Tagrumssolfanger

Målinger på et eksperimenthus

Søren Østergaard Jensen

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
FEBRUAR 1990 MEDDELELSE NR. 211

Medvirkende ved projektet:

Søren Østergaard Jensen, civ.ing.
Ole Balslev-Olesen, civ.ing.
Vagn Korsgaard, professor, civ.ing.
Lars Olsen, civ.ing., lic.tech.
Flemming Karn, maskinarbejder.
Mogens Jørgensen, elektronikmekaniker.
Vibeke B. Nielsen, assistent.
Bodil Fauerskov, assistent.

Desuden en tak til:

Svend Aage Svendsen, lektor, civ.ing., lic.tech.
Simon Furbo, civ.ing., lic.tech.
Bjarne Saxhof, civ.ing.
Arnold Debosscher, Katholieke Universitet Leuven, Belgien.
Villadsens Fabrikker a/s.
Torben Jakobsen, lektor, Instituttet for Husbygning, DTH.
Niels M. Jonassen, Afdelingsleder, Laboratoriet for Teknisk Fysik I, DTH.
Erik H. Riberholt, lektor, Afdelingen for Bærende Konstruktioner, DTH.

Trykt på Laboratoriet for
Varmeisolering, DTH, Lyngby

Forord

Denne rapport afslutter to projekter finansieret af Teknologirådet og Energiministeriet med titlerne "F&U projekt tagrumssolfanger", sagsnr. 1984-144/001-84.080 og "Tagrumssolfanger" (EFP-86), journal nr. 1353/86-1.

Rapporteringen består desuden af to rapporter med titlerne "Roof space collector - validation and simulations with EMGP2" (ref. (1)) og "Måle- og styresystem i et eksperimenthus med en tagrumssolfanger" (ref. (2)). Desuden er der udarbejdet 5 papers: Et til Nordisk Workshop om luftbaserede solvarmesystemer i Stavanger d. 1.-2. april 1987 (ref. (3)), et til ISES Solar World Congress 1987 i Hamburg d. 14.-18. september (ref. (4)) og tre til IEA Status seminar on Solar-air systems i Utrecht d. 1.-3. marts 1988 (ref. (5)).

Indholdsfortegnelse

		Side
1.	Indledning	7
2.	Konklusion	9
3.	Systembeskrivelse	11
3.1.	Eksperimenthuset	12
3.2.	Opvarmningssystemet	12
3.2.1.	Tagrumssolfangeren	13
3.2.2.	Stenmagasinet	16
3.2.3.	Kanaler	20
3.2.4.	Drift af rumopvarmningssystemet	22
3.2.5.	Brugsvandsanlægget	25
4.	Målinger	27
4.1.	Måleudstyr	27
4.2.	Måleperioder	28
4.3.	Solfangeren	28
4.3.1.	Effektivitetsudtryk	28
4.3.1.1.	Effektivitetsudtryk afhængig af middeltemperaturen	31
4.3.1.2.	Effektivitetsudtryk for en tagrumssolfanger med to dæklag	32
4.3.1.3.	Dug kontra vægge og gulv som absorber	33
4.3.2.	Tryktab over solfangeren	35
4.4.	Stenmagasinet	36
4.4.1.	Varmetab	36
4.4.2.	Temperaturlagdeling i stenmagasinet	38
4.4.3.	Tryktab i stenmagasinet	40
4.5.	Rumopvarmningssystemet	41
5.	Edb-beregninger	45
5.1.	Validering	45
5.1.1.	Solfangeren	46
5.1.2.	Stenmagasinet	49
5.1.3.	Hele opvarmningssystemet	53

5.2. Simuleringer 53
5.2.1. Brugsvandssystemet 53
5.2.2. Rumopvarmningssystemet 56
5.2.3. Hustyper 58
5.2.4. Simuleringsresultater 59
5.2.5. Andre besparelser 61

6. Praktiske erfaringer 63
6.1. Tagrumssolfangeren 63
6.1.1. Regntæthed 63
6.1.2. Lufttæthed 66
6.1.3. Fiberdugen 67
6.1.4. Tryktab 68
6.1.5. Varmekapacitet 70
6.1.6. Maksimumtemperatur.. 71
6.1.7. Luft-til-vand varmeveksler kontra absorber 75
6.1.8. Sne på solfangeren 76
6.2. Stenmagasin og kanaler 81
6.2.1. Varmetab 81
6.2.2. Forurening 82
6.2.2.1. Radon 82
6.2.2.2. Stenstøv 83
6.2.2.3. Mug og bakterier 83
6.2.2.4. Andre undersøgelser..... 84
6.3. Hele systemet 84
6.3.1. Energi til ventilation 84
6.3.2. Støj 86
6.3.3. Afgasning 87
6.3.4. Støv 87
6.3.5. Styring 87
6.3.6. Varme direkte fra solfanger til rum 88
6.3.7. Sommerstop 89

7. Økonomi 91
7.1. Årlige besparelser 91
7.1.1. Årlige besparelser i et el-opvarmet hus 95
7.2. Tilladelig investering 95
7.3. Meromkostninger 97
7.3.1. Tagrumssolfangere i eksisterende byggeri 100

8. Fremtidigt arbejde 101

Referencer 103

Bilag A. Skitser af eksperimenthuset 109
Bilag B. Brugsvandstanken 113
Bilag C. Data over brugsvandssystemet i simuleringerne 115

1. Indledning

Hovedproblemet ved udnyttelse af solvarme i Danmark er, at der kun er en lille solindstråling i størstedelen af fyringssæsonen. Globalstrålingen udgør kun ca. 400 Wh/m^2 pr. dag i december, hvor den er mindst, men næsten 6000 Wh/m^2 pr. dag i juni, hvor den er størst.

I princippet kan en 100% dækning af varmebehovet opnås ved hjælp af sæsonvarmelagre, hvor solvarmen fra sommeren gemmes til vinteren. Men sæsonvarmelagre til et eller få huse er langt fra at være rentable i dag. En anden mulighed er at forbedre solfangernes pris-/ydelsesforhold. Dette kan enten ske ved at udvikle meget effektive solfangere, selv om de bliver dyrere, eller ved at udvikle billige, men til gengæld mindre effektive solfangere.

Når en væsentlig del af opvarmningsbehovet i vintermånederne, hvor globalstrålingen er lille, skal dækkes, er et stort solfangerareal nødvendigt, selv hvis effektiviteten for solfangeren er høj. Ved små temperaturforskelle (0-20 °C) mellem absorber og omgivelser er simple solfangere næsten lige så effektive som de mere komplicerede.

Derfor bliver pris/ydelsesforholdet bedst for en simpel/billig solfanger, når det primært drejer sig om at dække den størst mulige del af rumopvarmningsbehovet (ved 20 °C) i vintermånederne. En sådan stor, simpel og billig solfanger er foreslået af Vagn Korsgaard og udviklet i tagrumssolfangeren.

I 1984 blev der på Laboratoriet for Varmeisolering udført et forprojekt (ref. (6)) for at klarlægge mulighederne for udnyttelse af tagrummet som solfanger. I dette projekt blev det anslået, at en tagrumssolfanger dækkende hele sydsiden af taget kunne dække mellem 40 og 50% af nettoenergiforbruget til rum- og brugsvandsopvarmning i et hus isoleret efter de danske isoleringsregler (BR-82). I et lavenergihus ville den tilsvarende dækningsgrad ligge mellem 60 og 75%.

Formålet med projektet beskrevet i nærværende rapport var at dokumentere disse høje dækningsgrader samt at indhente praktiske erfaringer fra et opvarmningssystem med en tagrumssolfanger under realistisk drift.

2. Konklusion

På baggrund af målingerne på eksperimenthuset er en edb-baseret model blevet valideret med godt resultat. Inden for usikkerheden er modellen i stand til at simulere energistrømme og temperaturer i solfanger og lager. Modellen er anvendt til at beregne, hvor stor en dækningsgrad et tagrumssolfangersystem vil have, hvis det bliver installeret i et virkeligt hus.

Resultaterne fra simuleringerne viser, at de anslåede tal fra forprojektet (ref. (6)) kan nås. Dvs. at 50% af nettoenergiforbruget til rum- og brugsvandsopvarmning kan dækkes i et hus isoleret efter de danske isoleringsregler. I huse, der lige netop opfylder kravene til betegnelsen lavenergihus, vil dækningsgraden ligge mellem 67 og 75%. Dækningsgraden vil være højere i dagens lavenergihuse med et opvarmningsbehov på ned til en trediedel af et BR-82 hus. Ovenstående dækningsgrader er troværdige, da modellen undervurderer udbyttet fra anlæggene en smule.

Da målingerne er foretaget på et eksperimenthus, eksisterer der ingen realistiske priser for, hvad det vil koste at installere ovennævnte solvarmesystem i et virkeligt hus. Prisen for et sådant system er dog estimeret ud fra standardpriser for byggearbejder i Danmark (med dertil hørende store usikkerheder). Hvis dette sammenholdes med energibesparelsen i anlæggets forventede levetid, ses det, at et sådant anlæg vil være rentabelt ved installation i forbindelse med bygning af almindelige danske enfamiliehuse. Økonomien er mere tvivlsom i lavenergihuse, idet det lave varmeforbrug mindsker ydelsen fra solvarmeanlægget, og dermed også forrentningen. Yderligere undersøgelser er dog nødvendige for at fastlægge økonomien ved installation i lavenergihuse.

I eksisterende huse med vandbårne varmeanlæg vil det ikke være rentabelt at installere et solvarmeanlæg af den type, som denne rapport beskriver. Det skyldes, at solvarmeanlægget er luftbaseret, hvilket gør, at der skal investeres i et helt nyt rumopvarmningssystem. Ved nybyggeri kan der tages højde for dette.

En anden mulighed er at overføre varmen fra tagrummet til et væskebaseret opvarmningssystem ved hjælp af en luft-til-vand-varmeveksler. På Laboratoriet for Varmeisolering undersøges i et igangværende projekt mulighederne for en sådan overførsel.

Gennem nærværende projekt er der opnået værdifuld erfaring med driften af et luftbaseret solvarmeanlæg. På trods af at denne type solvarmeanlæg er relativt ukendt i Danmark, hvorved der ikke findes meget erfaring med dimensionering, opbygning og installation af disse anlæg, har anlægget levet op til forventningerne. Der er selvfølgelig opdaget fejl og mangler ved anlægget, samt ting der kunne have været lavet smartere. Disse erfaringer vil dog kun lede til højere udbytte og bedre drift for kommende anlæg.

Der bør fokuseres på at udvikle en let, driftsikker og billig måde at integrere tagrumssolfangersystemer i huse, idet dette kan betyde en væsentlig reduktion i prisen. Samtidig bør det dog ikke glemmes, at systemudformningen beskrevet i denne rapport kun er en ud af flere. Andre systemudformninger kan vise sig at have højere ydelser og/eller lavere installationsomkostninger.

3. Systembeskrivelse

I 1986 blev der på Laboratoriet for Varmeisolerings forsøgsareal opført et eksperimenthus med en tagrumssolfanger dækkende hele den sydlige taghalvdel - ca. 44 m^2 (se fig. 1). Tagrumssolfangeren er forbundet med et varmelager (stenmagasin) på ca. 2,7 m^3 og et luftvarmeanlæg (se fig. 2).

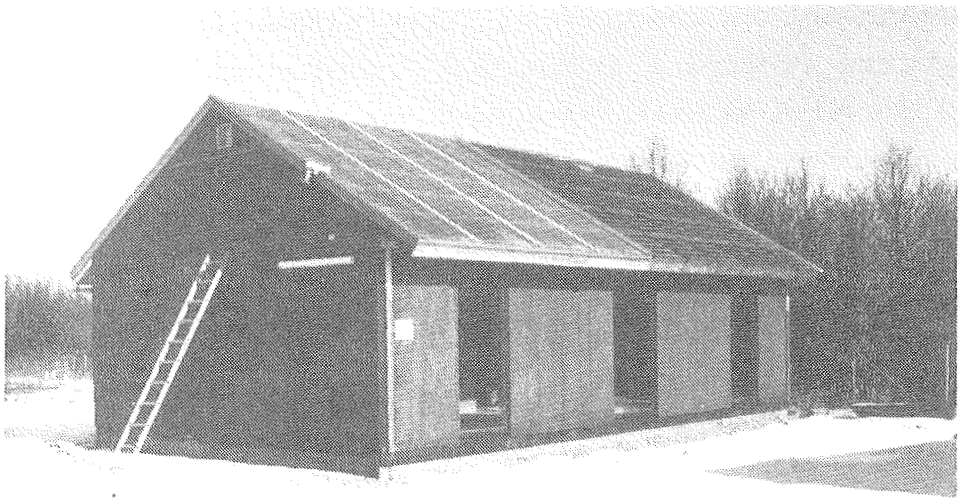


Fig. 1. Eksperimenthuset med tagrumssolfangeren.

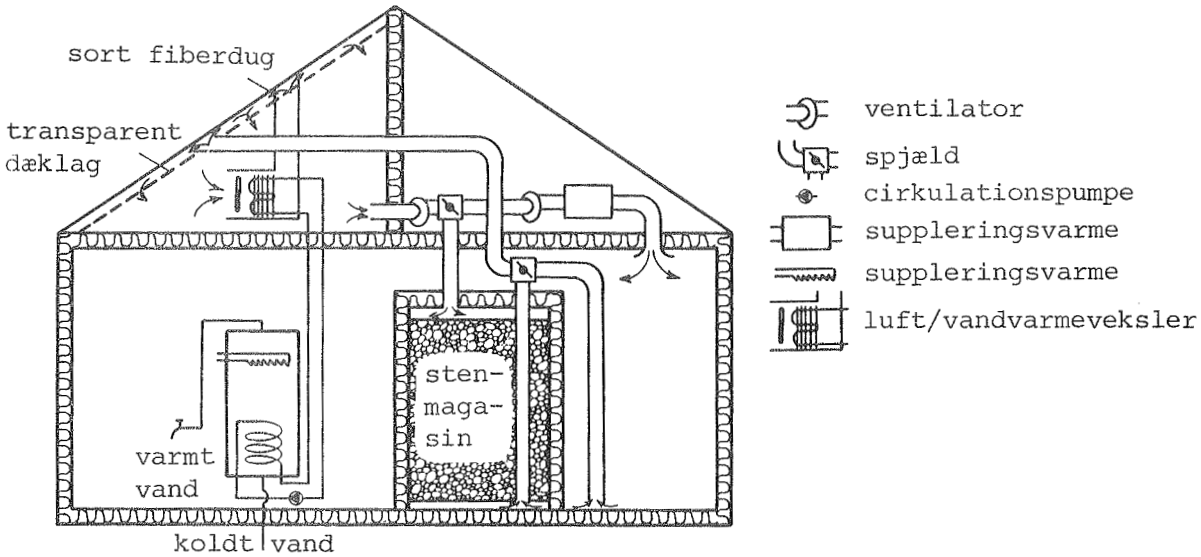


Fig. 2. Principdiagram over eksperimenthusets opvarmningsanlæg.

Dimensioneringen af varmesystemet i eksperimenthuset er dels foretaget på baggrund af tidligere eksperimenter på Laboratoriet for Varmeisolering (ref. (6), (7) og (8)) dels på baggrund af amerikanske anbefalinger (ref. (9) og (10)).

3.1. Eksperimenthuset

Eksperimenthuset er opbygget af lette elementer, bestående af et træskelet med isolering indkapslet i spånplader. Det bebyggede areal er 68 m^2 - skitser af huset kan findes i bilag A. Huset er isoleret efter de danske regler for isolering (BR-82), og har et varmetab (transmissionstab + ventilationstab) på ca. 130 W/°C, dvs. et dimensionerende varmetab på ca. 4200 W ved en udendørs temperatur på -12 °C.

Huset har et sadeltag med en hældning på 30°. Dette er ikke den optimale hældning for en solfanger. Men det er den mest almindelige taghældning i Danmark. Det største (potentielle) marked for tagrumssolfangere vurderes at være i forbindelse med udskiftning af eternittage på eksisterende huse. Hvis en tagrumssolfanger er rentabel med en hældning på 30°, er den det også for større, mere optimale hældninger.

3.2. Opvarmningssystemet

Eksperimenthusets rumopvarmningssystem består som vist på fig. 2 af en tagrumssolfanger, der er koblet til et varmelager (stenmagasin) og et luftvarmeanlæg. Da solvarmeanlægget ikke kan dække hele opvarmningsbehovet, er der installeret suppleringsvarme (el-varmelegemer) i serie med solvarmesystemet.

Det varme vand produceres, som vist på fig. 2, af et separat system. Der er installeret en luft/vand varmeveksler i tagrumssolfangeren. Fra denne varmeveksler tilføres brugsvandsbeholderen varme. Varmelegemet i brugsvandstanken (fig. 2) har ikke været i drift i måleperioden.

3.2.1. Tagrumssolfangeren

Tagrumssolfangeren er opbygget som to adskilte solfangere med forskellige dæklag (fig. 3). Begge dæklag er lavet af acryl. Det ene dæklag består af et enkelt lag, og er bygget op af vacuumformede plader å 0,9 x 0,9 m (fig. 4). Det andet dæklag består af ribbeplader, dvs. der er her to dæklag. Ribbepladernes længde er lig tagets højde (fig. 5). Ved at opdele solfangeren i to separate solfangere med forskelligt dæklag er det muligt at vurdere dæklagets indflydelse på solfangerens effektivitet.

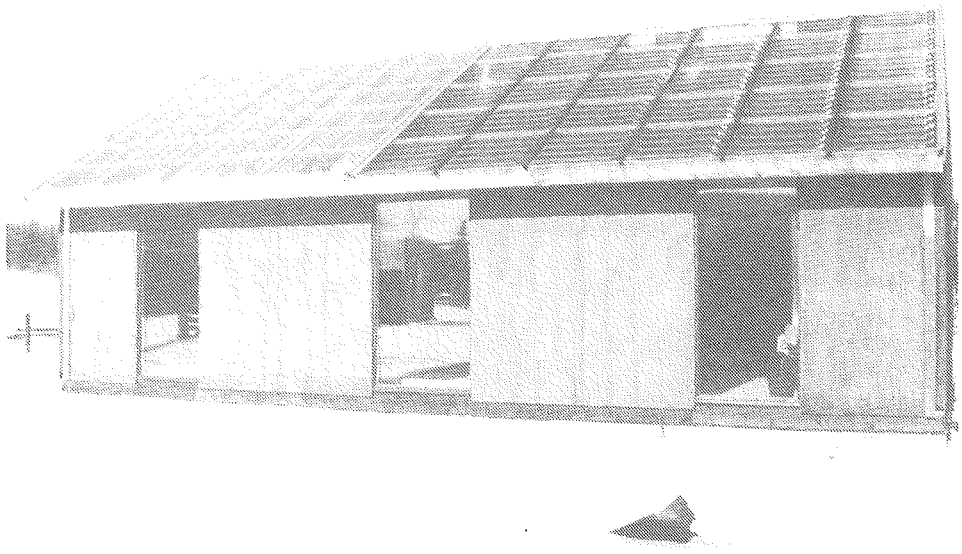


Fig. 3. Tagrumssolfangeren er opdelt i to adskilte solfangere.

Solfangerne er forbedret i forhold til forprojektet. Der er opsat en fiberdug mellem dæklag og tagrum (se fig. 6). Som vist suges luften gennem denne dug. Dette giver en større varmeoverføringsevne mellem absorber og luft end for solfangeren i forprojektet, hvor de sortmalede vægge og gulv udgjorde absorberen. Samtidig bevirker konstruktionen, at mellemrummet mellem absorber og dæklag bliver "koldere". Effektiviteten for denne solfanger er derfor højere end for solfangeren i forprojektet.

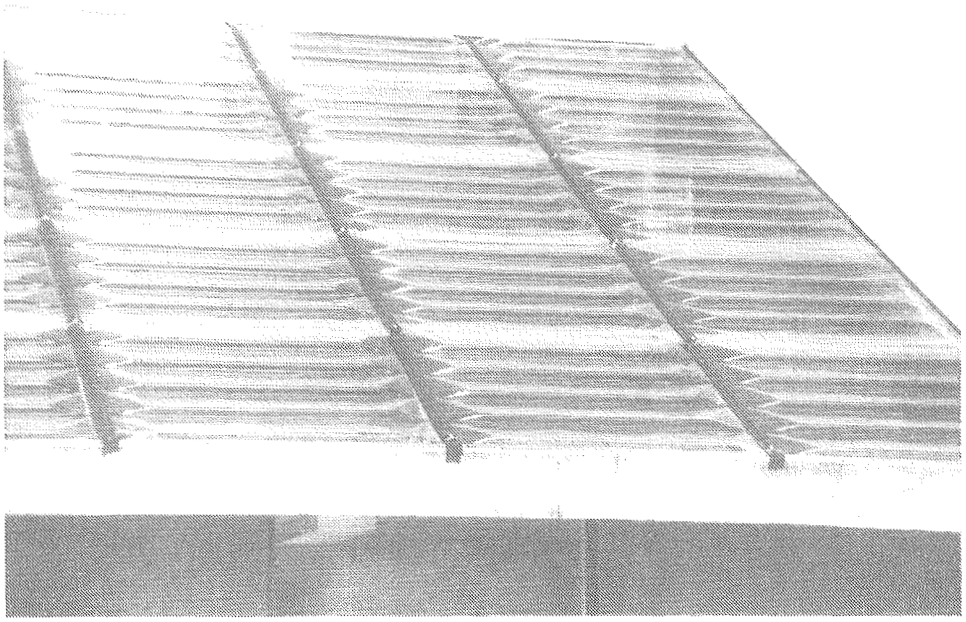


Fig. 4. Nærbillede af solfangeren med enkelt dæklag.

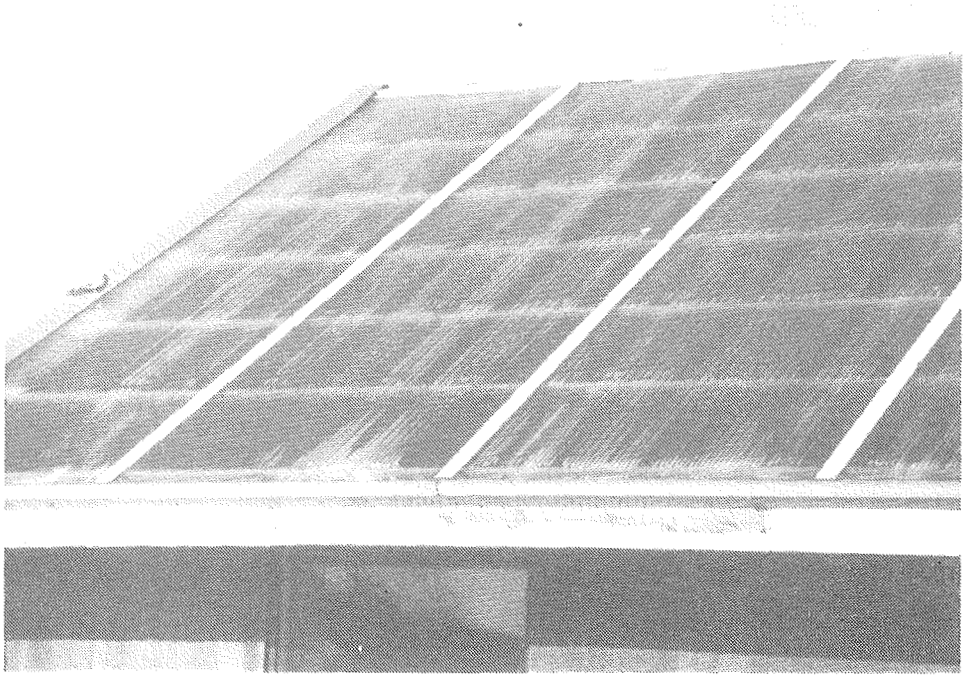


Fig. 5. Nærbillede af solfangeren med dobbelt dæklag af ribbeplader.

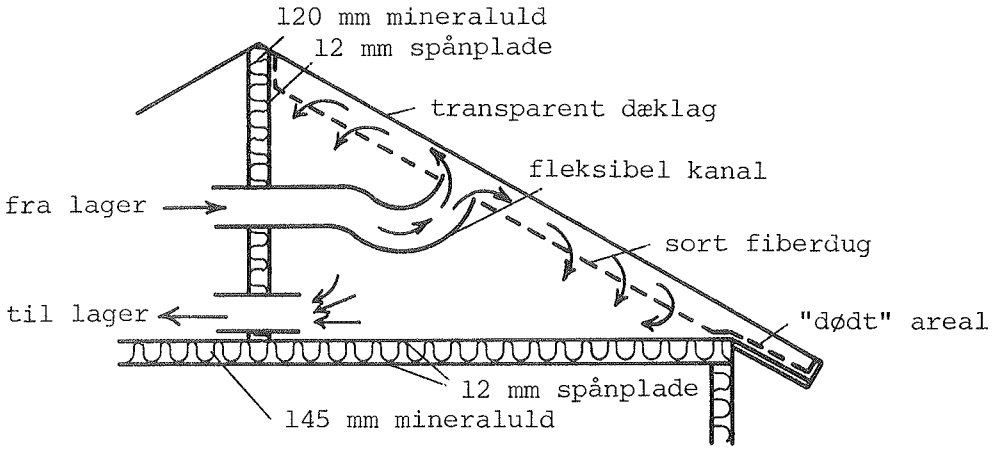


Fig. 6. Principskitse af funktion og materialer i tagrumssolfangeren.

Ved den her viste opbygning kan den sydlige halvdel af tagrummet ikke benyttes til andre formål på grund af de til tider høje temperaturer. Solfangeren behøver ikke nødvendigvis at udnytte hele det sydlige tagrum. Rummet bag fiberdugen kan gøres mindre, således at tagrumssolfangeren mere kommer til at ligne traditionelle luftsolfangere, der er relativt flade. Herved kan hele loftrummet udnyttes til andre formål. Fig. 7 viser den vestlige tagrumssolfanger med to dæklag, hvor brugsvandssystemets luft/vand-varmeveksler er intalleret. Figuren viser den fleksible indblæsningskanal samt udsugningskanalen. Billedet er taget før den sorte fiberdug blev monteret. Figuren viser desuden adgangslugen til den østlige tagrumssolfanger.

Det totale areal af tagrumssolfangeren er 43,9 m^2, hvor solfangeren med enkelt dæklag er 24,4 m^2 og solfangeren med to dæklag er 19,5 m^2. For solfangeren med to dæklag passer spærafstanden ikke med pladebredden, dette betyder, at der også er placeret spær udenfor pladens sammenføjninger, hvilket betyder, at det reelle areal er 18,6 m^2 for denne solfanger. Hvis vi som for væskesolfangere kun regner med det transparente areal, er dette for hele solfangeren 41,3 m^2. Som det fremgår af fig. 6 er der et "dødt" areal i bunden af solfangeren, der har en væsentlig

lavere effektivitet end den resterende del af solfangeren. Dette "døde" areal udgør ca. 6 m^2. Et sådant "dødt" areal eller udhæng er dog meget normalt i nyere danske huse.

I de følgende beregninger regnes der, på trods af ovenstående, med, at tagrumssolfangerens samlede areal er 43,9 m^2. Dvs. resultaterne angivet pr. m^2 undervurderer solvarmeanlæggets ydelse en smule.

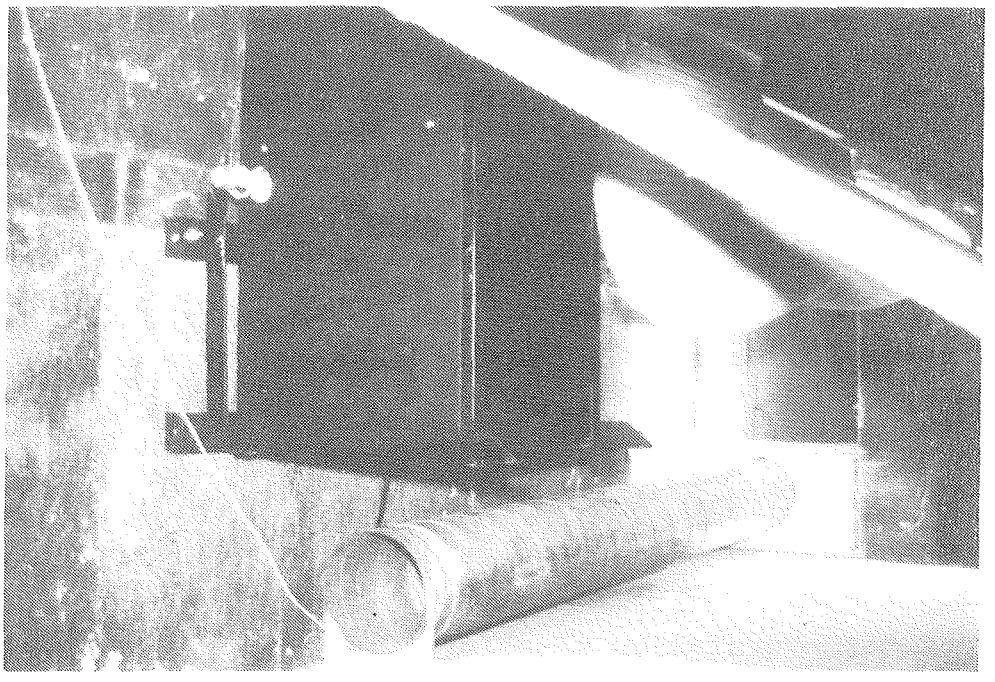


Fig. 7. Den vestlige tagrumssolfanger før den sorte fiberdug blev monteret.

3.2.2. Stenmagasinet

Solvarmeanlæggets varmelager består af ca. 2,7 m^3 sø-singels med en middeldiameter på 5 cm, placeret inde i eksperimenthuset. Et principdiagram over varmelageret er vist i fig. 8. Fig. 9 viser de anvendte vaskede søsten. Fig. 10 viser i detaljer opbygningen af lageret.

Lagerets vægge er, som vist i fig. 8 og 9, yderst opbygget som en sandwich-konstruktion bestående af to spånplader med mineraluld og lægter imellem. Dette er gjort for at få en stabil konstruktion uden store kuldebroer. På indersiden af sandwich-konstruktionen er placeret hård, trykbestandig mineraluld. Mellem stenene og den hårde mineraluld er anbragt en hård masonitplade til at fordele trykket fra stenene.

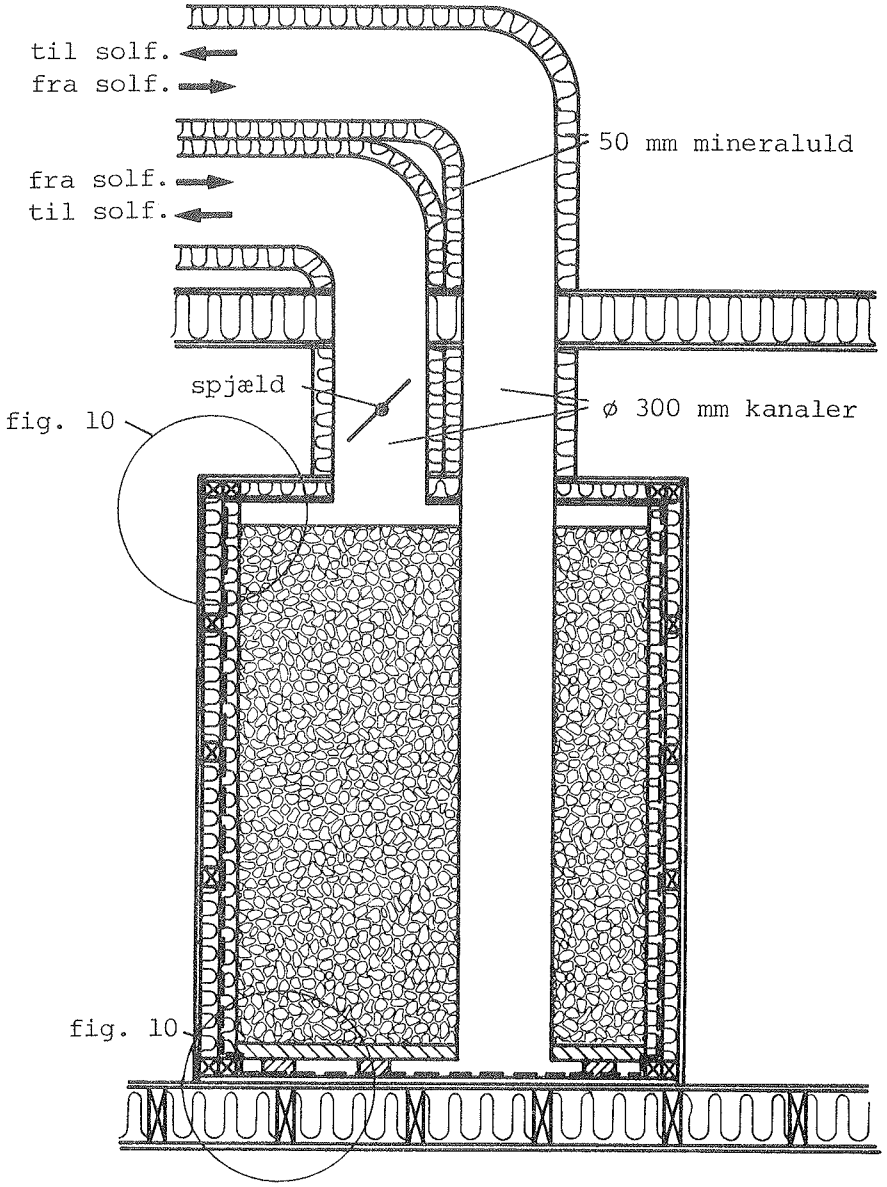


Fig. 8. Principdiagram over stenmagasinet.

