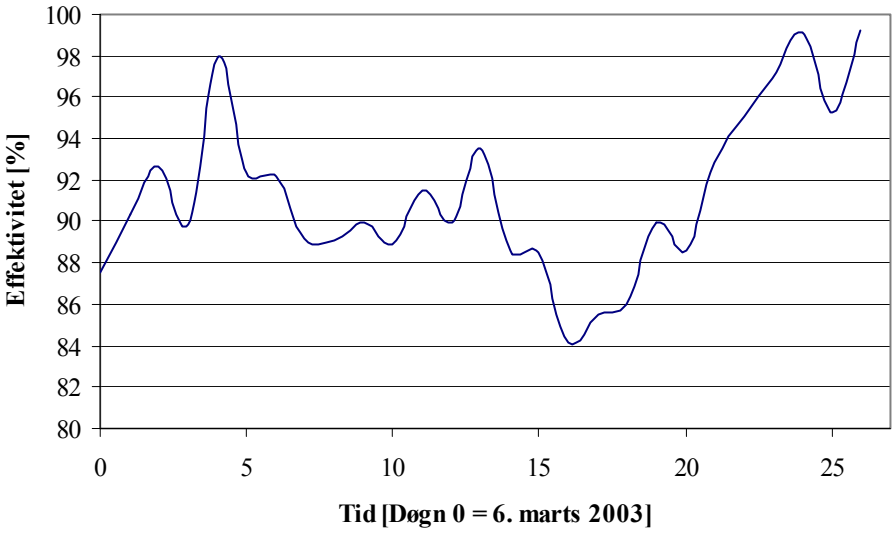
Det er en forudsætning at der indblæses og udsuges samme luftmængde gennem ventilationsanlægget. Målinger foretaget af leverandøren af ventilationsanlægget viser, som omtalt tidligere, at denne antagelse er rimelig. Volumenstrømmen har i perioden været på 165 m^3/h.

Effektiviteten af varmeveksleren varierer, og i Figur 8 er vist variationen gennem perioden.



Figur 8. Variation af varmevekslerens effektivitet (netto-temperaturvirkningsgrad) gennem perioden.

Firguren viser at varmevekslerens effektivitet varierer mellem 70 % og 79 %. Der er tale om forholdsvis små udsving, som sandsynligvis hænger sammen med udsvingene i fugtproduktionen i huset og eventuelt ubalance i systemet, hvis døre og/eller vinduer har været åbne. I Figur 9 er vist variationen i brutto-temperaturvirkningsgraden, der varierer mellem 84 og 99 %. De store udsving skyldes sandsynligvis usikkerheden forbundet med inde- og udetemperaturmålingerne og fugtforholdene.



Figur 9. Variation af ventilationsanlæggets effektivitet (brutto-temperaturvirkningsgrad) gennem perioden

2.6 Energiforbrug og internt varmetilskud

Huset har i måleperioden været beboet af 2 voksne og et lille barn. Huset forsynes med fjernvarme fra det lokale fjernvarmeværk.

Varmeforbrug til opvarmning er i perioden er målt vha. en opsat energimåler. Gennem den betragtede periode har der i gulvvarmeanlægget været et totalt forbrug på 370 kWh. På grund af problemer med måleapparaturet er der ikke foretaget målinger af opvarmningsbehovet for hver enkelt dag i måleperioden.

Varmtvands-installationen i huset består af en velisoleret gennemstrømningsvandvarmer (pladeveksler), og der er ikke cirkulation på det varme brugsvand. På denne baggrund ses bort fra det forholdsvis ubetydelige varmetab fra pladeveksler og varmtvandsrør. Derimod er varmetabet fra varmerør mm. i den øvrige varmeinstallation (fjernvarmeunit) ikke ubetydeligt, idet disse ikke er isolerede, hvilket er typisk for dagens byggeri. Varmetabet kan beregnes ud fra SBI meddelelse 129, Beregning af bruttoenergiforbrug. Der er anvendt stålrør (3/4") og varmetabet fra disse er 1,18 W/mK. I samråd med installatøren af varmeanlægget og med hensyntagen til uisolerede ventiler, rørsamlinger mm., er der skønsmæssigt bestemt en ækvivalent uisoleret rørlængde på 3 m. Der kan normalt anvendes en middeltemperaturdifference på 35 °C, der er forskellen mellem rørtemperatur og omgivelsernes temperatur. Derved kan beregnes et varmetab på 124 W svarende til 80 kWh i måleperioden.

Indstilling af fremløbstemperaturen i gulvvarmeanlægget er foretaget på baggrund af en beregning af den dimensionerende temperatur for gulvvarmeanlægget. Der er ikke målt på fremløbstemperaturen, men på basis af manuelle aflæsninger i perioden skønnes den gennemsnitlige fremløbstemperatur at have været ca. 33 °C i måleperioden. Ud fra forbrug af vand er den gennemsnitlige afkøling beregnet til 4,8 °C. På denne baggrund må det antages at temperaturen i og omkring gulvvarmeslangerne i måleperioden har været ca. 31 °C (afrundet).

Det interne varmetilskud sættes normalt til 5 W pr. m^2 bruttoetageareal. På baggrund af logbog og aflæst elforbrug, vil det være muligt at komme med et kvalificeret bud på hvad dette varmetilskud har været i måleperioden.

Varmetilskuddet fra personer er vurderet til 130 W i gennemsnit for hele døgnet i måleperioden, svarende til 0,9 W/m^2. Denne værdi er bestemt under forudsætning af en varmeafgivelse på typiske 100 W pr. voksen og 25 W for barnet og en opholdstid i 14 af døgnets 24 timer.

Der er aflæst et elforbrug til apparatur og belysning på 334 kWh, svarende til 3,6 W/m^2. Heraf vurderes det at belysning bidrager med en effekt på 150 W (gennemsnit over døgnet), svarende til ca. 1,0 W/m^2. Det resterende elforbrug er fra apparatur, svarende til 2,6 W/m^2. Det antages at 100 % af den omsatte varme fra elforbruget til belysning bliver til potentielt varmetilskud, mens denne andel i gennemsnit kan sættes til 70 % for apparatur i boliger, jf. ovennævnte SBI meddelelse 129. Samlet set kan det interne potentielle varmetilskud opgøres til 3,7 W/m^2, hvilket er ca. 25 % mindre end det man normalt regner med. Dette harmonerer udmærket med den moderate aktivitet i huset, idet der bor to voksne og et spædbarn på forholdsvis mange kvadratmeter.

2.7 Sammenfatning af resultater

I det efterfølgende er resultaterne af målingerne sammenfattet. De parametre som har direkte indflydelse på husets indeklima og energiforbrug er opsummeret i Tabel 6 for hvert enkelt døgn i perioden.

Tabel 6. Samlede måleresultater for perioden, døgnmiddelværdier/-summationer.

Dag [#]	Udetemperatur [°C]	Solindfald [kWh]	Indetemperatur [°C]	Vent. eff. [%]	Energiforbrug [kWh]
06.03.2003	2,3	1,4	20,8	88	
07.03.2003	4,2	13,7	21,8	90	
08.03.2003	4,2	1,7	20,8	93	
09.03.2003	4,5	1,9	21,6	90	
10.03.2003	6,5	11,0	21,1	98	
11.03.2003	6,4	11,3	21,2	92	
12.03.2003	3,9	16,9	21,5	92	
13.03.2003	3,0	24,0	21,3	89	
14.03.2003	3,4	25,0	21,2	89	
15.03.2003	4,8	24,4	21,8	90	
16.03.2003	4,2	18,0	21,3	89	
17.03.2003	4,8	24,7	21,2	92	
18.03.2003	4,5	9,8	21,3	90	
19.03.2003	4,5	15,2	20,3	94	
20.03.2003	3,8	19,8	20,8	89	
21.03.2003	2,5	13,5	20,7	88	
22.03.2003	1,9	26,2	21,0	84	
23.03.2003	4,1	26,4	21,2	86	
24.03.2003	5,4	20,1	21,2	86	
25.03.2003	3,8	13,5	20,6	90	
26.03.2003	5,5	22,9	21,9	89	
27.03.2003	5,4	22,3	21,9	93	
28.03.2003	5,7	16,3	21,4	95	
29.03.2003	7,0	15,6	21,4	97	
30.03.2003	6,1	18,3	21,0	99	
31.03.2003	5,9	25,7	21,5	95	
01.04.2003	5,5	3,2	20,0	99	
Sum/middel	4,6	443	21,2	91	370

Ud fra elmålinger og vurdering af aktiviteterne i huset i måleperioden (bl.a. på baggrund af logbog) er bestemt et gennemsnitligt potentielt varmetilskud fra personer, belysning og apparatur på 3,7 W/m^2, svarende til 348 kWh. Der har i perioden været et varmetab/-tilskud fra varmerør mm. på ca. 80 kWh.

3 SAMMENLIGNING BEREGNINGER/MÅLINGER

Sammenligninger mellem beregninger og målinger foretages dels hvor måleresultaterne sammenlignes med simplificerede beregninger baseret på husets totale varmetabskoefficient, og dels ved sammenligning med detaljerede simuleringer hvor bygningssimuleringsprogrammet BSIM [6] anvendes.

