



Måling på solvægge til rumopvarmning

Naturcenter Vestamager

Søren Østergaard Jensen

SolEnergiCenter Danmark Teknologisk Institut

Måling på solvægge til rumopvarmning

Naturcenter Vestamager

Søren Østergaard Jensen SolEnergiCenter Danmark Teknologisk Institut

Juli 1999

Forord

Nærværende rapport afslutter UVE-projektet "Måling på solvægge til rumopvarmning", journal nr. 51181/96-0054 finansieret af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi mv.

Projektet er en opfølgning på projektet EFP96-projektet "Ventilerede solvægge, Naturcenter Vestamager", journal nr. 1213/96-0020, hvor solvæggene blev designet og installeret (Schmidt, 1999). Solvæggene i Naturcenter Vestamager er designet af ingeniørfirmaet A/S Samfundsteknik (nu Carl Bro as).

Følgende har deltaget i projektet:

Søren Østergaard Jensen, civ.ing., SolEnergiCenter Danmark William Otto, laboratorieteknikker, SolEnergiCenter Danmark Ole Larsen, laboratorieteknikker, SolEnergiCenter Danmark Thomas Schmidt, civ.ing., Carl Bro

Måling på solvægge til rumopvarmning 1. udgave, 1. oplag 1999 © Teknologisk Institut 1999 Energidivisionen

ISBN: 87-7756-550-9

Indholdsfortegnelse

	Summary	3
1.	Indledning	4
2.	Målesystem	9
2.1.	Anvendte måleinstrumenter	
2.2.	Opsamling af data	
2.3.	Behandling af data	13
3.	Målinger	15
3.1.	Målinger for udvalgte perioder	
3.1.1.	Målinger for perioden 27. januar – 2. februar	16
3.1.2.	Målinger for perioden 612. marts	19
3.1.3.	Målinger for perioden 29. marts – 4. april	
3.2.	Solvæggenes effektivitet	
3.3.	Solvæggenes ydelse	
3.3.1.	Varmetab gennem spjæld	
3.3.2.	Elforbrug	
3.4.	Varmekapacitet	
3.5.	Stagnationstemperaturer	
3.6.	Rengøring	40
4.	Sammenfatning	43
5.	Referencer	44

Summary

Measurements have been performed on ventilated solar walls – in total 5 m² - mounted on an exhibition building at Naturcenter Vestamager in Denmark. When the sun shins and the solar walls are able to deliver heat to the building the fans in the bottom of the solar walls start. The fans suck in room air through ducts in the bottom of the solar walls. Heated air is delivered to the room through ducts in the top of the solar walls.

Measurements on the solar walls show that the solar walls perform close to what was expected. The efficiency of the solar walls are in the order of what could be expected considering the actual design and air flow through the solar walls: a start efficiency of 0.41 and a heat loss coefficient of $3.24 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Based on the measurements the annual performance has been calculated to be between 40 and 170 kWh/m² depending on the size of the space heating demand of the building and the start/stop temperature used to control the damper and fans. The expected annual performance was 150-175 kWh/m². The performance of the solar walls in Naturcenter Vestamager has based on the measurements been calculated to 95 kWh/a with a start/stop-temperature of 35° C. If the start/stop-temperature instead was set to 25° C the performance is calculated to be 160 kWh/a – i.e. what was originally expected. In a typical Danish flat from the seventies the annual performance will be around 125 kWh/m² with a start/stop temperature of 25° C.

The designed flow rate through the solar walls was 48 m³/hm² while the actual flow rate was 25 % lower = 36 m³/hm². A higher flow rate would increase the performance. However, the flow should not uncritical be increased as this will lead to an increased electricity consumption of the fans and may introduce problem with noise from the fans.

The solar walls were originally designed with a cover of glass with a very low iron content and a low emissive coating on the absorber. Due to visual reasons this was changed to a cover with a higher iron content and the low emissive coating on the inner side of the glass and a mat black absorber. This led to a lower transmission of solar radiation and a higher heat loss through the cover than in the original design. It is estimated that this has led to a decrease in performance of 8-10%.

Based on the measurements a max stagnation temperature of 130°C is expected. The solar walls are equipped with manual vent-holes in the top and bottom in order to be able to cool the air gap between the cover and absorber with ambient air in the summer. It has not been possible to show any effect of these vent-holes by the measurements. However, the covers consist of tempered glass and the glazing beads are relative warm so there is no risk of thermal tensions in the glass, which will break the glass.

The ventilation ducts in the solar walls have dust deposits after three years of use. This clearly shows that cleaning of the ducts and replacement of the filters at regular intervals are absolutely necessary.

1. Indledning

I forbindelse med opførelsen af Skov- og Naturstyrelsens Naturcenter Vestamager er der blevet installeret to sydvendte solvægge i centrets udstillingsbygning. Figur 1.1 og 1.2 viser udstillingsbygningen med de to solvægge placeret på hver side af glasdøren, mens figur 1.3 viser den solvæg, målingerne er udført på.



Figur 1.1. Naturcenter Vestamagers udstillingsbygning med de to solvægge.



Figur 1.2. Tegning af Naturcenter Vestamagers udstillingsbygning med de to solvægge.



Figur 1.3. Den solvæg målingerne er udført på.

Udstillingsbygningen i Naturcenter Vestamager, der har et bebygget areal på i alt 154 m², er velegnet til placering af solvægge, idet udstillingsrummet (se figur 2.3) med et areal på ca. 115 m² kun får dagslys gennem to glasfløjdøre – den ene er vist på figur 1.1-2 – se også figur 2.3. Solvæggene konkurrerer derfor kun med en relativt beskeden mængde direkte solindfald.

Solvæggene er aktive - forstået på den måde, at der cirkuleres luft i solvæggene ved hjælp af ventilatorer. Ventilatorerne suger rumluft ind i bunden af solvæggene. Luften opvarmes i solvæggen, hvorefter den blæses ind i rummet igen i toppen af solvæggene. Figur 1.4. viser princippet i solvæggene.



Figur 1.4. Princippet i solvæggene i Naturcenter Vestamager,

Solvæggene er beskrevet detaljeret i (Schmidt, 1999). De vil kun kort blive beskrevet her. Figur 1.5 viser et snit i solvæggene. Solvæggene består af (udefra og ind):

- 6 mm hærdet glas med en lavemissiv belægning på indersiden (Kappa Energi Float)
- luftspalte på 12 mm
- 2 mm sort anodiceret aluminiumsplade, der fungerer som absorber
- luftspalte på 20 mm
- bagplade i 1,5 mm galvaniseret stålplade
- 200 mm mineraluld
- 2 x 13 mm gipsplader



Figur 1.5. Lodret snit i solvæg.

Hver af de to solvægge har et transparent areal på ca. 2,5 m² og dermed et samlet transparent areal på 5 m². Solvæggene er ikke helt sydvendte, men orienteret 15° fra syd mod vest.

Figur 1.6 viser et lodret snit i væggen bag en af solvæggene. Figuren viser placeringen af kanalerne i solvæggene. Hver solvæg er delt op i to identiske, men separate solvægge med hvert sit kanalsæt.



Figur 1.6. Lodret snit i bagvæg visende placeringen af ventilationskanalerne i solvæggene.

Der er placeret en lille ventilator i den nederste kanal i hver halvdel af solvæggene. Ventilatorerne er af typen Pabst 4312 L med et effektbehov på 1,2 W. Ventilatorerne var dimensioneret til at yde en luftstrøm på ca. 120 m³/h gennem hver solvæg, dvs. omkring 50 m³/h pr. m² solvæg. I samme kanal som ventilatoren er der placeret et filter. Figur 1.7 viser et snit i den nederste kanal. Ind mod rummet er kanalerne afsluttet med riste af typen Lindab Comfort type C – se figur 1.8.



Figur 1.7. Vandret snit i den nederste kanal.