Lagerets dimensioner er: Udvendig: 1,53 x 1,53 m^2 og en højde på 1,89 m - selve stenvolumenet 1,28 x 1,28 m^2 og en højde på 1,63 m. Målinger/beregninger viser, at stenene udfylder ca. 55% af volumenet, resten udfyldes af luft. Dette betyder, at lagerets effektive varmefylde er ca. 3780 kJ/^oC. Temperaturen i lageret varierer mellem 20 og 80^oC, dvs. lageret kan maksimalt indeholde 63 kWh, hvilket kan dække det dimensionerende varmetab i 15 timer uden at interne varmetilskud fra personer, lys, mv. er medregnet. Som det fremgår af fig. 8 ledes luften ned gennem stenene ved varmetilførsel fra solfangeren, mens luften ledes op gennem stenene ved varmeudtag. Dette skaber en temperaturlagdeling i lageret, der øger lagerets effektivitet, idet kold og varm luft ikke bliver blandet.

Fig. 8 viser ligeledes, at kanalerne fra stenmagasinet er ført direkte op til den nordlige del af tagrummet. Kun i den ene af kanalerne er der monteret et spjæld inden for husets isolering. Dette betyder, at der er et betydeligt varmetab fra lageret til det nordlige tagrum - se afsnit 4.4.1. Dette varmetab kan minimeres betydeligt ved at installere spjæld lige over lageret i begge kanaler, samt ved at installere kanalerne - så langt det er muligt - inden for husets isolering.

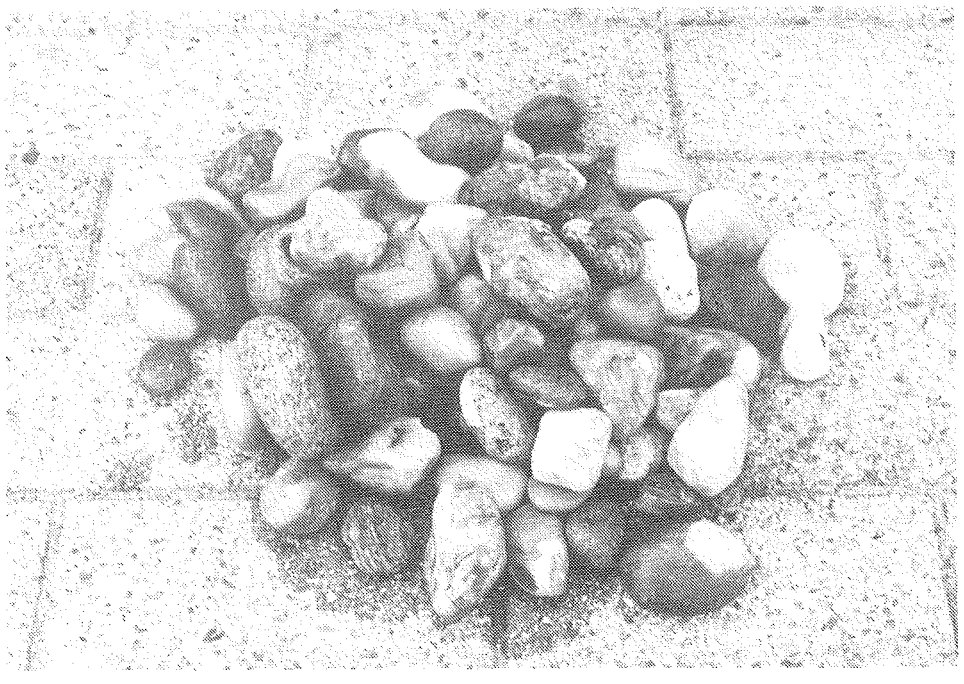


Fig. 9. De vaskede sø-singles, der er anvendt i stenmagasinet.

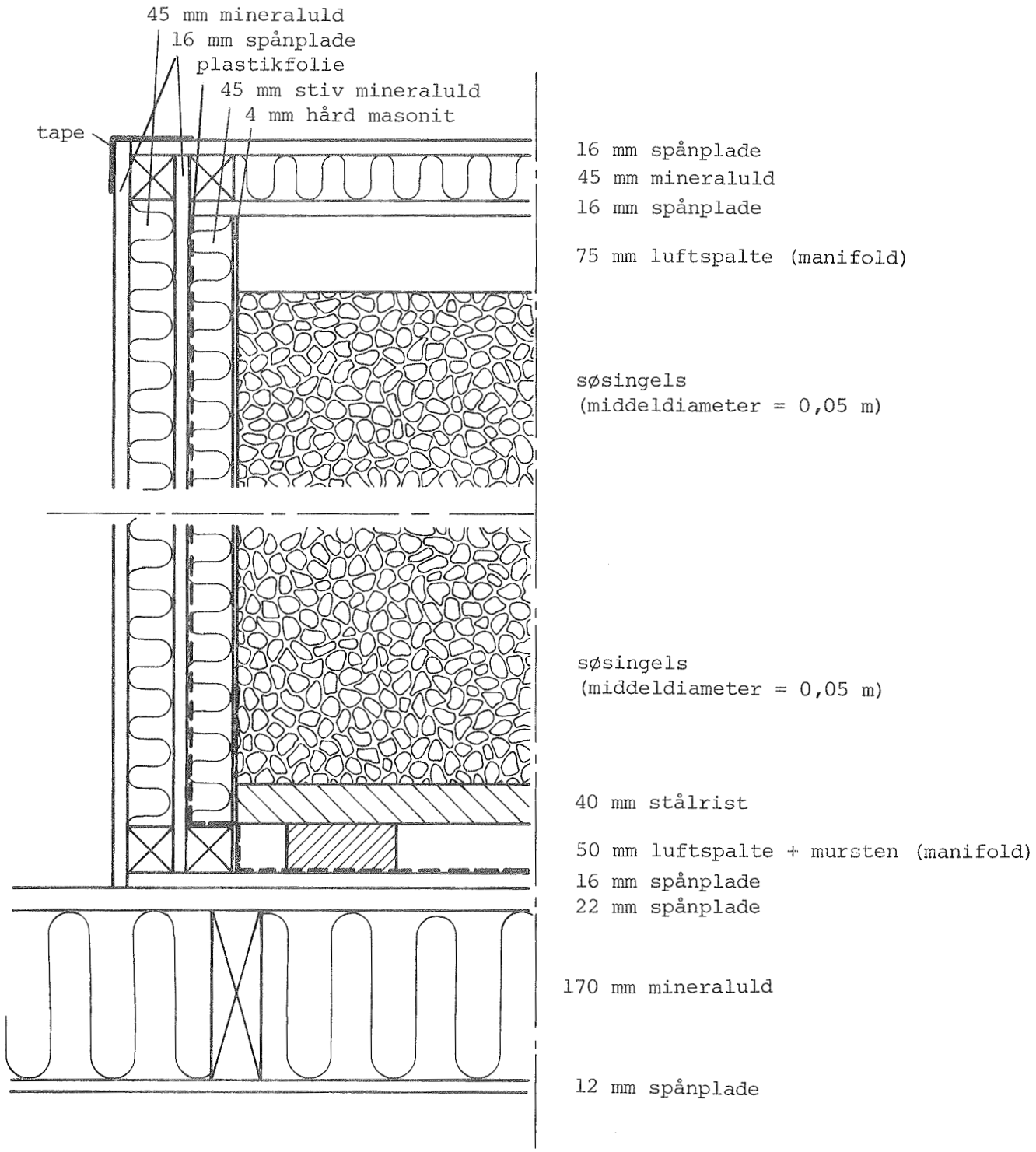


Fig. 10. Lagerets opbygning samt anvendte materialer.

3.2.3. Kanaler

Som antydet i afsnit 3.2.2. er kanalerne mellem lager og solfanger, og lager og rum, installeret i det nordlige tagrum. Dette blev gjort for at minimere omkostninterne ved opførelsen af eksperimenthuset, men har medført et meget stort varmetab til dette tagrum. Ved i stedet at installere kanalerne inden for husets isolering opnår man dels en reduktion i varmetabet på grund af en højere omgivelsestemperatur, dels at dette varmetab kommer huset til gode. Dette kan dog i perioder give anledning til overophedning af huset. Fig. 11-13 viser kanalinstallationerne i det nordlige tagrum. En nærmere beskrivelse af, hvordan luften strømmer i kanalerne, er givet i det næste afsnit.

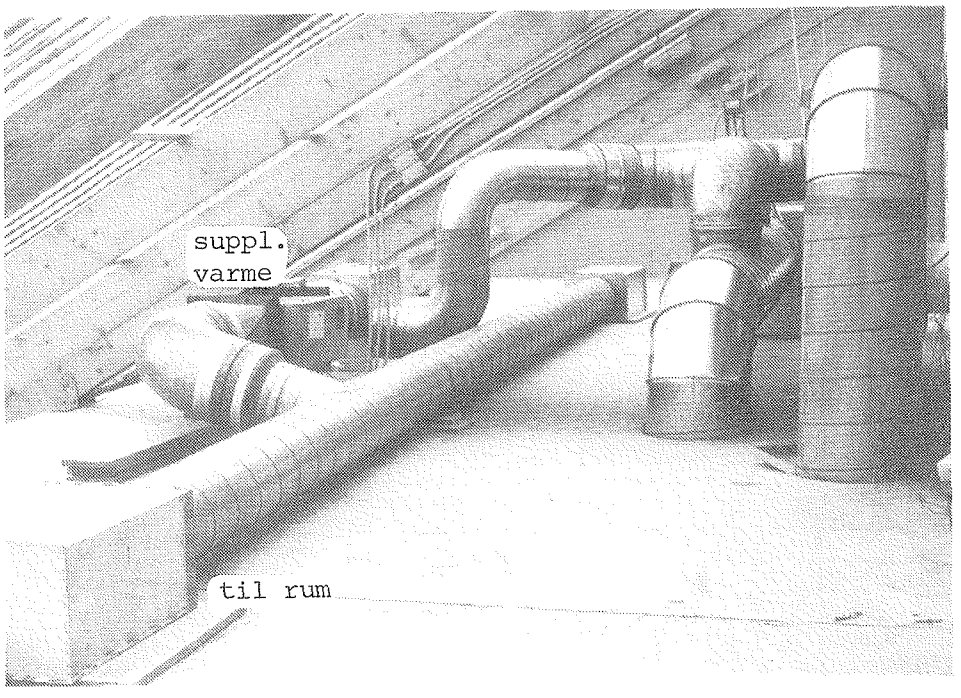


Fig. 11. Luftvarmesystemet inden isolering af kanalerne.

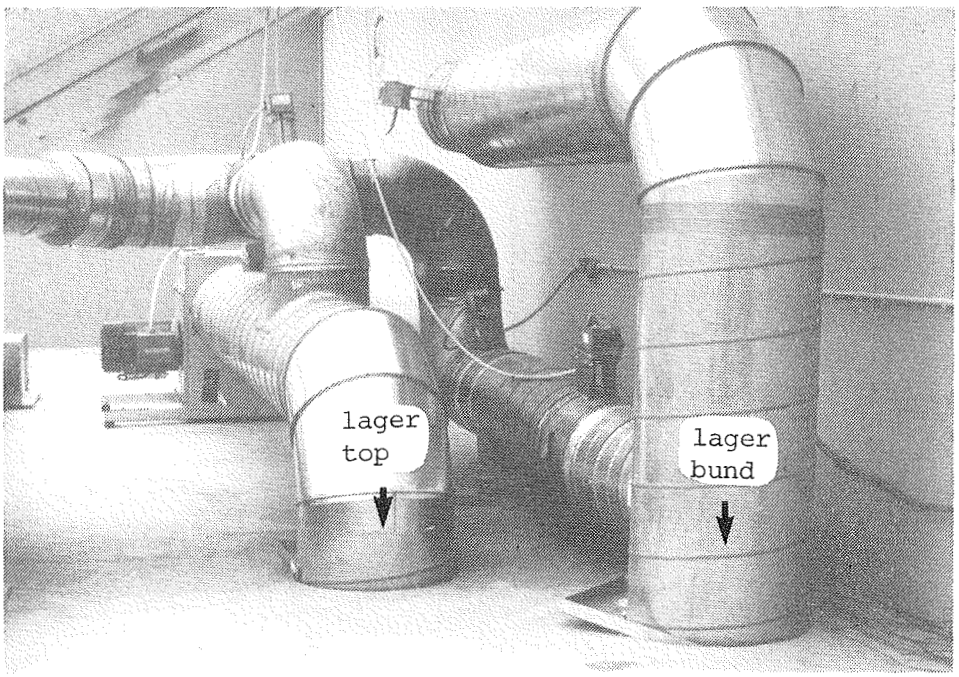
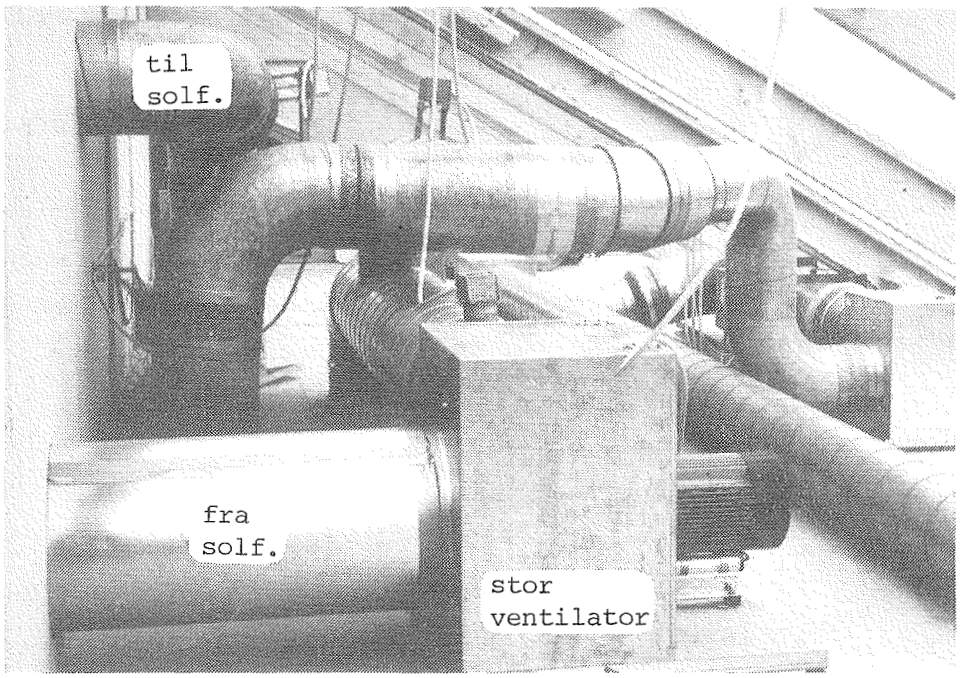


Fig. 12. Kanaler til og fra stenmagasinet før isolering.



lille
ventilator

Fig. 13. Kanaler til og fra tagrumssolfangeren før isolering.

Kanalerne er isoleret med 5-10 cm mineraluld, dette er vist på fig. 14.

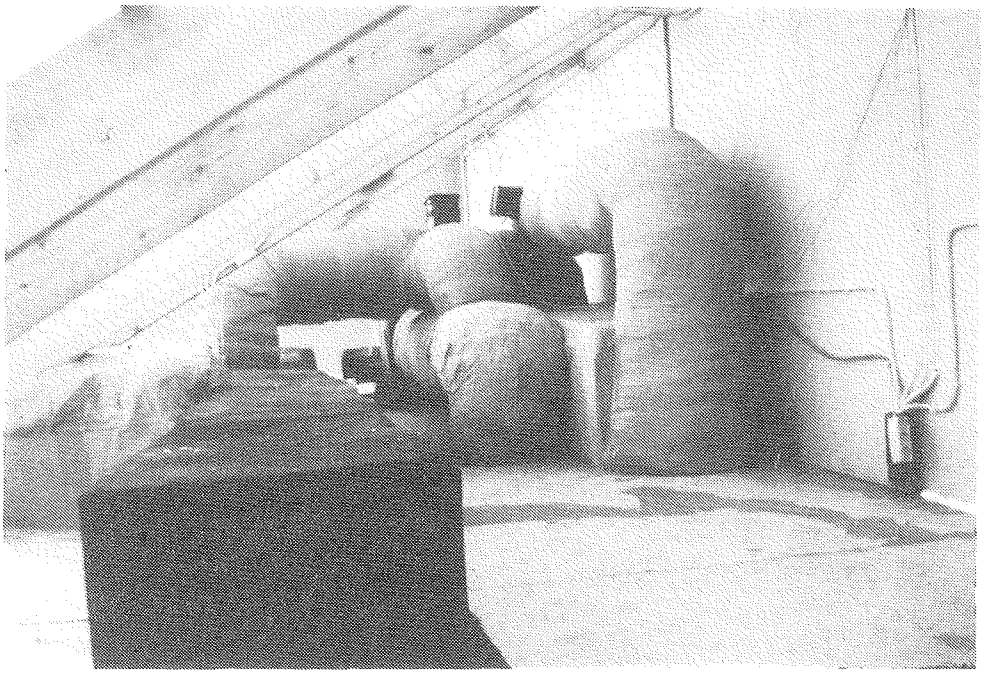


Fig. 14. Kanalsystemet efter endt isolering.

De anvendte kanaler er standard ventilationsrør med en diameter på 200, 250 og 300 mm. Som det ses af fig. 11-13 er der anvendt to ventilatorer: En stor centrifugalventilator på 710 W til at transportere luft fra solfangeren til lageret og en mindre centrifugalventilator på 180 W til lufttransport mellem lager og rum. De anvendte indblæsningsstudse er med diffusorer.

3.2.4. Drift af rumopvarmningssystemet

Fig. 15 viser driftssituationerne for opvarmningssystemet. Opvarmning af rummet startes når rumtemperaturen falder under 19°C og slukkes igen, når rumtempeaturen når op over 21°C.

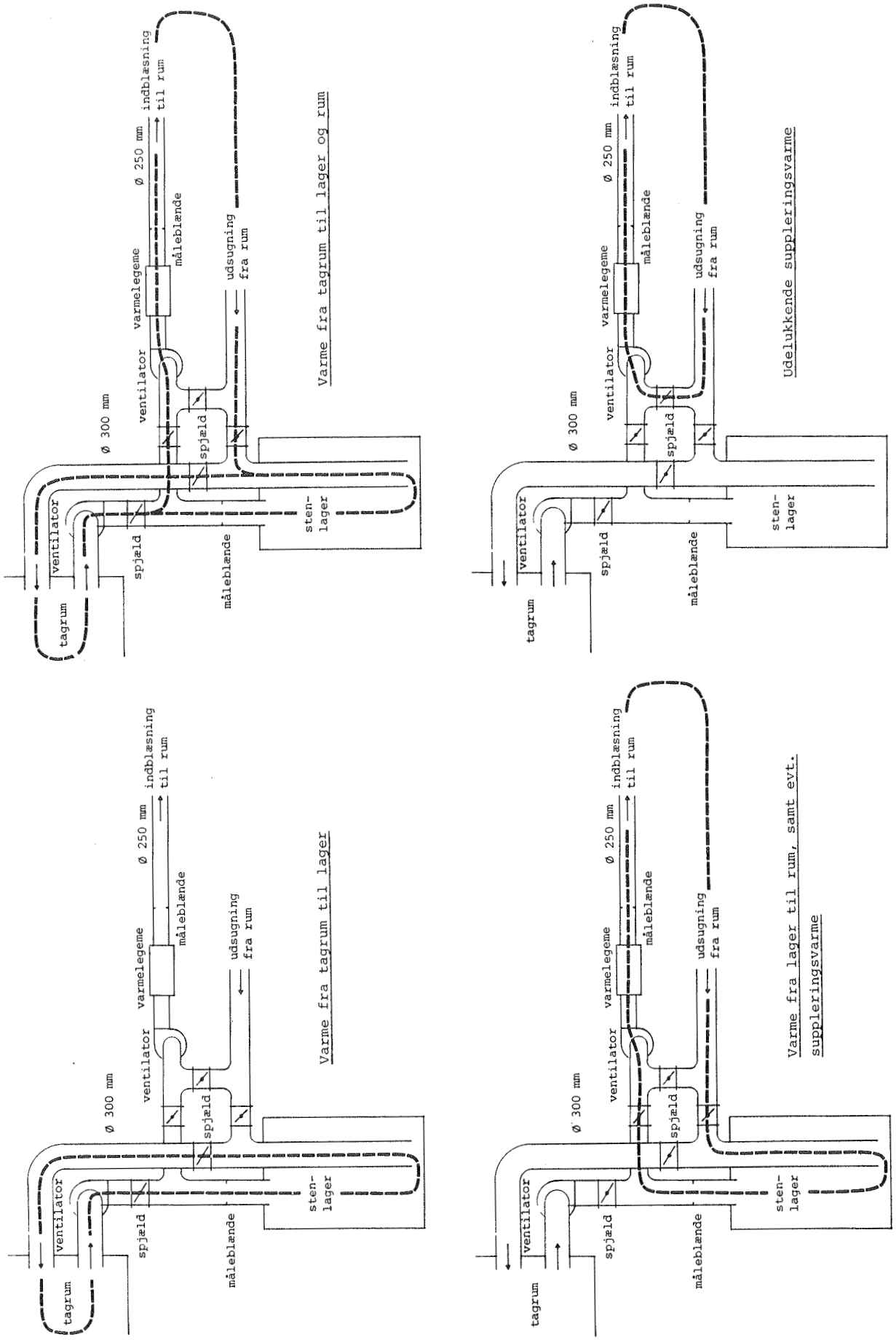


Fig. 15. Driftsituation for rumopvarmningsanlægget.

Indsamling af varme fra tagrumssolfangeren startes, når temperaturdifferensen mellem dugen i solfangeren med ét dæklag og bunden af lageret er højere end 8°C. Når denne temperaturdifferens falder til 5°C slukkes ventilatoren. Volumenstrømmen gennem solfangeren varierer afhængig af temperaurdifferensen mellem ind og udløb fra solfangeren. For $T \leq 10°C$ er volumenstrømmen ca. 32 m^3/h pr. m^2 solfanger, for $10 < \Delta T \leq 15°$ er volumenstrømmen ca. 38 m^3/h pr. m^2 solfanger og for $\Delta T > 15°C$ er volumenstrømmen ca. 43 m^3/h pr. m^2 solfanger.

Hvis huset under indsamling af varme fra solfangeren kræver opvarmning, kan en del af varmen fra solfangeren dirigeres direkte til huset. Når toppen af lageret er over 30°C, er lageret ene om at levere varme til huset, når dette kræves. For temperaturer i toppen af lageret mellem 25 og 30°C suppleres varmen fra lageret med suppleringsvarme - el-varme. Når temperaturen i toppen af lageret falder under 25°C opvarmes huset udelukkende med suppleringsvarme. Ved udendørstemperaturer på over 5°C er suppleringsvarmen 2 kW, for udendørstemperaturer mellem 0 og 5°C er suppleringsvarmen 4 kW og for under 0°C 6 kW. Det dimensionerende varmetab for huset er 4,2 kW. Volumenstrømmen i opvarmningssystemet er ca. 600 m^3/h.

Indblæsningshastigheden ved opvarmning af rummet er valgt ud fra en vægtning mellem at høje hastigheder giver støj, og evt. træk, mens lave hastigheder kræver en høj (ubehagelig) indblæsningstemperatur ved lave udendørs temperaturer. Fig. 16 viser sammenhængen mellem indblæsningstemperatur og volumenstrøm for forskellige udendørs temperaturer - rumtemperaturen er 20°C. Som det ses af figuren bør lagertemperaturen, der fastlægger, om der er behov for suppleringsvarme, være variabel (f.eks. afhængig af udelufttemperaturen eller manuelt årstidsbestemt) og ikke som her fast (30°C), da der ellers kan opstå korte perioder, hvor varmeanlægget ikke dækker behovet.

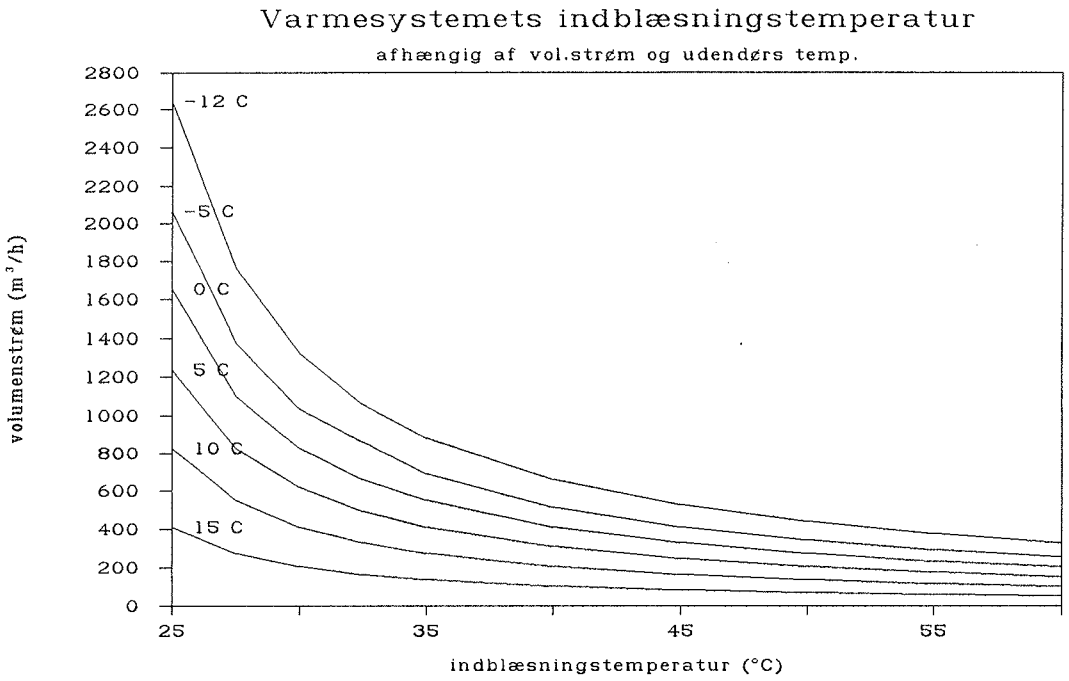


Fig. 16. Sammenhængen mellem varmeanlæggets indblæsningstemperatur og volumenstrøm til rummet for at opretholde en rumtemperatur på 20°C ved forskellige udendørstemperaturer.

3.2.5. Brugsvandsanlægget

Brugsvandsanlægget (fig. 2) er opbygget af en luft/vand varmeveksler - bestående af en ventilator og en ribberørsvarmeveksler (fig. 17) - fra Novenco (VNA-54 - varmeventilator) og en 190 l brugsvandstank Metro A/S (type 20020), (fig. 18 og Bilag B). Brugsvandstanken har ikke den optimale udformning, men er alligevel benyttet, da laboratoriet havde den i forvejen.

Varmeopsamlingen til brugsvandssystemet styres af en differenstermostat, hvor den ene føler er placeret i kontakt med dugen i det vestlige tagrum, og den anden er placeret i bunden af brugsvandstanken. Differenstermostaten styrer både pumpen i solfangerkredsen og ventilatorerne i luft/vand varmeveksleren. Tapningen af vand fra brugsvandstanken styres af et døgnur. Der tappes ca. 120 l pr. døgn - 40 l kl. 7.30, 12.30 og 19.30.

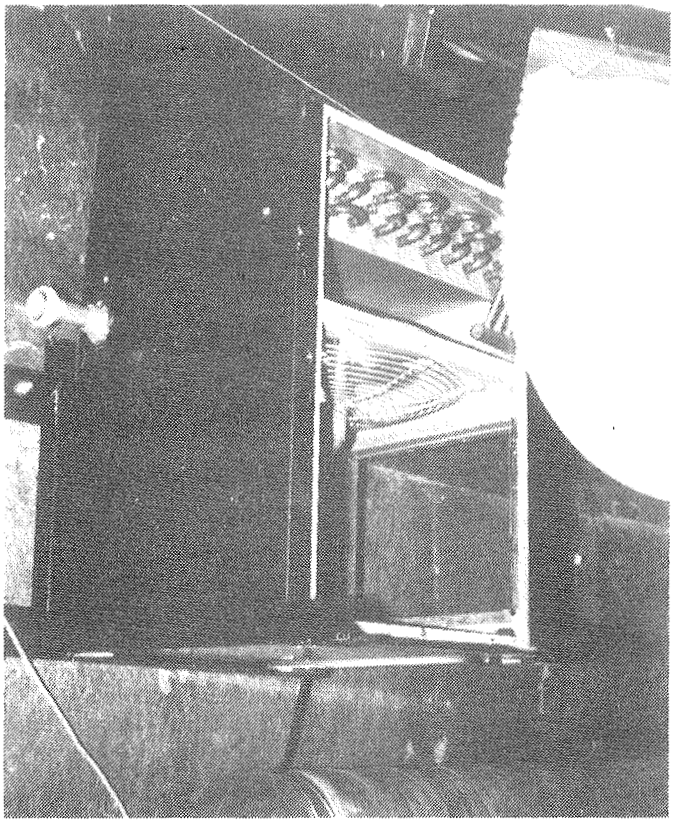


Fig. 17. Luft/vand varmeveksler placeret i den vestlige tagrums-solfanger.

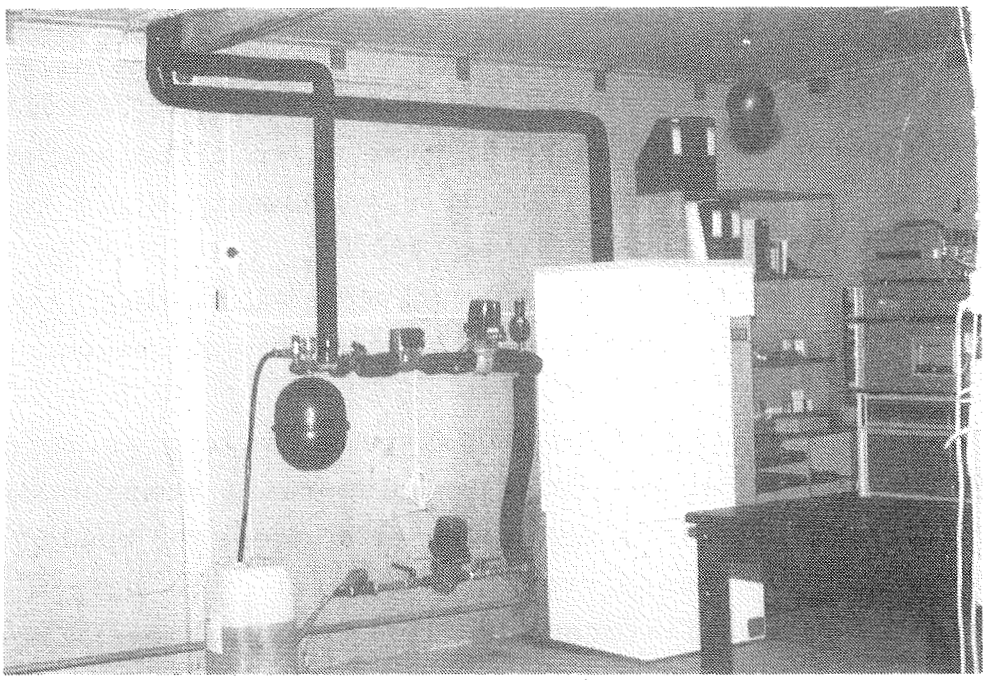


Fig. 18. Brugsvandstanken med rørføring.

