

Henrik Tommerup
Jørgen Rose

Forsøgshus med nye typer
klimaskærmskonstruktioner
Del 2: Måling af opvarmningsbehov

Byggesystem: Skalmurede
porebetonelementer

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET



Rapport
BYG•DTU R-060
2003
ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-122-6

Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner

Del 2: Målinger af opvarmningsbehov

Byggesystem: Skalmurede
porebetonelementer

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 skalmurede porebetonelementer. Huset har et forventet energiforbrug til rumopvarmning på ca. 50 % af den nugældende energiramme, som er 280 MJ/m²/år, jf. Bygningsreglement for Småhuse [1]. I rapporten "Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner, Del 1: Konstruktioner og systemer, Byggesystem: Skalmurede porebetonelementer" [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 24/1-2003 til 10/2-2003.

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 Lind & Risør A/S, som har samarbejdet med BYG•DTU om udviklings- og optimeringsmæssige aspekter. Fra Lind & Risør har deltaget Tegnestuechef Hans Steffensen og kvalitetschef Jan Hansen, og fra BYG•DTU har deltaget Professor Svend Svendsen, Forskningsadjunkt Jørgen Rose og Forskningsadjunkt Henrik Tommerup.

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 Snekkersten.

Projektets ene formål er at demonstrere, at det er muligt at bygge typiske enfamiliehuse 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. Der er ligeledes foretaget en måling af husets luftskifte.

Målingerne er foretaget for en periode på 18 døgn, fra d. 24/1 2003 til den 10/2 2003. I denne periode har huset brugt 867 kWh til opvarmning (gulvvarme). Huset har været ubeboet og forbrug af varmt vand kan derfor kun henføres til varmetab fra varmtvandsbeholder. Der er tilført 70 kWh fra solindfald og middel inde- og udetemperaturen har været hhv. 20,1 °C og -0,3 °C. Varmevekslerens temperaturvirkningsgrad har gennemsnitligt været 82 %. Husets infiltrationstab er bestemt vha. en sporgasmåling til 0,11 h⁻¹. Det årlige gennemsnitlige infiltrationstab kan forventes at være det samme.

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 særdeles god overensstemmelse mellem det beregnede (forventede) og målte energiforbrug, svarende til få procents afvigelse.

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. 51 % af den nu gældende energiramme.

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

SUMMARY

*Report R-060: Experimental building with new types of building envelope structures.
Part 2: Measurements of heating demand.*

Building system: Aerated light-weight concrete elements incorporating a facing wall.

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 Snekkersten.

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. In addition a measurement of the air change rate was performed. Measurements were performed for a period of 18 days, from January 24th 2003 to February 10th 2003. During this period the single-family house used 867 kWh for heating. The house was not occupied and therefore use of hot water is due to heat loss from the hot-water tank. 70 kWh were gained from solar radiation, and the mean inside and outside temperatures were 20.1 °C and –0.3 °C respectively. The temperature efficiency of the heat recovery unit was 82 %. The infiltration heat loss was measured to 0.11 h⁻¹ and the mean yearly infiltration heat loss can be expected to be the same.

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 (a deviation of only a few percent).

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 51 % 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 LUFTSKIFTEMÅLINGER	11
2.2 UDETEMPERATUR	18
2.3 SOLINDFALD	19
2.4 INDETEMPERATUR	22
2.5 EFFEKTIVITET AF VARMEVEKSLER, FROSTSIKRING MM.	23
2.6 ENERGIFORBRUG	27
2.7 SAMMENFATNING AF RESULTATER	27
3 SAMMENLIGNING BEREGNINGER/MÅLINGER	28
3.1 MÅLINGER SAMMENLIGNET MED SIMPLIFICEREDE BEREGNINGER	28
3.2 MÅLINGER SAMMENLIGNET MED DETALJEREDE BEREGNINGER	31
3.3 SAMMENFATNING OG DISKUSSION AF RESULTATER	33
3.4 MÅLINGER AF ÅRLIGT VARMEFORBRUG	35
4 KONKLUSION	37
4.1 BEREGNINGSMODEL VS. MÅLINGER	37
4.2 OPVARMNINGSBEHOV FOR FYRINGSSÆSON	37
5 REFERENCER	39
BILAG	41

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 og underbygge deres beregnede ydeevne 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 skærpselser 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. Herudover er der foretaget en måling af luftskiftet for huset, for at fastlægge hvor stor en infiltration der forekommer i huset. Sidstnævnte måling er vigtig for at opnå det bedst mulige sammenligningsgrundlag mellem simuleringer og målinger.

Der er målt data for i alt 18 døgn. Måleperioden er påbegyndt d. 24. januar 2003 og afsluttet d. 10. februar 2003. Årsagen til at der ikke er opsamlet en større datamængde er, at der har været problemer med at få måleudstyret i form af et målesystem til fjernaflæsning til at fungere. Målinger vil dog blive fortsat efterfølgende, og hvis der kan skaffes finansiering vil de data som fremkommer blive dokumenteret i en senere rapport.

2.1 Luftskiftemålinger

Der redegøres i dette afsnit for de målinger der er foretaget med henblik på at bestemme af husets lufttæthed.

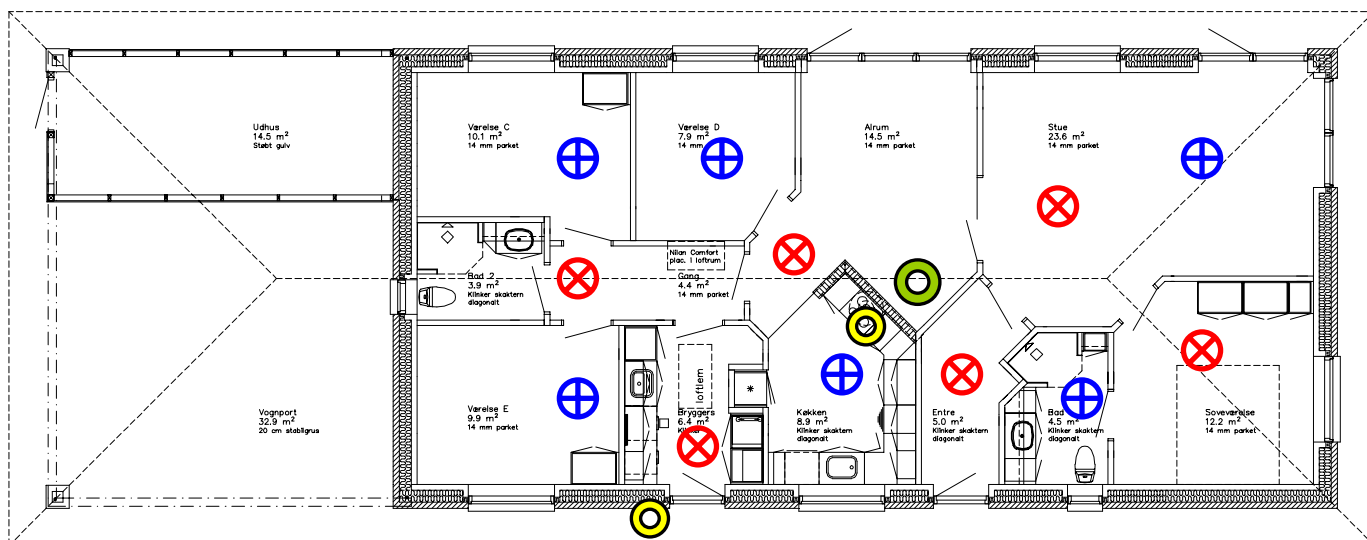
2.1.1 Sporgasmåling

Luftskiftet for huset, forstået som luftskiftet pga. utætheder i klimaskærmen, bestemmes på baggrund af den Europæiske standard ISO/FDIS 12569:2000 [4]. Der benyttes ”fald i koncentration”-metoden. Følgende data er benyttet i forbindelse med målingerne af husets luftskifte.

Måleobjekt:	Enfamiliehus
Byggeår:	2002
Adresse:	Snekkersten
Bruttoetageareal:	135 m ²
Etagehøjde:	2,37 m
Opvarmet volumen:	263 m ³
Test beskrivelse:	Måling af luftskifte (infiltration)
Test metode:	Sporgas, ”fald i koncentration”
Gas analyse apparat:	Gas kromatograf
Gastype:	Arcton 22 (Flouorcarbon 22)
Reference til standard:	ISO/FDIS 12569 : 2000
Testdato:	09.01.2003
Indetemperatur:	20 °C
Udetemperatur:	-3 °C
Vindstyrke:	Beaufort skalaen nr. 2, let vind

Apparaturet inkluderede et Bruel & Kjør type 1302 gas-analyseapparat, en Bruel & Kjør type 7620 proces controller – computer med software, og en Bruel & Kjør type 1303 automatisk gas-sampler med netværk. Fordelingen af gassen blev foretaget manuelt og der anvendtes ét plasticrør i polytetrafluorethylen PTFE med en 4 mm diameter til opsamling af rumluft. Placeringen af måleudstyr samt målepunkter fremgår af Figur 1. Opsamlingsrørene blev beskyttet mod luftbårne partikler (støv) med eksterne filtre. Måleområdet for den pågældende gasart for gas-

analyseapparatet er mellem 0.03 mg/m^3 og 300 mg/m^3 , og usikkerheden af koncentrationsmålingerne ved 1 ppm er ca. 3% af den målte værdi.



Figur 1: Placering af måleudstyr og målepunkter.

- | | | | |
|--|---|--|------------------------|
| | Emhætte og tørretumbler afkast forseglet. | | Placering af apparatur |
| | Opsamling af rumluft | | Dosering af sporgas |

Hoveddøre, vinduer og loftslem blev holdt lukket mens indvendige døre holdtes åbne under målingerne. Indblæsnings- og udsugningsventiler for ventilationsanlægget samt udsugningen over komfuret blev forseglet vha. plastic. Opsamlingsrør blev placeret på udvalgte steder 170 cm over gulvet. Gassen blev doseret manuelt, og fordelt jævnt vha. små ventilatorer (15W). Efter at have opnået en god ensartet koncentration, blev opsamlingspunkterne aflæst hvert ca. 6. minut, idet gasanalyseapparatets bruger ca. 1. minut på at bestemme sporgas-koncentrationen. Til sidst kunne luftskiftet bestemmes ud fra ændringen i gaskoncentrationen.

Luftskiftet for huset kan således bestemmes af ligningen:

$$n = \frac{\ln C(t_2) - \ln C(t_1)}{t_2 - t_1},$$

hvor:

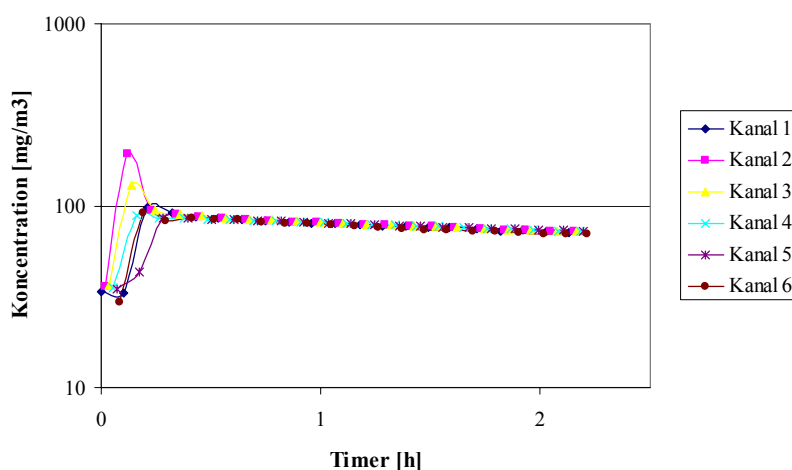
$C(t_1)$ er koncentrationen til tiden t_1 [mg/m^3 eller ppm]

$C(t_2)$ er koncentrationen til tiden t_2 [mg/m^3 eller ppm]

t_1 er tiden for påbegyndelse af målingen [h]

t_2 er tiden for afslutningen af målingen [h]

I Figur 2 er vist koncentrationskurven. Der er tilført sporgas af to omgange. Figuren viser koncentrationer fra umiddelbart før anden tilførsel.



Figur 2: Sporgaskoncentration i rumluften. Hældningen på kurven er et udtryk for luftskiftet.

Det ses af Figur 2 at der efter ca. $\frac{1}{2}$ time er etableret en god opblanding af rumluften, idet alle kanaler måler omtrentlig samme koncentration. Det gennemsnitlige luftskifte er efterfølgende blevet bestemt og fremgår af Tabel 1.

Tabel 1. Resultater af sporgasmålinger.

Test gennemført	Varighed af måling	Vindstyrke [Beaufort]	Udetemperatur [°C]	Indetemperatur [°C]	Gennemsnitligt luftskifte [h^{-1}]
09/01 2003	Ca. 90 min	2 (let vind)	-3	20	0,11

Det gennemsnitlige luftskifte for huset blev målt til $0,11 \text{ h}^{-1}$. På baggrund af aktuelle vind- og temperaturforhold kan konkluderes at huset har en god tæthed (mere herom senere i dette afsnit 2.1).

2.1.2 Trykprøvning

Der er blevet foretaget en trykprøvning af huset med henblik på bestemmelse af hvor huset er utæt og utæthedernes omfang. Den europæiske standard EN 13829:2000 [5] beskriver hvordan en trykprøvning skal foretages.

Det skal bemærkes at målingernes nøjagtighed afhænger af det anvendte udstyr og de aktuelle vejrforhold da prøvningen blev foretaget. Metoden måler ikke den naturlige luftinfiltration, som kan bestemmes ved sporgasmålinger.

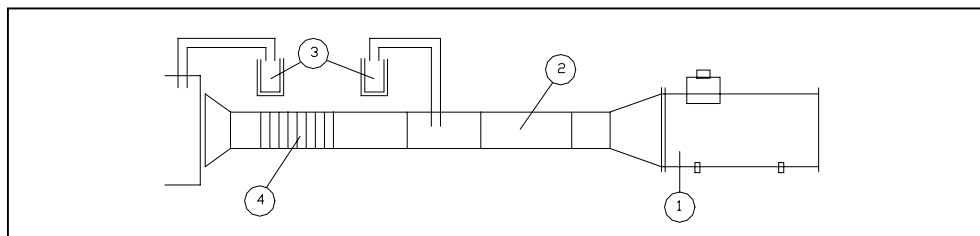
Fakta om de udførte målinger er anført nedenfor:

Måle objekt	Enfamiliehus
Opførelsesår	2002
Beliggenhed	Snekkersten
Bruttoetageareal	$A_F = 135 \text{ m}^2$
Rumhøjde	2,37 m
Opvarmet (effektivt) volumen	$V = 263 \text{ m}^3$
Areal af klimaskærm	$A_E = 328 \text{ m}^2$
Målebeskrivelse	Bestemmelse af lufttæthed
Målemetode	Fan pressurization method
Reference til standard	EN 13829: 2000
Forsøgsdato	09-01-2003
Indetemperatur	20 °C
Udetemperatur	-3 °C
Vindstyrke	Beaufort scale: 3 (jævn vind)

Måleudstyr og –procedure

Metodens overordnede princip er at måle hvilken luftmængde der skal fjernes/tilføres huset for at opnå en bestemt trykforskel over klimaskærmen. Vinduer og yderdøre blev holdt lukket og det mekaniske ventilationssystems udsugnings- og indblæsningsventiler var forseglet med plastfolie/tape under målingerne. Desuden var emhætten forseglet. I øvrige var alle indvendige døre åbne under målingerne, så den påtrykte trykforskel kunne fordeles over hele huset.

