



Solskodde - et bevægeligt solpanel

Termisk og funktionel evaluering

Søren Østergaard Jensen

SolEnergiCenter Danmark
Teknologisk Institut

Solskodde - et bevægeligt solpanel

Termisk og funktionel evaluering

Søren Østergaard Jensen
SolEnergiCenter Danmark
Teknologisk Institut

Juni 1999

Forord

Nærværende rapport afslutter måle- og evalueringsdelen af UVE-projektet ”Solskodder – et bevægeligt solpanel”, journal nr. 51181/98-0009 finansieret af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi m.v.

Projektet er gennemført som et samarbejde mellem Byfornyelsesselskabet København, Arkitektfirmaet C.F. Møllers Tegnastue, Ingeniørfirmaet Steensen & Varming og SolEnergiCenter Danmark, Teknologisk Institut.

Projektets formål var at opbygge en prototype af en solskodde for ved hjælp af denne at teste konceptet både termisk og funktionelt. Prototypen er udviklet i fælleskab af projektets partnere og opbygget i Teknologisk Institut Energi's prototype-laboratorium. Prototypen blev opstillet og testet på SolEnergiCenter Danmarks afprøvningsområde i Taastrup.

På baggrund af prototypen er det udarbejdet en detaljeret beskrivelse af opbygningen af solskodden inkl. 3D AutoCad-tegninger. Der er desuden udviklet en program, der udfra udvendige karmsmål for en fransk dør automatisk udregner længder på de indgående standardprofiler brugt i solskodden. Den detaljerede beskrivelse af solskodden kan direkte overdrages til en fabrikat for produktion af solskodden. Den detaljerede beskrivelse af solskodden indgår ikke i nærværende rapport.

Deltagere i projektet:

Byfornyelsesselskabet København

Karen Skou, arkitekt m.a.a.

C.F. Møllers tegnestue

Søren Rasmussen, arkitekt m.a.a.

Steensen & Varming

Rikke Westergaard, civilingeniør
Lars Eggert Nielsen, teknikumingeniør

SolEnergiCenter Danmark

Søren Østergaard Jensen, civilingeniør
Eik Bezzel, civilingeniør
William Otto, laboratorieassistent
Bertel Jensen, teknikumingeniør

Solskodde – et bevægeligt solpanel
1. udgave, 1. oplag 1999
© Teknologisk Institut 1999
Energidivisionen

ISBN: 87-7756-549-5

Indholdsfortegnelse

Summary	3
1. Indledning	4
2. Konklusion	7
3. Prototype	9
4. Målesystem	12
4.1. Anvendte måleinstrumenter	16
4.2. Opsamling af data	18
4.3. Behandling af data	18
5. Tryktab og opnåelig volumenstrøm af luft	19
5.1. Undertryk i bygningen	19
5.2. Tryktab	19
5.2.1. Beregnet tryktab	19
5.2.2. Målt trykfald over prototypen	20
5.3. Volumenstrøm af luft gennem solskodden	21
6. Målinger – termisk evaluering	25
6.1. Effektiviteter	25
6.1.1. Energi ud af solskodden	25
6.1.2. Udnyttelig solindfald	25
6.1.3. Målte effektiviteter	26
6.1.4. Beregnede effektiviteter	32
6.1.5. Varmekapacitet	35
6.1.6. Besparelser i opvarmningsbehovet	40
6.1.7. Varmelagring i væggen	42
6.2. Temperaturforhold i solskodden	42
6.2.1. Varmeoverføringsevne	42
6.2.2. Reduktion af varmetab gennem væggen bag solskodden	46
6.2.3. Problemer med temperaturudvidelser	46
6.3. Reduktion af varmetabet gennem den franske dør	48
6.4. Solskodden som solskorsten	48
7. Funktionel og visuel evaluering	51
7.1. Funktionel evaluering	51
7.2. Visuel evaluering	52
7.3. Arkitektens vurdering	53
8. Referencer	56
Bilag A Måling af undertryk i en lejlighed i Eriksgade 1	57
Bilag B Model til beregning af effektiviteten af solskodder	60

Summary

The examined solar shutter is a movable solar heating panel. Located in front of the wall the solar shutter acts as a solar air collector for preheating of ventilation air. Located in front of a French door the solar shutter acts as a shutter during the nights of the heating season, which decreases the heat loss through the French door. In the summer the solar shutter may act as a sun shading device in front of the French door.

A prototype of a solar shutter has been developed and tested.

The test shows that the efficiency of the solar shutter is comparable with the efficiency of traditional solar air collectors.

The annual savings of a 2.5 m² solar shutter located on an apartment with a living area of 60 m² and an air flow rate of 50 m³/h through the solar shutter is (based on the test results) calculated to be between 275 and 475 kWh. The performance is depended on the wind speed in front of the solar shutter and the actual space heating demand of the apartment.

An annual saving of between 110 and 210 kWh in the heat loss through the French door is further possible for doors with a U value of respectively 1.8 and 3 W/Km². Provided the occupants remember to pull the solar shutter in front of the French door during the night.

A small reduction in the heat loss through the wall - the solar shutter is located in front of during the day - is further possible. Also a small increase in the performance of the solar shutter acting as solar collector is possible as the wall behind the solar shutter (where the air to the room is led through) acts as storage. The two above-mentioned items will max lead to an annual saving of 50 kWh.

The total saving of a 2.5 m² solar shutter will thus under fortunate conditions be as high as 735 kWh/year, but may, however, under less fortunate conditions be as low as 200 kWh/year (or lower) – specially if the solar shutter is partly shaded.

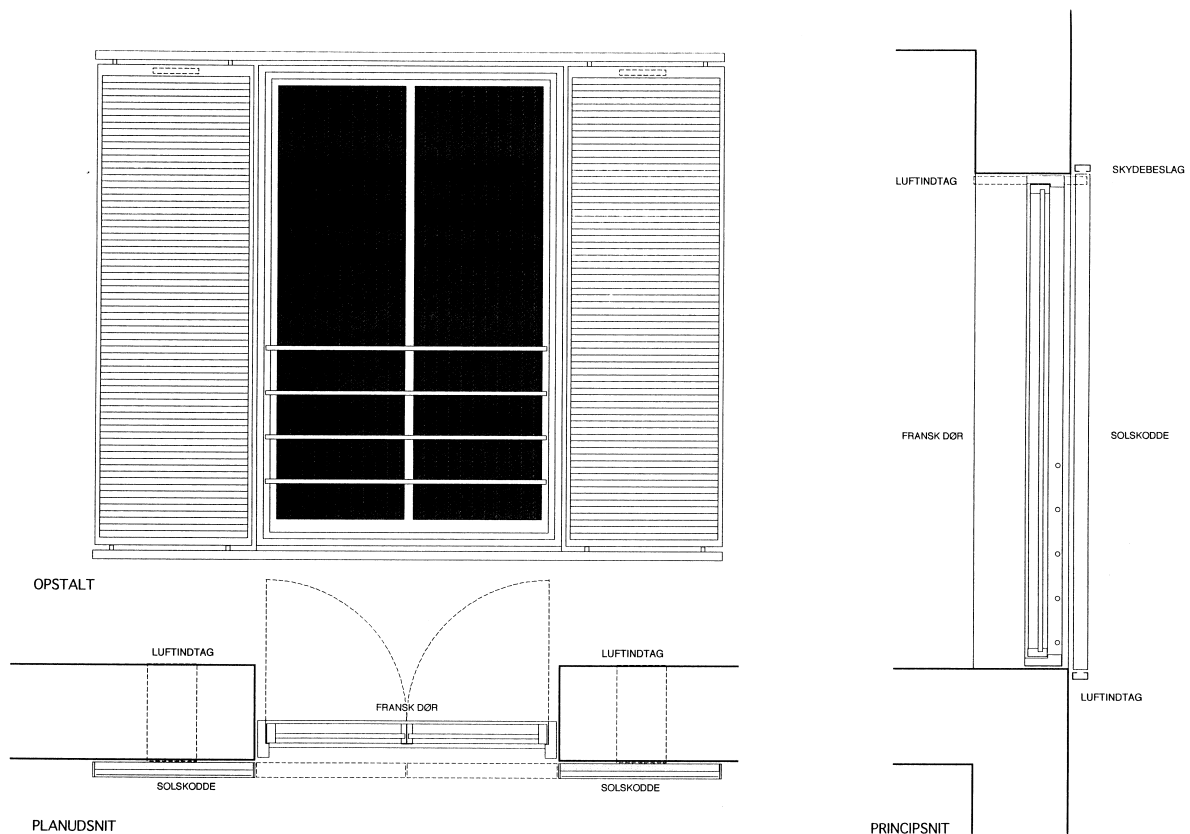
Calculations based on the measurements show that the solar shutter may also act as a solar chimney during the summer – i.e. pull air out of the dwelling, air which then may be replaced with colder fresh air from the north side of the building. Flow rates of up to 125 m³/h have been calculated.

The visual and technical function of the prototype is satisfactory. However, smaller modifications have been suggested. Detailed construction drawings have been developed based on the prototype. Drawings, which may be given to a manufacture for direct production of solar shutters. 20 solar shutters will be produced and installed on an apartment building in Copenhagen in year 2000.

1. Indledning

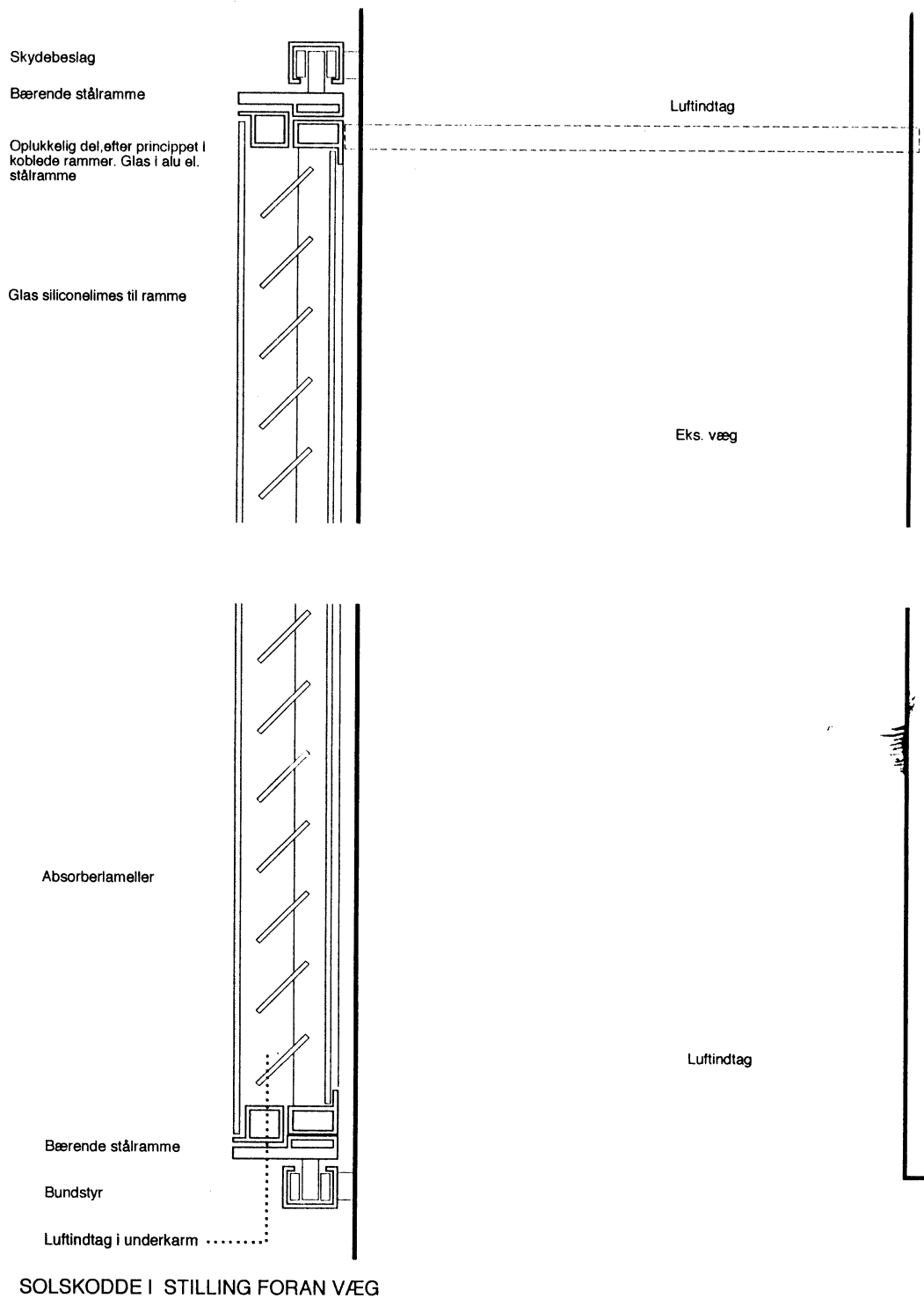
Konceptet ”Solskodder – et bevægeligt solpanel” er udviklet af Arkitektfirmaet C.F. Møllers Tegnastue og Ingeniørfirmaet Steensen & Varming som deres bidrag til konkurrencen ”Design af miljørigtige bygningsdele i byfornyelsen” afholdt i foråret 1997. Konkurrencen var udskrevet af Byfornyelsesselskabet København og Teknologirådet i samarbejde med DAL og Danske designere. Solskodde-konceptet, der blev præmieret i konkurrencen, er efterfølgende blevet videreudviklet i (C.F. Møllers Tegnastue, 1997).

Konceptet består af en skodde, der ved hjælp af en skydeskinne enten kan placeres foran en fransk dør eller foran væggen ved siden af døren – se figur 1.1. Når skodden er placeret foran den franske dør, fungerer den i dagtimerne om sommeren som solafskærmning og om natten i fyringssæsonen som en isolerende skodde foran døren. Placeret foran væggen fungerer skodden som luftsolfanger til forvarmning af friskluft til bygningen, idet der er matchende huller i væg og skodde – se figur 1.2. Det er intentionen, at friskluft skal suges gennem solskodden til bygningen ved hjælp af det undertryk, afkastventilationen skaber i bygningen.



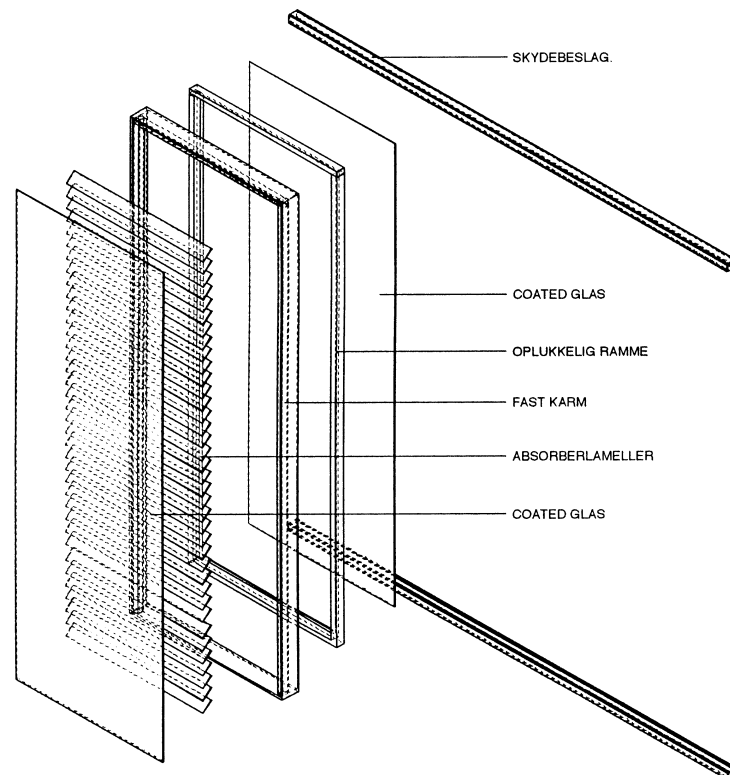
Figur 1.1. Fransk dør med to solskodder (C.F. Møllers Tegnastue, 1997).

Figur 1.3 viser en principskitse af solskoddens enkelte dele. I en ramme med glas for og bag er placeret en persienne, der fungerer som absorber – se også figur 1.2. Frontglasset er oplukkeligt for at muliggøre rengøring. Skodden er ophængt i skydebeslag for at muliggøre de to yderpositioner for skodden – foran dør eller væg. Figur 1.4 viser et eksempel på, hvordan solskodder vil tage sig ud på en typisk Vesterbroejendom.



Figur 1.2. Snit i solskodde, der viser henholdsvis luftindtag til skodde og bygning (C.F. Møllers Tegnestue, 1997).

I forlængelse af konkurrencen "Design af miljørigtige bygningsdele i byfornyelsen" er det besluttet at afprøve solskodde-konceptet i fuld skala i forbindelse med et konkret renoveringsprojekt på Vesterbro. Der skal opsættes 20 skodder på ejendommen Istedgade 43. Opsætningen er planlagt til at skulle foregå i maj 2000.



Figur 1.3. Hovedelementerne i solskodde-konceptet (C.F. Møllers Tegnastue, 1997).



Figur 1.4. Tænkt eksempel på solskodder anvendt på en typisk Vesterbroejendom (C.F. Møllers Tegnastue, 1997).

Før opsætningen af konceptet var der dog behov for en egentlig produktudvikling og afprøvning af konceptet. I det følgende kapitel beskrives den udviklede prototype af solskodden. I de derefter følgende kapitler beskrives resultaterne fra afprøvningen af prototypen.

2. Konklusion

Der er blevet opbygget en prototype af solskodden. Prototypen er blevet afprøvet såvel termisk som funktionelt.

Da det er tanken, at luft skal suges gennem solskodden ved hjælp af det undertryk, der opstår i lejligheder med afkastventilation, skal trykfaldet over solskodden være lille – på omkring 5 Pa ved den ønskede volumenstrøm. Det største trykfald opstår ved overgangen mellem solskodde og bygning. Et trykfald på under 5 Pa kan - for det valgte design og en volumenstrøm på 50 m³/h - opnås ved at have 6-7 huller á 40 mm fordelt jævnt over solskoddens bredde ved overgangen til væggen (og tilsvarende 6-7 huller gennem væggen).

Effektiviteten af solskodden er lig traditionelle luftsolfangere. Dette viser, at varmeoverføringen mellem persienne og luft er tilfredsstillende. Solskoddens effektivitet ligger midt i feltet ved de moderate vindhastigheder, der normalt er omkring en bygning, men i bunden af feltet ved høje vindhastigheder foran solskoddens dæklag.