3.1 Målinger sammenlignet med simplificerede beregninger

Den simplificerede beregning af husets forventede opvarmningsbehov, baseres på de målte ude- og indetemperaturer, brutto-temperaturvirkningsgraden for ventilationsanlægget, den tilførte solenergi, det interne varmetilskud fra personer, apparatur og varmerør mm. samt husets teoretiske varmetabskoefficient. Sidstnævnte er bestemt i rapporten "Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner, Del 1: Konstruktioner / systemer, Byggesystem: Lette ydervægselementer i stålskelet" [2].

Varmetabskoefficienten for huset kan derfor bestemmes som:

$$H_{total} = H_{trans,1D} + H_{trans,2D} + H_{vent}$$

hvor H_{total} er den totale varmetabskoefficient for huset,
$H_{trans,1D}$ er varmetabskoefficienten for 1-dimensionale transmissionstab,
$H_{trans,2D}$ er varmetabskoefficienten for 2-dimensionale transmissionstab, og
H_{vent} er varmetabskoefficienten for ventilationstab/infiltration.

Værdierne fra den første rapport benyttes, dog ændres varmetabskoefficienten for infiltrationstab, idet infiltrationen ændres fra de oprindelige 0,10 h^{-1} til 0,15 h^{-1}. I de tidligere gennemførte beregninger er det antaget at ventilationsanlægget har en temperaturvirkningsgrad på 90 %. Målinger har vist at denne forudsætning stort set var korrekt. Varmetabskoefficienten for konstruktioner (UA-værdien) er ligeledes korrigeret for at tage højde for det lille ekstra varmetab som forekommer gennem terrændækket, idet gulvvarmeslangerne er ca. 1 °C varmere end forventet. Af samme grund forhøjes varmetabskoefficienten for samlinger (ψl-værdien) for at tage højde for det forøgede varmetab gennem fundamentet. Forhøjelserne af varmetabskoefficienterne er foretaget ved forholdsregning mellem de forventede og de aktuelle temperaturer.

$$H_{total} = 76{,}3\,W/K + 12{,}6\,W/K + 0{,}34\,Wh/m^3K \cdot \left(0{,}58h^{-1} \cdot 9\% + 0{,}15h^{-1}\right) \cdot 285m^3 = 107{,}8W/K$$

Det forventede opvarmningsbehov for perioden kan bestemmes ved følgende formel:

$$Q_{opv} = H_{total} \cdot \left(T_{inde} - T_{ude}\right) \cdot t_{periode} - (Q_s + Q_i) \cdot \eta$$

hvor Q_{opv} er det forventede opvarmningsbehov,
T_{inde} er den gennemsnitlige indetemperatur for perioden,
T_{ude} er den gennemsnitlige udetemperatur for perioden,
$t_{periode}$ er antallet af timer i perioden,
Q_s er det samlede solenergitilskud i kWh,
Q_i er det samlede interne varmetilskud i kWh, og
η er udnyttelsesfaktoren for varmetilskud

Udnyttelsesfaktoren η angiver, hvor stor en del det potentielle varmetilskud, som kan nyttiggøres. I udnyttelsesfaktoren er derfor også indregnet effekten af husets varmeakkumulerende egenskaber. Resten af varmetilskuddet fjernes ved brug af solafskærmning og gardiner samt ved ekstra ventilation. På baggrund af metoden i SBI-anvisning 184 [5], er denne faktor beregnet til 0,95 for den aktuelle periode, idet huset kan henføres til kategorien "middel let bygning".

Indsættes de målte og beregnede værdier i formlen fås et forventet opvarmningsbehov for huset på :

$$Q_{opv} = 107{,}8\,W/K \cdot (21{,}2 - 4{,}6)\,°C \cdot 24\,h \cdot 27\,dage \cdot 10^{-3} - (443kWh + 348kWh + 80kWh) \cdot 0{,}95 = 333\,kWh$$

Det samlede opvarmningsbehov for perioden er målt til 370 kWh, hvilket altså er 37 kWh mere end beregnet med den simple beregningsmetode, og der er således en afvigelse på ca. 10 % mellem beregninger og målinger.

3.2 Målinger sammenlignet med detaljerede beregninger

De detaljerede beregninger foretages som nævnt vha. simuleringsprogrammet BSIM 2000 [6]. Modellen som benyttes er beskrevet i rapporten "Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner, Del 1: Konstruktioner/systemer, Byggesystem: Lette ydervægselementer i stålskelet" (grundmodel), der er dog foretaget en række ændringer beskrevet i det følgende.

3.2.1 Udetemperatur

For at give de korrekte randbetingelser til beregningsmodellen opbygges et nyt referenceår, hvor udetemperaturen defineres som de målte værdier i perioden 06.03.2003 til 01.04.2003.

3.2.2 Solindfald

For at medtage de målte solbestrålingsstyrker i BSIM, angives i ovennævnte referenceår timeværdier for direkte normalstråling E_0 og diffus himmelstråling på vandret E_v. Disse soldata bestemmes på baggrund af målte solintensiteter og beregnede indfaldsvinkler. Der benyttes Petersen solalgorimer og en antagelse om et skydække svarende til den helt overskyede himmel (8 oktas). Ved brug af denne simple metode er der beregnet et totalt solindfald på husets flader, der kun afviger ca. 3 % fra det målte. Afvigelse på de enkelt timer og flader er fornuftige.

I Bsim er der desværre et problem med at den transmitterede solstråling afhænger af vægtykkelsen, idet ruden altid antages placeret på væggens inderside og således skygges af en "recess" på væggens bredde. Da vægtykkelsen for det aktuelle hus er ca. 45 cm og vinduer/døre stort set er placeret helt ude i facaden, vil skyggeeffekten være betydelig, og det er derfor nødvendig at korrigere for fejlen. Dette foretages ved at udføre en beregning med vægge med ubetydelig vægtykkelse, hvorved det korrekte solindfald findes. Dette medtages i modellen med de rigtige vægge ved at justere på solenergitransmittansen for ruden.

Solstrålingen reduceres af skygger fra det omgivende terræn, bebyggelse og beplantning. I Figur 10 er vist et billede af forsøgshuset (gult) og nabohuset (rødt), idet billedet er taget i retning mod øst. Det ses, at nabohuset ligger forholdsvis tæt på forsøgshuset, og derfor vil det til en vis grad skygge for solen. Effekten vil dog ikke være udtalt i måleperioden (marts måned), hvor solen står forholdsvis højt på himlen. Der er desuden en ca. 2-3 m høj beplantning langs husets østlige og nordlige facader. Mod vest er skyggeforholdene ubetydelige. Det er skønsmæssigt forsøgt at modellere de nævnte skyggeforhold i BSIM, vha. den indbyggede funktion til medtagelse af skygger fra omgivelser.



Figur 10. Billede af forsøgshuset (til venstre) og nabohuset, taget mod øst.

Der er regnet med at 20 % af solstrålingen, som passerer ruden, bliver reflekteret tilbage gennem ruden eller på anden måde går tabt. Dette er en forholdsvis stor andel, men som skønnes at være realistisk på baggrund af udformningen af vindueslysninger og brug af persienner mm.

3.2.3 Indetemperatur

For at opnå samme betingelser i forbindelse med simuleringerne med BSIM som gjorde sig gældende i forbindelse med målingerne, foretages en tilpasning af setpunktet for indetemperaturen, så den gennemsnitlige indetemperatur for den betragtede periode bliver de målte 21,2 °C.

3.2.4 Ventilation

Ventilationen foregår med udeluft, der ledes gennem en varmeveksler. Ventilationsanlæggets temperaturvirkningsgrad sættes, jf. målingerne til 91 %, svarende til den forventede temperaturvirkningsgrad.

Tidligere er der redegjort for i hvilke rum, der er udsugning, og i hvilke, der er indblæsning. På baggrund af de udsugede og indblæste luftmængder opstilles der en luftbalance for huset, og herud fra fastlægges luftudvekslingen mellem rummene.

3.2.5 Infiltration

På baggrund af tidligere vurderinger af husets tæthed (infiltration) anvendes et luftskifte på 0,15 h-1 for samtlige zoner.

3.2.6 Temperatur af gulvvarmeslanger (Jordtemperatur)

I samtlige rum defineres opvarmning svarende til en maksimal effekt på 3,1 kW. Programmet BSIM giver ikke direkte mulighed for at definere gulvvarme som benyttes i det betragtede hus, og i stedet defineres opvarmningen som radiatoropvarmning.

Gulvvarmeslangerne har, jf. målingerne, en temperatur som er væsentligt højere end rumluften. Derfor må zonen under huset (den fiktive zone 'jord') defineres som havende en lavere temperatur end de typisk anvendte 10 °C. Derfor anvendes en temperatur for den fiktive zone jord på 0 °C. Den reducerede jordtemperatur svarer altså til at der haves en temperaturdifferens mellem oversiden af betondækket og jorden på ca. 21 °C, som igen svarer til den målte gulvvarmeslangetemperatur på ca. 31 °C minus jordtemperaturen på 10 °C.