Trykforskellen over klimaskærmen blev etableret vha. en ventilator forbundet til klimaskærmen via plade med studs monteret i badeværelsesvindue. I nedenstående Figur 3 er måleopstillingen skitseret:



Figur 3. Måleopstilling: 1. Ventilator med variabel hastighed (Veab Lackagematare type 600). 2. Pitot-rør (målerør), diameter 100 mm. 3. Mikromanometre til måling af trykforskel mellem ude og inde samt luftmængde. 4. En flexslange til at forbinde målerør/ventilator med plade i vindue.

Samlinger mellem udstyret og klimaskærmen/vinduet blev naturligvis tætnet, så potentielle utætheder herfra ikke skulle influere på resultaterne. Den udvendige tryksslange var placeret i perforeret boks og derved beskyttet mod direkte vindpåvirkninger. Derefter kunne trykforskellen uden tændt ventilator bestemmes, dvs. den naturlige trykforskel, idet der er krav til at denne ”nul-flow trykforskel” ikke må overstige 5 Pa. Idet kravet var opfyldt, blev der efterfølgende foretaget to måleserier med hhv. over- og undertryk. For hver måleserie var det ønskeligt at få datapunkter mellem 10 Pa og 60 Pa (med et spring på højst 10 Pa), men da det kun var muligt at opnå en trykforskel på ca. 40 Pa blev væsentlige mindre spring anvendt.

Med maksimal trykforskel påført huset, blev husets samlinger mm. undersøgt for utætheder, idet potentielle luftstrømme blev forsøgt visualiseret med specielt røgudviklingsudstyr. Ydervægge og

vinduer/døre samt samlinger mellem bygningsdele blev undersøgt, det samme blev loftlem, halogenspots og stikkontakter. Termografering blev også anvendt til at spore potentielle utætheder, og desuden til generelt at påvise kuldebroer. Indvendig termografering er specielt velegnet når der påtrykkes undertryk, idet der derved vil være en kold luftstrøm ind i huset gennem utæthederne. Der er i afsnit 3.1 vist billeder af termograferingen.

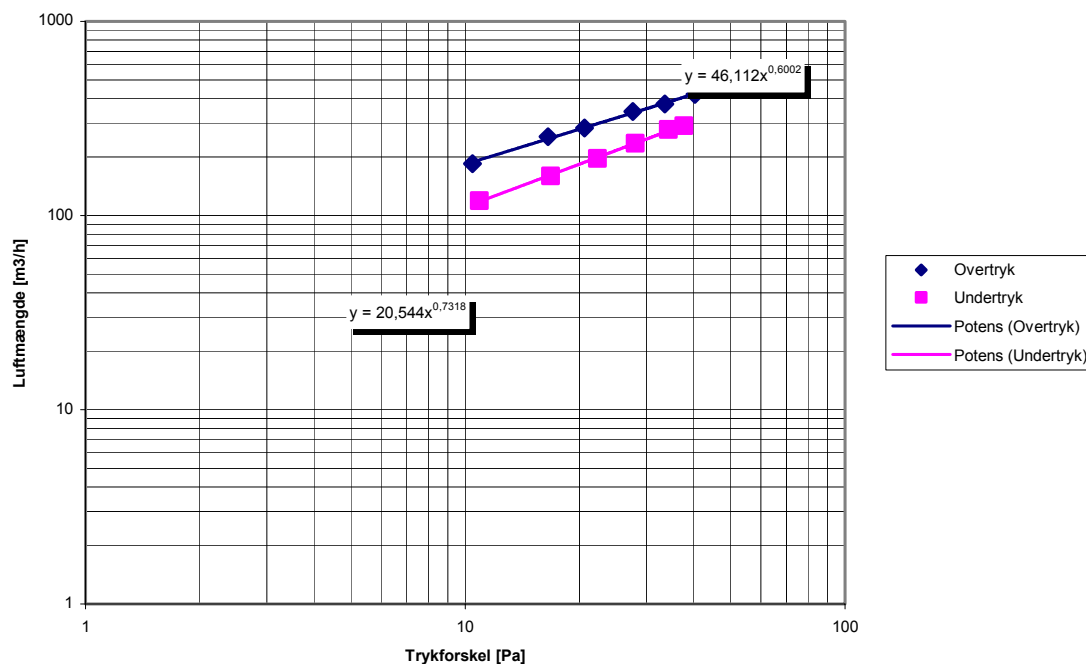
Databehandling

I nedenstående Tabel 2 præsenteres måledata. De målte luftmængder er blevet korrigeret for luftdensitet, og der konverteres til standardforhold (20 °C og $1,013 \times 10^5$ Pa). Formålet er at bestemme lufttæthedsgrafen for over- og undertryk og en middelværdi for luftskiftet ved referencetrykforskellen 50 Pa.

Tabel 2. Påførte trykforskel og samhørende luftmængder - med forseglet udsugnings- og indblæsningsventiler og emhætte.

Overtryk		Undertryk	
ΔP [Pa]	Luftmængde [m ³ /h]	ΔP [Pa]	Luftmængde [m ³ /h]
10,4	185	10,9	119
16,5	255	16,8	160
20,6	283	22,3	196
27,6	343	28,0	236
33,5	375	34,3	277
40,2	420	37,7	291

Ud fra disse data kan lufttæthedsgrafen for overtryk og undertryk optegnes (se Figur 4).



Figur 4. Lufttæthedsgraf for overtryk og undertryk.

Sammenhængen mellem luftmængde og trykforskel kan udtrykkes ved følgende formel

$$V_L = C_L \cdot (\Delta p)^n$$

Hvor

V_L [m^3/h] er volumenstrømmen gennem utæthederne i klimaskærmen

Δp [Pa] er trykdifferencen over klimaskærmen

n [-] er en strømningsekspONENT

C_L [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-n}$] er en strømningskoefficient

C_L og n bestemmes ved mindste kvadraters metode, se Tabel 3.

Tabel 3. Beregnede strømningskoefficienter/-eksponenter og luftmængde ved 50 Pa.

Koefficient	Overtryk	Undertryk
C_{env} [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-n}$]	46,112	20,544
n [-]	0,6002	0,7318
C_L [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-n}$]	46,112	20,989
V_{50} [m^3/h]	483	368

Resultater

Husets lufttæthed kan udtrykkes på forskellig måde. Nedenfor er luftmængden ved 50 Pa opgjort ift. indvendigt nettovolumen, klimaskærmens nettoareal og bruttoetagearealet.

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V}; \quad q_{50} = \frac{V_{50}}{A_E}; \quad w_{50} = \frac{V_{50}}{A_F}$$

Luftmængde	$V_{50} =$	425	m^3/h	Middelværdi
Luftskifte	$n_{50} =$	1,85	h^{-1}	Overtryk
	$n_{50} =$	1,41	h^{-1}	Undertryk
	$n_{50} =$	1,63	h^{-1}	Middelværdi
Permabilitet	$q_{50} =$	1,30	m/h	
Specifik tæthed	$w_{50} =$	3,16	m/h	

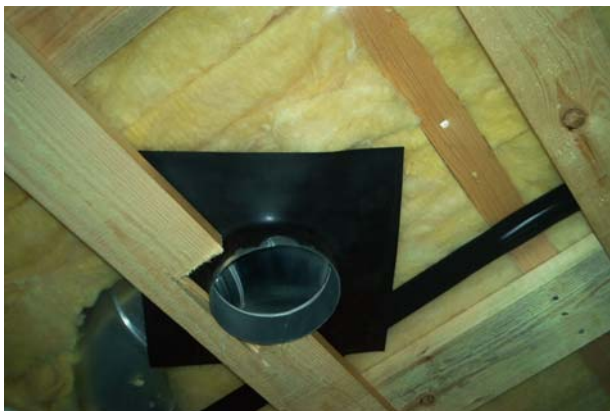
2.1.3 Konklusion og diskussion

Overordnet kan konkluderes, at klimaskærmen har en god tæthed. Baseret på målingerne er beregnet et luftskifte på ca. $1,6 \text{ h}^{-1}$ ved referencetrykforskellen 50 Pa. Erfaringer fra målinger på tilsvarende enfamiliehuse viser, at hvis der er særlig fokus på tætheden af klimaskærmen, er det muligt at opnå et luftskifte på ca. $1,5 \text{ h}^{-1}$ ved 50 Pa trykforskel. Til orientering er der i Tyskland særlige forskrifter (DIN norm 4108) for hvad luftskiftet må være, når der er tale om huse med mekanisk ventilation med varmegenvinding, idet luftskiftet ved 50 Pa trykforskel højst må være $1,5 \text{ h}^{-1}$ (ellers er kravet $3,0 \text{ h}^{-1}$). Et sådan krav er rimeligt, idet det er afgørende for sådanne systemers energieffektivitet at luftskiftet uden om anlægget reduceres til et minimum.

Anvendelse af røgudstyr og termografering kunne ikke påvise nogle betydelige og uventede utætheder. Halogen-spots og loftlem, som erfaringsmæssigt kan give problemer, viste ikke tydelige tegn på utætheder.

Der har i det aktuelle hus været særlig fokus på at sikre lufttætheden i loftet og samlingen mellem loft og bagvægge i ydermuren, hvilket utvivlsomt er en væsentlig årsag til den forholdsvis gode

opnåede lufttæthed. Der i den forbindelse sørget for at foretage en grundig tætning med tape af samlinger mellem plastfoliebanerne i loftet, og der er desuden udført en dobbelt forskalling for at give plads til udførelse af elinstallationer, og hvor ventilationskanaler gennembryder loftskonstruktionen er der udført en rørkrave af EPDM gummi (se Figur 5). Derudover er plastfolien ved bagvægge ført via rem til bagkant, hvor den er tætnet med liste og gummifuge (se bilag 7).



Figur 5. Billede af loftkonstruktion under opførelse. Billedet viser dels at dampspærren er placeret beskyttet, idet den er trukket tykkelsen af to forskallingslag ind i konstruktionen, og dels den rørkrave og tape der sikre tætheden hvor ventilationskanaler gennembryder dampspærren og ved plastfoliesamlinger.

Det er vigtigt i forbindelse med procesrækkefølgen ved opbygningen af loft- og tagkonstruktionen at taget er tæt overfor regn før dampspærre og isolering etableres. Ellers vil der kunne samle sig vand, som oftest vil blive drænet ud ved at skære huller i plastfolien, hvilket naturligvis er meget u hensigtsmæssigt.

Der er ved sporgasmålinger beregnet en naturlig luftinfiltration på $0,11 \text{ h}^{-1}$. Da denne måling er meget afhængig af de konkrete temperatur- og vindforhold på måletidspunktet, er der behov for en vurdering af det gennemsnitlige årlige luftskifte. I europæisk norm prEN ISO 13790 [6] er der i annex G angivet en formel for den tillægsluftstrøm (V_x) der skyldes infiltration/eksfiltration gennem utætheder i klimaskærmen:

$$\dot{V}_x = \frac{V \cdot n_{50} \cdot e}{1 + \frac{f}{e} \cdot \left| \frac{V_{\text{sup}} - V_{\text{ex}}}{V \cdot n_{50}} \right|^2}$$

hvor

V = det indvendig luftvolumen

V_{sup} = indblæsningsluftmængden

V_{ex} = udsugningsluftmængden

n_{50} = luftskiftet ved trykforskel på 50 Pa (se ovenfor)

Og e og f er koefficienter der udtrykker hvor godt huset er beskyttet mod vindpåvirkninger.

Idet V_{sup} og V_{ex} antages lige store, hvorved f udgår, og huset regnes for at være moderat beskyttet ($e = 0,07$), fås $V_x = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ svarende til et luftskifte på ca. $0,11 \text{ h}^{-1}$. Det årlige gennemsnitlige luftskifte via utætheder i klimaskærmen er altså tilfældigvis lige så stort som det der blev bestemt ved sporgasmåling.

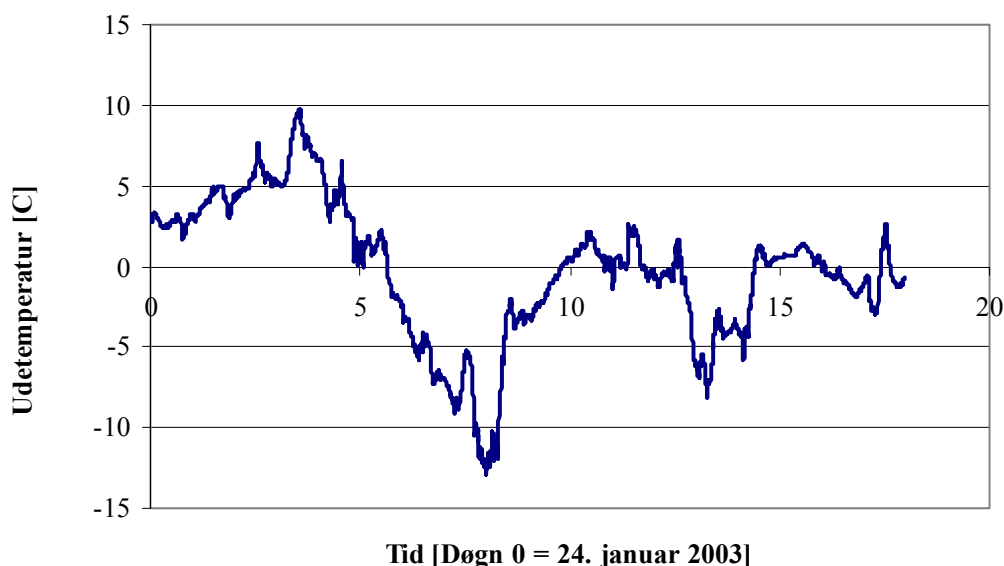
Det er vigtigt at reducere luftskiftet udenom ventilationsanlægget til et minimum, hvilket kan illustreres med et eksempel. I henhold til bygningsreglementet skal der ved mekanisk ventilation med varmegenvinding udskiftes en luftmængde på mindst 60 l/s for det aktuelle hus, som svarer til et luftskifte på $0,8 \text{ h}^{-1}$. For huse med et normalt tæthedsniveau kan man regne med et luftskifte pga. utætheder i klimaskærmen på $0,2 \text{ h}^{-1}$ (jf. DS418 – Beregning af bygninger varmetab). Den mekaniske ventilation er udstyret med varmegenvinding, som genvinder ca. 90 % af varmen i udsugningsluften, hvilket vil sige at det reelle luftskifte (den mængde udeluft der opvarmes til rumtemperatur) svarer til ca. $0,1 \text{ h}^{-1}$. Hvis luftskiftet pga. utætheder er de $0,2 \text{ h}^{-1}$, vil infiltrationstab udgøre 2/3 del af det samlede ventilationstab, svarende til ca. 1500 kWh/år, hvilket er betragteligt i forhold til husets forventede opvarmningsbehov på årsbasis, der er beregnet til ca. 5500 kWh/år ved en infiltration på $0,2 \text{ h}^{-1}$. Det kan derfor konkluderes at lufttætheden er utrolig vigtig, især når der er tale om lavenergihuse med mekanisk ventilation med varmegenvinding.