4. Målinger

4.1. Måleudstyr

Hjertet i måleudstyret er et Hewlett Packard dataloggersystem, der bliver styret af en IBM xt-PC - se fig. 19. Det er også dette system, der styrer rumopvarmningssystemet. Styre- og målesystemet er udførligt beskrevet i ref. (2), og vil derfor kun kort blive beskrevet her.

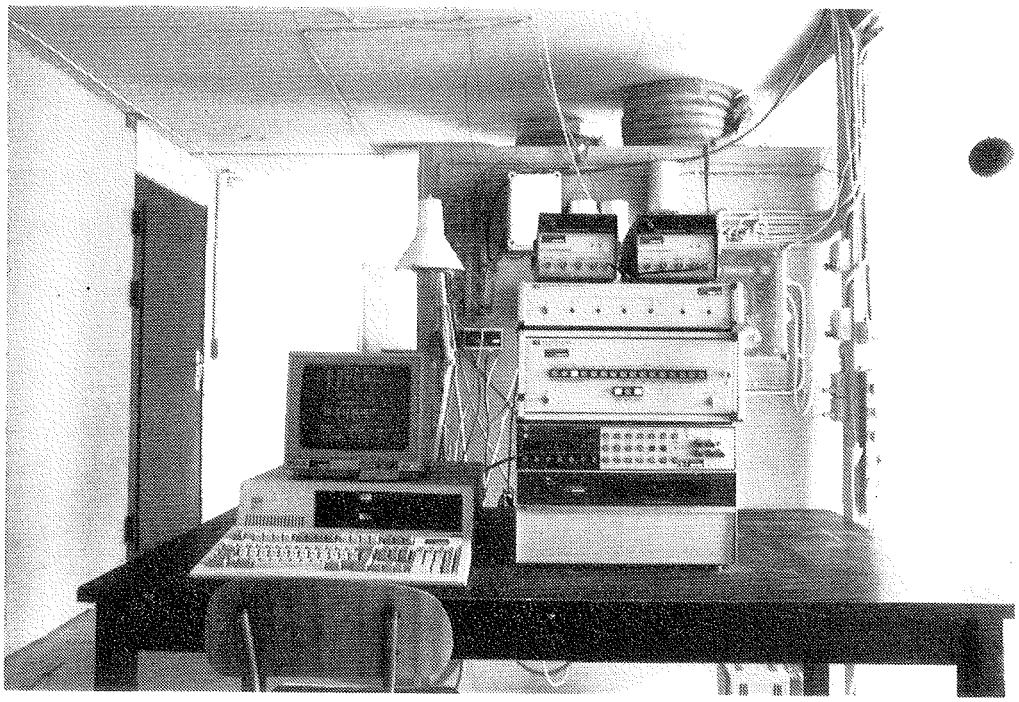


Fig. 19. Styre- og målesystem i eksperimenthuset.

Målesystemet omfatter 36 målepunkter: 30 temperaturer, 5 volumenstrømme af luft, 2 volumenstrømme af væske, og solindfaldet på en flade parallel med tagrumssolfangerens dæklag. Disse målepunkter bliver scannet hvert 30. sekund. På baggrund af målingerne beregnes diverse energistrømme i huset, og rumopvarmningssystemets driftssituation afgøres. Målte og beregnede værdier midles i halvtimeværdier, som lagres på disketter. Måledataene bliver viderebehandlet dels på UNI-C (det regionale edb-center) dels på PC.

4.2. Måleperioder

Egentlige målinger i eksperimenthuset blev først startet i februar 1987. I denne rapport er målinger frem til midt i oktober medtaget.

I foråret 1987 blev der målt på systemet, hvor både rumopvarmnings- og brugsvandsanlæg var i drift. Det viste sig dog umuligt på baggrund af disse målinger at udtale sig om solfangernes effektivitet. Det skyldes dels, at to forskellige solfangere er koblet til samme lager, dels at der i den vestlige solfanger er installeret brugsvandssystemets luft/vand varmeveksler. Tagrumssolfangeren og luft/vand varmeveksleren er fysisk forskellige og har desuden helt forskellige drifttider. Derfor blev luft/vand varmeveksleren koblet ud i juni 1987, således at kun rumopvarmningssystemet var i drift.

4.3. Solfangeren

4.3.1. Effektivitetsudtryk

På baggrund af målingerne i perioden 20/6-7/10 1987 er solfangernes effektivitet forsøgt fastlagt. I udvælgelsen af målte data er anvendt de normalt anbefalede udvælgelseskriterier: Indfaldsvinklen for solstrålingen på under 30° ($\sim$ mellem kl. 10.00 og 14.00) og en solindstråling på minimum 600 W/m^2. Desuden er målepunkter, hvor den totale volumenstrøm gennem solfangeren er under 1200 m^3/h ($\sim$ 27 m^3/m^2 h) blevet afvist.

I fig. 20-22 er effektivitetskurverne for den totale solfanger og for solfangerne med et og to dæklag optegnet. Effektiviteten af solfangerne er beregnet som:

$$\eta = \frac{Q}{I \cdot A} \qquad (1)$$

hvor Q er effekten fra solfangeren (W)
I er solindfaldet på solfangeren (W/m^2)
A er solfangerens areal (m^2).

Effektiviteten af solfangerne er optegnet som funktion af temperaturforskellen mellem indblæsningstemperaturen til solfangerne og udelufttemperaturen divideret med solindfaldet.

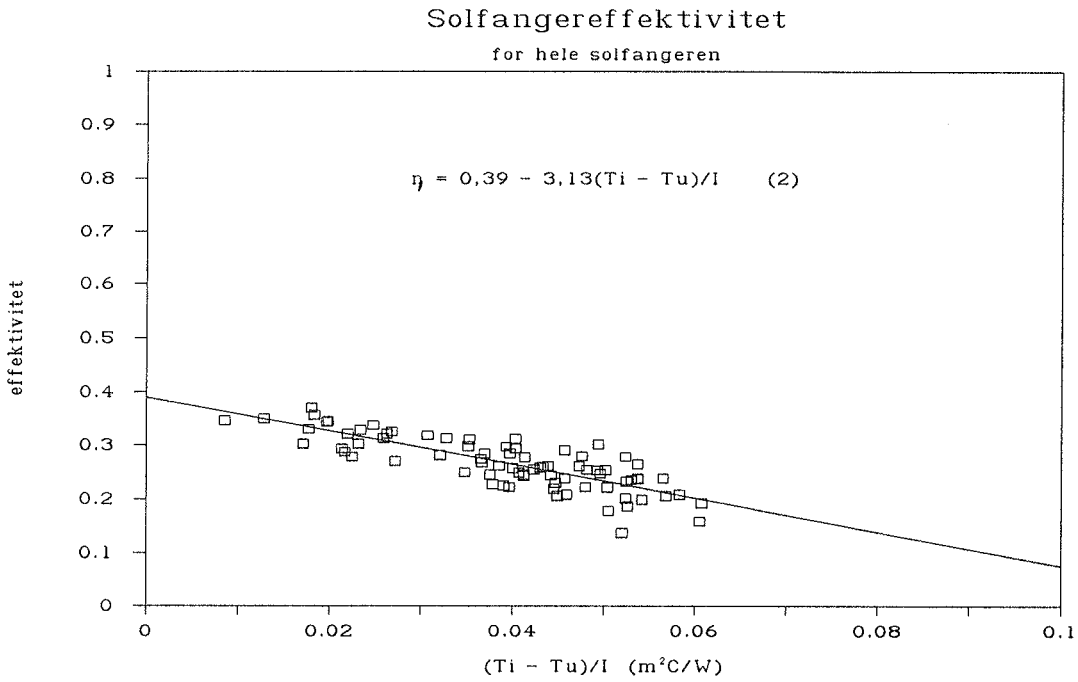


Fig. 20. Effektivitetskurve for den totale solfanger.

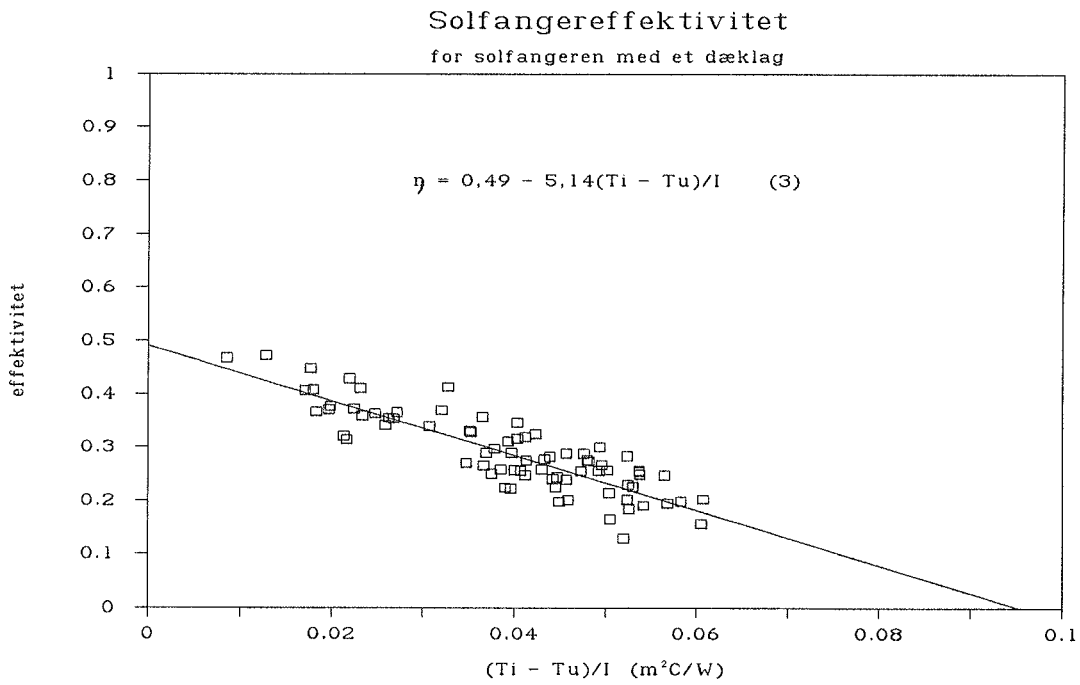


Fig. 21. Effektivitetskurve for den østlige solfanger med ét dæklag.

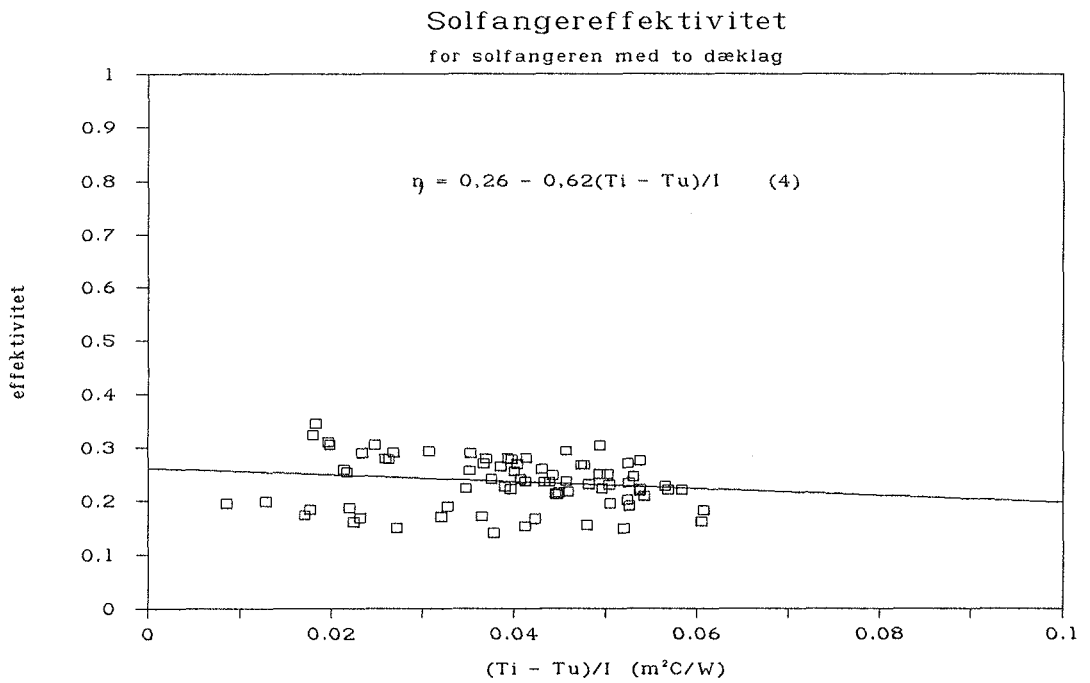


Fig. 22. Effektivitetskurve for den vestlige solfanger med to dæklag.

Effektivitetsudtrykket for solfangeren med ét dæklag ser rimeligt ud sammenlignet med effektivitetsudtryk fundet af andre (f.eks. (11)). Effektivitetsudtrykket for solfangeren med to dæklag burde kun have en lidt dårligere starteffektivitet end solfangeren med ét dæklag, da to dæklag transmitterer lidt mindre af solstrålingen end ét dæklag. Til gengæld har en solfanger med to dæklag en mindre varmetabskoefficient (andet tal i effektivitetsudtrykket), fordi to dæklag isolerer bedre end ét dæklag. Men som det ses af fig. 22 er den fundne effektivitetskurve for solfangeren med to dæklag helt urealistisk. Starteffektiviteten og varmetabskoefficienten er alt for lave. Hvad kan det skyldes? Det skyldes flere ting. For det første er effektivitetsudtrykkene fundet for solfangere i normal drift. Dvs. at målepunkterne er fundet for perioder, der er ustabile, f.eks. kan solindstrålingen veksle over måleperioden (en halv time), og solfangerne er altid enten under opvarmning eller

afkøling. Ved at sammenligne fig. 21 og 22 bemærkes det, at der er langt større spredning i måleresultaterne i den sidste figur, hvilket underbygger teorien om ustabilitet. Normalt fastlægges effektiviteten af solfangerne i Danmark i en kunstig sol, hvor forsøgsbetingelserne er stabile, og hvor de anvendte målepunkter er fundet for perioder, hvor solfangere stagnerer ved en given indløbstemperatur. Ustabiliteten ved de her foretagne målinger kan illustreres ved, at for ca. halvdelen af de anvendte måledata, var der mindre stop i volumenstrømmen gennem solfangere. Dvs. effektiviteten af solfangerne for disse perioder var egentlig lidt højere end beregnet.

På fig. 6 (s. 15) ses det, at gulvet og væggene i tagrumssolfangerne er beklædt ved spånplader. Det betyder, at solfangeren har en meget stor varmekapacitet, mellem 15 og 20 kJ/m^2. Varmekapaciteten for en væskesolfanger ligger på omkring 10 kJ/m^2. De her beskrevne solfangere reagerer altså relativt langsomt på ændringer. Det betyder, at fundne effektiviteter om formiddagen er for små, mens de er for store om eftermiddagen.

Start og stop af volumenstrøm gennem solfangere skete som nævnt i afsnit 3.2.4. på baggrund af temperaturen af dugen i solfangeren med ét dæklag. Dvs. solfangeren med to dæklag bliver styret på baggrund af situationen i solfangeren med ét dæklag. Dette introducerer selvfølgelig også en fejl i effektivitetsudtrykket for solfangeren med to dæklag.

4.3.1.1. Effektivitetsudtryk afhængig af middeltemperaturen

I den senere simulering af et hus med en tagrumssolfanger (afsnit 5) er der brug for et effektivitetsudtryk for solfangeren, der er afhængig af luftens middeltemperatur i solfangeren, og ikke som her baseret på indblæsningstemperaturen. Ved hjælp af solfangerligningerne (f.eks. ref. (12)) og kendskabet til at den gennemsnitlige volumenstrøm gennem den totale solfanger var 1509 m^3/h ($\sim$ 35 m^3/m^2 h) for måledataene i fig. 20-22 kan effektivitetsudtrykkene for solfangerne findes som funktion af luf-

tens middeltemperatur i solfangeren. Dette effektivitetsudtryk er her fundet for den totale solfanger og solfangeren med ét dæklag.

Den totale solfanger:

$$\eta = 0,46 - 3,7\ (T_m - T_u)/I \qquad (5)$$

Solfangeren med ét dæklag:

$$\eta = 0,67 - 6,98\ (T_m - T_u)/I \qquad (6)$$

hvor T_m er middeltemperaturen af luften i solfangeren (C),
T_u er udendørstemperaturen (C) og
I er solindfaldet i solfangeren (W/m^2).

4.3.1.2. Effektivitetsudtryk for en tagrumssolfanger med to dæklag

I ref. (13) er foretaget en undersøgelse af starteffektivitetens afhængighed af volumenstrømmen gennem en solfanger meget lig den her beskrevne - ét dæklag og en fiberdug som absorber. Solfangerens princip er det samme som her, der er blot anvendt en anden fiberdug, der er mere holdbar end den anvendt i dette projekt - se afsnit 6.1.3. Resultaterne er vist i fig. 23.

Som det ses af fig. 23 burde solfangeren med ét dæklag have en starteffektivitet på 55%, mod 50% som fig. 21 viser. Dette kan dels skyldes usikkerheden i regressionen foretaget i fig. 21, dels at der ikke er gjort meget ud af at gøre tagrumssolfangere tætte. Som det vises i næste afsnit, er solfangerne meget utætte. En anden årsag til den lavere starteffektivitet kan være, at luften blæses ind i mellemrummet mellem fiberdug og dæklag i et enkelt punkt (midt på dugen). Volumenstrømmen gennem fiberdugen kan derfor variere med forringet varmeovergang til følge. Det er svært at måle, om volumenstrømmen gennem fiberdugen er jævnt fordelt. Men ud fra målinger af temperaturen på dugen forskellige steder i solfangeren med ét dæklag, kan

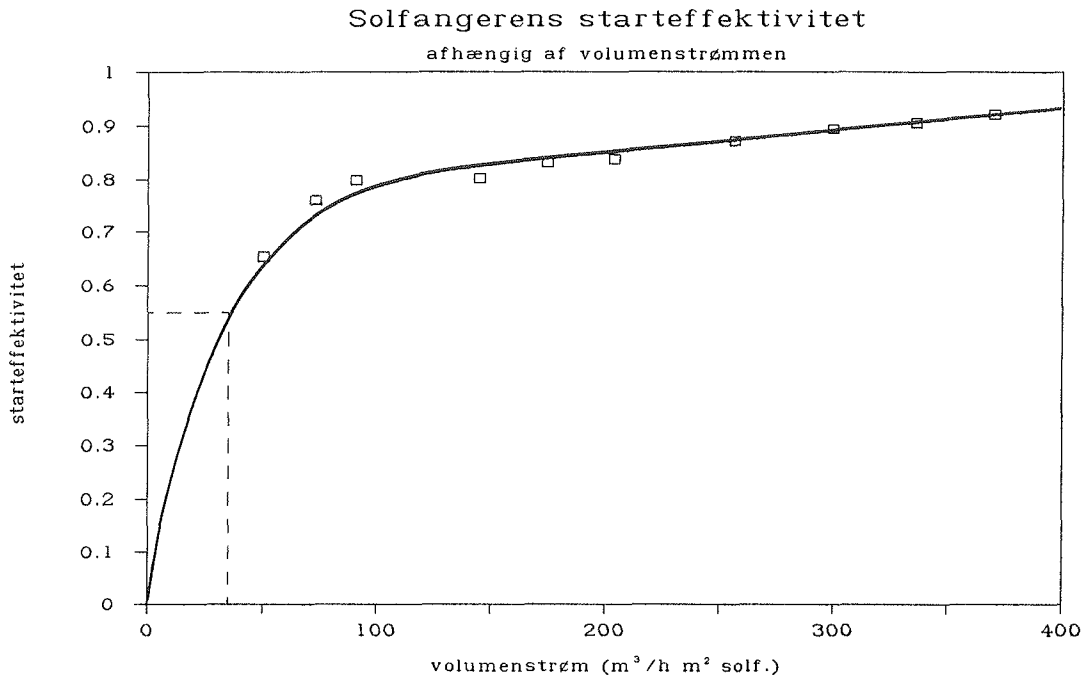


Fig. 23. Starteffektivitetens afhængighed af volumenstrømmen gennem solfangeren.

der sluttes, at volumenstrømmen er rimeligt jævnt fordelt. På grundlag af fig. 23, effektivitetsudtrykket for solfangeren med ét dæklag, og den viden, vi har om forskellen af effektiviteten mellem væskesolfangere med et og to dæklag (ref. (14) og (15)) sluttes det, at den her beskrevne solfanger med to dæklag kan have følgende effektivitetsudtryk ved en volumenstrøm på 35 m^3/m^2 h:

$$\eta = 0,70 - 5,0\ (T_m - T_u)/I \qquad (7)$$

Dette udtryk vil også blive brugt i simuleringerne i afsnit 5.

4.3.1.3. Dug kontra vægge og gulv som absorber

I fig. 24 er effektivitetskurverne for solfangeren med ét dæklag sammenlignet med solfangeren fra forprojektet, hvor absorberen var de sortmalede vægge og gulvet i tagrummet (fig. 25). Som det ses af figuren giver fiberdugen en væsentlig forbedring af tagrumssolfangerens effektivitet.

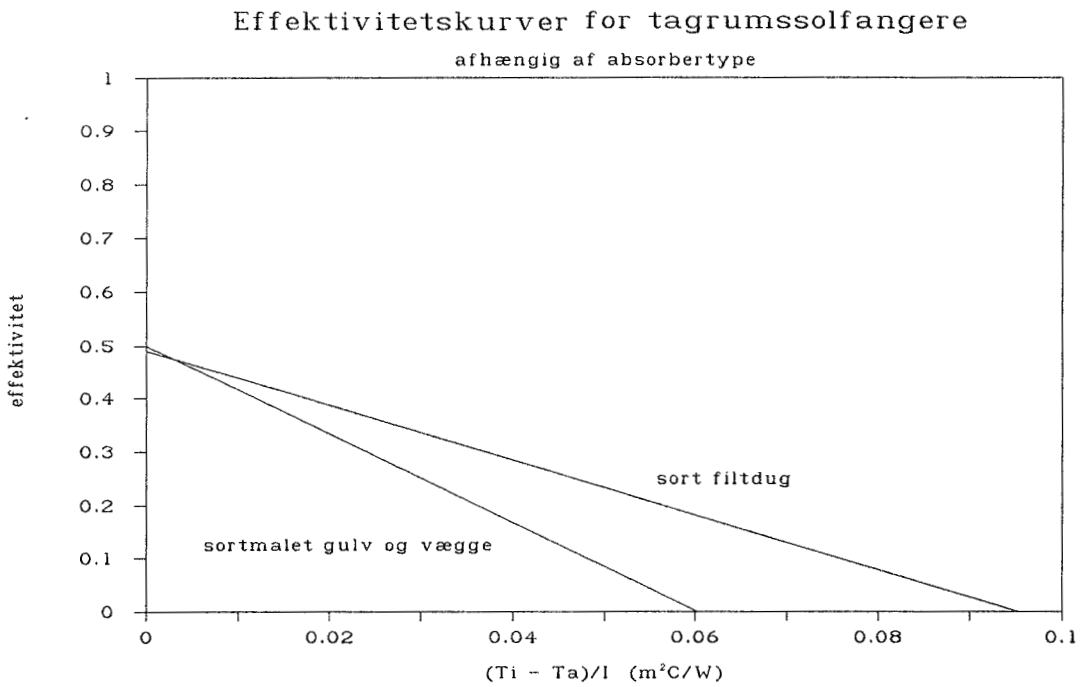


Fig. 24. Effektivitetskurven for tagrumssolfangeren med ét dæklag og tagrumssolfangeren fra forprojektet ved en solindstråling på 800 W/m^2 og en volumenstrøm på 35 m^2/h pr. m^2 solfanger.

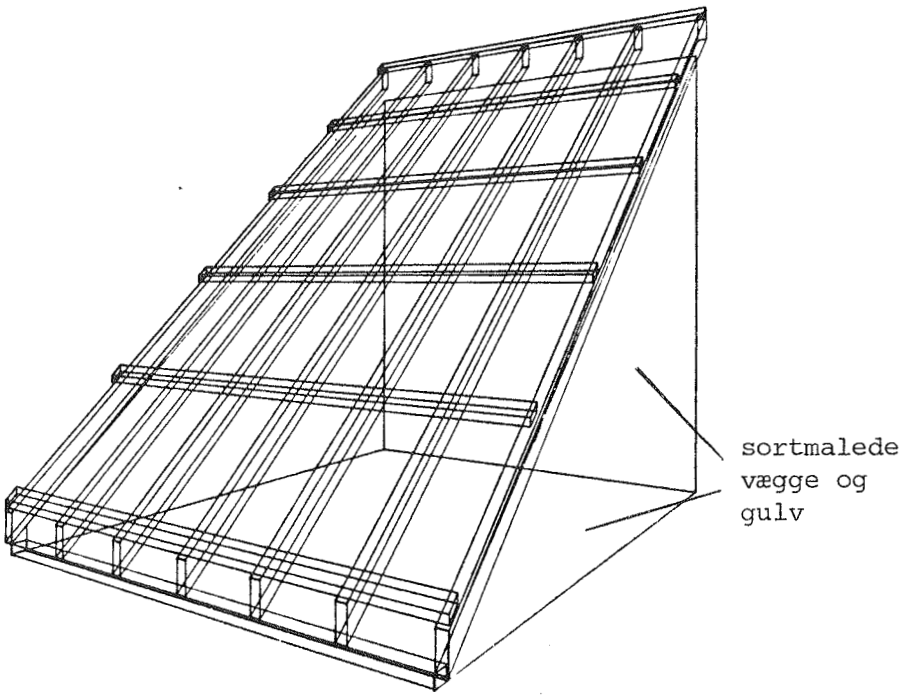


Fig. 25. Tagrumssolfangeren fra forprojektet, hvor de sortmalede sider og gulv udgør absorberen. Solfangerens areal er ca. 22 m^2.

Som det ses af fig. 23 er det muligt at forøge effektiviteten af tagrumssolfangeren væsentligt ved at have en større volumenstrøm gennem fiberdugen. Dette er f.eks. tilfældet, hvis der installeres en luft/vand varmeveksler i tagrummet til at forsyne brugsvandsbeholderen med varme. Det er målt/beregnet at for den anvendte luft/vand varmeveksler var volumenstrømmen gennem denne og dermed også gennem fiberdugen ca. 1100 m^3/h ved laveste omdrejninger (900 omdr./min.). For en tagrumssolfanger på 100 m^2, hvor rumopvarmningsanlægget har en volumenstrøm på 35 m^3/m^2h, vil det betyde, at volumenstrømmen gennem fiberdugen forøges til 47 m^3/m^2h. Ifølge fig. 23 øges starteffektiviteten fra 55 til 65%, men samtidig vil varmetabskoefficienten måske blive øget, idet der, på grund af øget lufthastighed, sker en større "omrøring" mellem tagrummet og spalten mellem fiberdug og dæklag.

4.3.2. Tryktab over solfangeren

Tryktabet over solfangeren har indflydelse på effektiviteten, idet et vist tryktab er nødvendigt for at etablere en jævn fordeling af volumenstrømmen gennem fiberdugen. På den anden side vil et for stort tryktab øge energiforbruget til ventilation og øge utæthedernes indflydelse på effektiviteten.

Tryktabet er det samme over de to typer solfangere. Tryktabet er målt dels over selve absorberen, dels over absorberen + den fleksible indblæsningskanal - tabel 1. Tryktabet er desuden målt for de tre forskellige volumenstrømme - se afsnit 3.2.4.

Tryktabet over selve absorberen vurderes at være rimeligt, men det er alt for stort over de fleksible kanaler. Dette store tryktab over indblæsningskanalerne kan undgås ved at anvende faste rør i stedet for fleksible kanaler. Dette vil mindske den nødvendige energi til ventilatoren men kan øge støjniveauet.

Volumenstrøm m^3/m^2h	Tryktab Pa	
	målt over absorberen	målt over absorberen + fleksible kanal
32	7,4	23,5
38	12,3	31,5
43	16,0	44,1

Tabel 1. Tryktab over tagrumssolfangeren.

Som allerede nævnt er solfangerne utætte. De er så utætte, at det er vanskeligt at måle. Der blev ikke gjort noget specielt for at tætne solfangerne. Men specielt solfangeren med ét dæklag er meget utæt. Det skyldes, at dæklaget består af plader på 0,9 x 0,9 m, der kun er lagt over hinanden uden anden form for tætning end en vulst. Spalten ved overlægget er 5-10 mm - fig. 4 (s. 14). Denne dæklagskonstruktion vil være meget vanskelig at tætne. Derimod vil det være væsentligt lettere at tætne dæklaget af ribbeplade, idet de store plader minimerer længden af samlingerne. En anden årsag til utætheden af solfangerne er sikkerhedsventilatorerne (fig. 1), der er anbragt i hver gavl til at holde temperaturen i solfangeren under en given temperatur. Sikkerhedsventilatorernes funktion er at hindre så høje temperaturer, at der sker beskadigelse af solfangerne eller direkte opstår brand. Deres nødvendighed diskuteres senere - se afsnit 6.1.6.

4.4. Stenmagasinet

4.4.1. Varmetab

På baggrund af målingerne i perioden 19/2-18/6 1987 er varmetabet fra lageret forsøgt fastlagt. Som allerede nævnt er der et betydeligt varmetab fra lageret til det nordlige tagrum, fordi

kanaler til og fra lageret er ført direkte op til det nordlige tagrum. Der er desuden kun ét spjæld inden for husets isolering i den ene kanal.

Til beregning af varmetabet fra lageret er der benyttet måleperioder, hvor der hverken har været varmetilførsel til lageret eller varmeforbrug (ud over varmetabet) fra lageret. Den anvendte beregningsmetode er beskrevet i ref. (16). Normalt beregner man varmetabet ved at antage, at det sker til rummet. Dette er vist i fig. 26 som funktion af forskellen mellem rumtemperaturen og temperaturen i det nordlige tagrum. I fig. 27 er vist resultatet fra beregninger ved den antagelse, at varmetabet sker til en temperatur lig temperaturen i det nordlige tagrum. Som det ses af fig. 26 og 27 sker det største varmetab til det nordlige tagrum - varmetabet er her mindst afhængig af temperaturforskellen mellem rum og det nordlige tagrum. Hvis varmetabet udelukkende skete til rummet ville varmetabet være 5-6 W/°C - liniernes skæring med y-aksen.

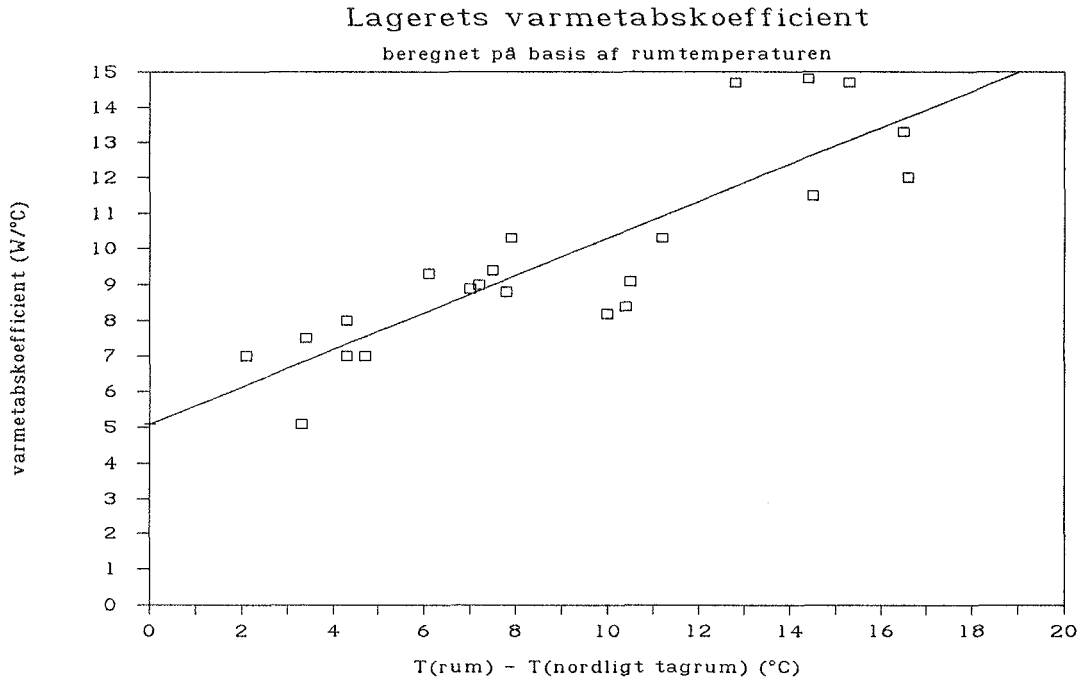


Fig. 26. Varmetabet fra stenmagasinet beregnet under antagelse af, at det sker til en temperatur lig rummets.

