

Solvægshus med integreret varmeanlæg

Målinger og beregninger

Kaj Lynggaard Isaksen



MEDDELELSE NR. 263
SEPTEMBER 1994
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

FORORD

Denne rapport beskriver målinger og beregninger med detaljerede parametervariationer i et solvægshus med integreret varmeanlæg. Varmelagringen sker i et stenlager under huset. Projektet er finansieret af Energistyrelsen og er en del af forskningsområdet: "Energianvendelse i bygninger" under Energiministeriets forskningsprogram EFP-92. Projektets ENS journal-nr. er 1213/92-0001.

Nærværende rapport udgør afslutningen af projektets 3. fase. Fase 1 og 2 er beskrevet i: "Solvægshus med integreret varmeanlæg - Projektering og opbygning" af Olaf Bruun Jørgensen og Svend Aage Svendsen /1/; samt "Uventilerede solvægge i ældre boligblok - fuldskalaforsøg" af Peter Fritzel og Olaf Bruun Jørgensen /2/. 1. og 2. fase er en del af forskningsområdet: "Energianvendelse i bygninger" under Energiministeriets forskningsprogram EFP-90 og EFP-91. Projektets ENS journal-nr. er 1213/90-0001 og 1213/91-0001.

Projektet er gennemført ved Laboratoriet for Varmeisolering med deltagelse af følgende medarbejdere:

Kaj Lynggaard Isaksen, civilingeniør.
Svend Svendsen, professor, lic.techn.
Peter Cort Jensen, tømrer.
Mogens Jørgensen, elektronikmekaniker.

Huset er opført af entreprenør- og ingeniørfirmaet B. Nygaard Sørensen A/S, hvor projektet er blevet varetaget af Palle Willems. Herudover har projektet fået fuld eller delvis sponsering fra følgende firmaer, nævnt i alfabetisk orden:

Belimo A/S.
Danogips A/S.
Dansk Sundolitt A/S.
Gränges Danmark A/S.
Helmuth Oppenheim aps.
Lemvig-Müller & Munck A/S.
Novenco Øst.
RIAS.
Rockwool A/S.
Systemvinduet A/S, Primo System.
Åholm & Christensen A/S.

INDHOLDSFORTEGNELSE

RESUMÉ	1
SUMMARY	3
1 INDLEDNING	5
1.1 Baggrund og formål	5
1.2 Konstruktionsbeskrivelse	5
1.3 Varmeanlæg	7
1.3.1 Styringsstrategi	8
2 MÅLEUDSTYR	11
2.1 Dataloggere	11
2.1.1 Termoelementer	11
2.1.2 Pyranometre	12
2.2 Vejrstation	12
2.3 Lufthastighedsmåler	14
2.4 Luftskeftemålinger	14
3 RESULTATER FRA FORSØGSHUSET	17
3.1 EDB-program	17
3.2 Beregningsforudsætninger	17
3.3 Energiforbrug og temperaturforhold	19
3.4 Vurdering af SUNCODE	25
4 BEREGNINGER PÅ FULDSKALA SOLVÆGSHUS	27
4.1 Beregningsforudsætninger	27
4.2 Energiforbrug og temperaturforhold	29
4.3 Parametervariationer	31
4.3.1 Vinduer, solvægge og luftsolfangere	32
4.3.2 Sadeltag	33
4.3.3 Ekstra isolering	34
4.3.4 Aerogel	34
5 KONKLUSION	39
REFERENCER	41
BILAG A	43
A 3 BYGNINGSBESKRIVELSE	44
A 4 MÅLEPROGRAM OG MÅLEUDSTYR	55
BILAG B	61

RESUMÉ

Et forsøgshus på ca. 25 m² er bygget på Laboratoriet for Varmeisoleringens forsøgsareal. Huset er bygget med det formål at afprøve, om konstruktionsprincipperne er anvendelige til nybyggeri af lavenergiboliger, der i høj grad udnytter solenergi.

I forsøgshuset er sydfacaden og taget udformet som en luftsolfanger, der leverer varme til et stenlager, der er placeret under huset. Facaderne mod øst, nord og vest fungerer som uventilerede passive solvægge. Væggene i huset består af 200 mm mineraluld med en luftspalte på hver side af mineralulden. Den udvendige luftspalte er luftsolfangeren/solvæggen, og den indvendige luftspalte bruges til opvarmning af rummet. Under gulvet og over loftbeklædningen er der ligeledes en luftspalte, der benyttes i en opvarmnings-situation.

Stenlageret og luftspalterne er fuldstændigt separeret fra indeluften for at undgå, at indeluften bliver inficeret med bakterier, der eventuelt kan befinde sig i stenlageret.

I perioden fra oktober 1992 til februar 1994 er der løbende foretaget målinger af temperaturer, solindfald og energiforbrug. Desuden blev der i samme tidsrum udført en række forsøg for at kontrollere styringen af indetemperaturen.

Det har vist sig muligt at opvarme stenlageret og senere benytte den oplagrede energi til at opvarme rummet med. Den højisolerede konstruktion giver anledning til meget høje indetemperaturer i sommerperioden. Dette kan dog afhjælpes ved udluftning og solafskærmning. Herved kan temperaturen for det meste holdes under 25°C.

Simuleringsprogrammet SUNCODE er benyttet til at beregne nettoenergibehovet i et solvægshus på 106 m². I basishuset, der principielt er opbygget af de samme materialer og samme konstruktion og anlægsudformning, er det totale energibehov til rumopvarmning 3150 kWh pr. år, og stenlageret leverer heraf 775 kWh, så nettoenergibehovet bliver derfor 2375 kWh pr. år. Der regnes her med et naturligt luftskifte på 0,1 h⁻¹ og en mekanisk ventilation på 0,5 h⁻¹ med en varmegenvindingsgrad på 60%.

Simuleringer med forskellige parametervariationer er foretaget for at undersøge effekten af bl.a. silika aerogeler. Den optimale beregnede løsning, hvor der er benyttet aerogeler i luftsolfangeren og vinduerne samt isoleret med 300 mm mineraluld, kommer nettoenergibehovet ned på 705 kWh pr. år. Dermed er det altså ikke lykkedes at finde en løsning, som gør solvægshuset selvforsynende med energi til rumopvarmning, men energimængden er dog så lav, at konstruktionen vil være interessant at afprøve i fuld skala.

SUMMARY

A test house with a ground area of about 25 m² was built at the university campus. The purpose of building the house was to test if the design principles could be used for building new low-energy houses, ie houses with an extensive use of solar energy.

In the test house the south facade and the roof were designed as an air solar collector supplying heat to a stone storage placed under the house. The east, north and west facades are working as unventilated passive solar walls. The walls of the house consist of 200 mm mineral wool with an air gap on each side of the mineral wool. The outside air gap is the air solar collector / solar wall, and the inner air gap is used for heating of the room. There are also air gaps under the floor and over the ceiling which are used for heating.

The stone storage and the air gaps are completely separated from the indoor air to avoid infection of the indoor air with bacteria that may be found in the stone storage.

From October 1992 to February 1994 continuous measurements were made of temperature, insolation and energy consumption. Over the same period of time a series of tests was made to check the indoor temperature control.

It was proved possible to heat the stone storage for subsequent use of the stored energy to heat the room. The highly insulated construction causes very high indoor temperatures during the summer. It was, however, possible to remedy that by ventilation and solar shading. In that way it was possible to keep the temperature below 25°C almost all the time.

The simulation programme SUNCODE was used to calculate the net energy consumption in a solar wall house with a ground area of 106 m². In the basic design of the house, for which the same material and the same construction and design were in principle used as in the test house the total energy consumption for heating was 3150 kWh per year, of that 775 kWh was supplied by the stone storage, and the net energy consumption was therefore 2375 kWh per year. The calculations were made under the supposition of a natural air change of 0.1 h⁻¹ and a mechanical ventilation of 0.5 h⁻¹ with a heat recovery of 60%.

The simulations were made to test the effect of eg silica aerogels in the air solar collector and the windows. The optimum calculated solution when using aerogels and an insulation of 300 mm mineral wool would give a net energy consumption of 705 kWh per year. It has thus not been possible to find a solution to make the solar wall house self-sufficient in energy for heating but the energy consumption was so low that it would be interesting to make a full-scale test of the design.

1 INDLEDNING

1.1 Baggrund og formål

Ved at anvende transparente dæklag med monolitisk silika aerogel i solvæggene har beregninger vist, at væggen bliver tabsfri i dagtimerne, hvis der blot er en bestrålingsstyrke svarende til en overskyet himmel. På solskinsdage vil der tilmed være et stort varmeoverskud, som kan lagres til senere.

I nybyggeri kan lagring af passiv solvarme ske andre steder end i muren, f.eks. hvis der etableres en luftstrøm mellem solvæggen og et lager. Muren behøver derfor ikke at være en tung konstruktion, men den kan laves som en let, højisoleret konstruktion, der mindsker varmetabet om natten.

Varmen føres fra lageret til huset via en luftspalte mellem en tynd indervæg og isoleringen. Dette sker i et lukket system, der ikke er i kontakt med friskluftforsyningen til huset. Dermed undgår man, at luften i huset får tilført urenheder eller bakterier fra stenlageret.

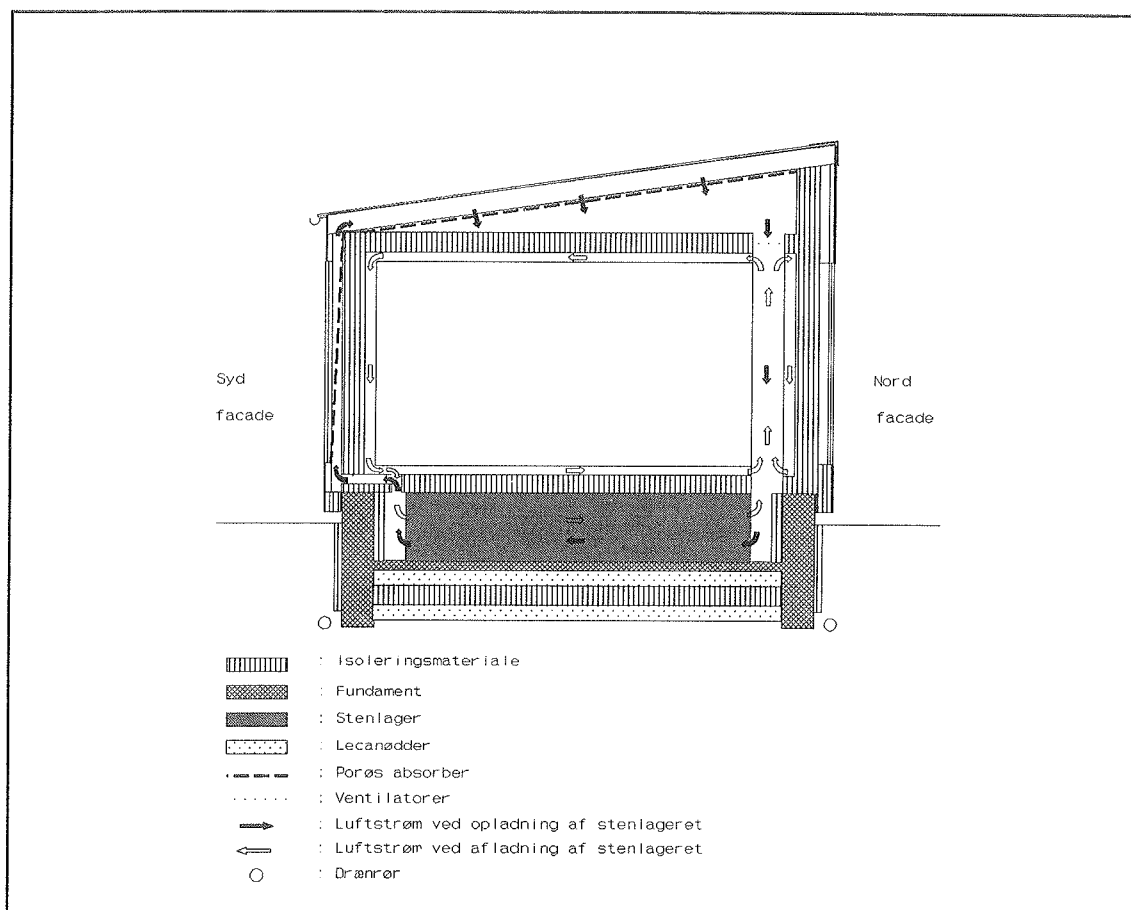
Ventilationsluften kan forvarmes af luften i lageret vha. en varmeveksler, det varme brugsvand kan hentes fra et traditionelt solvarmeanlæg. Huset bliver dermed praktisk taget selvforsynende med energi til opvarmning af rum og brugsvand. Desuden spares der anlægsudgifter til et konventionelt varmeanlæg.

Formålet med dette projekt er at projekttere og opbygge et hus, hvor rumopvarmningen er baseret på ovennævnte principper. Derefter skal beregninger og målinger af temperaturer og energiforhold eftervises, om konstruktionen og anlægsudformningen er egnet til nybyggeri af boliger eller ej.

1.2 Konstruktionsbeskrivelse

På LfV's forsøgsareal er der opbygget et forsøgshus på ca. 25 m² i ét stort rum. Huset er tegnet og bygget under ledelse af civ.ing. Olaf Bruun Jørgensen og professor, lic.techn. Svend Svendsen, LfV.

Husets klimaskærm, se figur 1.1, er udført af lette højisolerende konstruktioner. Sydfacaden og taget er udformet som solvægge/-fangere med luft som varmetransportende medium. Lagring af solvarmen sker i et stenlager under gulvet. Facaderne mod øst, nord og vest fungerer som uventilerede passive solvægge.



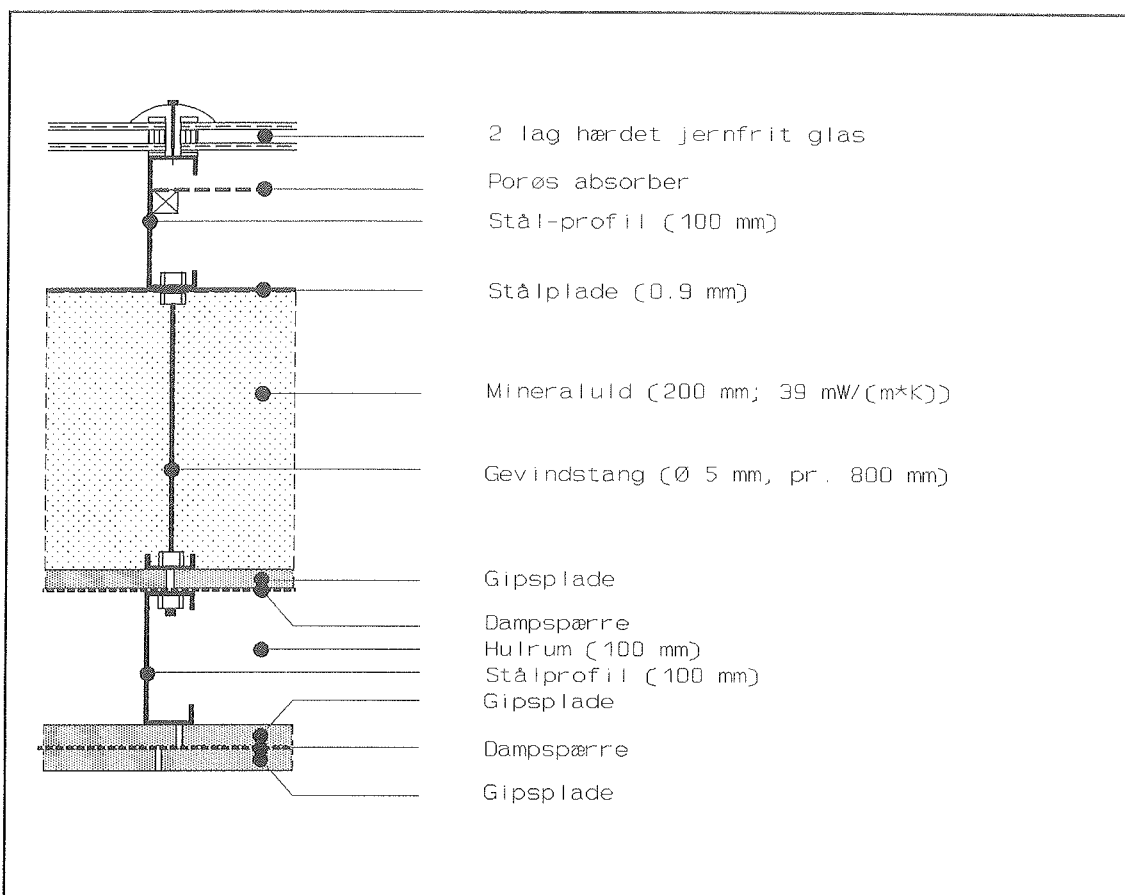
Figur 1.1 Principtegning af solvægshuset - fra /1/

Loftet bæres af 100 mm høje C-stålprofiler anbragt i hulrummet og i den nederste del af isoleringen. Hulrummet over loftet er isoleret fra tagrummet med en 12 mm gipsplade mellem stålprofilerne plus 200 mm mineraluld. Der er altså ingen ubrudt kuldebro mellem stue og tagrum.

Murens opbygning fremgår af figur 1.2. Stålprofilerne er placeret i begge hulrum for hver 1150 mm, hvilket netop er bredden af dækglasset. Stålprofilerne er fikseret vha. gevindstænger for hver 800 mm. Disse stænger udgør de eneste kuldebroer gennem mineralulden.

I væggene mod syd og nord er der placeret en dør, og mod øst og vest er der indsat et uoplukkeligt vindue med lavemissionsglas.

En mere detaljeret beskrivelse af konstruktionen findes i rapport 92-39 fra Laboratoriet for Varmeisolering /1/, og uddrag fra denne rapport er placeret i bilag A.



Figur 1.2 Vandret snit gennem sydfacaden - fra /1/

1.3 Varmeanlæg

Varmeanlæggets aktive kollektordel består som nævnt af sydfacaden og taget. Luften bliver trukket op gennem en porøs filt-absorber i sydfacaden og op under taget, der er lavet af transparente polycarbonatplader. Herfra bliver luften suget ned i tagrummet gennem endnu en porøs absorber, og via en ventilator sendt gennem en kanal og ned i stenlageret, hvor luften afgiver sin varme. Der er lidt støj i huset, når en af de to ventilatorer er i drift, men i et større hus vil man have mulighed for at placere kanalerne i et bryggers eller lignende, så støjen ikke generer beboerne.

Stenlageret, der er beliggende under gulvet, er 0,95 m højt og fylder stort set hele gulvarealet. Stenene er vaskede strandsten og har en diameter på 5-20 cm.

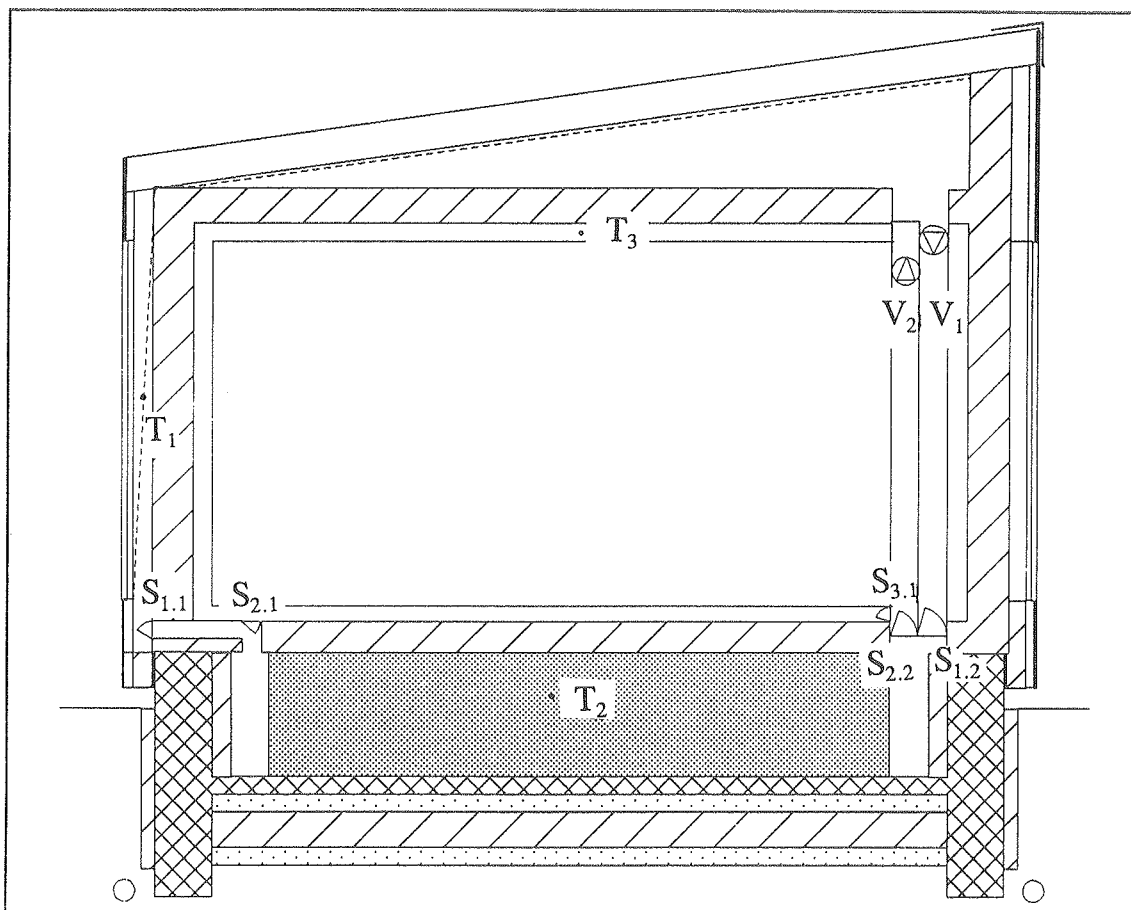
Varmen, der skal bruges til at opvarme stuen, trækkes vha. en ventilator modstrøms gennem stenlageret og via den anden kanal op i hulrummet over loftbeklædningen, der ligesom væggene består af to 13 mm gipsplader. Herved skabes et overtryk, der bevirker, at luften bliver presset ned i det indvendige hulrum i hver af de fire vægge og videre ned i hulrummet under gulvet. Herfra bliver noget af luften suget ind i

ventilationskanalen for eventuelt at regulere temperaturen af opvarmningsluften, mens resten forsvinder ned i stenlageret igen.

Dette opvarmningssystem bevirker, at både loft og gulv samt alle fire vægge virker som varmeafgiver. Den målte overtemperatur i det indvendige hulrum er dog så beskeden, at der ikke opstår strålingsasymmetri. Opvarmningsluften forbliver i et separat system, der ikke kommer i forbindelse med rumluften. Herved undgås problemer med luftkvaliteten i opholdsrummet.

1.3.1 Styringsstrategi

Varmesystemet kan opdeles i to separate systemer: opvarmning af lageret og opvarm-



Figur 1.3 Placering af ventilatorer, spjæld og termofølere

ning af det indvendige hulrum. Hvilket af de to systemer, der skal køre bestemmes af temperaturen tre forskellige steder. Termoelement 1 (T_1) er placeret på absorberfilten i det ventilerede hulrum på sydsiden, termoelement 2 (T_2) er stukket ned i stenlageret, og termoelement 3 (T_3) ligger i det indvendige hulrum over loftbeklædningen. På figur 1.3 er placeringen af ventilatorer (V), spjæld (S) og termofølere (T) skitseret.

Hvis $T_1 - T_2 \geq 10^\circ\text{C}$, vil der foregå en opvarmning af lageret, og ventilatorer og

spjæld vil reagere som vist i tabel 1.1.

V_1	V_2	$S_{1,1}$	$S_{1,2}$	$S_{2,1}$	$S_{2,2}$	$S_{3,1}$
tændt	slukket	åbent	åbent	lukket	lukket	lukket

Tabel 1.1 Ventilator- og spjæld-indstillinger ved opvarmning af lageret

Hvis $T_1 - T_2 < 10^\circ\text{C}$ og $T_2 - T_3 \geq 3^\circ\text{C}$ og $T_3 < 20^\circ\text{C}$, vil der foregå en opvarmning af det indvendige hulrum. Ventilatorer og spjæld indstiller sig som vist i tabel 1.2.