For at undgå selvcirkulation mellem rum og solvæg, når solvæggen ikke kan levere varme, eller når rummet ikke har behov for varme, er der monteret spjæld i kanalerne både foroven og forneden. Disse spjæld opereres af termostatstyrede spjældmotorer. Spjældmotorernes effektforbrug er ved aktivering af spjældene i alt 4 W, mens hvilespændingen er minimal.

Spjældene er sat til at åbne, når luften i toppen af spalten bag absorberen (T_1 i figur 1.5) er over 35°C (oprindelig designet til 40°C, men for at øge energiudbyttet, blev starttemperaturen sat ned), og hvis temperaturen af luften i indtaget til solvæggene (T_2 i figur 1.5) samtidigt er under 25°C.

Ventilationskanalerne i solvæggen er mod rummet afsluttet med riste som vist på figur 1.8.



Figur 1.8. Den ene solvægs indtag og indblæsninger set fra rummet.

Der er i Danmark kun lidt erfaring med den type luftsolvarmeanlæg, som solvæggene i Naturcenter Vestamager tilhører. For at forøge erfaringsmassen på området blev nærværende måleprojekt bevilget og igangsat.

2. Målesystem

Der er kun målt på den ene af de to solvægge i Naturcenter Vestamager, idet de er identiske og er koblet til samme rum (se figur 2.3). Der blev målt på solvæggen placeret til højre på figur 1.1-2. Da hver af de to solvægge består af to uafhængige og identiske halvdele, blev der kun målt på den ene halvdel af solvæggen.

I figur 2.1 er der vist en principskitse af solvæggene med angivelse af målepunkter.



Figur 2.1. Principskitse af solvæggen med målepunkter.

Der blev målt fire overfladetemperaturer i selve solvæggen: Tre temperaturer bag på absorberen (i de to tredjedelspunkter samt i toppen) og en temperatur midt på bagpladen. Temperaturen af luften til og fra solvæggen blev målt i solvæggens kanaler. Der blev målt to steder i afkastkanalen (henholdsvis øverste og nederste fjerdedelspunkt), idet lufttemperaturen varierer over kanaltværsnittet. Desuden blev lufthastigheden ud af solvæggen målt.

Figur 2.2. viser placeringen af lufthastighedsføleren og de to lufttemperaturfølere i den øverste kanal. Lufthastighedesføleren er placeret horisontalt i nederste fjerdedelspunkt i kanalen.

Rumtemperaturen blev målt bagerst i lokalet set i forhold til væggen med solvæggene som vist i figur 2.3.

Figur 2.4. viser placeringen af solarimeteret og udelufttemperaturføleren. Solarimetret var placeret i plan med solvæggenes dæklag. Ved siden af solarimeter og udelufttemperaturføler var anbragt en overfladetemperaturføler for at kunne registrere temperaturen på overfladen af bygningens almindelige sydvendte facade. Ved at sammenligne denne temperatur med temperaturen på solfangerens bagvæg er det muligt at vurdere, hvor stor en reduktion af varmetabet gennem væggene solvæggene giver anledning til. Væggen bag ved solvæggen er identisk med væggen bag de almindelige facaders træbeklædning.



Figur 2.2. Placeringen af lufthastighedsføler og lufttemperaturfølere i den øverste kanal.



Figur 2.3. Plan over udstillingsbygningen med angivelse af placeringen af solvæggene og rumtemperaturføleren. Vinduet vist i væggen mod vest (højre på figuren) er ikke tilstede i den opførte bygning.



Figur 2.4. Placering af solarimeter, udelufttemperaturføler samt overfladetemperaturføler på den almindelige facade.

2.1. Anvendte måleinstrumenter

Temperaturfølere på absorber og bagvæg

Alle temperaturer på absorberen og bagvæggen bag absorberen er blevet målt med termoelementer type T. Følerne på bagsiden af absorberen er placeret i de to tredjedelspunkter samt i toppen som vist i figur 2.1 og 2.5, mens temperaturen på bagvæggen er målt midt på væggen på den side, der vender mod isoleringen



Figur 2.5. Placering af overfladetemperaturfølere på bagsiden af absorberen.

Lufttemperaturfølere i ind- og udløb

Lufttemperaturen i den øverste og nederste kanal er blevet målt med PT100 klasse A følere.

Der er anvendt to følere i den øverste kanal for at kunne registrere den temperaturstratifikation, der opstår, fordi luften ud af solvæggen ikke er fuldt opblandet. Hvis luftstrømningen er fuldstændig laminar, vil en del af luften kun bestryge absorberen, mens en anden del kun vil bestryge bagvæggen, hvilket vil betyde to luftstrømme med forskellig temperaturstigning over solvæggen. Der vil dog altid ske en vis opblanding på grund af turbulens, men ofte ikke nok til at forhindre en temperaturstratifikation i luftstrømmen ud af solvæggen.

Lufthastighed/volumenstrøm af luft

Det er vanskeligt at måle volumenstrømme af luft gennem en solvæg af den her beskrevne type. I først omgang blev det forsøgt at karakterisere volumenstrømmen ved hjælp af den trykdifferens, ventilatoren skaber over den nederske kanal. Desværre viste dette trykfald sig at være meget fluktuerende bl.a. på grund af vindtryk på dæklaget. Denne målemetode kunne derfor ikke anvendes. I stedet blev en lufthastighedsføler (Schmidt SS 20.502) placeret i den øverste kanal som vist på figur 2.2. Det er dog også vanskeligt at bestemme volumenstrømmen af luft med denne metode, fordi måleinstrumentet kan forstyrre strømningen, der er en varierende lufthastighed over kanaltværsnittet (der normalt kræver flere målinger på tværs af strømningen), samt at lufthastigheden er lav.

I nærværende tilfælde blev én lufthastighedsføler i den øverste kanal kalibreret til at karakterisere volumenstrømmen gennem kanalen. Dette blev gjort ved at sammenholde samhørende værdier målt med lufthastighedsføleren og volumenstrømmen målt ved hjælp af en kalibreret måletragt (AM-1200 fra Wallac), der var tilpasset til kanalåbningen ved hjælp af en papkanal som vist på figur 2.6. Lufthastigheden i måletragten blev målt med en kalibreret lufthastighedssensor (Vela C2-C6-5).



Figur 2.6. Kalibrering af lufthastighedsføleren.

Tidligere anvendelse af denne kalibreringsmetode på en solvæg (Schmidt og Jensen, 1998) har vist, at det trykfald måletragten introducere ikke påvirker kalibreringsresultatet, ligesom

lufthastighedsføleren ikke introducerer en målbar reduktion i volumenstrømmen af luft gennem solvæggen.

Rumtemperatur

Rumtemperaturen blev målt med en standard PT100 klasse B skærmet rumtemperaturføler.

Udelufttemperatur

Udelufttemperaturen blev målt med en PT100 klasse B skærmet føler som vist i figur 2.4. For at skærme temperaturføleren fra solens opvarmning var denne føler placeret i en standardafskærmning bestående af to koncentriske rør med kun ringe termisk kontakt mellem føleren og det inderste rør og mellem de to rør. Det inderste rør var på indersiden sort og på ydersiden blank, mens det yderste rør også var sort på indersiden, men hvid på ydersiden.

Overfladetemperatur på facadens udvendige sydvendte træfacade

Overfladetemperaturen blev målt med en PT100 klasse B føler limet på facaden og malet sort som resten af facaden som vist på figur 2.4. Føleren er ikke skærmet mod solen, så solens opvarmning af overfladen registreres også.

Solindfald

Det totale solindfald på en flade i plan med solvæggene blev målt med et kalibreret solarimeter (Silkeborg Pyranometer 80-HD).

2.2. Opsamling af data

Alle målepunkter blev koblet til en datalogger med moduler fra Analog Devices. Målepunkterne blev scannet hvert 10. sekund og midlet i 10 minutværdier på en PC's harddisk.

Dataloggeren blev styret af PC'en via software't Labteck Control. På PC'ens skærm blev løbende vist øjebliksværdier for samtlige målepunkter.