Ved årssimulering anvendes en temperatur for den fiktive zone jord på 0 °C, svarende til at gulvvarmeslangerne er f.eks. 30 °C og jorden er 10 °C.

Kuldebroen i forbindelse med fundamentet vil ligeledes, i forbindelse med den betragtede periode, skulle fastlægges på baggrund af en temperaturforskel på 31 °C minus udetemperaturen. For at medtage dette forhold i beregningerne øges kuldebroens størrelse med en faktor som tilsvarer forholdet mellem de aktuelle temperaturforhold og de modellerede temperaturforhold. I forbindelse med betragtninger af hele fyringssæsonen vil man, jf. ovenstående, anvende en temperaturforskel på 30 °C minus udetemperaturen. Denne forskel er som i den oprindelige model.

3.2.7 Internt varmetilskud fra personer, belysning, apparatur og varmerør mm.

Det interne varmetilskud er bestemt tidligere i rapporten. Varmetilskud fra personer tilføres i tidsrummet kl. 16 til kl. 8. Varmetilskuddet fra belysning og apparatur tilføres jævnt fordelt over hele døgnet. Varmetilskuddene fordeles jævnt i huset, således at hvert rum har en arealvægtet andel af den samlede effekt. Varmetilskuddet fra de uisolerede varmerør i bryggers tilføres dog kun dette rum.

3.2.8 Udluftning

Det antages at der foretages udluftning (f.eks. ved at åbne vinduer) ved temperaturer over 24 °C. I simuleringen modelleres dette ved at der i tilfælde at en for høj temperatur igangsættes en udluftning af det pågældende rum med et luftskifte på 5 h^{-1}. På baggrund af beboernes angivelser i logbog, er dette en realistisk tilnærmelse til de aktuelle forhold i måleperioden.

3.2.9 Resultater

Der gennemføres en simuleringsperiode på 27 dage, svarende til den periode som er målt. Resultaterne er sammenfattet i Tabel 7.

Tabel 7: Beregnet energibalance for perioden 06. marts 2003 til 1. april 2003, BSIM.

Energibalance		[kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	305
Q_{inf}	Varmetab ved infiltration	-152
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	-49
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	396
$Q_{udst/pers}$	Varme tilført fra udstyr og personer	429
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-875
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	0
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-54

Energiforbruget til opvarmning er, som tidligere omtalt, målt til 370 kWh, og den detaljerede beregning undervurderer således energiforbruget med ca. 80 kWh.

Hvis man opstiller en tilsvarende varmebalance for den simple beregning (se Tabel 8), får man en idé om på hvilke områder de to beregningsmodeller adskiller sig. De anførte potentielle varmetilskud fra solstråling og udstyr/personer kan kun delvist udnyttes til opvarmning af huset, men er medtaget af hensyn til sammenligning af de enkelte bidrag. Udnyttelsesfaktoren η for varmetilskud er tidligere beregnet til 0,95.

Tabel 8: Beregnet energibalance for perioden 06. marts 2003 til 1. april 2003, simpel.

Energibalance		[kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	333
Q_{inf}	Varmetab ved infiltration	-156
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	0
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	443
$Q_{udst/pers}$	Varme tilført fra udstyr og personer	428
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-949
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	0
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-54

Det er hermed tydeligt at den primære forskel ligger i beregningen af transmissionstabet. Dette skyldes primært det forhold, at BSIM direkte tager hensyn til konstruktionernes varmekapacitet, mens effekten af varmekapaciteten i den simple metode er indregnet i udnyttelsesfaktoren. Det er derfor svært direkte at sammenligne varmetabet via klimaskærmen. Men også solindfaldet afviger og det skyldes metodeforskelle vedrørende indregning af effekt af interne og eksterne skygger, g-værdiens vinkelafhængighed mm.

3.3 Sammenfatning og diskussion af resultater

Sammenligningerne foretaget i dette kapitel har vist at der er en relativt dårlig overensstemmelse mellem både simplificerede og detaljerede beregninger og så det målte energiforbrug til opvarmning. Den simplificerede beregning og den detaljerede beregning af husets opvarmningsbehov undervurderer hhv. i størrelsesordenen 10 % og 20 % i forhold til målinger. I Tabel 9 er resultaterne sammenfattet.

Tabel 9: Opvarmningsbehov - beregnet og målt.

	Opvarmningsbehov [kWh]		
	Simpel beregning	BSIM	Målt
Total	333	305	370

Den forholdsvis store forskel mellem det målte og beregnede energiforbrug til opvarmning, kan skyldes flere parameters indflydelse. Men det er dog sandsynligt, at forskellen blot kan tilskrives, at der er regnet med lidt for høje udetemperaturer og lidt for lave indetemperaturer.

Ved de meteorologiske målestationer i Mejrup og Thyborøn, der ligger tæt på Lemvig, er der i måleperioden målt middeltemperaturer på hhv. 4,2 °C og 3,7 °C, hvilket er lidt mindre end de 4,6 °C, der er anvendt i beregningerne. Hvis det antages at udetemperaturen i stedet for de 4,6 °C, har været 4,0 °C, som er middeltemperaturen af målingerne i Mejrup og Thyborøn (alle timeværdier i vejrdata-filen reduceres med 0,6 °C), kan der med BSIM beregnes et energiforbrug til opvarmning på 341 kWh. Energiforbruget forøges altså som følge af den lavere udetemperatur fra 305 til 341 kWh, svarende til 12 %.

Som nævnt tidligere, er der en vis usikkerhed forbundet med indetemperaturmålingerne. På baggrund af bl.a. målinger af temperaturen ved indløbet til ventilationsanlæggets varmeveksler, er det ikke usandsynligt at den gennemsnitlige indetemperatur kan have været f.eks. 0,5 °C højere, dvs. 21,7 °C frem for de 21,2 °C. Med en indetemperatur på 21,7 °C, kan beregnes et energiforbrug til opvarmning på 350 kWh, svarende til en forøgelse på ca. 15 %. Det ses at opvarmningsbehovet er

betydeligt følsomt overfor blot små ændringer i randbetingelserne, hvilket er typisk for meget velisolerede huse.

Samlet set vil en 0,6 °C lavere udetemperatur kombineret med en 0,5 °C højere indetemperatur resulterer i et beregnet energiforbrug til opvarmning på 380 kWh (396 kWh ved den simple metode), og der er derved stort set overensstemmelse mellem det målte og de beregnede forbrug.

Årsagen til de forskelle der forekommer i de målte og beregnede resultater kan muligvis skyldes at der som opvarmning anvendes gulvvarme. I de målte resultater vil dette ikke spille nogen rolle, idet energiforbruget til opvarmning måles direkte ud fra den leverede fjernvarmeenergi. I de to beregningsmodeller, den simple og den detaljerede, er det dog vanskeligt at tage højde for at der anvendes gulvvarme som opvarmning. I "Numerical Investigation of Floor Heating Systems in Low Energy Houses" [7] er problemstillingen vedrørende dette behandlet, og det konkluderes at man, selv med en god styring af gulvvarmesystemet, vil kunne forvente et opvarmningsbehov som ligger 10 % højere end hvad der ville være tilfældet med et ideelt opvarmningssystem (svarende til det som "benyttes" i den simple beregningsmodel).

Med den generelle usikkerhed taget i betragtning, især ved så lave opvarmningsbehov, som der her er tale om, må det konkluderes at husets varmetekniske ydeevne er som forventet.

Opvarmningsbehovet for den betragtede måleperiode er altså stort set som forventet. Men hvis man tager udgangspunkt i en Bsim-model som afspejler målingerne i forbindelse med en beregning af det forventede opvarmningsbehov på årsbasis vil man få en for høj værdi. Følgende forhold, som er anvendt i Bsim-modellen, som sammenlignes med målingerne, bør derfor vurderes nøje inden der foretages en vurdering af husets årlige opvarmningsbehov:

- I den betragtede måleperiode (marts måned) har indetemperaturen været 21,2 °C i gennemsnit (eller måske lidt højere), hvor man normalt vil vurdere et forventet opvarmningsbehov for et hus ved en indetemperatur på 20 °C (selvom komforttemperaturen i opholdsrum typisk er 21 °C !). Den "høje" temperatur skyldes især et betydeligt varmetilskud i form af solstråling (60 % mere end normalt). I forbindelse med beregningen af det årlige opvarmningsbehov for huset anvendes sidstnævnte temperatur i Bsim-modellen.
- Gulvvarmeslangernes gennemsnitlige temperatur har været ca. 31 °C, hvilket omtrent svarer til den temperatur der er nødvendig til at opretholde 20 °C i det kritiske rum ved den dimensionerende udetemperatur (-12 °C). Udetemperaturen er væsentligt højere det meste af fyringssæsonen, og derfor bør der i årssimuleringen regnes med en middeltemperatur af gulvvarmeslangerne der er lavere end de 31 °C. Der foretages en lille korrektion, idet der anvendes den oprindelige antagelse om en gennemsnitlig temperatur på 30 °C.
- Varmegenvindingsenheden har levet op til forventningerne, idet temperaturvirkningsgraden har været 91 % i måleperioden. Anlægget har i perioden kørt balanceret (omtrent samme luftmængde i udsugning og indblæsning) med en volumenstrøm på 165 m^3/h (0,58 h^{-1}), hvilket er lidt mindre end bygningsreglementets krav til mekanisk ventilation (for det aktuelle hus svarende til 216 m^3/h), der er anvendt i den oprindelige årssimulering, men som er et meget normalt niveau i enfamilieshuse. I beregningen af det årlige opvarmningsbehov anvendes en luftmængde svarende til de 165 m^3/h.
- Tidligere i rapporten er det skønnet at det årlige gennemsnitlige luftskifte relateret til utætheder i klimaskærmen er ca. 0,15 h^{-1}, hvor der oprindeligt var antaget 0,10 h^{-1}. Der anvendes derfor et luftskifte ved infiltration på 0,15 h^{-1}.
- Det interne varmetilskud fra personer, apparatur og belysning er for måleperioden fastsat til 3,7 W/m^2, baseret bl.a. på aflæst elforbrug på 12 kWh/døgn. Det gennemsnitlige elforbrug siden hu-

set blev beboet i slutningen af år 2001, har ligget stabilt omkring 12 kWh/dag svarende til lidt over 4000 kWh/år. På denne baggrund benyttes de 3,7 W/m^2 i beregningen af husets årlige opvarmningsbehov. Dette er noget mindre end de typiske 5 W/m^2, der er anvendt i den oprindelige årssimulering.

Hvis man ændrer disse forhold i BSIM-modellen, som tidligere er sammenlignet med målingerne, og herefter gennemfører en årssimulering på baggrund af typiske vejrdata, får man energibalancen vist i Tabel 10. Til sammenligning er den oprindeligt forventede energibalance opstillet (beregnet i den første rapport fra projektet).

Tabel 10: Beregnet energibalance for hele året [DRY].

Energibalance		Oprindelig model [kWh]	Revideret model [kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	3747	4311
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-867	-1292
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	-150	-127
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	1779	1779
$Q_{udst/pers}$	Varme tilført fra udstyr og personer	4037	3737*
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-7905	-7888
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	-27	-10
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-669	-511

* inkl. varmetab/-tilskud fra uisolerede varmerør mm. i bryggers.

Det forventede opvarmningsbehov for huset er altså ca. 4300 kWh/år, hvilket svarer til ca. 38 % af den nugældende energiramme.

3.4 Målinger af årligt varmeforbrug

I Tabel 11 er angivet aflæsninger af den energimåler der siden slutningen af oktober måned 2002 har målt på den afsatte varme i gulvvarmeanlægget.

Tabel 11: Aflæst energiforbrug til rumopvarmning for huset.

Dato [-]	Akkumuleret forbrug [kWh]
24.10.02	0
02.12.02	729
24.12.02	1359
21.01.03	2232
04.03.03	3414
26.04.03	3987

Det ses at der er målinger for næsten hele fyringssæsonen 2002/2003. I perioden fra d. 24.10.02 til d. 26.04.03 er målt et varmeforbrug på 3987 kWh. En simulering med den reviderede model for ovennævnte periode, giver et forventet varmeforbrug på 4139 kWh. Det målte forbrug er altså lidt mindre end forventet, og kan hænge sammen med forskelle mellem de forudsatte og de faktiske forhold. De faktiske udeklimaforhold i form af gennemsnitstemperaturen har stort set været som i simuleringerne, idet der på den nærliggende DMI målestation Mejrup er målt 2,3 °C, mens referenceårets middeltemperatur for perioden er 2,1 °C. Antallet af soltimer målt i København har været 20

til 60 % større end normalt i februar, marts og april, mens antallet af soltimer i november, december og januar var 20 til 50 % mindre end normalt. Samlet set må solindfaldet antages at have været ”normalt” i perioden. Det kan herefter konkluderes at der en god overensstemmelse mellem beregninger og målinger.

4 KONKLUSION

Denne rapport har beskrevet en række detaljerede målinger af et hus, som forventes at have et opvarmningsbehov, der svarer til ca. 40 % af den gældende energiramme. I den første rapport er gennemgået de detaljerede beregninger som ligger til grund for disse forventninger.

Overordnet kan konkluderes at målingerne ikke har vist nogle væsentlige uoverensstemmelser i forhold til det oprindeligt forventede. Forskellen mellem beregninger og målinger er lille, når alle usikkerheder omkring materialedata etc. tages i betragtning.

Husets lufttæthed er også af stor betydning for opvarmningsbehovet, specielt, naturligvis, når der som her anvendes varmegenvinding på ventilationsluften. Oprindeligt var det forventet at der kunne opnås en lufttæthed af huset svarende til en infiltration på 0,10 h^{-1} eller mindre, idet man i tidligere projekter omhandlende lavenergihuse har opnået dette niveau. Der er ikke foretaget målingerne på det konkrete hus, men målinger på andre lavenergihuse har indikeret at infiltrationen i huset må forventes at være lidt større, svarende til ca. 0,15 h^{-1}. Dette medfører et højere opvarmningsbehov i forhold til det forventede.

Temperaturen i gulvvarmeslangerne har også en stor betydning for husets opvarmningsbehov, og det har vist sig at denne har ligget på et niveau som forventet. Den gennemsnitlige temperatur i gulvvarmeslangerne i den betragtede periode var ca. 31 °C. Det forventedes at temperaturen i hvert tilfælde kunne holdes under 30 °C. Dette medfører en lille forøgelse af transmissionstabet gennem terrændækket og en forøgelse af transmissionstabet gennem kuldebroen ved fundamentet.

4.1 Beregningsmodel vs. målinger

Når de uoverensstemmelser der er mellem den oprindelige teoretiske udformning af huset konstruktioner og systemer og de faktiske målte forhold justeres, viser beregninger og målinger en generelt god overensstemmelse. På baggrund af simplificerede beregninger fastlægges husets opvarmningsbehov for perioden 6. Marts 2003 til 1. April 2003 til ca. 303 kWh. Det målte opvarmningsbehov for denne periode er 370 kWh. Hvis man foretager en mere detaljeret beregning vha. simuleringsprogrammet BSIM 2000, får man et forventet opvarmningsbehov på 290 kWh. De beregnede opvarmningsbehov er altså ca. 20 % mindre end det målte, hvilket kan skyldes flere forhold, men kan umiddelbart forklares ved måleunøjagtigheder vedr. inde- og udetemperaturer. Beregninger har vist at opvarmningsbehovet er meget følsomt overfor små ændringer i disse randbetingelserne, hvilket er typisk for lavenergihuse.

Alt i alt må det konkluderes at BSIM-modellen giver en fornuftig vurdering af husets opvarmningsbehov under givne randbetingelser, og at de detaljerede kuldebro beregninger skaber realistiske inddata til simuleringsprogrammerne.

4.2 Opvarmningsbehov for fyringssæson

Oprindeligt forventedes det at opvarmningsbehovet for fyringssæsonen skulle være ca. 3747 kWh, og hvis man gennemfører simuleringen af opvarmningsbehovet for fyringssæsonen efter ændringerne på baggrund af målingerne får man 4311 kWh, hvilket svarer til ca. 38 % af den nu gældende energiramme. Huset kan altså forventes kun at bruge lidt mere energi end oprindeligt forventet, og den primære grund hertil er et lidt større ventilationstab og lidt mindre internt varmetilskud.

Projektets oprindelige formål var at huset skulle opfylde kommende skærpede energikrav i BR2005, svarende til et opvarmningsbehov reduceret til ca. 67 % af den nugældende energiramme (dvs. 7556 kWh), og dette mål er altså til fulde opfyldt.

Målinger af varmeforbruget til rumopvarmning i perioden ultimo oktober 2002 til ultimo april 2003 (ca. 80 % af fyringssæsonen) viser at dette stort set svarer til det forventede (simulerede) forbrug, idet der er taget højde for forskelle i randbetingelser mm.

Det lave opvarmningsbehov på ca. 40 % af energirammen i BR95, er opnået for en beskeden merinvestering i byggefasen, svarende til ca. 6 %, jf. rapporten [2]. Beregninger i denne rapport viser at totaløkonomien for forsøgshuset, beregnet over 30 år og med økonomiske forhold som i dag, er omtrent den samme, som for et typisk hus med naturlig ventilation. En udvikling i retning af stigende energipriser vil naturligvis forbedre totaløkonomien i forsøgshuset.

5 REFERENCER

[1] Bygningsreglementet for småhuse 1998 (BR-S 98). By- og boligministeriet 1998.

[2] Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 1: Konstruktioner/systemer. Rose, J. & Tommerup, H. Rapport BYG.DTU R-040, BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 2003.

[3] Energi 2000. Handlingsplan for en bæredygtig udvikling. Energiministeriet, april 1990.

[4] Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Kompendium 1. Grundlæggende energimæssige egenskaber. Nielsen, T. R. et al. 2001. Undervisningsnotat BYG.DTU U-001, BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 2001.