På grund af de to glaslag er varmekapaciteten af solskodden relativt høj – ca. dobbelt så stor som for en traditionel væskesolfanger. Varmekapaciteten udjævner varmetilførslen til bygningen under fluktuerende solindfald og resulterer i en højere effektivitet om eftermiddagen end om formiddagen.

Den årlige besparelse som følge af en 2,5 m² solskodde placeret på en 60 m² lejlighed og en volumenstrøm af friskluft gennem solskodden på 50 m³/h er beregnet til mellem 275 og 475 kWh afhængig af vindhastigheden foran solskodden og størrelsen af det rumopvarmningsbehov, solskodden har mulighed for at være med til at dække.

Yderligere vil der være en årlig besparelse gennem den fransk altandør (hvis beboerne husker at trække solskodden hen foran denne om natten) på 110 og 210 kWh afhængig om den franske dør har en U-værdi på 1,8 eller 3 W/Km².

Desuden vil der være en mindre besparelse som følge af, at solskodden i dagtimerne nedsætter varmetabet gennem væggen bag solskodden lidt og som følge af at væggen mellem solskodden og rummet virker som et varmelager. Denne besparelse vil maksimalt være 50 kWh pr. år.

Dvs. ydelsen for en solvæg på 2,5 m² kan i heldigste fald komme op på 735 kWh pr. år, men under mindre heldige omstændigheder ligge nede omkring 200 kWh (eller mindre), specielt hvis der er skyggegivere.

Beregninger på baggrund af målingerne har vist, at solskodden har potentielle muligheder for at fungere som solskorsten om sommeren. Dvs. trække luft ud af lejligheden, som kan erstattes med køligere frisk luft. Der er beregnet volumenstrømme gennem solskodden på op til 125 m³/h.

Der er ikke konstateret kondensdannelse i solskodden. Dette kan dog forekomme på klare nætter. Denne kondens vil hurtigt forsvinde ved solopgang. Placeringen af luftindtaget vendende nedad i bunden af solskodden bevirker, at slagregn ikke kan trænge ind i solskodden og gøre evtuelle støvansamlinger våde. Det vurderes derfor, at risikoen for opvækst af mikroorganismer i solskodden er minimal, da solskodden holdes tør af sollyset i kombination med

den kontinuerlige luftstrøm gennem solskodden. Tilgængæld kan det underste bæreprofil udgøre et problem, hvis det ikke sikres, at vand og snavs kan løbe af. Rengøring af solskodden er muliggjort ved, at dæklaget er hængslet i den ene side. Solskodden kan åbnes og rengøres ved at løsne få skruer i den anden side.

Funktionelt har prototypen fungeret tilfredsstillende, dog skal det sikres, at solskodden i den endelige version glider lettere end prototypen. Det skal bl.a. sikres, at ophængningssystemet kan tage højde for ujævnheder i væggen, den hænges op på. Der skal desuden udvikles et greb, der vil lette betjeningen af skodden. Yderligere skal der findes/udvikles en rist til indvendig afslutning af væggennemføringen. I den videre udvikling kan det overvejes, om det skal gøres muligt at kipe persiennen, når denne er placeret foran døren for at øge udsynet gennem skodden.

Visuelt fungerer solskodden tilfredsstillende med en spinkel konstruktion og ophæng, der kan monteres på mange forskellige bygningstyper. Dog bør det overvejes, om solskoddens ramme i den endelige version skal være lidt lysere end prototypen, som er antracitgrå, for at bløde op på det lukkede præg, når solskodden er foran den franske dør i dagtimerne.

Prototypen er opbygget af holdbare materialer, der kan modstå de max. temperaturer, der kan opstå i solskodden. Under afprøvningen er der kun konstateret problemer med udbøjning af bagpladen af polycarbonat. Denne bagplade bør derfor udskiftes med glas, selvom det forøger solskoddens vægt.

På baggrund af erfaringerne med prototypen er der udviklet konstruktionstegninger og samlebeskrivelser for en solskodde bestående af standardprofiler. Dette kan overgives til en fabrikant for direkte produktion. Det vil blive gjort for at få fremstillet 20 solskodder, der skal sættes op på Istedgade 43 i år 2000. På længere sigt er det tanken at videreudvikle solskodden sammen med en fabrikant for at sikre god kvalitet, fornuftig pris og markedsføring. Designet bør dog optimeres yderligere i et samarbejde med den valgte fabrikant.

3. Prototypen

I dette kapitel beskrives kort den udviklede prototype for at muliggøre en forståelse af den efterfølgende afprøvning og evaluering.

Prototypen har følgende udvendige dimensioner: $2,2 \times 1,27 \times 0,06 \text{ m}^3$ (h x b x d) og et transparent areal på $2,05 \times 1,17 = 2,4 \text{ m}^2$ (h x b). Prototypen er ophængt på en til formålet opbygget vægstump med en fransk dør som vist på forsiden. Figur 3.1 viser solskodden placeret foran væggen, mens figur 3.2 viser solskodden placeret foran døren. Prototypen er i måleopstillingen orienteret direkte syd.



Figur 3.1. Prototypen placeret foran væggen.



Figur 3.2. Prototypen placeret foran den franske dør.

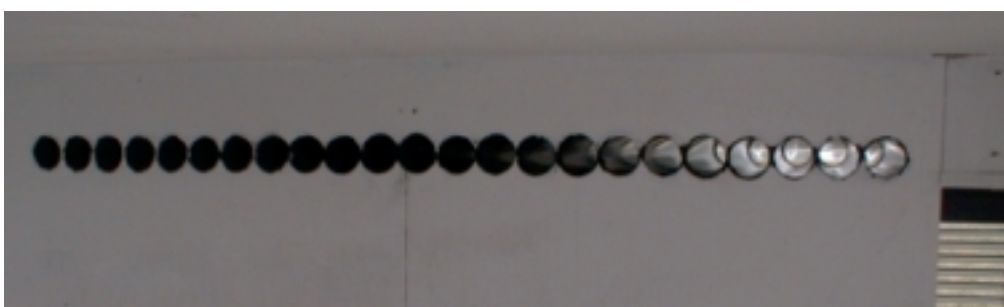
Prototypen er opbygget af standard-aluminiumsprofiler med et frontglas af 6 mm jernholdig, hærdet glas (da der var for lang leveringstid på jernfrit glas) og en bagplade af 4 mm transparent polycarbonat for at reducere vægten. Absorberen (persiennen) er en standard persienne fra firmaet Chr. Fabers fabrikker med lameller med en bredde på 25 mm. Lamellerne er på forsiden blank, sort (en mat, sort overflade er bedre, men er ikke et standardprodukt) og på bagsiden metalblank. Persiennen hænger midt i spalten mellem frontglasset og bagpladen (med en afstand på ca. 1,5 cm til begge), og lamellerne er vinklet ca. 45°. Frontglasset er hængslet i venstre side, således at det kan åbnes for rensning af persienne og pudsning af glassene.

Solskodden er for oven indsnævret (se figur 3.4) for at give plads til ophænget. På bagsiden af denne indsnævring er huller, hvorigennem luften fra solskodden overføres til bygningen gennem væggen. Figur 3.3 viser et billede af hullerne på bagsiden af prototypen. Der er 23 huller med en diameter på 40 mm og en centerafstand på 50 mm.



Figur 3.3. Hullerne på bagsiden af solskodden.

I væggen, hvor prototypen er sat op, er der boret et tilsvarende antal huller svarende til hullerne i solskodden – se figur 3.4. Hullerne i væggen er foret med glatte Ø 50/45 mm PVC-rør.



Figur 3.4. Hullerne i væggen bag solskodden – foret med glatte PVC-rør. Set ”indefra”.

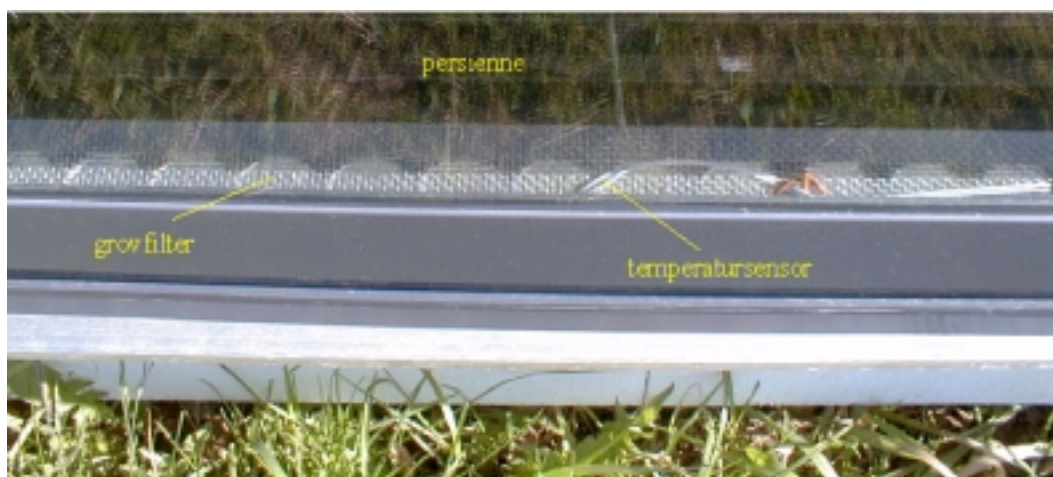
Mellem væg og solskodde er anbragt et aluminiumprofil, der er popnittet til bæreskinnen, med huller svarende til hullerne i solskodden – se figur 3.5. Overgangen mellem rør og profil samt rør og væg på indersiden er tætnet med akrylfugemasse. Tætningen mellem profil og solskodde udgøres af det store trykfald, en spalte på 2-3 mm mellem profil og solskodde skaber – se figur 4.4. Valget af denne tætningsmåde er begrundet i, at en pakning hurtigt vil blive slidt, da solskoddens bevægelse er på langs af tætningen.



Figur 3.5. Bæreskinne med det profil, der danner overgang mellem væg og solskodde. Kun 30% af hullerne er åbne – se kapitel 4.

23 huller er mere end nødvendigt, men er valgt for at være istand til at variere strømningsarealet gennem væggen for derved at kunne bestemme det optimale hulareal – se kapitel 4.

Luften til solskodden suges ind gennem solskoddens bund, hvor der er en række 20 mm huller samt et grovmasket insektnet – se figur 3.6.



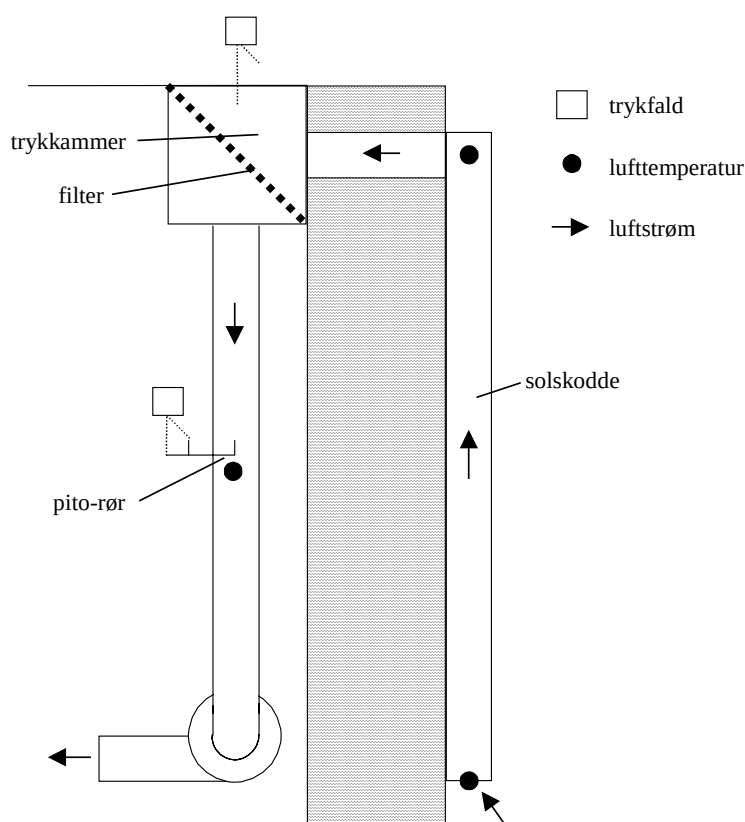
Figur 3.6. Solskoddens luftindtag (taget gennem dæklaget). Billedet viser også ledningen til temperatursensoren i indløbet. Selve sensoren sidder i skygge bag det nederste kantprofil.

4. Målesystem

Et af formålene med projektet var at gennemføre en termisk evaluering af solskoddekonceptet gennem målinger på prototypen. Ved termisk evaluering tænkes i første omgang på solskoddens effektivitet som luftsofanger, men også temperaturforhold i skodden og deraf eventuelle problemer med udvidelse af de indgående materialer.

Opsat på en rigtig bygning skal luftstrømmen gennem solskodden drives af undertrykket i bygningen skabt ved hjælp af afkastventilation. Det er derfor et relativt beskedne trykfald over skodden, der opereres med – se næste kapitel. Det beskedne trykfald bevirker, at det er vanskeligt at måle på solskodden. I nærværende kapitel beskrives det anvendte målesystem.

Figur 4.1 viser hovedprincippet i målesystemet. Figur 4.2 viser et billede af forsøgets ventilationsdel.



Figur 4.1. Hovedprincippet i målesystemet.

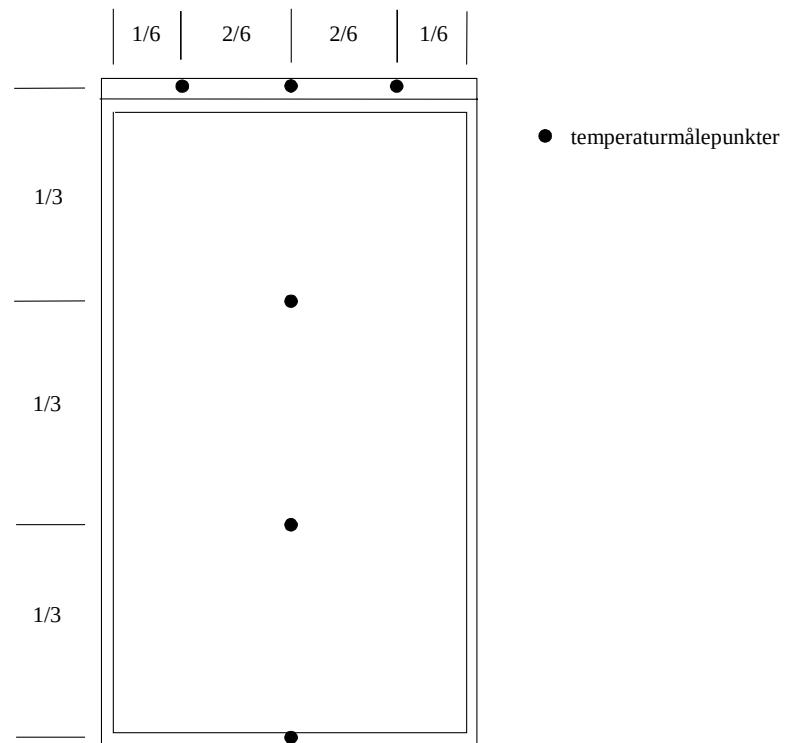
Luftstrømmen gennem solskodden skabes ved hjælp af en ventilator, hvor der er skudt et trykkammer ind mellem solskodden og ventilatoren. Trykkammeret skal sikre, at der suges jævnt over alle huller i væg og solskodde (figur 4.3-4). Trykkammeret er diagonalt delt op som indikeret på figur 4.1 ved hjælp af et metalhulplade og et tykt filter. Dette sikrer et stort trykfald – mange gange større end trykfaldet over solskodde + væg, der igen sikrer en jævnt fordelt volumenstrøm af luft gennem væggen og solskoddens huller.



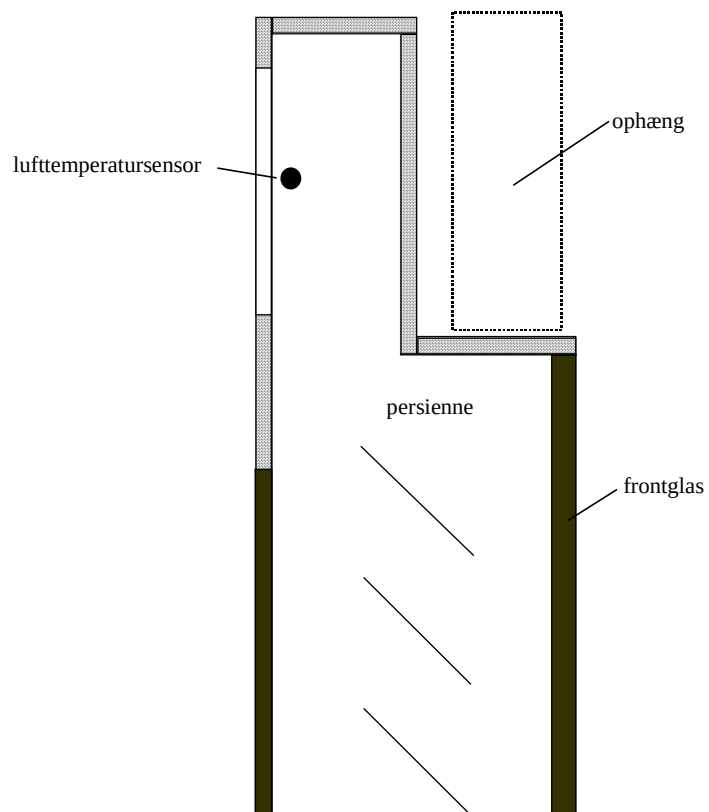
Figur 4.2. Måleopstillingens ventilationsdel.

Figur 4.1. viser målepunkterne til bestemmelse af energitilførslen til luften i solskodden. Volumenstrømmen af luft måles via trykfaldet over et pitot-rør indsat i ventilationskanalen efter trykkammeret. Ved hjælp af temperaturmålinger ved henholdsvis pitot-røret og i toppen af solvæggen omregnes det målte tryk til en volumenstrøm af luft gennem væggen. Temperaturstigningen over solskodden måles ved hjælp af temperaturfølere i top og bund af solskodden som vist på figur 4.3. Der er en temperatursensor i indløbet til solskodden – se også figur 3.6. Denne sensor er placeret, så den ikke rammes af direkte sollys. I toppen af solvæggen er placeret 3 temperatursensorer, således at de hver dækker en lodret tredjedel af solskodden. Temperatursensorerne i toppen af solskodden er placeret i indsnævringen ud for hullerne i solskodden – se figur 4.4. Sensorene er placeret ud for hul nr. 4, 12 og 20 i solskodden – se figur 4.1. Disse huller er altid holdt åbne i tryktabsundersøgelserne foretaget i næste kapitel.