V_1	V_2	$S_{1,1}$	$S_{1,2}$	$S_{2,1}$	$S_{2,2}$	$S_{3,1}$
slukket	tændt	lukket	lukket	åbent	styres	styres

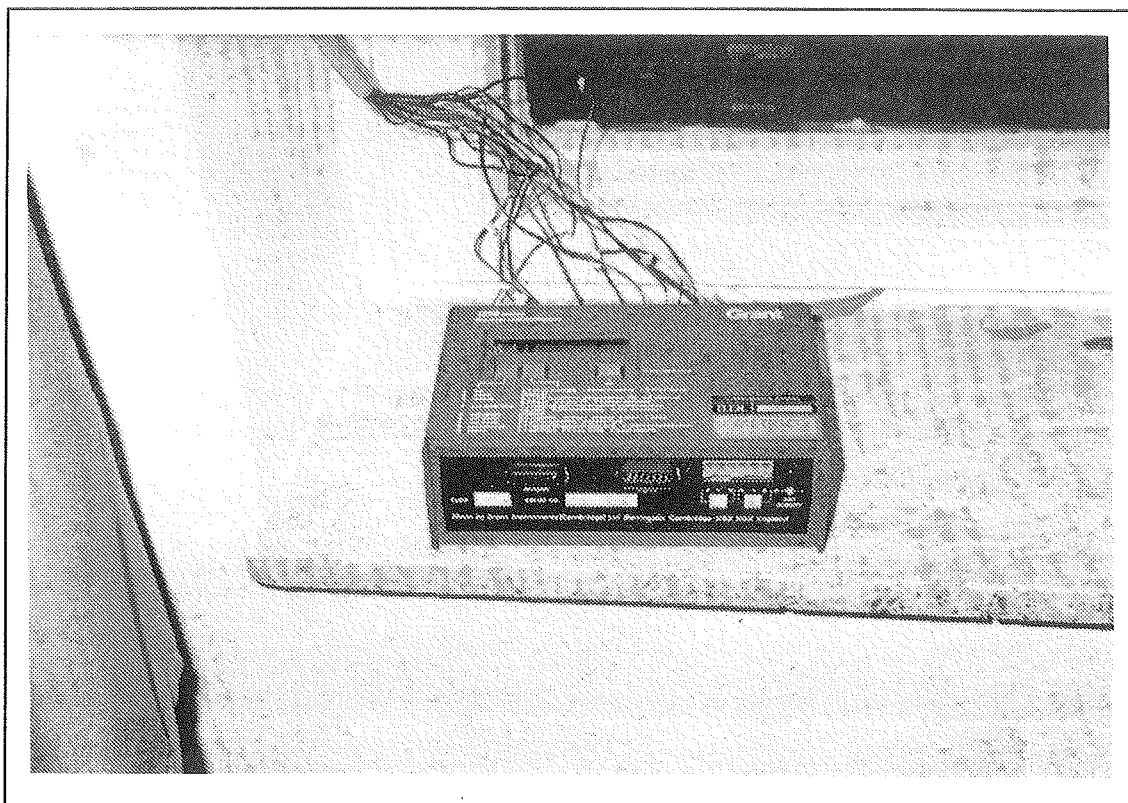
Tabel 1.2 Ventilator- og spjæld-indstillinger ved opvarmning af det indvendige hulrum

Ventilatorerne og spjældene styres elektronisk. Man har naturligvis mulighed for at ændre sætpunkterne på ulighederne, hvis denne styringsindstilling ikke fungerer tilfredsstillende, ligesom der er mulighed for at indstille ventilatoren, der blæser luft ned i stenlageret, på tre forskellige hastigheder. Ved opvarmning af hulrum er det angivet i skemaet, at spjældene $S_{2,2}$ og $S_{3,1}$ "styres". Dette bevirker, at såfremt lagerets temperatur er for høj, kan luften herfra blandes med den koldere luft under gulvet, inden den blæses ind i det indvendige hulrum. Det bemærkes, at opvarmning af lager og hulrum ikke kan ske samtidigt.

2 MÅLEUDSTYR

2.1 Dataloggere

Til at opsamle målinger af temperaturer og solindstråling benyttes to dataloggere af typen Grant, 1200 series, Squirrel meter/logger, se figur 2.1. Grant har otte indgange til temperaturmålinger og otte indgange, der registrerer en spændingsforskel (eller en strømstyrke). Den målte spændingsforskel kan omregnes til en temperatur eller en solbestrålingsstyrke, alt efter om der er tilkoblet et termoelement eller et pyranometer.



Figur 2.1 Grant datalogger

Målinger, der skal bruges som inddata til beregningsprogrammet SUNCODE /3/, gemmes på timebasis. Alle registrerede timeværdier er fundet ved at opsamle en måling hvert minut og tage middelværdien af de 60 opsamlinger. Til analysen af temperaturforholdene i solvægshuset gemmes middelværdien hvert 10. minut.

2.1.1 Termoelementer

I forsøgshuset er der benyttet termoelementer af kobber-konstantan. Termoelementerne er placeret udfra et ønske om at have data til input og check af SUNCODE, samt at

kunne følge temperaturerne i forsøgshusets hulrum og stenlageret. I bilag A er der vist en oversigt over placeringen af de omkring 60 termoelementer.

Halvdelen af indgangene i Grant dataloggerne registrerer som nævnt en spændingsforskel. Ved at måle en referencetemperatur (T_{ref} [°C]) ved tilslutningen til dataloggeren kan man omregne spændingsforskellene til temperaturer. Idet der benyttes kobberkonstantan gælder nedenstående formel, som er et tilnærmet udtryk, der er udledt på LfV.

$$T_m = T_{ref} + 12,95 \cdot S$$

$$T_d = S \cdot (25,9 - 0,06 \cdot T_m + 0,00027 \cdot T_m^2 - 0,000001 \cdot T_m^3)$$

$$T_{termo} = T_{ref} + T_d$$

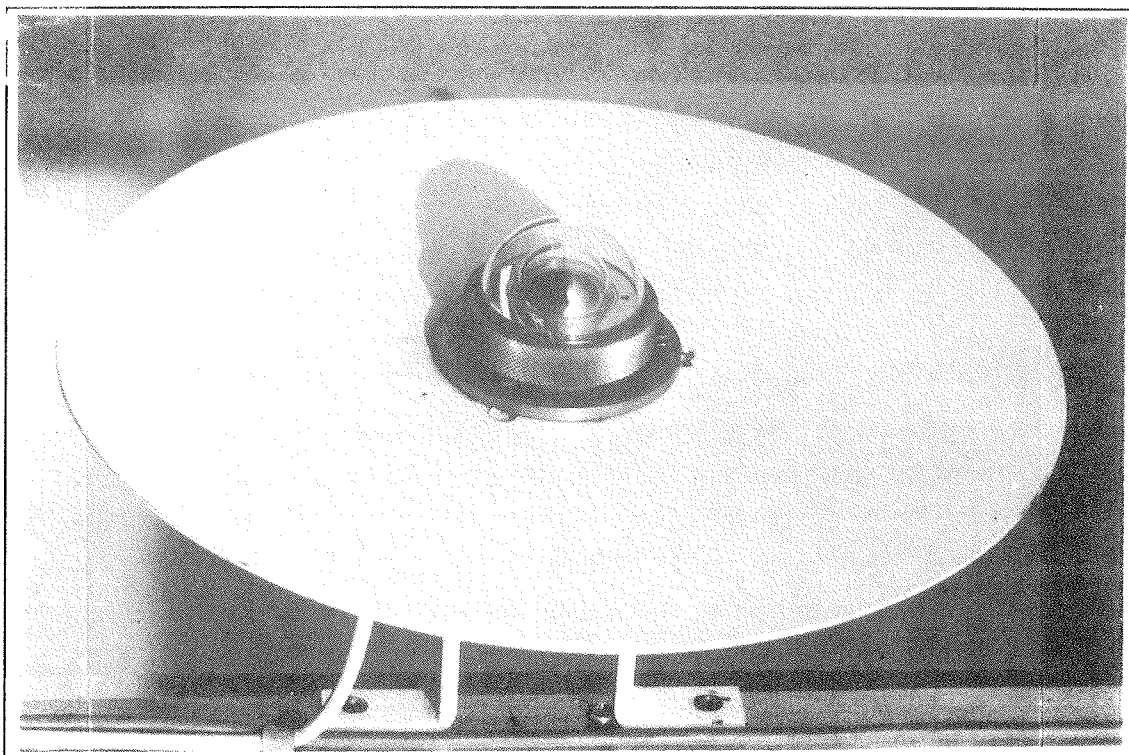
hvor S er den målte spændingsforskel [mV]
 T_{ref} er den målte referencetemperatur [°C]
 T_{termo} er temperaturen af termoelementet [°C]
 T_m og T_d er hjælpe størrelser [°C]
konstanterne er tilpasset til ovennævnte enheder

2.1.2 Pyranometre

Det totale (direkte + diffus + reflekteret) solindfald på de fire solvægge måles med et pyranometer fra Kipp & Zonen, model CM5. Pyranometeret består af to koncentriske halvkugler af glas, hvorunder der er anbragt en lille sort plade, se figur 2.2. Idet kortbølget stråling (sollys) kan passere glasset, absorberes den i pladen, som derved får en højere temperatur. Bag pladen findes en termosøjle, som omsætter temperaturstigningen til en spændingsforskel. Pyranometeret tilsluttes dataloggeren, og vha. en kalibreringsfaktor, der er specifik for hver enkel pyranometer, kan spændingsforskellen omsættes til en solbestrålingsstyrke [W/m^2].

2.2 Vejrstation

Beregninger på forsøgshuset foretages både med vejrdato fra det danske referenceår (TRY) /4/ og med aktuelle målte vejrdato. De sidstnævnte bruges bl.a. til at sammenholde programmet SUNCODE's resultater med målinger foretaget i forsøgshuset. De aktuelle vejrdato er målinger fra LfV's målestation. Afstanden til forsøgshuset er kun ca. 100 m, og derfor kan vejrdatoene antages at gælde for forsøgshuset.



Figur 2.2 Pyranometer fra Kipp & Zonen, model CM5, monteret på forsøgshuset

Målestationen måler hvert andet minut lufttemperatur, dugpunktstemperatur, global stråling, direkte stråling, diffus stråling, stråling på lodret mod N, S, Ø og V, belysning på vandret, infrarød stråling fra himlen, vindhastighed og andre parametre efter behov. SUNCODE har brug for timeværdier af fem målinger: direkte normal stråling, global stråling, udelufttemperatur, dugpunktstemperatur og vindhastighed. Vejrdatafilens format, som er vist i tabel 2.1, er komprimeret ASCII.

Variabel	Enhed	Størrelse af datastreng
1. Direkte normal stråling	kJ/m^2	4
2. Global stråling	kJ/m^2	4
3. Udelufttemperatur	$10 \cdot ^\circ\text{C}$	5
4. Dugpunktstemperatur	$10 \cdot ^\circ\text{C}$	5
5. Vindhastighed	$10 \cdot \text{m/s}$	4

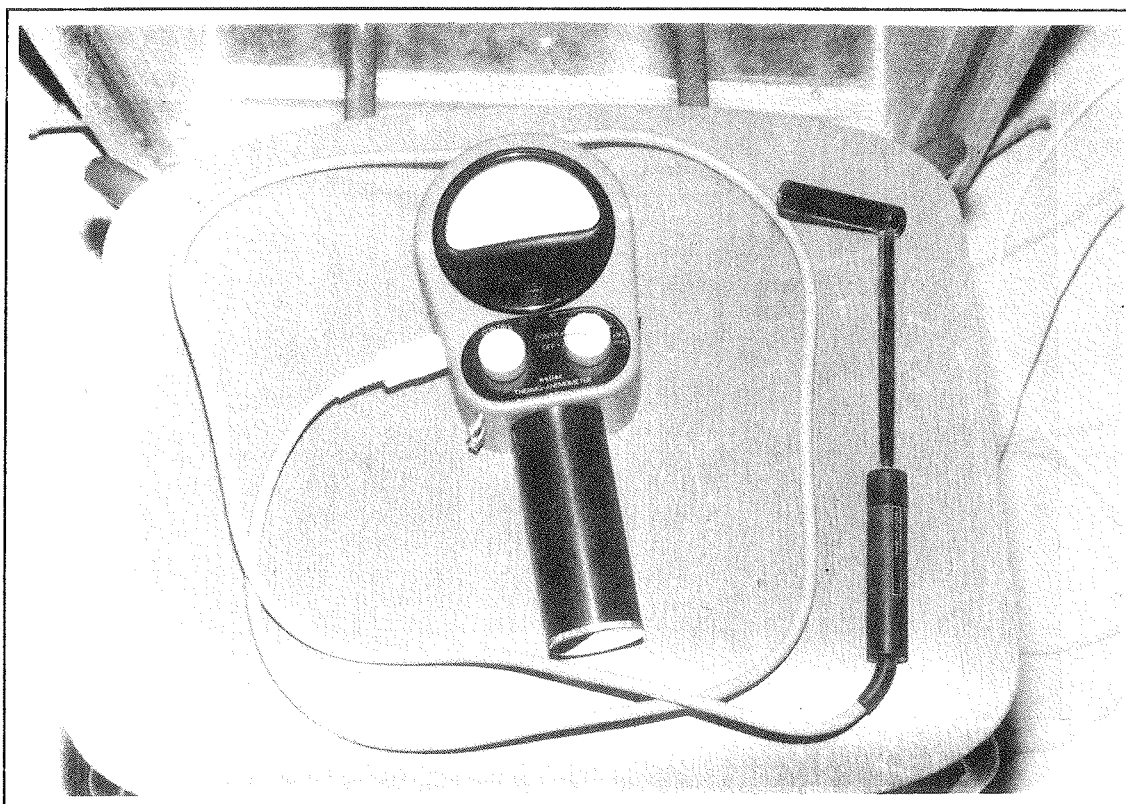
Tabel 2.1 Vejrdataformat til SUNCODE

Det ses på enheden for direkte normal og global stråling i tabel 2.1, at der ikke er tale om en solbestrålingsstyrke men om en energimængde (middelsolbestrålingsstyrken $[\text{W/m}^2]$ gange 3600 sekunder).

2.3 Lufthastighedsmåler

Metoden til at bestemme kapaciteten af de to ventilatorer, som oplader hhv. aflader stenlageret, er at finde middellufthastigheden i hver af kanalerne mellem tagrum og stenlager og derpå gange dette tal med kanalens tværsnitsareal. Luftstrømningen i kanalerne er turbulent, og derfor varierer lufthastigheden meget. I en tidligere måleserie er der fundet, at målinger foretaget 14 cm fra hjørnet kan udgøre middelværdien for lufthastigheden.

Målingerne er foretaget med et Wallace Thermo-Anemometer GGA 23s, se billedet på figur 2.3. Sondens vigtigste bestanddele er to tynde nikkel modstandstråde, hvoraf den ene opvarmes. De to modstande indgår i en Wheatstone bro. Idet luften passerer den opvarmede tråd, afkøles den, og modstanden falder. Den anden tråd påvirkes ikke af luften. Lufthastigheden reguleres automatisk for temperatursvingninger, og resultatet kan aflæses direkte på instrumentet i enheden m/s.

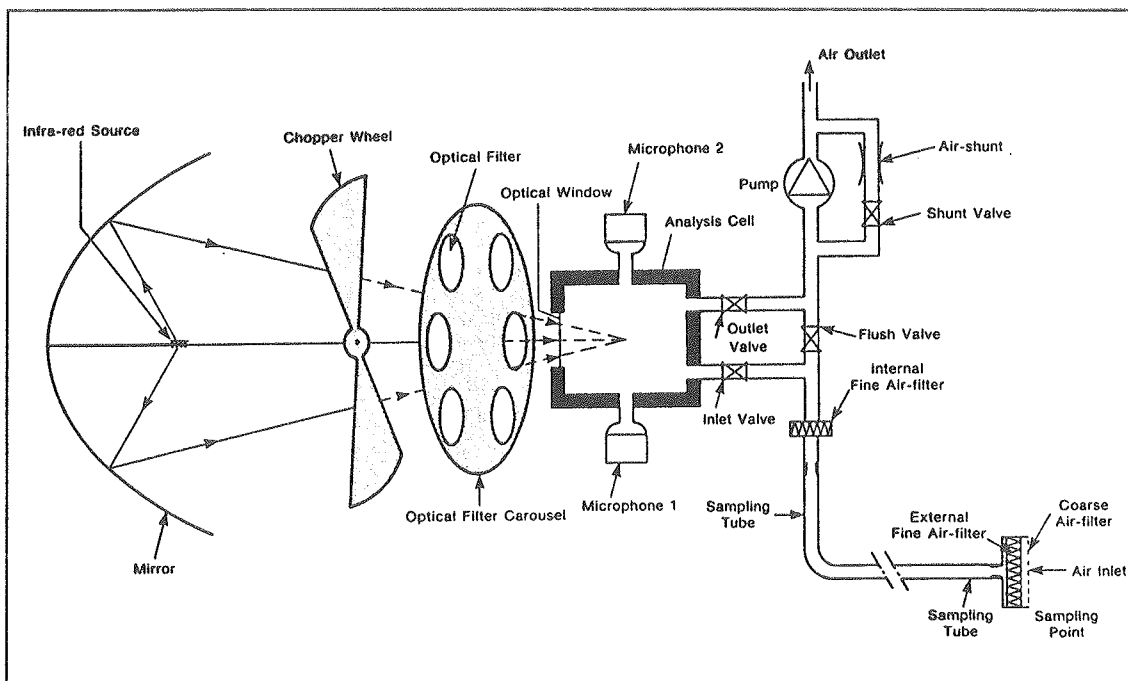


Figur 2.3 Wallace Thermo-Anemometer GGA 23s

2.4 Luftskeftemålinger

Der er foretaget to sæt målinger af luftskefte i forsøgshuset. Der er dels målt i stuen og dels i det system, der består af stenlager, ventileret solvæg, tagrum og kanaler mellem stenlager og tagrum. Metoden, der benyttes, er en måling af koncentrationshenfaldet ved hjælp af fotoakustisk spektroskopi. Man doserer en vis mængde sporgas og sørger for en god opblanding i hele måleområdet for at få en ensartet koncentration. Som sporgas er benyttet SF₆. Herefter måles koncentrationen kontinuert over en halv til en hel time. Koncentrationen falder eksponentielt med tiden, og derved kan man nemt bestemme luftskeftet vha. semi-logaritmisk papir.

Som gas-detektor benyttes Brüel & Kjær Multi-gas Monitor Type 1302. Opbygningen og virkemåden af apparatet er detaljeret beskrevet i /5/. Måleprincippet, som er vist på figur 2.4, er baseret på fotoakustisk infrarød spektroskopi.



Figur 2.4 Målesystem for Brüel & Kjær Multi-gas Monitor Type 1302 /5/

En pumpe driver luften gennem to filtre og ind i målekammeret, der lukkes hermetisk. Lys fra en infrarød kilde sendes gennem en "chopper", der får lyset til at pulsere, og derefter gennem et optisk filter. Gassen i målekammeret absorberer lyset, og derved stiger gassens temperatur. Det pulserende lys får altså temperaturen og dermed trykket til at svinge. Ændringen i trykket kan detekteres som lyd af to mikrofoner. Denne lydbølge er direkte proportional med koncentrationen af gassen, og værdien kan aflæses på displayet.

3 RESULTATER FRA FORSØGSHUSET

I dette kapitel vises resultatet af målinger og beregninger på forsøgshuset mht. energiforbrug til rumopvarmning samt temperaturforhold. Ved at benytte aktuelle vejrdata kan man sammenligne de beregnede resultater med målinger foretaget i forsøgshuset. Hermed har man mulighed for at sammenligne simuleringsprogrammet med målte temperaturer, inden der laves beregninger på et solvægshus i fuld størrelse.

3.1 EDB-program

PC-programmet SUNCODE /3/ benyttes til at beregne solvægshusets energiforbrug. Programmet er en PC-version af det amerikanske main frame program SERI/RES udviklet af L. Palmiter og T. Wheeling. SUNCODE er valgt fremfor andre programmer som f.eks. tsbi3, fordi SUNCODE kan regne på både solvægge og stenlagre. SUNCODE har dog visse fejl og mangler, som man må kompensere for ved at benytte forskellige omskrivninger og pseudo-inddata.

SUNCODE er et termisk simuleringsprogram til beregning af mindre bygningers indeklima og energiforbrug. Brugeren laver en termisk model af bygningen og bestemmer antallet af gennemregninger pr. time. Tidsskridtet er maksimalt en time, men den kan formindskes, hvis man ønsker en højere nøjagtighed. Simuleringsperioden vælges normalt til et år.

De matematiske ligninger udgør et ikke-lineært termisk netværk. Ligningerne løses vha. en kombination af eksplicit endelig differensmetode, Jacobi iteration og styret optimering. Beregningsmetoderne er nærmere beskrevet i /3/ og /6/.

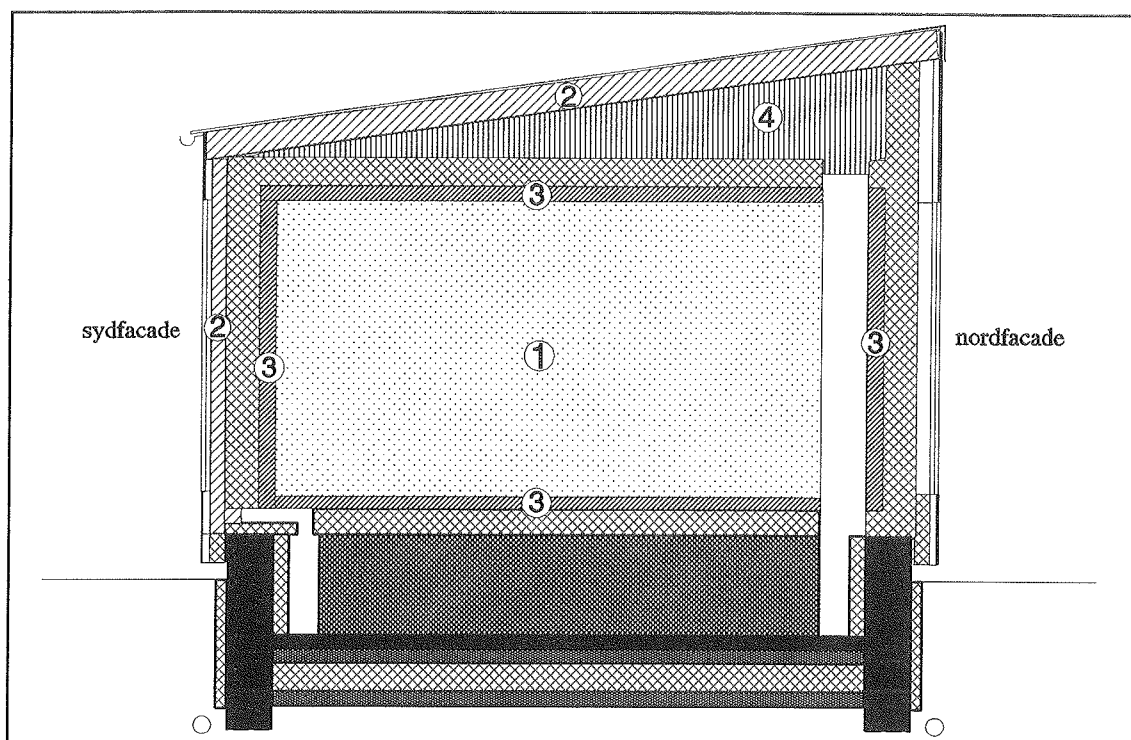
SUNCODE er delt op i to hovedprogrammer: EDITS og LOADS. EDITS er et interaktivt program, hvor editeringen (opbygningen af huset) samt kompileringen (oversættelsen) foregår. LOADS udfører selve simuleringen, hvortil den bl.a. benytter det danske referenceår TRY /4/ eller aktuelle vejrdata.

3.2 Beregningsforudsætninger

I beregningerne på forsøgshuset benyttes aktuelle vejrdata fremfor referenceåret for at kunne sammenholde beregningerne med målinger foretaget i forsøgshuset. De benyttede inddata for forsøgshuset er målte og beregnede værdier. Desuden er der brugt opslagsværdier for materialedata hentet fra /7/ og /8/.

Forsøgshuset inddeles i fire zoner, se figur 3.1:

- ① Stuen
- ② Den ventilerede sydfacade og hulrummet under taget
- ③ De ventilerede hulrum omkring stuen
- ④ Loftet



Figur 3.1 Zoneinddeling i forsøgshuset

Denne inddeling er lavet pga. restriktioner i SUNCODE. Programmet kræver, at stenlageret får og afgiver varme fra og til en egentlig zone. Stenlageret får tilført varme fra loftet, idet den opvarmede luft trækkes gennem absorberfilten under taget og ned på loftet. Lageret afgiver varme til de indvendige hulrum, hvorfra den ledes gennem gipspladerne og ind i stuen.