[5] SBI-Anvisning 184. 1995.
Bygningers energibehov.Varmeisolering, Konstruktionseksempler, Ventilation, Belysning. Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), Danmark. 1995.

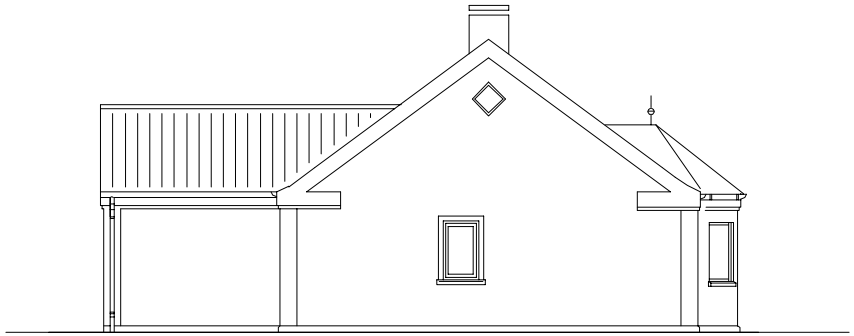
[6] BSIM2000: Et integreret EDB-værktøj til termisk analyse af bygninger og installationer (afløseren for Tsbi3). Statens Byggeforskningsinstitut, 2002.

[7] Numerical investigation of floor heating systems in low energy houses. Kragh, J., Weitzmann, P. and Jensen, C. F. 2002. Building Physics in the Nordic Countries, Proceedings of the 6th symposium, Oslo, Norway.

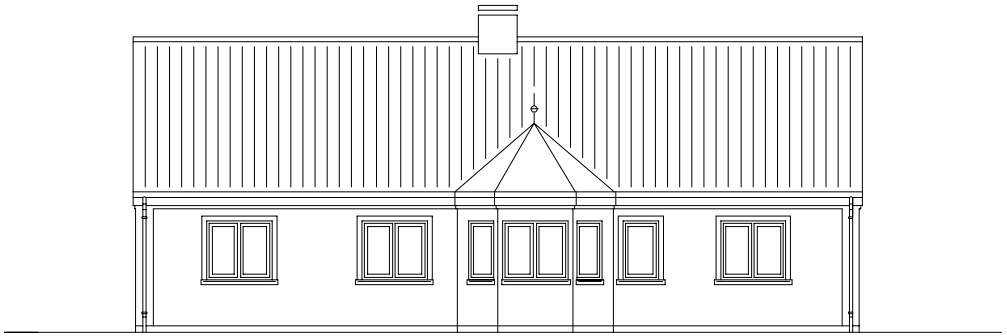
BILAG

På de efterfølgende sider er der vist tegninger af forsøgshuset i sin endelige udformning i form af facader, situationsplan, grundplan, tværsnit mv. Tegningerne er generelt ikke målfaste og det er ikke intentionen at tekst på tegningerne skal kunne læses.