Erfaringer fra lignende forsøgshusbyggerier viser, at infiltrationstab kan reduceres til under $0,10 \text{ h}^{-1}$, men det kræver dog at der udøves særlig omhu ved tætning af samlinger, gennembrydninger mv. Det er også erfaringen at den gode tæthed kan opnås ved konsekvent planlægning og omhyggelig udførelse og reparation af uundgåelige huller. Det skulle ikke være nødvendigt at anvende dyr og kompliceret teknologi.

2.2 Udetemperatur

Udetemperaturen måles vha. et termoelement placeret i vejrstationen, som er fastgjort til en taghætte på husets tag.

Udetemperaturen for måleperioden er vist i Figur 6.



Figur 6: Udetemperatur.

Af figuren kan det ses at der har været dage med meget mildt vejr, såvel som dage med kraftig frost. Den højeste temperatur har været ca. 10 °C, mens den laveste temperatur har været ca. -13 °C.

Den gennemsnitlige udetemperatur for hele perioden kan beregnes til -0,3 °C.

Hvis man beregner døgnmiddeltemperaturerne for perioden fås resultaterne vist i Tabel 4.

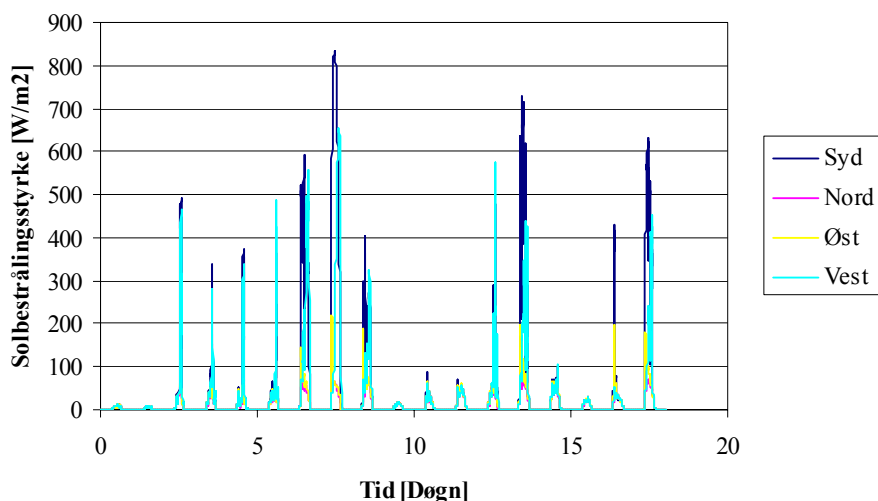
Tabel 4. Gennemsnitlige udetemperaturer for hvert enkelt døgn i perioden.

Dag [-]	Udetemperatur [°C]	Dag [-]	Udetemperatur [°C]	Dag [-]	Udetemperatur [°C]
24.01.2003	2,7	30.01.2003	-5,2	05.02.2003	-1,1
25.01.2003	4,0	31.01.2003	-8,4	06.02.2003	-4,9
26.01.2003	5,4	01.02.2003	-6,2	07.02.2003	-1,1
27.01.2003	7,1	02.02.2003	-1,4	08.02.2003	0,8
28.01.2003	3,9	03.02.2003	0,9	09.02.2003	-0,9
29.01.2003	0,3	04.02.2003	0,5	10.02.2003	-0,8

2.3 Solindfald

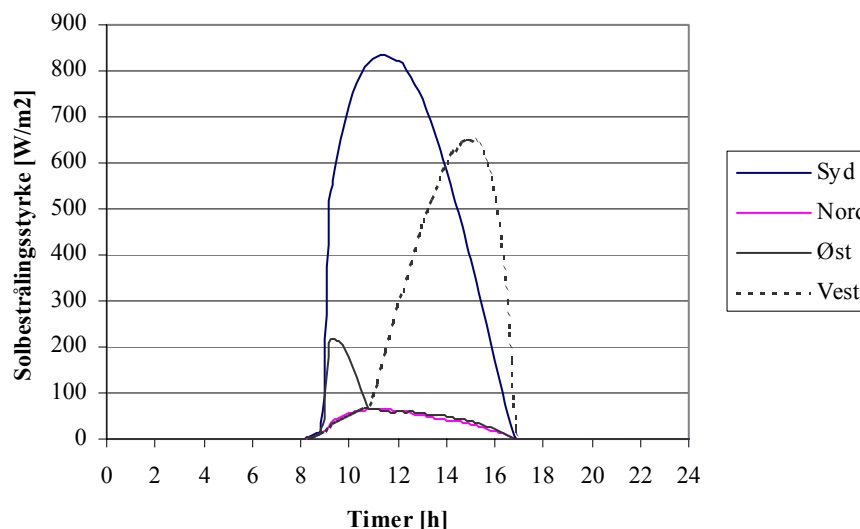
Solpåvirkningen af huset bestemmes vha. fire pyranometre monteret på vejrstationen. De fire pyranometre vender således at de korresponderer med husets facader og gavle, således at de målte værdier svarer til solindfaldet på husets fire retninger. Husets orientering fremgår af bilag 2. Det ses heraf at gavlen, der i det følgende benævnes nord, ikke er orienteret direkte mod nord, men næsten vender mod nordvest, og tilsvarende for de andre facader og gavle. Det vil bl.a. betyde at når solen står i syd vil også vestfacaden modtage en del solstråling.

I den betragtede periode er der målt solbetrålingsstyrker som vist i Figur 7.



Figur 7: Solbetrålingsstyrker på husets facader og gavle.

På figuren kan det være svært at skelne solstrålingen på de forskellige retninger. I Figur 8 er vist solbetrålingsstyrken for de 4 retninger for 7. døgn, dvs. 31. januar 2003.



Figur 8: Solbetrålingsstyrke på husets facader og gavle for 7. døgn (31. januar 2003)

Af figuren er det tydeligt at solen står op lidt efter kl. 8.00 og rammer hhv. syd- og østfacaden ca. samtidig. Når solen ikke længere rammer østfacaden rammes i stedet vestfacaden (kl. ca. 10.30). Årsagen til at vestfacaden får sol på et så tidligt tidspunkt skyldes at vestfacadens ikke er orienteret præcis mod vest (jf. bemærkning i starten af afsnittet). Nordfacaden rammes tydeligvis ikke af direkte solstråling. Alt i alt ser de målte data fornuftige ud, og afspejler hvad man kan forvente i slutningen af januar 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” [7], hvilket betyder at der ydermere tages højde for glassets solenergitransmittans samt eventuelle skyggefaktorer. Følgende formel anvendes :

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

hvor $g_{\text{korrigeret}}$ 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 63 %.

Skyggefaktoren F_s antages som udgangspunkt at være 0,9, idet der er tale om fri horisont. Udhænget på huset er minimalt. For vinduerne korrigeres F_s derfor, jf. retningslinierne i ”SBI-anvisning 184. Bygningers energibehov” [8], med en faktor -0,1 (lille udhæng).

Den korrigerede solenergitransmittans, der gælder for alle vinduer og døre, kan nu beregnes som :

$$g_{\text{korrigeret}} = 0,63 \cdot 0,80 \cdot 1,00 \cdot 0,90 = 0,45$$

Vinduet i sydfacaden, som vender mod vognporten, er placeret så beskyttet mod solstråling, at der ses bort fra dette vindues bidrag i beregningerne.

Glasarealerne for de fire facader kan opgøres til følgende :

$$\begin{aligned} A_{\text{øst}} &= 4,56 \text{ m}^2 \\ (A_{\text{syd}} &= 0,35 \text{ m}^2) \\ A_{\text{vest}} &= 9,69 \text{ m}^2 \\ A_{\text{nord}} &= 3,89 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Det er hermed tydeligt at huset ikke er orienteret bedst muligt i forhold til at udnytte solenergien. Det skal dog bemærkes at den såkaldte vestvendte facade er sydvest vendt, jf. bilag 2. Den gennemsnitlige glasandel i husets vinduer og døre er 61 %.

Målingerne, som er foretaget vha. pyranometre, bliver aflæst i W/m^2 , og disse værdier kan nu ganges med de respektive arealer samt den korrigerede solenergitransmittans. I løbet af nattetimerne, dvs. de tidspunkter hvor solen ikke skinner, viser målingerne både positive og negative udslag i solbestrålingsstyrken. Disse værdier nulstilles i forbindelse med beregning af solindfaldet. Da der er tale om meget små værdier har dette en meget lille betydning i de samlede beregninger.

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

Herved fås et samlet energitilskud fra solen på 70 kWh for den betragtede periode, der potentielt kan bidrage til opvarmning af huset. Udnyttelsesfaktoren for solenergien antages for den aktuelle periode at være 1,0. Denne værdi er vurderet på baggrund af SBI-anvisning 184.

Ligesom for udetemperaturen, bestemmes også det daglige soltilskud for hver enkelt dag i perioden. Resultaterne er vist i Tabel 5.

Tabel 5. Tilskud af solenergi til huset for hvert enkelt døgn i perioden.

Dag [-]	Soltilskud [kWh]	Dag [-]	Soltilskud [kWh]	Dag [-]	Soltilskud [kWh]
24.01.2003	0,5	30.01.2003	9,1	05.02.2003	4,7
25.01.2003	0,3	31.01.2003	13,8	06.02.2003	7,5
26.01.2003	4,0	01.02.2003	5,2	07.02.2003	2,7
27.01.2003	2,4	02.02.2003	0,7	08.02.2003	1,1
28.01.2003	2,4	03.02.2003	1,3	09.02.2003	2,0
29.01.2003	3,0	04.02.2003	2,0	10.02.2003	7,7

2.4 Indetemperatur

Indetemperaturen er målt vha. termofølere som er placeret i samtlige rum (med undtagelse af gang og bryggers). Den gennemsnitlige indetemperatur er således en arealvægtet middelværdi af 9 forskellige målinger.

Middelværdierne af indetemperaturen for hvert enkelt rum er opstillet i Tabel 6. På grund af problemer med måleudstyret er middeltemperaturerne kun baseret på 9 dages målinger (5 dage i starten og 4 dage i slutningen af måleperioden).

Tabel 6. Middeltemperatur og areal for hvert rum i huset.

Rum [-]	Middeltemperatur [°C]	Areal af rum [m ²]
Forældrebåd	19,8	4,5
Soveværelse	19,6	12,2
Stue	19,7	23,6
Køkken/alrum	20,0	23,4
Værelse E	20,3	9,9
Værelse C	19,9	10,1
Værelse D	19,9	7,9
Børnbad	19,8	3,9
Entre	20,1	5,0

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 19,9 °C.

Der er i hele perioden målt på temperaturen af udsugningsluften umiddelbart før indløb til ventilationsaggregatet. Da ventilationskanalerne er placeret i undersiden af loftkonstruktionen, og varmetabet derfor er minimalt, vil den målte temperatur omtrent svare til middellufttemperaturen i huset. Middeltemperaturen af udsugningsluften i måleperioden har været 20,1 °C. Middeltemperatur for hvert enkelt døgn i perioden er vist i Tabel 7.

Tabel 7. Middeltemperaturer i huset for hver enkelt døgn i perioden.

Dag [-]	Middeltemp. [°C]	Dag [-]	Middeltemp. [°C]	Dag [-]	Middeltemp. [°C]
24.01.2003	20,3	30.01.2003	19,6	05.02.2003	20,1
25.01.2003	20,2	31.01.2003	19,3	06.02.2003	19,4
26.01.2003	20,7	01.02.2003	19,0	07.02.2003	20,2
27.01.2003	20,6	02.02.2003	20,2	08.02.2003	20,2
28.01.2003	20,3	03.02.2003	20,2	09.02.2003	20,3
29.01.2003	20,2	04.02.2003	20,2	10.02.2003	20,3

Det fremgår af Tabel 7 at indeluftens temperatur ligger lige omkring 20 °C, som også har været gulvvarmesystemets setpunkt i måleperioden. Indetemperaturen (udsugningsluften ved indløb til aggregat) er dog kun ca. 19 °C i 4 døgn, som med en døgnmiddeltemperatur på –5 °C til –8 °C også er de klart koldeste døgn. Den mest sandsynlige årsag er varmetabet fra kanalerne, som ved så lave udetemperaturer trods alt vil have en vis effekt på afkølingen af luften. Der foreligger ikke data for indetemperaturer i de enkelt rum for de omtalte 4 kolde døgn.

Den højeste temperatur forekom søndag d. 26. Januar kl. 15, hvor middeltemperaturen i huset nåede op på 21,7 °C. Denne dag var solindstrålingen stor og der var åben hus med ca. 40 besøgende i tidsrummet 13-16.

2.5 Effektivitet af varmeveksler, frostsikring mm.

Effektiviteten af varmeveksleren (temperaturvirkningsgraden) kan bestemmes ud fra tre temperaturmålinger, svarende til temperaturen af den luft som hentes udefra (friskluft), den luft som hentes indefra (udsugning) og den luft som blæses ind (indblæsning). Temperaturvirkningsgraden er defineret som forholdet mellem den opnåede temperaturstigning i veksleren og den højest mulige temperaturstigning. Alle temperaturer er målt i flexslangerne umiddelbart uden for aggregatet.