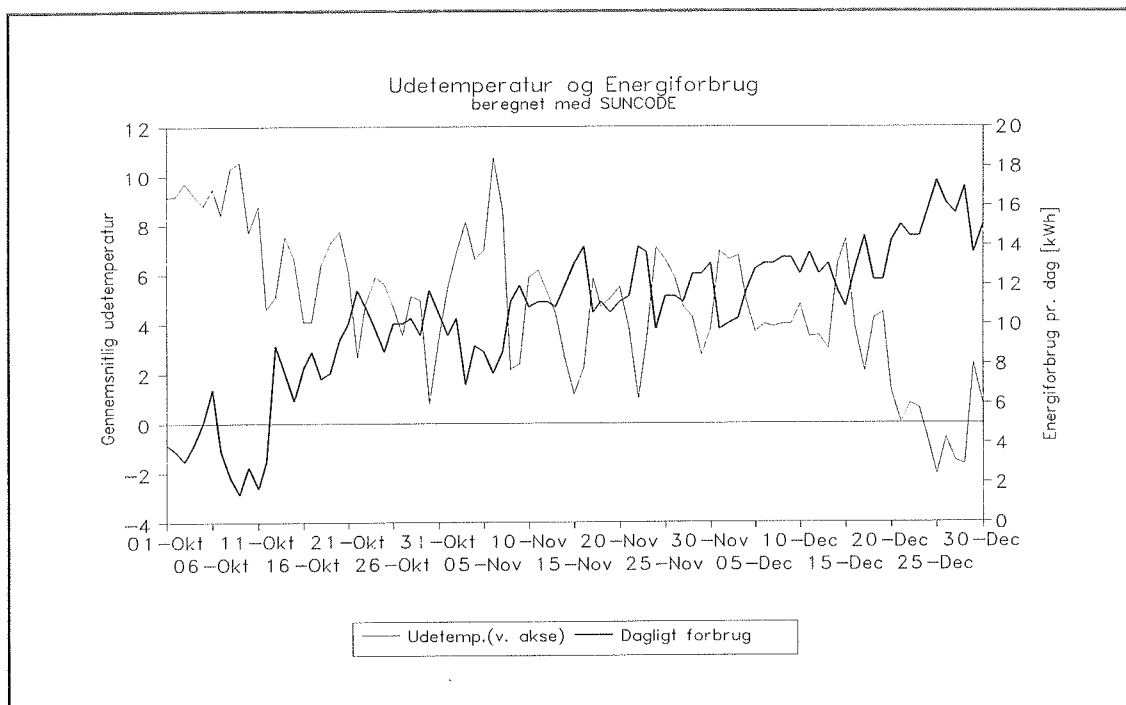
Der modtages ingen energi i form af varme fra personer eller elektrisk udstyr, da forsøgshuset står tomt. Som supplement til solvarmen er der opstillet en el-radiator med vekselstrømsmåler. Radiatoren opretholder en temperatur på mindst 20°C.

SUNCODE kan ikke umiddelbart regne på lavenergiruder (med coating og/eller gasfyldning), men ved at beregne forholdet mellem soltransmittansen gennem lavenergiruden og en almindelig termorude kan man rette op på denne mangel /9/.

I SUNCODE-simuleringerne kommer temperaturen i det indvendige hulrum (zone 3)

i fyringssæsonen dagligt ned på setpunktet, som er $22,0^{\circ}\text{C}$. Her afviger SUNCODE fra virkeligheden, hvor der ikke foregår nogen elektrisk opvarmning i hulrummet. Dette forhold bevirker, at den simulerede temperatur i stuen (zone 1) altid er over $20,0^{\circ}\text{C}$, og derfor bliver der ikke simuleret opvarmning her.

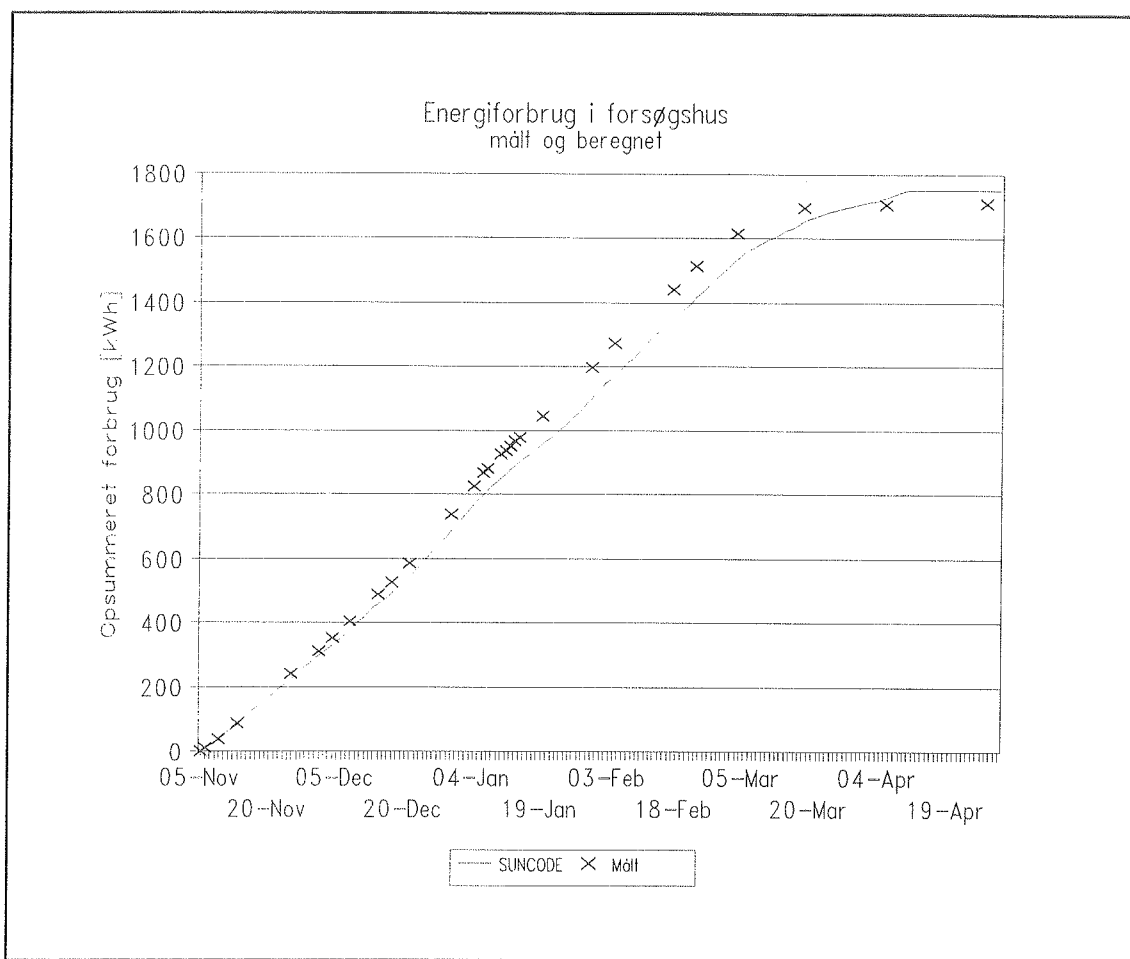
3.3 Energiforbrug og temperaturforhold



Figur 3.2 Sammenhæng mellem udetemperatur og energiforbrug

På figur 3.2 ses de gennemsnitlige udelufttemperaturer, som er målt på vejrstationen, samt det daglige opvarmningsbehov [kWh] i forsøgshuset. At de to kurver er i "modfase" skyldes naturligvis, at varmetabet og dermed energiforbruget bliver større, når temperaturdifferensen mellem inde og ude bliver større. Gennemsnitstemperaturen falder fra $9-10^{\circ}\text{C}$ først i oktober til omkring frysepunktet sidst i december. I november er opvarmningsbehovet ca. 10-13 kWh pr. dag for at opretholde en temperatur i stuen på 20°C . Men i løbet af december stiger energiforbruget til 17 kWh pr. dag.

I forsøgshuset er der opstillet en elektrisk radiator, som er termostatstyret med et setpunkt på 20°C . El-forbruget kan med 4% nøjagtighed aflæses på en vekselstrømsmåler. I perioden efter 5. november er måleren blevet aflæst med jævne mellemrum, og det er derfor muligt at lave en sammenligning mellem det faktiske energiforbrug og SUNCODE's beregning. Figur 3.3 viser det beregnede og målte opsummerede energiforbrug [kWh] over fyringssæsonen.



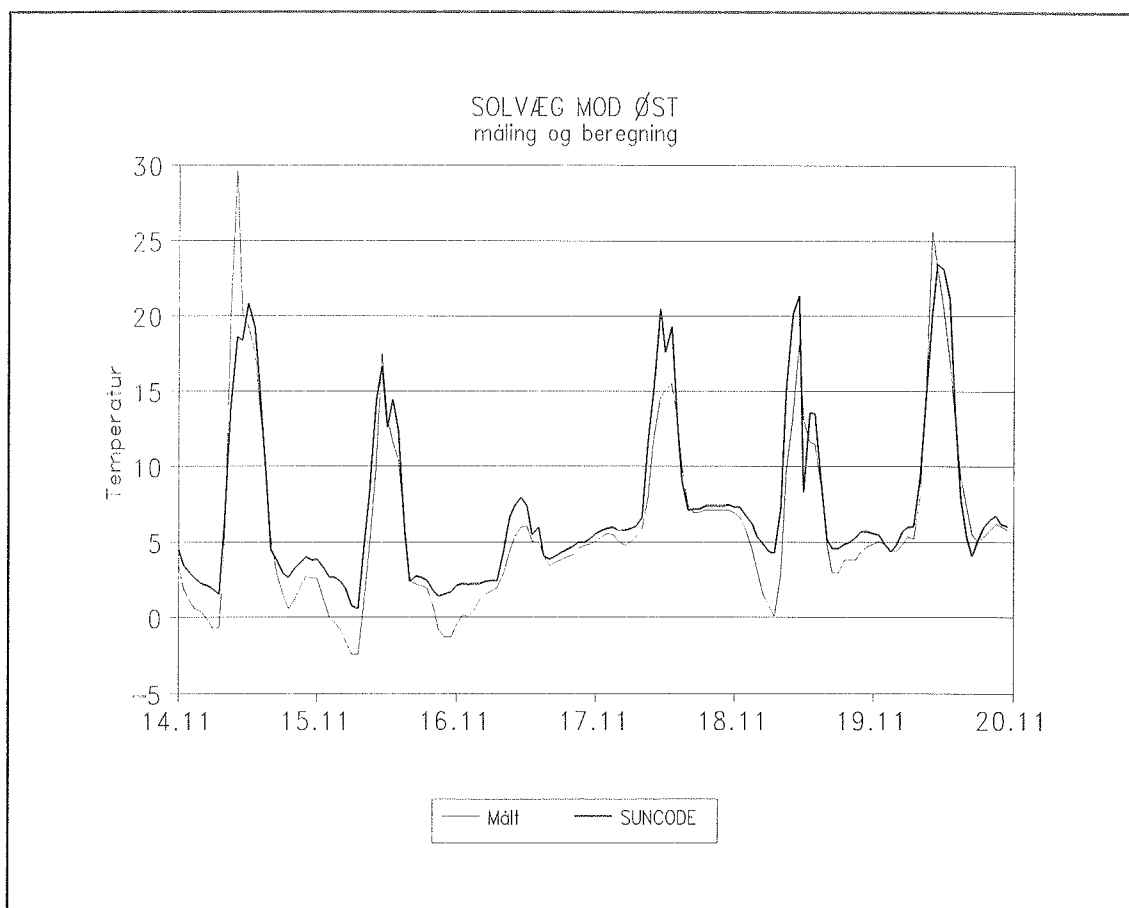
Figur 3.3 Opsummeret energiforbrug til rumopvarmning - målt og beregnet

Der er en meget pæn overensstemmelse mellem det målte og det beregnede energiforbrug, selv om de målte værdier ligger lidt højere. Fra 5. november til 30. december er energiforbruget beregnet til 687 kWh og målt til 740 kWh. Det er en difference på 7%, som dermed er større end måleudsikkerheden på 4%. En af grundene til det større varmeforbrug kan være, at døren til forsøgshuset næsten dagligt har været åben adskillige minutter. Det ændrer naturligvis luftskiftet i stuen. Luftskiftet i stuen er med hhv. lukket og åben dør målt til 0,05 og 16 gange i timen.

Fra midten af april er solstrålingen gennem vinduerne tilstrækkelig til at opretholde en temperatur i stuen på mindst 20°C, selv om stenlageret ikke er aktivt. Set over hele fyringssæsonen har SUNCODE beregnet det samlede energiforbrug i forsøgshuset 43 kWh for højt - svarende til en afvigelse på 2,5% af det målte.

Figur 3.4 og 3.5 viser målte og beregnede temperaturer i den passive solvæg mod øst for en periode i november og marts/april.

Der er kun mindre afvigelser mellem SUNCODES's beregnede temperaturer i

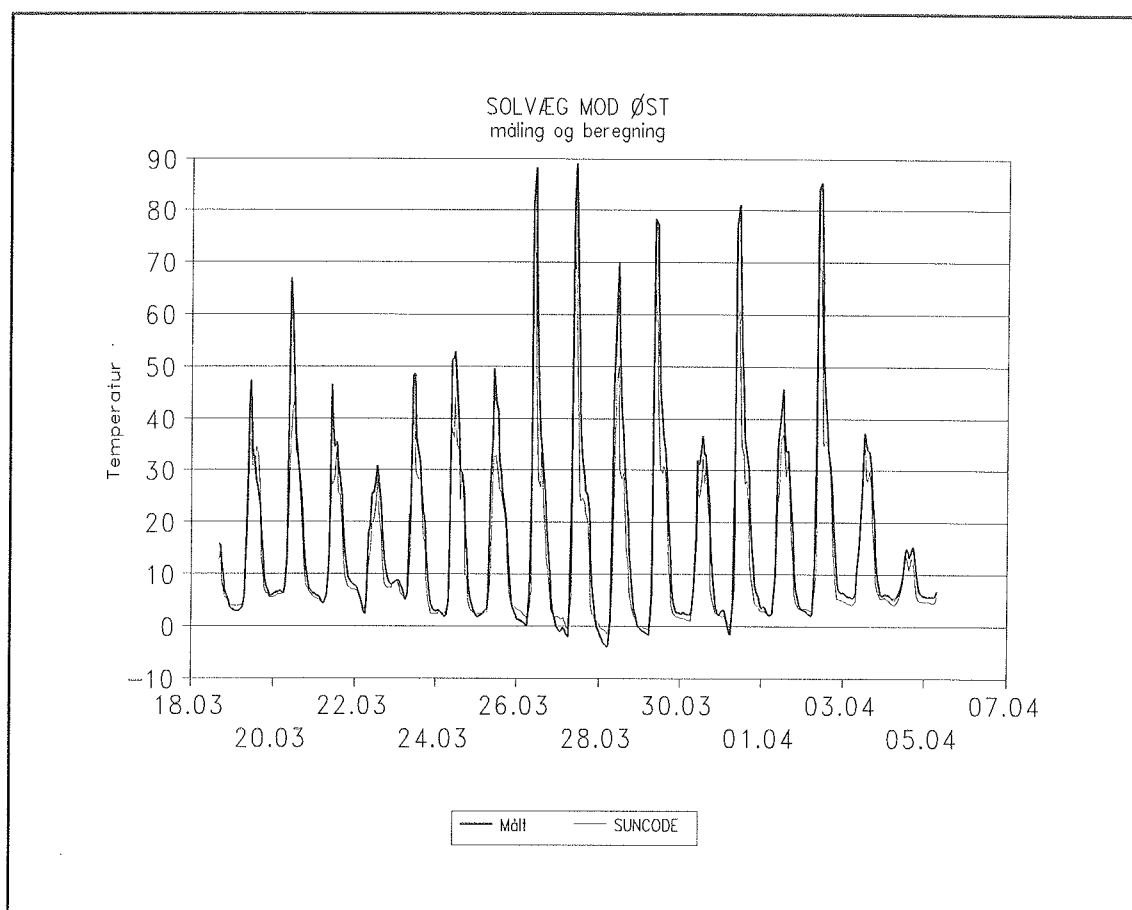


Figur 3.4 Temperaturforløb i østvendt solvæg - efterår

solvæggen og de tilsvarende målte. Nattemperaturen den 15. 16. og 18. november, figur 3.4, er beregnet lidt for højt. Dette skyldes sandsynligvis, at der har været klare nætter, og derved har det virkelig strålingstab til rummet været forøget i forhold til forudsætningerne i programmet. Desuden ses det i figur 3.5, at SUNCODE's peak-værdier ligger lavere end de målte, når temperaturen overstiger 40°C.

Ved at sammenholde de målte absorbertemperaturer med udeluftens kan man se, hvilken virkning de passive solvægge har. På figur 3.6 ses temperaturstigningen ved relativt lave solbestrålingsstyrker i den vestvendte passive solvæg for en 5-døgn periode i december. En solbestråling på blot 50 W/m² afspejler sig i en forøgelse af absorbertemperaturen på 9-10°C, mens udelufttemperaturen ikke ændres. På samme graf ses en solbestrålingsstyrke på 180 W/m² at medføre en stigning af absorbertemperaturen med 20-25°C. Dette betyder, at der selv ved meget lave solbestrålingsstyrker kan konstateres en stigning af temperaturen i solvæggen, og dermed et lavere varmetab fra huset. Ved højere solbestrålingsstyrker er der ligefrem tale om et varmetilskud til huset.

Solvægshuset er en meget let konstruktion, og derfor er væggene ikke i stand til at

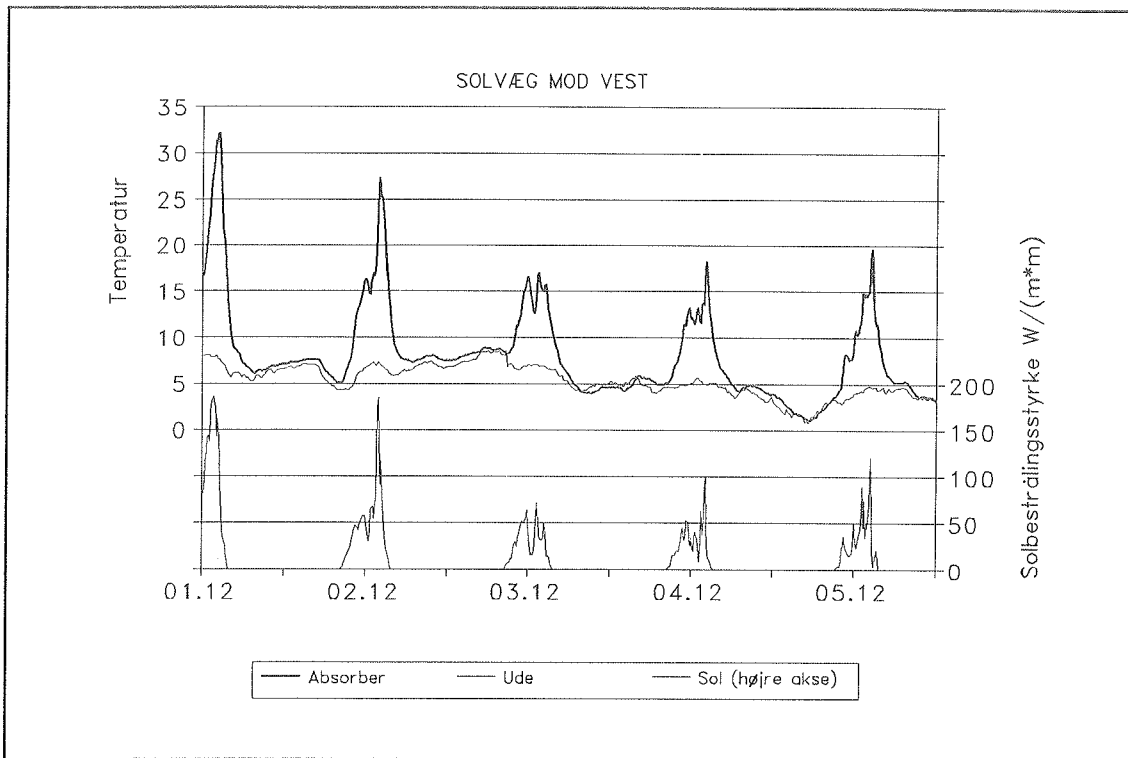


Figur 3.5 Temperatur i østvendt solvæg - forår

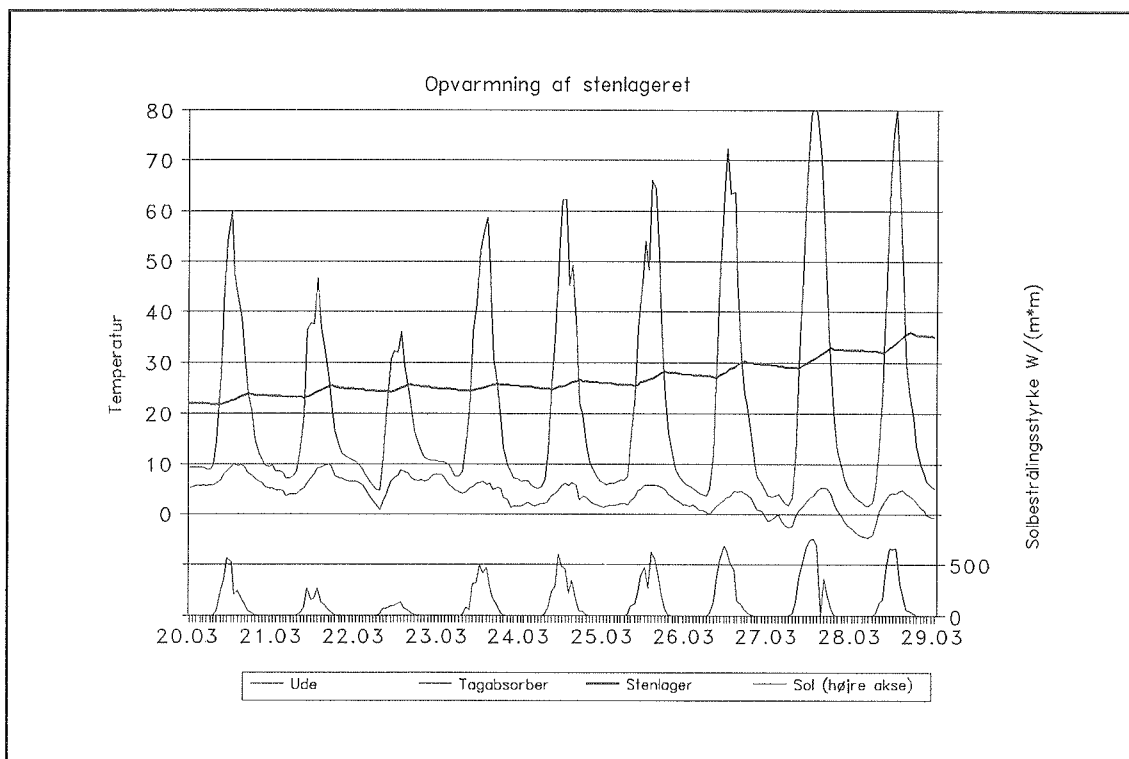
akkumulere nogen varme af betydning. Varmen akkumuleres i stedet i et stenlager under huset. Figur 3.7 viser et opvarmningsforløb i slutningen af marts måned. Det ses, at temperaturen i stenlageret er målt til at stige med 2-5°C i dagtimerne for solbestrålingsstyrker på 100-750 W/m². Det passive tab fra lageret til huset, jorden og omgivelserne medfører et temperaturfald på 1-2°C pr. døgn.

Det har ikke været muligt at have ventilatorerne i gang hver dag og dermed få den maksimale opladning af stenlageret. Beregninger med referenceåret viser, at det skulle være muligt at opnå 90-100°C i stenlageret. Der har ikke været kontinuerlige temperaturmålinger gennem hele 1993, og det er grunden til, at der er "huller" i grafen på figur 3.8.

En anden grund til at beregningerne med TRY giver højere temperaturer end de målte er, at der er flere solskinstimer i referenceåret, end der var i sommeren 1993. Der var dog perioder med godt vejr, og det giver sig bl.a. udslag i en temperaturstigning på 20°C over en fem døgn periode i juni. I de tidsrum i juni og juli, hvor stenlageret har en temperatur på over 60°C og samtidig ikke er blevet opvarmet, resulterer det passive tab i et temperaturfald på maksimalt 2,3°C pr. døgn.