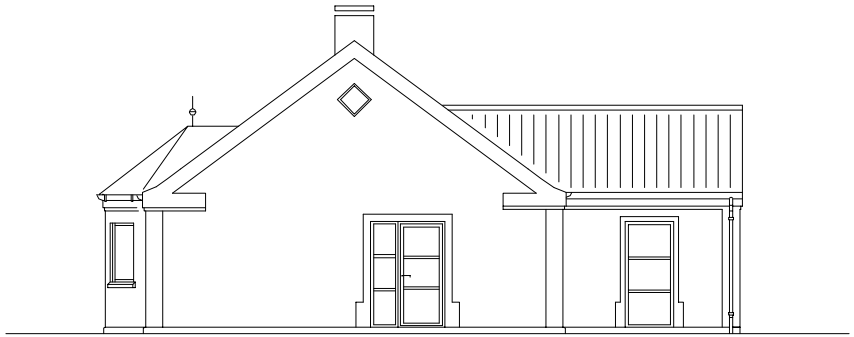
Bilag 1: Facader



GAVL MOD ØST



FACADE MOD NORD

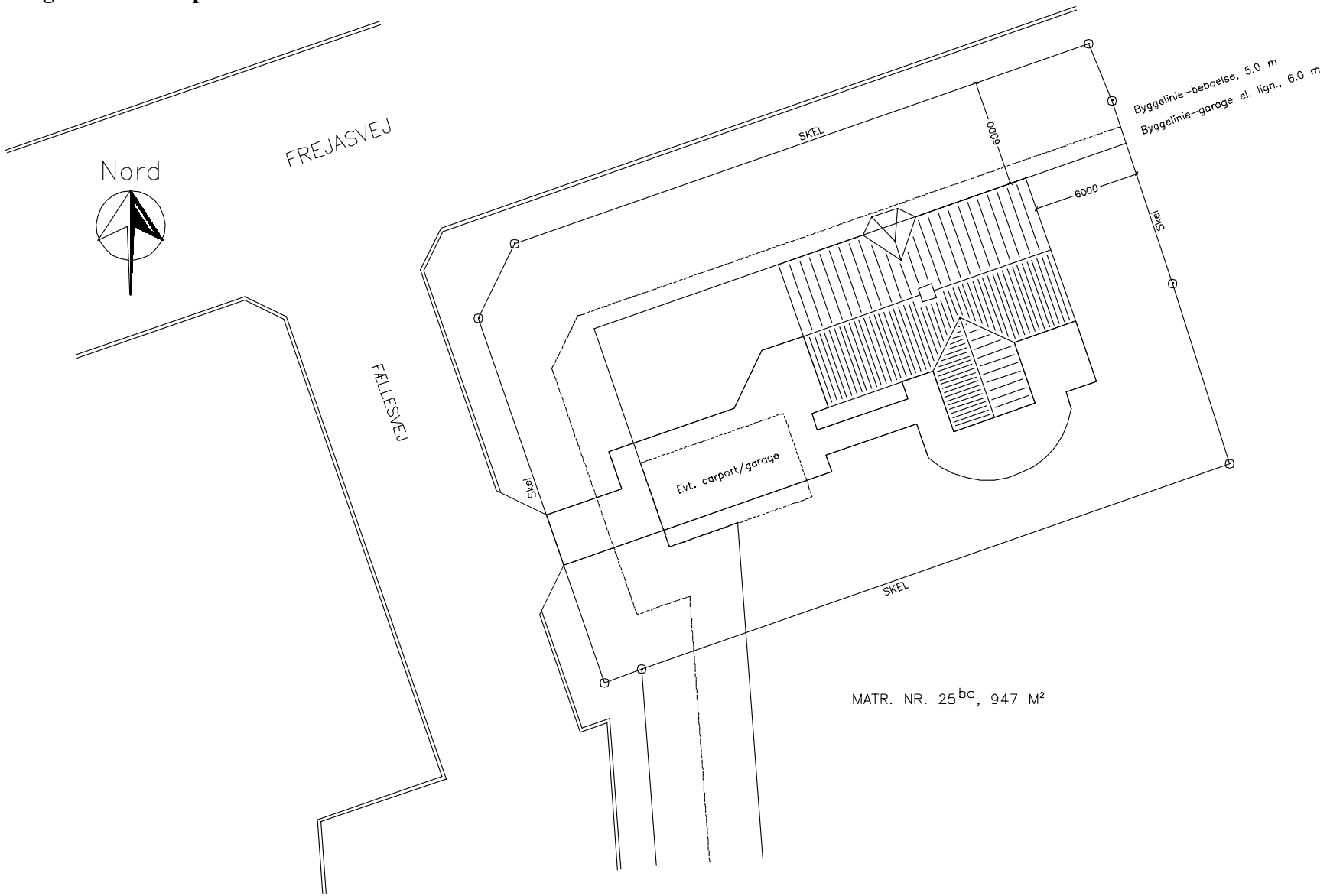


GAVL MOD VEST

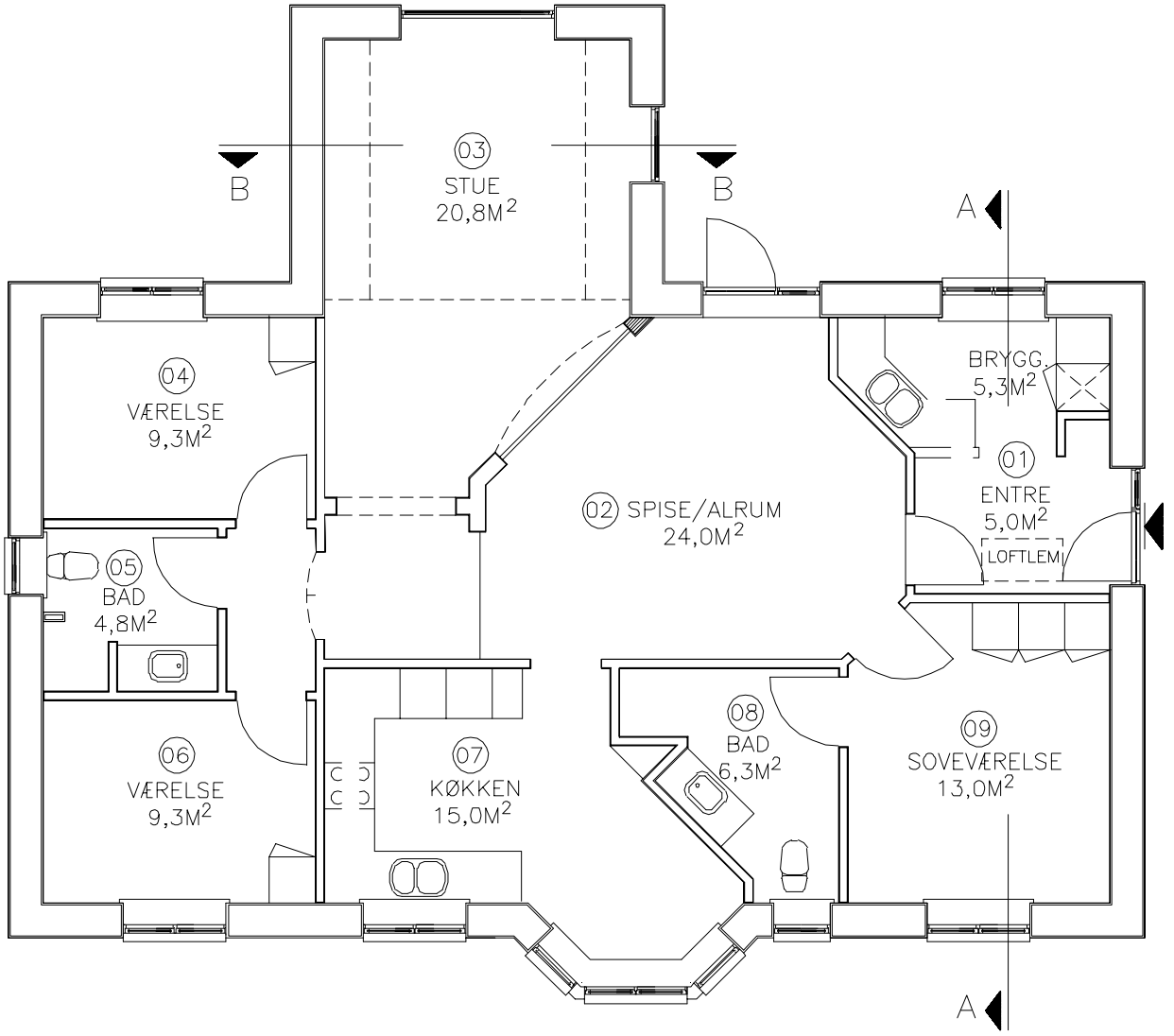


FACADE MOD SYD

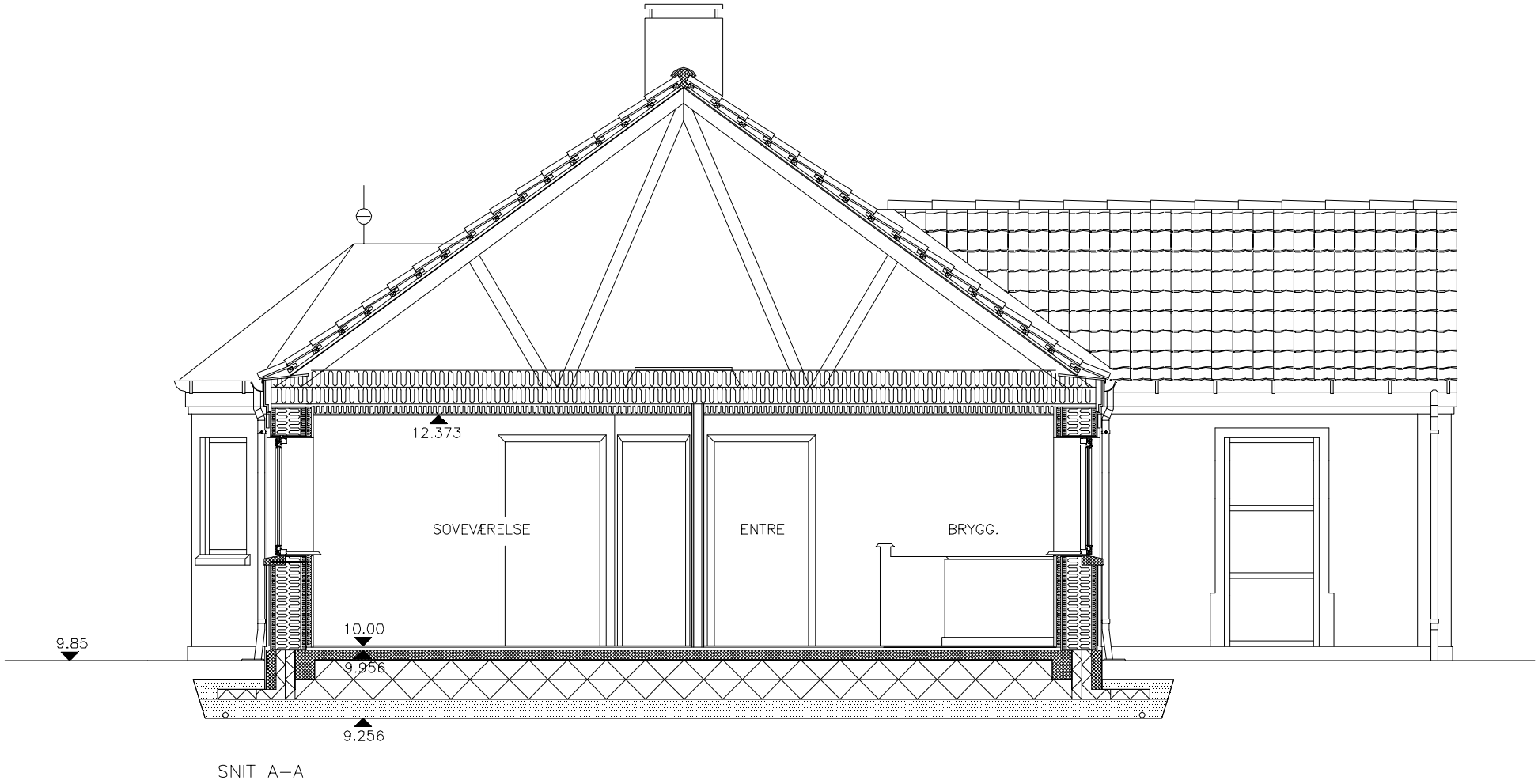
Bilag 2: Situationsplan



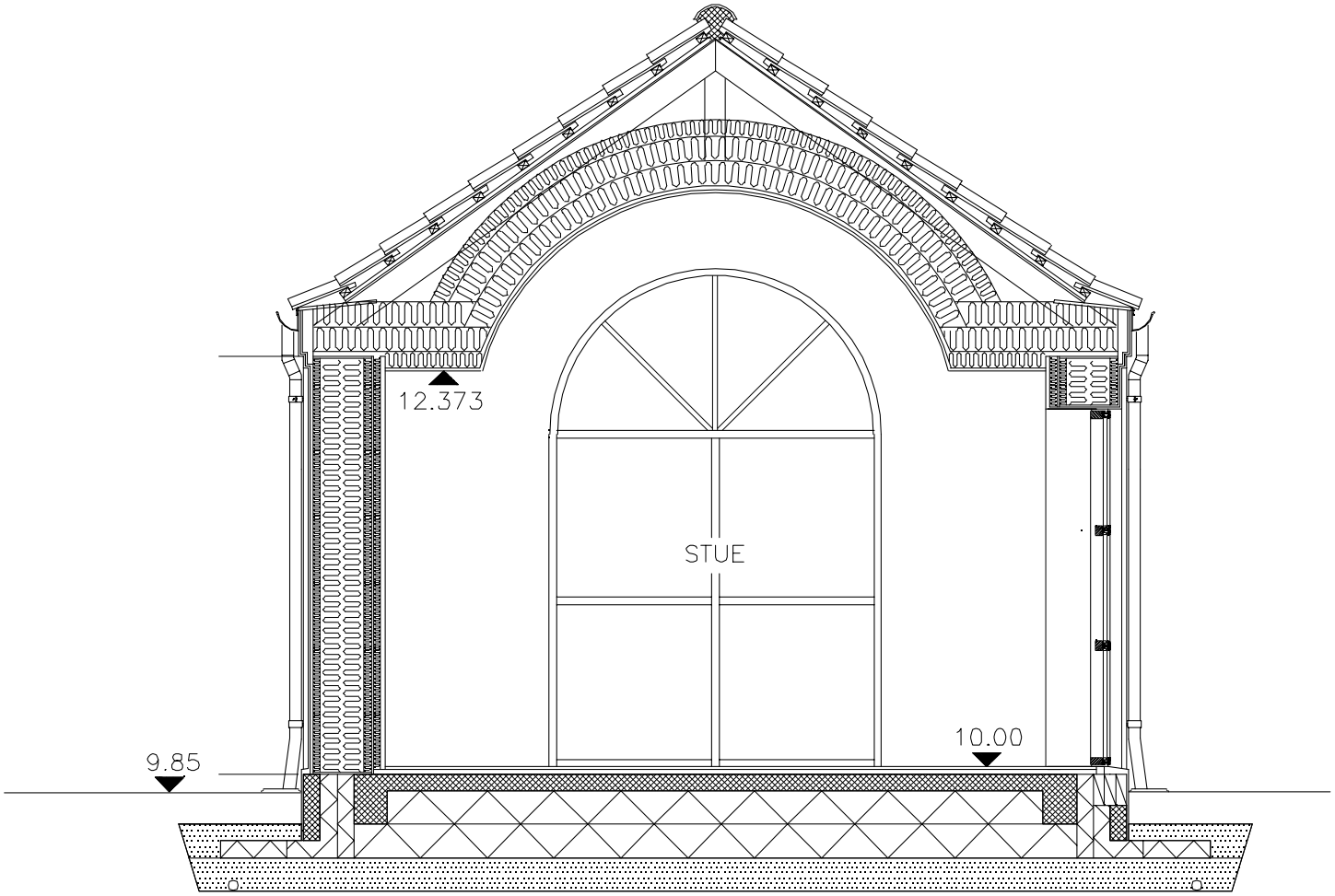