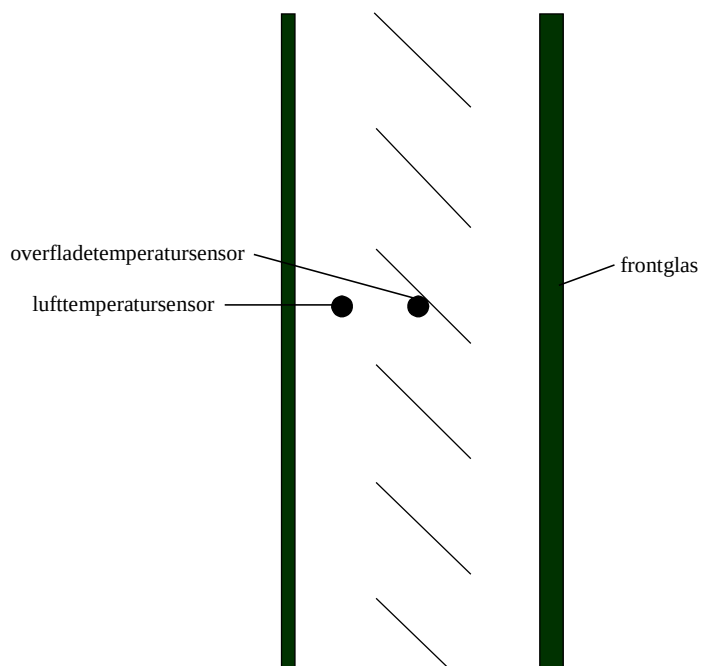
Figur 4.3 viser desuden temperatursensorer i solskoddens horisontale tredjedelspunkter. I disse punkter måles, som vist i figur 4.5, temperaturen på persiennen og i luftstrømmen bag persiennen. Sensorene sidder i skygge af persiennen. Disse målepunkter benyttes til at evaluere varmeoverføringen mellem persienne og luftstrøm samt den vertikale temperaturudvikling over solskodden.



Figur 4.3. Placering af temperatursensorer i solskodden.

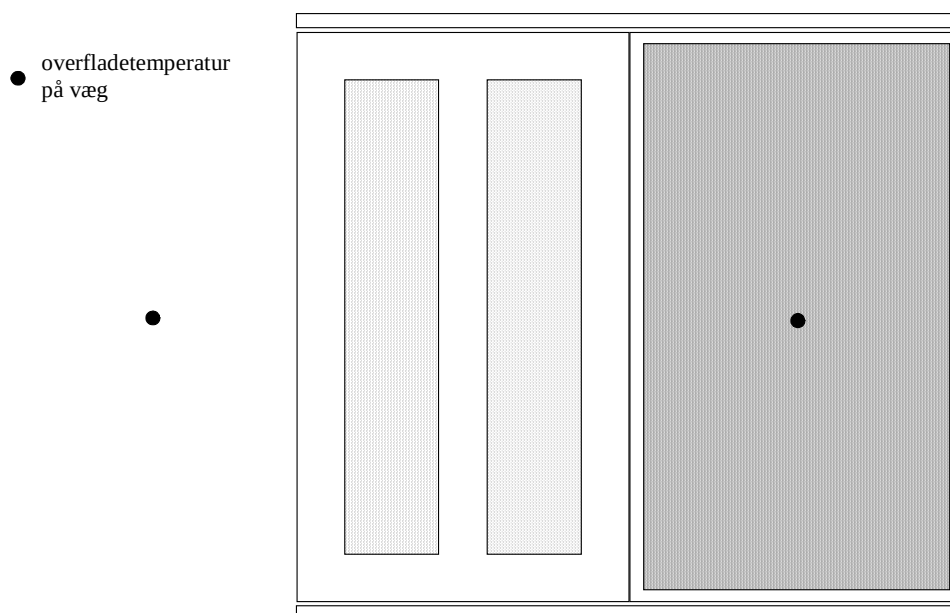


Figur 4.4. Placering af temperatursensorer i toppen af solskodden.



Figur 4.5. Placering af temperatursensorer i solskoddens vertikale tredjedelspunkter.

Ud over de nævnte temperatursensorer er der placeret to temperatursensorer på væggen. En bag solskodden og en frit eksponeret som vist på figur 4.6. Disse sensorer benyttes til at vurdere, hvor stor en besparelse, der kan opnås i transmissionstabet for den del af væggen, som solskodden dækker.



Figur 4.6. Overfladetemperatursensorer på væggen bag solskodden og frit eksponeret.

For at få en sammenhæng mellem energimængden ud af solskodden og solindfaldet måles det totale solindfald på en flade parallel med solskoddens dæklag som vist på figur 4.7.



Figur 4.7. Måling af totalt solindfald på solskodden samt vindhastighed foran solskodden.

SolEnergiCenter Danmarks vejrstation er placeret få meter fra solskodden. Målingen af det totale solindfald på solskodden i kombination med vejrstationens måling af totalt og diffust solindfald på 45° syd gør det muligt at bestemme, hvor meget direkte solindfald, og hvor meget diffust solindfald, der rammer solskodden. Dette er nødvendigt at vide for at kunne korrigere for refleksioner i solskoddens dæklag, når solindfaldet ikke er vinkelret på dæklaget. Det korregerede solindfald benyttes sammen med den målte energistrøm ud af solskodden til at bestemme solskoddens effektivitet.

Figur 4.7 viser desuden en vindmåler. Målingerne fra denne benyttes til at undersøge indflydelsen af vindhastigheden på solskoddens effektivitet.

Figur 4.1 viser måling af trykfald i trykkammeret lige efter solskodden. Denne måling benyttes til at bestemme trykfaldet over solskodde og væg – se næste kapitel.

4.1. Anvendte måleinstrumenter

Det er små trykfald, små lufthastigheder og ofte små temperaturdifferenser, der optræder i forsøgsopstillingen. Derfor er det meget vigtigt, at alt det anvendte måleudstyr er omhyggeligt kalibreret for at nedbringe måleunøjagtigheden, der ellers let bliver meget høj.

Temperaturfølere

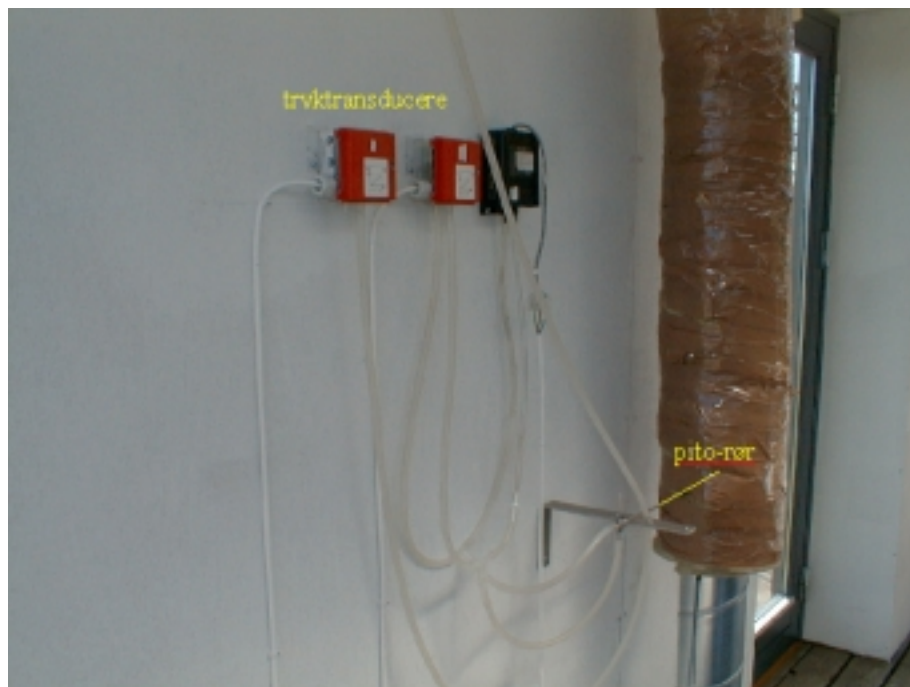
Alle temperaturer i solskodde, ventilationssystem og væg er målt med kalibrerede PT100 klasse B følere.

Volumenstrøm af luft

Volumenstrømmen af luft gennem solskodde + væg måles ved hjælp af et kalibreret pitot-rør, hvor forskellen mellem det dynamiske og statiske tryk giver et direkte kendskab til lufthastigheden i kanalen og dermed også volumenstrømmen af luft gennem kanalen. Pitot-røret er placeret ca. 1 m fra trykkammeret, hvilket betyder, at luftstrømningen er fuldt udviklet og stabil.

Tryktransducere

Trykfaldet over pitot-røret og trykfaldet over solskodden og væggen måles med kalibrerede tryktransducere – disse er vist i figur 4.8 sammen med pitot-røret. Der er til måling af trykfaldet over pitot-røret anvendt to tryktransducere med forskellig måleområder for at opnå høj nøjagtighed. En kalibreret tryktransducer fra Auto Tran Inc, model 700 med et måleområde fra 0 til 25 Pa og en kalibreret tryktransducer fra Huba Control, type 694 med et måleområde fra 0 til 100 Pa. Til måling af trykfaldet over solskodden og væggen er ligeledes anvendt en kalibreret tryktransducer fra Huba Control, type 694 med et måleområde fra 0 til 100 Pa.



Figur 4.8. De anvendte tryktransducere samt pitot-rør.

Solindfald

Solindfaldet på solskodden samt det totale solindfald fra SolEnergiCenter Danmarks vejrstation er målt med kalibrerede pyranometre fra Eppley, type PSP, mens det diffuse solindfald fra SolEnergiCenter Danmarks vejrstation er målt med et kalibreret pyranometer fra Kipp & Zonen, type CM5.

Vindhastighed

Vindhastigheden foran solskodden er målt med et kalibreret kopanemometer fra Thies, type 4.3105.

4.2. Opsamling af data

Alle målepunkter blev koblet til en datalogger med moduler fra Analog Devices. Målepunkterne blev scannet hvert 10. sekund og midlet i 5 minuttværdier på en PC's harddisk.

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

4.3. Behandling af data

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

Ved hjælp af kalibreringsudtrykkene er de målte værdier fra tryktransducerne omsat dels til en volumenstrøm af luft dels til et trykfald. Ydelsen af solskodden blev derefter fundet på baggrund af de målte temperaturer og den beregnede volumenstrøm af luft. Effektiviteten af solskodden blev senere beregnet i forbindelse med, at det udnyttelige solindfald (korrigeret for indfaldsvinklen) blev bestemt.

5. Tryktab og opnåelig volumenstrøm af luft

Det er som nævnt i indledningen meningen, at friskluft skal suges gennem solskodden og ind i bygningen ved hjælp af det undertryk, afkastventilation i bygningen skaber. Det er derfor væsentligt at vide, hvor stort et undertryk der er til rådighed, samt hvor stor en volumenstrøm af luft dette vil medføre gennem solskodden.

5.1. Undertryk i bygningen

For at skabe et overblik over det undertryk, der kan forventes at være i en lejlighed med afkastventilation, blev der foretaget målinger på en lejlighed meget lig lejlighederne i Istedgade 43, hvor solskodden først skal anvendes. Der blev målt undertryk i en lejlighed i Eriksgade 1, IV tv., 1708 København. Lejligheden er blevet renoveret med nye døre og vinduer samt fået afkastventilation, ligesom det er intentionen for lejlighederne i Istedgade 43.

Målerapporten findes i bilag A. Målerapporten konkluderer, at undertrykket er meget fluktuerende med et max. undertryk på 6,9 Pa og en middelværdi på 3-4 Pa. Udsugningsventilerne var dog indreguleret forkert – sandsynligvis af beboerne. Hvis udsugningsventilerne var indreguleret korrekt, vurderes det, at det er muligt at skabe et undertryk på mellem 5 og 8 Pa. Udsugningsventilerne skal desuden kunne fastlåses, så beboerne ikke fristes til at ændre indstillingen.

5.2. Tryktab

5.2.1. Beregnet tryktab

Under udviklingen af prototypen blev tryktabet for prototypen inkl. væggennemføring beregnet af Steensen & Varming. Tryktabet blev beregnet for en solskodde med dimensionerne 2,5 x 1,15 m² (h x b) ved en volumenstrøm på 50 m³/h. Væggennemføringen bestod af 10 Ø 40 mm glatte plastrør. Der var ingen rist på indersiden af væggen. Tryktabet er beregnet for en konstruktion, hvor indsnævringen (figur 4.4) havde et lidt mindre strømningsareal end i prototypen.

Tryktabet er beregnet til: 8 Pa

Volumenstrømmen på 50 m³/h er bestemt udfra, at frisklufttilførslen for en lejlighed i Bygningsreglementet (Bygge- og Boligstyrelsen, 1995) skal være 126 m³/h. Da solskodderne i Istedgade 43 skal monteres på bygningens køkkenside, må kun en mindre del af den friskluft trækkes gennem solskodden, da resten af lejligheden ellers ikke ville blive tilført friskluft.

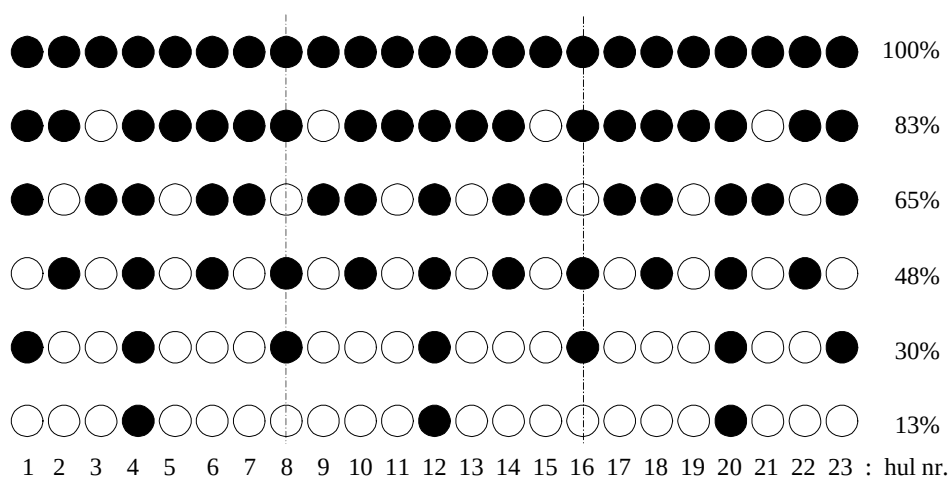
Et tryktab på 8 Pa er lige i overkanten, da der kun vurderes at være et undertryk på 5-8 Pa til at drive luftstrømmen. Der vil da ofte suges en mindre luftmængde end 50 m³/h gennem solvæggen. Trykfaldet på 8 Pa skal desuden tillægges et mindre tryktab for risten på indersiden af væggen.

Det blev derfor besluttet at øge strømningsarealet i indsnævringen i toppen af solskodden for at nedbringe tryktabet i prototypen.

5.2.2. Målt tryktab over prototypen

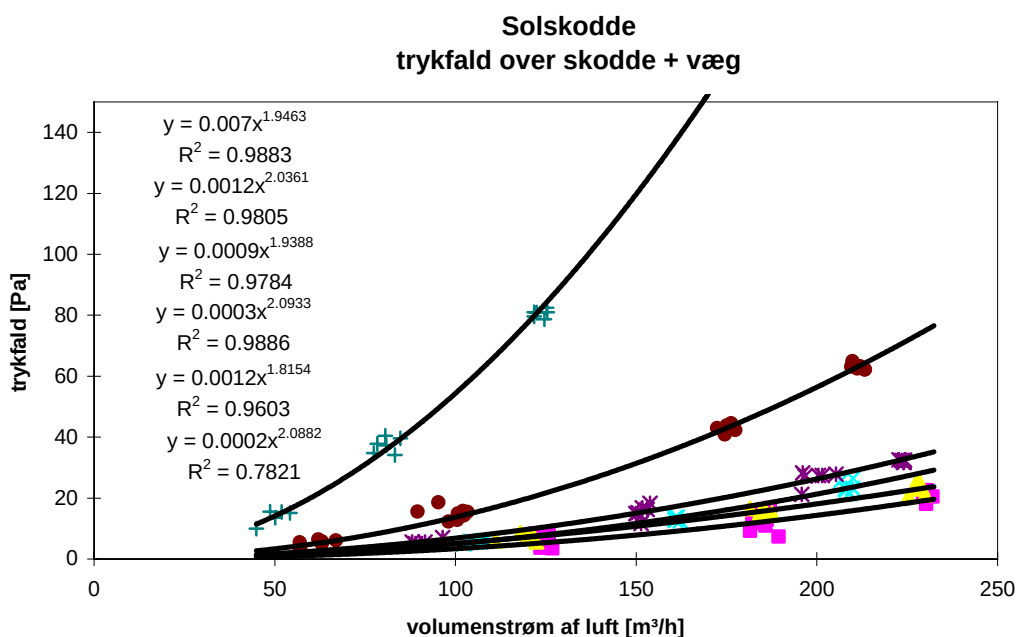
Prototypen var, som det nævnes i kapitel 2, udstyret med 23 Ø 40 mm huller i toppen, og væggen havde 23 matchende Ø 45 mm glatte plastrør. Der var ikke placeret en rist på indersiden af væggen.

23 huller er mere end nødvendigt, men var valgt for at give mulighed for at variere strømningsarealet gennem væggen for at kunne bestemme det optimale strømningsareal. Figur 5.1 viser en skitse af, hvordan strømningsarealet blev varieret, ved at huller blev afblændet med tape. Et hvidt hul betyder i figur 5.1, at hullet er afblændet. Tryktabet over skodde + væg blev målt for 6 situationer: Alle huller åbne = 100% og henholdsvis 83, 65, 48, 30 og 13% af hullerne åbne.