Ovenstående målesystem plejer normalt at være meget stabilt uden nævneværdige nedbrud. Desværre var det ikke tilfældet for målesystemet i Naturcenter Vestamager. Målesystemet brød jævnligt ned med deraf manglende måledata tilfølge. Nedbrudene skyldtes dels problemer med måle-PC'en dels problemer med dataloggerens målemoduler. En årsag til de mange nedbrud, som dog ikke er verificeret, kan være problemerne med elnettet til naturcentret. I måleperioden faldt el-forsyningen flere gange ud eller blev afbrudt på grund af reparationer. Målenedbrudene har resulteret i, at der ikke har været muligt at opnå sammenhængende måledata for en hel fyringssæson. Dette beskrives nærmere i næste kapitel.

2.3. Behandlig af data

Ved hjælp af dataloggersystemet/PC'en blev de fleste af de målte værdier omsat til forståelige fysiske størrelser som temperaturer og solindfald.

Ved hjælp af kalibreringsudtrykkene er de målte værdier fra lufthastighedsføleren senere blevet omsat til en volumenstrøm af luft, ligesom ydelsen er fundet på baggrund af de målte temperaturer og den beregnede volumenstrøm af luft.

3. Målinger

Målesystemet blev installeret i slutningen af 1997. Men fordi styringen af solvæggene var fejlinstalleret, og fordi en ny udstilling i bygningen krævede en replacering af måleudstyret, kom egentlige målinger på Naturcenter Vestamager først i gang i løbet af foråret 1998.

Som nævnt i forrige kapitel var der store problemer med målesystemet, der normalt plejer at være meget stabilt. Selv om der blev foretaget flere udskiftninger i både datalogger og pc, kom systemet aldrig til at køre stabilt – det vides endnu ikke hvorfor. Det har således ikke været muligt at opnå målinger for en hel fyringssæson. Dvs. det er ikke muligt at bestemme den årlige ydelse for solvæggene direkte ved hjælp af målingerne. I stedet er der ved hjælp af målingerne fundet effektivitetsudtryk for solvæggene, ved hjælp af hvilket, det er muligt at beregne den årlige ydelse for denne type solvægge for forskellige bygningstyper.

Før effektivitetsudtrykket udvikles vil måledata for udvalgte perioder blive behandlet for at skabe et indtryk af, hvordan solvæggene har virket.

3.1. Målinger for udvalgte perioder

I det følgende vises måle data for 3 udvalgte uger:

27. januar – 2 februar, 1999: (dagnummer 27-33)	En uge med fem gråvejrsdage og to solskinsdage. Ude- lufttemperaturer mellem $-9 \text{ og } 3^{\circ}\text{C}$
612. marts, 1999: (dagnummer 65-71)	En uge med tre gråvejrsdag og fire dage med fluktuerende solindfald. Udelufttemperaturer mellem –4 og 11°C.
29. marts – 4. april, 1999: (dagnummer 88-94)	En uge med meget solskin og udelufttemperaturer mellem -3 og 22° C.

De tre udvalgte uger viser således bredden i det danske vejrlig.

- For hver uge er der i det følgende vist seks grafer: 1. Vejrforhold totalt solindfald på solvæggene samt udelufttemperatur
 - 2. Ind- og udløbstemperaturer til solvæggene samt rumtemperatur
 - 3. Absorbertemperaturer
 - 4. Vægtemperaturer
 - 5. Volumenstrøm af luft gennem solvæggene
 - 6. Effekt tilført rummet

3.1.1. Målinger fra perioden 27. januar – 2. februar



Figur 3.1. Totalt solindfald på solvæggene og udeluftemperatur i perioden 27. januar – 2. februar, 1999.



Naturcenter Vestamager

Figur 3.2. Udløbstemperaturer og indløbstemperaturer til solvæggene samt rumtemperaturen i perioden 27. januar – 2. februar, 1999. For betegnelserne "udløb 1 og 2" se figur 2.1.

Figur 3.2, 3.8 og 3.14 viser, at rumtemperaturen i perioden har været meget lav – mellem 13 og 17°C det meste af tiden, undtagen i den sidste periode, hvor udelufttemperaturen i dagtimerne var høj. Den lave temperatur skyldes, at udstillingen på daværende tidspunkt var akvariefisk, der skulle have en lav temperatur. Der var køling på akvarierne. Figur 3.2, 3.8 og 3.14 viser, at selv om det drejer sig om et højloftet rum, hvor det kunne frygtes, at varmen ville

lægge sig under loftet og ikke komme opholdszonen tilgode, så stiger temperaturen i opholdszonen, når solvæggene er i drift.

Disse figurer viser samtidigt en temperaturdifferens mellem det to sensorer i udløbet på op til 5°C, når ventilatoren kører. Dette betyder, at luftstrømningen i spalten bag absorberen ikke er fuldt opblandet. Det er hovedsagelig den yderste del af luftstrømme, der opvarmes af absorberen, mens den inderste del af luftstrømningen opvarmes i mindre grad.



Figur 3.3. Absorbertemperaturer i solvæggene i perioden 27. januar – 2. februar, 1999. For placeringen af absorbertemperaturerne se figur 2.1.



Figur 3.4. Temperaturen på ydersiden af den almindelige væg (se figur 2.4), ydersiden af isoleringen i solvæggen (se figur 2.1) og udelufttemperaturen i perioden 27. januar – 2. februar, 1999.

Figur 3.3, 3.9 og 3.15 viser en temperaturstigning i absorbertemperaturen mellem de to tredjedelspunkter, når solen skinner, på 10-15°C. Figur 3.2, 3.8 og 3.14 viser tilsvarende en total temperaturstigning for luften på 20-25°C. Figur 3.3, 3.9 og 3.15 viser, at absorbertemperaturen i toppen er lavere end i det øverste tredjedelspunkt. Dette må skyldes, at der er en kuldebro i toppen af solvæggene, hvor absorberen er monteret på en aluminiumsramme, der igen har fat i de udvendige afdækningsprofiler. Om natten er de to absorbertemperaturer i tredjedelspunkterne identiske, men absorbertemperaturen i toppen er omkring 3 K højere. Dette indikerer en kuldebro mellem solvæg og rum.



Figur 3.5. Den totale volumenstrøm af luft gennem begge solvægge i perioden 27. januar – 2. februar, 1999.



Figur 3.6. Den totale effekt til rummet fra begge solvægge i perioden 27. januar – 2. februar, 1999.

Figur 3.2, 3.8 og 3.14 indikerer ligeledes et varmetab mellem solvæg og rum - gennem spjældene, idet "udløb 1" er højere end "udløb 2". Dette behandles senere i afsnit 3.3.1.



3.1.2. Målinger fra perioden 6.-12. marts

Figur 3.7. Totalt solindfald på solvæggene og udeluftemperatur i perioden 6.-12. marts, 1999.



Figur 3.8. Udløbstemperaturer og indløbstemperaturer til solvæggene samt rumtemperaturen i perioden 6.-12. marts, 1999. For betegnelserne "udløb 1 og 2" se figur 2.1.

Figur 3.4, 3.10 og 3.16 viser en sammenligning mellem overfladetemperaturen på den almindelige væg (se figur 2.4) og overfladetemperaturn på ydersiden af isoleringen bag solvæggen (se figur 2.1 – sensoren på bagpladen) samt udelufttemperaturen. Disse temperaturer benyttes til en vurdering af besparelsen i transmissionstabet gennem væggene bag solvæggene i afsnit 3.3. Figur 3.4, 3.10 og 3.16 viser, at temperaturen på ydersiden af isoleringen er højere end den udvendige vægtemperatur, når ventilatorerne i solvæggene ikke kører. Dette skyldes et mindre varmetab til udeluften. Men når ventilatorerne kører kontinuerligt, falder overflade-temperaturen på ydersiden af isoleringen i forhold til den udvendige vægtemperatur. Det skyldes, at luftstrømmen mellem absorber og bagplade køler solvæggen.



Figur 3.9. Absorbertemperaturer i solvæggene i perioden 6.-12. marts, 1999. For placeringen af absorbertemperaturerne se figur 2.1.