Bilag 3: Grundplan



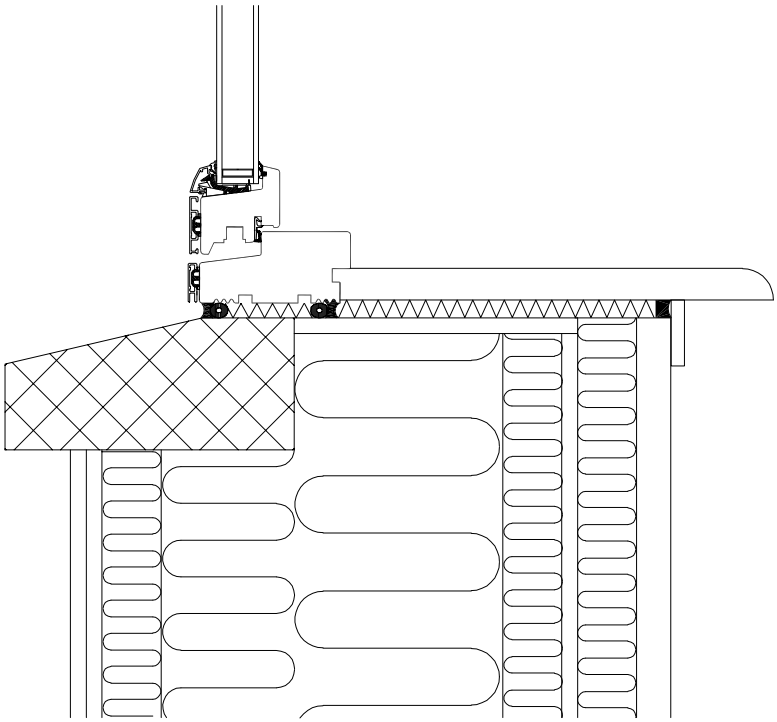
Bilag 4: Tværsnit



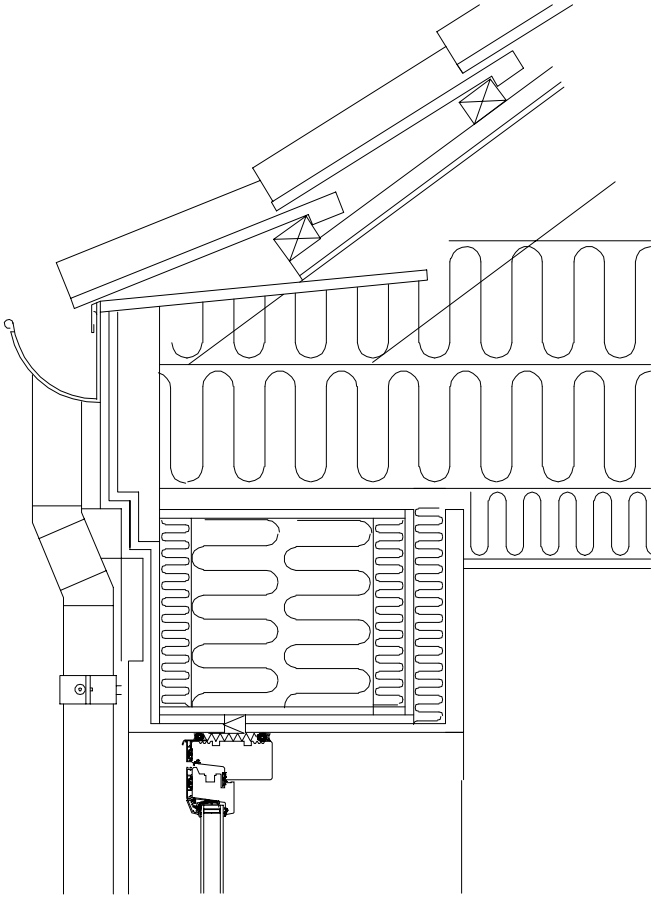
SNIT A–A



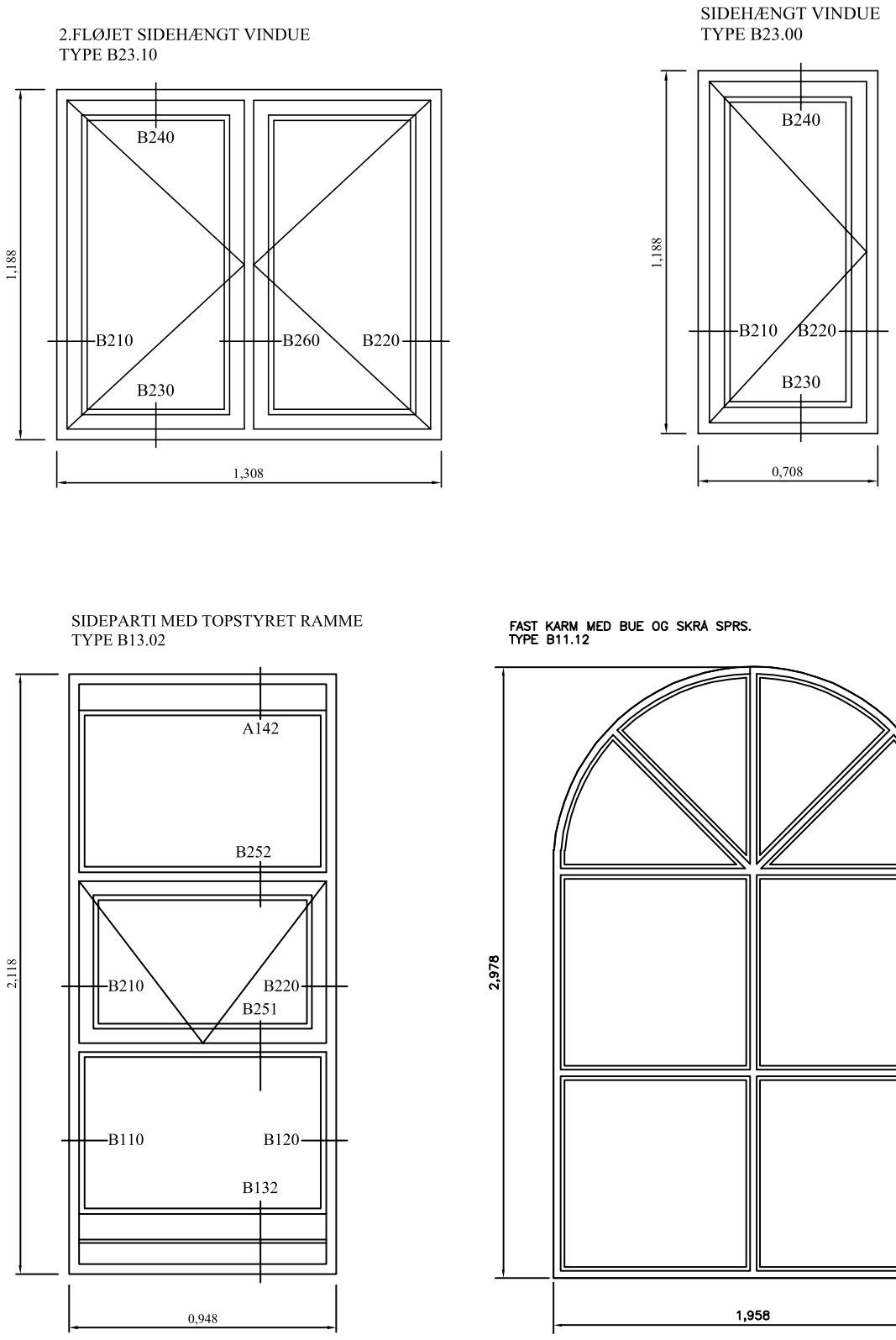
SNIT B–B



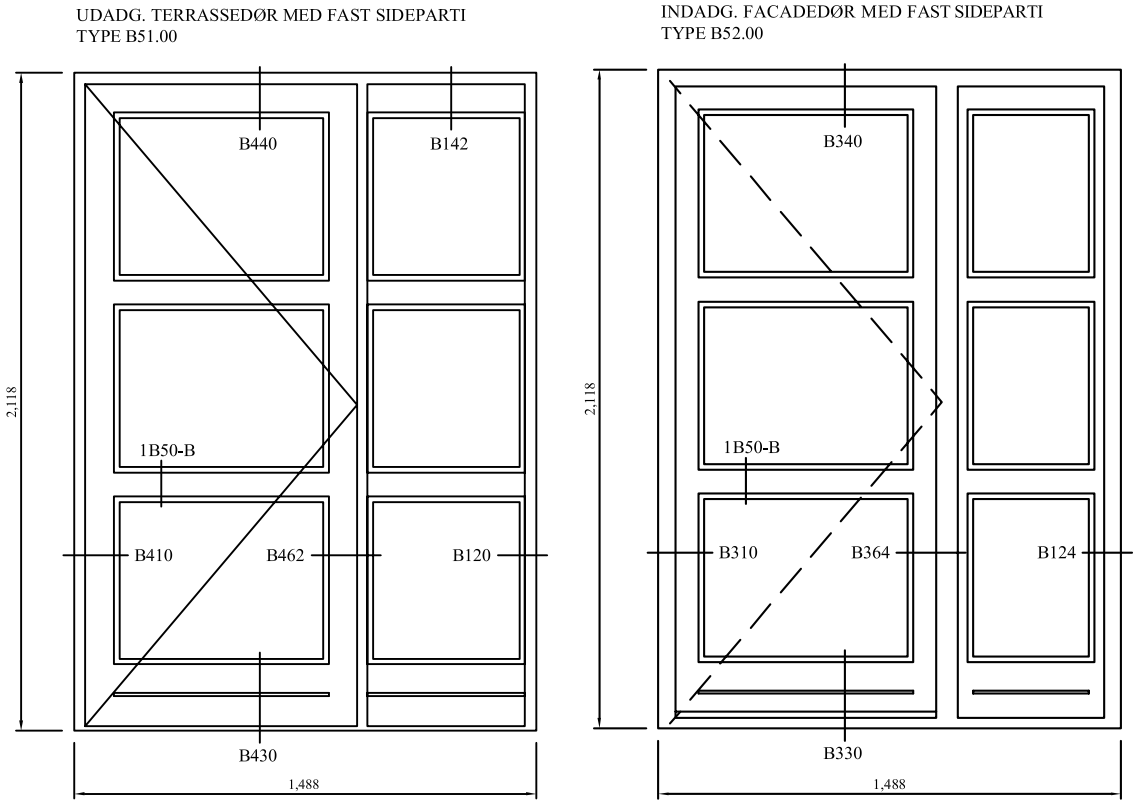
Bilag 5: Snit i underfals



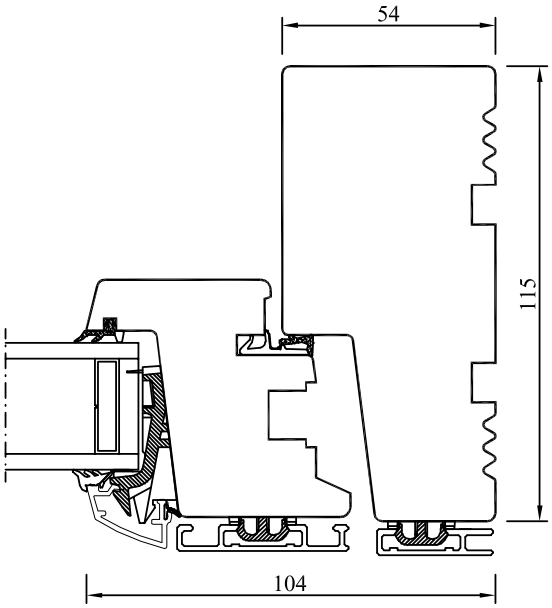
Bilag 6: Tagfodsdetalje