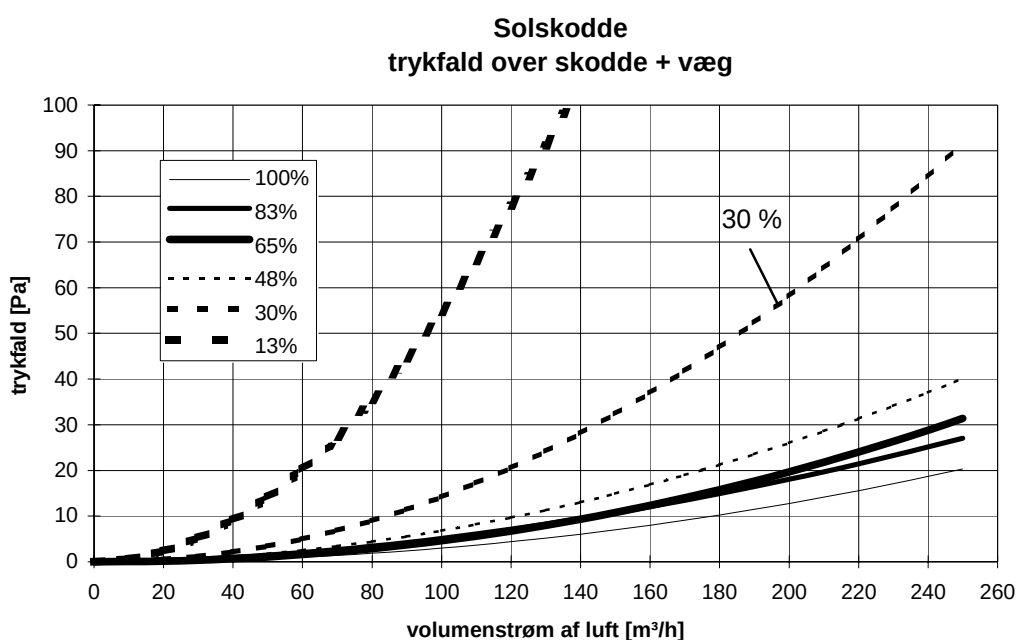
Figur 5.1. Antal huller åbne under tryktabsmålingerne. Sort betyder åbent hul.

Tryktabet blev målt for forskellige volumenstrømme af luft gennem solskodden som vist på figur 5.2, der viser de målte værdier sammen med regressionslinier og –udtryk.



Figur 5.2. Målt tryktab over skodde + væg. Stigende tryktab med faldende strømningsareal.

I figur 5.3 er kun regressionslinierne vist for at bedre overskueligheden.



Figur 5.3. Trykfaldet over solskodde + væg som funktion af volumenstrøm af luft samt antal åbne huller gennem væggen.

Det beregnede trykfald i afsnit 5.2.1 var fundet for en solskodde med en bredde på 1,15 m. Bredden af prototypen er 1,27 m. For at få samme lufthastighed som i beregningerne i afsnit 5.2.1, skal tryktabet i figur 5.3 aflæses ved ($50 \times 1,27/1,15 = 55$ m³/h).

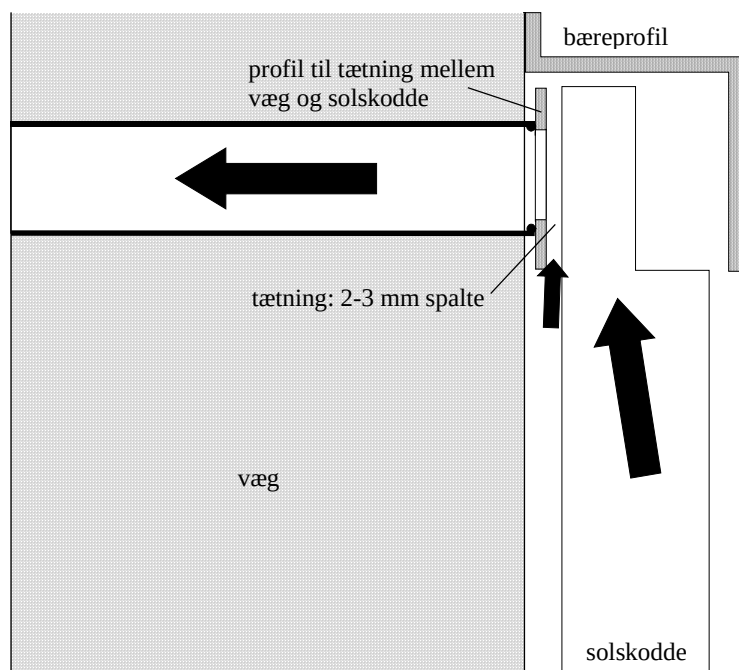
Figur 5.3 viser, at trykfaldet i alle tilfælde (undtagen et åbningsareal på 13%) er under 5 Pa ved en volumenstrøm på 55 m³/h. For at holde omkostningerne nede og bevare styrken i væggen, skal antallet af huller gennem væggen være så lille som mulig. Derfor vælges et hulareal på 30% = 7 huller, der giver et tryktab på lige over 4 Pa ved 55 m³/h. Dvs. et hulareal på 25% = 6 huller kan også anvendes. Det vælges her at arbejde videre med 30%, da det går bedre op med antallet af huller i forsøgsopstillingen – se også figur 4.5.

5.3. Volumenstrøm af luft gennem solskodden

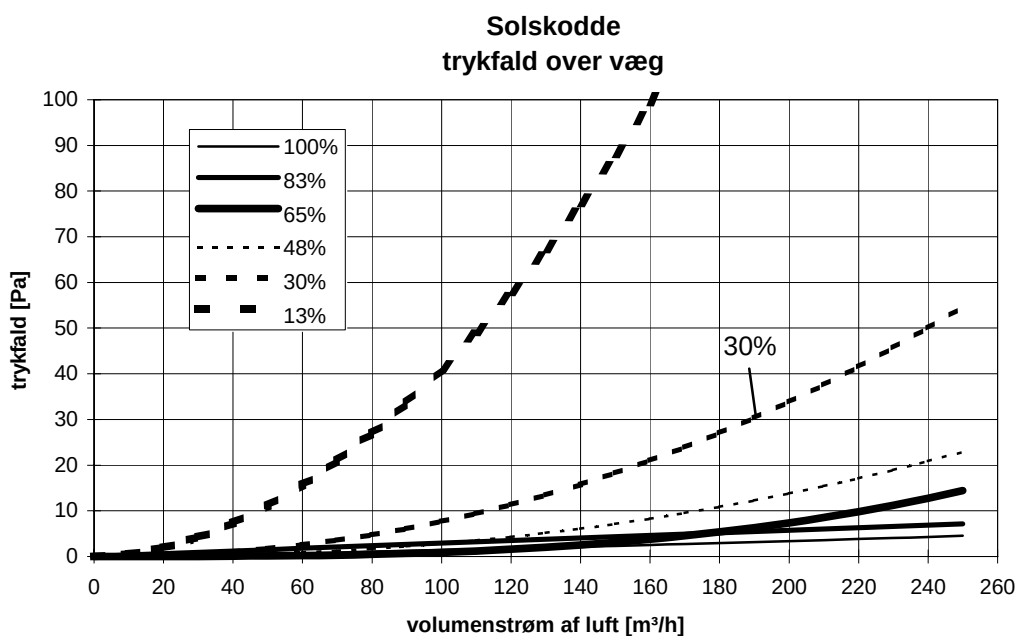
I kapitel 2 blev det nævnt, at tætningen mellem væg og solskodde udelukkende udgøres af trykfaldet over en 2-3 mm spalte – se figur 5.4. I dette afsnit undersøges det, hvor godt denne tætning virker.

For at bestemme hvor meget luft der slipper ind gennem spalten (tætningen mellem væg og solskodde), blev der udført yderligere to serier af tryktabsmålinger. En serie, hvor tryktabet over væggen uden solskodden foran blev målt (skodden i en position som vist på figur 4.2), og en hvor tryktabet over væg + spalte blev målt. Det sidste blev gjort ved at hullerne i solskodden (se figur 3.3) blev lukket med tape og solskodden derefter placeret foran væggen, så luften udelukkende kunne komme ind gennem spalten.

Figur 5.5 og 5.6 viser resultatet fra disse målinger.



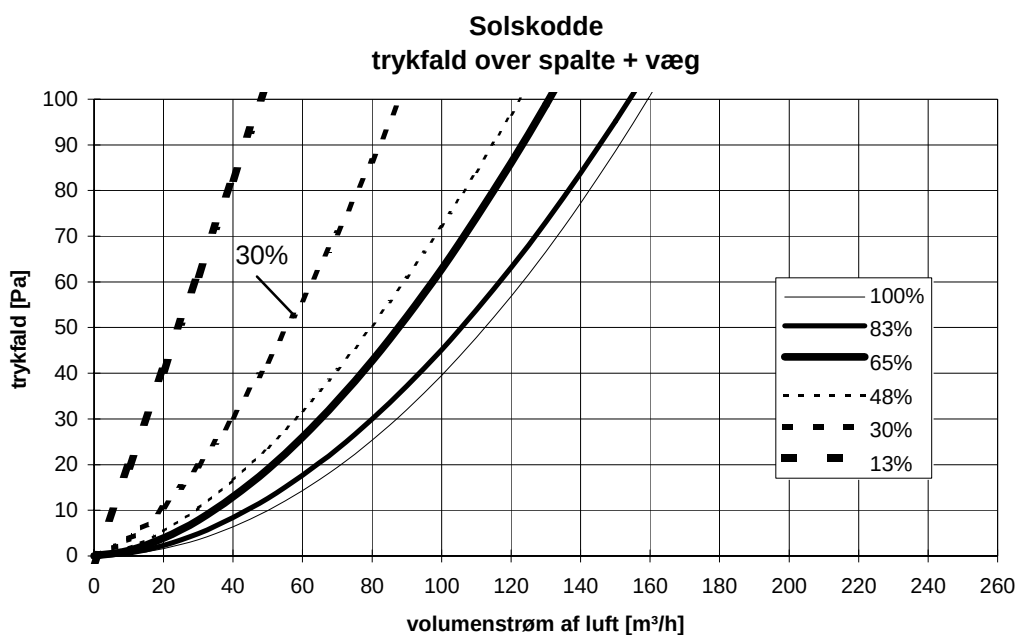
Figur 5.4. Tætningen i form af en 2-3 mm spalte mellem væg og solskodde.



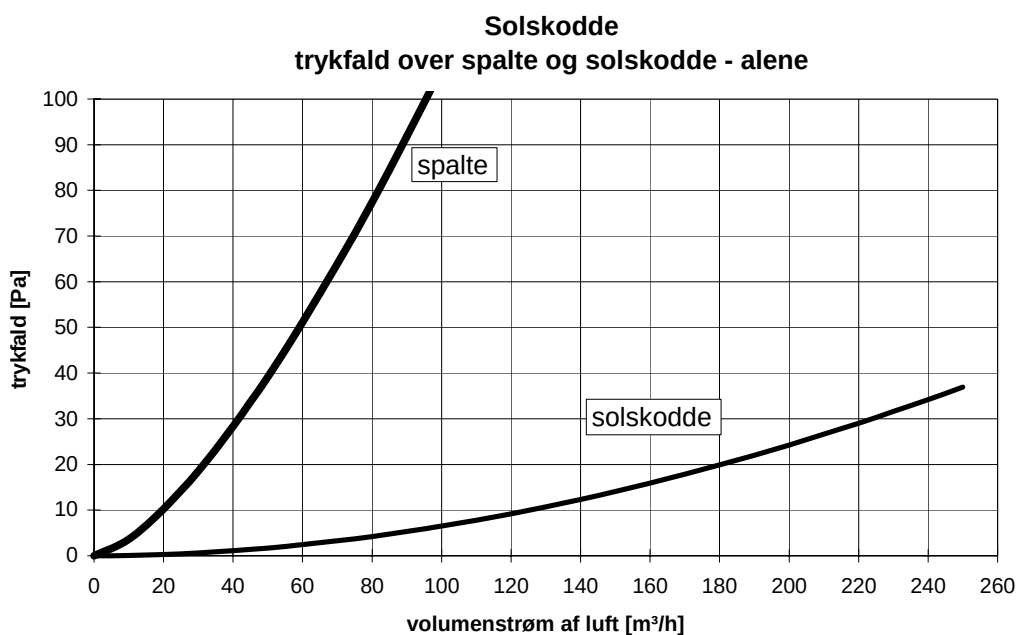
Figur 5.5. Tryktabet over væggen alene.

En sammenligning mellem figur 5.3 og 5.5-6 viser, at trykfaldet over spalten er meget større end trykfaldet over solskodden, mens trykfaldet over væggen er mindre end trykfaldet over solskodden.

Figur 5.7 viser trykfaldet over solskodden alene og spalten alene for et hulareal på 30%. Dvs. trykfaldene er fratrasket trykfaldet over væggen.

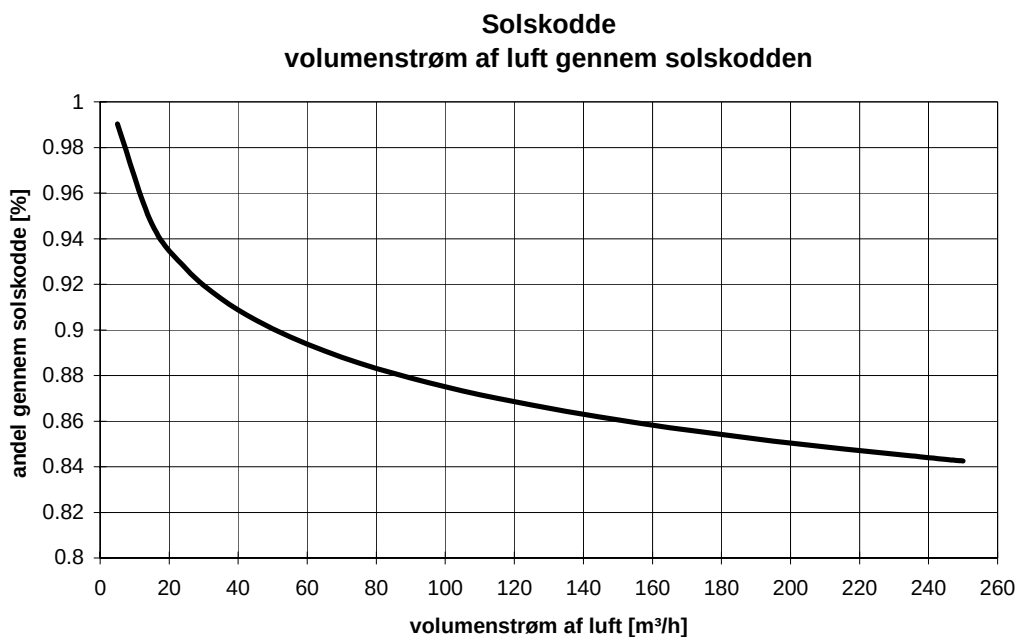


Figur 5.6. Tryktabet over spalten + væggen.



Figur 5.7. Trykfaldet over solskodden alene og spalten alene ved et hulareal på 30%.

For trykfaldene over solskodde og spalte gælder, at trykfaldet over disse altid vil være identiske. Dvs. at det er muligt at anvende figur 5.5 til at bestemme, hvor stor en volumenstrøm af luft, der går gennem henholdsvis solskodde og spalte ved givne trykfald. Dette er anvendt til at bestemme, hvor stor en del af luften, der tilføres bygningen, som rent faktisk suges gennem solskodden. Dette er vist i figur 5.8.



Figur 5.8. Den brøkdel af volumenstrømmen af luft, der tilføres lejligheden, som går gennem solskodden afhængig af volumenstrømmen af luft til lejligheden.

Figur 5.8 viser, at en tætning mellem væg og solskodde i form af en 2-3 mm spalte fungerer efter hensigten. I det interessante område omkring $55 \text{ m}^3/\text{h}$ suges kun 10% af luften til lejligheden ikke gennem solskodden. Disse sidste 10% suges hovedsagelig bag solskodden, hvor luften har en overtemperatur i forhold til udelufttemperaturen, hvilket betyder, at det reelle "tab" er lavere end 10%.

6. Målinger – termisk evaluering

I dette kapitel foretages en termisk evaluering af prototypens funktion – primært for at fastlægge effektiviteten af solskodden. På baggrund af temperaturmålinger vurderes desuden forskellige forhold omkring solskodden – varmeoverføringsevne, mindsket varmetab gennem den væg solskodden er placeret foran og eventuelle problemer med temperaturudvidelse i solskodden. Desuden vurderes skoddens isolerende effekt foran en fransk dør, ligesom det undersøges, om solskodden kan fungere som solskorsten om sommeren.

6.1. Effektivitet

Effektiviteten for luftsolfangere til forvarmning af friskluft fastlægges traditionelt som en funktion af volumenstrømmen af luft gennem solfangerne. Dette vil også blive gjort her, dels fordi det bedst illustrerer effektiviteten, dels fordi det så er muligt at sammenligne med andre luftsolfangeres effektivitet.

Effektiviteten er energimængden ud af solskodden divideret med det udnyttelige solindfald, der rammer solskodden. Det udnyttelige solindfald er det totale solindfald på solskodden korrigeret for refleksion i dæklaget som følge af en indfaldsvinkel for solstrålingen større end 0° .

6.1.1. Energi ud af solskodden

I dataloggerens måleprogram beregnes energimængden ud af solskodden som en funktion af temperaturstigningen over solskodden og volumenstrømmen af luft gennem væggen. Dette er ikke den korrekte energimængde, som det blev beskrevet i afsnit 5.3.

Figur 5.8 viser, hvor stor en del af volumenstrømmen gennem væggen, der kommer fra solskodden. Energimængden, der tilføres lejligheden, er derfor den energimængde, der beregnes i dataloggeren multipliceret med den aktuelle værdi i figur 5.8 plus et bidrag fra den luft, der suges gennem spalten mellem solskodden og væggen. Dette sidste bidrag er fundet som en funktion af volumenstrømmen gennem væggen multipliceret med den aktuelle værdi over kurven i figur 5.8 og temperaturdifferenten mellem udeluften og luften bag solskodden. Dette bidrag er behæftet med en relativ høj usikkerhed, idet noget luft suges direkte udefra og noget fra bag solskodden, hvor kun overfladetemperaturen midt på væggen bag solskodden måles. Bidraget er dog beskedent og bidrager kun lidt til usikkerheden på solskoddens effektivitet.