Naturcenter Vestamager

Figur 3.10. Temperaturen på ydersiden af den almindelige væg, ydersiden af isoleringen i solvæggen (se figur 2.1) og udelufttemperaturen i perioden 6.-12. marts, 1999.

Figur 3.5, 3.11 og 3.17 viser, at volumenstrømmen af luft gennem begge solvægge tilsammen ligger mellem 170 og 200 m³/h med en middelværdi på 181 m³/h. Dette er noget under den dimensionerende volumenstrøm på 240 m³/h, og skyldes et forøget trykfald i de aktuelle solvægge i forhold til de forventede trykfald ved dimensioneringen af solvæggene. Lavere volumenstrømme – f.eks. for dag nr. 71, figur 3.11 – skyldes, at måledataene foreligger som midlede 10. minutersværdier. Dvs. ventilatorerne har her ikke kørt i hele perioden på 10 minutter (middelværdien af nogle minutter med ingen luftstrøm og nogle minutter med luftstrøm på omkring 180 m³/h bliver da et sted mellem 0 og 180 m³/h, som det f.eks. ses for dagnr. 70 sidst på eftermiddagen – figur 3.11).



Figur 3.11. Den totale volumenstrøm af luft gennem begge solvægge i perioden 6.-12. marts, 1999.



Figur 3.12. Den totale effekt til rummet fra begge solvægge i perioden 6.-12. marts, 1999.

Figur 3.6, 3.12 og 3.18 viser, at den tilførte effekt til rummene fra de to solfangere tilsammen ved klart solskin ligger på omkring 1400 W med et maksimum på lige under 1600 W d. 3. april 1999 – figur 3.19, dagnr. 93. På dage med klart vejr var det totale solindfald på omkring 800 W/m². Effektiviteten vil da være lige omkring 35%, da det transparente areal er 2 x 2,5 m². I denne beregning er der dog ikke taget hensyn til, at indfaldsvinklen for solindfaldet ikke er 0°. Solvæggenes effektivitet behandles nærmere i afsnit 3.2.

3.1.3. Målinger fra perioden 29. marts – 4. april



Figur 3.13. Totalt solindfald på solvæggene og udeluftemperatur i perioden 29. marts – 4. april, 1999.



Figur 3.14. Udløbstemperaturer og indløbstemperaturer til solvæggene samt rumtemperaturen i perioden 29. marts – 4. april, 1999. For betegnelserne "udløb 1 og 2" se figur 2.1.



Figur 3.15. Absorbertemperaturer i solvæggene i perioden 29. marts – 4. april, 1999. For placeringen af absorbertemperaturerne se figur 2.1.



Naturcenter Vestamager udeluft- og ydervægstemperaturer

Figur 3.16. Temperaturen på ydersiden af den almindelige væg, ydersiden af isoleringen i solvæggen (se figur 2.1) og udelufttemperaturen i perioden 29. marts – 4. april, 1999.



Figur 3.17. Den totale volumenstrøm af luft gennem begge solvægge i perioden 29. marts – 4. april, 1999.



Figur 3.18. Den totale effekt til rummet fra begge solvægge i perioden 29. marts – 4. april, 1999.

3.2. Solvæggenes effektivitet

Det er vanskeligt at fastlægge effektiviteten af solfangere ved in-situ målinger. Det er dels svært at opnå stationære forhold, dels sker solindfaldet på solfangeren under varierende ind-faldsvinkler, desuden er en stor del af solindfaldet ofte diffust (der traditionelt behandles som havende en konstant indfaldsvinkel på 60°C).

I nærværende projekt er der kun målt den totale solindstråling på solvæggene. Det er derfor nødvendigt først at splitte totalindstrålingen op i direkte og diffust solindfald og derefter at omregne solindfaldet til et ækvivalent solindfald med en indfaldsvinkel på 0°.

Totalindtrålingen er blevet opsplittet i direkte og diffust soindfald ved hjælp af ligningerne i (Duffie og Beckman, 1991). Herefter er indflydelsen af indfaldsvinklen (refleksion i dæklagets overflade og øget absorption igennem dæklaget) behandlet ved at multiplicere med korrektionsfaktoren:

 $k=1 - tan^{a}(\theta/2)$ hvor θ er indfaldsvinklen for solstrålingen og a er 3,7 for et dæklag med ét lag glas (Nielsen, 1995).

Korrektionsfaktoren er vist grafisk i figur 3.19. Korrektionsfaktoren multipliceres med solindfaldet – for den aktuelle indfaldsvinkel for det direkte sollindfald og for en indfaldsvinkel på 60° for det diffuse solindfald.



Figur 3.19. Korrektionsfaktor for indfaldsvinklen af solens stråler på solvæggens dæklag.

Effektiviteten af solfangere fastlægges traditionelt som en funktion af den reducerede temperaturdifferens (= differencen mellem middeltemperaturen af fluiden i solfangeren og udelufttemperaturen divideret med solindfaldet vinkelret på solfangerens dæklag). Effektiviteten af solvæggene i Naturcenter Vestamager bør derfor fastlægges på samme måde, idet solvæggene ved solindfald fungerer som luftsolfangere, der opvarmer rumluft. Dette er vist i figur 3.20, hvor måledata fra perioden 25. september, 1998 – 11. april, 1999 er anvendt. I figuren er også indtegnet et eksempel på effektiviteten for en traditionel luftsolfanger (Bosanac og Jensen, 1997).

Figur 3.20 viser også en regressionslinie fundet på basis af målingerne. Som det ses, har den fundne effektivitetskurve en helt anden form end forventet. I stedet for at falde med $\Delta T/I$ stiger den. Dette skyldes de dynamiske forhold, effektiviteten er fundet under. Dette vises i figur 3.21-22.



Figur 3.20. Solvæggens effektivitet vist på den traditionelle måde til præsentation af solfangeres effektivitet. Til sammenligning er også vist effektiviteten for en traditionel luftsolfanger (Bosanac og Jensen, 1997).
 T_m er luftens aritmetiske middeltemperatur, T_a er udelufttemperaturen og

I er det korrigerede solindfald.

I figur 3.21 er effektiviteterne fra figur 3.20 vist som funktion af tidspunktet på dagen, mens figur 3.22 viser effektiviteterne som funktion af det korrigerede solindfald.



Figur 5.21. Solvæggens effektiviteter vist som funktion af det tidspunktet på dagen, hvor de er målt.



Figur 3.22. Solvæggens effektiviteter vist som funktion af det korrigerede solindfald, de er målt ved.

Som det ses af figur 3.21-22, optræder de høje effektiviteter primært sidst på dagen og ved lave solindfald. Dette viser, at afvigelsen af solvæggens effektivitet fra det normale udseende af en effektivitetsligning skyldes en kombination af de dynamiske forhold effektiviteterne er målt under og solvæggens varmekapacitet. De høje effektiviteter optræder, når solindfaldet mindskes – f.eks. sidst på dagen eller når en sky går for solen. Solvæggene er da varme. På grund af varmekapaciteten afkøles de langsommere end solindfaldet reduceres. Der overføres her varme fra solvæggenes materialer til luftstrømmen, hvorved effekten ud af solfangeren kun langsomt reduceres – langsommere end solindfaldet.

Standarden for udendørs bestemmelse af solfangeres stationære effektivitet (ISO, 1994) angiver, at denne skal måles ved et solindfald større end 800 W/m² og en indfaldsvinkel på under 30°. Det er muligt at finde effektiviteter ved korrigerede solindfald over 800 W/m², men med en lodret placering er indfaldsvinklen i de fleste af målingerne større end 30°. Dette løses dog ved at benytte det korrigerede solindfald i stedet for det totale solindfald på solvæggene.