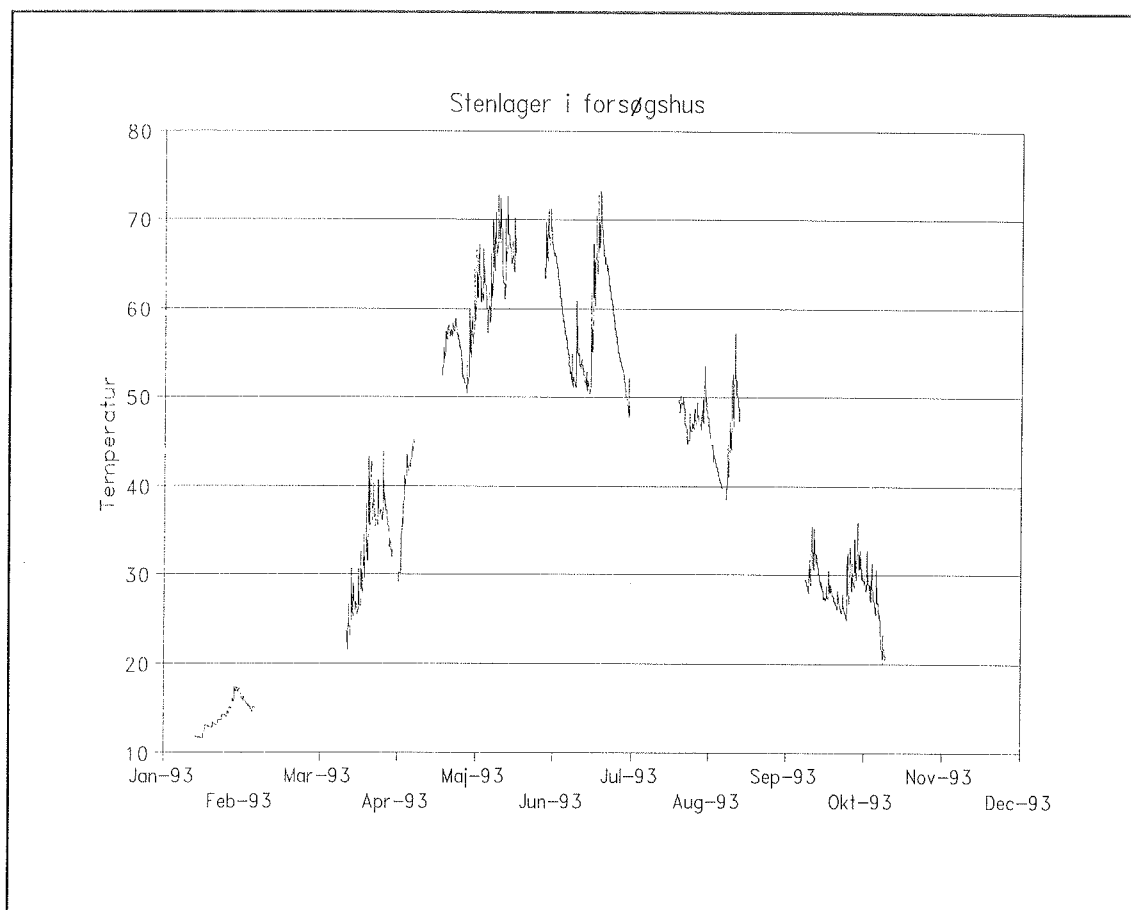


Figur 3.6 Sammenhæng mellem absorbertemperatur i vestvendt solvæg og solstrålingsstyrke



Figur 3.7 Aktuelt temperaturforløb i stenlageret i slutningen af marts

Når man har et højisoleret hus, som er opvarmet ved hjælp af solvarme, så er det nødvendigt at undersøge, om temperaturen i huset kan holdes nede på et acceptabelt

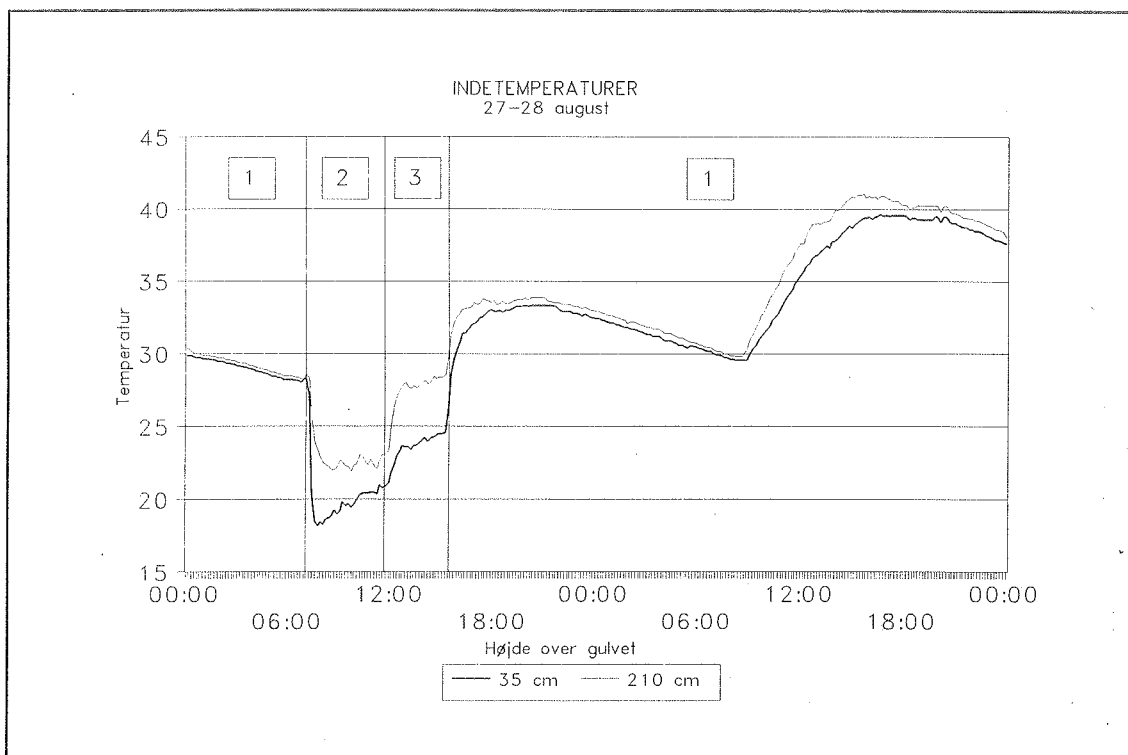


Figur 3.8 Aktuelle temperaturer i stenlageret gennem 1993

niveau ved kun at benytte almindelig udluftning og afskærmning. I forsøgshuset er den eneste mulighed for ventilation at åbne den ene eller begge døre. Herved kan man regulere luftskiftet mellem 0,05-16 gange pr. time.

På figur 3.9 er den målte temperatur i to forskellige højder afbildet for to dage i august. Begge dage var der solskin hele dagen, og temperaturen i dagtimerne var omkring 17-18°C. I områderne, der er markeret med et ettal, har begge døre været lukket, og dermed praktisk taget ingen ventilation. Totallet viser det tidsrum, hvor begge døre har stået på klem; og tretallet er placeret i den periode, hvor kun døren mod nord har stået på klem samtidig med, at alle vinduerne har været skærmet af for solen med aluminiumsplader.

Figur 3.9 viser tydeligt, at det er nødvendigt at ventilere huset for at opnå acceptable temperaturforhold. Indetemperaturen kan på varme solskinsdage komme op over 60°C, hvis der ikke er nogen udluftning eller solafskærmning. Dette skyldes hovedsageligt solindfaldet gennem vinduerne. En anden medvirkende faktor er kanalen fra tagabsorberen. Heri kan lufttemperaturen være mere end 100°C, og selv om kanalen er næsten



Figur 3.9 Temperaturer i stuen med og uden ventilation - 1:ingen ventilation 2:begge døre på klem 3:én dør på klem

helt tæt, så kommer der alligevel et betydeligt varmebidrag gennem væggene. Sidstnævnte problem kan naturligvis let løses i et rigtigt hus ved at placere kanalerne i et rum, hvor der er mulighed for en kraftig udluftning, og hvor beboerne normalt ikke opholder sig længere tid ad gangen.

Med solafskærmning og almindelig udluftning kan der opnås temperaturer på omkring 25°C, og dermed er overophedning ikke noget problem.

3.4 Vurdering af SUNCODE

Det er ikke muligt at lade stenlageret være den eneste varmeafgiver i en zone. Dette er en mangel ved programmet, når et hus som forsøgshuset skal simuleres. Dermed kan man ikke eftergøre de virkelige forhold, hvor stenlageret afgiver varme i det indvendige hulrum, og radiatoren er placeret i stuen. Det bevirker, at SUNCODE udregner et for stort energibehov. Problemet kan afhjælpes, hvis man først undersøger i hvilken periode, temperaturen i stenlageret er for lav til at afgive varme. Derefter laves en kørsel, hvor der ikke defineres opvarmning i hulrummet i denne periode.

En anden ønskværdig tilføjelse til SUNCODE er, at det bliver muligt at gøre U-værdierne for ruder og solvægsdæklag temperaturafhængige. Dette er vigtigt i

forbindelse med beregninger på solvægge. De beregnede temperaturer på dage med solskin bliver urimelige høje; specielt hvis dæklaget har en lav U-værdi.

SUNCODE kan kun regne på identiske glaslag. Dermed kan man ikke umiddelbart bruge aerogelruder eller andre lavenergiruder. Problemet løses ved at reducere transmittansen gennem glaslagene vha. en skyggefaktor. Denne løsningsmetode har erfaringsmæssigt vist sig at være udemærket.

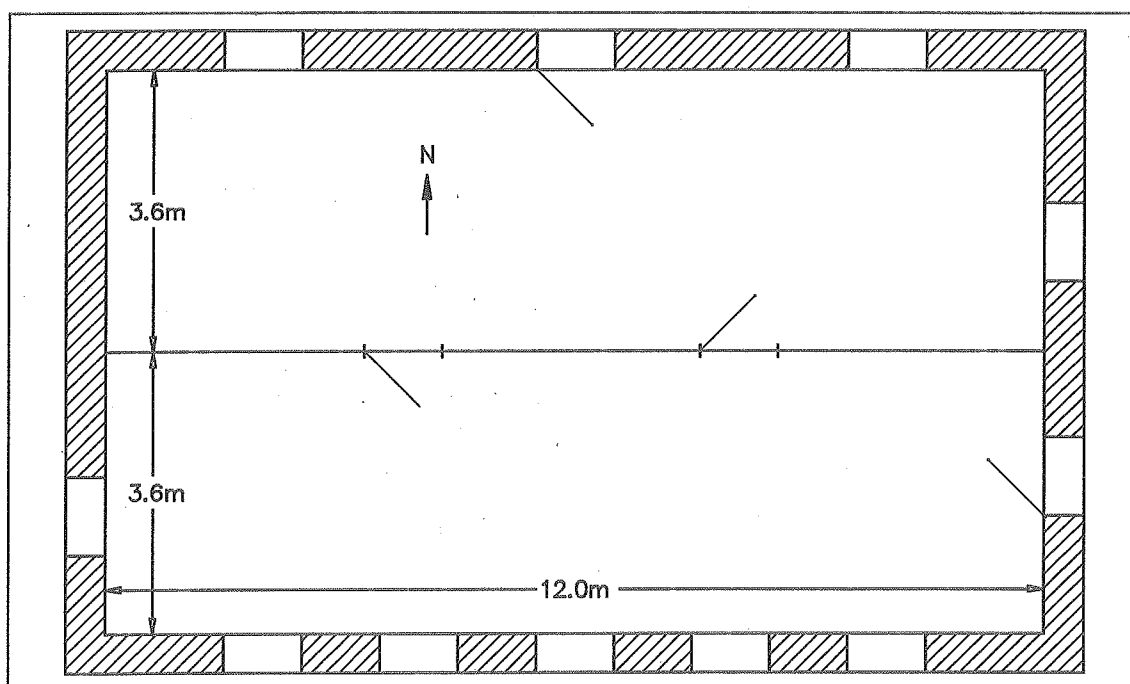
Overensstemmelsen mellem SUNCODE's beregninger og de målte værdier er tilfredsstillende. Afvigelsen mellem det beregnede og det målte energiforbrug i forsøgshuset over en hel fyringssæson var kun 2,5%. Derfor kan man også have tillid til programmet's beregninger på et større hus, som er opbygget efter de samme principper som forsøgshuset.

4 BEREGNINGER PÅ FULDSKALA SOLVÆGSHUS

For at kunne sammenligne energiforbruget i solvægshuset med andre lavenergihuse er det nødvendigt at skalere forsøgshuset op. Fuldskalahuset opbygges i edb-programmet SUNCODE, således at det i princippet fungerer på samme måde som forsøgshuset.

4.1 Beregningsforudsætninger

Husets grundareal er 106 m^2 . Beregningsmæssigt inddeles huset ikke i værelser, køkken osv., men af hensyn til varmetilskud opdeles huset i to rum, der vender mod syd hhv. nord. Figur 4.1 viser en planskitse af huset, så man kan danne sig et indtryk af størrelsen samt placeringen af døre og vinduer.



Figur 4.1 Plan over solvægshus i fuld skala

Der er anbragt seks vinduer i det sydvendte rum; fem mod syd og et mod vest. Desuden er der i østsiden en dør til det fri. I det nordvendte rum er solindfaldet gennem vinduer ikke så stort. Derfor er antallet af vinduer kun to mod nord og et mod øst. I nordfacaden er der ligeledes placeret en dør. De to rum er adskilt med en væg med to døre, som antages at stå åbne hele tiden.

Arealet af luftsolfangerne, som leverer varmen til stenlageret, er 112 m^2 fordelt med 96 m^2 på taget og 16 m^2 på sydfacaden. Stenlageret har dimensionen $l \times b \times d$: $10,0 \text{ m} \times 7,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$.

Luftskiftet er delt op i to perioder. I fyringssæsonen ventileres der $0,5 \text{ h}^{-1}$ mekanisk med varmegenvinding, hvor effektiviteten er 60%. Desuden regnes huset for at have et naturligt luftskifte på $0,1 \text{ h}^{-1}$. Derfor fås luftskiftet: $n = 0,1 + (1-0,6) \cdot 0,5 = 0,3 \text{ h}^{-1}$. Uden for fyringssæsonen benyttes varmeveksleren ikke, og her regnes med $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$.

Idet huset regnes for at være beboet, fås et varmetilskud fra personer i huset, elektriske installationer og varmt vand, jvf. /10/. Årstidsvariationen er vist i figur 4.2.

Q_i kWh/måned	Q_i kWh/måned	Q_i kWh/måned	Q_i kWh/måned
Jan 530	Apr 420	Jul 390	Okt 480
Feb 460	Maj 410	Aug 410	Nov 490
Mar 480	Jun 380	Sep 420	Dec 530

Figur 4.2 Internt varmetilskud - fra /10/

Mellem de to rum sker der en varmeudveksling gennem de to åbne døre. Koefficienten ($H_{res} [\text{W/K}]$) består af et bidrag fra konvektion og fra stråling, jvf. /11/. Konvektionsbidraget findes udfra Grashofs, Prandtls og Nusselts tal.

Dørens mål er $2,1 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$. Der er skønnet en temperaturdifferens mellem de to zoner på $\Delta T = 5 \text{ K}$. Først bestemmes Grashofs tal:

$$Gr = \frac{g \cdot \Delta T \cdot D^3}{T \cdot \nu^2} = \frac{9,82 \text{ m/s}^2 \cdot 5 \text{ K} \cdot 2,1^3 \text{ m}^3}{295 \text{ K} \cdot (15,1 \cdot 10^{-6})^2 \text{ m}^4/\text{s}^2} = 6,76 \cdot 10^9$$

hvor g er tyngdeaccelerationen [m/s^2]
 ΔT er temperaturforskellen [K]
 D er højden af døren [m]
 T er middeltemperaturen [K]
 ν er luftens kinematiske viskositet [m^2/s]

Herefter bestemmes Nusselts tal:

$$Nu = 0,3 \cdot Pr \cdot Gr^{0,5} = 0,3 \cdot 0,71 \cdot (6,76 \cdot 10^9)^{0,5} = 17500$$

hvor Pr er Prandtls tal (tabelopslag)

Udfra Nusselts tal kan den konvektive varmeoverføringskoefficient bestemmes som:

$$Nu = \frac{H_k}{w \cdot \lambda} \Leftrightarrow H_k = Nu \cdot w \cdot \lambda = 17500 \cdot 1,0\text{m} \cdot 0,0257 \text{ W/mK} = \underline{450 \text{ W/K}}$$

hvor H_k er den konvektive varmeoverføringskoefficient [W/K]
 λ er luftens varmeledningsevne [W/mK]
 w er dørens bredde [m]

Strålingsbidraget er ikke så stort som konvektionsbidraget pga. den lille temperaturforskel, men det bør dog medtages i beregningerne.

$$H_r = \frac{w \cdot D \cdot \sigma \cdot (T_S^4 - T_N^4)}{\Delta T}$$

$$= \frac{1,0\text{m} \cdot 2,1\text{m} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \cdot (298^4\text{K}^4 - 293^4\text{K}^4)}{5 \text{ K}} = \underline{12 \text{ W/K}}$$

hvor σ er Stefan-Boltzmanns konstant [W/m²K⁴]
 T_S og T_N er temperaturen i de to rum [K]

Den resulterende koefficient, som er et udtryk for hvor stor varmeudveksling, der er mellem de to zoner, fås ved at addere bidragene og gange med antallet af døre.

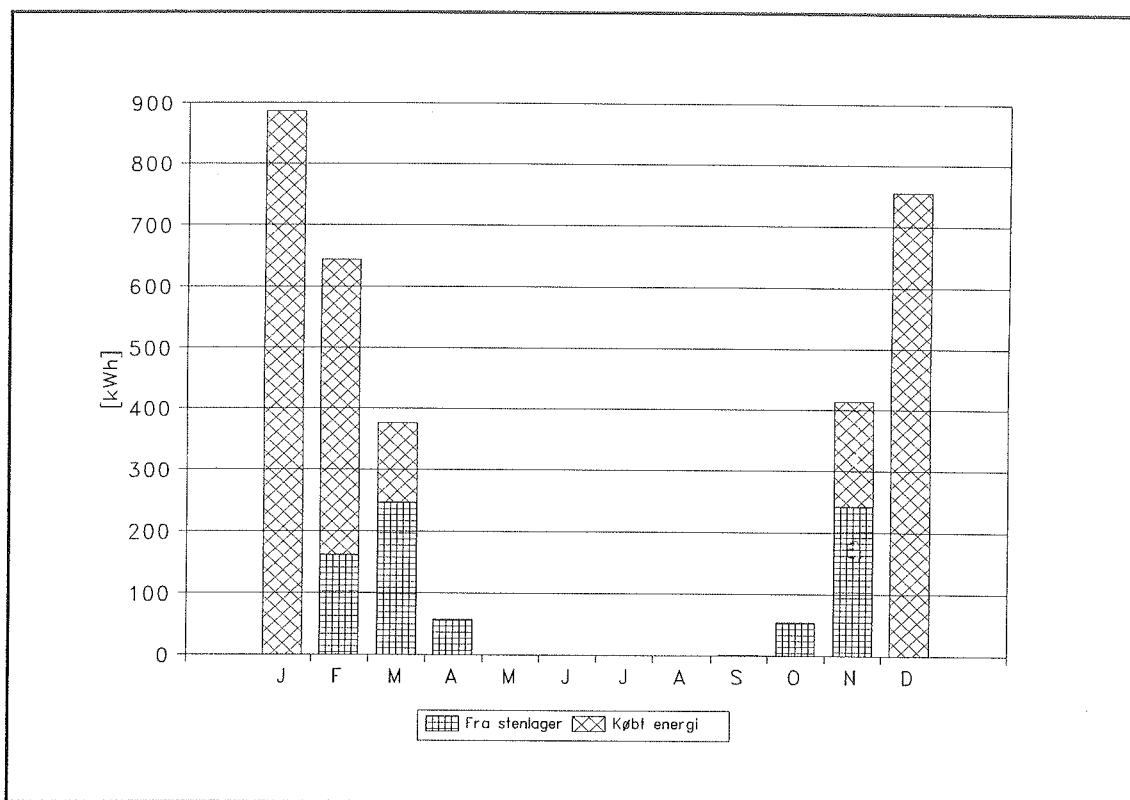
$$H_{res} = (H_k + H_r) \cdot 2 = \underline{920 \text{ W/K}}$$

Hvis temperaturen i stuerne bliver højere end 25°C, ventileres der med udeluft. Den maksimale udluftning svarer til et luftskifte på 10 gange pr. time.

Som vejrdato i simuleringen benyttes det danske referenceår TRY /4/.

4.2 Energiforbrug og temperaturforhold

For at et hus kan betegnes som et lavenergihus, skal det opfylde definitionen som beskrevet i BR-S 85 /12/. Heri er nettoenergibehovet til opvarmning og ventilation angivet til ikke at overstige 3,6 GJ + 0,126 GJ pr. m² bruttoetageareal pr. år. For solvægshuset giver det et maksimalt nettoenergibehov på 17,0 GJ eller 4710 kWh pr. år. Nettoenergibehovet er varmekorrekteret for varmetilførsel fra personer, husholdningsapparater, belysning, solindfald samt husets varmeakkumulerende egenskaber /10/. Det sidstnævnte er for solvægshuset hovedsageligt stenlageret.

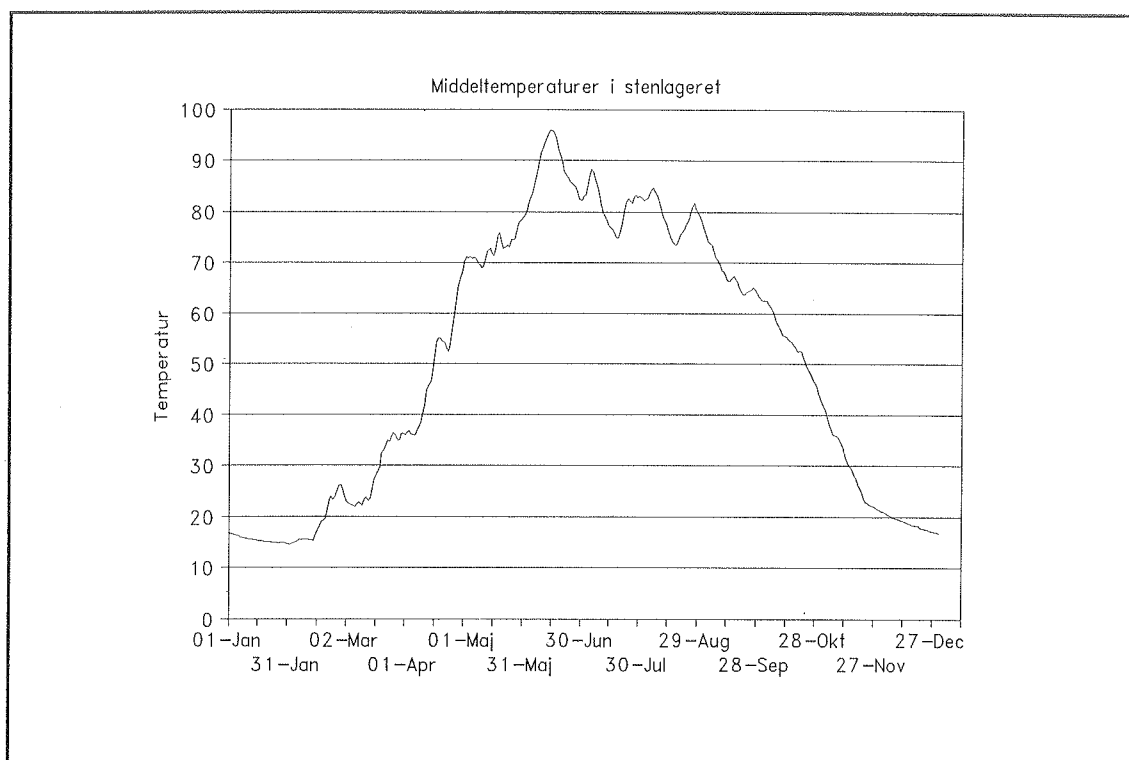


Figur 4.3 Energimængder fra stenlageret og radiatorerne

Figur 4.3 viser energiforbruget til opvarmning. Heri er ikke medtaget gratisvarmen fra personer, elektricitet og varmt brugsvand jvf. figur 4.2, som faktisk udgør en større andel af det samlede energitilskud end varmen fra stenlageret og radiatorerne. Summen af disse bidrag udgør 3150 kWh mod 5400 kWh fra gratisvarmen. Stenlageret leverer 775 kWh pr. år - svarende til cirka en fjerdedel af energibehovet.