I den betragtede periode har der kunnet måles følgende middeltemperaturer (temperaturen af luften i afkastet er blot til orientering) :

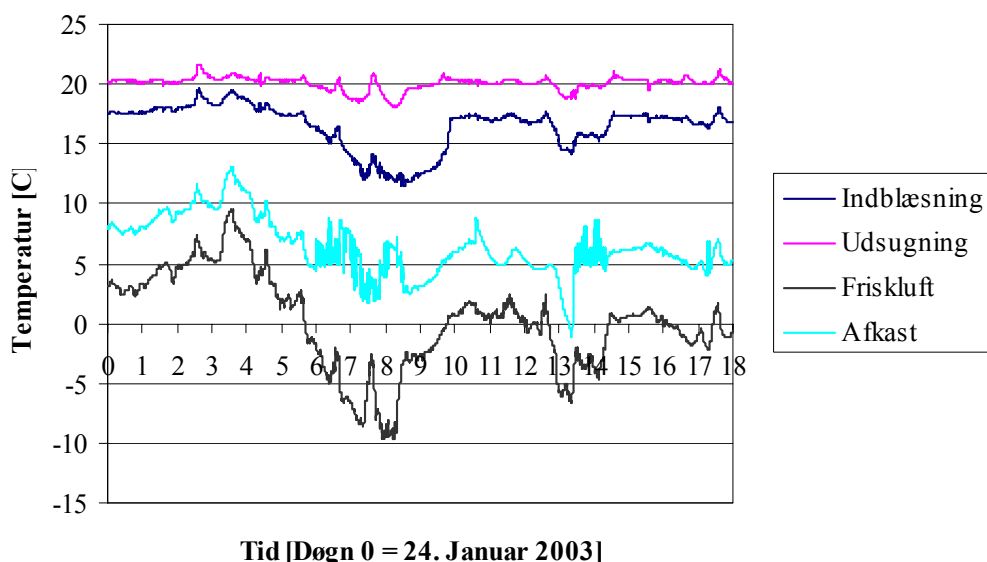
$T_{\text{friskluft}}$	=	0,1 °C
T_{afkast}	=	6,4 °C
$T_{\text{udsugning}}$	=	20,1 °C
$T_{\text{indblæsning}}$	=	16,5 °C

Den gennemsnitlige temperaturvirkningsgrad kan således bestemmes som :

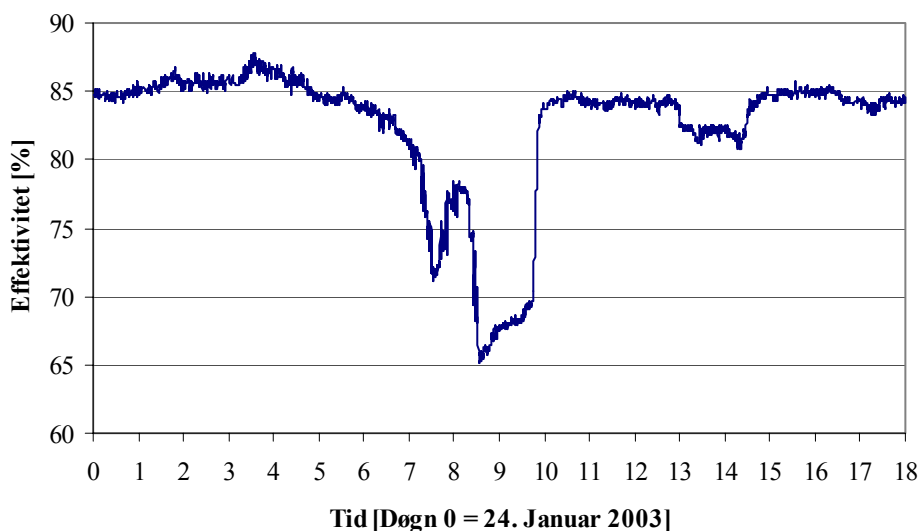
$$\eta_{\text{vgv}} = 1 - \frac{(T_{\text{udsugning}} - T_{\text{indblæsning}})}{(T_{\text{udsugning}} - T_{\text{friskluft}})} = 1 - \frac{(20,1 - 16,5)}{(20,1 - 0,1)} = 0,82 = 82\%$$

Som det fremgår senere i dette afsnit, er der i indblæsningen og udsugningen målt gennemsnitlige luftmængder på hhv. 181 m³/h og 201 m³/h. Denne forskel udlignes ved infiltration af udeluft.

Temperaturer og effektivitet af varmeveksleren varierer, og i Figur 9 og Figur 10 er vist variationen gennem perioden.



Figur 9. Variation i de fire temperaturmålinger i ventilationsaggregatet.



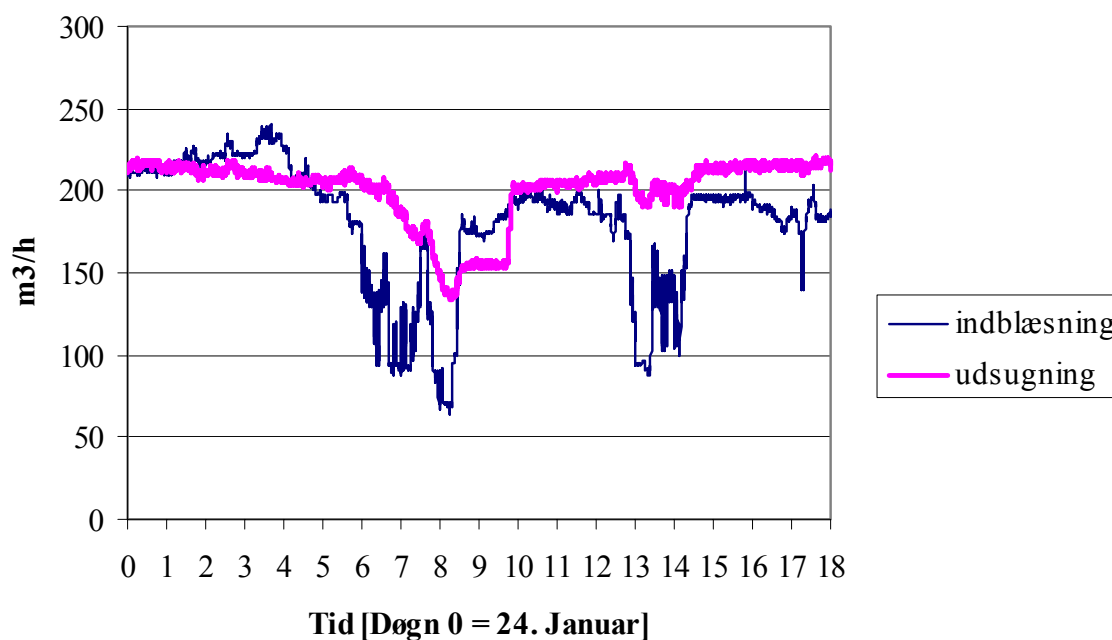
Figur 10: Variation af varmevekslerens effektivitet gennem perioden.

Det ses af Figur 10 at temperaturvirkningsgraden langt fra har været konstant i perioden. Især i perioden dag 7 til dag 10 (en periode med streng frost) har temperaturvirkningsgraden været væsentligt lavere. Dette skyldes tilisningsproblemer.

Anvendelse af meget effektive varmevekslere kan give anledning til tilisningsproblemer i varmevekslerens afkast, når udetemperaturen kommer under ca. $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. For at undgå isdannelse er ventilationsaggregatet forsynet med en temperaturføler og en regulering, der i princippet sikrer at afkastluften ikke kommer under $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Reguleringen foretages ved at indblæsningsluftstrømmen reguleres ned så den kolde luftstrøm bliver mindre end den varme luftstrøm hvilket betyder at afkastluften nedkøles mindre og en temperatur på ca. $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ kan holdes i afkastluften. Udsugningsluftstrømmen kan reguleres op hvis nødvendigt, hvilket har samme effekt. Afrimning stopper når afkasttemperaturen har været større end $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i 5 min.

For at have styr på luftmængderne i indblæsningen og udsugningen og dermed ventilationstabet har der i måleperioden været placeret to termiske anemometre i ventilationsaggregatet. Disse har målt køleeffekten og omdannet den til et volt-signal, der er lineært. Ved at lave samtidige målinger i aggregatet og af luftmængder i de enkelt rum ved forskellige luftmængder (4 trin styret anlæg), har sammenhæng mellem målte volt og volumenstrøm kunne bestemmes. Det skal bemærkes at nøjagtigheden på målinger i aggregat og husets rum er hhv. plus/minus 5 % og 10 %.

I Figur 11 er vist volumenstrømmens variation i den indad- og udadgående luftstrøm.



Figur 11: Variation af volumenstrømmen i hhv. indblæsning og udsugning.

Figur 11 viser hvordan luftstrømmen i indblæsningen i de kolde perioder nedreguleres for at forhindre en tilisning af varmeveksleren. Det skal bemærkes at nedreguleringen aktiveres første gang (dag 6) allerede ved ca. 5 °C. Det ses også af figuren at den udsugede luftmængde falder forholdsvis jævnt fra dag 6 til dag 8, hvilket er et tegn på en jævnt større tilisning af varmeveksleren og at afrimningen altså ikke virker. Først omkring dag 10, hvor udetemperaturen nærmer sig frysepunktet, ”tør veksleren op” og luftmængden i udsugningen normaliseres. De gennemsnitlige luftmængder i indblæsningen og udsugningen har kunne beregnes til hhv. 181 m³/h og 201 m³/h. Forskellen i luftmængderne udlignes ved infiltration af udeluft, som medregnes i form af en forøgelse af den naturlige luftinfiltration.

I slutningen af december 2002 og starten af januar 2003 var der en længerevarende periode med frost og ekstremt lave temperaturer efter danske forhold. Dette medførte en kraftig tilisning af varmeveksleren. Den 6. Januar konstateredes en indblæsningstemperatur på 1,5 °C ved en udetemperatur på -9 °C og en udsugningstemperatur på 18 °C (målt ved indløb til aggregat). Samtidigt blev der målt luftmængder på ca. 200 m³/h og 100 m³/h i hhv. indblæsningen og udsugningen, hvilket naturligvis forklarer den lave indblæsningstemperatur. Komfortmæssigt er det uheldigt med en indblæsningstemperatur på kun 1,5 °C.

Det kan konkluderes at nedreguleringen af indblæsningsluftmængden, der skal sikre at varmeveksleren forbliver fri for is, er utilstrækkelig. Der er behov for en styring der hurtigere

nedregulere indblæsningen, evt. stopper den helt, eller en anordning, der sørger for et by-pass af veksleren.

Der er lavet en måling af elforbruget. Målingen er udført af af Nilan A/S, d. 6. Jan 2003. Der er målt på den optagne effekt for begge ventilatorer. Der blev samtidig målt på udsugnings- og indblæsningsluftmængder i de enkelte rum. De målte samlede luftmængder samt målte effektoptag er vist i Tabel 8.

Tabel 8. Målte luftmængder og effektoptag på en dag med is i varmeveksleren.

Trin	Indblæsning [m ³ /h]	Udsugning [m ³ /h]	Effektoptag [W]
1	97	46	35
2	114	57	39
3	191	90	60
4	253	152	82

Da målingerne blev udført var udsugningsdelen af veksleren tiliset på grund af en forudgående periode med streng frost, jf. målingerne der viser at udsugningen kun var ca. halvt så stor som indblæsningen. Dette kunne også aflæses af indblæsningstemperaturen, som var meget lav.

De målte effektoptag er mindre for det tiliset aggregat end i normalsituationen uden tilisning (jf. nedenfor) på trods af et konstant omdrejningstal. Det mindskede strømningstværsnit i veksleren betyder at tryktabet/modtrykket i veksleren er forøget, mens tryktabet i kanalsystemet, som følge af den halverede volumenstrøm er væsentligt mindre (tryktabet varierer omtrent proportionalt med kvadratet på volumenstrømmen). Samtidig vil motorens virkningsgrad være lidt mindre, da man må forvente at ventilatoren køre optimalt i normalsituationen. Dette er samlet set forklaringen på det nedsatte effektoptag.

Der er ikke lavet en måling af elforbruget med afrimet aggregat. Spørgsmålet er også hvor korrekt/brugbar denne ville være, idet der dels ikke er tale om normalsituationen (altså med beboere i huset) og dels er det ikke umiddelbart muligt at lave en nøjagtig måling af samhørende volumenstrømme i kanalsystemet pga. anlæggets udformning. I øvrigt vil filtrenes renhed have en vis betydning. Det aktuelle ventilationsanlægs elforbrug er dog målt ved prøvning på Teknologisk Institut (omtalt i delrapport 1, der omhandler konstruktioner/systemer [2]). De anvendte centrifugalventilatorer er med fremadkrummede skovle og DC-motorer med en god elvirkningsgrad, og der er forudsat et typisk eksternt modtryk (kanalsystem mm.) på 150 Pa. Prøvningen viser at effektoptaget er 84 W ved 60 l/s svarende til 735 kWh/år ved drift hele året.

2.6 Energiforbrug

Husets energiforbrug gennem perioden er målt vha. energimålere. Der er opsat i alt 2 målere, således at der kan måles på forbruget til varmt brugsvand (VV) og forbruget til gulvvarmeanlægget (GV). Desuden måler varmeværket på det samlede forbrug af varme.

Varmtvandsbeholderen har været i drift i måleperioden, men idet huset ikke har været beboet i den pågældende periode, har forbruget til varmt brugsvand være minimalt, og der tages derfor ikke hensyn til dette i vurderingerne. Varmetabet fra beholderen antages at kunne udnyttes 100 % til opvarmning af huset og henføres til det interne varmetilskud.

Gennem den betragtede periode har der været et totalt forbrug i GV-anlægget på 867 kWh. På grund af problemer med måleapparatet er der ikke foretaget målinger af opvarmningsbehovet for hver enkelt dag i måleperioden.

Indstilling af fremløbstemperaturen 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. 34 °C i måleperioden. Ud fra forbrug af vand er den gennemsnitlige afkøling beregnet til 4,0 °C. På denne baggrund må det antages at temperaturen i og omkring gulvvarmeslangerne i måleperioden har været 32 °C.

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 9 for hvert enkelt døgn i perioden og for perioden som helhed.

Tabel 9: Samlede måleresultater for perioden, døgnmiddelværdier/-sumationer.

Dag [#]	Udetemperatur [°C]	Solindfald [kWh]	Indetemperatur [°C]	VGV eff. [%]	Energiforbrug [kWh]
24.01.2003	2,7	0,5	20,3	85	-
25.01.2003	4,0	0,3	20,2	86	-
26.01.2003	5,4	4,0	20,7	86	-
27.01.2003	7,1	2,4	20,6	86	-
28.01.2003	3,9	2,4	20,3	86	-
29.01.2003	0,3	3,0	20,2	84	-
30.01.2003	-5,2	9,1	19,6	83	-
31.01.2003	-8,4	13,8	19,3	76	-
01.02.2003	-6,2	5,2	19,0	71	-
02.02.2003	-1,4	0,7	20,2	71	-
03.02.2003	0,9	1,3	20,2	84	-
04.02.2003	0,5	2,0	20,2	84	-
05.02.2003	-1,1	4,7	20,1	84	-
06.02.2003	-4,9	7,5	19,4	82	-
07.02.2003	-1,1	2,7	20,2	83	-
08.02.2003	0,8	1,1	20,2	85	-
09.02.2003	-0,9	2,0	20,3	85	-
10.02.2003	-0,8	7,7	20,3	84	-
Sum/middel	-0,3	70	20,1	82	867

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 bygningssimulerings-programmet BSIM anvendes.