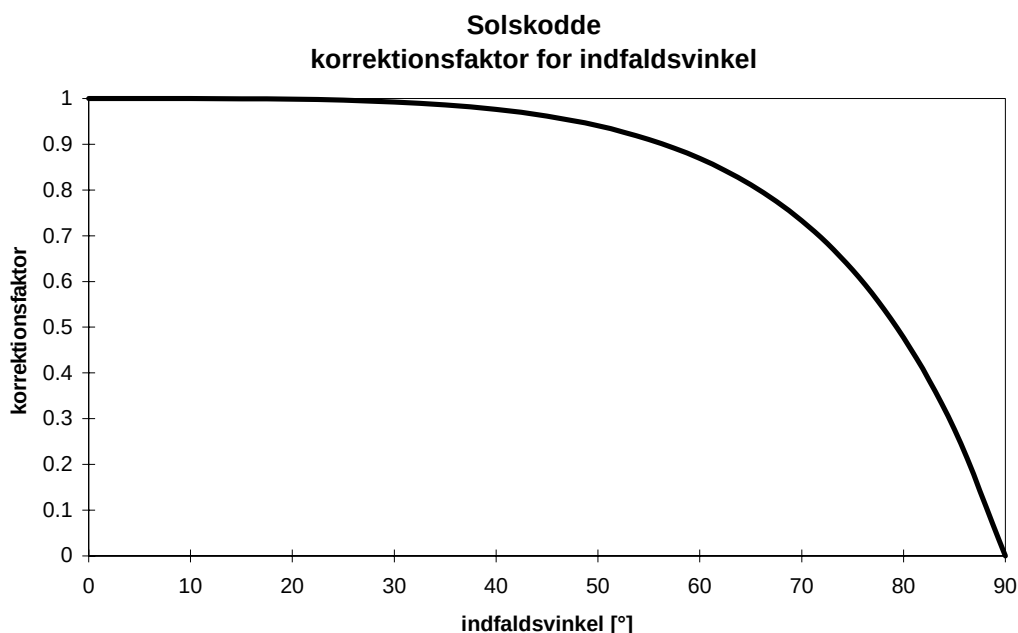
6.1.2. Udnyttelig solindfald

På baggrund af målingerne af solindfald: Totalt og diffust solindfald fra Prøvestationens vejrstation og totalt solindfald på solskodden, er det muligt at splitte solindfaldet på solskodden op i direkte og diffust solindfald. Dette er nødvendigt, da solindfaldet i måleperioden aldrig er vinkelret på solskoddens dæklag, og da solfangeres effektivitet opgives ved en indfaldsvinkel på 0° . Der bliver afhængig af tidspunktet på dagen reflekteret mere eller mindre af solindfaldet i dæklaget som følge af en større eller mindre indfaldsvinkel for solstrålingen.

Det udnyttelige solindfald beregnes ved at multiplicere solindfaldet med en korrektionsfaktor:

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

Korrektionsfaktoren er vist grafisk i figur 6.1. Direkte og diffus solstråling behandles forskellig. Θ for direkte solindfald varierer over dagen og beregnes for hvert målepunkt, mens Θ for diffust solindfald traditionelt antages at have en konstant indfaldsvinkel på 60° .



Figur 6.1. Korrektionsfaktor for indfaldsvinkler af solens stråler afhængig af indfaldsvinklen.

Korrektionsfaktorerne multipliceres med det direkte og det diffuse solindfald, før disse lægges sammen og tilsammen udgør det udnyttelige solindfald.

6.1.3. Målte effektiviteter

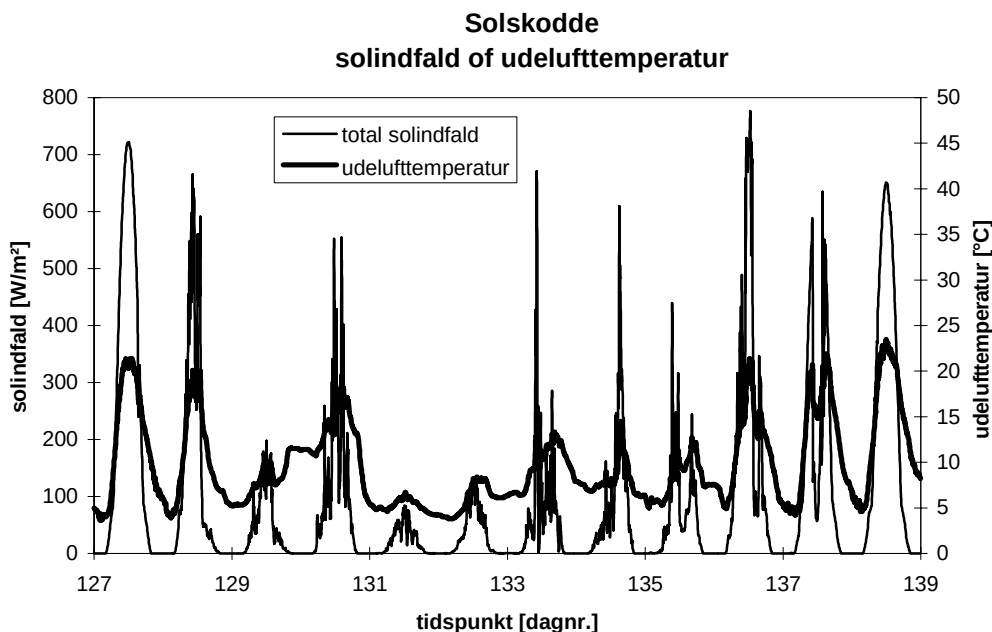
På baggrund af den korrigerede energimængde og det udnyttelige solindfald er solskoddens effektivitet fundet for forskellige volumenstrømme af luft.

Der måles på en dynamisk situation, hvor solskodden er udsat for vejrliget. Det betyder, at det er vanskeligt at måle den stationære effektivitet, som normalt angives som en solfangers effektivitet. Underlagt vejrliget vil solskodden hele tiden være under opvarmning eller afkøling – som vist i figur 6.5. På en klar solskinsdag vil solskodden om formiddagen blive mere og mere varm i takt med øget solindfald og øget udelufttemperatur – den målte effektivitet vil her være lavere end effektiviteten under stationære forhold, da der hele tiden anvendes energi til at varme solskodden op. Omvendt vil solskodden gradvis køle af om eftermiddagen, hvor solindfaldet og udelufttemperaturen aftager – den målte effektivitet vil her være højere end effektiviteten under stationære forhold, da der hele tiden overføres varme fra solskodden til luftstrømmen.

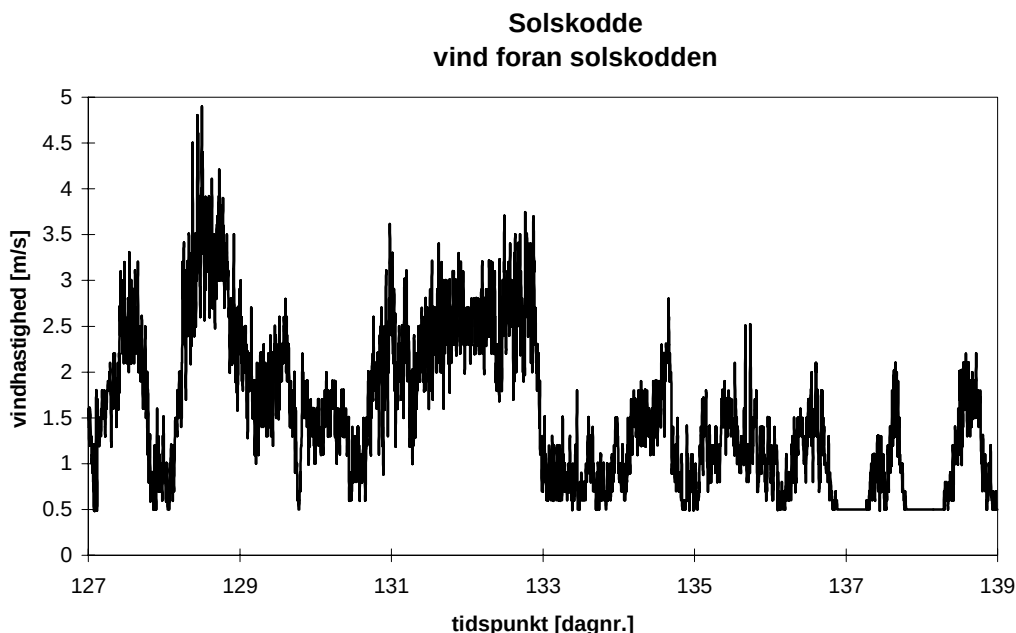
Standarden for måling af væskesolfangers stationære effektivitet under dynamiske forhold (ISO, 1994) angiver, at denne skal måles ved et solindfald større end 800 W/m^2 og en indfaldsvinkel på under 30° . Dette kan lade sig gøre for en solfanger placeret med en hældning omkring 45° mellem kl. 10 og 14 (soltid) på en klar solskinsdag i sommerhalvåret. Det kan dog ikke lade sig gøre for en lodret placeret solvæg i maj-juni, hvor målingerne på solskodden

foregik. Solindfaldet (korrigeret for indfaldsvinkelen) vil være lavere end 800 W/m^2 , og indfaldsvinklen vil altid være højere end 30° . I stedet er anvendt følgende kriterier: Kun målinger fra en klar solskinsdag kan anvendes og solindfaldet skal være højere end 500 W/m^2 .

Figur 6.2 viser solindfaldet og udelufttemperaturen for en periode på 12 dage i maj, 1999 – 7.-18. maj (begge dage inkl.), hvor volumenstrømmen af luft gennem solskodden var omkring $65 \text{ m}^3/\text{h}$. Figur 6.3 viser vindhastigheden foran solskodden, da dette, som det senere vises, har stor indflydelse på solskoddens effektivitet.

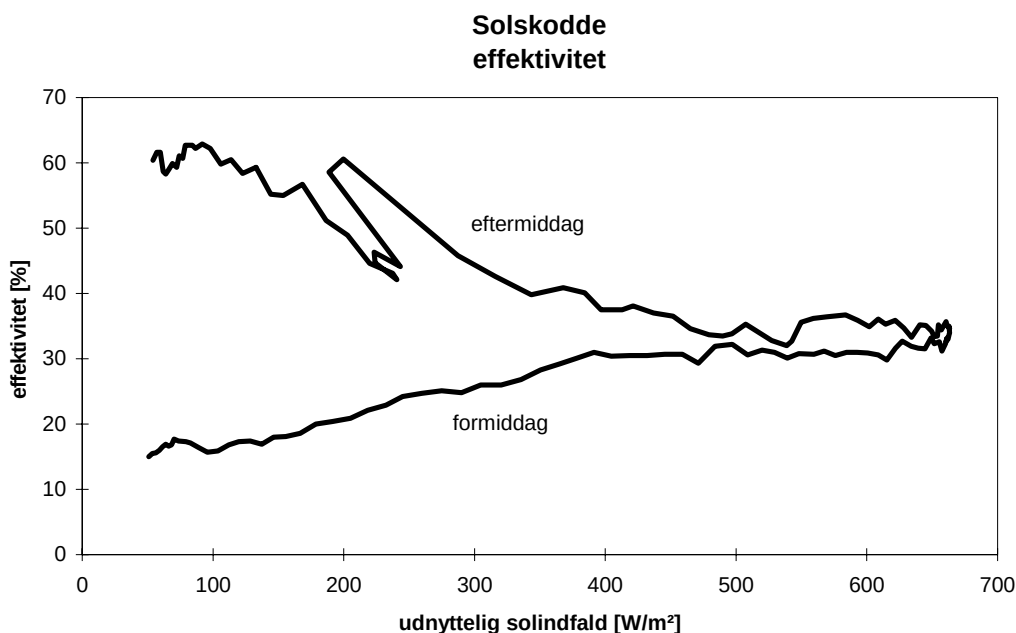


Figur 6.2. Solindfald og udelufttemperatur i perioden 7.-18. maj, 1999.

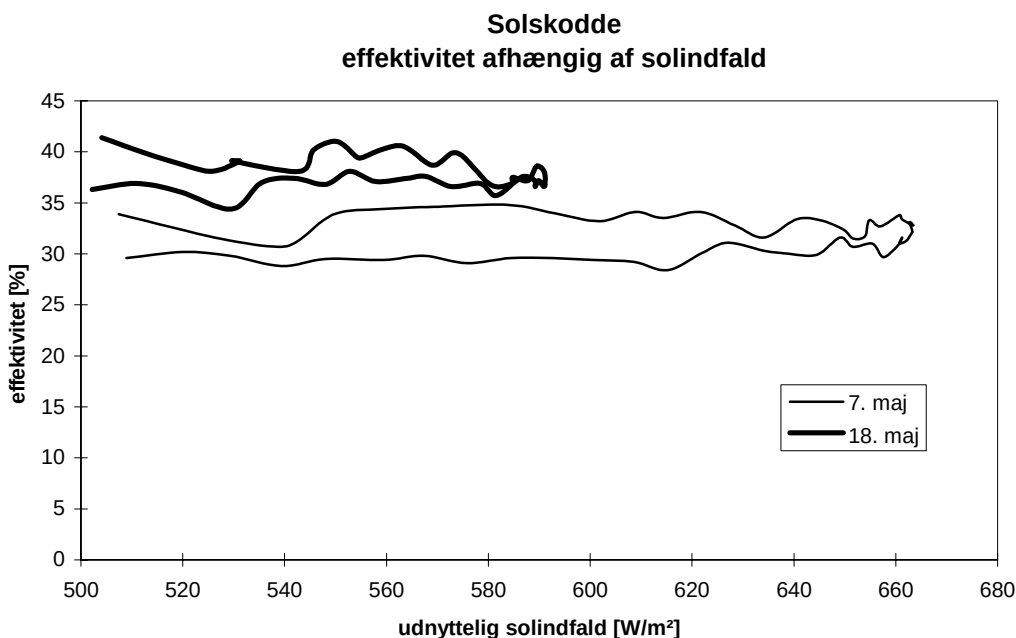


Figur 6.3. Vindhastigheden foran solskodden i perioden 7.-18. maj, 1999. Vindmåleren kan ikke måle lavere hastigheder end $0,5 \text{ m/s}$. Derfor er lavere hastigheder ikke vist.

Figur 6.2 viser, at det kun er dag nr. 127 (7. maj) og dag nr. 138 (18. maj), der opfylder kriterierne for bestemmelse af den stationære effektivitet. Figur 6.4 og 6.5 viser effektiviteten som funktion af det udnyttelige solindfald. Figur 6.4 viser effektiviteten for d. 7. maj for udnyttelige solindfald over 50 W/m², mens figur 6.5 viser målingerne for bestemmelse af den stationære effektivitet. Figur 6.4 viser tydeligt indflydelsen af den termiske masse i solskodden – for lave effektiviteter om formiddagen og for høje om eftermiddagen, men effektiviteten omkring kl. 12 (udnyttelig solindfald >500 W/m²) er meget stabil. Dette ses også i figur 6.5.

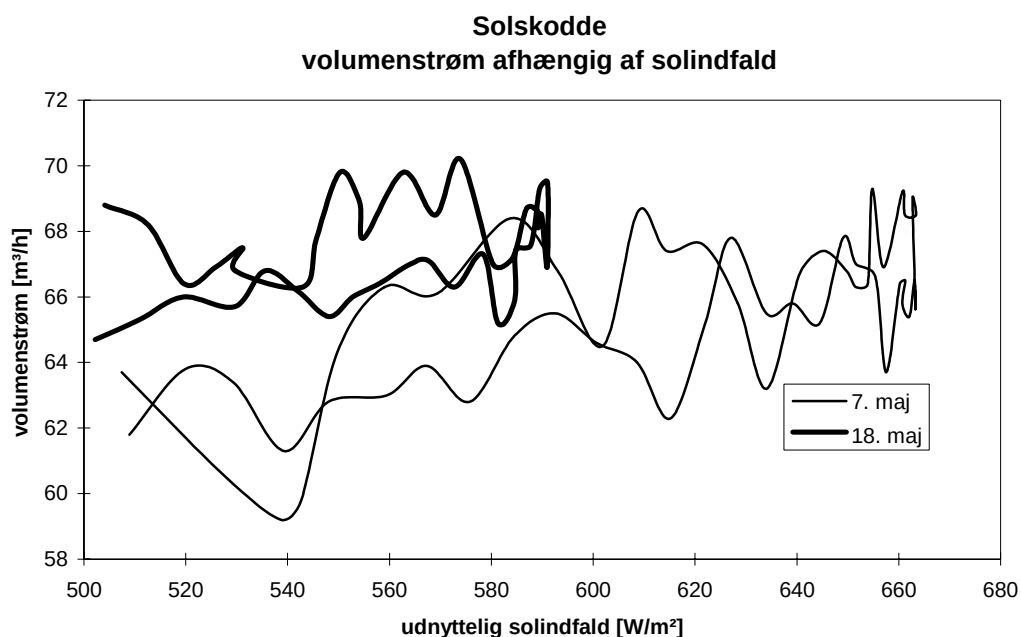


Figur 6.4. Effektiviteten for solskodden målt d. 7. maj (dag nr. 127) som funktion af det udnyttelige solindfald.

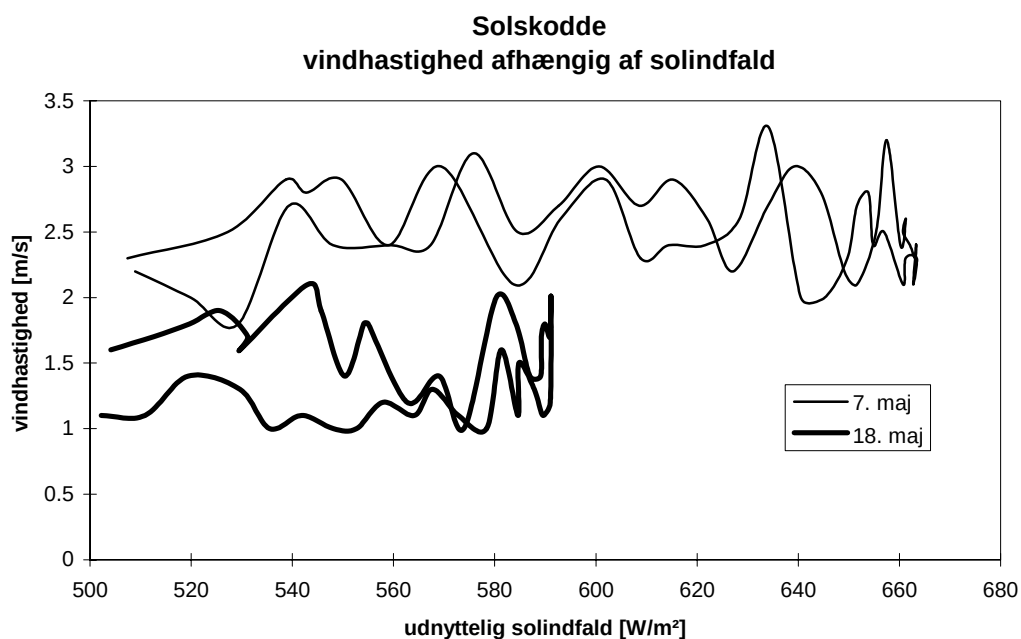


Figur 6.5. Effektiviteten for solskodden d. 7. og 18. maj (dag nr. 127 og 138) som funktion af det udnyttelige solindfald – dog kun for solindfald >500 W/m². Middelværdierne af disse serier er den stationære effektivitet

Figur 6.6 og 6.7 viser henholdsvis volumenstrømmen af luft gennem solskodden og vindhastigheden foran solskodden for den samme situation som i figur 6.5.