En af de mere interessante energimængder er den del, som man skal betale for. Det er samtidigt den mængde, der kaldes nettoenergiebehovet. Den udgør 2375 kWh. Solvægshusets energibehov er dermed kun halvdelen af kravet til et lavenergihus. I et paper af K.E. Thomsen et al. /17/ er forskellige varianter af lavenergi-rækkehuse med optimeret soludnyttelse beskrevet. Energiebehovet er 2955 kWh i basishuset og 2005 kWh ved brug af aerogeler i vinduerne i taget og mod syd samt skodder for resten. Solvægshusets opvarmningsbehov er af samme størrelsesorden som disse rækkehuse, hvor facaderne er vendt mod øst og vest.

Stenlagerets temperaturniveau er vist på figur 4.4. De høje temperaturer i sommermånedene medfører et stort passivt energitilskud til huset. I alt ca. 2000 kWh, som ikke kan udnyttes, men derimod skal bortventileres. Der er derfor grund til at isolere stenlageret bedre foroven.



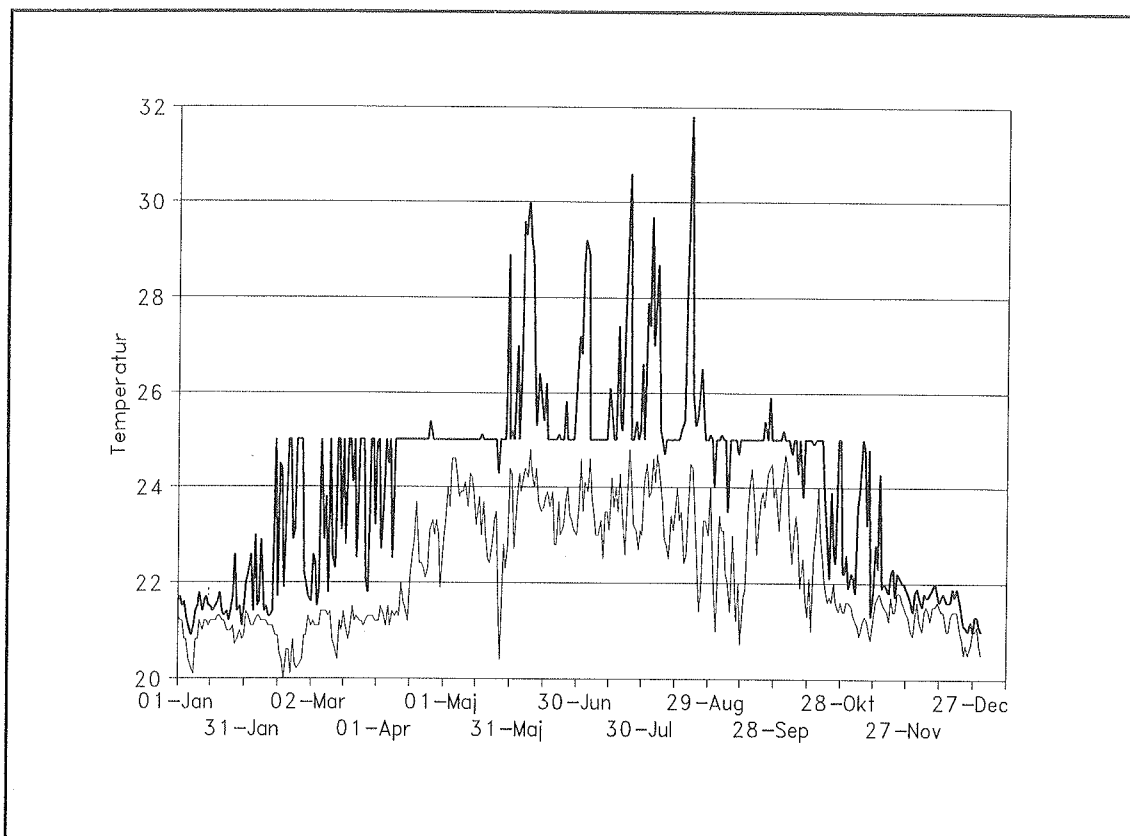
Figur 4.4 Middeltemperaturer i stenlageret

Et af problemerne ved at have et højisoleret hus med stor udnyttelse af solindfaldet er, at man nemt risikerer at få for høje indetemperaturer. Det kan derfor anbefales at have en afskærmning i form af en markise eller udvendige persienner for at begrænse solindfaldet i sommermånederne. Det er vigtigt, at afskærmningen er udvendig, idet solindstrålingen skal stoppes, inden den kommer ind i huset. Figur 4.5 viser temperaturforløbet i juli.

En solafskærmning vil medføre at temperaturen i huset ikke vil overstige 27-28°C, hvilket er acceptabelt for korte perioder i sommermånederne /13/.

4.3 Parametervariationer

I dette afsnit undersøges forskellige parametervariationer på det store solvægshus for at se hvilken effekt, disse har på nettoenergibehovet. For hver variation vil nettoenergibehovet pr. år (Q [kWh]) blive angivet sammen med den procentvise besparelse eller merforbrug i forhold til referencehuset (2375 kWh). Nettoenergibehovet er som nævnt tidligere den del af energiforbruget, som gratisvarmen fra personer, elektrisk udstyr, varmt vand og solen ikke kan dække.



Figur 4.5 Max. og min. temperaturer i sydzone - ingen solafskærmning

4.3.1 Vinduer, solvægge og luftsolfangere

Ved at sætte soltransmittansen af hhv. vinduerne, dæklagene i solvæggene og solfangerne til 0 kan man undersøge effekten af hvert af komponenterne for sig.

Hverken passive solvægge eller luftsolfanger

Solvæggene samt luftsolfangeren på referencehuset gøres ugennemskinnelige.

Resultat: $Q = 4335$ kWh eller et merforbrug på 83 %.

Ingen passive solvægge

Soltransmittansen af de passive solvægge mod øst, nord og vest sættes til 0.

Resultat: $Q = 2500$ kWh eller et merforbrug på 5 %.

Kun tagsolfanger

De passive solvægge samt luftsolfangeren mod syd regnes som værende sorte.

Resultat: $Q = 2790$ kWh eller et merforbrug på 18 %.

Kun solfanger mod syd

Soltransmittansen gennem solvæggene mod øst, nord og vest samt luftsolfangeren på taget sættes til 0.

Resultat: $Q = 2990$ kWh eller et merforbrug på 26%.

Ingen aktiv solfanger - kun passive solvægge

Luftsolfangeren mod syd udskiftes med en passiv uventileret solvæg, og transmittansen gennem taget er 0.

Resultat: $Q = 4085$ kWh eller et merforbrug på 72%.

Referencehuset uden vinduer, luftsolfanger eller solvægge

Alle soltransmittanser sættes til 0.

Resultat: $Q = 5340$ kWh eller et merforbrug på 125%.

Det er bemærkelsesværdigt, at de passive solvægge ikke yder et nævneværdigt energitilskud. Det er, fordi væggen er en meget let og velisoleret konstruktion. Derved kan den opsamlede varme i solvæggen ikke lagres, og næsten al energien tabes gennem dæklaget igen.

Selv om man ikke gør nogen tiltag med hensyn til udnyttelse af solenergi, så er varmebehovet lavt nok til, at huset kan klassificeres som et lavenergihus. Dette skyldes, at huset er velisoleret og antallet af kuldebroer gennem isoleringen er minimeret.

Tagsolfangeren ser ud til at være mere effektiv end solfangeren i sydfacaden. Det er lidt overraskende, men det skyldes, at tagsolfangerens areal er seks gange større.

4.3.2 Sadeltag

Her undersøges, hvilken indflydelse et sadeltag har på energibehovet. Tagsolfangeren udgør her kun den sydlige del af taget. Den nordlige del er af en ugenomsigtig konstruktion, der beregningsmæssigt består af en spånplade og 200 mm isolering.

Taghældning 15°

Idet bredden af huset er 8,0 m, bliver længden af en tagflade 4,1 m og taghøjden 1,1 m. Arealet af tagsolfangeren er 49,7 m².

Resultat: $Q = 2845$ kWh eller et merforbrug på 20%.

Taghældning 30°

Arealet af tagsolfangeren er 55,4 m².

Resultat: $Q = 2660$ kWh eller et merforbrug på 12%.

Taghældning 45°

Arealet af tagsolfangeren er 67,9 m².

Resultat: $Q = 2685$ kWh eller et merforbrug på 13 %.

Ved at lave et sadeltag reducerer man tagsolfangerens areal, og dermed forøges energibehovet. Et sadeltag kan dog være at foretrække af arkitektoniske årsager.

4.3.3 Ekstra isolering

Vægge

Væggene isoleres med 300 mm Rockwool i stedet for 200 mm.

Resultat: $Q = 1895$ kWh eller en besparelse på 20 %.

Stenlager

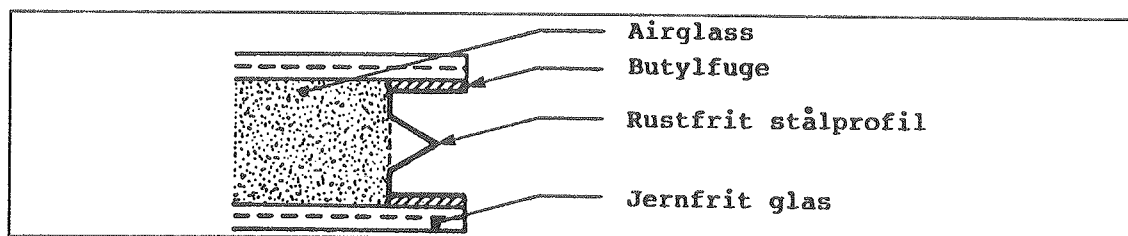
Under stenlageret og langs alle siderne isoleres med yderligere 100 mm Sundolitt ($\lambda = 0,039$ W/mK) til i alt 300 mm. Resultat: $Q = 2255$ kWh eller en besparelse på 4 %.

Ekstra isolering i væggene giver en ganske pæn besparelse, men det giver samtidigt store problemer med at holde temperaturen i opholdsrummene under 25°C . Det kan desuden give arkitektoniske problemer, idet vægtykkelsen bliver 55-60 cm. Dermed kan huset komme til at virke tungt og uelegant. En isoleringstykkelse på 200 mm i væggene er derfor at foretrække.

Besparelsen ved at isolere stenlageret mere er meget begrænset. Til gengæld ændrer man heller ikke på huset udseende.

4.3.4 Aerogel

SUNCODE er ikke umiddelbart egnet til at regne på aerogel, da en aerogel-rude er opbygget af lag, der er forskellige mht. transmittans, isolans, ekstinktionskoefficient og brydningsindex. Det er dog muligt at omgå disse problemer ved at korrigere skyggefaktoren /14/. Figur 4.6 viser en skitse af aerogel-rudens kant.



Figur 4.6 Snit gennem kanten af aerogel-ruden - fra /14/

Materialeleværdier:

Aerogel: $\lambda = 0,008$ W/mK, tykkelse = 20 mm

Glas: $\lambda = 0,8$ W/mK, tykkelse = 4 mm

Overgangsisolans $R_o = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$

Dette giver varmetabskoefficient for aerogel-rudens centerdel på: $U_0 = 0,373 \text{ W/m}^2\text{K}$

Herefter bestemmes kantkonstruktionens varmetabskoefficient pr. løbende meter (C [W/mK]).

$$C = \left(\frac{d_{stål}}{\lambda_{stål} \cdot g_{stål}} + \frac{t_{but}}{\lambda_{but} \cdot b_{but}} \right)^{-1}$$

hvor

$d_{stål}$ er stålprofilets længde (30 mm)

$\lambda_{stål}$ er stålprofilets varmeledningsevne (15 W/mK)

$g_{stål}$ er stålprofilets godstykkelse (0,3 mm)

t_{butyl} er butylfugens tykkelse (2 mm)

λ_{butyl} er butylfugens varmeledningsevne (0,2 W/mK)

b_{butyl} er butylfugens bredde (10 mm)

Med ovennævnte værdier indsat fås: $C = 0,13 \text{ W/mK}$

Den ækvivalente U-værdi for et vindue bestemmes af følgende formel, idet der tages hensyn til kuldebroen i kantkonstruktionens.

$$U = U_0 + \frac{P}{A} \cdot \frac{q_k}{T_a - T_o}$$

hvor

U_0 er varmetabskoefficienten i rudens midterfelt [W/m²K]

P/A er rudens perimeter/areal-forhold [m/m²]

q_k er varmestrømmen i rudens kantkonstruktion [W/m²]

T_a er indetemperaturen [°C]

T_o er omgivelsernes temperatur [°C]

q_k er bl.a. en funktion af C . Ligningerne er beskrevet nærmere i /14/. Resultatet afbildes i figur 5.2, hvor den ækvivalente U-værdi for aerogel-ruder med $C = 0,13 \text{ W/mK}$ er vist som en funktion af P/A .

Vinduer:

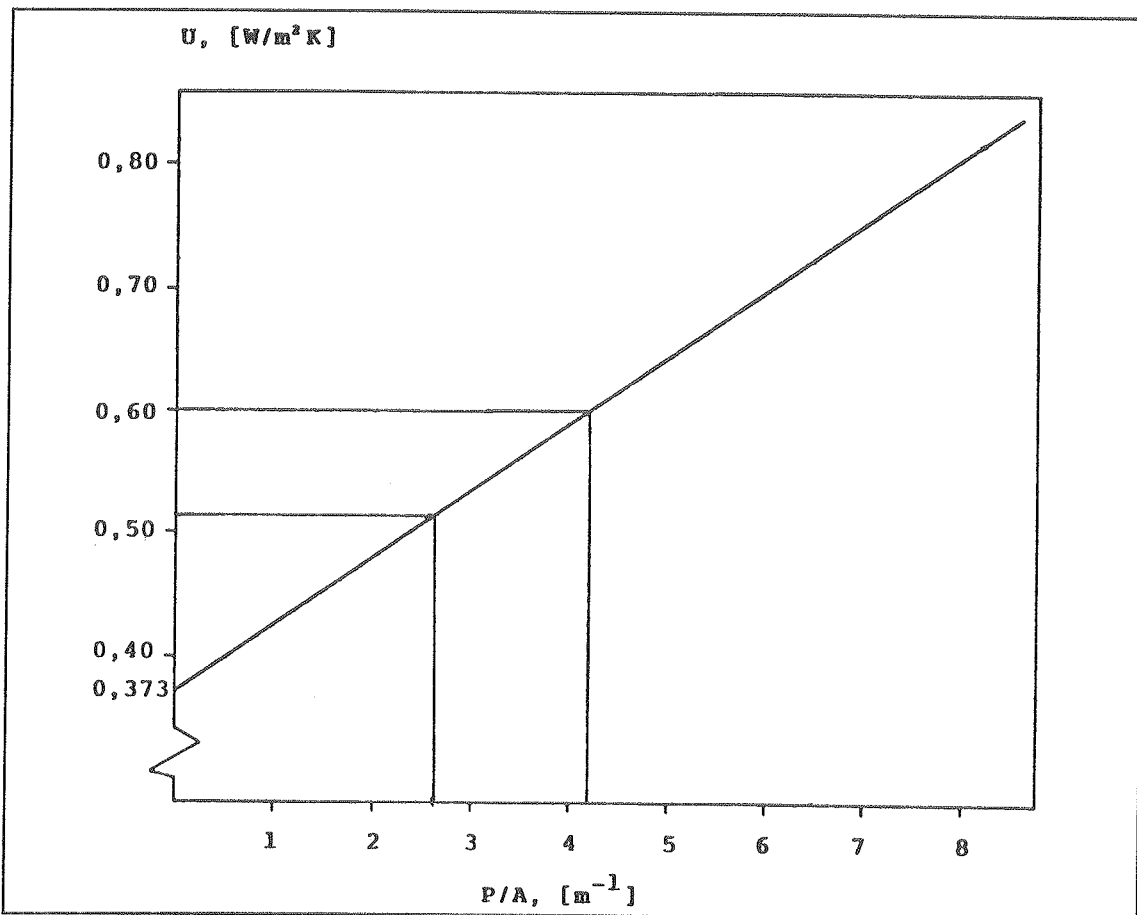
$$P/A = (4 \cdot 0,95 \text{ m}) / (0,95 \text{ m} \cdot 0,95 \text{ m}) = 4,21 \text{ m}^{-1}$$

På figur 4.7 aflæses $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$

Dæklag:

$$P/A = (2 \cdot 1,10 \text{ m} + 2 \cdot 2,43 \text{ m}) / (1,10 \text{ m} \cdot 2,43 \text{ m}) = 2,64 \text{ m}^{-1}$$

På figur 4.7 aflæses $U = 0,515 \text{ W/m}^2\text{K}$



Figur 4.7 U-værdi som funktion af P/A, $C = 0,13 \text{ W/mK}$ - hentet fra /14/

Brydningsindex:

I følge formel (2.3.1.1) i /15/ fås: $n = 1,0 + 0,21 \cdot \rho / 1000 = 1,02$, idet $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$ for monolitisk silika aerogel. I beregningerne benyttes $n = 1,0$, hvilket medfører, at transmittansen mht. reflektansen $\tau_r = 1,0$. Dette forsvares i /14/ med, at fejlen er mindre end 1%, og det giver nogle mindre komplicerede ligninger.

Effektiv transmittans-absorptans produkt $(\tau\alpha)_e$ /16/:

$$(\tau\alpha)_e = ((\tau\alpha) + 0,23 \cdot (1 - \tau_a)) \cdot SC = (1,01 \cdot \tau_r \cdot \tau_a \cdot \alpha + 0,23 \cdot (1 - \tau_a)) \cdot SC$$

hvor

τ_a er transmittansen mht. absorptansen i glasset [-]

τ_r er transmittansen mht. reflektionstab [-]

α er absorptansen [-]

SC er skyggefaktoren [-]

I SUNCODE beregnes: $(\tau\alpha)_e = \tau' \cdot \alpha' \cdot SC$; hvor τ' indeholder korrektion for den varme, som dæklaget absorberer; α' indeholder korrektion for den udnyttede del af

reflektionerne mellem ruden og det bagvedliggende rum.

I tabel 7.1.3.1 i /15/ er $(\tau\alpha)_{e,0} = 0,72$ og $(\tau\alpha)_{e,60} = 0,58$ for dæklaget i en solvæg. Værdierne svarer til direkte hhv. diffus indfalden stråling.

$$\text{Dæklag: } \alpha = 0,95 \Rightarrow \alpha' = 1,01 \cdot 0,95 = 0,96$$

$$\tau' = (\tau\alpha)_e / (\alpha' \cdot SC) = (1,01 \cdot \tau_a \cdot 0,95 + 0,23 \cdot (1 - \tau_a)) / 0,96 = 0,76 \cdot \tau_a + 0,24$$

Transmittansen mht. absorption bestemmes som /16/: $\tau_a = \exp(-K \cdot L / \cos b)$

Her er K ekstinktionskoefficienten [mm^{-1}], L er tykkelsen [mm], og b er brydningsvinklen.

Ekstinktionskoefficient:

Idet dæklagstykkelsen (L) beregningsmæssigt sættes til 5 mm, kan pseudo-værdierne for K og SC bestemmes vha. transmittans-absorptans produkterne. Da $n = 1,0$ er brydningsvinklen og indfaldsvinklen ens.

$$(\tau\alpha)_e = (0,76 \cdot \tau_a + 0,24) \cdot 0,96 \cdot SC$$

$$(\tau\alpha)_{e,0} = (0,76 \cdot \exp(-K \cdot 5 \text{ mm} / \cos 0) + 0,24) \cdot 0,96 \cdot SC$$

$$(\tau\alpha)_{e,60} = (0,76 \cdot \exp(-K \cdot 5 \text{ mm} / \cos 60) + 0,24) \cdot 0,96 \cdot SC$$

K findes ud fra de to ovennævnte ligninger.

$$\frac{0,72}{0,58} = \frac{0,76 \cdot \exp(-K \cdot 5 \text{ mm}) + 0,24}{0,76 \cdot \exp(-2 \cdot K \cdot 5 \text{ mm}) + 0,24} \Rightarrow K = 0,066 \text{ mm}^{-1}$$

Herefter udregnes $SC = 0,952$

$$\text{Vinduer: } \alpha = 1 \Rightarrow \alpha' = 1,01 \cdot 1 = 1,01$$

Beregningerne for vinduerne er som for dæklagene.

Resultaterne er:

$$K = 0,064 \text{ mm}^{-1} \text{ og } SC = 0,903$$

Da SUNCODE ikke kan regne med temperaturafhængige U -værdier, får man urealistiske temperaturer på ca. 800°C i de passive uventilerede solvægge. Derfor er beregningerne for besparelspotentialt ved anvendelse af aerogel indskrænket til vinduerne, taget og den ventilerede solvæg mod syd.

Aerogel i vinduer

I alle vinduer isættes aerogel, mens tag og sydfacade forbliver uændret.

Resultat: $Q = 1970$ kWh eller en besparelse på 17%.

Aerogel i vinduer og sydfacade

Taget er som i basishuset af polycarbonat.

Resultat: $Q = 1890$ kWh eller en besparelse på 20%.

Aerogel i vinduer og sydfacade - ingen tagsolfanger

Soltransmittansen gennem taget sættes til 0, og kildezonen til stenlageret er den ventilerede sydfacade.

Resultat: $Q = 2220$ kWh eller en besparelse på 7%.

Aerogel i vinduer, dæklag og tag

Hele tagfladen består af aerogel, og dermed er det samlede solfangerareal med aerogel 112 m².

Resultat: $Q = 1005$ kWh eller en besparelse på 58%.

Aerogel i vinduer, dæklag og tag samt 300 mm isolering i vægge og omkring stenlager

Dette er den optimale kombination af de foreslåede parametervariationer i solvægshuset.

Resultat: $Q = 705$ kWh eller en besparelse på 70%.

Som det kunne forventes, er der mulighed for at nedsætte energibehovet ved at bruge aerogel. Et af hovedformålene med Task 13 under Det Internationale Energi Agentur (IEA) /17/ var at lave et hus, hvor nettoenergiebehovet til rumopvarmning ligger på 1000-1500 kWh. Ved at benytte aerogel i vinduer, dæklag og tag er Task 13 målet opnået for solvægshuset. Selv ved den optimale udformning er det ikke muligt at gøre solvægshuset selvforsynende med energi til rumopvarmning, men det er dog lykkedes at nedbringe varmekonsumet til et meget lavt niveau. Det skal her bemærkes, at det på nuværende tidspunkt ikke er muligt at købe vinduer med silika aerogel endnu.

5 KONKLUSION

Laboratoriet for Varmeisolering har projekteret og opført et solvægshus i form af et forsøgshus på ca. 25 m². Over en periode på 1½ år er solvægshusets opvarmnings-system blevet undersøgt - dels ved målinger i forsøgshuset og dels ved beregninger med simuleringsprogrammet SUNCODE.

Indledningsvis er beregninger med SUNCODE blevet sammenlignet med målinger af temperaturer forskellige steder i forsøgshuset samt energiforbruget til rumopvarmning for at få et indtryk af, om SUNCODE er i stand til at regne på et hus som solvægshuset, der er meget utraditionel i sin opbygning.

Selv om programmet har sine begrænsninger, som f.eks. at det kun kan regne på identiske glaslag og U-værdierne er temperaturuafhængige, så har det været muligt at omgå disse problemer og få beregnede resultater, der ligger meget tæt op ad de målte.

Energiforbruget over en fyringssæson blev målt og beregnet med 2,5% afvigelse, og en sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer i solvæggene viser også en god overensstemmelse. Der er derfor grund til at tro, at beregningerne på solvægshuset i fuld skala er rimelig nøjagtige.

Simuleringer viser, at de passive uventilerede solvægge mod øst, nord og vest i deres nuværende udformning ikke har nogen vital betydning. Selv om der er målt og beregnet, at absorbertemperaturen ligger over udeluftstemperaturen ved blot diffus bestråling, så er varmebehovet kun 5% mere end basishusets 2375 kWh, hvis man undlader de passive solvægge. Grunden til, at de passive solvægge ikke gør meget gavn, ligger sandsynligvis i, at den opsamlede varme hverken kan lagres eller nå ind i stuen, da muren er højisolert uden nogen synderlig varmekapacitet.

I et forsøg på udnytte de passive solvægge i solvægshuset bedre, bliver de i løbet af efteråret 1994 i et nyt projekt ændret, således at man kan bruge dem til forvarmning af ventilationsluft. Man har åbnet solvæggen forneden, så udeluften kan komme ind bag glasset. Her bliver den opvarmet og vha. en ventilator trukket ind i rummet. En del af varmetabet gennem muren vil sammen med evt. solindfald være med til at opvarme ventilationsluften, og dermed er varmetabet gennem muren ikke et fuldstændigt tab.