Figur 3.23 viser effektiviteterne, der overholder ovenstående kriterier for måling af den stationære effektivitet. Antallet af målepunkter er her reduceret fra 612 (i figur 3.20) til 32 (i figur 3.23). I figuren er ligesom i figur 3.20 indtegnet effektiviteten for en traditionel luftsolfanger. Der er også indtegnet en kurve for solvæggene i Vestamager. Denne kurve kan ikke udledes direkte udfra måledataene i figur 3.23. Der er også en for lille spredning i den reducerede temperaturdifferens til at anvende metoden i (Bosanac og Jensen, 1997). I stedet for er effektivitetsligningen udledt ved hjælp af målepunkterne i figur 3.23 i kombination med kurvens skæring med x-aksen. Skæringen med x-aksen er fundet ud fra stagnationstemperaturen for solvæggene fastlagt ved hjælp af målinger foretaget i december 1997, hvor styringen af solvæggene var forkert installeret, så der ikke var en volumenstrøm af luft gennem solvæggene. Korrigeret solindfald, udelufttemperatur og absorbertemperaturerne i tredjedelspunkterne er vist i figur 3.24-25 for to dage i december 1997. På grund af det lille datagrundlag, er det fundne effektivitetsudtryk dog behæftet med en relativ stor usikkerhed.



Figur 3.23. Samme situation som i figur 3.20, men kun med målepunkter, hvor den korrigerede solindfald var over 800 W/m².



Figur 3.24. Korrigeret solindfald og udelufttemperatur for perioden 16.-17. december 1997.

Da der ikke var volumenstrøm af luft gennem solvæggene i perioden vist i figur 3.24-25, er de viste absorbertemperaturer meget tæt på stagnationstemperaturen for solvæggene. Middelstagnations-temperaturen for solvæggene er da middelværdien af de to viste absorbertemperaturer. Den reducerede stagnations-temperaturdifferens findes derefter ved at fratrække udelufttemperaturen og dividere med det korrigerede solindfald. Middelværdien af den reducerede stagnationstemperatur for korrigerede solindfald over 800 W/m² er herefter fundet til 0,127 Km²/W. Denne værdi er i figur 3.23 sammen med middelværdien af målepunkterne (31,1% ved 0,023 Km²/W) anvendt til at finde effektligningen og –kurven i figur 3.23.



Figur 3.25. Absorbertemperaturer og udelufttemperatur for perioden 16.-17. december 1997.

Effektivitetsudtrykket for solvæggene i Naturcenter Vestamager er således fundet til:

 $\eta = 0.41 - 3.24 \cdot (T_m - T_a)/I$

Figur 3.23 viser, at effektiviteten for solvæggene i Naturcenter Vestamager er en del lavere end for solfangeren i (Bosanac og Jensen, 1997). Dette er ikke underligt, da solfangeren i (Bosanac og Jensen, 1997) er en højeffektiv solfanger med lavemissiv belægning på absorberen og finner ned i luftstrømmen bag absorberen som vist i figur 3.26. Desuden er effektiviteten for solfangeren i figur 3.26 fundet ved en volumenstrøm af luft gennem solfangeren på 74 m³/hm² mod en volumenstrøm gennem solvæggen i Naturcenter Vestamager på ca. 34 m³/hm². Volumenstrømmen af luft har meget stor indflydelse på luftsolfangeres effektivitet på grund af den lave varmeoverføringsevne mellem absorber og luft. Yderligere har solfangeren i (Bosanac og Jensen, 1997) jernfrit glas mod solvæggenes jernholdige glas, og solfangeren i (Bosanac og Jensen, 1997) har en selektiv belægning på absorberen, mens den er på dæklaget i solvæggene – dette reducerer transmittansen af solsttrålingne og øger varmetabet. Et hurtigt overslag viser, at ca. 20 % af forskellen mellem solfangeren i (Bosanac og Jensen, 1997) og solvæggene i Naturcenter Vestmager stammer fra forskellen i dæklag/absorberbelægning, mens den resterende forskel ligeligt skyldes lavere volumenstrøm og mangel på finner i solvæggene i Naturcenter Vestamager.



Figur 3.26. Den anvendte absorber i solfangeren fra (Bosanac og Jensen, 1997). Absorberen består af ekstruderede aluminiumsprofiler (Mørck et al, 1993).

3.3. Solvæggenes ydelse

I forrige afsnit blev effektiviteten af solvæggene bestemt. I dette afsnit vil den årlige ydelse for denne type solvægge blive fastlagt.

Det har ikke været muligt i nærværende projekt at opbygge en detaljeret model af solvæggene, der tager hensyn til solvæggenes varmekapacitet, da det var et måleprojekt og ikke et beregningsprojekt. Det er vanskeligt og tidskrævende at opbygge og validere en detaljeret model af et solvarmeanlæg. I stedet forsøges der med en simpel model, udelukkende bestående af den fundne effektivitetsligning.

I modellen anvendes middelværdien af den samlede volumenstrøm af luft i måleperioden gennem solvæggene på 181 m³/h. I modellen er det desuden nødvendigt at kende start/stoptemperaturen for ventilatorerne, da modellen skal kunne bestemme, hvornår ventilatorerne kører. Figur 3.27 viser udløbstemperaturen fra solvæggene til rummet for samme periode som vist i figur 3.13.



Figur 3.27. Udløbstemperaturen af luften fra solvæggene til rummet, når ventilatorerne kører.

Figur 3.27 viser en starttemperatur på omkring 32° C og en stoptemperatur, der er lidt højere – altså lidt lavere end hvad termostaternes skala viste (35° C). I første omfang anvendes en stop/start-temperatur i modellen på 32° C.

Figur 3.28 viser en sammenligning mellem målte og beregnede effekter til rummet for samme periode som vist i figur 3.27. Som det ses, er der meget ringe overensstemmelse mellem model og målinger. I beregningerne starter ventilatorerne for sent og stopper for tidligt, da der ikke drages nytte af den solstråling, der har opvarmet solvæggene før ventilatorstart, og da den varme, der akkumuleres i solvæggene under drift, ikke medvirker til forlængelse af ventilatorernes drifttid. Den beregnede energimængde ud af solvæggene (arealet under kurverne) udgør i perioden kun 36% af den målte energimængde. For klare solskinsdage (dagnr. 88-89) udgør den beregnede energimængde 57% af den målte energimængde, mens der på en dårlig dag (dagnr. 90) ikke beregnes nogen tilført energimængde.

For alle måleperioderne i 1999 udgør den beregnede energimængde tilført rummet kun 32% af den målte energimængde. Udelukkelse af den termiske masse i beregningerne giver altså et helt forkert resultat.



Naturcenter Vestamager

Figur 3.28. Sammenligning mellem målte og beregnede effekter ud af solvæggene, hvor effektivitetsudtrykket på side 29 lægges til grund for beregningerne, og hvor der ikke tages hensyn til den termiske masse i solvæggene.

Derfor forsøges med en anden beregningsform, hvor regressionsudtrykket for effektiviteterne i figur 3.22 anvendes, idet den termiske masse her implicit indgår. Dog vil denne model give for høje ydelser først på dagen og for lave midt på dagen, men forventes at passe godt sidst på dagen. Det anvendte regressionsudtryk er:

$$\eta = 74.857 \, \cdot \, e^{\text{-}0.0011 \, \cdot \, det \; korrigerede \; solindfald}$$

Figur 3.29 viser regressionslinien sammenholdt med de målte effektiviteter.

Figur 3.30 viser en sammenligning mellem målte effekter og effekter beregnet med ovenstående effektivitetsudtryk.

Som det ses, er der nu væsentlig bedre overensstemmelse mellem målte og beregnede effekter. Den beregnede energimængde ud af solvæggene udgør i perioden 90% af den målte energimængde. For klare solskinsdage (dagnr. 88-89) er den beregnede energimængde 2% højere end den målte energimængde, mens den beregnede energimængde på en dårlig dag (dagnr. 90) udgør 80% af den målte energimængde.

For alle måleperioderne i 1999 udgør den beregnede energimængde tilført rummet 95% af den målte energimængde. En forskel på 5% er mindre end måle/beregningsusikkerheden.

Modellen vurderes på dette grundlag at være tilstrækkelig god til at kunne anvendes ved beregning af den årlige ydelse for denne type solvæg i forskellige bygninger.



Figur 3.29. Solvæggens effektiviteter vist som funktion af det korrigerede solindfald, de er målt ved samt regressionslinien på baggrund af udtrykket på side 31.