3.1 Målinger sammenlignet med simplificerede beregninger

Den simplificerede beregning af husets forventede opvarmningsbehov, baseres på de målte ude- og indetemperaturer, temperaturvirkningsgraden af varmeveksleren, den tilførte solenergi, samt husets teoretiske varmetabskoefficient. Sidstnævnte er bestemt i rapporten ”Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner, Del 1: Konstruktioner/systemer, Byggesystem: skalmurede porebetonelementer”.

I de tidligere gennemførte beregninger er det antaget at varmegenvindingsenheden har en temperaturvirkningsgrad på 90 %. Dette har målingerne dog vist var en smule for optimistisk. Derfor korrigeres varmetabskoefficienten for huset, i forhold til den oprindelige beregnede. 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

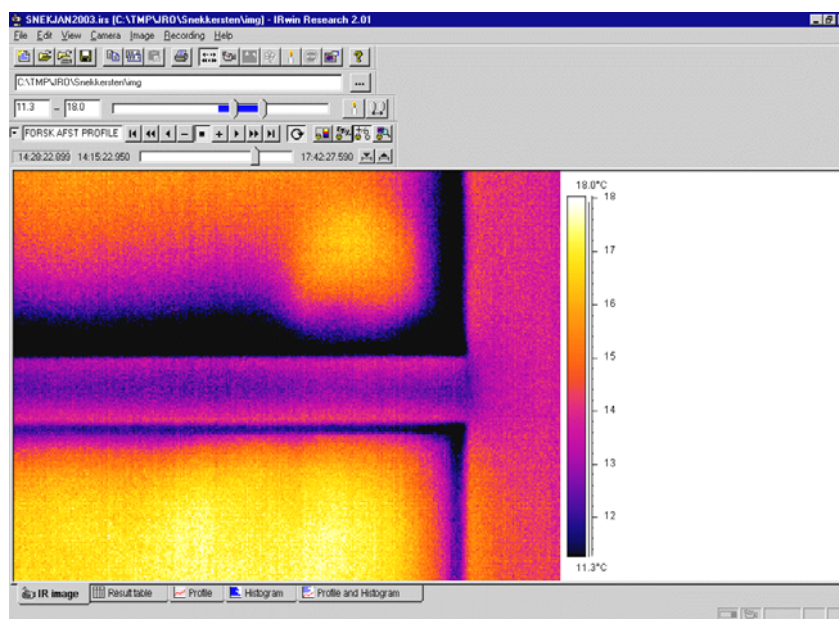
H_{vent} er varmetabskoefficienten for ventilationstab/infiltration.

Værdierne fra den første rapport benyttes, dog ændres varmetabskoefficienten for ventilations- og infiltrationstab, således at der tages højde for den lavere temperaturvirkningsgrad. Ydermere ændres også den naturlige infiltrationen fra de oprindelige $0,10 \text{ h}^{-1}$ til $0,11 \text{ h}^{-1}$, idet detaljerede målinger har vist at infiltrationen var en smule højere end forventet. Dertil skal medregnes en infiltration på $0,08 \text{ h}^{-1}$, som skyldes at der mekanisk er fjernet en større luftmængde end der er indblæst (se afsnit 3.2.6). Varmetabskoefficienten for konstruktioner (UA-værdien) er ligeledes korrigeret for at tage højde for det ekstra varmetab som forekommer gennem terrændækket, idet gulvvarmeslangerne er ca. 2°C varmere end forventet. Af samme grund forhøjes varmetabskoefficienten for samlinger (ψ -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. Der er desuden taget højde for den forøgede infiltration pga. af en lidt større udsuget luftmængde end indblæst luftmængde, jf. afsnit 2.5.

$$H_{total} = 83,3 \text{ W} / \text{K} + 12,9 \text{ W} / \text{K} + 0,34 \cdot (0,69 \text{ h}^{-1} \cdot 18\% + 0,11 + 0,08 \text{ h}^{-1}) \cdot 263 \text{ m}^3 = 124 \text{ W} / \text{K}$$

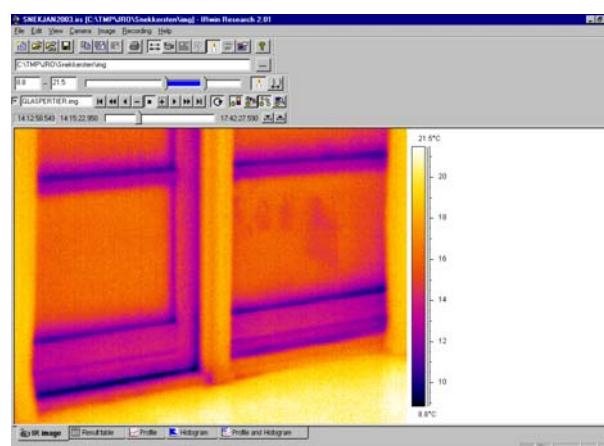
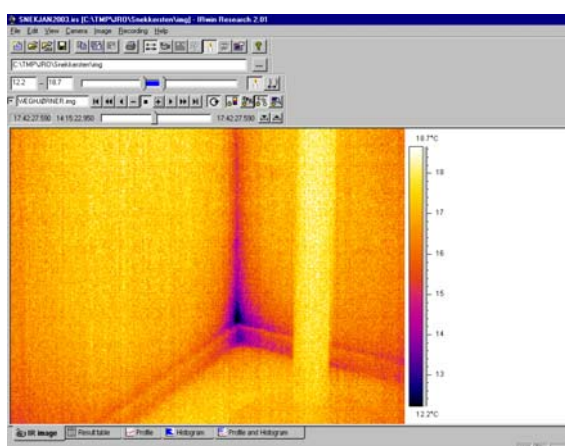
Termograferingen har i ét tilfælde kunne påvise en kuldebro, der ikke er taget højde for i forbindelse med de tidligere omtalte detaljerede beregninger. Det drejer sig om et enkelt glasfelt i døren i glaspartiet i køkken/alrum, der under byggeriet er blevet ødelagt, og senere ved en fejl er blevet erstattet med en rude med et afstandsprofil i stål (vinduerne er ellers udstyret med en ”varm kant”).

I Figur 12 ses en betydelig forskel i overfladetemperaturen ved rudekanten, idet stålprofilen trækker kulden ind i et stort område i rudens periferi. Billedet er taget på en dag i januar hvor temperaturen var ca. -3°C . I vintermånederne vil indelufts relative luftfugtighed typisk ligge mellem 30 og 50 % (jf. SBI-anvisning 178 – Bygningers fugtisolering). Hvis der antages en fugtighed i den høje ende og en indetemperatur på 22°C , fås en dugpunktstemperatur på ca. 11°C , og det ses af figuren at dette netop er temperaturen hvor der er koldest. Med tanke på at udetemperaturen sagtens kan være lavere end -3°C , er der derved stor risiko for dannelse af kondens i rudekanten.



Figur 12. Vandret sprøse i facadeglasdør. Det øvre glasfelt har en et afstandsprofil i stål, mens det nedre profil er et kompositmateriale (såkaldt varm kant profil).

I Figur 13 er vist to termografier der viser kuldebroeffekten i ydervægshjørne (billedet til venstre) og det generelle billede af væsentlige kuldebroer ved rudekanter mm. i forbindelse med vinduer/døre.



Figur 13. Ydervægshjørne og glasdør samt fast vinduesparti.

Der vil ikke blive taget højde for ovennævnte utilsigtede kuldebro, idet den har minimal betydning for det samlede varmetab.

Det forventede opvarmningsbehov for perioden kan bestemmes ved følgende formel:

$$Q_{opv} = H_{total} \cdot (T_{inde} - T_{ude}) \cdot T_{periode} - Q_s - Q_i$$

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 til huset i kWh, og
 Q_i er det samlede interne varmetilskud til huset i kWh.

Det interne varmetilskud er af relativt lille betydning, idet huset ikke har været beboet i måleperioden. Der har dog været lys tændt forskellige steder i huset og der har været besøgende til åbent hus arrangementer. Desuden har køleskab, cirkulationspumpe i varmeanlæg samt varmtvandsbeholder været i drift. For køleskabets vedkommende vurderes det gennemsnitlige effektforbrug i perioden at have været 50 % af mærkeeffekten. Cirkulationspumpen i varmeanlægget er en standard Grundfoss UPS (3 trin), der antages at have kørt konstant døgnet rundt på trin 2, hvor effekten er 45 W. Med hensyn til sidstnævnte har der ikke været et nævneværdigt forbrug og derfor kun et varmetab, der vil bidrage til husets opvarmning. Varme fra ventilatorer indgår i ventilationsanlæggets temperaturvirkningsgrad. I Tabel 10 er vist en overslagsmæssig opgørelser over varmetilskud og elforbrug i måleperioden.

Tabel 10. Oversigt over bidrag til det interne varmetilskud og forbrug af el i måleperioden.

Internt varmetilskud / elforbrug	Effektforbrug [W]	Nyttiggjort [%]	Varmetilskud [kWh]	Elforbrug [kWh]
Belysning	100	100	43	43
Ventilatorer	80	-	-	35
Køleskab (mærkeeffekt 120 W)	60	100	26	26
Cirkulationspumpe i varmeanlæg	45	100	19	19
Varmetab fra varmtvandsbeholder og varme- og varmtvandsrør	-	100	40	-
Måleudstyr og udendørs belysning			≈ 0	?
Personer			≈ 0	-
I alt			128	123

Alt i alt vurderes på denne baggrund at der er tale om et samlet varmetilskud på 128 kWh, svarende til ca. 300 W jævnt fordelt over perioden. Elforbruget for perioden er beregnet til 123 kWh, hvilket stemmer meget godt overens med aflæsninger af elmåleren i huset, der viser et samlet forbrug på 190 kWh, hvis der tages hensyn til forbrug fra måleudstyr og udendørs belysning ikke er medregnet.

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

$$Q_{opv} = 124W / K \cdot (20,1 - (-0,3))^\circ C \cdot 24h \cdot 18dage - 70kWh - 130kWh = 892kWh$$

Det samlede forbrug til rumopvarmning for perioden er målt til 867 kWh, og der er således brugt 25 kWh mindre end man skulle forvente, hvilket f.eks. kunne svare til at varmetabskoefficienten for huset har været 121 W/K i stedet for de anvendte 124 W/K.

Det er umiddelbart svært at give en forklaring på afvigelserne mellem det målte og beregnede opvarmningsbehov. Men der tages ikke højde for husets varmekapacitet i forbindelse med den simple beregning, og dette er en del af forklaringen. Desuden er der en betydelig usikkerhed på de målte/beregnete volumenstrømme i ventilationsanlægget, hvilket kan have en vis effekt.

3.2 Målinger sammenlignet med detaljerede beregninger

De detaljerede beregninger foretages vha. simuleringsprogrammet BSIM 2000 [9]. Modellen som benyttes er beskrevet i rapporten "Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner, Del 1: Konstruktioner/systemer, Byggesystem: Skalmurede porebetonelementer (grundmodel). Der er dog foretaget en række ændringer, som er 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 24.01.2003 til 10.02.2003.

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 på de overvejende nord- og sydvendte gavle og beregnede indfaldsvinkler. Der benyttes Petersen solalgoritmer 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 enkelte timer og flader er fornuftige.

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 20,1 °C.

3.2.4 Effektivitet af varmeveksler

Ventilationen foregår med udeluft der ledes gennem en varmeveksler. Varmevekslerens temperaturvirkningsgrad sættes, jf. målingerne til 82 %. I de perioder hvor anlægget har kørt omtrent balanceret har virkningsgraden været ca. 85 %, hvilket svarer til forventningerne.

Ventilationssystemet er udformet så der foretages mekanisk udsugning i alle rum undtagen entre og gang. Der foretages indblæsning i alle opholdsrum undtagen i baderum og bryggers. På baggrund af målte luftmængder i indblæsnings- og udsugningsventiler opstilles en luftbalance for huset og herudfra fastlægges luftudvekslingen mellem de enkelte rum.

3.2.5 Temperatur af gulvvarmeslanger (Jordtemperatur)

I samtlige rum defineres opvarmning svarende til en maksimal effekt på 3,3 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 -2 °C. Den reducerede jordtemperatur svarer altså til at der haves en temperaturdifferens mellem oversiden

af betondækket og jorden på 22 °C, som igen svarer til den målte gulvvarmeslangetemperatur på ca. 32 °C minus jordtemperaturen på 10 °C.

Denne antagelse kan dog ikke benyttes i forbindelse med simuleringer hvor man betragter hele fyringssæsonen, idet gulvvarmeslangerne i denne situation ikke vil have en gennemsnitlig temperatur som er 32 °C (formentlig noget lavere, hvis fremløbstemperaturen tilpasses behovet for varme). Af denne grund vælges det ved årssimulering at anvende en temperatur for den fiktive zone jord på 0 °C, svarende til at gulvvarmeslangerne er 30 °C og jorden er de typiske 10 °C.

Kuldebroen i forbindelse med fundamentet vil ligeledes, i forbindelse med den betragtede periode, skulle fastlægges på baggrund af en temperaturforskel på 32 °C minus udetemperaturen. I forbindelse med betragtninger af hele fyringssæsonen vil man, jf. ovenstående, anvende en temperaturforskel på 30 °C minus udetemperaturen. For at medtage dette forhold i beregningerne øges kuldebroens størrelse med en faktor som tilsvarende forholdet mellem de aktuelle temperaturforhold og de modellerede temperaturforhold.

3.2.6 Infiltration

På baggrund af tidligere omtalte målinger af husets tæthed (infiltration) anvendes et luftskifte på 0,11 h⁻¹ for samtlige zoner. I tillæg medregnes et luftskifte på 0,08 h⁻¹, som skyldes at der via ventilationsanlægget i gennemsnit er fjernet 20 m³/h mere luft end der er tilført, idet forskellen udlignes ved infiltration af udeluft.

3.2.7 Intern varmelast fra personer, belysning og apparatur

I Tabel 10 fremgår det at varmetilskuddet i måleperioden har været i størrelsesordenen 130 kWh svarende til en gennemsnitlig effekt på 300 W. Disse 300 W fordeles jævnt i huset, således at hvert rum har en arealvægtet andel af den samlede effekt.