Idet forsøgshuset er meget tæt og velisolert, kan man få meget høje temperaturer inde i huset. Dette problem kan afhjælpes ved en solafskærmning og udluftning. Dermed opnås, at temperaturen kun i korte perioder ligger over 25°C.

Energibehovet i basishuset på 106 m² er beregnet til 3150 kWh pr. år, hvoraf sol-energien, der er oplagret i stenlageret, bidrager med 775 kWh. Dermed bliver nettoenergibehovet på 2375 kWh pr. år.

Som det kunne ventes, er der store besparelser at hente på energiforbruget til opvarmning ved brug af silika aerogel. 17% af energibehovet spares ved alene at bruge aerogel i vinduerne. Hvis man derudover sætter silika aerogel i dæklaget på luftsolfangeren, kan man udnytte stenlageret bedre. Beregningerne viser, at nettoenergibehovet i så fald kan nedbringes til godt 1000 kWh pr. år.

Aerogelruder er stadig under udvikling, og den optiske og mekaniske kvalitet af aerogelen er i øjeblikket ikke tilstrækkelig god til benyttelse i vinduer. Brugen af aerogeler medfører i stor omfang overophedning, og i forbindelse med et aerogelvindue skal der derfor altid være mulighed for solafskærmning.

Ved at isolere med 300 mm mineraluld og i øvrigt benytte aerogelruder og -dæklag fremkommer den mest energiøkonomiske konstruktion, hvor kun godt 700 kWh skal tilføres udefra om året. Selv om solvægshuset ikke bliver selvforsynende med energi til rumopvarmning, så er niveauet for energibehovet så lavt, at der er basis for at undersøge konstruktionsprincipperne yderligere. Det næste skridt vil naturligt være at opføre et solvægshus i fuld størrelse og udføre målinger af energiforbruget og indeklimaet. Desuden skal det undersøges, om der vil være en acceptabelt økonomi og et potentielt marked for et sådant hus.

REFERENCER

- /1/ Jørgensen, Olaf Bruun og Svend Aage Svendsen: "Solvægshus med integreret varmeanlæg. Projektering og opbygning". Rapport nr. 92-39, Laboratoriet for Varmeisolering (LfV), Danmarks Tekniske Universitet (DTU), december 1992.
- /2/ Fritzel, P. og Olaf B. Jørgensen: "Uventilerede solvægge i ældre boligblok - fuldskaforføg". Meddelelse nr. 241, LfV, DTU, marts 1993. ISSN 0905-1511.
- /3/ DeLaHunt, Mary Jane: "SUNCODE-PC a program user's manual". Ecotope, Inc. Seattle, Washington, USA, 1985.
- /4/ Andersen, Bo - Stig Eidorff - Lars Hallgreen - Hans Lund - Erik Pedersen - Stig Rosenørn - Ole Valbjørn: "Vejrdata for VVS og Energi - Dansk Referenceår TRY". SBI rapport 135. Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), 1982.
- /5/ Brüel & Kjær: "Product Data, Multi-gas Monitor - Type 1302", 1991.
- /6/ Christensen, Jørgen Erik: "EDB-programmer til beregning af passiv solvarme". Meddelelse nr. 185, LfV, DTU, oktober 1987. ISSN 0905-1511.
- /7/ "Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af bygningers varmetab". Dansk Standard DS 418 5. udgave, NP-186-S, december 1986. ISBN 87-571-0967-2.
- /8/ Hansen, H.E. - P. Kjerulf-Jensen - Ole B. Stampe (red.): "danvak - Varme- og Klimateknik - Grundbog". DANVAK ApS. ISBN 87-982652-1-0.
- /9/ Jørgensen, Olaf Brunn og Claus Schmidt: "Energirenovering af ældre boligblok med hovedvægt på udnyttelse af transparant isoleringsmateriale". Meddelelse nr. 212, LfV, DTU, marts 1990. ISSN 0905-1511.

- /10/ Johnsen, Kjeld og Anker Nielsen: "Beregning af energiforbrug i småhuse". SBI-rapport 148, Statens Byggeforskningsinstitut, 1984.
- /11/ Barakat, S.A.: "Inter-Zone Convective Heat Transfer in Building: A Review". Journal af Solar Energy Engineering, Vol. 109, May 1987.
- /12/ Byggestyrelsen: "BR-S 85, Bygningsreglement for småhuse". Marts 1985. ISSN 0900-2022.
- /13/ Johnsen, Kjeld og Henrik Schmidt: "Højisolerede glashuse", SBI-rapport 220, Statens Byggeforskningsinstitut, 1993.
- /14/ Jørgensen, Olaf Bruun: "Silica aerogel-ruder i den danske boligmasse". Meddelelse nr. 208, LfV, DTU, juli 1989. ISSN 0905-1511.
- /15/ Ingerslev Jensen, Karsten: "Højisolerende transparent dæklag". Meddelelse nr. 204, LfV, DTU, juli 1989. ISSN 0905-1511.
- /16/ Duffie, John A. and William A. Beckman: "Solar Engineering af Thermal Processes", Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 1980. ISBN 0-471-05066-0.
- /17/ Thomsen, Kirsten E. - Kim B. Wittchen - Bjarne Saxhof: "Advanced Solar Low-Energy Buildings - Danish Work within IEA Task 13". Paper presented at ASHRAE/DOE/BTECC Conference in Florida, USA, December 1992.

BILAG A

Redigeret uddrag fra /1/:

Jørgensen, Olaf Bruun og Svend Aage Svendsen: "Solvægshus med integreret varmeanlæg. Projektering og opbygning". Rapport nr. 92-39, Laboratoriet for Varmeisolering (LfV), Danmarks Tekniske Universitet (DTU), december 1992.

A 3 BYGNINGSBESKRIVELSE

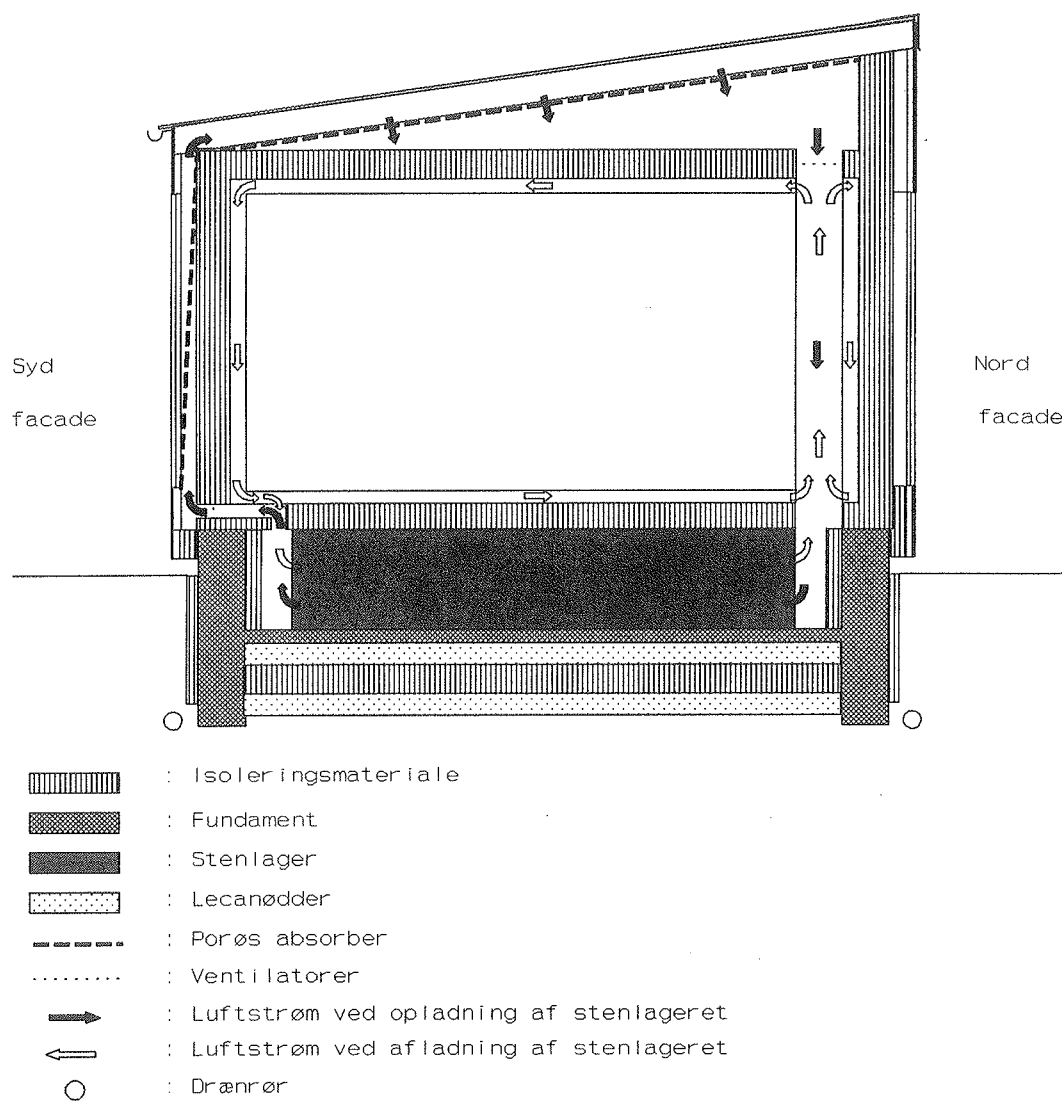
A 3.1 Idé og principiel udformning

Det opførte solvægshus er inspireret af et eksisterende modulbaseret byggesystem med tyndvæggede stålprofiler, gipsplader og mineraluld. Da det er tanken, at solvægshuset skal være selvforsynende med varme, er dette opbygget af højisolerede konstruktioner, hvorfor opvarmningsbehovet vil være begrænset sammenlignet med traditionelt byggeri. Opvarmningen af huset sker ved at udnytte solenergi med luft som det varmebærende medium, idet et stenvarmelager under huset opvarmes ved at lade luft passere gennem ventilerede solvægge. Herved opvarmes luften i perioder med solskin. Den opvarmede luft afgiver varme til stenvarmelageret, hvorefter stenvarmelageret i perioder med fyringsbehov opvarmer luften, der cirkuleres i en spalte i husets vægge, luft og gulv inden for isoleringen. Ved at udforme opvarmningssystemet på denne måde kan meget lave temperaturer (ned til 20°C) i stenvarmelageret udnyttes, og desuden forbedres den termiske komfort (ingen luftstrømninger og total varmeomslutning). Luften, der cirkuleres gennem stenvarmelageret, bliver ikke blandet med rumluften. Derved undgås en række luftkvalitetsmæssige problemer. I figur A 3.1 er vist en principskitse af det opførte hus.

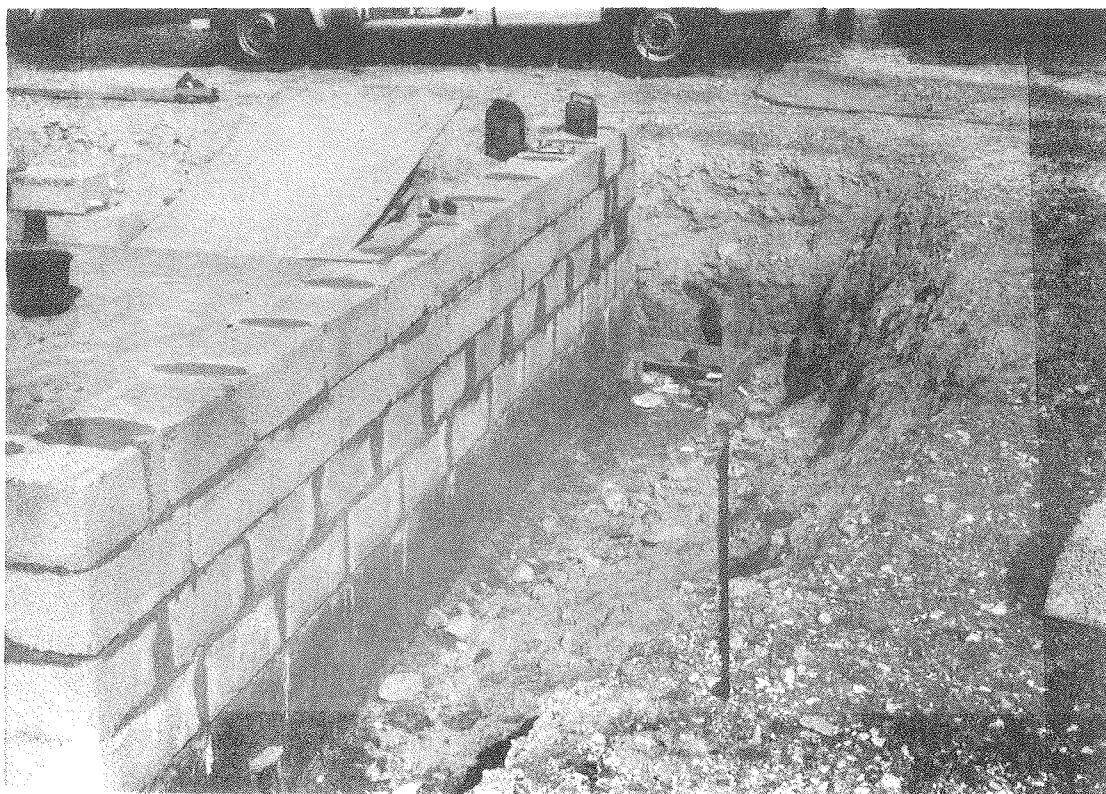
A 3.2 Konstruktioner

Bærende konstruktioner

Husets fundament er opført på et støbt rendefundament oven på hvilket, der er opmuret et fundament af blokke af letklinker. I figur A 3.2 er vist et foto af fundamentet. De vigtigste tegninger af husets konstruktioner findes i bilag B.

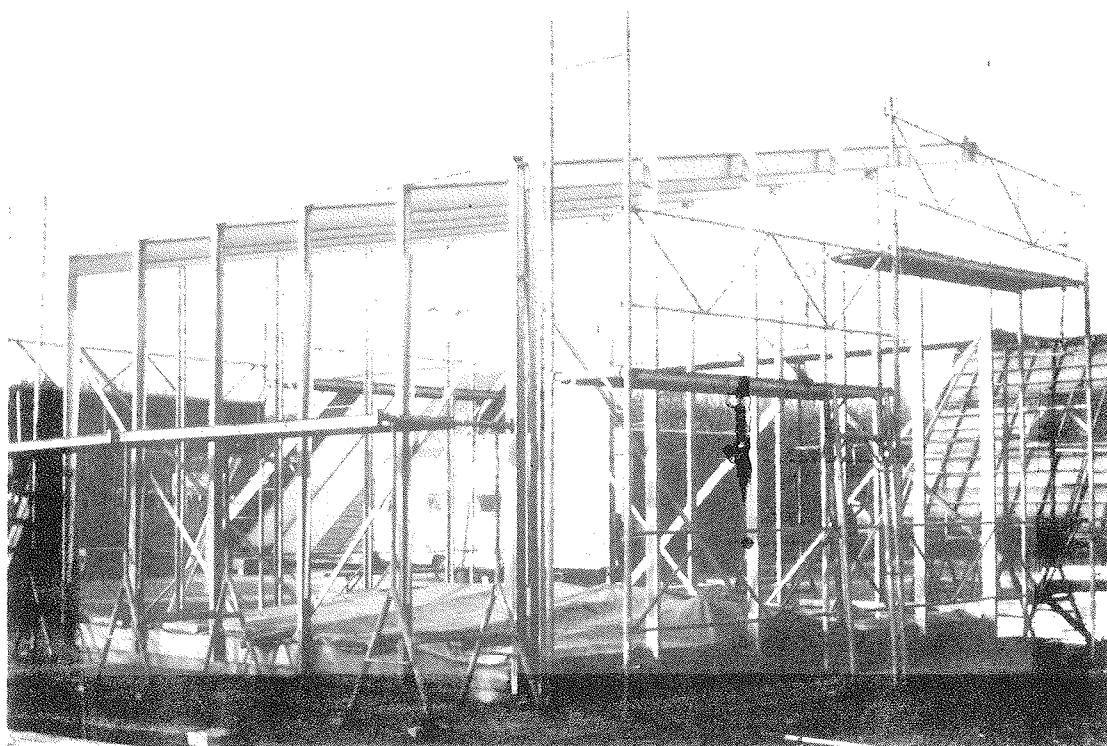


Figur A 3.1 *Principskitse af det opførte solvægshus*



Figur A 3.2 *Opmuret fundament af blokke af letklinker*

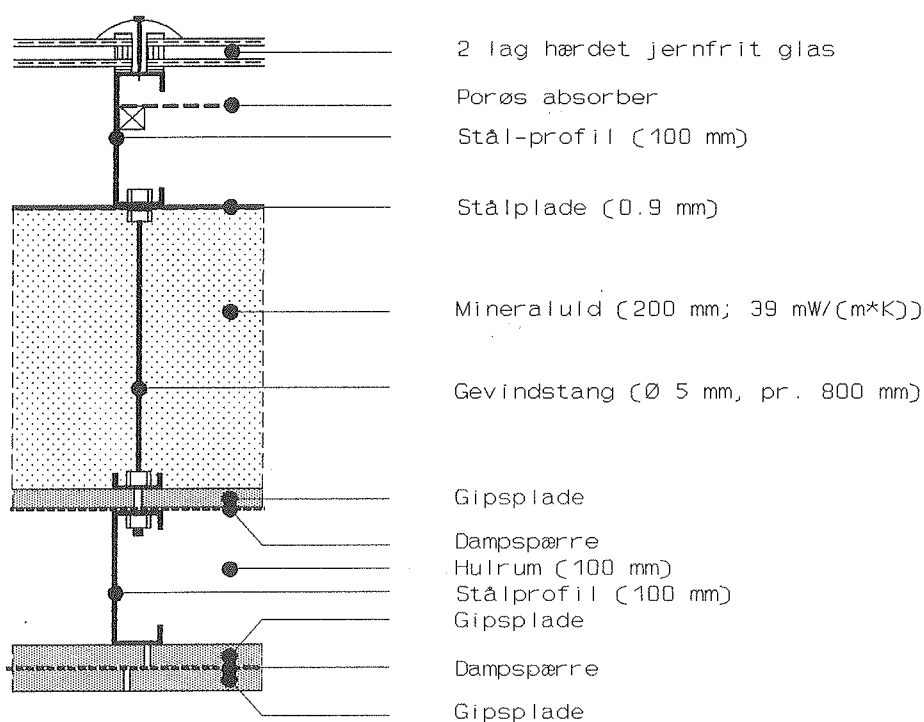
Husets væg- og tagkonstruktion er udført som en indvendig og udvendig ramme af 100 mm C-formede stålprofiler. Denne konstruktion er vist i figur A 3.3.



Figur A 3.3 *Bærende stålskelet til vægge og tag*

Ydervæg

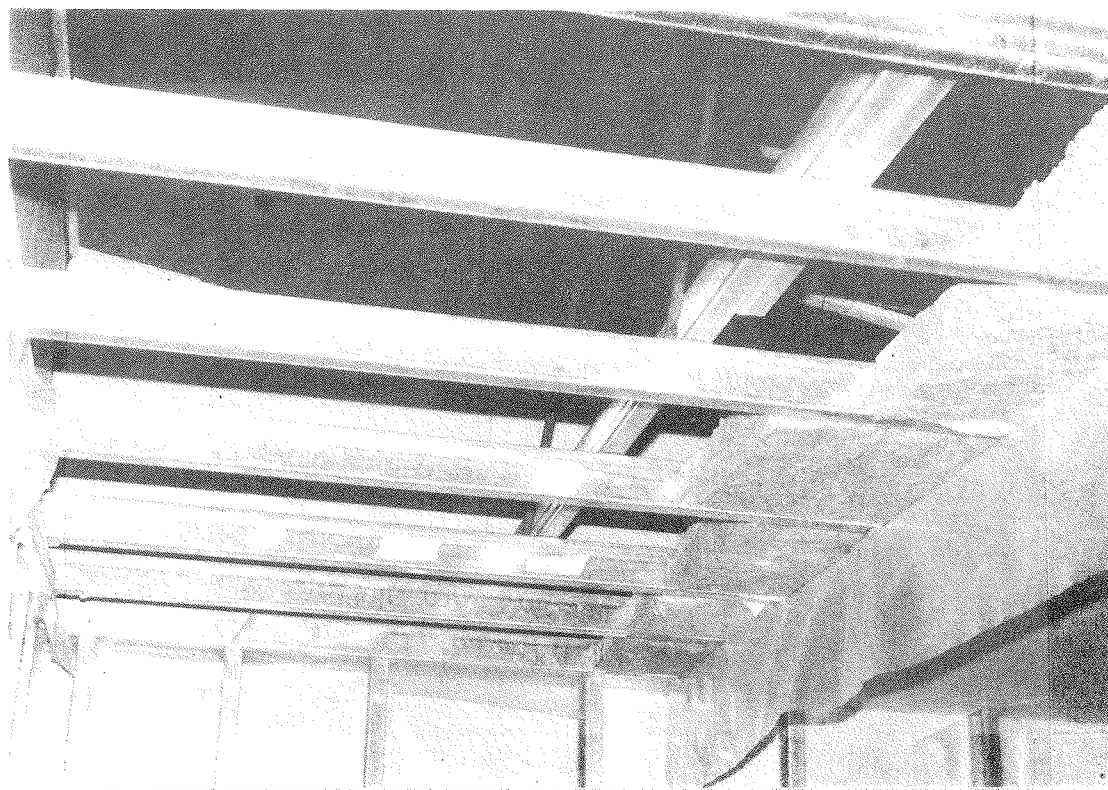
Ydervæggene er set indefra opbygget som: To 13 mm gipsplader mellem hvilke, der er en dampspærre, herefter en indvendig bærende ramme af 100 C-formede stålprofiler pr. ca. 600 mm, en 13 mm gipsplade, 200 mm mineraluld, en 0,9 mm stålplade, en udvendig bærende ramme af 100 mm C-formede stålprofiler pr. ca. 1150 mm, en porøs absorber, to lag hærdet glas. Imellem den indvendige og udvendige bærende stålramme er monteret 5 mm gevindstænger pr. 800 mm for at minimere kuldebroeffekten bedst muligt. Dette reducerer U-værdien for ydervæggene i forhold til, hvis der i stedet havde været anvendt et 200 mm C-profil med ca. 43 %. I de tre uventilerede solvægge er ikke anvendt en porøs absorber. Stålbladerne er i stedet malet sorte. I figur A 3.4 er vist et vandret snit i den sydvendte ydervæg.



Figur A 3.4 Vandret snit i sydvendt solvæg

Loft

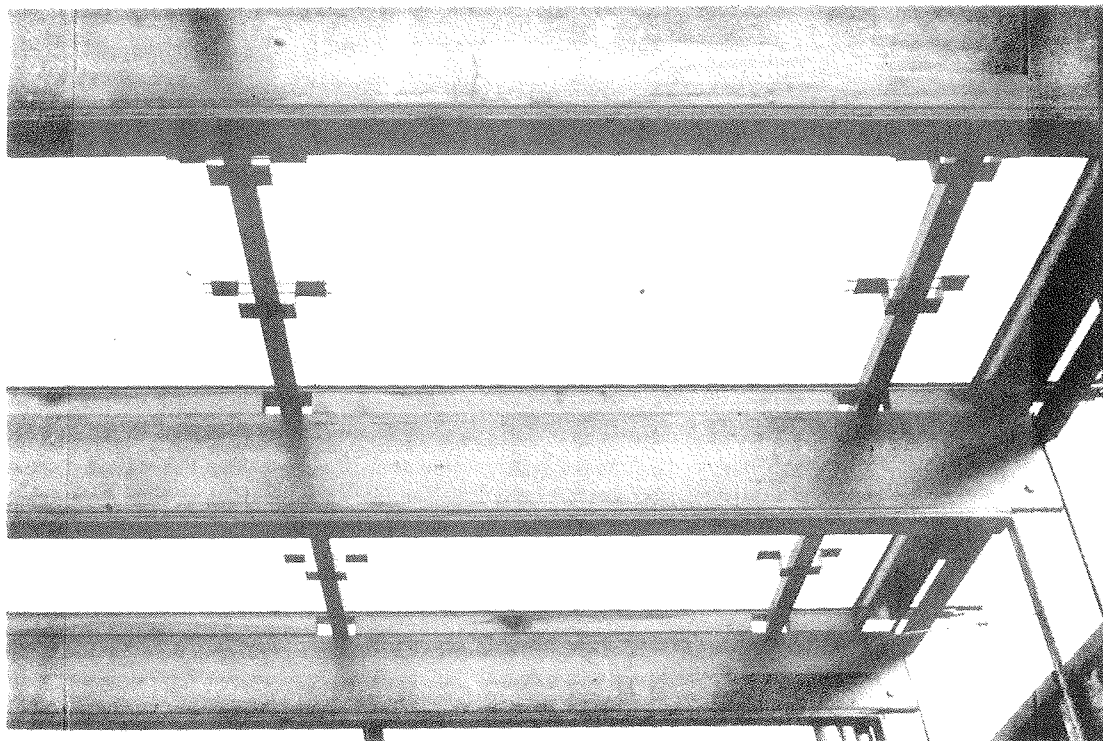
Set indefra er loftet opbygget som: To 13 mm gipsplader mellem hvilke, der er en dampspærre, herefter en indvendig bærende ramme af 100 mm C-formede stålprofiler pr. ca. 600 mm, en 13 mm gipsplade, 100 mm mineraluld placeret mellem 100 mm C-formede stålprofiler pr. ca. 600 mm, 100 mm mineraluld, hvorved der ikke findes nogen ubrudt kuldebro i loftkonstruktionen. I figur A 3.5 er vist, hvorledes loftkonstruktionen er opbygget.