Figur 3.30. Sammenligning mellem målte og beregnede effekter ud af solvæggene, hvor effektivitetsudtrykket på side 31 lægges til grund for beregningerne, og som implicit tager hensyn til den termiske masse i solvæggene.

Ydelsen for solvæggen placeret i en bygning er afhængig af bygningens aktuelle rumopvarmningsbehov – jo højere rumopvarmningsbehov, jo højere ydelse. For at beregne ydelsen er det derfor nødvendigt med et timebaseret opvarmningsbehov. Dette kendes ikke for udstillingsbygningen i Naturcenter Vestamager. I stedet er anvendt rumopvarmningsbehovene for tre boliger fra IEA Task 19, Solar Air Systems (Hastings and Mørck, 1999). Boligerne er identiske men har forskellig isoleringsgrad. Det årlige opvarmningsbehov er 5.340, 10.620 og 24.340 kWh. Boligerne er på 100 m². Der er valgt at anvende rumopvarmningsbehov for boliger, idet det da er muligt at sammenligne med beregningerne i (Gramkow et al, 1999), hvor ydelsen for flere forskellige typer solvægge er beregnet med tsbi3 (Johnsen et al, 1993 og Wittchen, 1996).

Ved beregningen af ydelsen af solvæggene i de tre boliger, sammenlignes den beregnede ydelse ud af solvæggene med rumopvarmningsbehovet. Hvis ydelsen er større end behovet, reduceres ydelsen til at være lig behovet. Solvæggene servicerer primært den sydlige del af boligerne, hvor den er placeret, men også en del af det nordlige rumopvarmningsbehov dækkes, da der ofte er udsugningsventilation fra køkken og bad, der traditionelt er placeret i den nordlige del af boligen. Derved suges varme fra stue til køkken/bad. Dog vil soveværelser ofte ikke indgå i dette luftskifte. Behovet defineres derfor som hele rumopvarmningsbehovet for den sydlige del af boligen og halvdelen af rumopvarmningsbehovet for den nordlige del.

Forudsætningerne i beregningerne er som i Naturcenter Vestamager: 5 m² transparent areal, volumenstrøm af luft gennem solvæggene: 180 m³/h, start/stop-temperatur: 32°C. Dog er der også udført kørsler med en start/stop-temperatur på 25°C. Desuden anvendes det danske referenceår TRY (Statens Byggeforskningsinstitut, 1982). Resultaterne af simuleringerne er vist i figur 3.31



Figur 3.31. Den årlige ydelse for solvæggene afhængig af det totale rumopvarmningsbehov for den bolig, de er monteret på.

Figur 3.31 viser som ventet en stærk afhængighed af rumopvarmningsbehovet samt en endnu stærkere afhængighed af start/stop-temperaturen. Det sidste er ikke uventet. Ved en lavere start/stoptemperatur, får solvæggene mulighed for at starte tidligere og stoppe senere, hvilket forøger solvæggenes ydelse. Kurven for start/stop-temperaturen på 25 °C er dog behæftet med en større usikkerhed end kurven for 32°C, da modellen ikke er kalibreret på baggrund af må-

ledata, hvor start/stop-temperaturen var 25°C. Usikkerheden vurderes dog ikke at være højere end, at figur 3.31 giver et rimeligt billede af afhængigheden af start/stop-temperaturen.

Figur 3.31 viser årlige ydelser mellem 40 og 170 kWh/m² solvæg. Rumopvarmingsbehovet for udstillingsbygningen i Naturcenter Vestamager er på baggrund af varmetabsberegninger anslået til 20.000 kWh/år. Dvs. den årlige ydelse for solvæggene vil ligge mellem 95 og 160 kWh/m² solvæg afhængig af start/stop-temperaturen. På designtidspunktet var der forventet en ydelse på 150-175 kWh/m² (Schmidt, 1999). Solvæggene lever således med en start/stop-temperatur på 25°C op til forventningerne.

Som det ses af figur 3.2, 3.8 og 3.14 var rumtemperaturen i udstillingsbygningen mellem 15 og 20°C. Man kunne derfor frygte, at den simple model ikke kan anvendes, når rumtemperaturen er 20°C, som er anvendt som indløbstemperatur til solvæggene i figur 3.31. Figur 3.32 viser de målte effektiviteter som funktion af differencen mellem indløbstemperaturen og udelufttemperaturen.



Figur 3.32. Solvæggens effektivitet vist som funktion af differencen mellem indløbstemperaturen og udelufttemperaturen.

Figur 3.32 viser kun ringe afhængighed af differencen mellem indløbstemperaturen og udelufttemperaturen (regression giver en næsten vandret linie), hvilket viser, at den simple model også kan anvendes ved en indløbstemperatur på 20°C.

Til ydelsen i figur 3.31 hører også reduktionen i varmetabet gennem væggen, hvor solvæggene er monteret foran. Denne besparelse beregnes i det følgende, idet den indgår i ydelserne i (Gramkow et al, 1999), som ydelsen for solvæggene i Naturcenter Vestamager vil blive sammenlignet med.

I Naturcenter Vestamager er der målt temperaturer på ydersiden af isoleringen bag solvæggen og på ydersiden af den almindelige facade ved siden af solvæggene – se figur 2.1 og 2.4. Dvs. det er muligt direkte at udtale sig om den ændring i væggens overfladetemperatur, som sol-

væggene har givet anledning til. Ændringen i overfladetemperaturen er dog afhængig af, om solen skinner eller ej. Hvis solen ikke skinner, vil overfladetemperaturen på den almindelige væg være lavere end bag solvæggen, da væggen bag solvæggen er beskyttet af solvæggens dæklag og absorber. Men når solen skinner, og solvæggenes ventilatorer kører, vil væggen bag solvæggen ofte være koldere end den almindelige overflade, da væggen bag solvæggene køles af den rumluft, der cirkuleres i solvæggene. Ovenstående er vist i figur 3.33-34, hvor figur 3.33 viser differencen mellem overfladetemperaturen på væggen bag solvæggen og den almindelige facade som funktion af udelufttemperaturen for perioder uden solindfald, mens figur 3.34 viser den samme differens som funktion af det korrigerede solindfald for perioder med solindfald.



Figur 3.33. Differencen mellem overfladetemperaturen på væggen bag solvæggen og den almindelige facade som funktion af udelufttemperaturen for perioder uden solindfald.

Figur 3.33 viser som forventet, at overfladetemperaturen bag solvæggen er højere end overfladetemperaturen på den almindelige facade i perioder uden solindfald. "Tungerne" med højere temperaturdifferencer fremkommer på dage efter højt solindfald, hvor solvæggene stadig er varme, når solen går ned.

Figur 3.34 viser, at ved små solindfald, hvor ventilatorerne ikke kører, er overfladetemperaturen bag solvæggene højere end overfladetemperaturen på den almindelige facade, mens dette er omvendt, når ventilatorerne kører ved højt solindfald, hvor overfladen bag solvæggene køles af luftstrømmen.

Figur 3.33-34 viser, at der ikke eksisterer en simpelt korrelation mellem de to overfladetemperaturer og udelufttemperatur eller solindfald. Forskellen mellem de to overfladetemperaturer er desuden i høj grad afhængig af de aktuelle vindforhold, hvilket ikke er blevet målt på Naturcenter Vestamager. I stedet anvendes målingerne. Middeludelufttemperaturen i de opnåede målinger er 4°C, hvilket er det samme som i opvarmningssæsonen i det danske referenceår TRY. Det antages derfor, at målingerne er repræsentative for hele året. Middeltemperaturen for overfladen bag solvæggene er i målingerne 10,5°C, mens middeltemperaturen på den almindelige facade var 7,6°C. Dvs. overfladen bag solvæggene har således i gennemsnit en 2,9 K højere tempertur end den almindelige facade.