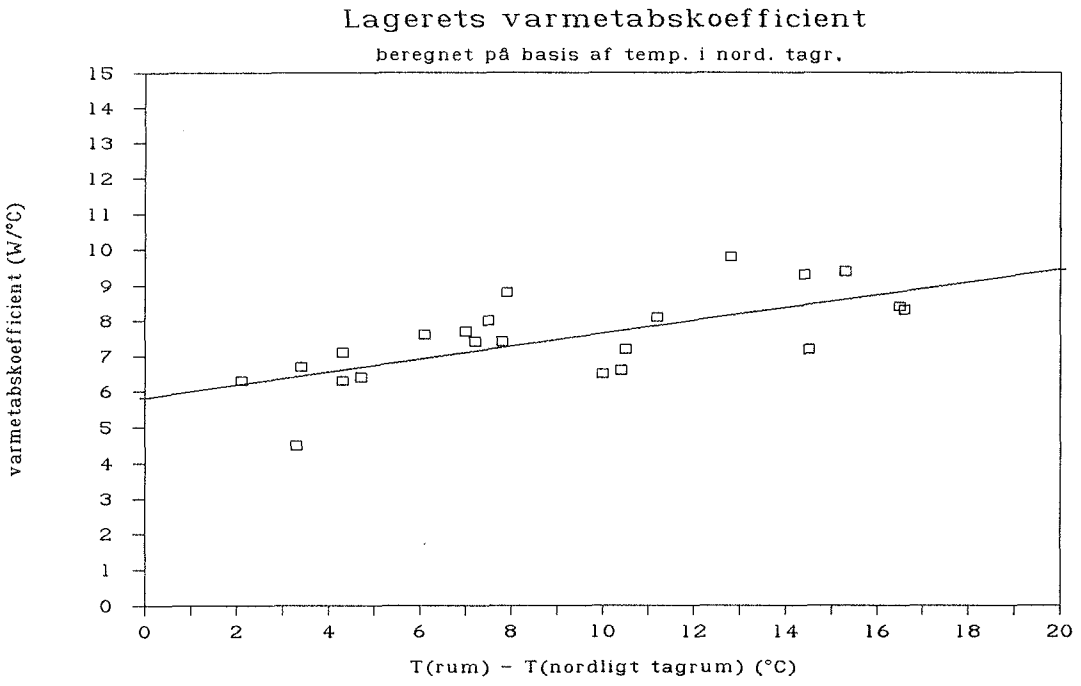


Fig. 27. Varmetabet fra stenmagasinet beregnet under antagelse af, at det sker til en temperatur lig det nordlige tagrums.

4.4.2. Temperaturlagdeling i stenmagasinet

Et solvarmeanlæg med et lager, der har en god temperaturlagdeling, vil alt andet lige have en højere ydelse end et anlæg med et lager, der har ens temperatur i alle lag. I dette afsnit vil der blive set nærmere på temperaturlagdelingen i stenmagasinet. På fig. 28 er temperaturforløbet for tre tilfældige dage i marts optegnet. Fig. 29 viser solindfaldet og udendørstemperaturen for de samme tre dage.

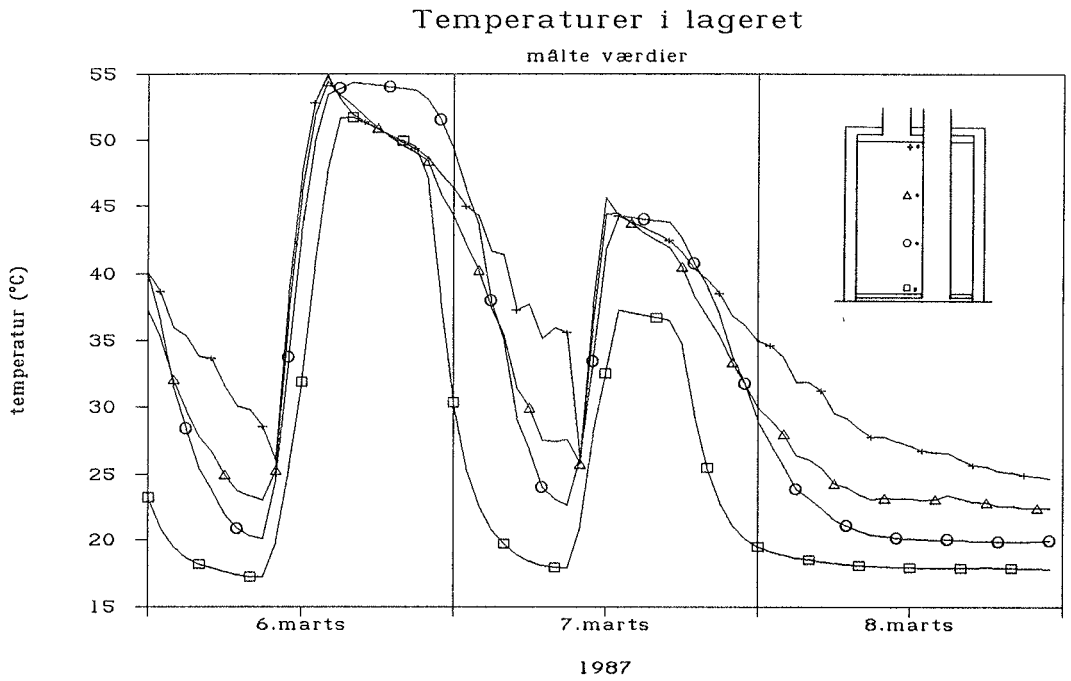


Fig. 28. Forløbet af fire temperaturer i stenmagasinet for tre dage i marts 1987.

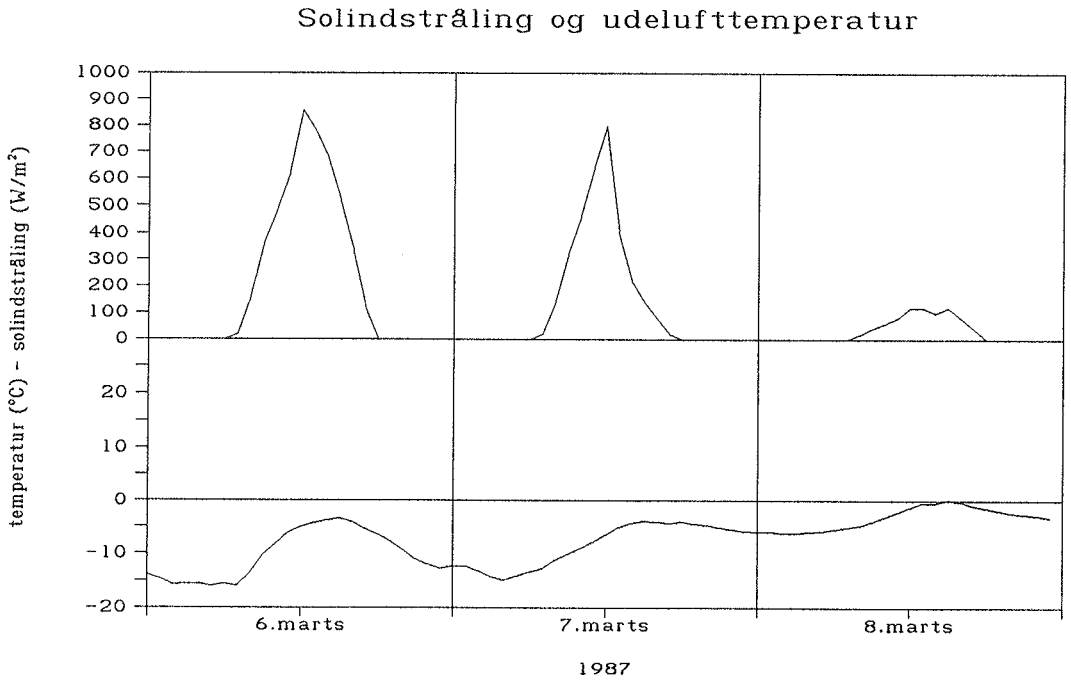


Fig. 29. Solindstrålingen og udendørstemperaturen for de tre samme dage som i fig. 27.

Som det ses, er der en rimelig lagdeling i lageret, når der bliver tappet varme fra det. Men under varmeopsamling er temperaturlagdelingen dårlig. Det skyldes, at volumenstrømmen gennem lageret i denne periode er høj; 1400-1900 m^3/h. Dette svarer til 0,24-0,32 m/s (når volumenstrømmen divideres med arealet af stenene vinkelret på strømningsretningen). I ref. (9) og (10) anbefales det, at denne værdi ikke overstiger 0,15 m/s. En bedre stratificering og dermed et mere effektivt lager kan opnås ved en lavere volumenstrøm eller et større strømningsareal. Lavere volumenstrøm vil mindske solfangerens effektivitet, og et større strømningsareal vil betyde, at lageret optager et større gulvareal i huset. En afvejning mellem disse forhold må foretages i de enkelte tilfælde.

4.4.3. Tryktab i stenmagasinet

Tryktabet over lageret er målt for de fire volumenstrømme der optræder: tre under varmeopsamling og en under varmeudtag. Resultatet er angivet i tabel 2.

Retning af volumenstrømmen	Volumenstrøm m^3/h	Tryktab Pa
Varmeudtag (op)	600	20
Varmeindsamling (ned)	1400 1650 1900	103 142 177

Tabel 2. Tryktab over stenmagasinet afhængig af volumenstrømmen.

Som det ses af tabel 2 er tryktabet over lageret meget stort under varmeopsamling. Ved at sænke luftens strømningshastighed

gennem lageret som foreslået i forrige kapitel, vil ikke kun lagdelingen bedres, tryktabet over lageret vil også mindskes væsentligt. Dette vil igen betyde en væsentlig besparelse i den energimængde, ventilatorerne skal tilføres. Lageret var designet til at have et tryktab på 110 Pa ved en volumenstrøm på 2000 m^3/h. Altså væsentligt mindre end det, der blev målt. Det forventes derfor, at et bedre design, specielt af den nederste manifold, vil mindske tryktabet.

Som det fremgår af fig. 8 og 10 er der i lageret indlagt en plastikfolie, og de udvendige samlinger af lageret er tætnet med tape. Utæthederne i lageret anses derfor for minimale, og uden betydning set i forhold til de store utætheder i solfangeren.

4.5. Rumopvarmningssystemet

Det er vanskeligt kort at give et overblik over, hvordan systemet har kørt. Men på fig. 30 er vist forskellige energistrømme i systemet for en uge i marts. Fig. 31 viser solindstrålingen og udendørstemperaturen for den samme periode. På fig. 30 er der ikke vist den del af lagerets varmetab, der kommer huset til gode, da det som nævnt i afsnit 4.4.1. er meget svært at beregne.

Rumopvarmningssystemet er luftbaseret. Det er velkendt, at det kræver mere energi at transportere varme rundt med luft end med vand. Tryktabene i solfanger og lager har ydermere været større end nødvendigt. Derfor udgør den energi, der er brugt til ventilatorerne ca. 15% af den nyttige energimængde fra solfangerne. Det forventes dog, at det er muligt at mindske dette energiforbrug ved at mindske tryktabene i anlægget, så det kun udgør ca. 10% af den nyttige energimængde fra solfangerne.

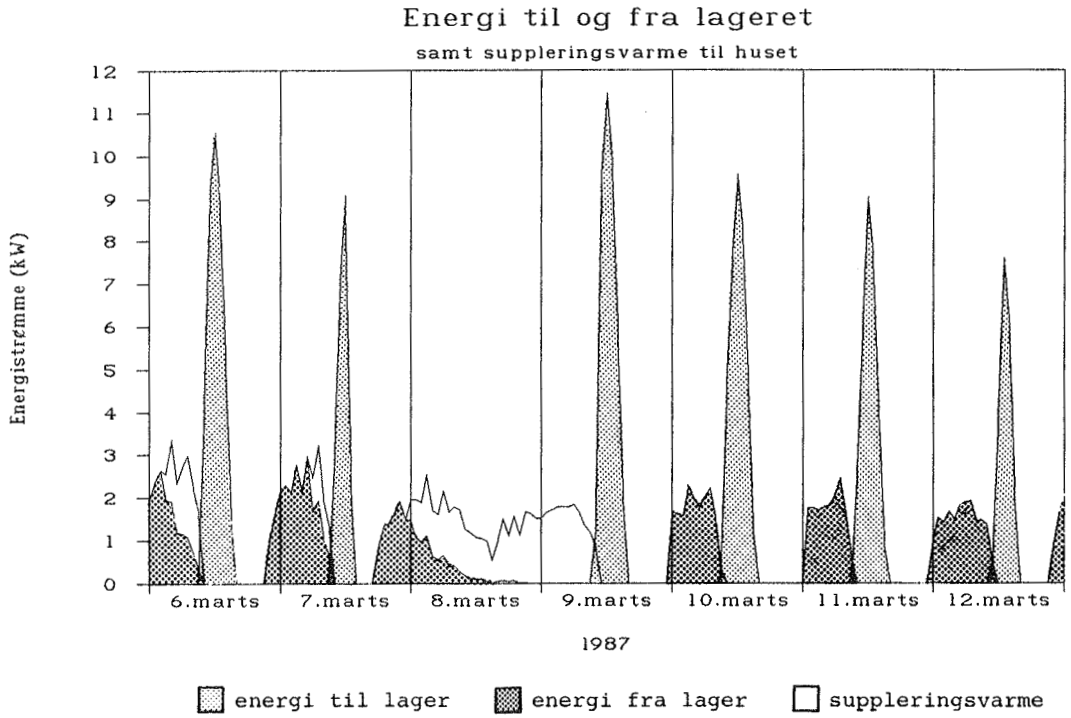


Fig. 30. Energistrømme i rumopvarmningssystemet for en uge i marts 1987.

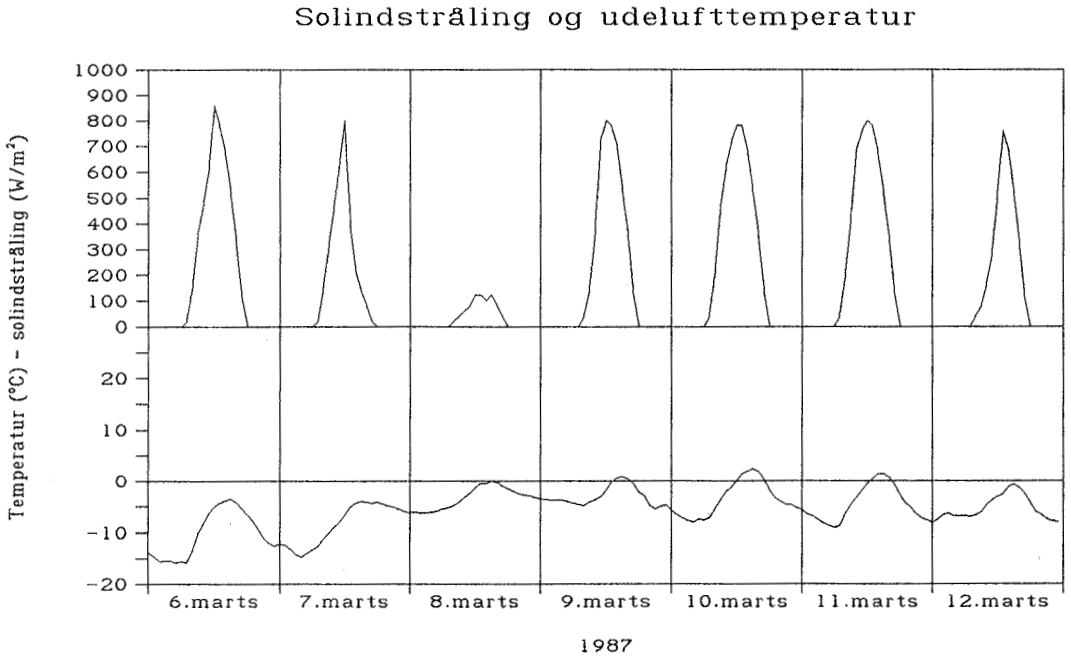


Fig. 31. Solindstrålingen og udendørstemperaturen for den samme uge som fig. 29.

I perioden fra d. 19. februar 1987 til opvarmningssæsonen officielt afsluttedes d. 31. maj 1987 (minus 6 dage med måleudfald), har huset haft behov for 1476 kWh i suppleringsvarme. I samme periode blev lageret tilført 4151 kWh.

Som nævnt har rumopvarmningsanlægget den facilitet, at varme fra tagrummet kan føres direkte fra solfangeren til huset. I ovennævnte periode er kun 22 kWh ($\sim$ 0,5% af den nyttiggjorte varme fra tagrummet) anvendt på denne måde. Dette kan skyldes, at huset kun består af ét rum, således at hele huset får gavn af lagerets varmetab og solindfaldet gennem vinduerne. Men ved en fornuftig placering af lageret, således at varmekrævende rum passivt tilføres varme fra lageret, bør det være muligt at mindske den tid, hvor varme kan tages direkte fra solfangeren. På den måde kan systemet forenkles og billiggøres, idet styringen og kanalføringen forenkles ved at udelade ovennævnte facilitet.

5. EDB-beregninger

Formålet med nærværende projekt var bl.a. at dokumentere de høje dækningsgrader, der blev beregnet i forprojektet (ref. (6)). Det har ikke været muligt inden for projektets rammer at udstrække måleperioden til en hel opvarmningssæson eller mere. Som beskrevet i forrige kapitel dækker måleperioden under halvdelen af en fyringssæson.

Der er principielt to måder at undersøge, hvor høj dækningsgraden er: Enten sammenlignes måleresultaterne for eksperimenthuset med varmeforbruget for et tilsvarende hus uden tagrumssolfanger. Eller en model valideres på baggrund af målingerne og benyttes derefter til at simulere solvarmeanlæggets ydelse og dermed også dets dækningsgrad. Hovedproblemet med den første metode er, at det kun giver mulighed for at udtale sig om dækningsgraden for den aktuelle måleperiode og for det aktuelle anlæg. Det er forbundet med meget store usikkerheder at prøve at ekstrapolere til andre vejrpåvirkninger og andre anlæg. Fordelen ved den anden metode er, at når først modellen er valideret, er det betydeligt lettere og forbunden med mindre usikkerheder at foretage parameteranalyser. På grund af dette, og fordi det ikke var muligt inden for projektets rammer at benytte begge metoder, blev det valgt at anvende metoden med validering og efterfølgende simulering med en model.

5.1. Validering

Som model valgtes den edb-baserede model EMGP2 (European Modelling Group Program 2) (ref. (17)), der er udviklet i et samarbejde mellem flere europæiske lande - deriblandt Danmark - under EF-kommissionens solvarmeforskningsprogram. Modellen findes både i en PC og en Main Frame version.

Som allerede nævnt i forrige kapitel var der problemer med at bestemme effektiviteten af solfangeren ud fra målingerne i foråret 1987. Valideringen af solfangermodellen vil derfor

blive foretaget på baggrund af målingerne fra sommerperioden (se fig. 32). Omvendt er kun målingerne fra foråret anvendt til validering af lagermodellen (fig. 32), mens det er meningsløst at anvende målingerne fra sommerperioden til dette formål, da der i denne periode ikke har været noget varmeforbrug.

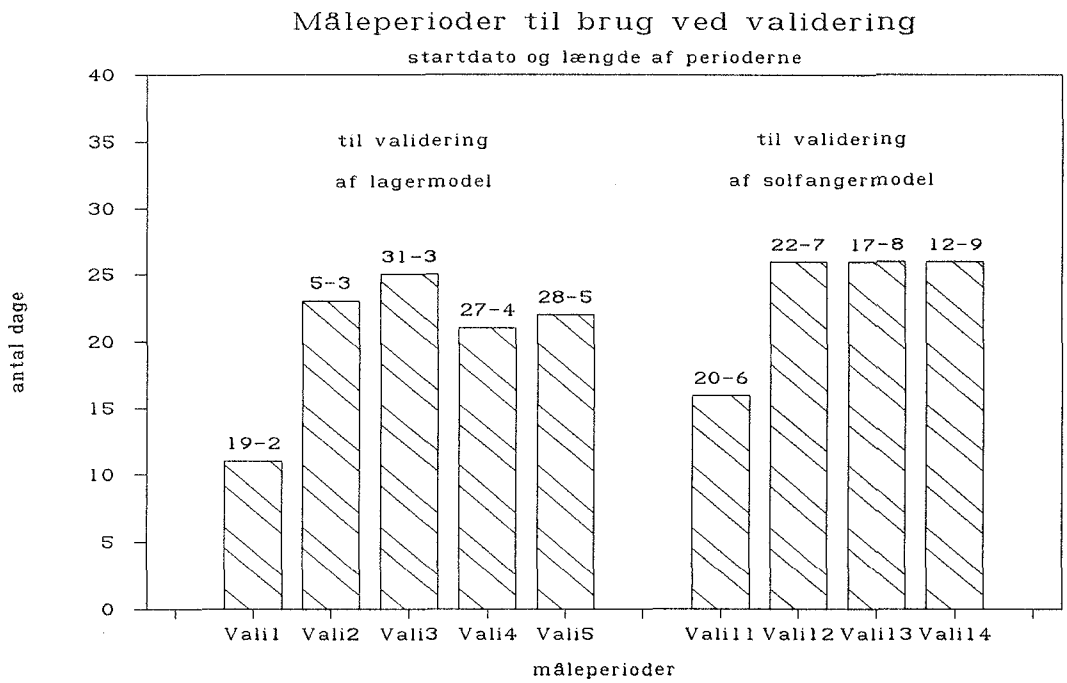


Fig. 32. Måleperioder benyttet til validering af edb-modellen.

Valideringen af edb-modellen er udførligt beskrevet i ref. (1), kun hovedresultaterne vil derfor kun blive givet her.

5.1.1. Solfangeren

Valideringen af solfangermodellen er kun foretaget for den totale solfanger, bl.a. fordi der længe herskede tvivl om flow-fordelingen mellem de to solfangere. Dvs. effektivitetsudtrykket (5) s. 32 er anvendt til at beskrive solfangeren.

I tabel 3 er resultatet af valideringen vist. Anden kolonne viser den målte energimængde fra solfangeren, tredie kolonne

viser den beregnede værdi. Fjerde kolonne viser den procentvise forskel mellem målt og beregnet værdi. Femte kolonne angiver usikkerheden på værdierne i kolonne 4. Denne usikkerhed er dels beregnet på grundlag af måleusikkerhederne og dels på grundlag af usikkerheden på beregningen (beregnet på grundlag af usikkerhederne på de enkelte parametre, der indgår i beregningen).

Måle-perioder	Værdi	Målt MJ	Beregnet MJ	Forskel %	Usikkerhed %
Valil1	Fra solfanger	255	245	-3,9	14,6
Valil2	Fra solfanger	456	441	-3,3	20,5
Valil3	Fra solfanger	450	440	-2,2	15,8
Valil4	Fra solfanger	607	655	7,9	14,3

Tabel 3. Resultatet af valideringen af solfangermodellen.

Som det ses af tabel 3 er forskellen mellem målte og beregnede værdier mindre end usikkerheden (fig. 33), hvorfor valideringen må siges at være tilfredsstillende. Men usikkerheden på valideringen er meget stor, samtidigt med at det kan se ud som om, at der er en sæsonafhængighed i forskellen mellem målte og beregnede værdier. Dette bestyrker yderligere antagelsen fra forrige kapitel om, at effektivitetsudtrykket for den totale solfanger også er forkert omend i mindre grad end for solfangeren med to dæklag alene.

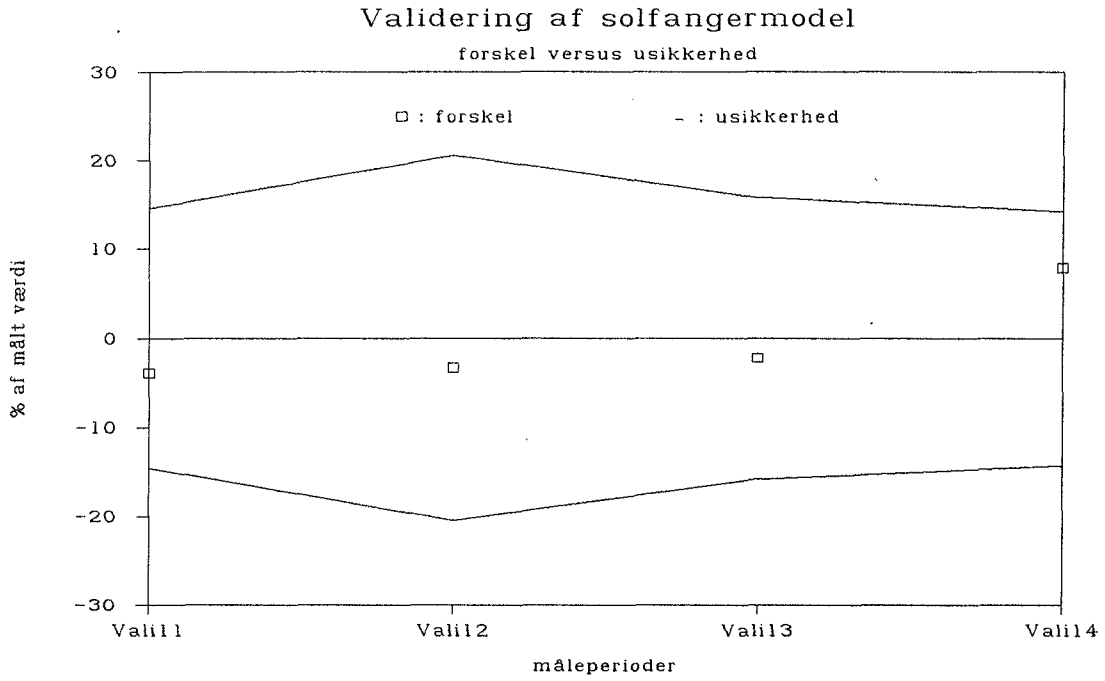


Fig. 33. Forskellen mellem målte og beregnede energimængder fra solfangeren og usikkerheden på denne størrelse.

I fig. 34 er den målte og beregnede solfangertemperatur sammenlignet for en uge i september (måleperiode Vali14). Som det ses er der et rimeligt sammenfald, bortset fra om natten, hvor den målte solfangertemperatur er relativt meget højere end den beregnede. Det skyldes, at husets varmetab gennem den ene loftshalvdel holder tagrumssolfangeren opvarmet. Dette er der ikke taget hensyn til i modellen, men betyder heller ikke noget for anlæggets ydelse, da der ikke sker varmeopsamling i denne periode.

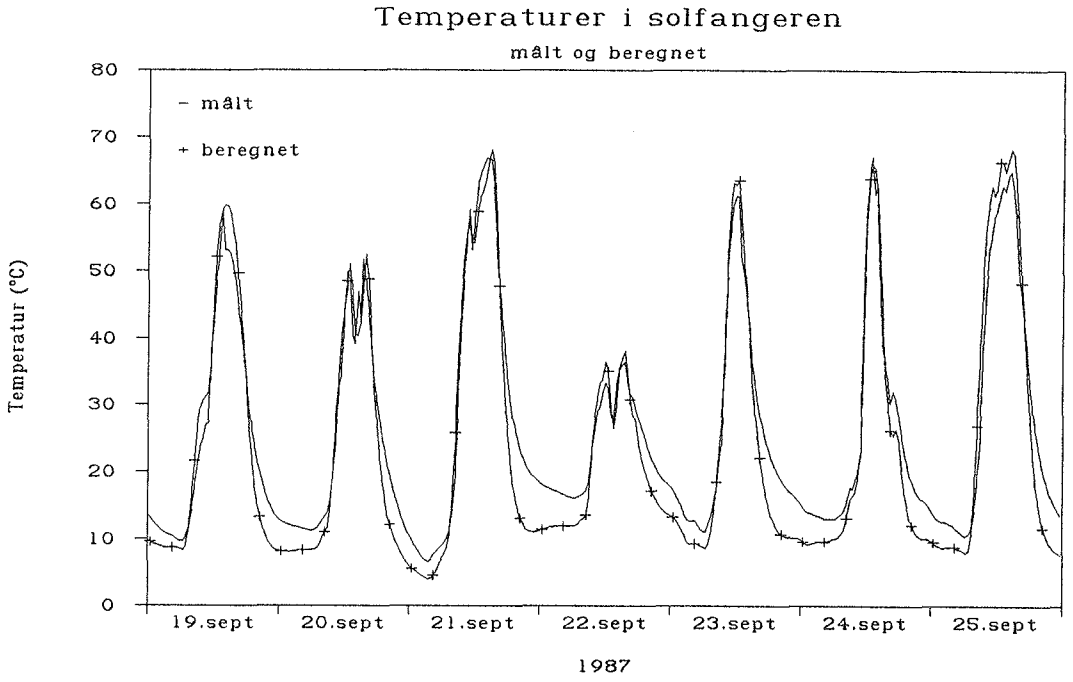


Fig. 34. Målt og beregnet solfangertemperatur for en periode i september.

5.1.2. Stenmagasinet

I tabel 4 er vist resultatet fra valideringen af lageret. Tabellen er opbygget som tabel 3. Som det ses af fig. 35 og 36, er der kun én værdi, der falder uden for usikkerheden (1 x sigma) (standardafgivelsen), men da den er langt inden for 2 x sigma må resultatet anses for tilfredsstillende, idet det ud fra normal statistisk praksis siges, at 67% af målingerne skal ligge inden for sigma, 95% inden for 2 x sigma og 99,9% inden for 3 x sigma. Det bemærkes desuden, at usikkerhederne for denne validering er væsentlig lavere end for valideringen af solfangeren.

Måle-perioder	Værdi	Målt MJ	Beregnet MJ	Forskel %	Usikkerhed %
Vali1	Til lager	756	724	-4,2	7,8
	Fra lager	426	424	-0,5	4,8
Vali2	Til lager	1417	1324	-6,6	8,0
	Fra lager	840	841	0,1	4,4
Vali3	Til lager	1390	1256	-9,6	8,2
	Fra lager	630	633	0,5	5,7
Vali4	Til lager	574	579	0,9	12,4
	Fra lager	106	102	-3,8	6,4
Vali5	Til lager	442	436	-1,4	11,6
	Fra lager	17	17	0	7,8

Tabel 4. Resultatet af valideringen af lagermodellen.

I fig. 37 og 38 er vist det målte og beregnede temperaturforløb i lageret gennem tre dage i marts. Som det ses er de målte og beregnede temperaturer ikke placeret i helt samme niveau i lageret. Desuden er de beregnede temperaturer beregnet som værende inde i stenene, mens de målte temperaturer er fundet i et plastrør, der står lodret i lageret. Under hensyntagen til ovenstående må det siges, at modellen beskriver temperaturforløbet i lageret utroligt godt.

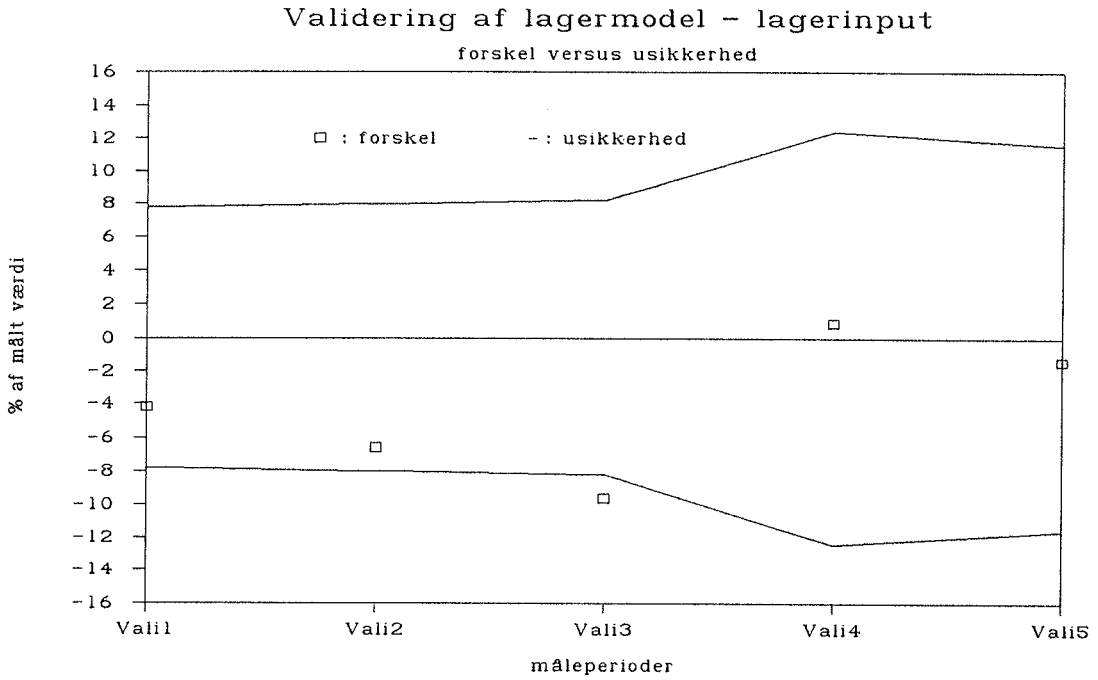


Fig. 35. Forskelle mellem målte og beregnede energimængder til lageret samt usikkerheden på denne størrelse.