Figur A 3.5 *Opbygning af loftkonstruktionen*

Tag

Tagkonstruktionen er set indefra udført som: 200 mm C-formede stålbjælker imellem hvilke, der er udspændt en porøs absorber. Dæklaget er udført af 10 mm polycarbonat-plader. For at tage hensyn til temperaturbevægelserne er der foretaget en fastgørelse af polycarbonat-pladerne, der tillader disse at bevæge sig op til 50 mm i længderetningen. I figur A 3.6 er vist et foto af fastgørelsen.



Figur A 3.6 Fastgørelse af dæklag i tagkonstruktion

Gulv

Gulvet er set indefra opbygget som: En 22 mm gulv-spånplade, en 13 mm gipsplade mellem hvilke, der er en dampspærre, herefter et 100 mm hulrum med trælægter på strøer, 200 mm mineraluld mellem 200 C-formede stålbjælker pr. ca. 600 mm. Under gulvkonstruktionen findes det 950 mm høje stenvarmelager.

Terrændæk

Terrændækket er set indefra opbygget som: 80 mm beton, 150 mm letklinker, 200 mm polystyren dæk-plader og 150 mm letklinker.

Fundament

Fundamentet er set indefra opbygget som: 125 mm trykfast mineraluld, 290 mm leca-blokke, 10 mm puds, 75 mm polystyren dræn-plader. I bunden af fundamentet er på ydersiden etableret et omfangsdræn, der er sluttet til en eksisterende faskine. Dette er vist i figur A 3.7.



Figur A 3.7 *Omfangsdræn ved fundament*

Vinduer

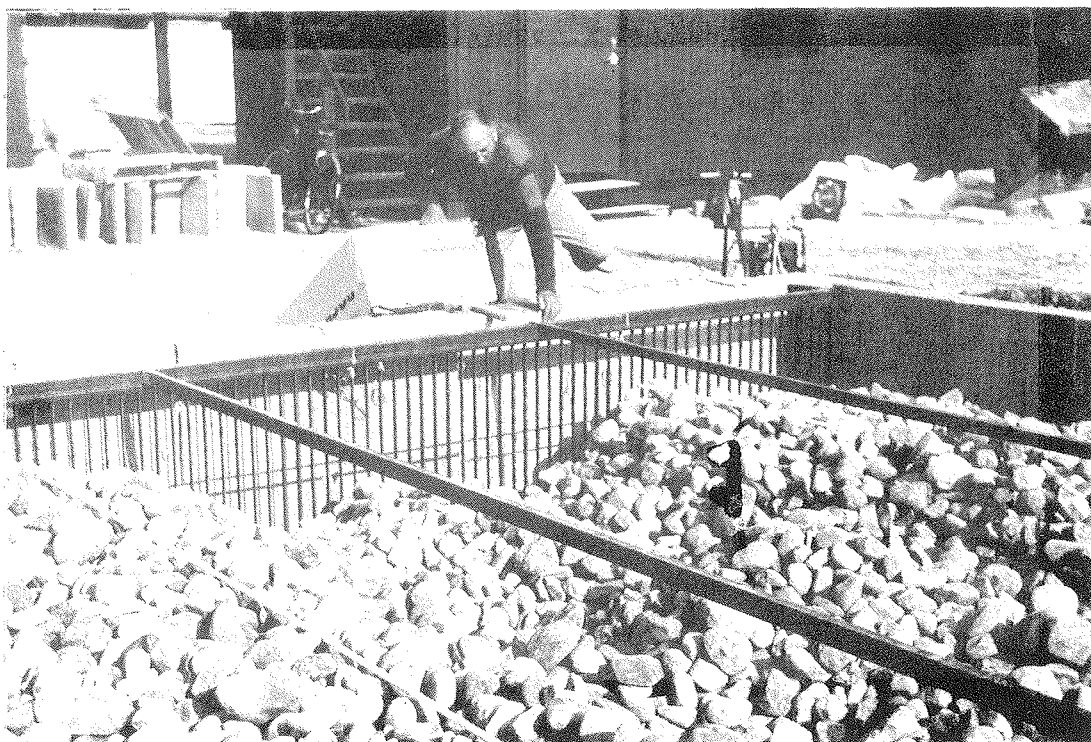
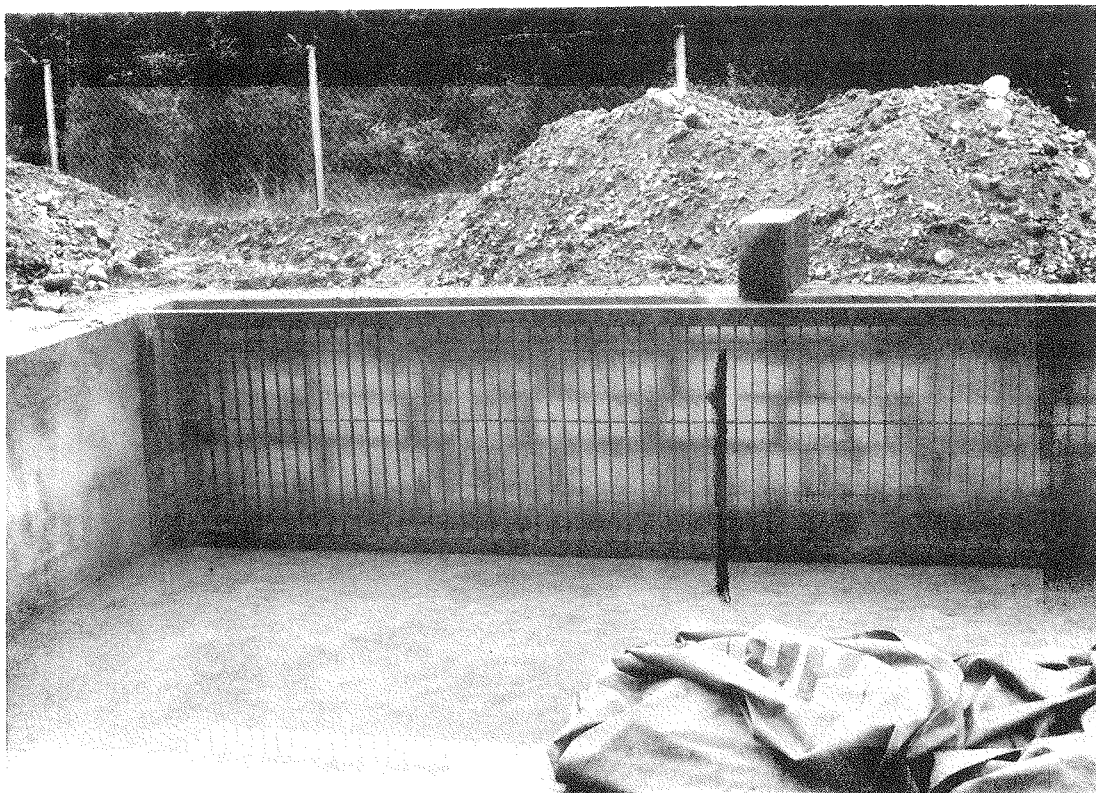
Vinduerne er uoplukkelige og udført med lavenergi-ruder med en U-værdi på 1,6 W/m²K. Rammer af hvide plastelementer.

Døre

Døren i nordsiden er fremstillet i hvid plast isoleret med 16 mm isoleringsmateriale. Mod syd er isoleringsmaterialet erstattet med lavenergi-ruder.

Stenvarmelagre

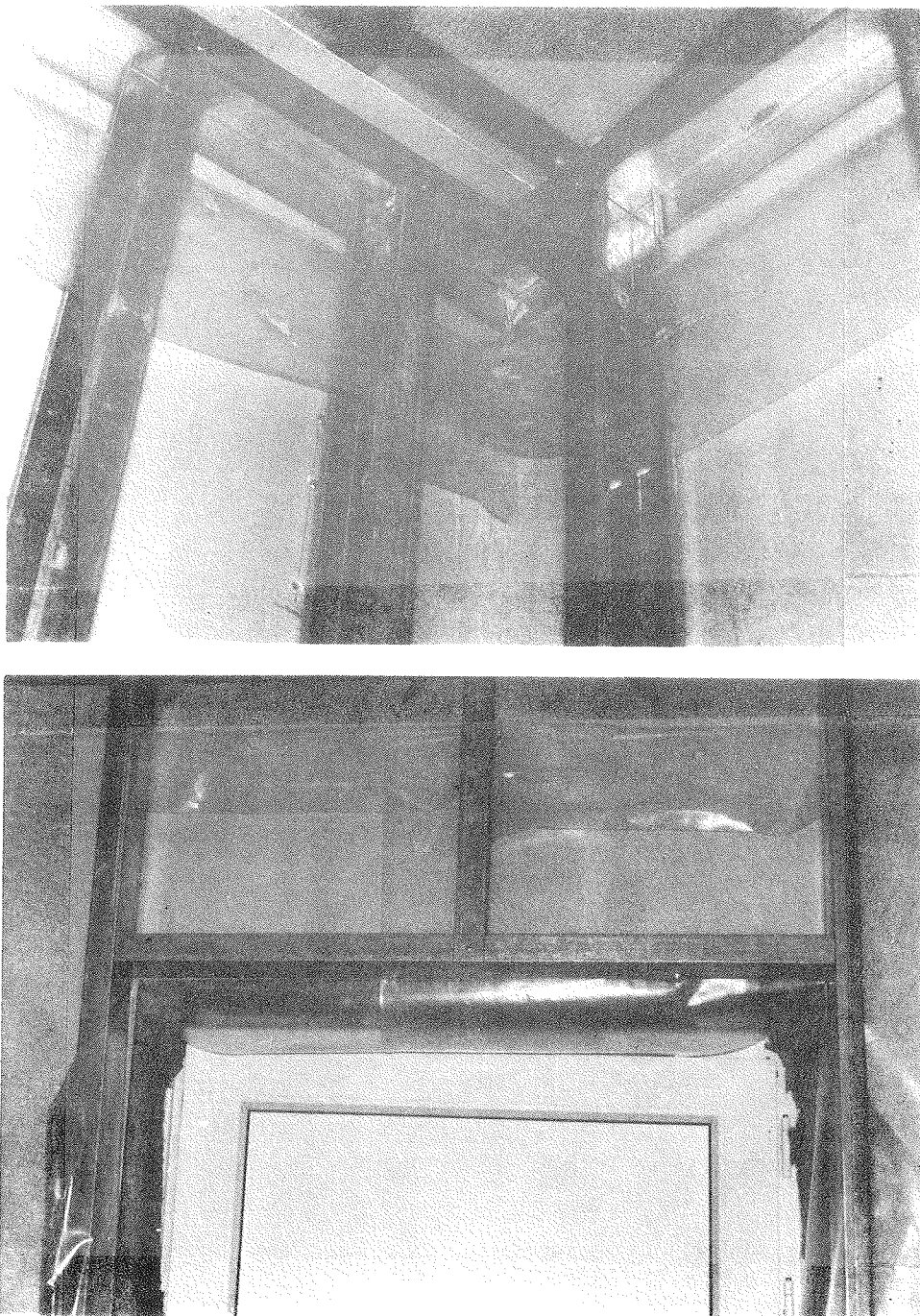
Stenvarmelageret er udført med et trykkammer i den syd- og nordvendte ende. Stenene holdes på plads af en kraftig jernrist. I figur A 3.8 er vist to fotos af stenvarmelageret.



Figur A 3.8 *Stenvarmelageret uden og med sten*

A 3.3 Tæthed og luftcirkulation

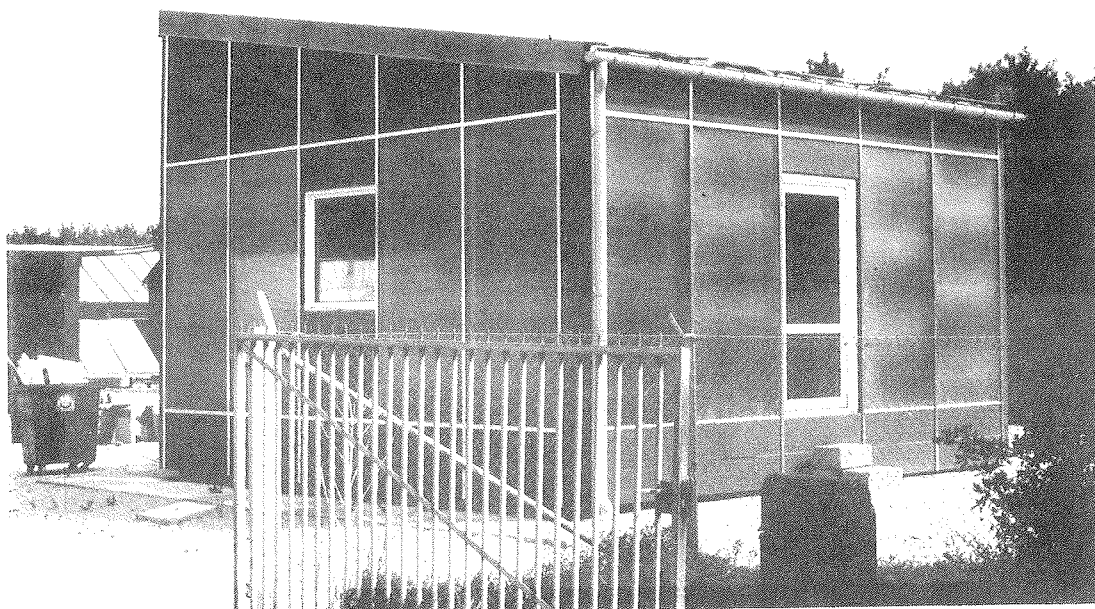
For at sikre at den opvarmede luft føres korrekt frem til stenvarmelageret, solvæg og hulrum, samt at ønsket infiltration med udeluft undgås, er huset udført med en omhyggelig tætning. Herudover er der flere steder i huset anvendt ventilationskanaler for at sikre korrekt luftstrømning. Foranstaltninger til omhyggelig tætning og korrekt luftstrømning er vist i figur A 3.9.



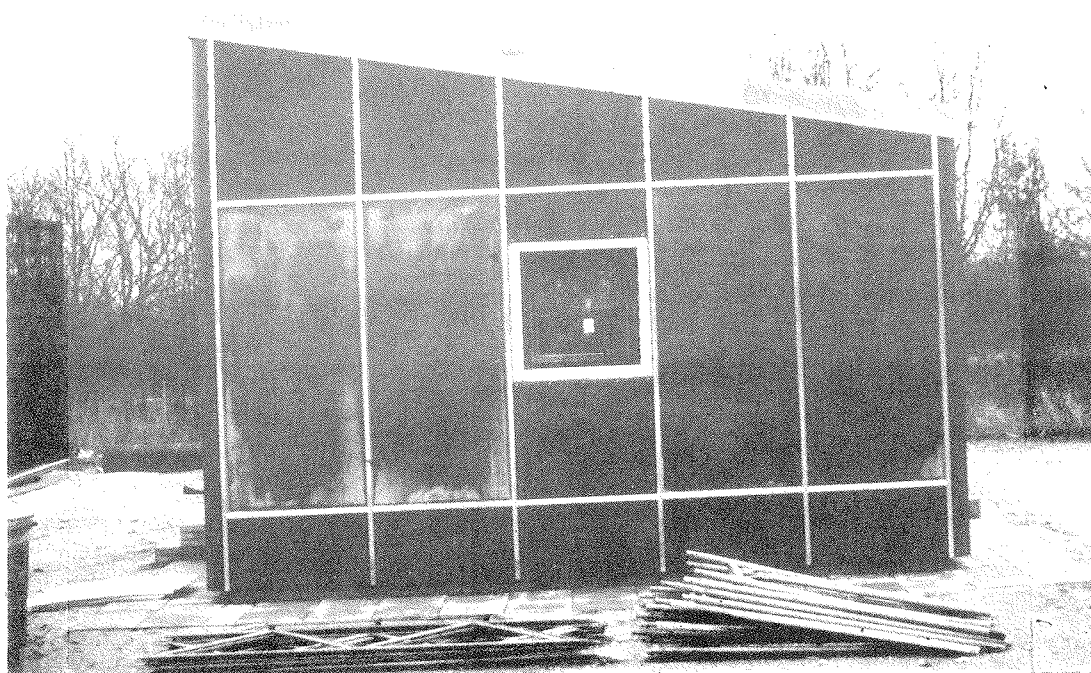
Figur A 3.9 Foranstaltninger til omhyggelig tætning og korrekt luftstrømning

A 3.4 Præsentation af det færdige hus

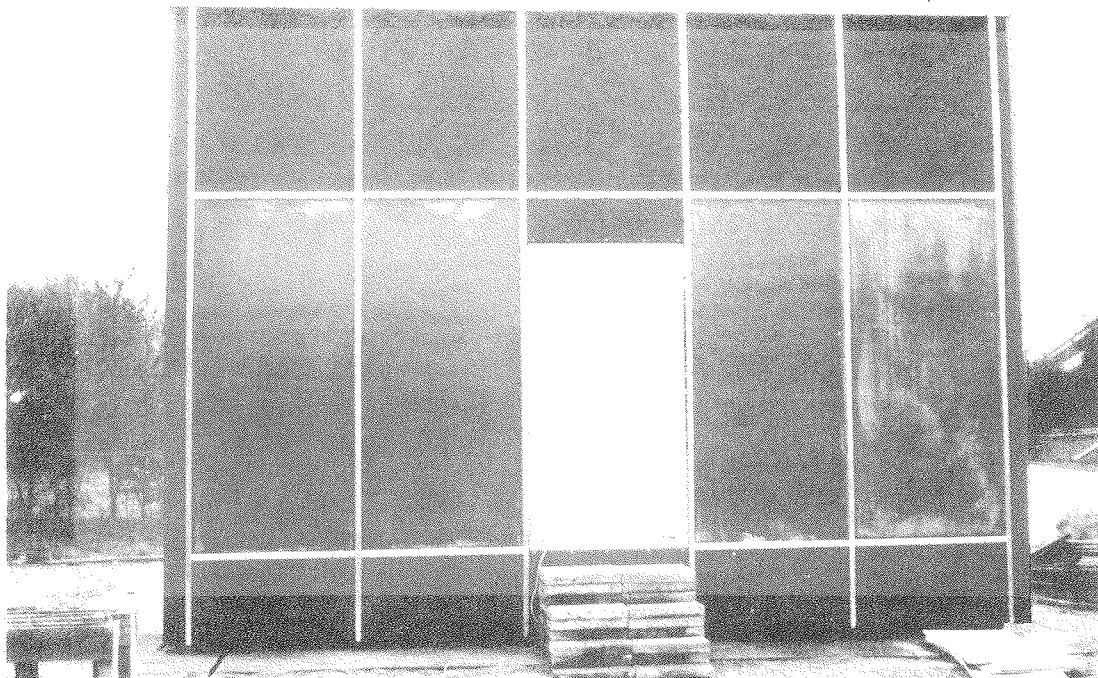
De forskellige facader i det opførte solvægshus med integreret varmeanlæg er vist i figur A 3.10, A 3.11 og A 3.12. I figur A 3.13 er vist et foto af huset set i fugleperspektiv.



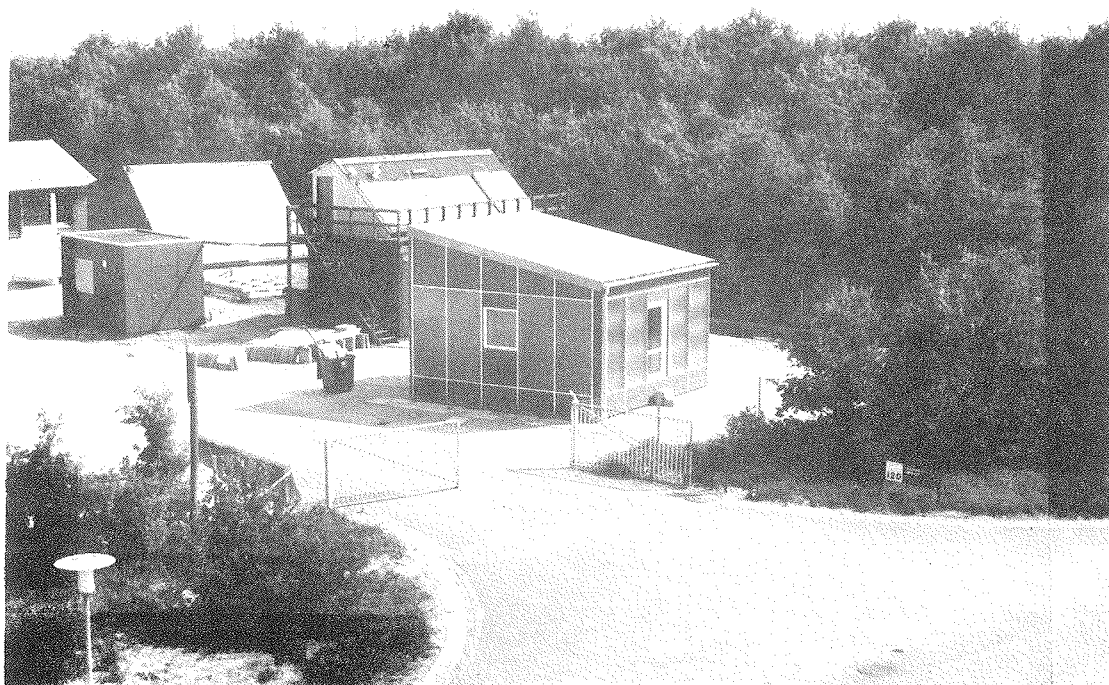
Figur A 3.10 Solvægshus med integreret varmeanlæg set fra sydvest



Figur A 3.11 Solvægshus med integreret varmeanlæg set fra vest



Figur A 3.12 *Solvægshus med integreret varmeanlæg set fra nord*



Figur A 3.13 *Fugleperspektiv af solvægshus med integreret varmeanlæg*

A 4 MÅLEPROGRAM OG MÅLEUDSTYR

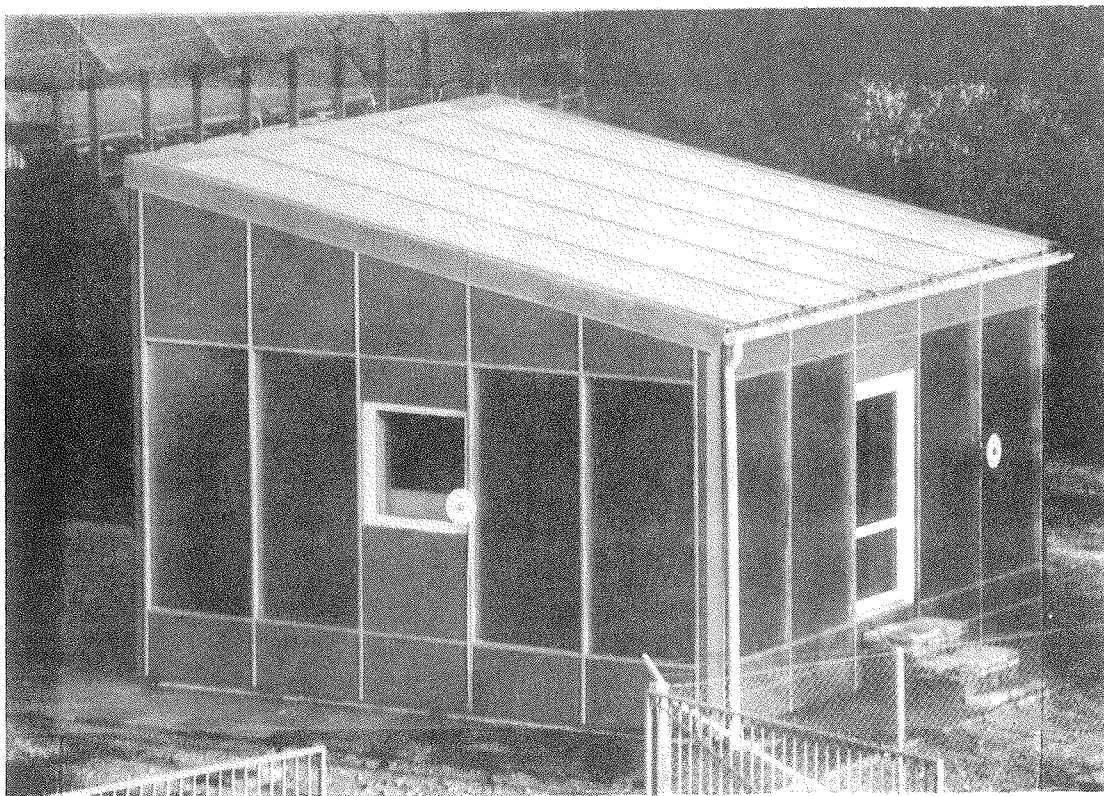
Der kan foretages to forskellige typer målinger:

- 1) Solindfald på alle facader samt tag.
- 2) Temperaturforhold for solvægge, stenvarmelageret, hulrum og opholdszone.