Med en U-værdi på ca. 0,2 W/m²K (væggene i Naturcenter Vaestamager), giver det en besparelse på ca. 3 kWh/m² - hvilket er ubetydeligt. For de vægge, der er anvendt i (Gramkow et al, 1999) med en U-værdi på 0,6 W/m²K vil besparelsen være i størrelsesordenen 10 kWh/m².



Figur 3.34. Differencen mellem overfladetemperaturen på væggen bag solvæggen og den almindelige facade som funktion af det korrigerede solindfald for perioder uden solindfald.

I (Gramkow et al, 1999) er der regnet på en lejlighed med et opvarmningsbehov på ca. 8.000 kWh/år og ligeledes med et solvægsareal på 5 m². Solvæggen er ikke identisk med solvæggen et i Naturcenter Vestamager, idet der er tale om solvægge med naturlig ventilation og et andet dæklag (tolags termorude med jernfrit glas). (Gramkow et al, 1999) angiver den årlige ydelse for en sådan solvæg til 54 kWh/m².

Ved aflæsning i figur 3.31 ved et rumopvarmningsbehov på 8.000 kWh/år findes en ydelse på 65 og 125 kWh/m² pr. år for en start/stop-temperatur på henholdsvis 32 og 25°C. Hertil skal lægges 10 kWh/m² pr. år som følge af sparet varmetab gennem væggen bag solvæggene. Solvæggene i Naturcenter Vestamager yder således væsentligt mere end solvæggen i (Gramkow et al, 1999). Det skyldes den bedre varmeovergang mellem absorber og luft som følge af en højere volumenstrøm af luft gennem solvæggene i Naturcenter Vestamager. Ydelsen fra solvægge med cirkulerende luft er meget afhængig af volumenstrømmen gennem solvæggene, idet varmeovergangen mellem absorber og luft falder drastisk ved en reduktion af volumenstrømmen af luft.

3.3.1. Varmetab gennem spjæld

Som nævnt i afsnit 3.1.1. antyder figur 3.2, 3.8 og 3.14, at der foregår et varmetab gennem spjældene, idet "udløb 1" (se figur 2.1) er højere end "udløb 2", når der ikke er solindfald. "udløb 1 og 2" er her altid lavere end rumtemperaturen. Det formodes derfor, at der er et varmetab gennem spjældene, idet der er en strøm af rumluft ind foroven i kanalerne og ud forneden i kanalerne, som bestryger spjældene.

Det er ikke muligt at bestemme dette varmetab. I et igangværende UVE-projekt "Bestemmelse af varmetab fra spjæld i solvægge", journal nr. 51181/98-0015, der forventes færdig med udgangen af 1999, vil betydningen af varmetabet fra spjæld i solvægge blive fastlag under kontrollerede laboratorieforhold, og der vil blive givet retningslinier for bestemmelse af dette varmetab i konkrete solvægge.

Varmetabet fra spjældene i Naturcenter Vestamager vurderes at kunne være i samme størrelsesorden eller højere end besparelsen i varmetabet gennem væggen bag solvæggene. Figur 3.35 indikerer dog, at varmetabet ikke er så stort, idet figuren viser et billede af en af solvæggene en frostklar morgen, hvor solen endnu ikke har ramt solvæggene. Billedet viser rim på ydersiden af solvæggenes dæklag. Hvis varmetabet gennem spjældene var høje, ville der ikke være rim på dæklaget. Effekten af varmetabet gennem spjældene bliver reduceret af, at der er en absorber mellem spjæld og dæklag, og at der er en lavemissiv belægning på indersiden af dæklaget.



Figur 3.35. Billede af en af solvæggene med rim på ydersiden af dæklagene en frostklar morgen.

3.3.2. Elforbrug

Der er ventilatorer i solvæggene i Naturcenter Vestamager, der ligesom spjældene drives med elektricitet. Ved hjælp af programmet til bestemmelse af den årlige ydelse for solvæggen er elforbruget til solvæggene fastlagt. Elforbruget udgør mellem 0,5 og 1 kWh/m² pr. år. Dvs. mellem 0,5 og 1,3% af solvæggenes ydelse, hvilket er ubetydeligt. Det lave elforbrug skyldes et design med et bevidst lavt trykfald over solvæggene.

3.4. Varmekapacitet

Som vist tidligere, er solvæggenes varmekapacitet en vigtig faktor for ydelsen. Varmekapaciteten vil derfor blive bestemt i det følgende for at muliggøre en eventuel senere mere detaljeret modellering af solvæggene. Solvæggenes varmekapacitet består af en større eller mindre del af varmekapaciteten af dæklaget, absorberen, bagpladen, isoleringen samt kantlisterne.

Til beregning af varmekapaciteten anvendes samme metode, som SolEnergiCenter Danmark, Teknologisk Institut anvender til bestemmelse af væskesolfangeres varmekapacitet (ISO, 1994).

Del af solvæggene	Vægtningsfaktor
Dæklag	$0,01 \cdot F' \cdot U^{(1)}$
Absorber	1
Bagplade	1
Isolering	$0,5^{(2)}$
Kantlister	1

Tabel 3.1. Vægtningsfaktorer til bestemmelse af solvæggenes varmekapacitet.

¹⁾ $F' \cdot U$ er anden konstant i effektivitetsligningen i figur 3.23 – dvs. 3,24.

²⁾ Tykkelsen af isoleringen i solfangere er normalt omkring 0,05 m. I solvæggene i Naturcenter Vestamager er tykkelsen af isoleringen 0,2 m. Kun en del af denne isolering indgår i solvæggenes varmekapacit – der antages 0,05 m.

I direkte kontakt med absorberen er der to aluminiums-firkantrør, der skaber afstanden mellem dæklag/absorber og absorber/bagplade. Dimensionen for disse rør er 20 x 10 mm² og 12 x 12 mm² med en godstykkelse på 1 mm. I alt er der ca. 3.5 m af disse rør pr. m² solvæg. Varmekapaciteten for solvæggen er vist i tabel 2.

Del af solvæggene	Varmekapacitet
	kJ/m²K
Dæklag	0,5
Absorber	5,0
Bagplade	5,7
Isolering	0,5
Kantlister	0,9
I alt	12,6

Tabel 2.Solvæggenes varmekapacitet.

Varmekapaciteten for solvæggene er mere end 2 gange så høj som en traditionel væskeabsorber med en strip-absorber (inkl. væske). Det skyldes den tykke absorber (2 mm) og bagpladen (1,5 mm). Solvæggene er dog termisk lette set i forhold til solvægge, hvor en tegl- eller betonmur udgør absorberen.

3.5. Stagnationstemperaturer

Dataloggersystemet blev sat i gang igen i juni/juli 1999 for at kunne fastlægge solvæggenes stagnationstemperaturer samt for at fastlægge effekten af de manuelle udluftningsspjæld, solvæggene udvendigt foroven og forneden er udstyret med – se figur 3.36. Udluftningesventilerne åbner små spalter indtil spalten mellem dæklaget og absorberen. Hensigten med dette var at muliggøre køling solvæggen ved hjælp at en selvcirkulerende volumenstrøm af udeluft.



Figur 3.36. Udluftningsventiler til køling af solvæggene om sommeren.

Figur 3.37 viser stagnationstemperatur-differencen for solvæggen i perioden 24. juni – 18. juli, 1999 som funktion af det korrigerede solindfald. Stagnationstemperatur-differencen er differencen mellem absorbertemperaturen i det øverste tredjedelspunkt (figur 2.1) og udeluft-temperaturen. Der var i denne perioden ingen volumenstrøm mellem bygning og solvægge.

Det korrigerede solindfald på solvæggene vil maksimalt andrage 800 W/m² om sommeren. Dette medfører ifølge figur 3.37 en stagnationstemperatur-differens på omkring 100 K, hvilket en varm sommerdag med en udelufttemperatur på 30°C vil bringe stagnationstemperaturen op på 130°C. Det samme resultat fremkommer ved anvendelse af effektivitetsudtrykket på side 29. Skæringen med x-aksen i figur 3.23 er 0,127 Km²/W, hvilket med et korrigeret solindfald på 800 giver en stagnationstemperatur-differens på lige over 100 K. En klar vinterdag med et korrigeret solindfald på 1000 W/m², vil stagnationstemperatur-differensen komme op på 125-130 K, men til gengæld vil udelufttemperaturen være omkring 0°C. Stagnationstemperaturen vil da også være i størrelsesordenen 130°C, hvilket er observeret en klar vinterdag.