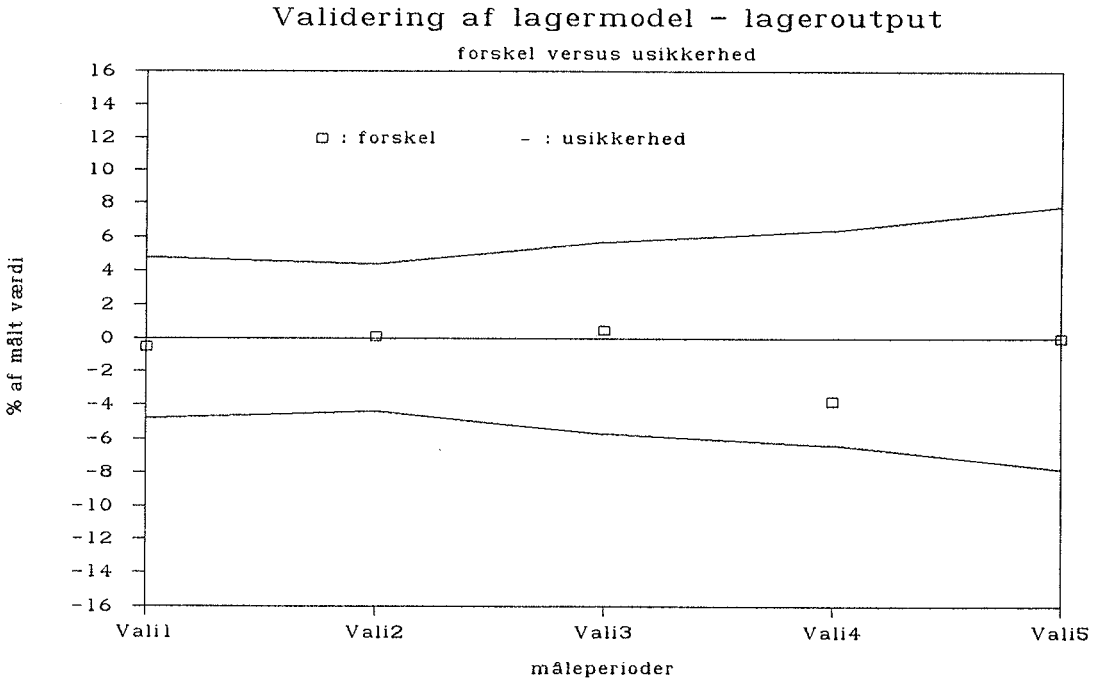


Fig. 36. Forskellen mellem målte og beregnede energimængder fra lageret samt usikkerheden på denne størrelse.

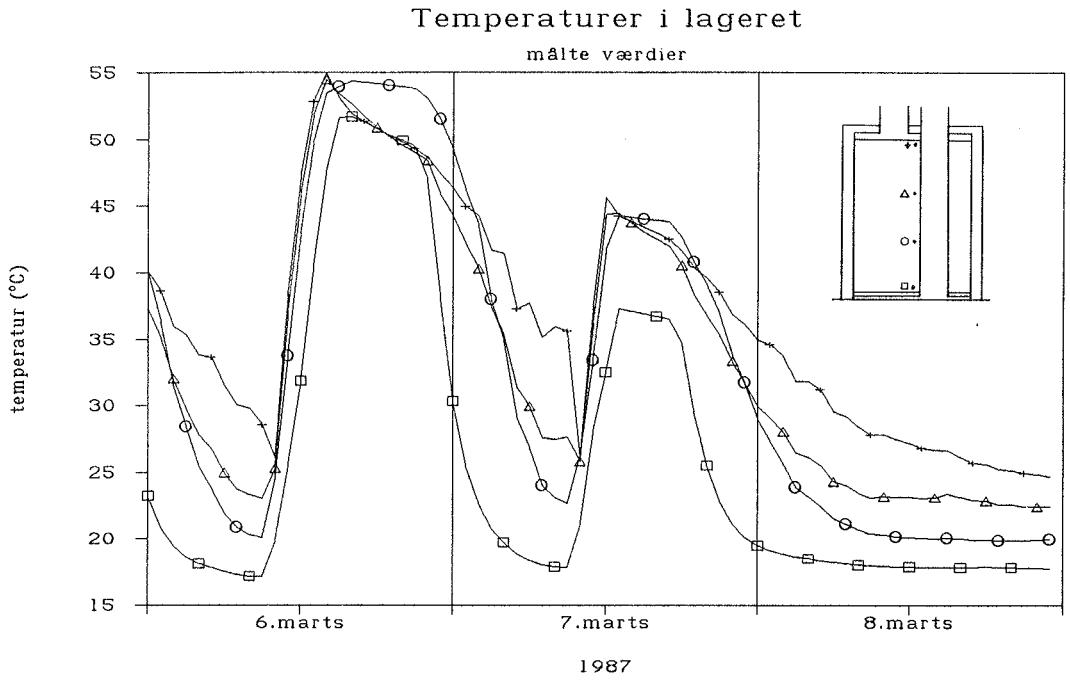


Fig. 37. Målte temperaturer i lageret for tre dage i marts 1987 (figuren er identisk med fig. 28).

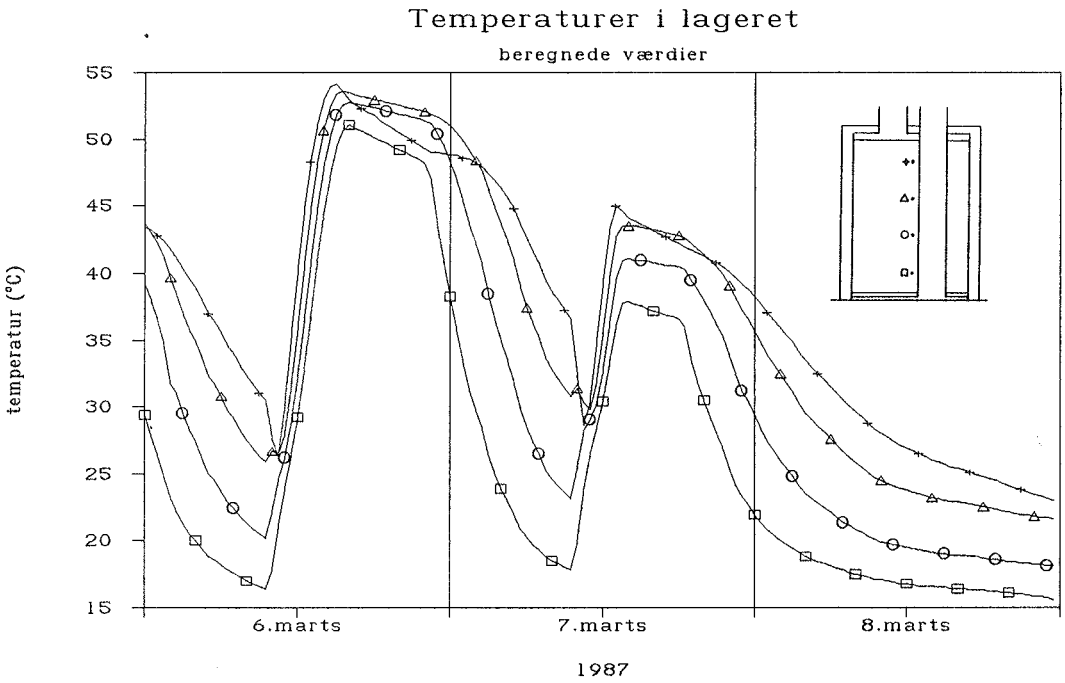


Fig. 38. Beregnede temperaturer i lageret for de samme tre dage som fig. 37.

5.1.3. Hele opvarmningssystemet

Der er ikke foretaget validering af en model, der beskriver hele systemet, hovedsagelig fordi måleperioderne som før nævnt ikke kan bruges til validering af et system med både solfanger og lager. Desuden ville en sådan model blive meget kompliceret, idet volumenstrømmen gennem solfangeren i eksperimenthuset varierede afhængig af temperaturdifferensen over solfangeren. Hvis modellen yderligere skulle tage hensyn til brugsvandssystemets luft/vand varmeveksler, ville modellen blive yderligere kompliceret. Der har i dette projekt ikke været tid til opbygning af en sådan model.

Selv om modellen, der beskriver rumopvarmningsmodellen (uden luft/vand varmeveksleren), ikke er valideret som et hele, vurderes det dog, at modellen inden for en rimelig usikkerhed kan beskrive anlægget.

5.2. Simuleringer

Som nævnt i forrige afsnit vil en model, der beskriver eksperimenthusets opvarmningssytem være kompliceret at opbygge. Dette har ikke været muligt at gøre inden for projektets rammer. Der er derfor foretaget nogle simplifikationer, der dog anses for at være rimelige, specielt fordi de ikke overestimerer udbyttet fra solvarmeanlægget. Den første tilnærmelse, der gøres, er at adskille rum- og brugsvandssystemet i to separate systemer.

5.2.1. Brugsvandssystem

I simuleringerne ændres brugsvandssystemet, idet det antages, at luft/vand varmeveksleren udskiftes med en væskebaseret plan solfanger. Der anvendes her en solfanger med en Sunstrip-absorber. Solfangeren antages at have en effektivitet på:

$$\eta = 0,78 - 4,4(T_m - T_u)/I - 0,011(T_m - T_u)^2/I \qquad (8)$$

I tabel 5 er brugsvandsanlæggets ydelse i de 5 første måleperioder sammenlignet med et solvarmeanlæg med ovenstående solfanger, men ellers identisk med anlægget i eksperimenthuset. Arealet for væskesolfangeren er sat til henholdsvis 4 og 5 m^2.

måle-periode	Udbytte fra brugsvandsanlægget MJ		
	målt i eksperimenthuset	Tilsvarende system, men med plan solfanger	
		4 m^2	5 m^2
Vali1	155	159	175
Vali2	340	250	391
Vali3	397	354	349
Vali4	426	407	470
Vali5	358	323	354

Tabel 5. Sammenligning mellem udbyttet fra brugsvandsanlægget i eksperimenthuset og et tilsvarende anlæg med en plan solfanger i stedet for luft/vand varmeveksleren.

Som det ses af tabel 5 vil et brugsvandsanlæg med en plan solfanger på mellem 4 og 5 m^2 give samme udbytte som brugsvandsanlægget i eksperimenthuset. Det vælges at anvende et solfangerareal på 5 m^2, idet det daglige varmtvandsforbrug sættes op fra 120 til 150 l/dag. Dette svarer til et årligt nettoenergiforbrug på 2500 kWh.

I bilag C er vist databladet for et solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, der anvender en solfanger med en effektivitet som (8). I bilag C er også vist datablade for solfangeren og lageret. Lageret er her bedre end i eksperimenthuset, idet det er slankere og varmevekslerspiralen er placeret i bunden. Ud fra tabellerne i bilag C kan det beregnes at anlægget vil have en dækningsgrad på 67 og 70% ved en taghældning på henholdsvis 30 og 45°. Disse tal er dog underestimerede, idet der i databladet er regnet med, at varmetabet fra bagsiden af solfangeren

sker til udelufttemperaturen. I en tagrumssolfanger vil dette varmetab ikke eksistere, idet det "sker" til tagrumssolfangeren med en temperatur næsten lig den plane væskesolfanger. Ved at anvende et brugsvandsanlæg med en traditionel plan væskesolfanger, bliver rumopvarmningssystemets ydelse også underestimeret, idet volumenstrømmen gennem dugen formindskes. I tabel 6 er tagrumssolfangerens ydelse til rumopvarmning beregnet for de 5 første måleperioder. Dette er sammenlignet med solfangerens målte ydelse dels til rumopvarmning alene og dels til rumopvarmning og brugsvand. Her er andelen til brugsvand kun medregnet, når stenlageret også tilføres varme.

Måle-periode	Udbytte fra tagrumssolfangeren				
	Beregnet MJ	Målt til rum alene MJ	mer-ydelse %	Målt til rum + brugsvand MJ	mer-ydelse %
Vali1	1120	1560	34	1780	59
Vali2	1246	1449	16	1817	46
Vali3	343	347	1	740	116
Vali4	367	352	-4	682	86
Vali5	613	777	27	872	42

Tabel 6. Sammenligning af beregnet udbytte fra tagrumssolfangeren (med ligning (5)) og faktisk udbytte, når luft/vand varmeveksleren er i funktion.

Som det ses øges tagrumssolfangerens ydelse betragteligt også ud over usikkerheden fundet i afsnit 5.1.1, når volumenstrømmen øges som følge af luftstrømmen gennem luft/vand varmeveksleren.

5.2.2. Rumopvarmningssystemet

Rumopvarmningssystemet, der benyttes til simuleringerne, er vist i fig. 39, og funktionen af spjældene er vist i tabel 7. Spjæld M anvendes til at sikre, at indblæsningstemperaturen ikke bliver for høj.

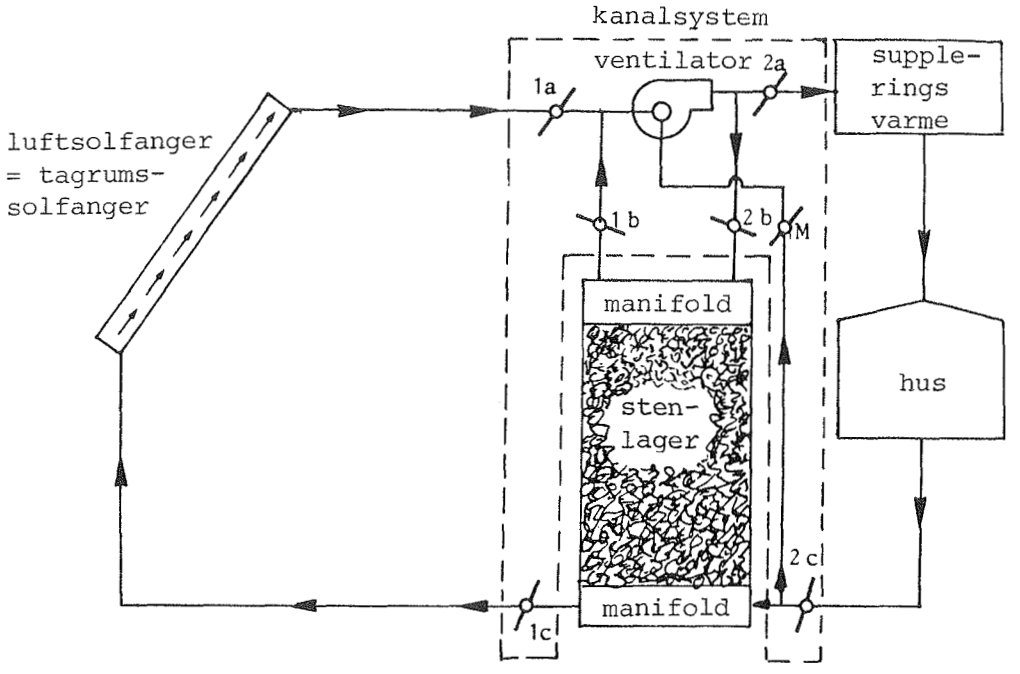


Fig. 39. Diagram over rumopvarmningsanlægget benyttet i simuleringerne.

Af systemparametre er anvendt de samme som i eksperimenthuset. Dvs. 0,06 m^3 lager pr. m^2 solfangerareal og en volumenstrøm gennem solfangeren på 35 m^3/h pr. m^2 solfanger. Som solfanger er dels valgt solfangeren med ét enkelt dæklag fra eksperimenthuset - effektivitetsudtryk (6) (s. 32), dels en solfanger med to dæklag - effektivitetsudtryk (7) (s. 33). Der er anvendt to solfangere for at undersøge, hvilken betydning solfangerens effektivitet har på systemets dækningsgrad.

Driftsituationer lufttransport mellem	Spjældplacering					
	1a	1b	1c	2a	2b	2c
Solfanger - hus	Å	L	Å	Å	L	Å
Solfanger - lager	Å	L	Å	L	Å	L
Lager - hus	L	Å	L	Å	L	Å
Alt afbrudt	L	Å	L	L	Å	L

Tabel 7. Operationen af spjældene i rumopvarmningsanlægget. Å=åben, L=lukket.

I de følgende simuleringer er hovedparten af kanalsystemet placeret inden for husets isolering. Dette betyder dels at varmetabet fra lageret og kanalerne bliver mindre, dels at dette varmetab kommer huset til gode. Det er estimeret at 75% af dette varmetab er anvendeligt for huset. Det har dog vist sig, at denne procentsats har meget lidt indflydelse på dækningsgraden (1-2 procentpoint), idet utilsigtet varmetab og den tilførte energi fra lageret konkurrerer om at dække samme varmebehov. Det betyder, at med stor udnyttelse af varmetabet falder udnytteligheden af den opsamlede energi i lageret og omvendt.

For at gøre modelarbejdet lettere er der indført en simplifikation i modellen. Volumenstrømmen gennem lageret er ens ved energiopsamling og afladning - 35 m^3/h pr. m^2 solfanger. I et rigtigt anlæg ville volumenstrømmen ved afladning være meget lavere. Den høje volumenstrøm ved afladning mindsker temperaturlagdelingen i lageret, (jf. afsnit 4.4.2), hvilket betyder en lavere ydelse. Modellen underestimerer altså udbyttet fra lageret.

Rumopvarmningsanlægget er kun slået til i opvarmningssæsonen, hvilket vil sige, at der er slukket fra d. 1. juni til d. 31. august.

5.2.3. Hustyper

For at give et overblik over dækningsgraden af det ovenfor beskrevne solvarmesystem er der udført simuleringer for to forskellige hustyper med to forskellige taghældninger. Nettoopvarmningsbehovet er excl. gratisvarme fra personer, elektriske installationer og solindstrålingen gennem vinduerne. En nærmere beskrivelse af forudsætningerne kan findes i ref. (18).

Hustype	Taghældning o	Nettorumopvarmningsbehov kWh/år	Nettobrugsvandsopvarmningsbehov kWh/år
Almindeligt hus	30 45	13.500	2.500
Lavenergihus	30 45	6.200	2.500

Tabel 8. De fire forskellige husmodeller simuleringerne er udført for.

Det almindelige hus har en isoleringsstandard svarende til BR-82 kravene. Energistyrelsens krav til et lavenergihus (for fritagelse for tilslutningspligt til kollektive forsyningsanlæg) er, at energiforbruget til rumopvarmning er det halve af et BR-82-hus. I dag er det dog muligt at nå ned på et energiforbrug til rumopvarmning på under 3.000 kWh/år.

Husene har et bebygget areal på 140 m^2, og er orienteret således at solfangeren er sydvendt. Arealet af solfangerne er 85 m^2 for taget med 30° hældning og 105 m^2 for taget med 45° hældning. Heraf benytter brugsvandsanlægget 5 m^2, således at rumopvarmningsanlæggets solfanger er henholdsvis 80 og 100 m^2. Som vejrdata anvendes det danske "Test Reference Year" (TRY) (ref. 19), der beskriver vejret for et dansk gennemsnitsår.

5.2.4. Simuleringsresultater

I tabel 9 er listet resultaterne fra simuleringerne.

Hustype	Taghældning	Total netto-opvarmnings-behov kWh	Nødvendig supplerings-varme kWh	Fra solvarmesystem			
				Rumopvarm-ning kWh	Brugsvands-opvarmning kWh	Rum- + brugs-vandsopvarm-ning kWh	Dækning-grad %
Normalt hus	30°	16000	8650	5670	1680	7350	46
			7360	6960		8640	54
	45°	16000	7990	6260	1750	8010	50
			6580	7670		9420	59
Lavener-gihus	30°	8700	3480	3540	1680	5220	60
			2760	4260		5940	68
	45°	8700	3010	3940	1750	5690	65
			2310	4640		6390	73

Tabel 9. Resultaterne fra simuleringer med EMGP2. Det øverste tal i hver række er fremkommet ved brug af effektivitetsudtrykket for solfangeren med ét dæklag (6). Det nederste tal er fremkommet ved brug af effektivitetsudtrykket for en solfanger med to dæklag (7).

Som det fremgår af tabel 9 er det rimeligt at sige, at mindst halvdelen af nettoopvarmningsbehovet i et almindeligt hus kan dækkes af et solvarmesystem med en tagrumssolfanger, og at to trediedele til tre fjerdedele af nettoopvarmningsbehovet kan

dækkes i et lavenergihus med det i tabel 8 beskrevne opvarmningsbehov; i lavenergihuse med lavere energiforbrug vil dækningsgraden være større. Det skal her erindres, at modellen, som før nævnt, undervurderer udbyttet fra solvarmeanlægget.

Tabellen viser også, at anvendelse af en solfanger med to dæklag er at foretrække, idet det betyder en forbedring i dækningsgraden på 12-18 procentpoint.

I simuleringerne er anvendt stenmagasin på henholdsvis 4,8 og 6 m^3. Disse lagre kræver en del plads, specielt da de er relativt godt isolerede. Der er derfor udført simuleringer for om muligt at fastlægge den optimale lagerstørrelse. Simuleringerne er udført for huse med 30° taghældning og en solfanger med ét dæklag. Resultatet af disse simuleringer er vist i fig. 40.

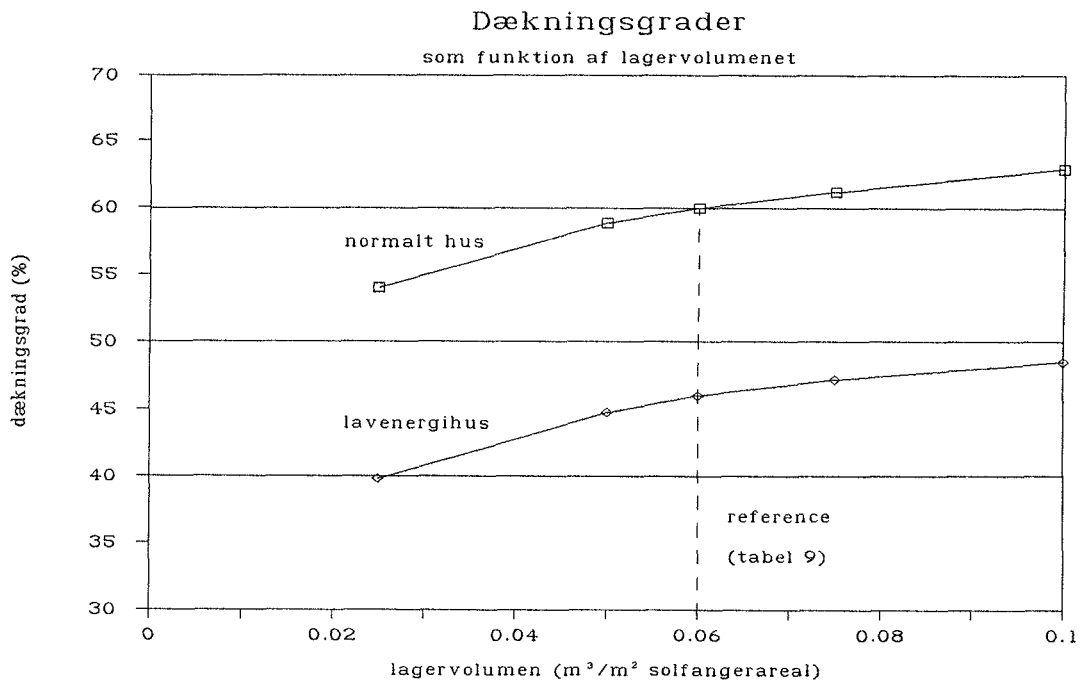


Fig. 40. Lagerstørrelsens indflydelse på dækningsgraden. Taghældningen: 30° og solfanger med ét dæklag.

Som det ses af fig. 40 er der ikke meget at vinde ved at øge lagerets størrelse, tværtimod tabes der kun lidt ved at gå ned i

lagerstørrelse. Lageret bør være omkring 0,05 m^3 pr. m^2 solfanger.

5.2.5. Andre besparelser

I huse med et solvarmesystem med en tagrumssolfanger er det muligt at slukke suppleringsvarmen i omkring halvdelen af året. Det betyder, at der spares en del energi, idet der da ikke er noget tomgangstab fra suppleringsvarmekilden. Hvis vi antager, at suppleringsvarmen leveres af et moderne olie- eller gasfyr med varmetab på 350 W og en fyringseffektivitet på 85%, beløber det sparede tomgangstab sig til omkring 1800 kWh, dvs. mellem 20 og 35% af udbyttet fra solvarmeanlægget - se tabel 9.

I modellen er det antaget, at halvdelen af den tilførte effekt til ventilatorerne kan nyttiggøres i solvarmeanlægget. Hvis der anvendes aksialventilatorer, hvor motoren er placeret inde i røret, vil hovedparten af den tilførte effekt kunne nyttiggøres, hvorved anlægget får en højere ydelse end her antaget. Hvis der modsat anvendes radialventilatorer med motoren siddende uden for røret, vil en mindre del af effekten kunne nyttiggøres.

Der spares også suppleringsvarme på anden måde. Det sydlige tagrum har en højere temperatur end et tilsvarende normalt tagrum. Det betyder, at varmetabet gennem den ene lofthalvdel mindskes. Det er beregnet, at for d. 8. marts (se fig. 30 - s. 42), hvor der kun var lidt solindstråling, blev husets totale varmetab mindsket med omkring 2%. På baggrund af simuleringen vurderes det, at det totale varmetab for hele opvarmningssæsonen mindskes med 2,5-3% afhængig af, om solfangeren har et eller to dæklag. En del af denne besparelse optræder selvfølgelig i perioder, hvor der intet varmebehov er. Desuden mindskes varmebehovet også i perioder, hvor solvarmeanlægget kan dække opvarmningsbehovet. Det reelle udbytte af besparelsen anslås derfor til at være omkring 1%.

I det foregående er den mulige besparelse i nettoopvarmningsbehovet beskrevet. I en vurdering af den totale energibesparelse et tagrumssolfangersystem vil give en bygning, indgår desuden overvejelser om energiforbruget til ventilatorerne. Energiforbruget til ventilatorerne bliver undersøgt i kapitel 6.3.

6. Praktiske erfaringer

Som det fremgår af de foregående kapitler er der tale om et eksperimenthus. Dvs. det er bygget for at opnå erfaringer med et solvarmesystem, der ellers ikke er erfaring med her i Danmark. Så selv om solvarmesystemet har kørt godt, er der selvfølgelig en del fejl og mangler ved anlægget. Nogle af disse fejl og mangler er allerede omtalt i de foregående kapitler. I dette kapitel vil anlæggets fejl og mangler blive diskuteret, og der gives bud på, hvordan de kan afhjælpes.

6.1. Tagrumssolfangeren

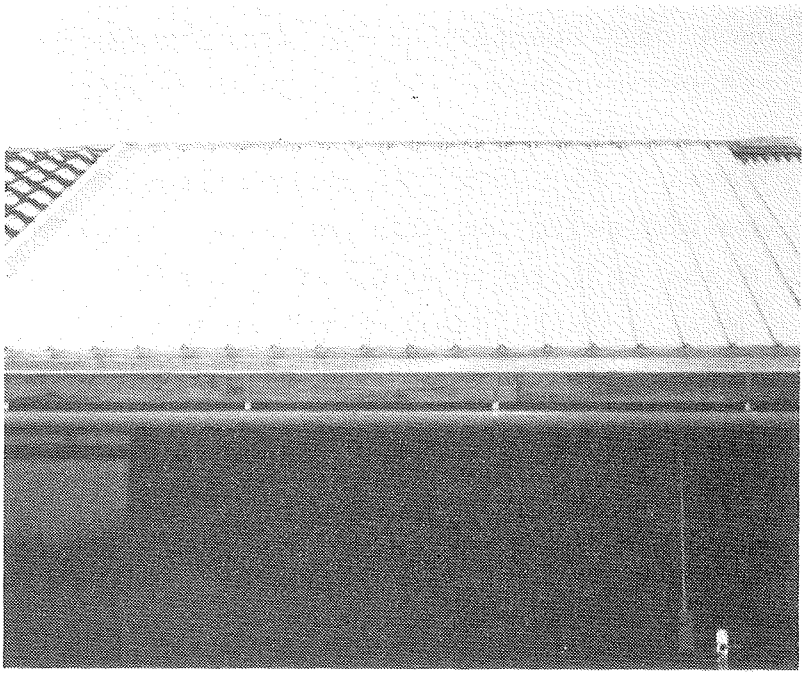
6.1.1. Regntæthed

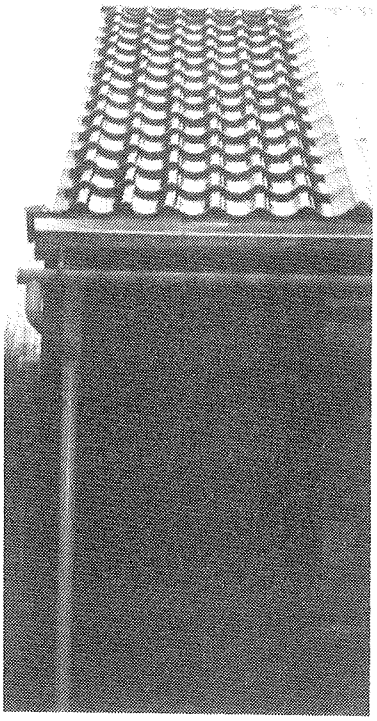
Solfangerens dæklag fungerer både som dæklag for solfangeren og som regnskærm for bygningen. Man skal derfor være helt sikker på, at dæklagets regntæthed ikke forringes. Ud over de to forskellige dæklag på tagrumssolfangeren er der monteret tre forskellige dæklag på tagets nordside, se fig. 41. Disse dæklag er grønne glasteglsten, trelags Fastlock plader af PVC og en tynd bølgeplade af acryl.

Der er ikke konstateret regnindtrængning ved nogen af de fem dæklag. Regnindtrængning sker ikke kun som følge af utætte samlinger, regnindtrænging kan også ske som følge af beskadigelse af dæklaget. Denne beskadigelse kan enten forårsages af slag eller som følge af de temperaturpåvirkninger dæklaget udsættes for i en tagrumssolfanger.

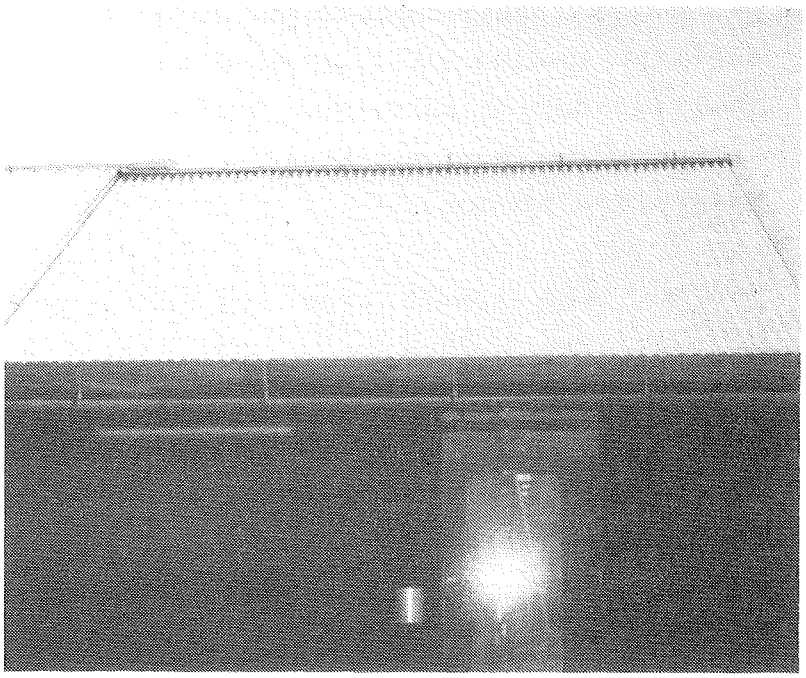
Med hensyn til slag må et glastag af almindeligt vinduesglas siges at være sårbart. Ligeledes er den tynde bølgeplade af acryl også sårbar, idet acryl er relativt hårdt og skørt. Plader af polycarbonat er derimod mindre sårbare, til gengæld gulner de i løbet af en kortere årrække (10 år). I handlen findes der ribbeplader af polycarbonat/acryl, der kombinerer det bedste fra disse to plasttyper - sejhed og stabilitet overfor UV-stråling.