A 4.1 Solindfald på facader og tag

Målepunkter

Solindfaldet måles vha. fem pyranometre, der er placeret midt på de fire facader samt på taget. Placeringen af pyranometrene er vist i figur A 4.1.



Figur A 4.1 *Placering af pyranometre til måling af solindfald*

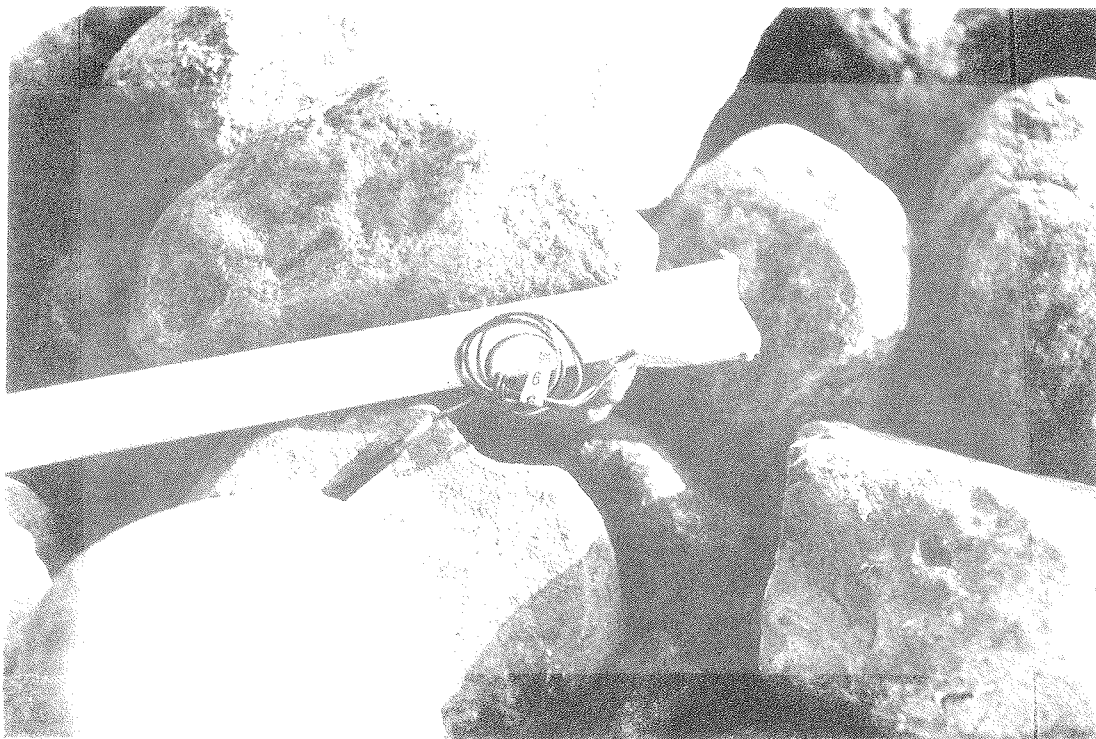
Metode

De benyttede pyranometre, type CM 5 fra Kipp & Zonen, udtrykker solindfaldet som funktion af en i pyranometret målt spændingsforskel. Den målte spændingsforskel registreres i "spændingskanaler" i en datalogger. Pyranometrene er kalibreret således, at en spændingsforskel på 1 mV svarer til et solindfald på hhv. $76,3 \text{ W/m}^2$ for det sydvendte, $76,3 \text{ W/m}^2$ for det vestvendte, $87,0 \text{ W/m}^2$ for det nordvendte og $87,0 \text{ W/m}^2$ for det østvendte pyranometer. Pyranometret på tagfladen er kalibreret således, at en spændingsforskel på 1 mV svarer til et solindfald på $80,6 \text{ W/m}^2$.

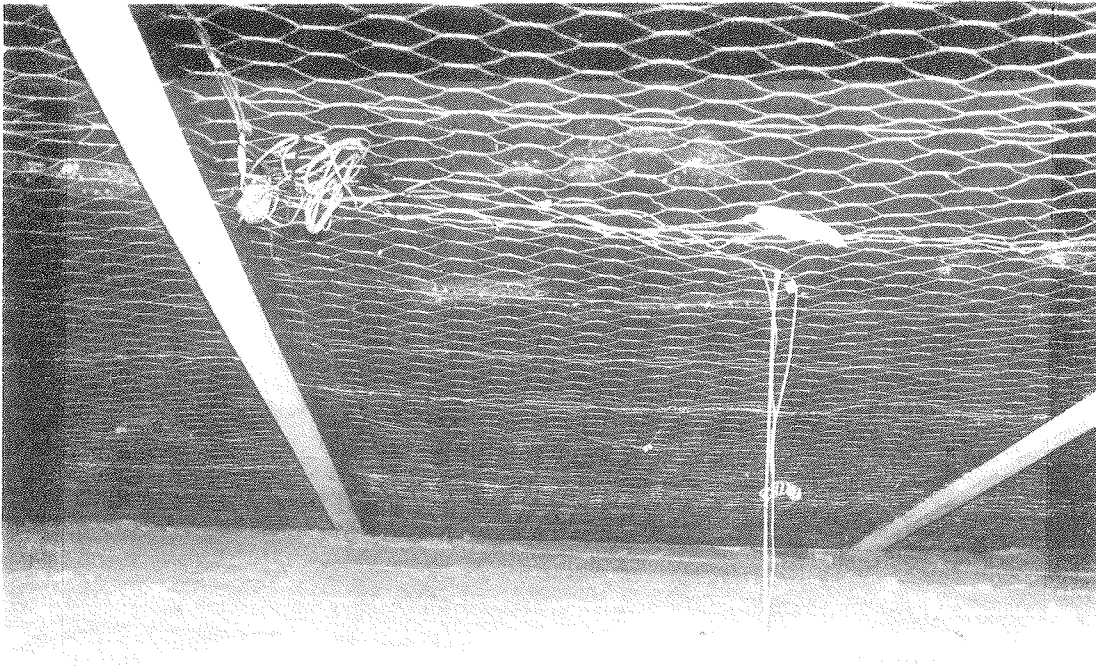
A 4.2 Temperaturforhold for solvægge, stenvarmelageret, hulrum og opholdszone

Målepunkter

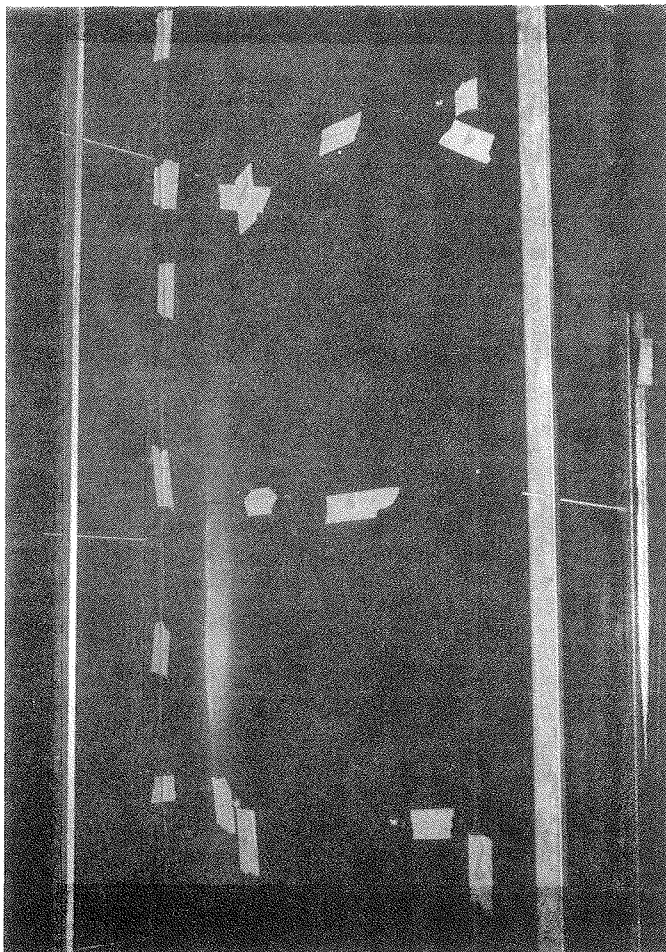
Vurderingen af de to forskellige typer solvægge (uventileret og ventileret) er baseret på måling af en række temperaturer. I figur A 4.2, A 4.3, A 4.4 og A 4.5 er vist termoelementer i hhv. stenvarmelageret, absorber i tagrum, bag på stålplade i ventileret solvæg samt i hulrum på inderside af isolering i ydervæg. De forskellige målepunkter er vist i tabel A 4.1 og A 4.2.



Figur A 4.2 *Termoelement i stenvarmelageret*



Figur A 4.3 *Termoelement på absorber i tagrum*



Figur A 4.4 *Termoelementer bag på stålplade i ventileret solvæg*



Figur 4.5 *Termoelementer i hulrum på inderside af isolering i ydervæg*

Sydvendt facade - solvæg	
Lednings-nr.	Placering
1	Inderside af glas
2	Yderside af glas
3	Nederst på absorber
4	Midt på absorber
5	Øverst på absorber
6	Inderside af stålplade
7	Indløb til solvæg
Tag og loft -solfanger	
Lednings-nr.	Placering
8	Overgang fra solvæg til solfanger
9	Inderside af polycarbonat-plade
10	Yderside af polycarbonat-plade
11	Nederst på absorber
12	Midt på absorber
13	Øverst på absorber
14	Midt i tagrum
15	Overside af isolering
Nordvendt facade - solvæg	
Lednings-nr.	Placering
16	Midt på absorber
17	Hulrum bag blå plade ud for loftrum
Østvendt facade - solvæg	
Lednings-nr.	Placering
18	Midt på absorber
19	Hulrum bag blå plade ud for loftrum
Vestvendt facade - solvæg	
Lednings-nr.	Placering
20	Nederst på absorber, sydlige halvdel
21	Nederst på absorber, nordlige halvdel
22	Midt på absorber
23	Øverst på absorber, sydlige halvdel
24	Øverst på absorber, nordlige halvdel
25	Hulrum bag blå plade ud for luftrum
Sydvendt facade-ydermur	
Lednings-nr.	Placering
26	Inderside af mineraluld
27	Nederst i ventileret hulrum
28	Midt i ventileret hulrum
29	Øverst i ventileret hulrum
30	Inderside af indvendige gipsplader
31	Overgang til lager

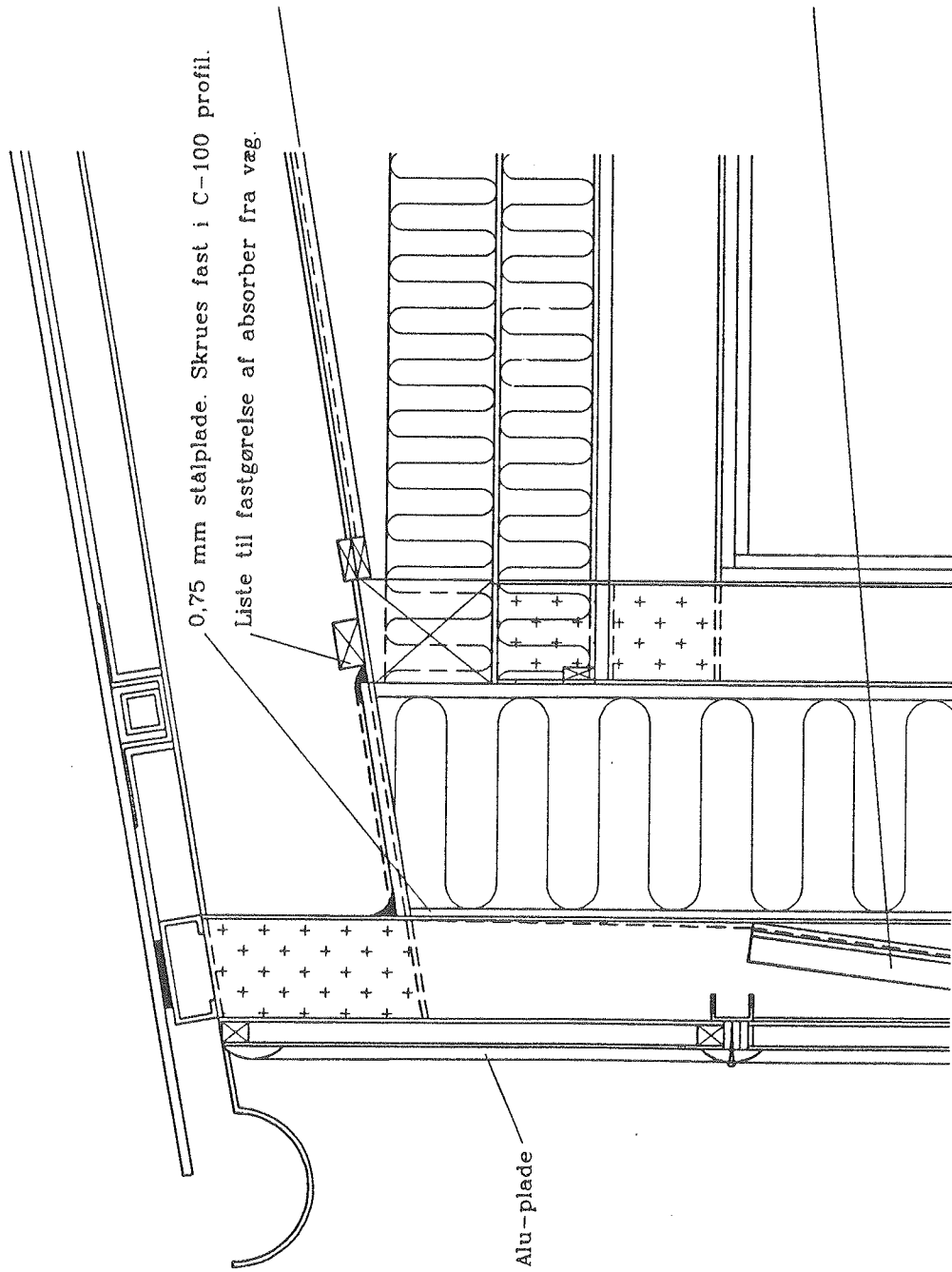
Tabel A 4.1 Oversigt over målepunkter i solvægshus

Nordvendt facade - ydermur	
Lednings-nr.	Placering
32	Inderside af mineraluld
33	Nederst i ventileret hulrum
34	Midt i ventileret hulrum
35	Øverst i ventileret hulrum
36	Inderside af indvendige gipsplader
Øst- og vestvendt facade - ydermur	
Lednings-nr.	Placering
37	Inderside af mineraluld, øst
38	Inderside af mineraluld, vest
39	Midt i ventileret hulrum, øst
40	Midt i ventileret hulrum, vest
41	Inderside af indvendige gipsplader, øst
42	Inderside af indvendige gipsplader, vest
Gulv og loft	
Lednings-nr.	Placering
43	Inderside af mineraluld, gulv
44	Inderside af mineraluld, loft
45	Midt i ventileret hulrum, gulv
46	Midt i ventileret hulrum, loft
47	Inderside af indvendige spånplader, gulv
48	Inderside af indvendige gipsplader, loft
Ventilator fra tagrum	
Lednings-nr.	Placering
49	Indløb fra tagrum
50	Indløb til lager
Ventilator til ventileret hulrum	
Lednings-nr.	Placering
51	Indløb fra lager
52	Indløb fra ventileret hulrum, gulv
53	Indløb til ventileret hulrum, loft
Stenvarmelageret	
Lednings-nr.	Placering
54	Top, nord, øst
55	Bund, nord, øst
56	Top, midt, midt
57	Bund, midt, midt
58	Top, syd, vest
59	Bund, syd, vest
60	Oven på sten, midt, midt

Tabel A 4.2 Oversigt over målepunkter i solvægshus

BILAG B

Konstruktionstegninger fra forsøgshuset



0.75 mm stålplade. Skrues fast i C-100 profil.

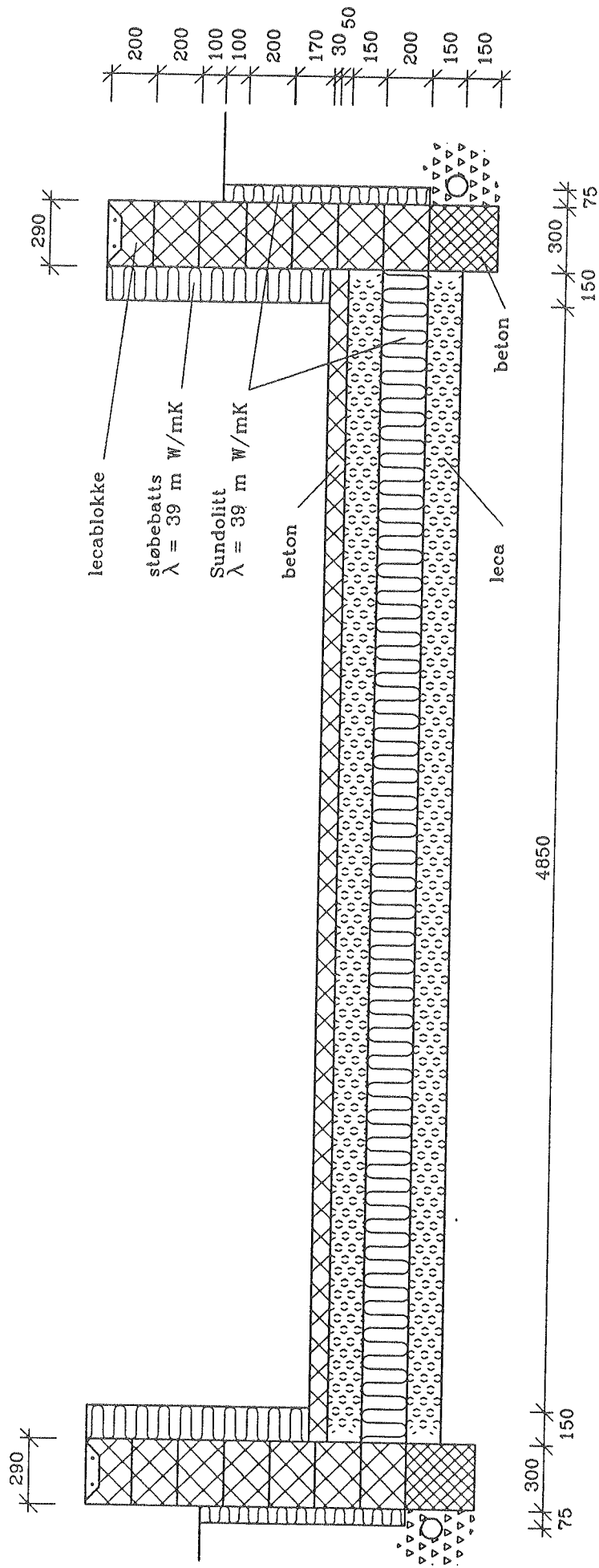
Liste til fastgørelse af absorber fra væg.

Alu-plade

Porøs absorber fastholdt mellem 2 tværgående lister og fastgjort på undersiden af spær bjælke af understen liste samt i siderne af langsgående liste.

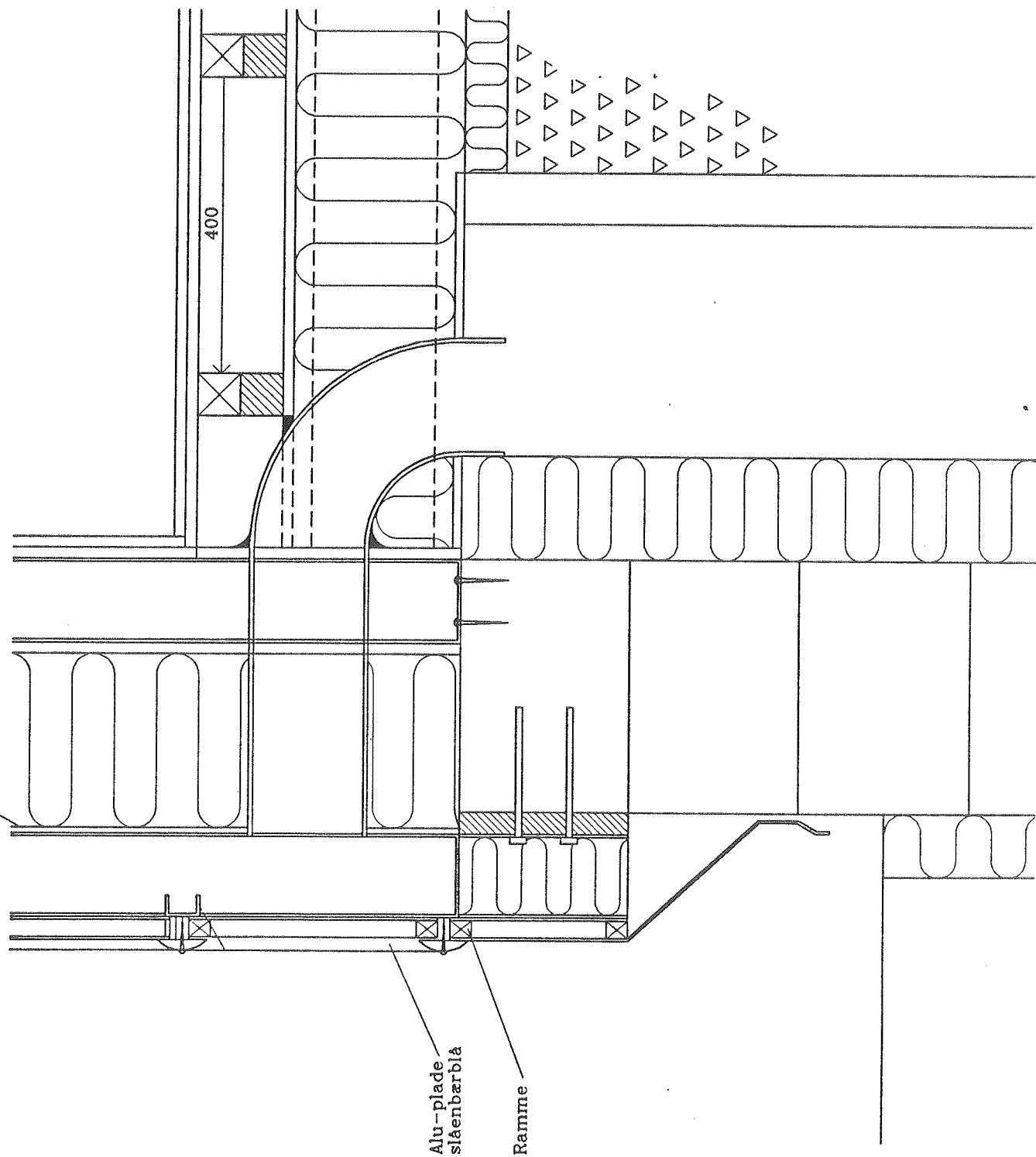
Vinkeljern skruet fast i C-100 profil til fastgørelse af absorber. Denne fastnes i siderne med lister til vinkeljernet udkragende flade. 27,5 mm overlæg.

Tegn.: 3.04, 1 : 5
Lodret snit
Overgang fra solvæg
til tagsolflanger
LIV/OBJ



Tegn.: 1.03, 1 : 25
 Varmelager
 Lodret snit: 2 - 2
 LIV/OBJ

0,75 mm stålplade. Skrues fast i C-100 profil.



Tegn.: 3.01, 1 : 5
Lodret snit
Overgang fra lager
til sydvendt solvæg
LIV/OBJ