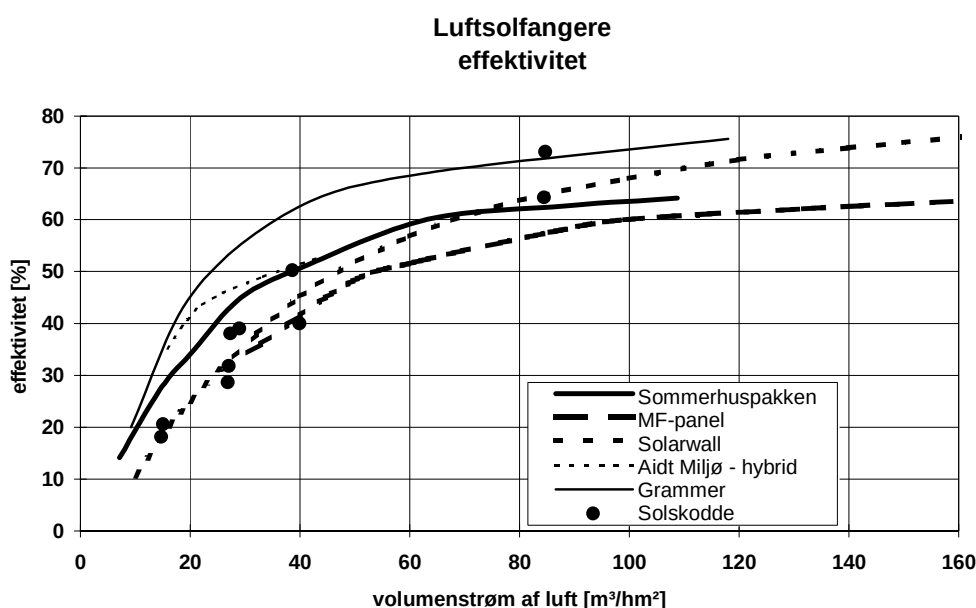
Figur 6.6. Volumenstrømmen af luft gennem solskodden d. 7. og 18. maj som funktion af det udnyttelige solindfald – dog kun for solindfald $>500 \text{ W/m}^2$.



Figur 6.7. Vindhastigheden foran solskodden d. 7. og 18. maj som funktion af det udnyttelige solindfald – dog kun for solindfald $>500 \text{ W/m}^2$.

Som det ses af figur 6.6 og 6.7, var volumenstrømmen af luft gennem solskodden og vindhastigheden foran solskodden også rimeligt stabile. En nærmere undersøgelse viste desuden, at målingerne fra d. 8. og 16. maj (dag nr. 128 og 136) også har en tilstrækkelig lang stabil periode til at kunne anvendes til bestemmelse af den stationære effektivitet.

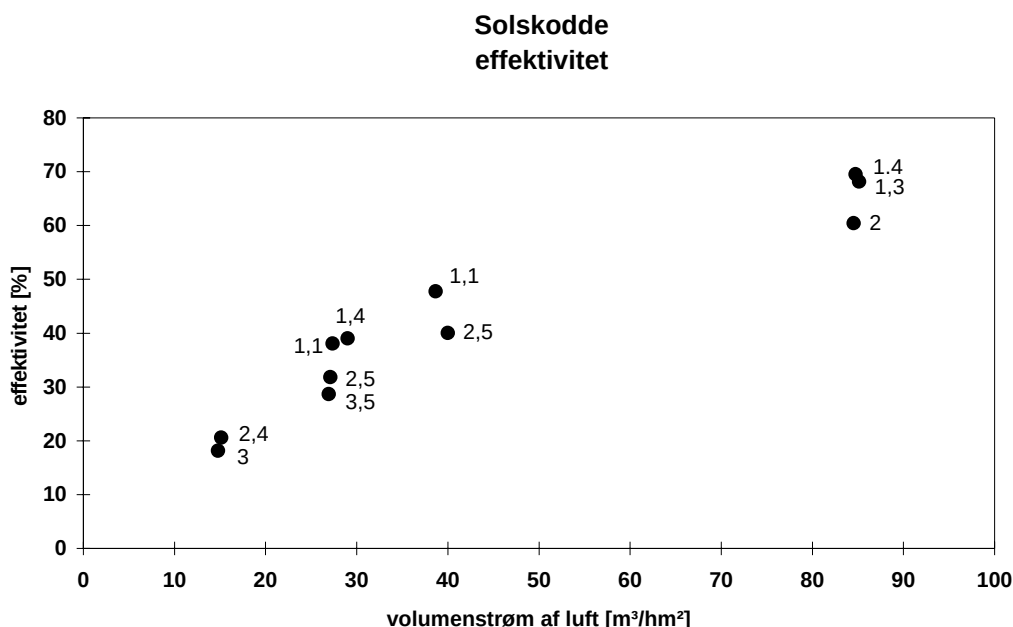
På samme måde er de stationære effektiviteter fundet for andre volumenstrømme af luft gennem solskodden. De fundne stationære effektiviteter er vist i figur 6.8 sammen med effektiviteten for andre luftsolfangere. For at muliggøre sammenligningen er enheden på x-aksen specifik volumenstrøm – dvs. volumenstrømmen gennem solfangerne divideret med det transparente areal. De andre luftsolfangere i figur 6.8 har alle (undtagen Grammer) luftstrømmen helt eller delvist mellem dæklag og absorber. Solskoddens effektivitet ligger meget pænt i det interessante område omkring $20 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ($55 \text{ m}^3/\text{h} / 2,4 \text{ m}^2$) – specielt i betragtning af, at prototypen ikke har jernfrit glas som dæklag og en mat, sort absorber, som det er intentionen at anvende, når solskodder skal monteres i Istedgade 43. For store luftmængder $>80 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ er solskoddens effektivitet på højde med de bedste luftsolfangere. Effektiviteten ved høje volumenstrømme virker for høj, kurven burde have fladet mere ud. På grund af en mindre temperaturdifferens over solskodden, er usikkerheden på effektiviteten ved høje volumenstrømme høj. Dette kan forklare de høje effektiviteter ved store volumenstrømme.



Figur 6.8. Effektiviteten af solskodden sammenlignet med effektiviteten af andre solfangere til forvarmning af luft.

- Sommerhuspakken: Lille kommercielt solvarmeanlæg fra Aidt Miljø specielt til affugtning af sommerhuse. Absorberen er en sort filt, hvor luften passerer 2 gange – luftstrømningen er både bag, foran og igennem absorberen. Dæklaget er en plast-ribbeplade (Jensen, 1994).
- MF-panel: Solfanger og varmeveksler i ét. I solfangerdelen strømmer luften mellem dæklaget og en trapezkorrugeret metalplade. Dæklaget er en plast ribbeplade (Jensen, 1990).
- Solarwall: Kommerciel canadisk solfanger uden dæklag, hvor luften suges ind gennem små huller over hele absorberen (McClenahan, 1995).
- Aidt Miljø - hybrid: Kommerciel hybridsolfanger fra Aidt Miljø til kombineret forvarmning af vand og luft. Luften strømmer mellem dæklaget og (væske)absorberen. (Væske)absorberen er sorte plast-ribberør og dæklaget er en plast-ribbeplade (Kristiansen og Jensen, 1994).
- Grammer: Tysk kommerciel højeffektiv solfanger. Absorberen består af aluminium med finner ned i luftstrømmen (der er bag absorberen) for at øge varmeoverføringsevnen. Dæklaget er jernfrit glas (Morhenne og Lagensiepen, 1997).

Figur 6.8 viser en stor spredning i de målte effektiviteter. Dette skyldes primært vindpåvirkningen, idet varmetabet fra solskodden er afhængig af vindhastigheden foran solskodden, da dæklaget kun udgøres af et enkelt lag glas med et stort varmetab. Figur 6.9 viser de samme punkter som figur 6.8, men med angivelse af middelvindhastigheden foran solskodden. De andre solfangere i figur 6.8 er mindre følsomme over for vindpåvirkning, idet de enten har et dobbelt dæklag, luftstrømningen udelukkende bag absorberen eller normalt er så store (Solarwall), at vinden blot blæser varmen hen til en anden del af solfangeren i stedet for at blæse den helt væk.



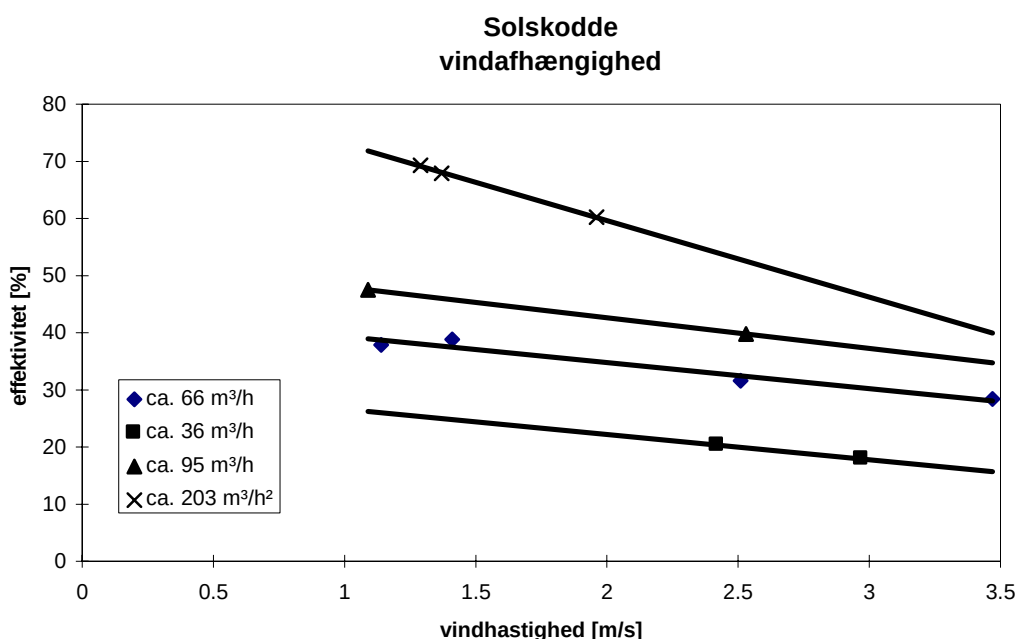
Figur 6.9. Effektiviteten for prototypen som funktion af volumenstrømmen af luft og vindhastigheden foran prototypen.

Værdierne fra figur 6.9 er desuden listet i tabel 6.1.

Dato	Volumenstrøm af luft m³/h	Vindhastighed m/s	Effektivitet %
7. maj	65,4	2,5	31,6
8. maj	64,9	3,5	28,4
16. maj	70,0	1,4	38,8
18. maj	66,1	1,1	37,9
19. maj	36,6	2,4	20,3
20. maj	35,8	3,0	17,9
28. maj	96,3	2,5	39,8
2. juni	93,2	1,1	47,5
16. juni	203,8	1,3	69,3
17. juni	203,3	2,0	60,2
19. juni	204,7	1,4	67,9

Tabel 6.1. Målte stationære effektiviteter og samhörørende middelværdier for volumenstrømmen af luft gennem solskodden og vindhastighed foran solskodden.

I figur 6.10 er effektiviteten af solskodden vist som funktion af vindhastigheden foran solskodden og som funktion af volumenstrømmen af luft gennem solskodden. Figuren antyder en lineær sammenhæng. Der er dog ikke målepunkter nok til en præcis fastlæggelse af effektivitetens afhængighed af vindhastigheden. Figuren illustrerer den høje usikkerhed ved effektiviteten ved høje volumenstrømme. Vindafhængigheden bør alt andet lige mindskes ved forøgelse af volumenstrømmen gennem solskodden, idet middeltemperaturen af luften reduceres - og dermed også varmetabet gennem dæklaget. Usikkerheden ved store volumenstrømme er dog ikke noget problem, da solskoddens arbejdsområde er ved volumenstrømme under $100 \text{ m}^3/\text{h}$.



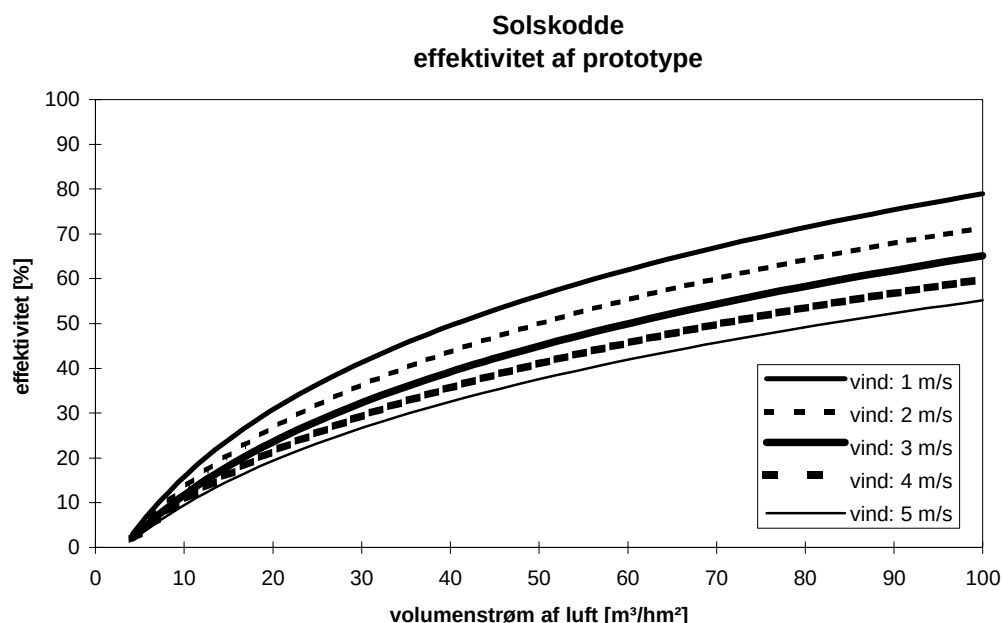
Figur 6.10. Effektivitetens afhængighed af vindhastigheden.

6.1.4. Beregnede effektiviteter

Figur 6.9-10 og tabel 6.1 viser, at solskoddens effektivitet er meget afhængig af vindhastigheden foran solskodden. Det er dog ikke tilrådeligt ud fra målingerne at bestemme effektiviteten af solskodden for andre kombinationer af volumenstrøm og vindhastighed – der er ikke nok målinger til at foretage en sådan interpolation. Desuden er det ikke muligt ud fra målingerne på prototypen at bestemme effektiviteten med et andet dæklag eller en anden absorberbelægning, hvilket er nødvendigt for at kunne bestemme effektiviteten for de solskodder, der skal installeres i Istedgade 43

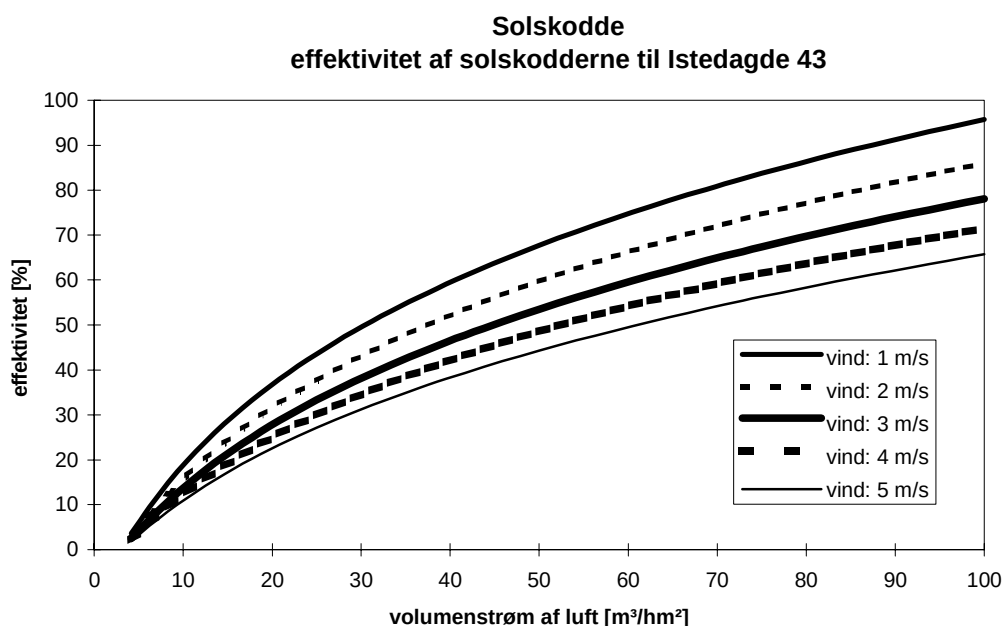
I stedet er der udviklet og kalibreret en simpel model af solskodden. Dette er beskrevet i detaljer i bilag B. Her vil kun blive vist resultaterne fra kørsler med modellen.

Figur 6.11 viser den beregnede effektivitet af prototypen som funktion af volumenstrømmen af luft og vindhastigheden. Enhederne på x-aksen er specifik volumenstrøm (dvs. pr. $\text{m}^2_{\text{solfanger}}$) for også at kunne anvende den til andre arealer. Som nævnt i bilag B er usikkerheden stor ved store volumenstrømme. Modellens primære gyldighedsområde er: Volumenstrøm af luft: $10\text{-}40 \text{ m}^3/\text{hm}^2_{\text{solfanger}}$ og vindhastighed: $1\text{-}3,5 \text{ m/s}$.



Figur 6.11. Beregnet effektivitet for prototypen. $\tau = 0,8$ og $\alpha = 0,81$.

Figur 6.12 viser effektiviteten for solskodderne til Istedgade 43, hvor dæklaget er 6 mm jernfrit glas ($\tau = 0,86$ (Jensen, 1986)) og persiennerne er udvendig mat, sort ($\alpha = 0,95$). Tabel 6.2 angiver regressionsudtrykkene for kurverne i figur 6.12. Mellem figur 6.11 og 6.12 er $\tau\alpha$ -produktet øget med 22%. Dette giver anledning til en forøgelse i effektiviteten på ca. 15%. α er forøget fra 0,84 til 0,95, dvs. med 13%. Hvis α kun blev forøget med ca. det halve, fordi absorptansen af persiennen i prototypen faktisk var 0,9, ville det betyde en forøgelse i effektiviteten på omkring 8-9% eller lidt under det halve af forskellen mellem figur 6.11 og 6.12. Usikkerheden på baggrund af mangel på præcise oplysninger om absorptansen af persiennen i prototypen vurderes derfor at være i størrelsesordenen $\pm 5\%$.