Fastlock





Glastegl



Vedrilser

Fig. 41. Tre transparente dæklag på tagets nordside.

PVC kan ikke tåle høje temperaturer, det vil således blive plastisk inden for tagrumssolfangerens temperaturområde (se senere). Fastlock pladen er dog mindre følsom over for de høje temperaturer i tagrumssolfangeren, idet det er smalle plader, der kan fås som to- og trelags plader, og derved mere stabile. Disse plader er dog næsten mælkehvide og tillader derfor mindre lys at trænge igennem end f.eks. acrylpladerne.

Glasteglstenene kan tåle ret hårde slag og også høje temperaturer. Men de er vanskelige at tætne, fygesne kan trænge ind. Desuden er lysgennemtrængningen dårlig, hovedsagelig fordi de kræver mange lægter.

Den bedste dæklagstype må anses at være ribbepladen, idet de store pladearealer de findes i bevirker, at antallet af samlinger minimeres. Sårbarheden overfor slag er lille, idet der er to dæklag afstivet med tværgående ribber. Desuden er der erfaring med oplægning af disse plader som tagbelægning i byggeindustrien. I tabel 10 er angivet priser for dæklagene anvendt i eksperimenthuset, med undtagelse af glasteglstenene, hvor det ikke har været muligt at skaffe priser, da produktionen af disse er stoppet i Danmark. Glasteglsten vil desuden være væsentligt dyrere end priserne angivet i tabel 10.

Som det ses af tabellen er ribbepladen det bedste valg, idet bølgepladen af acryl sandsynligvis er for tynd til at kunne klare de påvirkninger, den vil blive udsat for i en tagrumssolfanger. Det burde dog være muligt at finde et egnet enkeltlags dæklag, der opfylder kravene til tagrumssolfanger, men som er billigere end den svenske løsning (tabel 10). I økonomiafsnittet (afsnit 9) antages det, at et sådant dæklag vil koste 150 kr. pr. m^2, excl. moms.

Placering	Dæklag	Pris excl. moms
Sydside	Vakuumformede acrylplader fra Scandinavian Solar (svensk firma) d=3,3 mm	380,00 1)
	Acrylribbeplade fra Rias d=1,5 mm, D=16 mm	284,75 2)
Nordside	Bølget acrylplade (Vedrilser) fra Moutedison d=1,2 mm	48,00
	PVC Fastlock-plader fra Villadsens fabrikker:	
	2 dæklag	400,00
	3 dæklag, d=1,8, 0,3 og 1,8 mm, D=50 mm	720,00

Tabel 10. Priser (1988, excl. moms) på de ovennævnte dæklagstyper på eksperimenthuset. Priserne er uden eventuelle tværgående understøtningslægter.
1) '86 pris, kræver ikke understøtningslægter,
2) prisen er incl. inddækning foroven og forneden.
d=godstykkelsen, D=samlet pladetykkelse.

6.1.2. Lufttæthed

Selv om dæklaget er regntæt, medfører det ikke nødvendigvis lufttæthed. Utætheder for luft kan væsentligt reducere effektiviteten for luftsolfangere, idet opvarmet luft forsvinder ud af solfangeren og/eller kold luft trænger ind. Det blev forsøgt at måle luftutætheden af dæklagene i tagrumssolfangeren, men det var umuligt, idet utæthederne var så store, at der ikke kunne etableres noget overtryk på indersiden af dæklaget. Specielt er dæklaget bestående af et enkelt lag meget utæt. Som det ses af fig. 3 og 4 (s. 13 og 14) består dette dæklag af kvadratiske (0,9 x 0,9 m^2) vacuumformede acrylplader. Disse plader er lagt

ind over hinanden, hvor en vulst sikrer regntætheden i sammenføjningen, men der er en luftspalte på 5-10 mm. Denne dæklagstype er specielt udviklet til tagintegrerede solfangere med væskefyldte absorbere - dæklaget er beskrevet i ref. (20).

Der er ikke gjort noget specielt for at lave dæklaget på eksperimenthuset lufttæt. Men alligevel kan det siges, at det vil være lettest at tætne dæklaget bestående af ribbeplader, fordi der her er færre samlinger end ved dæklaget med enkeltlagsplader.

Den store luftutæthed har ikke kun reduceret solfangerens effektivitet. Der lå allerede efter kort drifttid en del døde insekter på den sorte fiberdug samt en del støv. Dette vil med tiden nedsætte ydelsen fra solfangeren, hvis ikke fiberdugen rengøres, hvilket kan blive en bekostelig affære. Det kan desuden frygtes, at insekterne kan være medvirkende til at ødelægge solfangeren.

6.1.3. Fiberdugen

Den sorte fiberdug, der er monteret i tagrumssolfangeren er sort Fibertex PORA 73 (ref. 21), der er filt af syntetiske fibre. Materialet i fibrene er UV-stabiliseret polypropylen og viscose. Dugen har en tykkelse på 1,2 mm, forsiden (mod solen) er mat med en opkradset karakter.

Dugen anvendes normalt som solafskærmning i drivhuse. Den er i virkeligheden ikke egnet til brug i tagrumssolfangeren, idet fabrikanten (ref. (21)) angiver en holdbarhed på min. 5000 solskinstimer bag glas. Det normale antal solskinstimer i Danmark er ca. 1500, dvs det kan ikke forventes, at dugen holder mere end 4 år. Selv om dugen er billig (12 kr/m^2, '87-priser) vil det være økonomisk uforsvarligt at anvende den, da den skal udskiftes relativt tit. Montagen af dugen er dyr, specielt i en allerede eksisterende solfanger. I ref. (13) er dugens bestandighed over for varme afprøvet. Dugen undergik strukturforandringer allerede ved 125 ^{o}C. Denne tempeatur er som beskrevet i

afsnit 6.1.6. ikke usandsynlig i en tagrumssolfanger. Inspektion af dugen i forsommeren 1988 (mindre end 2 år efter opsætningen) viste desuden, at dugen i det vestlige tagrum med 2 dæklag var blevet så mør, at den flere steder hang i laser. Dugen i det østlige tagrum viste derimod ingen tegn på degenerering, men i sommeren 1989 er nedbrydningen af denne dug så langt fremskreden, at den går i stykker, hvis der trækkes lidt i den. Dugen kan således ikke anbefales.

Ref. (13) anbefaler en filt lavet af spinfarvet viscose (regenereret cellulose iblandet sort farvestof) i en tæt filtstruktur. Filten viste ingen strukturændring ved opvarmning til 175 °C, en halv times ophold ved 150 °C og 3 timers ophold ved 125 °C. Prøven blev derfor udsat for 200 °C i en halv time, men viste stadig ingen tegn på strukturændringer. Filten har en varmeoverføringsevne og et trykfald svarende til typen anvendt i tagrumssolfangeren.

Det vurderes desuden, at filtens UV-stabilitet er acceptabel. Filten forhandles af Filtas Filtvarefabrik A/S til 22 kr/m^2 ('86-priser, ref. (13)) i ruller af 1 m's bredde. Filten er vanskeligere at montere end dugen i tagrumssolfangeren, der leveres i ruller med bredder op til 4,8 m. En anden filttype, der måske er anvendelig, består af carbon fibre. Denne filttype er rapporteret anvendt i en billig japansk luftsolfanger (ref. (22)).

Anvendelse af fiberdug i tagrumssolfangere er, ud over holdbarheden, afhængig af, at der udvikles et let og billigt monteringssystem, idet tagrumssolfangeren ellers vil blive for dyr.

6.1.4. Tryktab

Som nævnt i afsnit 4.3.2. (s. 35) er tryktabet over tagrumssolfangeren stort, idet der er anvendt fleksible kanaler op til dugen. Ref. (10) angiver, at tryktabet over en fleksibel kanal, der er komprimeret 10% i længderetningen (det er ikke ret

meget), er 3,65 gange så stort som tryktabet over en glat, galvaniseret metalkanal. De fleksible kanaler blev valgt for at lette installationen. De bør dog undgås for at holde den nødvendige ventilatoreffekt nede. Tryktabet over fiberdugen ligger mellem 7 og 16 Pa. Tryktabet over absorberen er nødvendigt for at opretholde en ensartet luftstrøm gennem hele dugenn. Dette er specielt nødvendigt, hvor indblæsning og udsugning sker i ét punkt, mens luften skal passere gennem dugen over hele dennes areal, for at give en god og effektiv solfanger. Det er svært at måle luftfordelingen gennem dugen. Som det ses af fig. 42, er der i solfangeren med ét dæklag anbragt to ekstra temperatur-målepunkter på dugen (nr. 29 og 30, målepunkt nr. 19 anvendes til styring af solfangeren). Temperaturmålingerne er et gennemsnit mellem temperaturen af dugen og den luft, der strømmer hen over målepunktet. Det er derfor svært at bedømme om de tre punkter har ens temperaturer, idet luftstrømmen over 19 er koldere end over 29 og 30. Alligevel vurderes det ud fra målingerne, at temperaturforskellene ikke er større, end at luftfordelingen gennem dugen er acceptabelt ensartet. Tryktabet gennem dugen er således tilstrækkeligt stor.

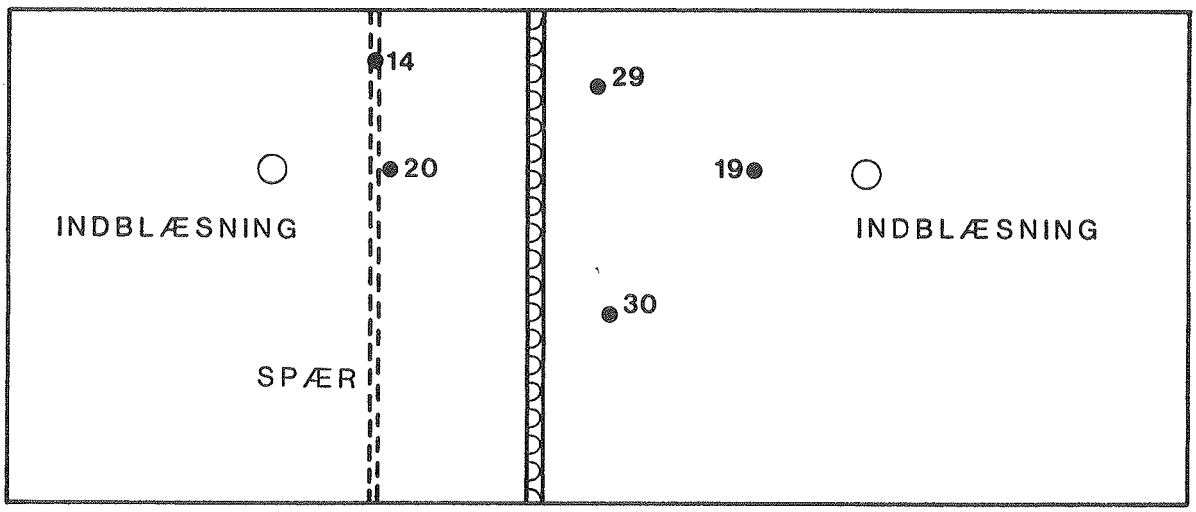


Fig. 42. Målepunkter på dugen i tagrumssolfangeren.

På den anden side må tryktabet over absorberen ikke blive for stort. For selv om et stort tryktab sikrer en jævn flowfordeling over dugen i den ideelle solfanger, vil det højst sandsynligt føre til dårligere effektivitet i en virkelig solfanger. Det skyldes, at eventuelle utætheder i solfangeren får større betydning på grund af højere trykdifferenser mellem solfanger og omgivelser, og at eventuelle huller og rifter i dugen vil betyde, at større luftmængder slipper igennem her uden at blive opvarmet.

6.1.5. Varmekapacitet

Som beskrevet i afsnit 4.3.1. har tagrumssolfangeren en stor varmekapacitet, idet vægge og loft er beklædt med spånplader. Varmekapaciteten pr. m^2 solfangerareal er ca. dobbelt så stor som for en væskesolfanger, hvor der indgår metal og væske. Den store varmekapacitet bevirker, at solfangeren er træg. Den starter sent, men da luftstrømmen gennem solfangeren styres af en sensor på dugen, stopper den ikke væsentligt senere, end hvis varmekapaciteten var lille. På den måde går en ikke uvæsentlig energimængde tabt. Det er beregnet, at hvis varmekapaciteten nedsættes fra 17 til 2 $kJ/m^2{}^oC$ (varmekapaciteten af dug og dæklag alene) vil dækningsgraden for systemet stige med op til 2 procentpoint.

Det er let at nedsætte tagrumssolfangerens varmekapacitet betydeligt, blot ved at fjerne spånpladerne og i stedet have isolering ud mod tagrumssolfangeren. Dog vil det være hensigtsmæssigt at en del af gulvet i solfangeren er bæredygtigt over for en person, således at solfangeren kan inspiceres. Ved at have en relativ stor varmekapacitet i gulvet, opnår man desuden, at varmetabet gennem den lufthalvdel, der vender mod tagrumssolfangeren, minimeres efter en dag med solskin, idet temperaturen i loftets øverste lag (= gulvet i solfangeren) længere har en overtemperatur. Men modsat om morgenen på en overskyet dag, hvor der ingen luftstrøm er igennem solfangeren, da vil gulvet i solfangeren kun langsomt stige i temperatur.

Det er nødvendigt med en afdækning af al isoleringen for at minimere støvgenerne. Denne afdækning kan dog foretages med et materiale uden nævneværdig varmekapacitet - f.eks. Alukraft.

6.1.6. Maksimumtemperatur

Som allerede nævnt er der installeret en ventilator i hver gavl. Formålet med disse ventilatorer er at sikre, at temperaturen i tagrumssolfangeren ikke bliver for høj. Ventilatorerne er termostatstyrede, således at de går igang ved en temperatur på 85-90 °C og igen stopper ved 75-80 °C. Ventilatorerne er ikke store nok til at bringe temperaturen ned på 75-80 °C, hvis solindstrålingen, udelufttemperaturen og indblæsningstemperaturen er høj. Dog har de sikret, at lufttemperaturen i tagrummet (som halv times middelværdier) aldrig er kommet over 91 °C.

Behovet for at holde temperaturen i tagrummet nede opstår, fordi der indgår træ i solfangerkonstruktionen. Der er derfor foretaget temperaturmålinger inde midt i et spær i solfangeren med to dæklag (målepunkt 14, fig. 42, s. 69). Spærene er sortmalede på siderne og opnår derfor en overtemperatur i forhold til luften i solfangeren. Den maksimale temperatur målt i spæret var ca. 97°C (lufttemperaturen i solfangeren var 82°C), målt på en dag med en solindstråling på 900 W/m^2 og en udelufttemperatur på 19°C. Dette er ikke den mest kritiske situation, idet solindstråling på 1000 W/m^2 og udendørstemperaturer på 30°C kan opnås, dog ikke nødvendigvis samtidigt.

Som det beskrives i et senere afsnit, vil rumopvarmningssystemet være slukket om sommeren. Dvs. der er kun sikkerhedsventilatorerne til at holde temperaturen nede. Men disse kan også svigte - f.eks. ved strømsvigt. Tagrumssolfangeren vil da gå i stagnation, dvs. opnå en temperatur, hvor den er i balance med omgivelserne. I sensommeren 1986 (efter dugen var monteret) er der målt stagnationstemperaturer i tagrumssolfangeren på 105°C.

Som en del af den normale test, plane, væskefyldte solfangere udsættes for på Laboratoriet for Varmeisolering, indgår stagnationsprøvning af solfangerne. Solfangerne (uden væske) udsættes for en indstråling på 900 W/m^2 ved en lufttemperatur på omkring 25°C. Fra test af solfangere med en sort overflade på absorberen og en ribbeplade som dæklag er fundet stagnationstemperaturer for absorberen på 136°C. Sådanne solfangere er under denne test principielt lig med tagrumssolfangeren med ribbepladen (hvor de højeste temperaturer vil forekomme). Tagrumssolfangeren vil dog være lidt mindre effektiv end solfangeren. Dette betyder, at stagnationstemperaturen for absorberen i en tagrumssolfanger vil ligge under 150°C, selv om den udsættes for en højere indstråling ved en højere lufttemperatur. Ifølge ref. (23) vil lufttemperaturen i en tagrumssolfanger i stagnation ligge 15-20°C under absorberens temperatur. Temperaturen i træet vil afhænge af beskaffenheden af træets overflade. I ref. (23) er der foretaget forsøg for at undersøge, hvordan temperaturen i træet afhænger af udseendet af træets overflade. I tabel 11 er resultatet fra disse forsøg angivet. Tabellen viser, hvor meget temperaturen inde i træet (2,5 cm inde) falder, når overfladen af træet ændres fra at være sortmalet.

Som det ses, falder temperaturen (2,5 cm inde i træet) ikke væsentligt ved at undlade at male træet i en tagrumssolfanger sort. Men det forventes dog, at denne temperaturforskel vil være større i overfladen af træet, da træ har en relativt ringe varmeledningsevne. Det vil dog være muligt, ved at undlade at male træet sort, at mindske den temperatur træet udsættes for til mellem 5-15°C under absorberens stagnationstemperatur, afhængig af hvor tæt træet er på absorberen.

For træ findes der to kritiske temperaturområder (ref. (24)): 280-300°C, hvor gasudviklingen fra træet er blevet så stor, at antændelse kan ske som følge af en gnist, og 450-500°C, hvor selvantændelse kan ske. En temperatur på 150°C er derfor ikke umiddelbart kritisk (ref. (24)). Men hvad siger myndighederne? Der findes ingen regler for netop denne situation, men i Bygningsreglementet (ref. (25)) er der regler for varmeinstallationer, der er i kontakt med træ:

Overflade	Fald i temperatur i forhold til en sortmalet overflade °C
Sølvpapir (for oven og på siderne)	11
Sølvpapir (på siderne)	9
Natur	8
Reflekterende maling	7

Tabel 11. Temperaturforholdet 2,5 cm inde i træet, når overfladen ændres fra at være sortmalet.

"Stk. 8. Rørledninger og andre installationsdele skal opstilles således, at overfladetemperaturen på brændbart materiale ikke kan overstige 80°C. Når dette ikke godtgøres, skal rørledninger og andre installationsdele med en temperatur mellem 100°C og 120°C holdes mindst 30 mm fra træværk eller andet brændbart materiale. Med en temperatur mellem 120°C og 150°C skal afstanden være mindst 50 mm." ref. (25) s. 156.

Det tolkes, at disse regler gælder for et konstant temperaturniveau. I en tagrumssolfanger vil stagnationstemperaturen kun være høj (>80°C) i en kortere periode (nogle få timer), herefter vil solfangeren køle af og om natten nå en temperatur nær udeluftens.

Også andet indikerer, at korttidsopvarmning til 150°C er acceptabel. Den brandtest, bygningselementer udsættes for, den såkaldte ovnkammer prøve (ref. (26) og (27)), angiver, at mid-

deltemperaturen (af 5 målepunkter) af den vægside der vender væk fra varmepåvirkningen, ikke må overstige +140°C (+ står for overtemperatur, dvs. at temperaturen reelt må være omkring 160°C), og at ingen enkelttemperatur må overstige +180°C (200°C).

Tre år efter opførelsen er der ingen synlige tegn på nedbrydning af træet som følge af varmepåvirkningen. Tagrumssolfangeren har ellers været i stagnation i sommeren 1989, en sommer med meget sol og høje udelufttemperaturer i juni-juli, for at konstatere eventuel nedbrydning.

Selv om temperaturer på op til 150°C ikke udgør en brandrisiko, er spørgsmålet, om træets styrkeegenskaber ikke bliver forringet ved denne varmepåvirkning? Ifølge ref. (28) vil den varmepåvirkning, som spærene i en tagrumssolfanger bliver udsat for, ikke betyde en betænkelig mindskelse af spærenes styrkeegenskaber. Der er heller ikke grund til at frygte den langtidspåvirkning træet bliver udsat for. Tagkonstruktionen må dog ikke bliver dimensioneret for snært, og at kvalitetskravene for træet angivet i Bygningsreglementet (ref. (25)) skal overholdes.

Selv om materialerne ikke tager skade af temperaturniveauet og stagnationstemperaturerne i tagrumssolfangeren, er det alligevel klogt at holde temperaturerne på en rimeligt niveau. Bl.a. fordi det i sommerperioden ikke er rart at have et loft, der er 100-150°C varmt, når der i forvejen kan være overophedningsproblemer i huset. Reguleringen af temperaturniveauet kan ske ved hjælp af termostatstyrede ventilatorer, spjæld der enten reguleres manuelt eller ved hjælp af samme mekanisme som anvendes til åbning af vinduer i drivhuse, solafskærmning ved hjælp af lyse "gardiner", m.m. Den simpleste form for udluftning er spjæld i top og bund af solfangeren, der åbnes manuelt i sommerperioden, hvor rumopvarmningssystemet er slukket. Lige meget hvilken form for udluftning, der vælges, skal det sikres, at solfangeren ikke blot er luft- og regntæt, når udluftning ikke ønskes, men også regntæt når udluftning ønskes. Ligeledes skal

det ved hjælp af f.eks. insektnet sikres, at insekter ikke kan slippe ind via udluftningsledningerne.

6.1.7. Luft/vand-varmeveksler kontra absorber

I kapitel 5 under simuleringer blev det nævnt, at en absorber på 5 m^2 har omtrent samme ydelse som luft/vand-varmeveksleren i eksperimenthuset. Men luftstrømmen gennem luft/vand-varmeveksleren bevirker, at dækningsgraden for rumopvarmningssystemet stiger (se tabel 6, s. 55). I dette afsnit diskuteres det, hvilken af de to løsninger til opsamling af varme til brugsvandssystemet, der er mest rentabel.

Luft/vand-varmevekslerne i eksperimenthuset koster ifølge fabrikanten 4990,- excl. moms = 6087,80 kr. incl. moms (primo 1988).

Absorberen kan udformes på flere måder afhængig af spærafstand og højde af taget. Dette har indflydelse på f.eks. antallet af samlinger i absorberen, og dermed også indflydelse på prisen. Her er medtaget 2 eksempler: 1) 1 stk. 5 x 1 m^2 og 2) 2 stk. 2,5 x 1 m^2. Den danske forhandler af Sunstrip, Batec, oplyser, at prisen for disse absorbere vil være:

1) 420-450 kr./m^2 excl. moms
2) 500-550 kr./m^2 excl. moms

dvs for 5 m^2 incl. moms:

1) 3050-3355 kr.
2) 2562-2745 kr.

Dvs. forskellen mellem luft/vand-varmeveksleren og absorberen bliver 2730-3525 kr. Hvis vi anvender nuværdifaktoren fra næste kapitel betyder det, at den årlige merbesparelse for luft/vand-varmeveksleren over 20 år skal være:

155-200 kr.

Ventilatoren i eksperimenthuset brugte 45 W. Cirkulationspumpen i de to systemer er ens og der ses derfor bort fra den her. Med en årlig driftstid for ventilationen (og pumperne) på 2000 timer (afhængig af lagerudformning og styresystem), betyder det en ekstra udgift for luft/vand-varmeveksleren på 90 kWh. Ifølge ref. (29) var prisen for elektricitet i januar 1988 (i NESA-området) 74,4 øre/kWh. Ekstraudgiften for elektricitet til luft/vand-varmevekslerens ventilator er derfor 70 kr. Dvs. luft/vand-varmeveksleren skal øge solvarmesystemets besparelse (i forhold til et system med en absorber) med:

225-270 kr.

Hvis suppleringsvarmekilden er et moderne oliefyr med en effektivitet på 85% og olieprisen er 0,39 kr/kWh (ref. (29)) skal anlæggets merydelse være:

490-590 kWh

Anlægget med luft/vand-varmeveksleren skal således have en årlig merydelse på mindst 500 kWh, dette svarer til en årlig merydelse for hele anlægget på mellem 5,6 og 9,4 % afhængig af solfanger, hældning af tag, hustype, m.m.

De 5,6-9,4% merydelse ligger nok i yderkanten af hvad et større flow gennem dugen kan frembringe. Men alligevel bør det vurderes i de enkelte tilfælde, hvilken anlægstype der er bedst egnet. Andre forhold end energibesparelsen kan tale for at vælge den ene type frem for den anden.

6.1.8. Sne på solfangeren

Det store solfangerareal i en tagrumssolfanger bevirker, at solvarmeanlægget har en relativ høj dækningsgrad om vinteren, mellem 13 og 42% afhængig af antal dæklag, hældning og hustype. Det kan dog frygtes, at denne dækningsgrad vil forringes betydeligt i perioder med vekslende sol og sne. Et snelag på taget

kan da forhindre, at solindstrålingen kan udnyttes. Dette har dog vist sig ikke at være noget problem. Følgende billeder er taget den 5. marts 1987, hvor det havde sneet om natten. Der lå således et 1-2 cm tykt lag sne på taget. Men som fig. 43 viser, var sneen på dæklaget af ribbeplade, allerede mens det sneede, begyndt at skride ned på grund af dæklagets glatte overflade. På grund af at det enkelte dæklag er vakuumformet, har sneen sværere ved at glide af her, men der er dog en begyndende nedskridning igang, der har dannet en revne ved pilen.

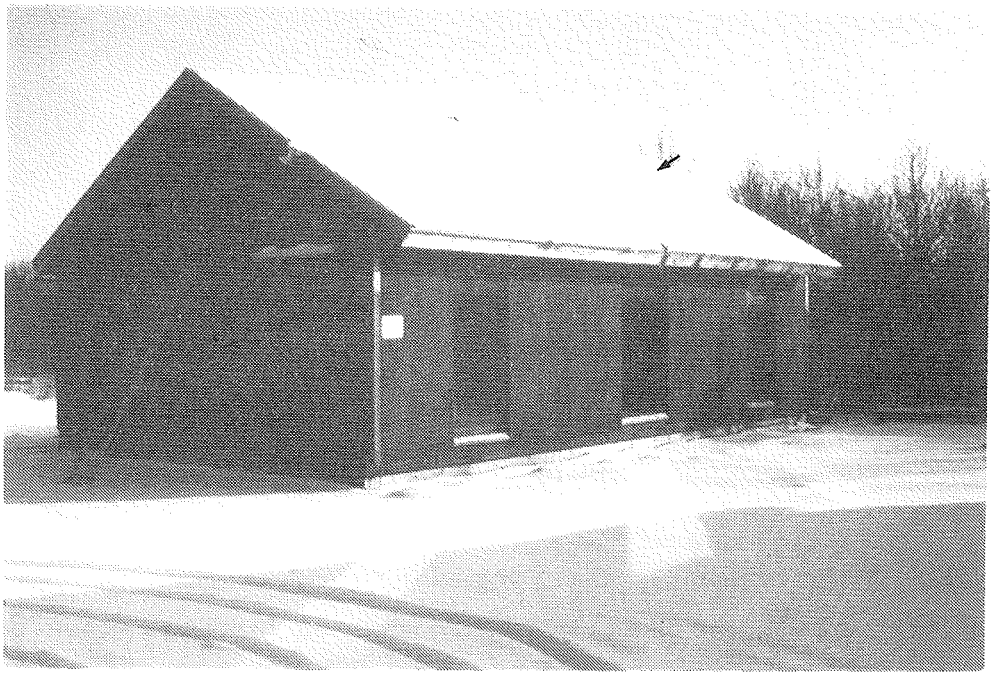


Fig. 43. Kl. 10.00, tagrumssolfangeren med et 1-2 cm tykt snelag. Der er begyndende revnedannelse ved pilen.

Fig. 44 er taget kl. 10.17, hvor sneen på det enkelte dæklag er begyndt at skride. Den første revnedannelse ved ribbepladen sker kl. 10.22. Udelufttemperaturen er -9 til -8 °C og solindstrålingen er mellem 350 og 550 W/m^2, - der er lidt skyer på himmelen.

Fig. 44. Kl. 10.17, sneen begynder at skride på solfangeren med ét dæklag.

I tabel 12 er vist temperaturen i luftrummet mellem dug og dæklag målt på dugen i solfangeren med ét dæklag.

En sammenligning mellem tabel 11 og fig. 45, der er taget kl. 10.30, altså efter at ventilationen var gået igang, viser, at der ikke skal være meget af dæklaget fri, før solfangeren bliver opvarmet. Når først ventilatoren er igang, går det stærkt, idet dæklaget bliver varmet op, også hvor der stadig er sne. Fig. 46 er taget kl. 10.40, og fig. 47 kl. 11.10.

Tid	Temperatur ved dugen	Kommentarer
8.30	-3,0	
9.00	-0,5	
9.30	2,8	
10.00	9,0	revnedannelse i sneen på solf. med ét dæklag
10.19	10,1	
10.23	18,9	revnedannelse i sneen på solf. med to dæklag
10.25	21,0	
10.25	25,2	ventilatoren starter for at føre varme til lager
10.35	29,5	

Tabel 12. Temperaturen i tagrumssolfangeren med ét dæklag d. 5. marts 1987.

Som det ses af billederne forsvandt sneen i løbet af ca. 1 time. Når sneen så hurtigt forsvinder fra et tag med 30° hældning, vil det ske endnu hurtigere fra et tag med en hældning på 45°. Det kan tænkes, at sneen slet ikke vil lægge sig her, men skride af med det samme på grund af dæklagets glatte overflade.

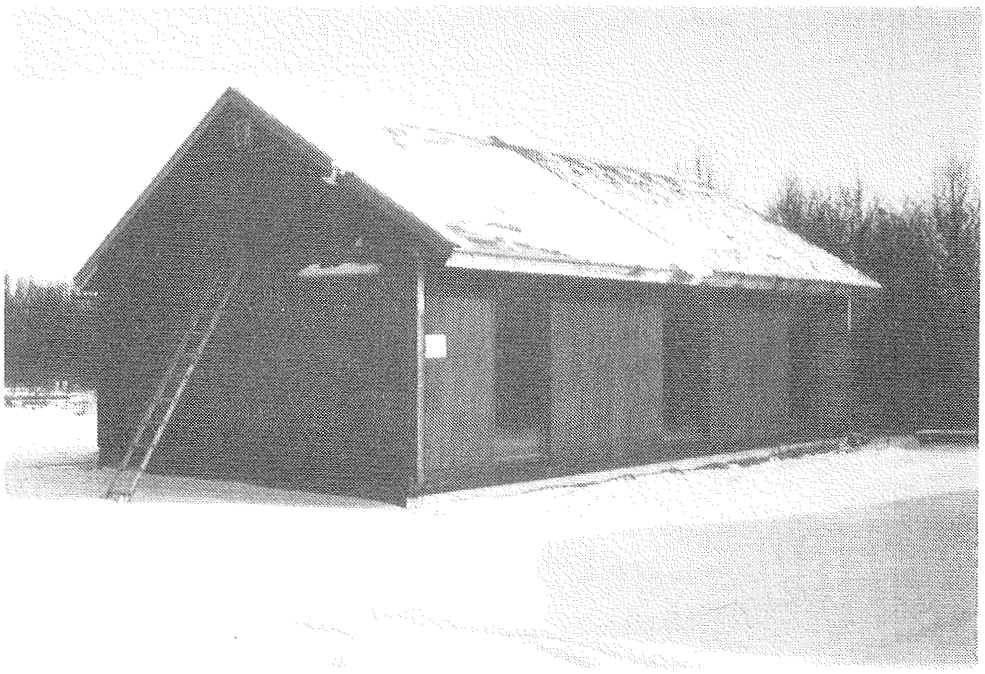


Fig. 45. Kl. 10.30, fem minutter efter at ventilatoren er gået igang. Sneen begynder også at skride på solfangeren med to dæklag.

Fig. 46. Kl. 10.40. Sneen begynder at skride hurtigt.

Fig. 47. Kl. 11.10, næsten al sneen er væk.

6.2. Stenmagasin og kanaler

6.2.1. Varmetab

Som det allerede er nævnt flere gange, har der været et stort varmetab fra varmeanlægget, på grund af uheldige installationer: Kanaler på et uisoleret loft og et manglende spjæld, hvorved selvcirkulation af varm luft fra lager til kolde kanaler på loftet forekom. Som det ses af fig. 28 (s. 39) falder temperaturen af lageret til under 19 °C. Det skyldes, at returluften fra rummet først skal op over loftet gennem "kolde" kanaler, før den når stenmagasinet.