3.2.8 Udluftning

Igennem måleperioden har der ikke været anvendt udluftning, da huset ikke har været beboet.

3.2.9 Resultater

Der gennemføres en simuleringsperiode på 18 dage, svarende til den periode som er målt. Resultaterne er sammenfattet i Tabel 11.

Tabel 11: Beregnet energibalance for perioden 24. Januar 2003 til 10. Februar 2003, BSIM 2000.

Energibalance	[kWh]
Q _{opv}	Energiforbrug til opvarmning
Q _{inf}	Nettobidrag ved infiltration
Q _{udl}	Varmetab ved udluftning
Q _{sol}	Energi tilført ved solindfald
Q _{udst}	Varme tilført fra udstyr
Q _{trans}	Trans. tab via klimaskærm
Q _{mix}	Vent. tab til naborum
Q _{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg

Energiforbruget til opvarmning er, som tidligere omtalt, målt som 867 kWh, og den detaljerede beregning undervurderer således energiforbruget med ca. 12 kWh.

Hvis man opstiller en tilsvarende varmebalance for den simple beregning, får man en idé om på hvilke områder de to beregningsmodeller adskiller sig.

Tabel 12: Beregnet energibalance for perioden 24. Januar 2003 til 10. Februar 2003, simpel.

Energibalance		[kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	892
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-147
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	0
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	70
Q_{udst}	Varme tilført fra udstyr	130
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-848
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	0
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-98

Det er hermed tydeligt at den primære forskel ligger i beregningen af transmissionstabet og solindfaldet. For transmissionstabet vedkommende skyldes det primært det forhold, at Bsim tager hensyn til konstruktionernes varmekapacitet. Der er dog også andre forhold som spiller ind, men da der ikke er tale om større afvigelser skal disse forhold ikke diskuteres mere i nærværende sammenhæng.

3.3 Sammenfatning og diskussion af resultater

Sammenligningerne foretaget i dette kapitel har vist at der er en særdeles god overensstemmelse mellem både simplificerede og detaljerede beregninger og så de måleresultater som er opnået. Den simplificerede beregning af husets opvarmningsbehov for den betragtede periode overvurderer en smule i forhold til måleresultaterne hvorimod den detaljerede beregning undervurderer en smule. Der foreligger, som nævnt tidligere, ikke målinger af varmeforbrug for hvert enkelt døgn i perioden.

I Tabel 13 er resultaterne sammenfattet.

Tabel 13: Opvarmningsbehov beregnet og målt.

Dato	Opvarmningsbehov [kWh]		
	Simpel beregning	BSIM	Målt
24.01.2003	45	42	-
25.01.2003	41	40	-
26.01.2003	34	33	-
27.01.2003	30	30	-
28.01.2003	39	37	-
29.01.2003	49	46	-
30.01.2003	57	55	-
31.01.2003	61	58	-
01.02.2003	63	62	-
02.02.2003	56	55	-
03.02.2003	49	48	-
04.02.2003	49	48	-
05.02.2003	51	48	-
06.02.2003	58	56	-
07.02.2003	53	52	-
08.02.2003	49	48	-
09.02.2003	54	51	-
10.02.2003	48	46	-
Total	892	855	867

Hvis der havde været målt hvert døgn ville der utvivlsomt have forekommet døgn hvor forskellen i resultaterne mellem beregninger og målinger havde været relativt store. Hvis f.eks. vejret ændrer sig fra at være koldt og overskyet til væsentligt varmere og solrigt i løbet af kort tid vil den store termiske masse i betonpladen bevirke at den lagrede varme vil blive afgivet i den ”varme” periode, hvilket udover et forøget varmeforbrug vil kunne give problemer med overtemperatur. Denne træghed i varmetilførslen kan afhjælpes ved at bruge let gulvvarme (hvor det er muligt) og en fremløbstemperatur der er tilpasset udeklimaet frem for en konstant fremløbstemperatur hele året.

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” [10] 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 opvarmningsystem (svarende til det som ”benyttes” i den simple beregningsmodel).

Opvarmningsbehovet for den betragtede måleperiode er stort set som forventet, hvilket primært skyldes at huset varme- og ventilationsanlæg har fungeret efter hensigten. 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 har rumtermostater i de enkelte rum været indstillet på ca. 20 °C, hvilket har resulteret i at indetemperaturen har været 20,1 °C i gennemsnit, hvor man normalt vil vurdere et forventet opvarmningsbehov for et hus ved en indetemperatur på 20 °C. I forbindelse med beregningen af det årlige opvarmningsbehov for huset anvendes sidstnævnte i Bsim-modellen.
- Gulvvarmeslangernes gennemsnitlige temperatur har været ca. 32 °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 32 °C, ellers vil opvarmningsbehovet blive urealistisk højt. Derfor anvendes den oprindelige antagelse om en gennemsnitlig temperatur på 30 °C.
- Varmegenvindingsenheden har delvist levet op til forventningerne idet den tørre temperaturvirkningsgrad under normale forhold (samme luftmængde i udsugning og indblæsning) er målt til ca. 85 %. Ventilationsanlæggets frostsikring (neddrøsling af indblæsningsluften) vil i perioder bevirke at den oplevede virkningsgrad vil være nedsat, og hvis huset er beboet kan forventes at denne frostsikring vil blive aktiveret i ca. 200 timer om året (jf. [1]), hvilket er en meget begrænset periode. I modsat retning trækker udnyttelsen af den latente varme i udsugningsluften ved kondensation i varmeveksleren, men effekten er dog begrænset. I beregningen af det årlige opvarmningsbehov korrigeres varmevekslerens effektivitet til 85 %, idet der i den oprindelige årssimulering for huset er anvendt 90 %.
- Tidligere i rapporten er det bestemt at det årlige gennemsnitlige luftskifte relateret til utætheder i klimaskærmen er ca. 0,11 h⁻¹, hvor der oprindeligt var antaget 0,10 h⁻¹. Der anvendes derfor et luftskifte ved infiltration på 0,11 h⁻¹.

Hvis man ændrer disse forhold i BSIM-modellen som tidligere er sammenlignet med målingerne, og herefter gennemfører en årssimulering på baggrund af typiske vejrdato får man energibalancen vist i Tabel 14. Til sammenligning er den oprindeligt forventede energibalance opstillet (beregnet i den første rapport fra projektet).

Tabel 14: Beregnet energibalance for hele året [DRY].

Energibalance		Oprindelig model [kWh]	Revideret model [kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	4932	5319
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-760	-834
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	-103	-93
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	1691	1691
Q_{udst}	Varme tilført fra udstyr	3747	3747
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-8812	-8800
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	-29	-34
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-666	-996

Det forventede opvarmningsbehov for huset er altså ca. 5319 kWh, hvilket svarer til ca. 51 % af den nugældende energiramme.

3.4 Målinger af årligt varmekonsum

For at få et billede af husets faktiske energiforbrug på årsbasis er der i Tabel 15 redegjort for aflæsninger af det samlede energiforbrug (fjernvarmeværkets måler).

Tabel 15: Aflæst totalt energiforbrug for huset.

Dato [-]	Akkumuleret forbrug [kWh]
04.09.02	0
18.11.02	3651
18.12.02	4771
17.01.03	6333
11.02.03	7475
05.05.03	9641

I den første periode, fra d. 04.09.02 til d. 18.11.02, bliver der brugt meget varme, idet huset ikke var færdigbygget på dette tidspunkt. Først ultimo september var klimaskærmen færdiginstalleret, idet de sidste arbejder i denne forbindelse var etablering af ydervægsisolering og skalmur samt fugning. Varmen blev tilsluttet nogle uger forinden af hensyn til især udtørringen af betondækket. Ventilationsanlægget har fungeret normalt fra d. 18.11.02. Huset har i øvrigt været ubeboet i hele perioden og der har ikke været noget nævneværdigt forbrug af varmt brugsvand.

Det ses at der i perioden fra d. 18.11.02 til d. 05.05.03, der udgør ca. 75 % af fyringssæsonen, har været et samlet energiforbrug på 5990 kWh. De 5764 kWh er varme afsat i gulvvarmeanlægget og de resterende ca. 250 kWh er varmetab fra varmtvandsbeholder og varmerør, som medregnes i simuleringerne som et tillæg til det interne varmetilskud. En simulering med den reviderede model for ovennævnte periode, hvor der er regnet med et internt varmetilskud svarende til at huset har været ubeboet hele perioden (= 300 W, jf. tidligere i rapporten), giver et forventet varmekonsum på

6072 kWh. Det målte forbrug er altså lidt mindre end forventet, og kan hænge sammen med forskelle mellem de forudsatte og de faktiske forhold.

Det er forsøgt at verificere eventuelle forskelle i de forventede (simulerede) og faktiske udeklimaforhold. Målinger foretaget af DMI (Danmark Meteorologiske Institut) i Sjælsmark (tæt på Snekkersten) viser at middeludetemperaturen i perioden har været præcis den samme som i referenceåret (1,9 °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 har solindfaldet i perioden været ”normalt”. Der har ikke kunne konstateres nogle væsentlig forskel i den faktiske indetemperatur i huset og den forventede. En årsag til ovennævnte forskel kunne blot være at størrelsen af det interne varmetilskud var sat for højt. Hvis det interne varmetilskud reduceres fra de 300 W til 215 W svarer det beregnede energiforbrug til det målte forbrug (forudsat at 90 % af varmetilskuddet kan udnyttes til opvarmning).

4 KONKLUSION

Denne rapport har beskrevet en række detaljerede målinger af et hus, som forventes at have et opvarmningsbehov som ligger ca. 50 % under 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 meget lille, når alle usikkerheder omkring materialedata etc. tages i betragtning.

Der har været en forventning om at temperaturvirkningsgraden for den varmegenvindingsenhed som er anvendt i huset havde en virkningsgrad på 90 %, men de detaljerede målinger har vist at den er ca. 85 %. Dette medfører en lille forøgelse af opvarmningsbehovet for huset, i forhold til det oprindeligt forventede. I forbindelse med målinger på ventilationsanlægget har det kunne konstateres at nedreguleringen af indblæsningsluftmængden, der skal sikre at varmeveksleren forbliver fri for is, er utilstrækkelig. Der er behov for en styring der hurtigere nedregulere indblæsningen, evt. stopper den helt eller en anordning der sørger for et by-pass af veksleren.

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 $0,10 \text{ h}^{-1}$ eller mindre, idet man i tidligere projekter omhandlende lavenergihuse har opnået dette niveau. En måling har vist at infiltrationen i huset er lidt større, $0,11 \text{ h}^{-1}$. Den samme værdi kan forventes som gennemsnit over fyringssæsonen.

Temperaturen i gulvvarmeslangerne har også en stor betydning for husets opvarmningsbehov, og det har vist sig at denne ligger lidt højere end forventet. Den gennemsnitlige temperatur i gulvvarmeslangerne i den betragtede periode var ca. $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Det forventedes at temperaturen i hvert tilfælde kunne holdes under $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette medfører en lille forøgelse af transmissionstabet gennem terrændækket og en forøgelse af transmissionstabet gennem kuldebroen ved fundamentet. Alt i alt vil dette forhold naturligvis påvirke opvarmningsbehovet en smule i negativ retning.

4.1 Beregningsmodel vs. målinger

Når de uoverensstemmelser der er mellem den oprindelige teoretiske udformning af husets 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 24. Januar 2003 til 10. Februar 2003 til ca. 892 kWh. Det målte opvarmningsbehov for denne periode er en smule lavere, 867 kWh. Hvis man foretager en mere detaljeret beregning vha. simuleringsprogrammet BSIM 2000, får man et forventet opvarmningsbehov som er en smule lavere end det målte, svarende til 855 kWh, og alt i alt må det konkluderes at BSIM 2000-modellen giver en særdeles fornuftig vurdering af husets opvarmningsbehov under givne randbetingelser.

4.2 Opvarmningsbehov for fyringssæson

Den beregningsmodel som benyttes til sammenligning med målingerne er justeret således at der kan foretages en realistisk vurdering af opvarmningsbehovet for fyringssæsonen.

Oprindeligt forventedes det at opvarmningsbehovet for fyringssæsonen skulle være ca. 4932 kWh, og hvis man gennemfører simuleringen af opvarmningsbehovet for fyringssæsonen efter

ændringerne på baggrund af målingerne får man 5319 kWh, hvilket svarer til ca. 51 % af den nu gældende energiramme. Huset kan altså forventes kun at bruge lidt mere energi end oprindeligt forventet, og den primære grund hertil er den lidt lavere temperatureffektivitet for varmeveksleren i forhold til hvad der forventedes.

Projektets oprindelige formål var at videreudvikle den eksisterende husløsning til at niveau svarende til en reduktion af energirammen på mindst 33 % (dvs. 7035 kWh), og dette mål er altså til fulde opfyldt.

Målinger af varmeforbrug til rumopvarmning i perioden medio november 2002 til primo maj 2003 (ca. 75 % af fyringssæsonen) viser at dette forbrug stort set svarer til det forventede (simulerede) forbrug, idet der er taget højde for forskelle i randbetingelser mm.

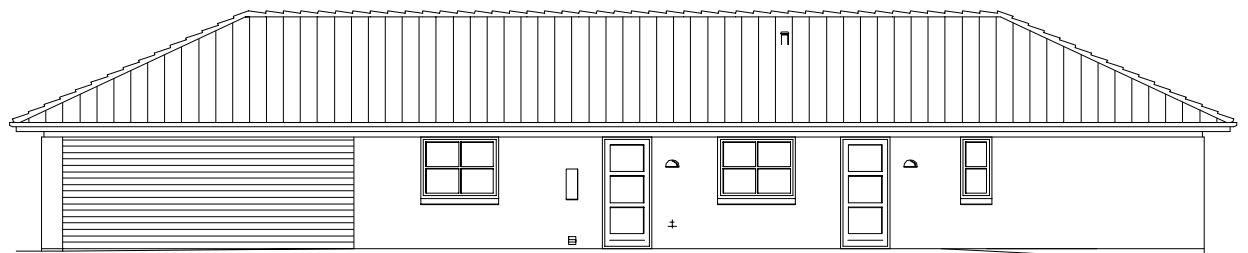
5 REFERENCER

- [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-056, BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 2003.
- [3] Energi 2000. Handlingsplan for en bæredygtig udvikling. Energiministeriet, april 1990.
- [4] ISO/FDIS 12569:2000. Thermal performance of buildings – Determination of air change in buildings – Tracer gas dilution method.
- [5] EN 13829:2000. Thermal performance of buildings – Determination of air permability of buildings – Fan pressurization.
- [6] PrEN ISO 13790. Thermal performance of buildings – calculation of energy use for space heating
- [7] 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.
- [8] SBI-Anvisning 184. 1995.
Bygningers energibehov. Varmeisolering, Konstruktionseksempler, Ventilation, Belysning. Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), Danmark. 1995.
- [9] BSIM2000: Et integreret EDB-værktøj til termisk analyse af bygninger og installationer (afløseren for Tsb3). Statens Byggeforskningsinstitut, 2002.
- [10] 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. Tegningerne er generelt ikke målfaste og det er ikke intentionen at tekst på tegningerne skal kunne læses. Der henvises i stedet for til beskrivelsen af huset i rapportens kapitel 2.