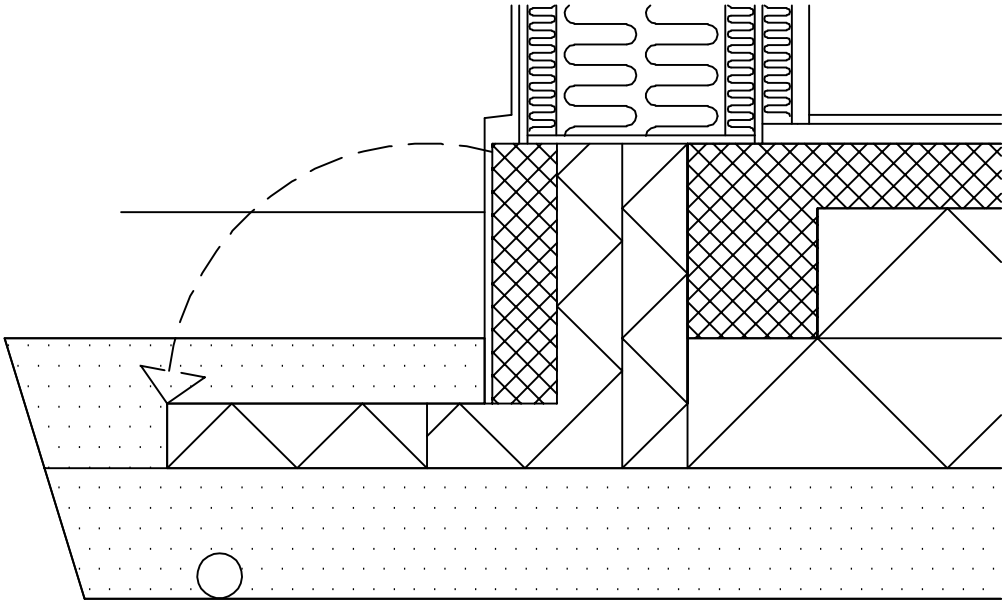
Bilag 7: Vindues- og dørtyper



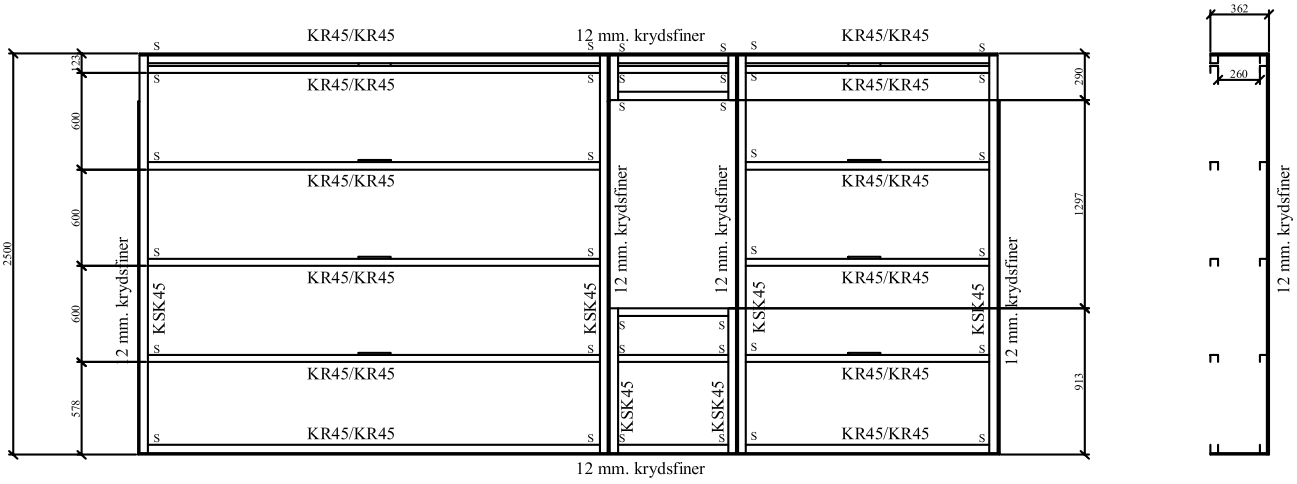
Bilag 7: Vindues- og dørtyper



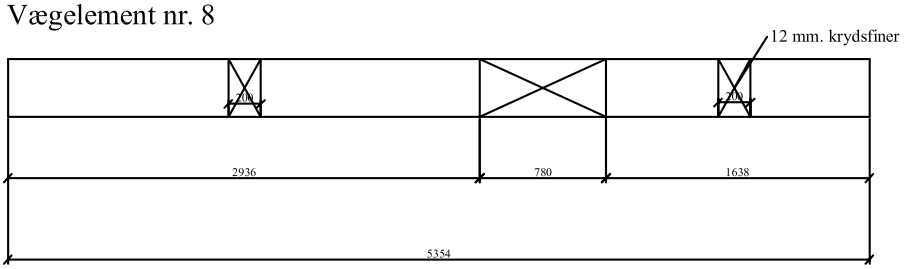
Bilag 8: Typisk snit i ramme-karm: sidekarm i oplukkelige vinduer



Bilag 9: Fundamentsdetalje



Vægelement nr. 8



Bilag 10: Typisk vægelement