Samtlige kanaler i varmeanlægget bør installeres inden for husets isolering. På den måde mindskes varmetabet, og det varmetab der sker, kommer huset til gode. Det er selvfølgelig nødvendigt at føre to kanaler op til tagrumssolfangeren. Det vil være klogt at installere spjæld i disse to kanaler lige under husets isolering. Disse spjæld skal kunne lukke helt tæt

for at hindre selvcirkulation, og dermed forhindre et betydeligt varmetab.

Alle spjæld i anlægget skal kunne lukke tæt til, således at uønskede varmestrømme og varmetab undgås.

6.2.2. Forurening

I nærværende anlæg opvarmes rumluften direkte i stenmagasinet dvs. der er ingen varmeveksler indskudt mellem luften i huset og luften i lageret. Dette kunne give anledning til forurening af forskellig karakter.

6.2.2.1. Radon

Radon er et produkt af radioaktive partikler, der optræder naturligt i mange bjerg- og jordarter. Radon i for store koncentrationer er skadeligt for helbredet. Det kunne frygtes, at anvendelse af et stenmagasin i direkte kontakt med rumluften vil hæve koncentrationen af radon i luften. Allerede under projekteringen var vi klar over dette problem, hvorfor vi valgte at anvende vaskede søsten (søsingels), hvor radonproblemerne skulle være små.

Men for at være helt sikre lod vi Laboratoriet for Teknisk Fysik I, Danmarks Tekniske Højskole, udtage prøver af luften i stenmagasinet, efter at anlægget havde været stoppet i ca. en uge, for at hæve koncentrationen af radon i lageret, - dvs. området med den højest mulige koncentration. Koncentrationen i huset vil være lavere, da der her sker luftskifte.

To prøver blev taget over stenene, mens en anden prøve blev taget helt tæt på stenene. De to første prøver viste en stråling på 30 og 38 bekarel, mens den sidste viste 56 bekarel. En undersøgelse foretaget af Statens Institut for Strålehygiejne (ref. (30)) viser, at den gennemsnitlige naturlige stråling i

danske boliger er 59 bekarel. Dvs. stenmagasinet har ikke forøget strålingsniveauet i huset. Man skal dog stadig være påpasselig, for visse bjergarter kan indeholde store koncentrationer af radioaktivt materiale, men umiddelbart indebærer søsingels ikke denne risiko.

6.2.2.2. Stenstøv

Hvis der anvendes sten, der er fremkommet ved knusning af f.eks. granit, vil der være problemer med støv fra disse sten. Støvet kan indeholde asbest, radioaktive partikler m.m. Ved at bruge vaskede søsten mindskes dette problem betydeligt, idet alt løst materiale forlængst er slebet af stenene. Dog bør stenene spules før indlæggelse i stenmagasinet for at fjerne alle partikler, der har forurenet stenene. Efter spulningen skal stenene tørre helt for at undgå mug- og bakterievækst (se næste afsnit). Den smule støv, der er tilbage, vil desuden blive fjernet i de filtre, der normalt er installeret i luftvarmeanlæg - se senere.

6.2.2.3. Mug og bakterier

Fra USA rapporteres (ref. (9)) der om enkelte tilfælde af mug og/eller bakterier i stenmagasiner. Mug og bakterier opstår, fordi der er fugt i lageret. Denne fugt opstår, når varm, fugtig luft kommer i kontakt med kolde sten, hvor luftens vanddamp kondenserer på stenene. I USA er dette problem opstået i drivhuse, hvor stenlageret er afkølet kraftigt om natten, hvorefter det opvarmes med varm og meget fugtig luft. Problemet er også rapporteret, hvor anlægget bruges til køling af et hus. Lageret køles med udeluft om natten, for at kunne køle luften i huset om dagen. Der bør derfor udvises forsigtighed ved projektering af anlæg med stenlagre til køleformål.

Fra USA (ref. (9)) er der også rapporteret om anlæg, der havde en dårlig lugt de første få uger efter ibrugtagningen, hvorefter det forsvandt helt. Det formodes, at lugten skyldtes, at stene-

ne var våde, da de blev lagt ned. Stenene bør derfor være tørre, når de bliver anbragt i magasinet.

6.2.2.4. Andre undersøgelser

Målinger i et lavenergihus med luftvarme og stenmagasin (med granit) i Hjortekær (Energiministeriets lavenergiprojekt, hus E) har ligeledes vist, at der ikke er problemer med radon, stenstøv, mug eller bakterier ved brug af stenmagasiner.

6.3. Hele systemet

6.3.1. Energi til ventilatorer

Det er nødvendigt at have et vist tryktab over solfanger og stenlager for at sikre en jævnt fordelt luftstrømning gennem disse. Men jo højere tryktabet er, jo mere energi bruger ventilatorerne til at transportere luften rundt. Det koster mere energi at transportere varme med luft end med vand. Men de 15% af den udnyttelige energi fra solfangerne, der er anvendt i eksperimenthusets ventilatorer, vurderes at være for højt. I tabel 13 er angivet beregnede og målte tryktab for forskellige dele af systemet. I den første søjle er angivet de dimensionerende tryktab ved en luftstrøm på 2000 m^3/h. I den anden søjle er de faktiske tryktab ekstrapoleret til 2000 m^3/h fra de målte tryktab for solfanger og lager. Det dimensionerende tryktab over solfangeren er sat til tryktabet over absorberen alene. Tryktabet over rørene er ens = det dimensionerende, da dette tryktab ikke er målt. Tryktabet over måleblænden ved lageret er 25 Pa ved en volumenstrøm på 2000 m^3/h, hvilket ikke er medregnet i tryktabet over rørene. Denne måleblænde er ikke nødvendig i et rigtigt anlæg, anlæggets tryktab kan derfor reduceres med 10%.

Tryktab	Dimensionerende Pa	Faktiske Pa
Solfanger	20	45
Rør	45	45
Lager	110	200
I alt	175	290

Tabel 13. Faktiske og beregnede tryktab i systemet.

Tryktabet over systemet er altså 66% højere end beregnet. Dette skyldes for solfangeren den fleksible rørstrækning og for lageret sandsynligvis manifolden i bunden. Hvis tryktabet havde været lig det beregnede ville den nødvendige energi til ventilatorerne have været omkring en trediedel lavere (ref. (31)), altså 10% af den udnyttelige energi fra solfangeren.

Ifølge professor George Löf, Colorado State University, udgør det nødvendige elektricitetsforbrug kun 5% af den udnyttelige energi fra et veldimensioneret luftbaseret solvarmeanlæg i Colorado. Nu er det ikke muligt at overføre dette tal direkte til danske forhold med et andet klima og forbrugsmønster. Men det siger alligevel lidt om, at det bør være muligt at nedbringe det nødvendige energiforbrug til ventilatorerne.

I eksperimenthuset kørte den store ventilator med tre forskellige luftflow. For de to lave luftflow bliver ventilatoren droslet ned. Det koster mere energi at drosle en stor ventilator ned, end at anvende en ventilator af den rigtige størrelse. Ved kun at køre med én volumenstrøm gennem solfangeren mindskes solfangerens effektivitet en smule, men spørgsmålet er om dette

ikke opvejes af mindre energi til ventilatoren, der jo bruger den dyreste form for energi - elektricitet.

Som det fremgår senere er det nødvendigt med filtre, hvilket der ikke var i eksperimenthuset. Dette vil selvfølgelig øge tryktabet noget, og dermed også energiforbruget til ventilatorerne. Men det vurderes alligevel at dette energiforbrug kan holdes på omkring 10% af den udnyttelige energi fra solvarmeanlægget.

Umiddelbart kan det virke mærkeligt, at ventilatoren i luft/vand-varmeveksleren kun anvender 45 W til at transportere 1200 m^3/h, når den store ventilator skal have tilført 460 W for at transportere 1400 m^3/h. Det skyldes, at ventilatoren i luft/vand-varmeveksleren kun skal overvinde tryktabet i absorberens egen varmeveksler. Dette trykfald vurderes at være mindre end en tiendedel af tryktabet i rumopvarmningssystemet.

I eksperimenthuset transporteres varmen fra lageret aktivt til huset ved hjælp af ventilatorer. Den nødvendige driftstid af ventilatoren og dermed elektricitetsforbruget kan mindskes ved at dimensionere lageret til også at afgive varme passivt. Isoleringen mellem lageret og et varmekrævende rum (f.eks. badeværelset) kan mindskes således, at rummet opvarmes ved hjælp af lagerets varmetab uden brug af mekanisk varmetransport (ref. (40)).

6.3.2. Støj

Støjen fra rumopvarmningsanlægget i eksperimenthuset har været minimal. Ventilatorerne har kun kunnet høres svagt. Det meste støj kom fra indblæsningen til rummene. Denne støj var noget højere end acceptabelt, men kan let undgås ved det rette valg af indblæsningsaggregat og volumenstrøm. Der findes stor erfaring med dæmpning af støj i luftvarmeanlæg, så dette burde ikke udgøre et problem.

6.3.3. Afgasning

Eksperimenthuset, lageret og tagrumssolfangeren er alle lavet af spånplader, der som bekendt afgiver visse gasser. Denne udgasning bliver ikke mindre af, at f.eks. solfangeren når op på temperaturer omkring 100 °C. Lugten fra disse udgasningsprodukter har derfor til tider været meget kraftig i eksperimenthuset. Men i et rigtigt hus, hvor anvendelsen af spånplader er mere begrænset, og hvor det undgås at spånplader eller andre materialer, der udsender gasser, kommer i berøring med den varme luft, vil dette problem være lille.

6.3.4. Støv

Der er ingen varmeveksler mellem luften i tagrum, lager og rum. Det er den samme luft, der cirkulerer i hele systemet, dvs. at der kan foregå en stor støvtransport i systemet. Der har været meget lidt støv i eksperimenthuset, hvilket hovedsagelig skyldes, at huset ikke har været beboet.

I luftvarmeanlæg er det normalt, at man indskyder filtre i systemet, således at der næsten intet støv forekommer i boligen, i modsætning til radiatorsystemer, der forværrer støvgenerne. Erfaringerne fra luftvarmeanlæg kan direkte overføres til luftsolvarmeanlæg. Et sådant opvarmningssystem vil således være bedst egnet i huse, hvor der skal bo allergikere, især hvis der anvendes såkaldte allergifiltre i systemet.

Systemet skal dog designes således, at rengøring af kanalerne muliggøres i tilfælde af f.eks. bakterievækst i systemet.

6.3.5. Styring

I eksperimenthuset klares styringen af anlægget af et dataloggersystem styret af en PC'er. Dette er en relativ dyr løsning at vælge til et privat hus. Et styringssystem bestående af kob-

lede termostater og differenstermostater eller et system baseret på microprocessorer vil i dag være billigere. PC-løsningen kan dog være attraktiv, hvis man har andre styrings- og/eller overvågningsopgaver. Desuden kan PC'ere sættes op således, at styreprogrammet kører i baggrunden, mens man kan køre andre opgaver på PC'eren. Dette vil dog gøre afviklingen af forgrundsopgaverne langsommere, da styringen af varmeanlægget har første prioritet. PCløsningen bliver dog stadig billigere, som følge af udviklingen inden for edb-området.

Ved udviklingen af styresystemet skal man være opmærksom på, at man ikke introducerer blokeringer. F.eks. den situation at solfangerens temperatur ligger mellem start og stop (ventilationen er ikke igang), da skal man passe på, at huset stadig kan få varme, selv om solfangeren har første prioritet.

6.3.6. Varme direkte fra solfanger til rum

Som det ses af fig. 15 (s. 23) har rumopvarmningsanlægget i eksperimenthuset den facilitet at varme kan dirigeres direkte til rummet fra solfangeren. I måleperioden fra 14. februar til 31. maj 1987 (minus 6 dage med måleudfald) var kun 22 kWh eller under 0,5% af den nyttiggjorte varme fra tagrummet dirigeret direkte til rummet.

Simuleringerne i kapitel 5 viser, at kun mellem 3 og 6% af opvarmningsbehovet dækkes ved at lede varme direkte fra tagrummet til rummet. Dette behov optræder for det meste om morgenen/formiddagen på dage med solskin indtil solindstrålingen gennem vinduerne kan klare opvarmningsbehovet. Spørgsmålet er da om det ikke ville være mere rentabelt at spare denne opvarmningsmulighed. Rumopvarmningsanlægget skal kun køre kort tid for at opretholde rumtemperaturen, således at udbyttet fra solfangeren kun falder lidt.

Indvendingen kan da være, at solindstrålingen gennem vinduerne ikke opvarmer de nordvendte rum, der således kan have varmebe-

hov, mens de sydvendte rum har overtemperaturer. Hvis de nordvendte rum er soveværelser gør det ikke noget at temperaturen falder i dagtimerne. Værre er det med f.eks. badeværelser, men her kan man designe huset således, at varmekrævende rum deler væg med stenmagasinet. På den måde anvendes lagerets varmetab til opvarmning af rum uden overophedningsproblemer, hvilket vil øge anlæggets effektivitet.

Den endelige anlægsudformning må fremkomme som et samspil mellem arkitekt og anlægsdesigner.

6.3.7. Sommerstop

I simuleringerne i kapitel 5 er det antaget, at rumopvarmningsanlægget slukkes helt uden for opvarmningssæsonen (i sommermånederne), hvor der normalt ikke er brug for rumopvarmning. Selvfølgelig kan der være perioder uden for opvarmningssæsonen, hvor der er brug for en smule rumopvarmning jf. sommeren 1987. Det vil dog ikke være tilrådeligt at lade anlægget køre i denne periode, dels fordi den energi ventilatorerne bruger langt overstiger rumopvarmningsbehovet, dels fordi det er ubehageligt at have et 80 °C varmt lager i en bolig, hvor der kan optræde overophedningsproblemer. Problemet kan løses ved at have et mindre el-varmelegeme som ekstra suppleringsvarme (hvis ikke suppleringsvarmen allerede er elektricitet). Dette el-varmelegeme skulle da kun fungere i sommertiden og sammen med ventilatoren, der blæser luft til rummene. Styringen kunne evt. være manuel for at begrænse driftstiden.

7. Økonomi

I dette afsnit vil rentabiliteten af et opvarmningssystem med en tagrumssolfanger blive undersøgt. Da nærværende rapport beskriver et projekt udført på et eksperimenthus, eksisterer der ingen realistiske priser for meromkostningerne ved at installere et tagrumssolfangersystem i stedet for et traditionelt opvarmningssystem. I stedet vil det ud fra standardpriser (bl.a. ref. (33)) blive vurderet, om systemet er rentabelt. Prisfastsættelsen i afsnittet om besparelser og udgifter bygger på '88-priser.

7.1. Årlige besparelser

De følgende økonomiberegninger har udgangspunkt i simuleringsresultaterne fra tabel 9 s. 59. Økonomien beregnes for fire tilfælde: Laveste og højeste udbytte for begge hustyper = 1) 85 m^2 solfanger, 30° hældning og ét dæklag og 2) 105 m^2 solfanger, 45° hældning og to dæklag. Der regnes desuden med, at varmekilden både i det traditionelle opvarmningssystem og i solvarmesystemet er et moderne oliefyr med en effektivitet på 85% og et tomgangstab på 350 W.

Besparelserne fra tabel 9:

◆1

	30°	45°	
normalt hus	7.350	9.420	kWh/år
lavenergihus	5.220	6.390	kWh/år

I sommermånederne vil tilskudsvarmekilden som nævnt kunne slukkes helt. Fyret kan slukkes i:

◆2

	30°	45°	
normalt hus	5	6	mdr.
lavenergihus	6	6	mdr.

Dette betyder en besparelse på:

◆3

	30°	45°	
normalt hus	1.280	1.350	kWh/år
lavenergihus	1.530	1.530	kWh/år

Fyret stoppes i et halvt år, men i denne periode er der et mindre varmebehov, som solvarmesystemet ikke kan dække. Dette behov kan billigst og simplest dækkes af små el-varmelegemer - dels i luftvarmesystemet, dels i brugsvandstanken. El-forbruget til disse varmelegemer er dels en udgift i elektricitet, dels en besparelse i olieregningen.

Opvarmningsbehov, som solvarmeanlægget ikke kan dække, når fyret er slukket.

Rumopvarmning:

◆4

	30°	45°	
normalt hus	25	64	kWh/år
lavenergihus	0	0	kWh/år

Brugsvandsopvarmning:

◆5

	30°	45°	
normalt hus	19	131	kWh/år
lavenergihus	131	131	kWh/år

Den samlede besparelse i opvarmningsbehovet bliver da: ◆1 + ◆3 + ◆4 + ◆5 =

		30°	45°	
◆6	normalt hus	8.670	10.970	kWh/år
	lavenergihus	6.800	8.050	kWh/år

Oliefyrets virkningsgrad er 85%. Den samlede oliebesparelse bliver derfor:

		30°	45°	
◆7	normalt hus	10.200	12.900	kWh/år
	lavenergihus	8.100	9.500	kWh/år

Ifølge ref. (29) var gas/olieprisen ved årsskiftet 87/88 : 0,39 kr/kWh.

Hvilket giver en besparelse på:

		30°	45°	
◆8	normalt hus	3.980	5.030	kr./år
	lavenergihus	3.180	3.730	kr./år

Der er omkostninger forbundet med opnåelsen af denne besparelse: Elektricitet anvendt til ventilatorerne i rumopvarmningssystemet og til cirkulationspumpen i brugsvandsanlægget. Desuden den allerede nævnte suppleringsvarme under ◆4 og ◆5.

Som nævnt under afsnit 6.3.1. antages det, at det nødvendige energibehov til ventilatoren vil være ca. 10% af den nyttiggjorte energi til rumopvarmning fra solfangeren. Denne energimængde andrager her (fra tabel 9, s. 59):

		30°	45°	
◆9	normalt hus	570	770	kWh/år
	lavenergihus	350	460	kWh/år

Cirkulationspumpen i brugsvandsanlægget kører i gennemsnit ca. 2000 timer om året. Tallet er afhængig af styresystem, solfanger og lager. Med en 35 W pumpe bliver det årlige el-forbrug 70 kWh.

Det samlede el-forbrug bliver da: ◆9 + ◆4 + ◆5 + 70 kWh:

		30°	45°	
◆10	normalt hus	684	1.035	kWh/år
	lavenergihus	551	661	kWh/år

Med en el-pris på 74,4 øre/kWh (ref. (29)) for NESA-området giver det en udgift på:

		30°	45°	
◆11	normalt hus	510	770	kr./år
	lavenergihus	410	490	kr./år

Den samlede årlige besparelse ved at installere solvarmeanlægget bliver da: ◆8 - ◆11:

		30°	45°	
◆12	normalt hus	3.470	4.260	kr.
	lavenergihus	2.770	3.240	kr.

7.1.1. Årlige besparelser i et el-opvarmet hus

Her regnes der med, at det traditionelle opvarmningssystem er el-paneler samt en el-opvarmet brugsvandstank med et varmetab på 3 W/°C. Tilskudsvarmen i solvarmeanlægget er ligeledes el-varme.

Her er der ingen besparelser at hente ved sommerlukning af tilskudsvarmekilden, så ◆3 falder bort. Til gengæld er varmetabet fra brugsvandsbeholderen allerede medregnet i simuleringerne, så besparelsen er ca. 1000 kWh større end ◆1 viser: Den samlede besparelse (besparelse minus udgifter) bliver da: ◆1 + 1000 - ◆9 - 70 kWh:

◆13

	30°	45°	
normalt hus	7.710	9.580	kWh/år
lavenergihus	5.800	6.860	kWh/år

Hvilket giver en årlig besparelse på:

◆14

	30°	45°	
normalt hus	5.740	7.130	kr.
lavenergihus	4.320	5.110	kr.

7.2. Tilladelig investering

For at et solvarmeanlæg er rentabelt, må prisen for at installere anlægget ikke overstige den besparelse, anlægget giver anledning til gennem sin levetid. Men da priserne for den sparede energi varierer gennem anlæggets levetid, kan første års besparelse ikke anvendes direkte. Det er nødvendigt ikke blot at tage hensyn til inflationen, men også til lånevilkårene på investeringstidspunktet.

I de efterfølgende beregninger regnes der med, at anlægget installeres ved bygningen af et hus. Ifølge ref. (34) var lånevilkårene (kreditforeningslån) d. 1. feb. 1988: Rentefod 10%, 30-årige mixlån. Mixlånet bestod af 60% annuitetslån - kurs 88,5 og 40% serielån - kurs 91,25. Den effektive rente (incl. bidrag) var da 11,96 før skat og efter skat (50%) 6,28%. Der regnes desuden med en inflation på 5%, og en real prisstigning på energi (ud over de 5%) på 0%.

Til at beregne den tilladelige investering benyttes nuværdimetoden (f.eks. ref. (35)), hvor fremtidige besparelser og udgifter omregnes (tilbagediskonteret) til deres værdi på investeringstidspunktet. Selv om lånet er 30-årigt, afskrives anlægget her alligevel over 20 år, som er den normalt accepterede levetid for væskebårne solvarmeanlæg. Ifølge ref. (32) er levetiden for luftbaserede solvarmeanlæg mindst lige så lang som for væskebårne anlæg.

Dvs. de fundne årlige besparelser fra forrige afsnit (12 og 14) skal ganges med 17,65 for at få det maksimale beløb investeringen i solvarmeanlægget må andrage:

		30°	45°	
Oliefyr	normalt hus	61.200	75.200	kr.
	lavenergihus	48.800	57.200	kr.

◆15

		30°	45°	
El-varme	normalt hus	101.300	125.800	kr.
	lavenergihus	76.200	90.200	kr.

Der ydes stadig 30% tilskud til installation af solvarmeanlæg, hvorved ovenstående maksimale investeringsbeløb bliver forhøjet til:

		30°	45°	
Oliefyr	normalt hus	87.400	107.400	kr.
	lavenergihus	69.800	81.700	kr.

◆16

		30°	45°	
El-varme	normalt hus	144.700	179.700	kr.
	lavenergihus	108.900	128.900	kr.

7.3. Meromkostninger

I dette afsnit fokuseres på anlæg installeret i nybyggeri. Det forsøges at estimere, hvad merudgiften for et tagrumssolfanger-anlæg vil være. Merudgiften kan groft deles op i følgende punkter: Luftvarmeanlæg i stedet for vandbårent system, transparent dæklag i stedet for tagdækning, installering af den sorte fiberdug, at huset skal være større som følge af, at stenlageret optager en del plads, opførelsen af stenlageret, styring af rumopvarmningsanlæg, brugsvandsanlægget og diverse.

Det er ikke her muligt at nå til klarhed over, hvad der er dyrest: Luftvarmeanlæg eller vandbårne systemer. Nogle mener luftvarmeanlægget er dyrest - andre omvendt. Det antages derfor her, at de koster det samme.

Ved at installere en tagrumssolfanger spares hele tagdækningen på tagets sydside. Ifølge ref. (33) vil denne besparelse andrage 56-128 kr./m^2 excl. moms afhængig af hvilken eternittype, der vælges (teglsten er endnu dyrere). Besparelsen vil derfor være 1) 85 m^2 ∿ 5.800-13.300 kr. incl. moms og 2) 105 m^2 ∿ 7.200-16.400 kr. incl. moms. Det antages, at udgiften til oplægning af det transparente dæklag er lige så stor som oplægning af tagdækningen. Prisen for enkeltlagsdæklaget

antages her at være 150 kr./m^2 excl. moms, (se afsnit 6.1.1.), dvs. prisen for 85 m^2 bliver 15.600 kr. incl. moms. Prisen for ribbepladen er 284,75 kr/m^2 excl. moms, hvilket for 105 m^2 giver ∿ 36.500. Merprisen for det transparente dæklag bliver da 1) 85 m^2 solfanger, 30° hældning og enkeltlag = 2.300-9.800 kr. incl. moms og 2) 105 m^2 solfanger, 45° hældning og dobbeltlag = 20.100-29.300 kr. Ved at vælge et billigere dæklag af f.eks. polycarbonat kan prisen pr. m^2 måske nedbringes med 100 kr. eller 8.000-10.000 for hele tagfladen. Dette er der ikke regnet med i det følgende.

Dugen koster 22 kr. ('86 priser excl. moms). Det antages, at opsætningen af dugen koster det samme som oplægning af eternittag ∿ 100 kr./m^2 excl. moms. Dvs. montagen af dugen bliver 1) 85 m^2 ∿ 12.700 incl. moms og 2) 105 m^2 ∿ 15.600 kr. incl. moms.

Ifølge ref. (36) ligger prisen for bygning af et hus på mellem 5.500 og 6.500 kr./m^2 excl. moms, dvs. i snit omkring 7.300 kr./m^2 incl. moms. Det antages, at marginalprisen for en ekstra m^2 er 50% af dette tal. Stenlagrene fylder for de to anlægsstørrelser henholdsvis 4,8 og 6 m^3. Med isolering svarer det til et grundareal på 3,4 og 3,9 m^2, hvilket er i overkanten, idet flere af lagerets vægge erstatter skillevægge, hvorved det effektive areal, lageret beslaglægger, er mindre. Hvis det antages, at to af lagerets vægge erstatter skillevægge, vil husets arealforøgelse som følge af stenlageret blive henholdsvis 2,9 og 3,4 m^2. Yderligere formindskelse af arealbehovet er mulig, hvis lageret dimensioneres med passiv varmeafgivelse - altså mindre isolering og dermed tyndere vægge - dette tages der dog ikke hensyn til i nærværende tilfælde. Merudgiften som følge af lagerets arealkrav bliver dog henholdsvis 10.600 og 12.400 kr. incl. moms. Prisen for opførelse af stenlageret, styresystemet og diverse har det ikke været mulig at opgøre i dette projekt.

Ifølge ref. (37) er merprisen for et lille brugsvandsanlæg installeret i nybyggeri 2.000 kr./m^2 solfangerareal. Dvs. et 5 m^2 anlæg vil koste 10.000 kr. Dette tal er incl. statsstøtte,

men da der allerede er taget højde for dette i afsnit 7.2, skal tallet her tillægges støtten, dvs. prisen bliver ∿14.300 kr. incl. moms.

Samlede merudgifter:

	85 m2	105 m2	
Transparent dæklag	2.300-9.800	20.100-29.300	kr.
Sort fiberdug	12.700	15.600	kr.
Ekstra gulvareal	10.600	12.400	kr.
Brugsvandsanlæg	14.300	14.300	kr.
I alt	39.900-47.400	62.400-71.600	kr.

Hvis anlægget skal være rentabelt må udgiften til stenlageret, styresystemet og diverse ikke overstige den tilladelige investering (◆16, s. 97) minus ovenstående udgifter.

Hvis vi ser på et system med oliefyr (se ◆16, s. 97) ses det, at for et almindeligt hus kan dette sagtens lade sig gøre, hvis solfangeren har to dæklag og 45° hældning, (der er 60-70.000 kr. tilbage) men også hvis solfangeren har ét dæklag og 30° hældning (her er der 40-50.000 kr. tilbage). Derimod vil systemet næppe være rentabelt i et lavenergihus med lav taghældning. Dette skyldes, at solvarmesystemet i et lavenergihus koster lige så meget som i et almindeligt hus. Men opvarmningsbehovet er betydeligt lavere, hvorved udbyttet fra anlægget, der skal forrente anlægget, også mindskes.

Det kan således diskuteres (hvilket <u>ikke</u> vil blive gjort her), hvad der er mest rentabelt; et almindeligt hus med et solvarmeanlæg eller et lavenergihus uden et solvarmesystem.

For et hus med el-varme skal det vurderes om merbesparelsen på mellem 39.000 og 69.000 kr. (se ◆16, s. 97) er stor nok til at finansiere merudgiften ved at installere et luftvarmeanlæg frem

for el-paneler (som er relativt billige). Det er måske muligt, idet der ikke skal investeres i et relativt dyrt olie- eller gasfyr.

Økonomibetragtningerne i dette kapitel er behæftet med meget store usikkerheder, både med hensyn til betragtningerne over omkostningerne ved installation af anlægget og med hensyn til den forventede energiprisstigning. En reel energiprisstigning ud over 0% vil øge anlæggets rentabilitet. At en sådan stigning vil indtræffe i 90'erne er ikke utænkelig, idet den amerikanske olieproduktion og olieproduktionen i den engelske del af Nordsøen er faldende, hvorved OPEC igen kan blive prisdannende.

7.3.1. Tagrumssolfangere i eksisterende byggeri

I det foregående kapitel blev økonomien vurderet for et anlæg installeret i nybyggeri. Men hvordan er økonomien i eksisterende byggeri, f.eks. i forbindelse med en renovering af taget?

Det traditionelle danske opvarmningssystem er vandbaseret, der findes kun få luftopvarmede huse. For at udnytte et anlæg af den type, der er beskrevet i denne rapport, skal der installeres et luftopvarmningssystem. Hvis det vandbårne system ikke trænger til udskiftning, vil det være urentabelt at installere et sådant solvarmeanlæg. Besparelsen er ikke stor nok til at forrente en så stor investering. Det kan lade sig gøre i nybyggeri, fordi beløbet der spares på et traditionelt vandbårent system, bruges til et luftvarmesystem.

På Laboratoriet for Varmeisolering udføres i øjeblikket en undersøgelse af muligheden for at overføre varmen fra en tagrumssolfanger til et vandbårent opvarmningssystem. Dette projekt vil godtgøre, om det er rentabelt at installere tagrumssolfangere i eksisterende bygninger med vandbaseret opvarmningssystem.

8. Fremtidigt arbejde

Nærværende rapport beskriver resultaterne fra et eksperimenthus med et tagrumssolfangersystem. Rapporten beskriver detaljeret, hvordan solvarmesystemet er opbygget, og redegør for de ydelsesmæssige og økonomiske forhold ved at installere et sådant system i et dansk enfamiliehus. Men er det beskrevne system det mest rentable system? Det er det givetvis ikke. Systemet er et forsøgsanlæg, hvor der bl.a. ikke er gjort meget for at optimere installationen af anlægget. Installationsomkostningerne kan nedbringes væsentligt ved en produktudvikling, der sigter mod et design, der er hurtigt, simpelt og sikkert at installere. Sikkert betyder her, at der ikke kræves meget forudkendskab for at installere anlægget, samt at der skal klumres meget ved installationen før anlæggets ydelse berøres væsentligt. Det er ligeledes væsentligt, at der foretages undersøgelser af hvilke materialer, der er velegnet i tagrumssolfangere set ud fra et holdbarhedsmæssigt, men også økonomisk synspunkt.

I fremtiden bør der satses på at produktmodne tagrumssolfangerkonceptet på samme måde som det f.eks. er sket for små solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, der efterhånden er blevet hyldevarer. På den måde kan det sikres, at tagrumssolfangersystemet bliver et rentabelt alternativ til traditionelle opvarmningsformer som olie, gas, fjernvarme m.m.

I projektet, som denne rapport beskriver, er der kun undersøgt én udformning af et tagrumssolfangersystem. Dette systemdesign har ikke nødvendigvis det bedste pris/ydelses-forhold.

Andre udformninger af solfanger og lager kan vise sig at være mere rentable. Man kunne f.eks. tænke sig, at luften i stedet for at blive trukket gennem en dug, trækkes gennem loftisoleringen, det såkaldte modstrømsprincip (ref. (38)). Lageret kunne integreres helt i selve bygningsstrukturen, f.eks. i væggene eller i etageadskillelsen ved brug af betonhuldæk (ref. (39) og (40)). Eller der kunne anvendes smeltevarmelagre. På Laboratoriet for Varmeisolering er der udført lovende forsøg med smel-

tevarmelagre specielt velegnede til luftvarmesystemer (ref. (41)).

Mulighederne er mange, det gælder derfor om nu at få undersøgt de forskellige koncepter og få fastlagt de bedste systemudformninger.

Referencer

(1) Roof space collector - validation and simulation with EMGP2. Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 87-15. 1987.

(2) Måle- og styresystem i et eksperimenthus med en tagrumssolfanger. Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 88-2, 1988.

(3) Tagrumssolfanger. Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Paper til nordisk workshop om luftbaserede solvarmeanlæg. Stavanger Norge, d. 1.-2. april 1987.

(4) Roof space collector. Søren Østergaard Jensen og Vagn Korsgaard. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Paper og poster til ISES Solar World Congress 1987 in Hamburg, Vesttyskland. Proceedings, vol. 2, pp 1135-39.

(5) Air based solar collectors in Denmark, Storages in air based solar heating systems in Denmark og Air based solar heating systems in Denmark. Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. 3 papers til IEA Status seminar on Solar air systems, Utrecht, Holland, d. 1.-3. marts 1988.

(6) Forprojekt til F&U projekt tagrumssolfanger. Vagn Korsgaard og Ole Balslev-Olesen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 85-10, 1984.

(7) Luftsolfangere og varmelagring i jord. Kurt Kielsgaard Hansen. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 118, 1982.