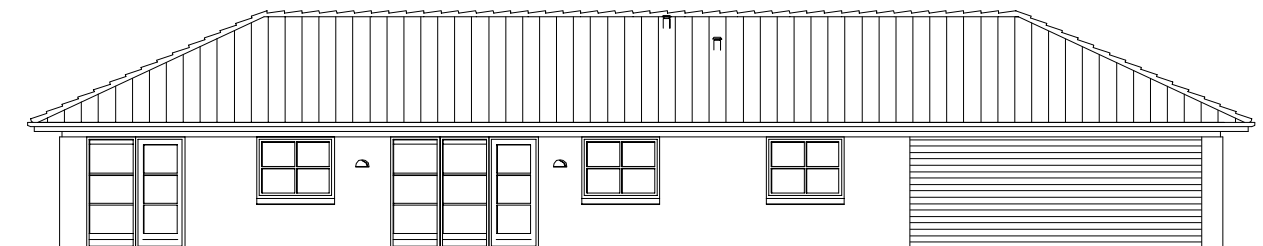
Bilag 1: Facader



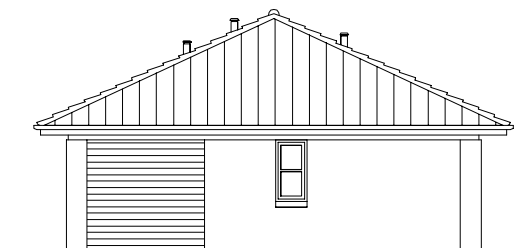
Facade mod Øst



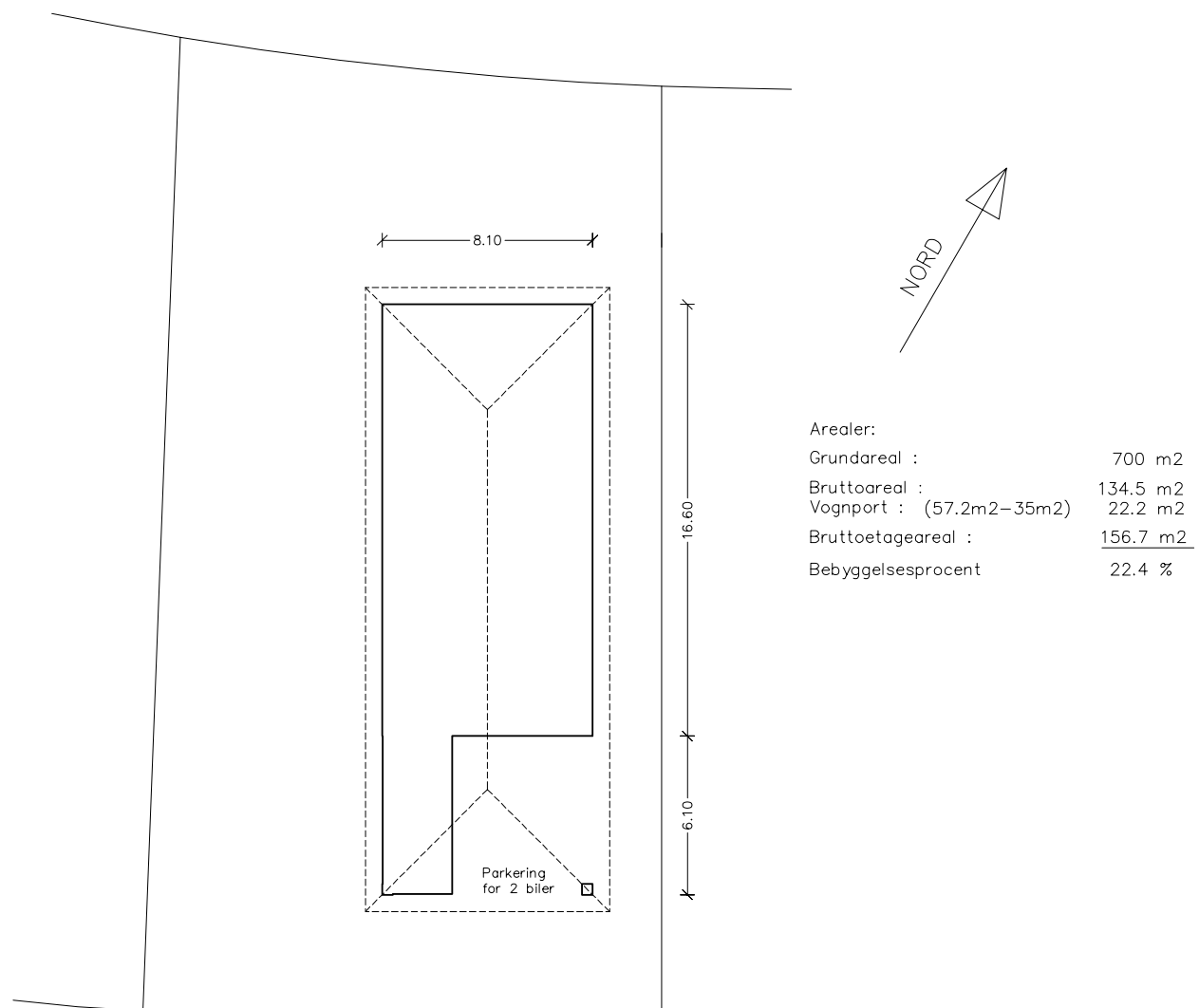
Gavl mod Nord



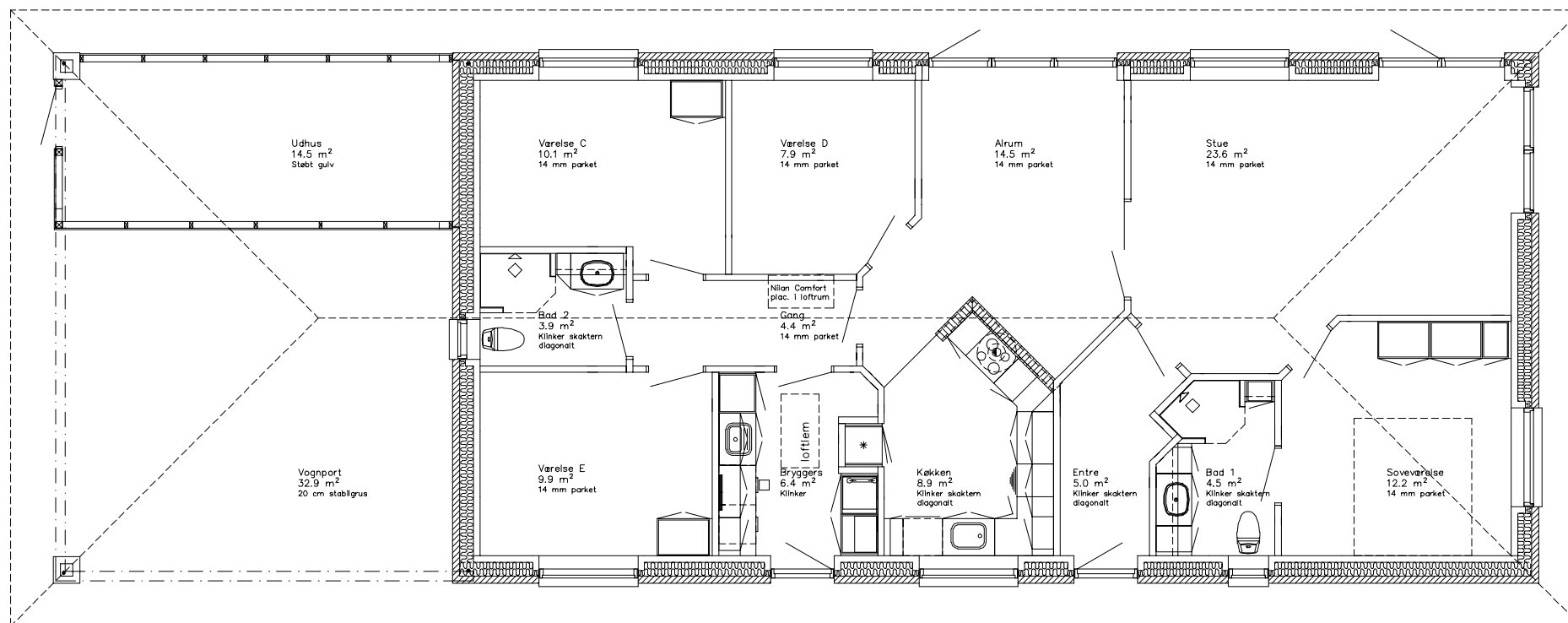
Facade mod Vest



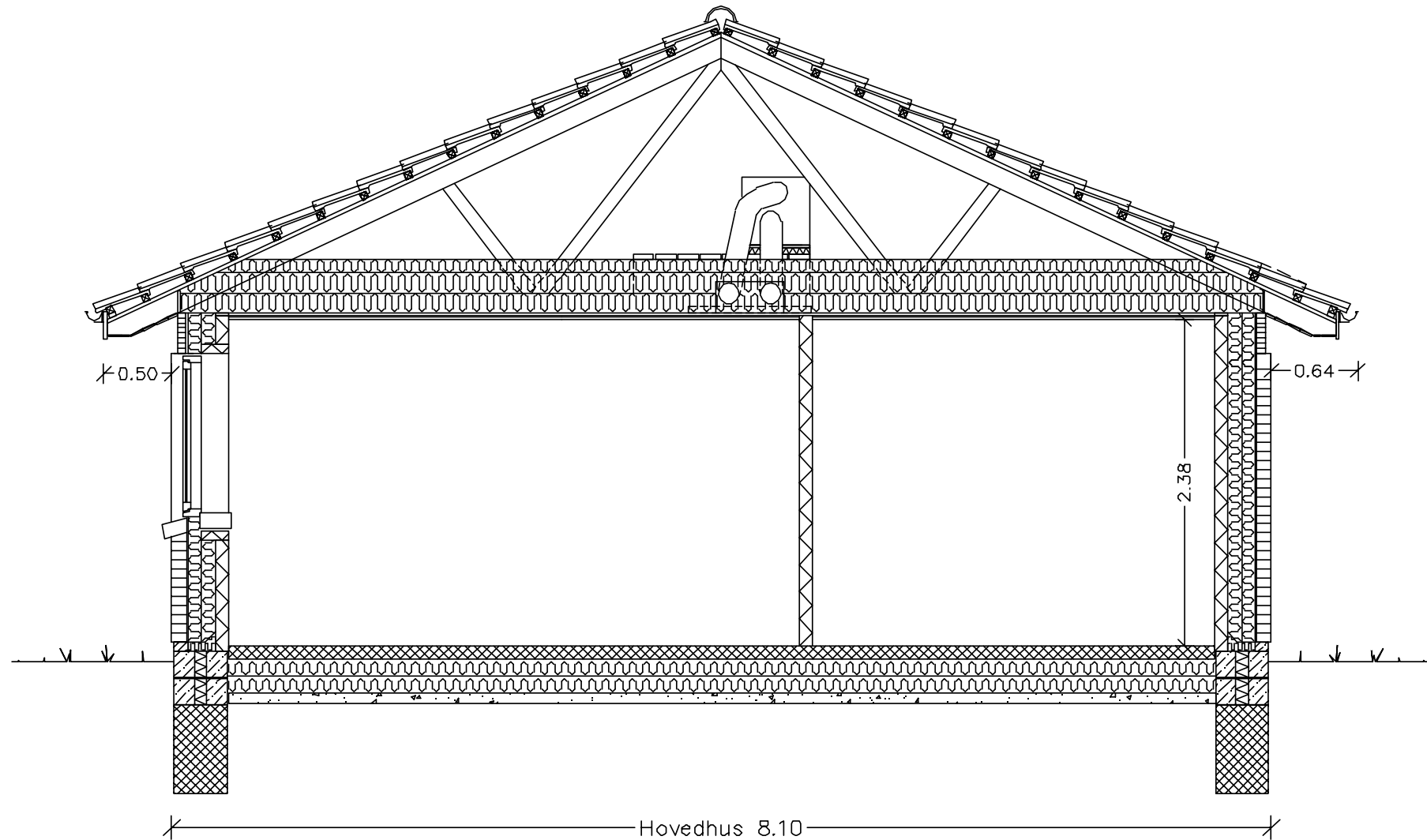
Gavl mod Syd

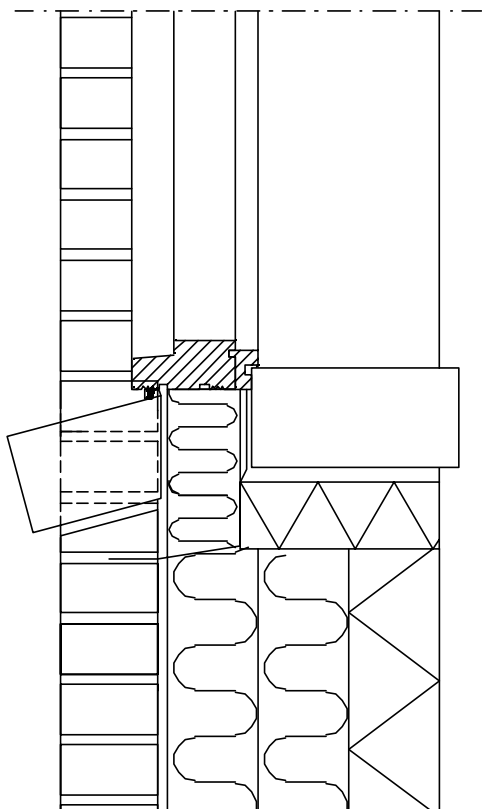
Bilag 2: Situationsplan

Bilag 3: Grundplan

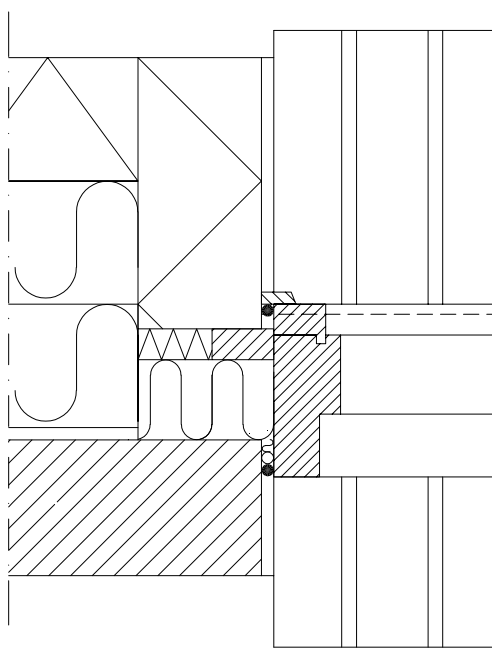
Opvarmet bruttoareal: 135 m²

Bilag 4: Tværsnit

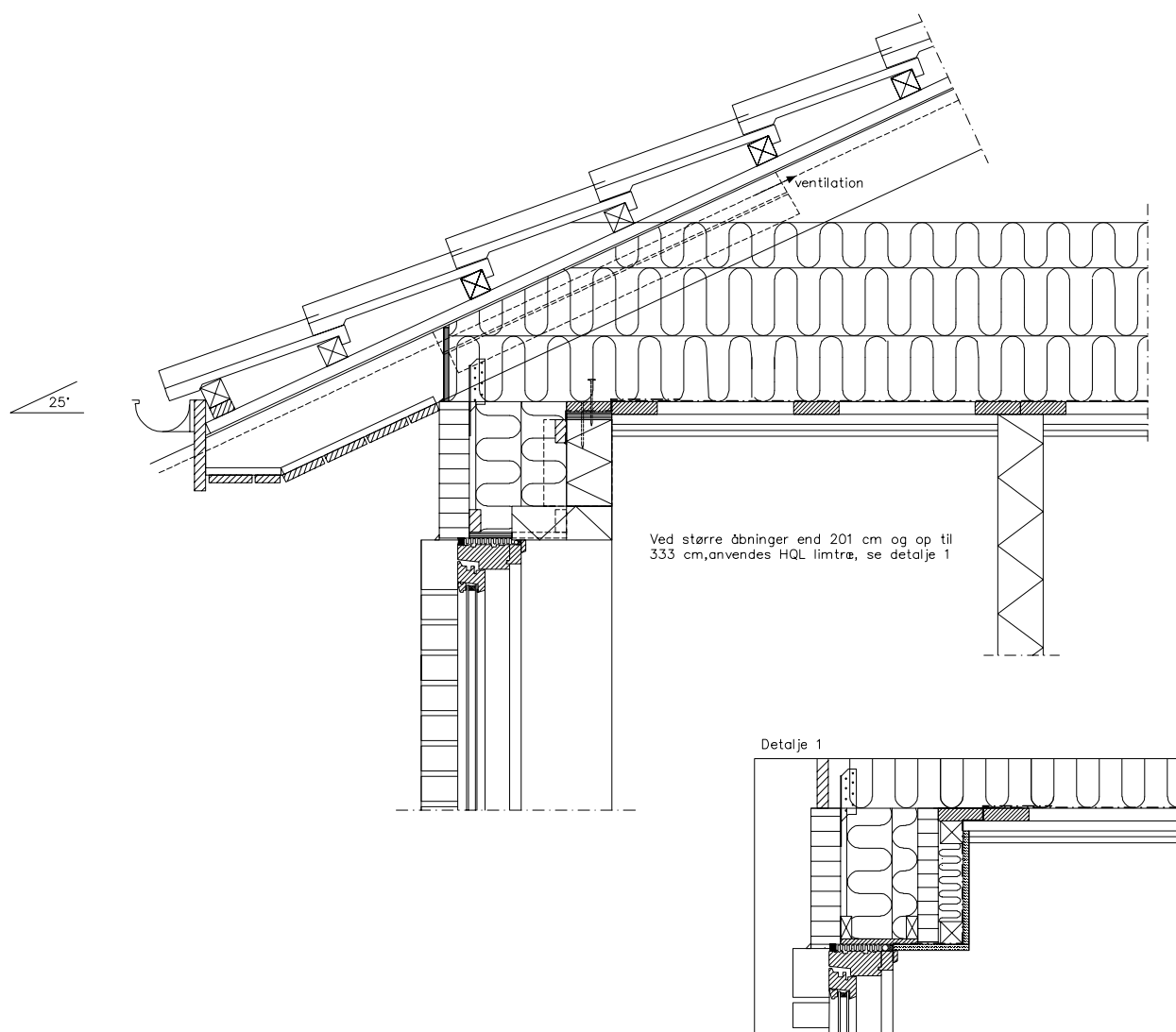




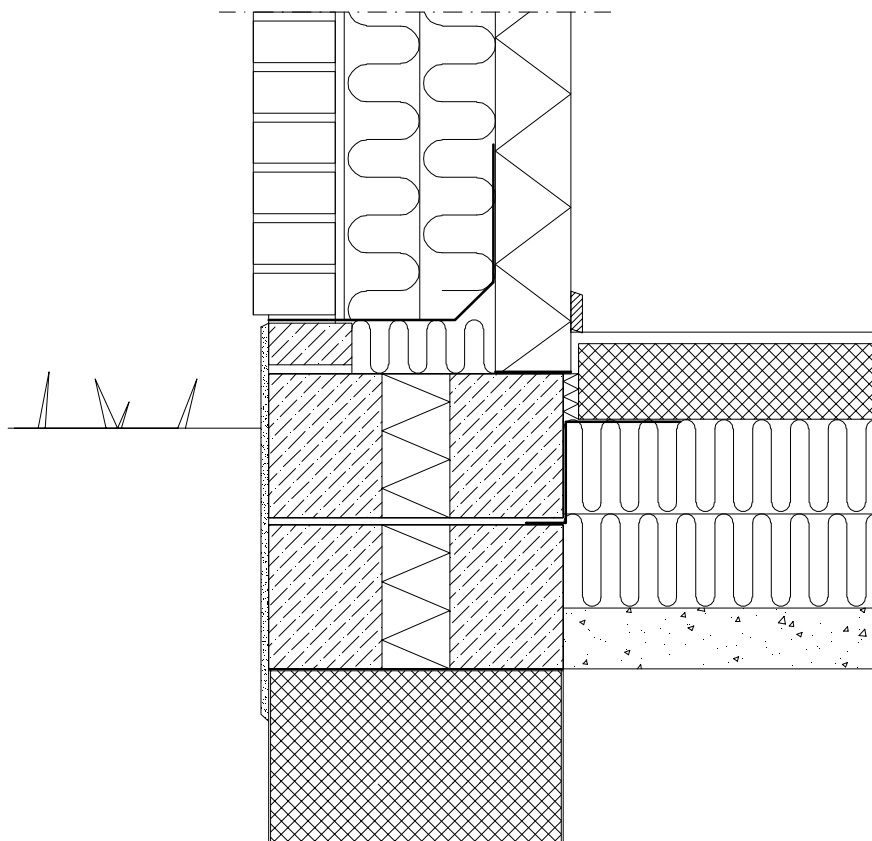
Bilag 5: Lodret snit i underfals



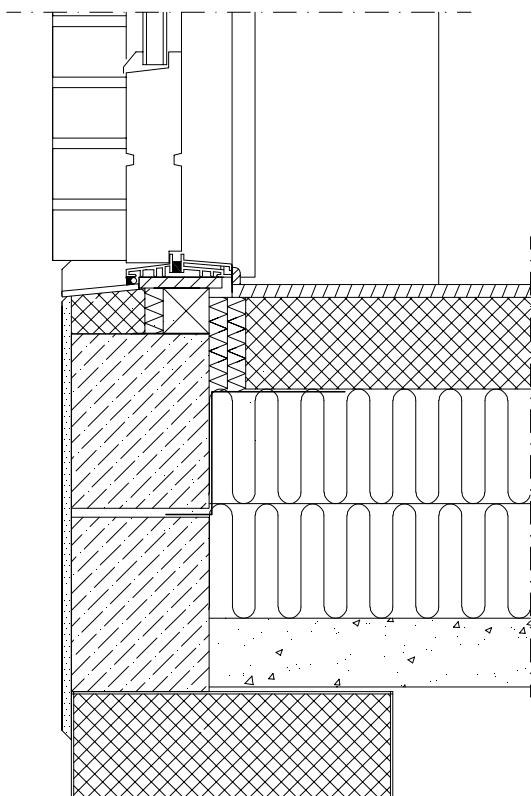
Bilag 6: Vandret snit i sidefals



Bilag 7: Tagfodsdetalje

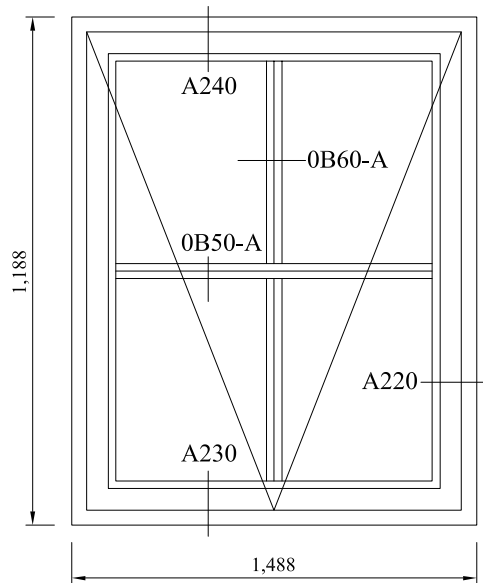