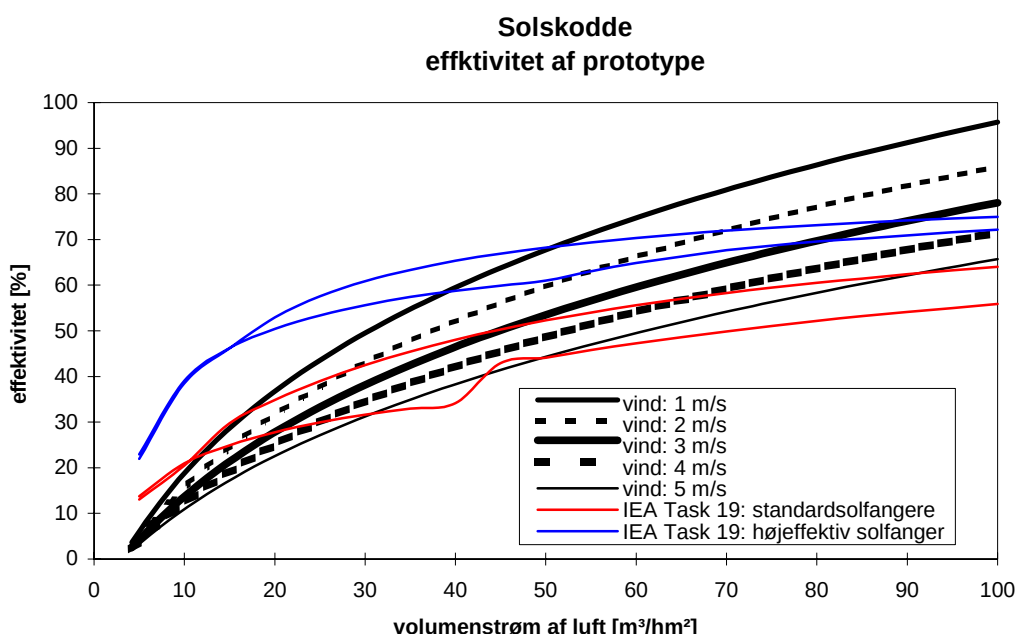


Figur 6.12. Effektiviteten af solskodderne til Istedgade 43.

Vindhastighed	Regressionsudtryk
1 m/s	$-3,2946 + 2,3940 \cdot V - 0,0244 \cdot V^2 + 0,0001 \cdot V^3$
2 m/s	$-3,3505 + 2,0708 \cdot V - 0,0203 \cdot V^2 + 0,00009 \cdot V^3$
3 m/s	$-3,2210 + 1,8333 \cdot V - 0,0175 \cdot V^2 + 0,00007 \cdot V^3$
4 m/s	$-3,0391 + 1,6473 \cdot V - 0,0154 \cdot V^2 + 0,00006 \cdot V^3$
5 m/s	$-2,8461 + 1,4945 \cdot V - 0,0137 \cdot V^2 + 0,00006 \cdot V^3$

Tabel 6.2. Regressionsudtrykkene for kurvene i figur 6.12. V er den specifikke volumenstrøm af luft gennem solskodden [m^3/hm^2].

I afsnit 6.1.6 bliver ydelsen for solvæggene til Istedgade 43 fastlagt ved hjælp af nomogrammer udviklet i IEA Task 19 – Solar Air Systems (Hastings and Mørck, 1999). I udviklingen af nomogrammerne fra Task 19 er der anvendt to solfangere: En standardsolfanger med ét dæklag, sortmalet absorber og luftstrømmen bag absorberen og en højeffektiv solfanger med ét dæklag og selektiv absorber med finner ned i luftstrømmen bag absorberen. Effektivitetskurverne for disse to solfangere er vist i figur 6.13 sammen med kurverne fra figur 6.12.



Figur 6.13. Effektiviteten af solskodderne til Istedgade 43 sammenlignet med solfangerne fra IEA Task 19 – Solar Air Systems (Hastings and Mørck, 1999).

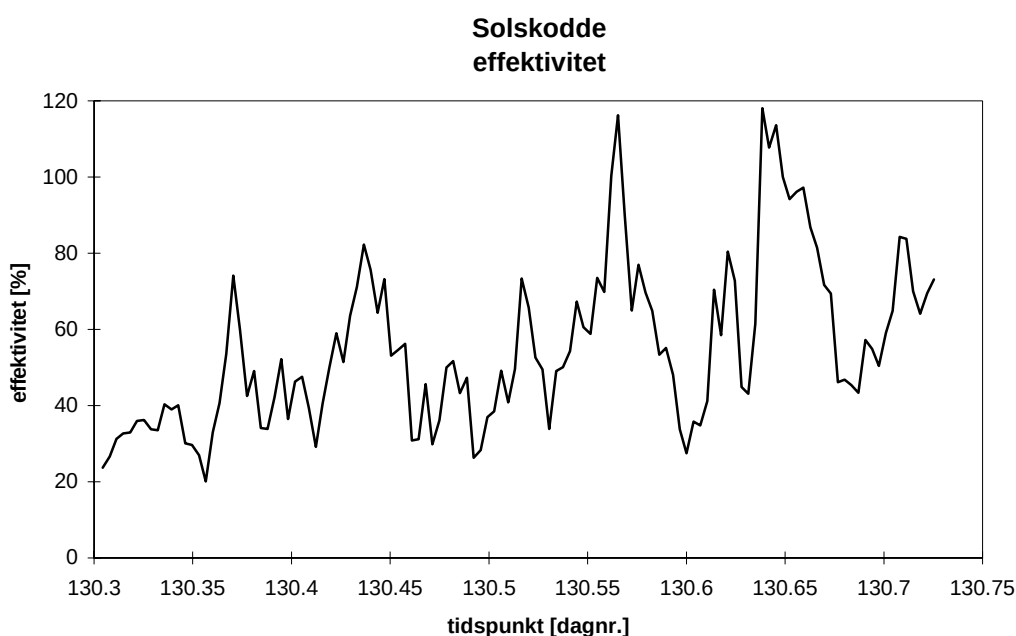
Der er to kurver for IEA Task 19 solfangerne. Det skyldes, at nomogrammerne er udviklet for et solfangerareal på 2, 8 og 16 m^2 . Det er effektiviteten for solfangerarealerne på 2 og 8 m^2 , der er vist i figur 6.13. Grunden til forskellen i effektivitet er, at solfangerfeltet består af moduler på 2 m^2 . For solfangerarealet på 8 m^2 er to paneler seriekoblet, og 2 x 2 paneler er derefter parallelkoblet. Det betyder, at lufthastigheden ved samme specifikke volumenstrøm af luft gennem solfangerne er højere i et solfangerfelt på 8 m^2 end i et felt på 2 m^2 . Effektiviteten for solfangerfeltet på 8 m^2 er derfor højere end for 2 m^2 . Det mærkelige knæk på kurven for standardsolfangeren på 2 m^2 skyldes, at der anvendes en kalibreret matematisk model af solfangerne (Morhenne og Lagensiepen, 1997), hvor knækket angiver omslagsområdet fra laminar til turbulent strømning.

Solskodderne til Istedgade 43 vil have en specifik volumenstrøm på omkring $20 \text{ m}^3/\text{hm}^2_{\text{solfanger}}$, og et areal på omkring $2,5 \text{ m}^2$. Dvs. kurverne fra figur 6.12 skal sammenlignes med IEA task 19 solfangerne med et areal på 2 m^2 - dvs. den nederste røde og blå kurve. Figur 6.13 viser, at effektiviteten af solskodderne til Istedgade 43 ved en vindhastighed på 3 m/s er lig effektiviteten for standardsolfangeren fra IEA Task 19. Ved en vindhastighed på 2 m/s er solskodden omkring 5% point bedre end IEA Task 19 standardsolfangeren, mens solskodden ved en vindhastighed på 1 m/s ligger mellem de to typer af IEA Task 19 solfangere.

Ovenstående information benyttes til fastlæggelse af den forventede ydelse for solskodden. Dette gøres i afsnit 6.1.6. Men først fastlægges en anden parameter af betydning for ydelsen.

6.1.5. Varmekapacitet

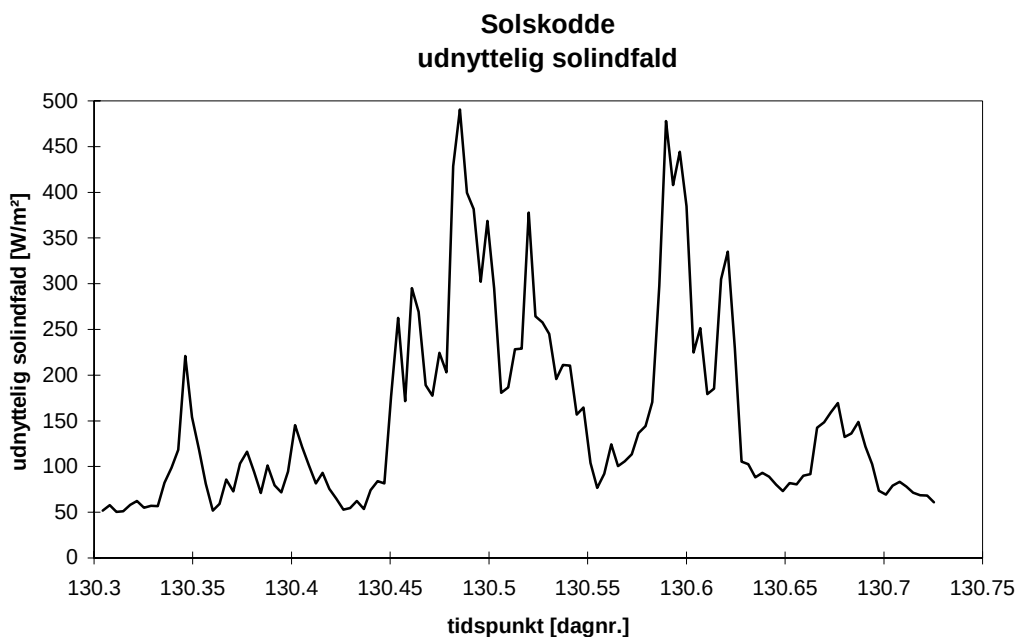
Som det fremgår af figur 6.4 har solskoddens varmekapacitet stor indflydelse på effektiviteten tidligt og sent på dagen. Dette fremgår endnu tydeligere af figur 6.14, hvor effektiviteten er vist for d. 10. maj. Her var solindfaldet meget fluktuerende, som det ses af figur 6.15.



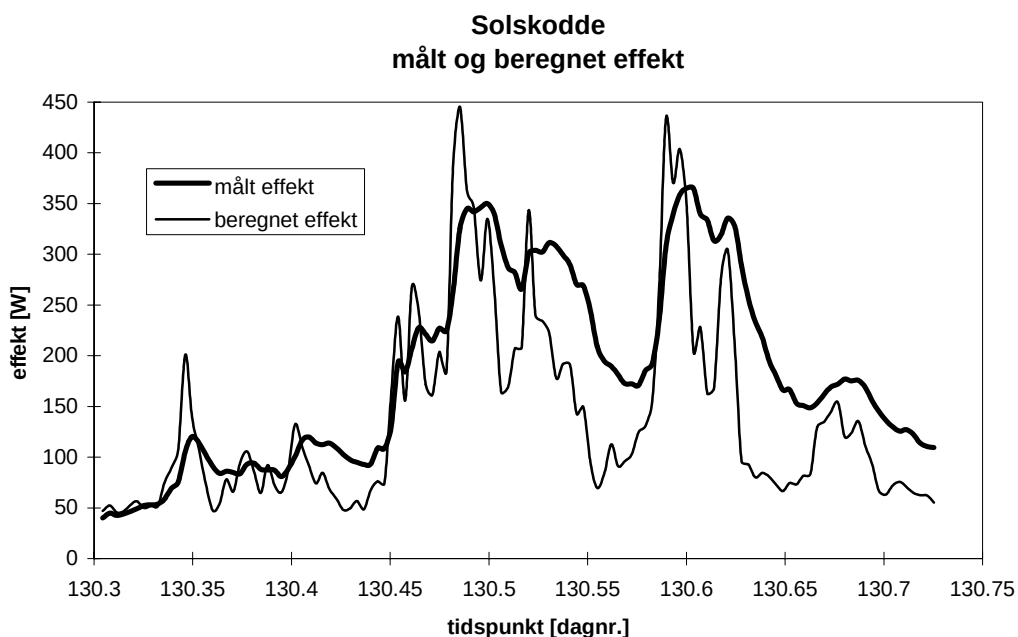
Figur 6.14. Effektiviteten for solskodden 10. maj for solindfald $>50 \text{ W/m}^2$.

I figur 6.16 er den målte effekt ud af solskodden d. 10. maj sammenlignet med den beregnede effekt udfra den stationære effektivitet. Middelvindhastigheden foran solskodden for perioden vist i figur 6.14-15 var $1,1 \text{ m/s}$ – dvs. samme vindhastighed som for d. 18. maj og dermed en formodet effektivitet på 37,9% (fra tabel 6.1). Den beregnede effekt er i figur 6.16 fundet ved at tage 37,9% af det udnyttelige solindfald og multiplicere med det transparente areal på $2,4 \text{ m}^2$ - altså en meget simpel ”model” af solskodden.

Figur 6.17-18 viser den samme situation som figur 6.16 men for d. 7. og 11. maj – en dag med klar himmel og en dag med overskyet (dagnr. 137 og 131 i figur 6.2). 11. maj: vindhastighed = $2,3 \text{ m/s}$ => effektivitet = 33,6% jvf. figur 6.10 – kurven for ca. $66 \text{ m}^3/\text{h}..$

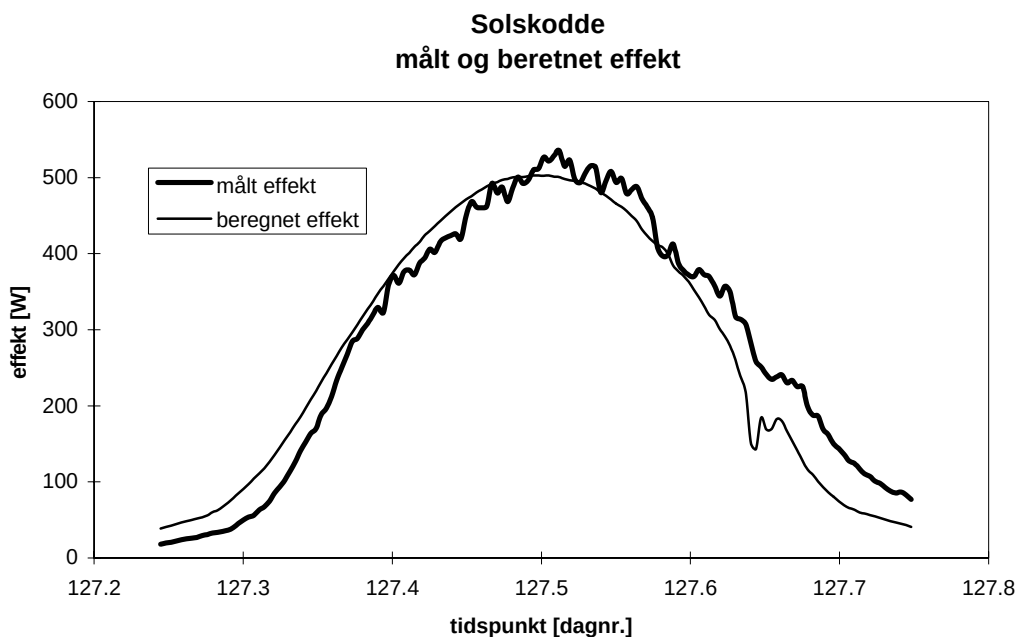


Figur 6.15. Udnyttelig solindfald på solskodden d. 10. maj for samme periode som i figur 6.14.

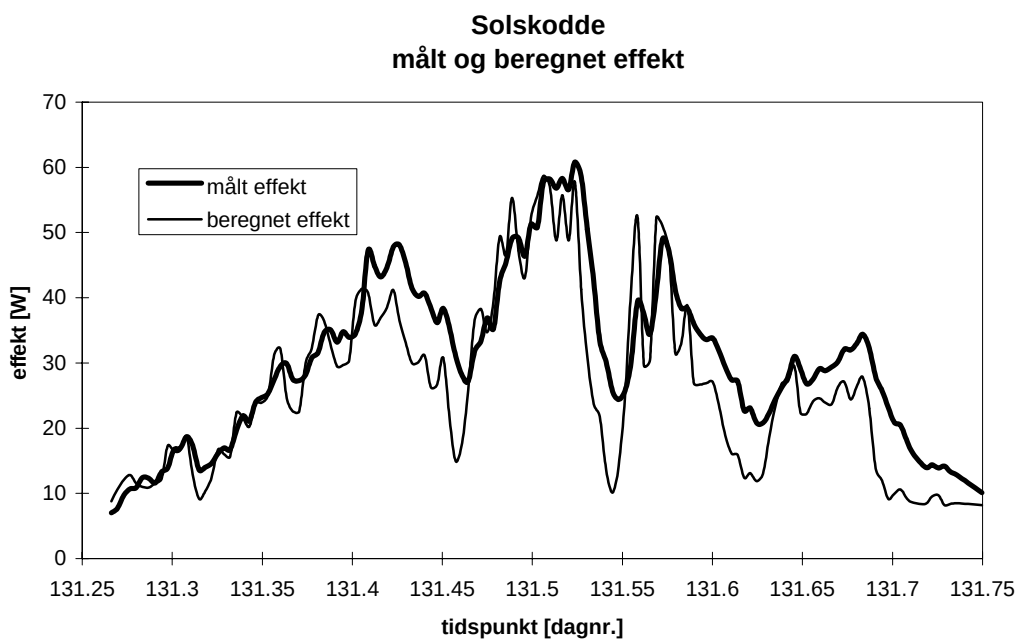


Figur 6.16. Målt og beregnet effekt ud af solskodden d. 10. maj. Udnyttelig solindfald >50 W/m^2 .

Figur 6.16-18 viser, at den beregnede effekt ud af solskodden som forventet er lidt ude af fase med den målte effekt. Den beregnede effekt er også mere fluktuerende ved fluktuerende solindfald end den målte effekt, hvilket også var forventet, idet “modellen” ikke har et dæmpende led i form af en varmekapacitet. For stabilt solindfald (figur 6.17) er den beregnede effektivitet mindre fluktuerende, idet “modellen” ikke tager hensyn til vindpåvirkingen og fluktuationer i volumenstrømmen af luft. Tabel 6.3 viser den målte og beregnede middeleffekt over de tre dage.