(8) Luftsolvarmeanlæg - eksperimentelle forundersøgelser. Ole Balslev-Olesen. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 86-10. 1986.

(9) Rockbeds. Dan Lewis et.al. Artikel i Solar Age marts 1987. pp. 44-48.

(10) How to size up solar air systems. Vic Reno. Artikel i Solar Age januar 1983. pp. 30-34.

(11) Solar Energy System Design. N.C. Harris et.al. John Wiley & Sons, 1985. ISBN 0-471-87104-4.

(12) Solar Engineering of Thermal Processes. J.A. Duffie & W.A. Beckmann, 1980. ISBN 0-471-05066-0.

(13) Luftsolfanger med porøs absorber - beregnet til tørringsprocesser. K. Ingerslev Jensen og B. Vig Jørgensen. Eksamensprojekt ved Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. 1987.

(14) Effektivitetsprøvning af solfanger foretaget for HS-kedler. S. Svendsen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 80-24. 1980.

(15) Effektivitetsprøvning af solfanger foretaget for HS-kedler. S. Svendsen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 80-26. 1980.

(16) Recommendations for European Solar Storage Test Methods. Commission of the European Communities. 1984.

(17) A European Transient Simulation Model for Thermal Solar Systems - EMGP2. W.L. Dutre. Solar Energy R&D in the European Community. Series A, Volume 5. D. Reidel Publishing Company for the Commission of the European Communities. 1985.

(18) Videnbank - 3 huses opvarmningsbehov. Henrik Lawaetz og Leif Sønderskov Jørgensen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. 1977.

(19) Vejrdata for VVS og energi - Dansk referenceår TRY. Statens Byggeforskningsinstitut. SBI-Rapport 135. 1982.

(20) Konstruktion af solfangere. - En håndbog/idebog. Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Energiministeriets solvarmeprogram - rapport nr. 36. 1986.

(21) Datablad for PDRA 73 og ALUPOR. Fibertex aps. Svendborgvej 16. Postbox 8028. 9220 Aalborg Øst. 08 13 86 00.

(22) For a system of the fixed heat process type, the dehydration system by an air collection and heating mode. Seiki Kashihara. Sumitomo Metal Industries Ltd. Ote Center Bldg. 1-3, Otemachi 1-Chome. Chiyoda-Ku. Tokyo. 100-Japan.

(23) Final report of the management support contractor for the residental solar heating demonstration. Volume III. High temperature exposure of wood structures in solar systems. BE&C Engineers, Inc. 1983.

(24) Samtale med lektor Torben Jakobsen, Instituttet for Husbygning, Danmarks Tekniske Højskole.

(25) Bygningsreglement 1982. Byggestyrelsen.

(26) DS 1051.1. Brandprøvning. Modstandsevne mod brand.

(27) DS 1052.1. Klassifikationsstandarden.

(28) Samtale med lektor Erik H. Riberholt, Afdelingen for Bærende Konstruktioner, Danmarks Tekniske Højskole.

(29) VVS-magasin for varme, ventilation, sanitet, miljø og energiteknik. Nr. 1, januar 1988. Teknisk Forlag.

(30) Naturlig stråling i danske boliger. Sundhedsstyrelsen. 1987.

(31) Dimensioneringskurver i lavtrykscentrifugalventilatorer. Katalog fra Novenco. December 1984.

(32) Samtaler med professor George O.G. Löf, Colorado State University, USA, på I.E.A. Status seminar on Solar air systems, Utrecht, Holland, 1.-3. marts 1988.

(33) V & S - priser, Husbygning 1987. V & S Byggedata a/s.

(34) Opringning til Kreditforeningen Danmark d. 29. januar 1988.

(35) Økonomisk vurdering af energibesparende foranstaltninger. Kjeld Johnsen, Michael Kvetny og Hans Skifter Andersen. Statens Byggeforskningsinstitut. SBI-anvisning 132. 1982.

(36) Samtale med Bjarne Saxhof, civ.ing. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole.

(37) Solvarme i nybyggeri. Michael Møllgaard og Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Energiministeriets Solvarmeprogram - rapport nr. 39. 1987.

(38) Lav-energihus med modstrømsvægge. Vagn Korsgaard. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 43. 1976.

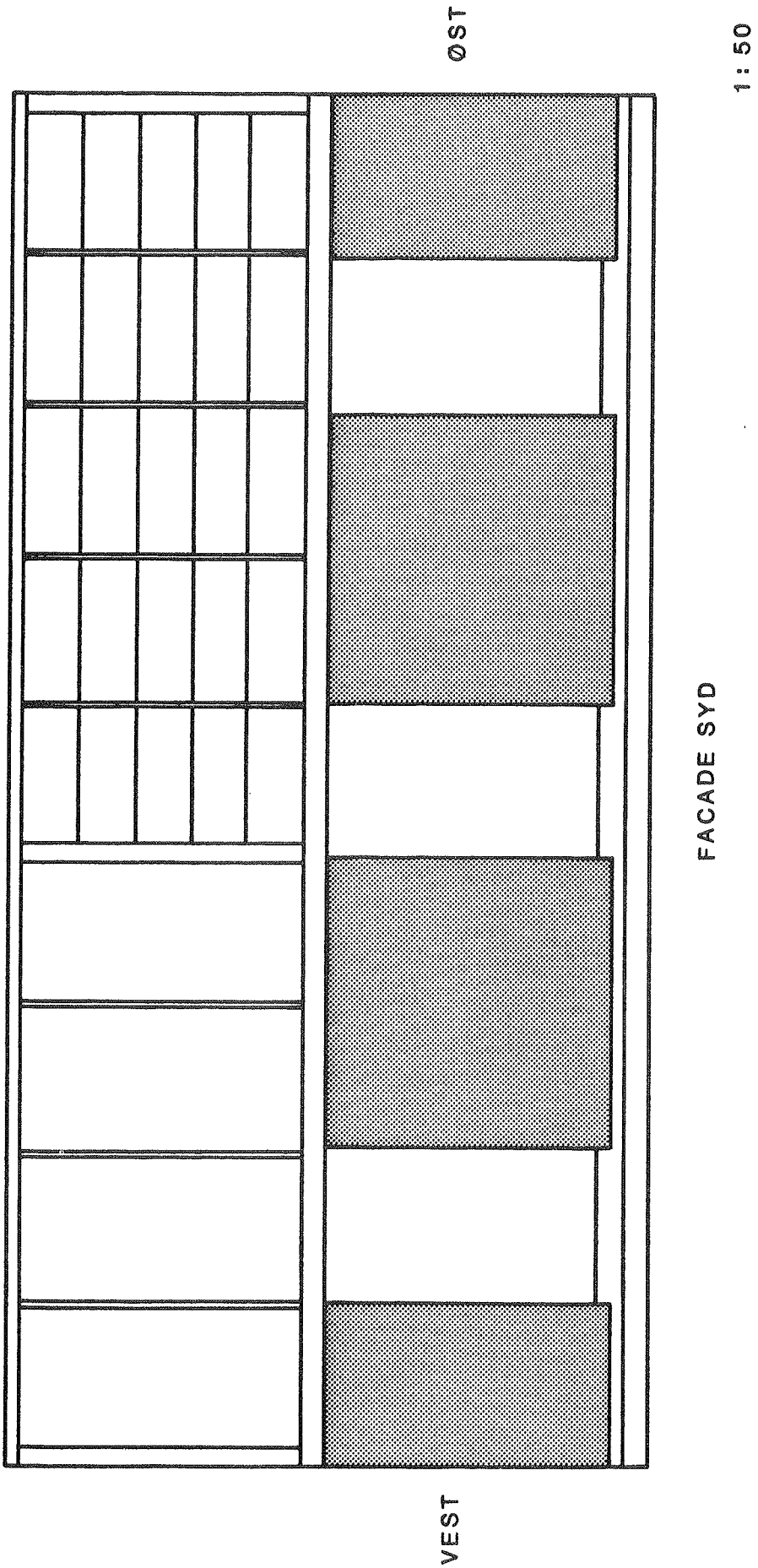
(39) The air-core System for Thermal Storage: Bion D. Howard. Artikel i Passive Solar Journal, 3 (3), pp. 249-276. 1986.

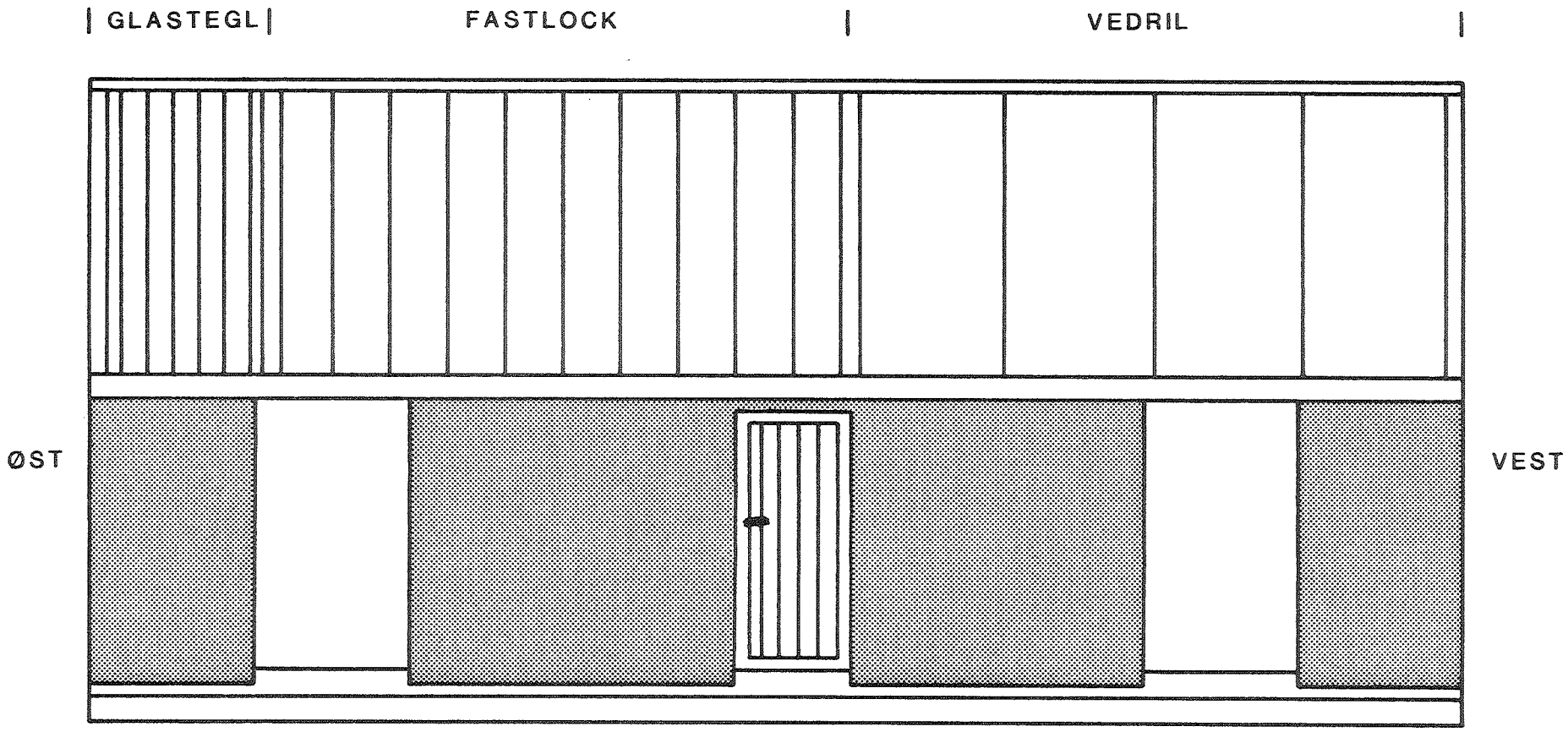
(40) Solvarmeanlæg med bygningsintegrerede varmelagre. Lars Olsen. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske

Højskole. Energiministeriets varmelagerprojekt, rapport nr. 21. 1984.

(41) Smeltevarmelagre baseret på salthydrater placeret i plastslanger. Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Energiministeriets varmelagerprojekt, rapport nr. 23. 1987.

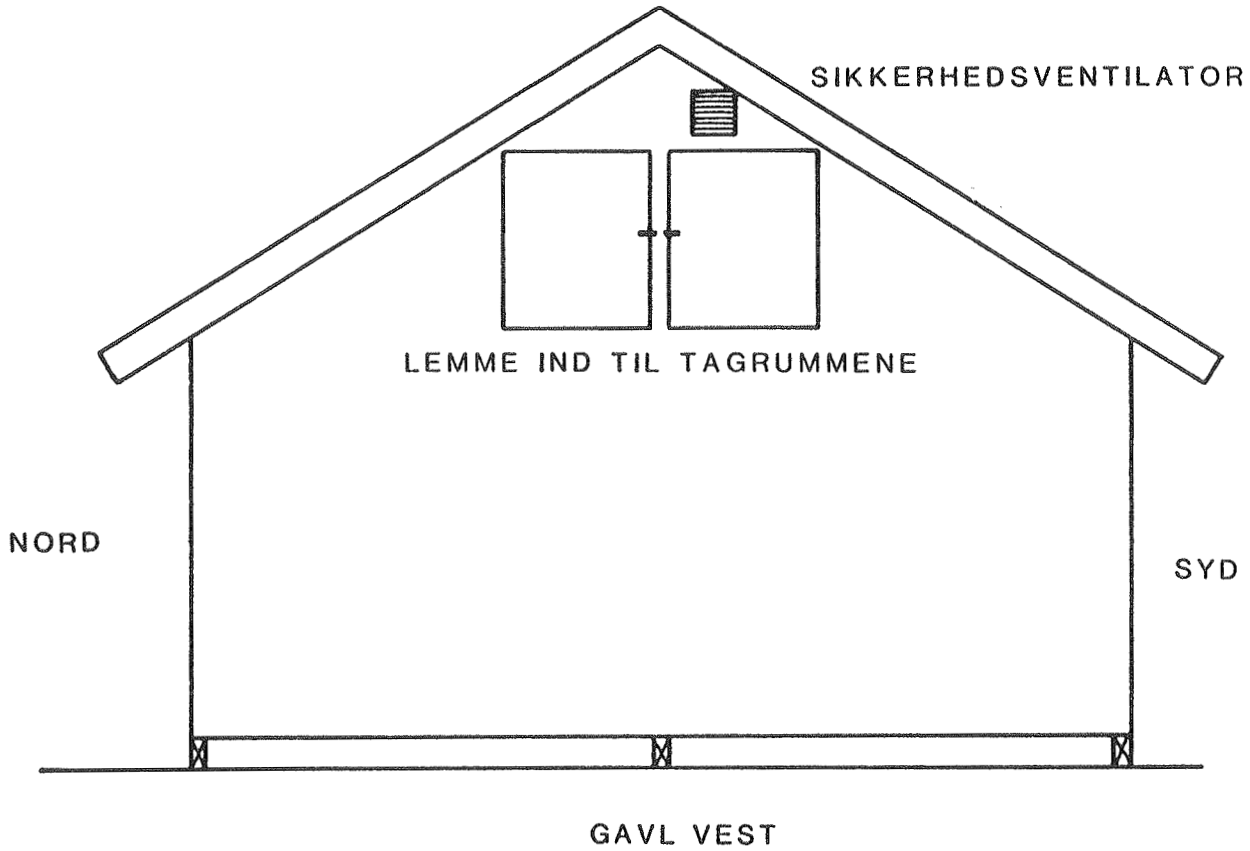
Bilag A: Skitser af huset





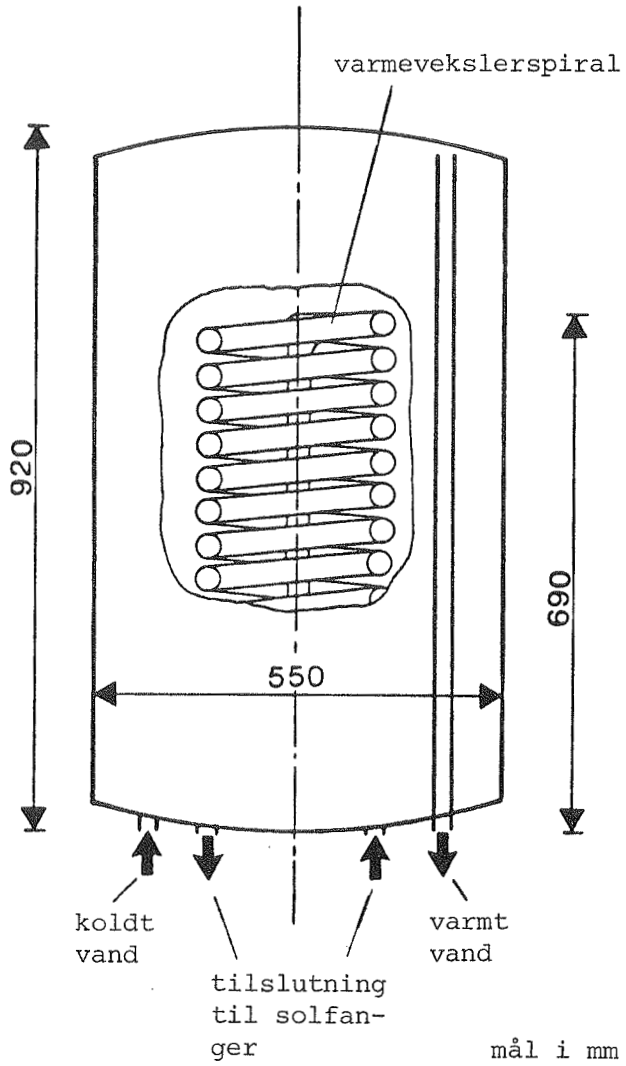
FACADE NORD

1 : 50



Vestgavlen. Østgavlen er magen til, blot er der her ingen lemme til tagrummene.

Bilag B: Brugsvandstanken



Skitse over brugsvandstanken i eksperimenthuset.

Vandvolumen		190 l
Dimensionering af tanken:	Diameter Højde	55 cm 92 cm
Isolering:	Materiale Tykkelse	polyurethan 2,5-15 cm
Varmevekslerspiral:	Materiale Længde Dimension Middelvarme- overføringsevne	stål 9 m 3/4 " 250 W/°C
Dimensionering af kabinet		60x60x147 cm^3

Data for lageret.

Bilag C: Data over brugsvandssystemet i simuleringerne

DATABLAD VEDRØRENDE SOLFANGEREFFEKTIVITET	NR. D 2003
Fabrikat: BATEC, LIDEMARKSVEJ 20, 4681 HERFØLGE	Type: BA 22 SELEKTIV
Prøvelaboratorium: LABORATORIET FOR VARMEISOLERING, DTH, 2800 LYNGBY, TLF.02-88 35 11	Solf.id-nr.: 161

Udv.dim.: 2,07 x 1,12 x 0,085 m

Vægt: 40,0 kg

Transparent areal: 2,16 m^2

Transparent(e) lag: 1 lag 4 mm glas

Absorber:

Type: rør-plade; forbindelsesteknik: valsning

Materiale: kobberrør, aluminiumsplade

Tykkelse: pladetykkelse: 0,5 mm; vægtykkelse i kobberrørene: 0,35 mm

Kanalsystem: 8 langsgående parallelle rør

Fordelerrør: kobberrør 22 x 1 mm

Belægning: selektiv, anodiseret og farvet med nikkel

Bagsideisolering: 30 mm mineraluld

Kantisolering: 15 mm mineraluld

Solf.-kasse: ramme af alu-profil, bagside af alu-plade

Tætning: glasset hviler på et butylbånd og fugen mellem glas og ramme er tætnet med silikonefugemasse, EPDM-gummityller ved rørgennemføringer

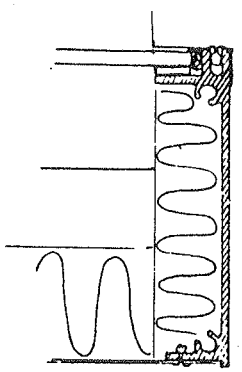
Anbefalet max.tryk: 250 kPa

Tryktab: 0,6 kPa ved en væskestrøm på 0,043 kg/s pr. element (50% propylenglykol)

Tilslutning: kan ske til de fire tilslutstudse med indvendigt 3/4" gevind. Andre tilslutningsstudse kan udføres efter behov

Montering: Solfangeren kan monteres uden på tag eller indbygges

Tværsnit:

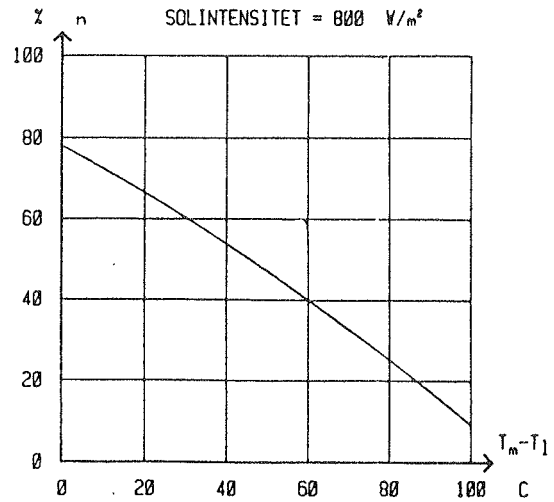


Effektivitetsudtryk ved flg. forhold:

Hældning 45°, væskestrøm 0,043 kg/s
50% propylenglykol, vindhastighed 5 m/s

$$\eta = 0,78 - 4,4\frac{T_m - T_l}{E} - 0,011\frac{(T_m - T_l)^2}{E}$$

hvor η = effektivitet
T_m = middelvæsketemperatur
T_l = lufttemperatur
E = solintensitet



Bemærkninger til prøvningen: Ingen

Dato:	Prøvestationens underskrift:
1983-02-09	T. VEST HANSEN

DATABLAD FOR VARMELAGRE TIL SOLVARMEANLÆG TIL BRUGSVANDSOPVARMNING	Prøvenr.: D 3014 Type: Fønix Eminent B
Fabrikant: BATEC, Lidemarksvej 20, 4681 Herfølge	Godkendelsesnr.: K 030

Udformning: Varmtvandsbeholder med spiral som forbindes til solfangerkredsen, placeret forneden i beholderen. For supplerende opvarmning er placeret en varmevekslerspiral og en elpatron foroven i beholderen. Varmt vand tappes foroven i beholderen og koldt vand ledes ind ved bunden. En mineraluldskappe omgiver beholderen. Kapppen holdes på plads af pap og kløtzel.

Udv.dim.incl. isolering:0,765x2,31m(diamxhøj)

Vægt (fyldt): 416 kg.

Varmtvandsbeholder:

Type: Cylindrisk m. hvælvede endebunde
Udv.dim.: (diam. x højde): 0,465 x 1,84 m
Volumen: 300 l
Godsmateriale: Stål
Korrosionsbeskyttelse: Forsynet med anode

Varmeveksler: solfangerkreds):

Type: Ribberør
Materiale: Kobber
Væskeindhold: 1,0 l
Varmeoverførende areal: 1,1 m^2

Varmeveksler (suppl. varmekreds):

Type: Ribberør
Materiale: Kobber
Væskeindhold: 1,0 l
Varmeoverførende areal: 1,1 m^2

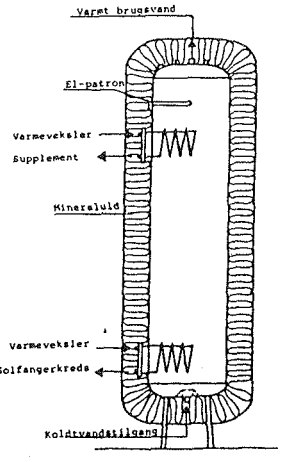
Elpatron:

Ydelse: 3000 W
Væskevolumen over varmelegeme: 40 l
Væskevolumen over føler: 40 l

Isolering:

Bund (materiale/tykkelse): Mineraluld/100mm
Sider (materiale/tykk.): Mineraluld/150 mm
Top (materiale/tykkelse):Mineraluld/200 mm

Lodret snit i lager:



Måleresultater:

Varmelagringskapacitet: 1370 kj/°C

Varmetabskoefficient (i drift): 3,8 W/°C

Varmetabskoefficient (i stilstand): 3,3 W/°C

Varmeoverføringsevne fra solfangervæske til lager

H(20): 100 W/°C
H(50): 172 W/°C
H(80): 244 W/°C

Tryktab over varmeveksler.

Ved væskestrøm på 0,1 kg/s 50% propylenglykol og væsketemperatur ca. 25°C .....: 6,8 kPa

Symboler:

$H(T_1)$ - Varmeoverføringsevne ved lagertemperatur på T_1 °C, W/°C

Bemærkninger til prøvningen: Ingen

Dato: 1984-11-21	Prøvestationens underskrift: T. Vest Hansen

DATABLAD VEDRØRENDE SOLVARMEANLÆG TIL VARMT BRUGSVAND	Prøvestationsnr.: D 6101
FABRIKAT: BATEC, LIDEMARKSVEJ 20, 4681 HERFØLGE	Type: 1 b
Beregningerne er udført med anlægsmålinger som valideringsgrundlag	Godkendelsesnr.: K 030

Anlægsbeskrivelse

Solfanger

Fabrikat	: Batec
Type	: BA 22 Selektiv
Prøvestationsnr.	: D 2003
Antal elementer	: 3
Transparent areal	: 6,48 m^2

Lager

Fabrikat	: Batec
Type	: Fønix Eminent B
Prøvestationsnr.	: D 3014
Volumen	: 300 l
Elpatron	: Ja

Styresystem

Fabrikat	: Tempertronic
Type	: EDT 11 M
Prøvestationsnr.	: D 5008

Pumpe

Fabrikat/Type	: Grundfoss/UPS 15-35
Effekt	: 75 W

Cirkulationsvæske

Fabrikat/Type	:
Bestanddele	: 50% propylenglycol

Rørsystem	Fordelerrør	Frem/Retur
Materiale	Messing	Kobber
Dimensioner	3/4" Unioner	18/22 mm
Længde	0,6 m	14 m
Isoleringsmat.	Uisoleret	Armaflex
Isoleringstyk.	0 m	15 mm
Varmetabskoef.	5.6 W/°C	3.9 W/°C

Beregningsforudsætninger

Forbrug

Liter pr.døgn (10°C - 45°C)	: 200 l/d
Svarende til	: 2920 kWh/år

Vejrdata

Dansk referenceår (TRY, SBI-rapport 135)

Solindfald (45°, syd	: 1190 kWh/m^2

Solfanger

Hældning med vandret	: 45°
Afvigelser fra syd	: 0°

Lager

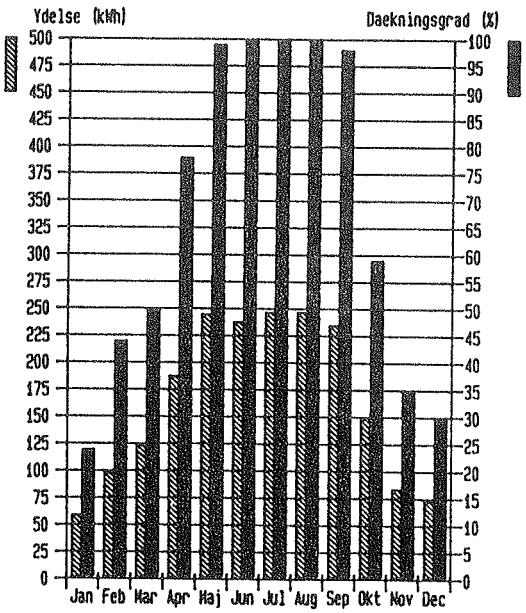
Omgivelsestemperatur for lager	: 20°

Styresystem

Startdifferens	: 10°C
Stopdifferens	: 2°C

Beregningsresultater

Årlig ydelse	: 1987 kWh
Årlig ydelse pr.m^2 solfanger	: 307 kWh/m^2
Dækningsgrad	: 68% *)
Dækningsgrad udenf.fyringssæson	: 100%**)
Årligt elforbrug for pumpe	: 172 kWh
Årligt elforbrug for elpatron	: 144 kWh***)
Årligt varmetab fra lager	: 372 kWh
Årligt varmetab fra rørsystem	: 606 kWh



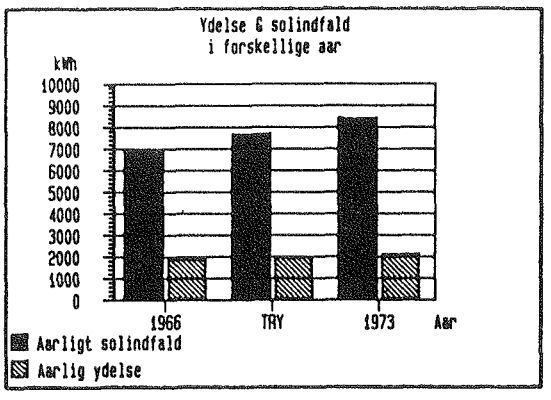
Månedlige ydelser og dækningsgrader

Bemærkninger:
*)Dækningsgrad er forholdet mellem ydelse og forbrug
**)Fyringssæson: 23/9 - 9/5 (227 dage)
***)Elpatron er kun sluttet til udenfor fyringssæsonen
Elforbrug for elpatron er medregnet i årlig ydelse

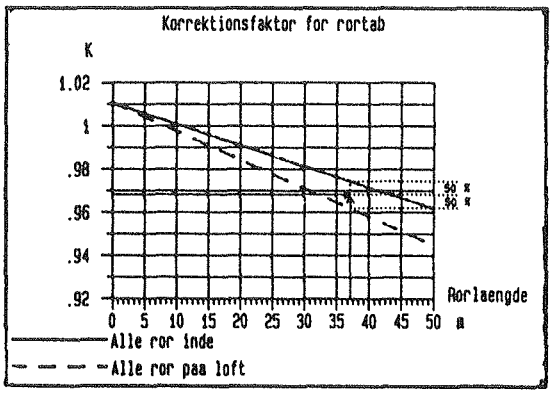
Dato: 1985-07-18	Prøvestationens underskrift: T.Vest Hansen

Antal elementer / Areal m^2 / Forbrug l/d	kWh/år	2 / 4.32 Y	$d_{år}$	d_{uf}	3 / 6.48 Y	$d_{år}$	d_{uf}	4 / 8.64 Y	$d_{år}$	d_{uf}	5 / 10.80 Y	$d_{år}$	d_{uf}
100	1460	1050	72	100	1110	76	100	1150	79	100	1170	80	100
200	2920	1860	64	100	1990	68	100	2070	71	100	2120	73	100
300	4380	2540	58	99	2720	62	99	2840	65	100	2920	67	100
400	5840	3090	53	97	3330	58	98	3490	60	98	3610	62	99

Ydelser og dækningsgrader for varierende forbrug og solfangerareal. Y: Årlig ydelse i kWh/år, $d_{år}$: Årlig dækning i %, d_{uf}: Dækning i % uden for fyringssæson (9/5-23/9).



Ydelse og solindfald for anlægget på forsiden i år med forskelligt solindfald. (1966 og 1973 er h.h.v."dårligste" og "bedste" år i perioden 1959-1973).



Korrektionsfaktor for andre rørlængder og placeringer af rør. Ydelse og dækningsgrad multipliceres med faktoren for den aktuelle rørlængde. Pilene illustrerer et eksempel med 37 m rør mellem solfanger og lager, 50% inde og 50% på loft (uopvarmet rum).

Orientering / $d_{år}$ / Hældning	syd 60%	70%	80%	sydsydøst eller sydsydvest 60%	70%	80%	sydøst eller sydvest 60%	70%	80%	østsydøst eller vestsydvest 60%	70%	80%	øst eller vest 60%	70%	80%
15°	.92	.91	.90	.91	.90	.90	.89	.89	.88	.87	.86	.86	.83	.82	.82
30°	.97	.96	.96	.95	.95	.95	.92	.92	.92	.88	.88	.87	.82	.82	.82
45°	1.00	1.00	1.00	.97	.98	.98	.94	.95	.95	.89	.90	.91	.81	.81	.82
60°	1.01	1.01	1.02	.99	.99	1.00	.94	.96	.96	.88	.89	.90	.78	.79	.81
75°	.96	.98	1.01	.94	.96	.99	.90	.93	.95	.84	.86	.88	.73	.75	.79
90°	.86	.91	.97	.84	.89	.95	.81	.85	.91	.76	.78	.83	.67	.69	.73

Korrektionsfaktor for forskellige orienteringer og hældninger af solfangeren. $d_{år}$ angiver dækningsgraden for et anlæg med en solfanger, der er sydvendt og har en hældning på 45° med vandret. Hældning angiver vinklen mellem solfanger og vandret. (Ydelse og dækningsgrad multipliceret med faktoren for den aktuelle orientering).