Bilag 8: Fundamentsdetalje ved mur

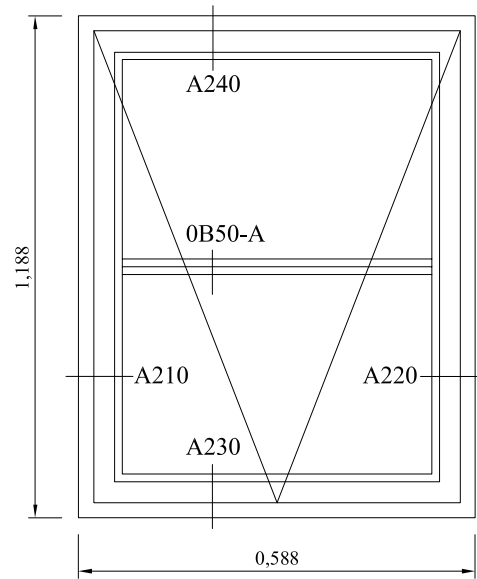


Bilag 9: Fundamentsdetalje ved døre. Ved høje faste vinduespartier er alu-bundstykket erstattet af et karmprofil i træ.

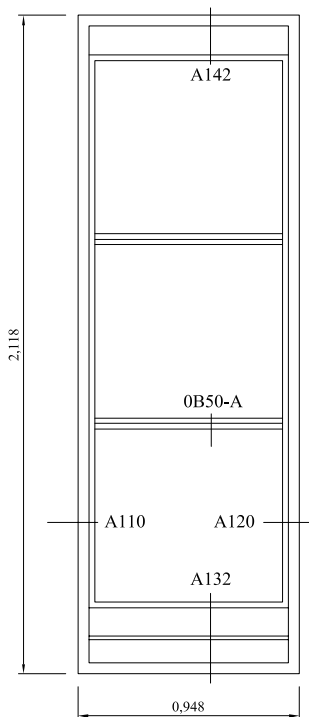
TOPSTYRET VINDUE MED KRYDSSPROSSE
TYPE A21.00



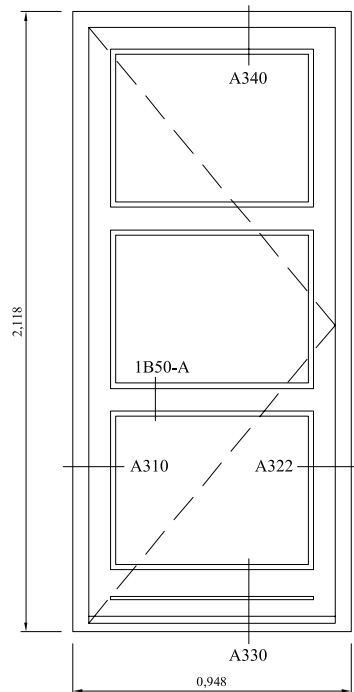
TOPSTYRET VINDUE MED 1 V SPROSSE
TYPE A21.00



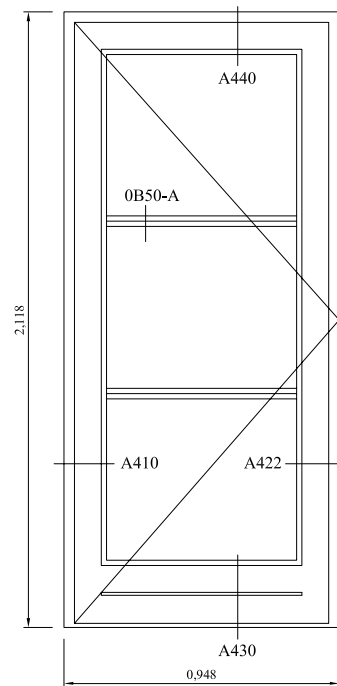
SIDEPARTI MED 2 SPROSSER
TYPE A12.00



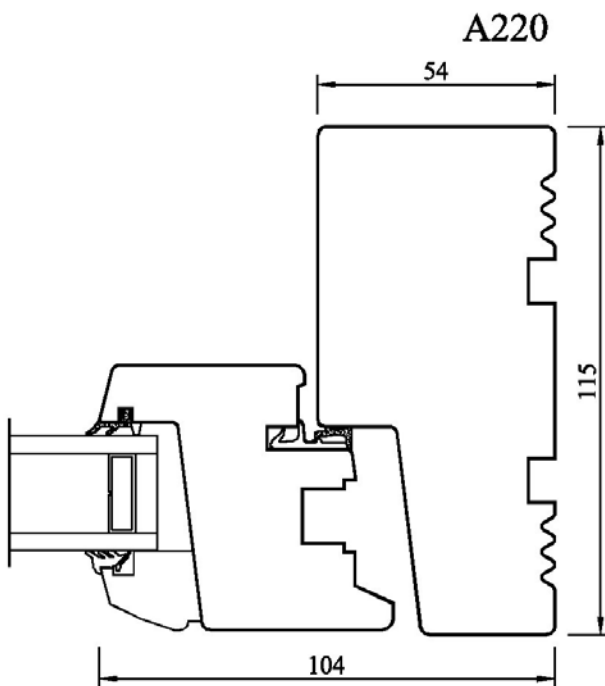
INDADG. FACADEDØR
TYPE A32.12



UDADG. TERRASSEDØR MED 2 SPROSSER
TYPE A31.00



Bilag 10: Vindues- og dørtyper (mål er meter)



Bilag 11: Typisk snit i ramme-karm: sidekarm i oplukkelige vinduer (mål er i mm)