Figur 3.37. Stagnationstemperatur-differencen for solvæggen i perioden 24. juni – 18. juli, 1999 som funktion af det korrigerede solindfald.

Figur 3.38 viser effekten af udluftningsventilerne i solvæggen. Til denne måling er placeringen af udløbstemperaturen i solvæggen – "udløb 1 og 2" i figur 2.1 ændret. Den ene føler er flyttet om på den anden side af spjældet (dvs. ind mod absorberen) i en solvæg med udluftningsventilerne lukket, mens den anden føler har fået en tilsvarende placering i en solvæg, hvor udluftningsventilerne var åbne. I figur 3.38 er differencen mellem disse to temperaturer vist som funktion af korrigeret solindfald. Differencen er temperaturen i solvæggen med lukkede udluftningsventiler minus temperaturen i solvæggen med åbne udluftningsventiler.

Figur 3.38 viser, at udluftningsventilerne tilsyneladende ingen effekt har. Differencen er næsten lige så ofte under som over 0 K.

Figur 3.38 tyder således på, at udluftningsventilerne har et for lille åbningsareal/for stor trykfald til at kunne skabe en tilstrækkelig volumenstrøm af udeluft til at køle solvæggene. Men da der er anvendt hærdet glas som dæklag, vil en stagnationstemperatur på 130°C ikke lede til brud på glasset. Men da solvæggene vender direkte ud mod en terrasse, hvor folk kan opholde sig, kan den høje stagnationstemperatur måske give anledning til problemer, idet glastemperaturen på trods af den lavemissive belægning ofte vil være høj.

3.6. Rengøring

Solvæggene er som vist i figur 1.7 udstyret med et filter i den nederste kanal, hvor også ventilatoren er placeret. Figur 3.39 viser et billede af denne kanal 3 år efter installation og uden rengøring. Billedet viser en koncentreret støvbelægning på specielt ventilatoren. Det er således yderst vigtigt, at denne kanal bliver rengjort og filteret skiftet regelmæssigt.



Figur 3.38. Differencen mellem lufttemperaturen i toppen af en solvæg med lukkede udluftningsventiler og lufttemperaturen i toppen af en solvæg med åbne udluftningsventiler.



Figur 3.39. Billede af den nederste kanal i en af solvæggene.

Figur 3.40 viser et billede af den øverste kanal i en af solvæggene, ligeledes efter 3 år og uden rengøring. Billedet viser også støvansamling i kanalen. Dette burde ikke være muligt, da luften inde i solvæggen filtreres. Støvet kan enten være støv fra opførelsen eller støv, der er ført ind i kanalen som følge af luftstrømmen skabt af varmetabet over spjældet som beskrevet i

afsnit 3.3.1. Denne kanal bør derfor holdes under opsyn og om nødvendigt rengøres med jævne mellemrum.



Figur 3.40. Billede af den øverste kanal i en af solvæggene.

4. Sammenfatning

Der er gennemført målinger på to ventilerede solvægge – i alt 5 m² - monteret i en udstillingsbygning i Naturcenter Vestamager. Når solen skinner, og solvæggene kan levere varme, starter ventilatorer i bunden af solvæggene, der suger rumluft ind i solvæggene. Den opvarmede luft kastes ind i rummet i toppen af solvæggene.

Målingerne på solvæggene viser, at solvæggene stort set fungerer som forventet. Effektiviteten af solvæggene er i den størrelsesorden som kunne forventes under hensyntagen til den aktuelle opbygning og den aktuelle volumenstrøm af luft gennem solvæggene: En starteffektivitet på 0,41 og en varmetabskoefficient på 3,24 W/m²K.

På baggrund af målingerne er den årlige ydelse for solvæggene beregnet til at ligge mellem 40 og 170 kWh/m² afhængig af størrelsen af rumopvarmningsbehovet, som solvæggene er med til at dække og den start/stop-temperatur, der anvendes til styring af spjæld og ventilatorer. Den forventede årlige ydelse på designtidspunktet var 150-175 kWh/m² (Schmidt, 1999). Ydelsen for solvæggene i Naturcenter Vestamager er på baggrund af målingerne beregnet til 95 kWh/år med en start/stop-temperatur på 35°C. Hvis start/stop-temperaturen i stedet havde været 25°C, er ydelsen beregnet til 160 kWh/år – dvs. som oprindelig anslået. I en typisk '70'er lejlighed vil ydelsen være omkring 125 kWh/m² med en start/stop-temperatur på 25°C.

Solvæggene var designet til at have en volumenstrøm af luft på 48 m³/hm², men den faktiske volumenstrøm var 25% lavere = 36 m³/hm². En større volumenstrøm af luft gennem solvæggen vil øge ydelsen. Men det kan dog ikke tilrådes ukritisk at øge volumenstrømmen af luft for at få en højere ydelse, da dette giver et øget elforbrug og kan lede til problemer med støj fra ventilatorerne.

Solvæggene havde i det oprindelige design jernfrit glas og selektiv belægning på absorberen. Dette blev af visuelle grunde udskiftet til jernholdigt glas med en lavemissiv belægning på indersiden og en matsort absorber. Dette betyder en lavere transmittans for sollys og et højere varmetab gennem dæklaget end i det oprindelige design. Reduktionen af solvæggenes effektivitet som følge af dette er anslået til 8-10%.

På baggrund af målingerne forventes der en maksimal stagnationstemperaturer på 130°C. Solvæggene er udstyret med manuelle udluftningsventiler, der om sommeren skal kunne køle solvæggene ved hjælp af udeluft. Målinger har ikke kunnet påvise en effekt af disse udluftningsventiler. Da dæklagene er hærdet glas og glaslisterne er relativt varme, er der ingen fare for sprængning af glasset på grund af termiske spændinger.

Ventilationskanalerne i solvæggene er efter tre år beskidte. Dette understreger nødvendigheden af jævnlig rengøring af kanaler og udskiftning af filtre.

5. Referenceliste

- Bosanac, M and Jensen, S.Ø., 1997. In-Situ Solar Air Collector Array Test. Solar Energy Laboratory, DTI Energy. ISBN 87-7756-480-4.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, New York. ISBN 0-47-05066-0.
- Gramkow, L. et al, 1999. 2. Generations solvægge Bygningsintegreret solvarme. COWI
- Hastings, S.R. and Mørck, O. (eds.), 1999. Solar Air Systems Design Hanbook. James&James. Under udgivelse.
- ISO, 1994. Test Methods for Solar Collectors Part 1. Thermal Performance of Glazed Liquid Heating Collectors including Pressure Drop. ISO 9806-1. 1994-12-01.
- Johnsen, K. et al, 1993. tsbi3 Brugervejledning. Statens Byggeforskningsinstitut.
- Mørck, O, et al, 1993. Udvikling af luftsolfanger. Cenergia Energy Consultants og Laboratoriet for Varmeisolering, DTU.
- Nielsen, J.E., 1995. Brugervejledning til KVIKSOL et program til simulering af solvarmeanlæg. Version 5.2. Prøvestationen for Solenergi, DTI Energi.
- Schmidt, T.P. og Jensen, S.Ø., 1998. Præfabrikerede ventilerede solvægge i byggeriet, fase 2
 Design og opbygning af solvægge på Thermologica-huset, Egebjerggård samt efterfølgende målinger. Carl Bro og SolEnergiCenter Danmark.
- Schmidt, T.P., 1999. Ventilerede solvægge Naturcenter Danmark. Carl Bro.
- Statens Byggeforskningsinstitut, 1982. Vejrdata for VVS og Energi Dansk referenceår TRY. SBI-rapport 135.
- Wittchen, K., 1996. Solvægge i simuleringsprogrammer. Statens Byggeforskningsprogram. SBI-rapport 267.