Figur 6.17. Målt og beregnet effekt ud af solskodden d. 7. maj. Udnyttelig solindfald >50 W/m^2 .



Figur 6.18. Målt og beregnet effekt ud af solskodden d. 11. maj. Udnyttelig solindfald >10 W/m^2 .

Tabel 6.3 viser, at den beregnede energimængde ud af solskodden – beregnet på baggrund af den stationære effektivitet – altid er lavere end den målte. Forskellen er størst for dage med fluktuerende solindfald og ubetydelig på klare dage. På overskyede dage (som der er mange af i Danmark) er forskellen også relativt beskednen.

Dato	Målt middeleffekt W	Beregnet middeleffekt W	Beregnet/ målt
Figur 6.16	181,8	140,3	0,77
Figur 6.17	284,2	275,8	0,97
Figur 6.18	30,5	26,4	0,87

Tabel 6.3. Sammenligning mellem målt og beregnet middeleffekt fra solskodden for tre udvalgte dage med forskellige vejrforhold.

Den simple "model" udelukkende baseret på den stationære effektivitet – uden hensyntagen til varmekapaciteten, vil på klare dage lede til en for stor tilført energimængde om morgen, men en for lille tilført mængde energi om eftermiddagen.

En mere korrekt model kræver således hensyntagen til varmekapaciteten. Der er taget hensyn til varmekapacitet i beregningen af besparelsen i opvarmningsbehovet i afsnit 6.1.6. Varmekapaciteten for prototypen forsøges fastlagt i det følgende.

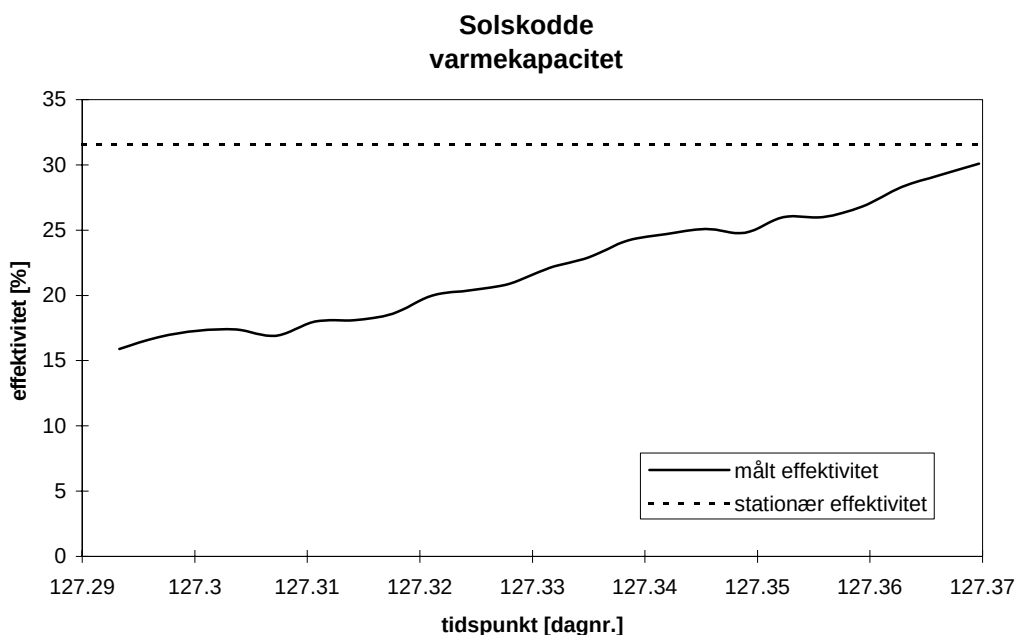
Tabel 6.4 angiver mængden og varmekapaciteten af de indgående materialer i prototypen. Undtagen persiennen på ca. 2 kg, er alle materialer i kontakt med omgivelserne. Materialernes varmekapacitet vil i større eller mindre grad indgå i solskoddens "reelle" varmekapacitet afhængig af solskoddens varmetab, absorptionen af solstråling i dæklagene samt varmeoverføringskoefficient mellem luft og materialer, hvor varmetabet er afhængig af vinden og volumenstrømmen af luft gennem solskodden, mens varmeoverføringen er afhængig af volumenstrømmen af luft gennem solskodden.

Materiale	Vægt $\text{kg/m}^2_{\text{transparent areal}}$	Varmekapacitet $\text{kJ/Km}^2_{\text{transparent areal}}$
Glas	16	12
Plast	5,2	6,2
Aluminium	7,4	6,8
I alt	28,6	25

Tabel 6.4. Vægt og varmekapacitet for de indgående materialer i prototypen.

På baggrund af målingerne vil den "reelle" varmekapacitet i det følgende blive estimeret. Det gøres på baggrund af målingerne på klare dage som vist i figur 6.4. Figur 6.19 viser opvarmningsforløbet om formiddagen d. 7. maj. Hvis varmekapaciteten var nul, ville effektiviteten hele dagen være 31,6%, men på grund af varmekapaciteten er effektiviteten om formiddagen lavere. Reduktionen i effektiviteten er altså udtryk for varmekapaciteten. Ved at integrere den energimængde, der er mellem de aktuelle effektiviteter og den stationære effektivitet og dividere med temperaturstigningen over samme tidsrum (korrigeret for stigningen i udelufttemperaturen), fås et mål for varmekapaciteten. De beregnede varmekapaciteter er vist i tabel 6.5. Som det ses af tabel 6.5, er to af de beregnede varmekapaciteter ved en volumenstrøm på omkring $203 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ helt udenfor, med en varmekapacitet mere end 2 gange varmekapaciteten i materialerne og understreger dermed den store usikkerhed ved den anvendte metode. Den store afvigelse på varmekapaciteten for store volumenstrømme hænger sammen med den mindre

temperaturdifferens over solskodden og dermed større usikkerhed på bestemmelsen af ikke blot varmekapaciteten, men også effektiviteten. De to sidste værdier for $203 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ udelades i den efterfølgende behandling af de beregnede varmekapaciteter.



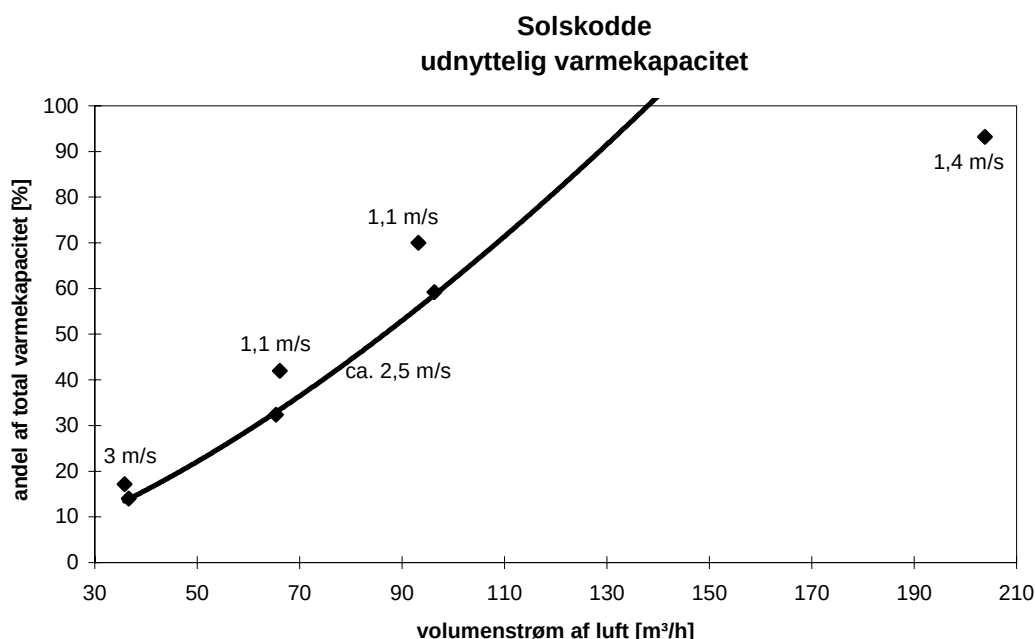
Figur 6.19. Graf til bestemmelse af solskoddens ”reelle” varmekapacitet.

Dato	Volumenstrøm af luft m^3/h	Vindhastighed m/s	”Reel” varme- kapacitet kJ/Km^2
19. maj	36,6	2,4	3,5
20. maj	35,8	3,0	4,3
7. maj	65,4	2,5	8,1
18. maj	66,1	1,1	10,5
28. maj	96,3	2,5	14,8
2. juni	93,2	1,1	17,5
16. juni	203,8	1,3	23,3
17. juni	203,3	2,0	(61,7)
19. juni	204,7	1,4	(67,3)

Tabel 6.5. Beregnet ”reel” varmekapacitet og samhörrende middelværdier for volumenstrømmen af luft gennem solskodden og vindhastighed foran solskodden.

Som det ses, stiger den ”reelle” varmekapacitet med volumenstrømmen af luft gennem solskodden. Dette skyldes, at ved forøgede lufthastigheder falder varmeovergangsmodstanden mellem luft og konstruktionen. Dette betyder, at en øget del af solskoddens totale varmekapacitet indgår i den ”reelle” varmekapacitet. Figur 6.20 viser, hvor stor en procentdel den ”reelle” varmekapacitet udgør af den totale varmekapacitet for prototypen fra tabel 6.4 som funktion af volumenstrøm af luft gennem solskodden og vindhastigheden foran solskodden. Regressionslinien er den ”reelle” varmekapacitet for en vindhastighed på ca. $2,5 \text{ m/s}$. Figur 6.20 viser, at afhængigheden af vindhastigheden er mindre entydig, men antyder, at den ”reelle”

varmekapacitet stiger med faldende vindhastighed. Dette er også logisk, da varmetabet mindskes med faldende vindhastighed, hvorved middeltemperaturen af materialerne øges.



Figur 6.20. Den ”reelle” varmekapacitets andel af den totale varmekapacitet for solskodden.

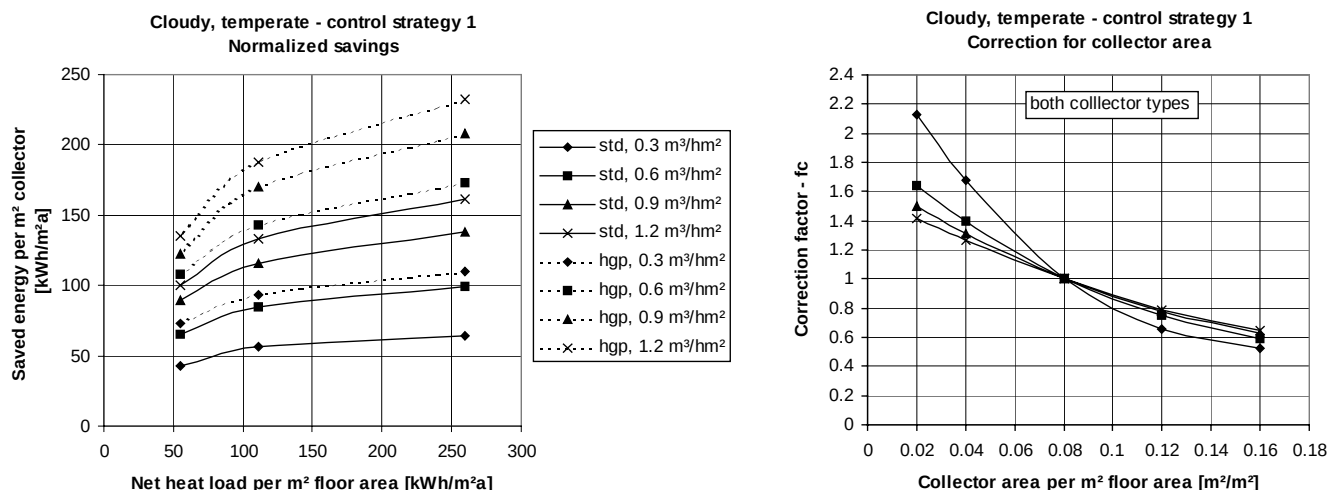
Ved fastlæggelse af en solskoddes ydelse ved hjælp af en model, der tager hensyn til solskoddens varmekapacitet, kan figur 6.20 anvendes med meget forsigtighed. Værdierne i figur 6.20 er som vist med værdierne i tabel 6.4 for 203 m³/hm² behæftet med en meget stor usikkerhed.

5.1.6. Beparelser i opvarmningsbehovet

Beparelser i opvarmningsbehovet som følge af montering på en lejlighed undersøges i dette afsnit som nævnt ved hjælp af nomogrammerne udviklet (af nærværende rapport forfatter) i IEA Task 19 – Solar Air Systems (Hastings and Mørck, 1999) for luftsolfarmesystemer til forvarmning af friskluft. Nomogrammerne er udviklet ved hjælp af Transair (Hastings and Mørck, 1999), der er en specialversion af simuleringsprogrammet TRNSYS. Nomogrammerne giver mulighed for en hurtig bestemmelse af ydelsen for solvarmeanlæg til forvarmning af friskluft. I nomogrammerne er der implicit taget hensyn til de dynamiske forhold i lejligheden og luftsolfangeren – herunder også til varmekapaciteten i lejlighed og solfanger.

”Nomogrammet”, der anvendes i det aktuelle tilfælde, er vist i figur 6.21. ”Cloudy, temperature” er synonym for det danske referenceår (TRY) og ”control strategy 1” betyder, at der altid suges luft gennem solfangeren i dagtimerne. ”Nomogrammet” består af to grafer: En graf der angiver den normaliserede besparelse ved et solfanger areal på 0,08 m² pr. m² opvarmet etageareal og en graf med en korrektionsfaktor, hvor der kan tages hensyn til andre solfangerarealer. Besparelsen fås ved at multiplicere værdierne fra de to grafer.

Indgangsparametrene til graferne er rumopvarmningsbehovet pr. m² etageareal, volumenstrømmen af luft gennem solfangeren pr. m² etageareal, solfangertypen (std: standardsolfanger og hgp: højeffektiv solfanger – se figur 6.13) og solfangerarealet pr. m² etageareal.



Figur 6.21. ”Nomogram” til beregning af ydelsen for luftsolfarmesystemer til forvarmning af friskluft i Danmark, hvor friskluften i dagtimerne suges gennem solfangeren.

I det følgende vises et regneeksempel for at illustrere ydelsen for solskodden monteret på en lejlighed.

Der tages udgangspunkt i en lejlighed på 60 m² med et rumopvarmningsbehov på 100 kW/m²_{etageareal}. Det transparente areal af solskodden er 2,5 m² og volumenstrømmen af luft gennem solskodden er 50 m³/h. Indgangsparametrene i figur 6.21 er det specifikke opvarmningsbehov på 100 kW/m²_{etageareal}, den specifikke volumenstrøm: 50/60 = 0,833 m³/hm²_{etageareal} og det specifikke solfangerareal: 2,5/60 = 0,0417 m²/m²_{etageareal}. I Istedgade kommer solskodden til at sidde på køkkensiden, hvor udsugningen er placeret, så solskodden får kun mulighed for at arbejde med omkring halvdelen af lejlighedens rumopvarmningsbehov. Her er det specifikke opvarmningsbehov 50 kW/m²_{etageareal}. Monteret på stuesiden vil den opvarmede luft suges om til nordsiden/køkkensiden – solskodden vil i det tilfælde få mulighed for at arbejde med næsten hele lejlighedens opvarmningsbehov.

Det er svært at udtale sig om vindforholdene i en karré i en by. Derfor beregnes besparelsen for en vindhastighed på både 1 og 3 m/s, hvilket ifølge afsnit 6.1.5 svarer til henholdsvis midt mellem ”hgp”- og ”std”solfangeren for 1 m/s og ”std”solfangeren for 3 m/s i figur 6.21.

Tabel 6.6 viser den specifikke besparelse som følge af solskodden, mens tabel 6.7 viser den totale besparelse. Der er i besparelserne i tabel 6.6-7 ikke taget hensyn til skygger på solskodden. Skygger vil reducere besparelsen.

Vindhastighed	Solskodderelateret rumopvarmningsbehov	
	50 kW/m ² _{etageareal}	100 kW/m ² _{etageareal}
3 m/s	110 kWh/m ² _{solfanger} pr år	155 kWh/m ² _{solfanger} pr år
1 m/s	135 kWh/m ² _{solfanger} pr år	190 kWh/m ² _{solfanger} pr år

Tabel 6.6. Den specifikke besparelse som følge af en solskodde på 2,5 m² for en lejlighed på 60 m².

Vindhastighed	Solskodderelateret rumopvarmningsbehov	
	50 kW/m ² _{etageareal}	100 kW/m ² _{etageareal}
3 m/s	275 kWh pr år	390 kWh pr år
1 m/s	340 kWh pr år	475 kWh pr år

Tabel 6.7. Besparelsen som følge af en solskodde på 2,5 m² for en lejlighed på 60 m².

Ydelsen for solskodden er som forventet stærkt afhængig af det rumopvarmningsbehov, den er med til at dække samt af vindhastigheden foran skodden. Volumenstrømmen af luft gennem solskodden har også indflydelse på ydelsen. Hvis en større del af lejlighedens friskluftbehov blev trukket gennem solskodden – f.eks. 100 m³/h, vil ydelsen stige med 20-30% - mest ved høje vindhastigheder. Men dette vil kræve en ventilator i forbindelse med solvæggen for at kunne overvinde tryktabet i solskodden. Det vil på den anden side muliggøre et filter i forbindelse med solskodden, hvori den friske luft kan renses. En ventilator i forbindelse med solskodden vil betyde et øget elforbrug, der skal sammenholdes med merydelsen.

6.1.7. Varmelagring i væggen

Et område, der ikke er blevet behandlet i målingerne, er den varmeakkumulering, der sker i væggen bag solskodden som følge af, at luften trækkes ind gennem væggen. Muren omkring kanalerne gennem væggen vil blive varmet op i dagtimerne og senere afgive varmen igen, når solindfaldet aftager. Afhængig af den termiske tyngde af væggen, vil denne således udjævne temperaturen af friskluften, så der opnås lavere maksimaltemperaturer og højere temperaturer om aftenen. Dette har en gunstig effekt på komfort og opvarmningsbehov. Da væggen befinder sig bag solskodden, og da der i dagtimerne hele tiden trækkes luft gennem kanalerne i væggen, vurderes det at varmetabet er minimalt om dagen. Når solskodden trækkes hen foran skodden, vil der stadig trækkes luft gennem kanalerne (hvis spjældene på indersiden af væggen ikke lukkes), således at det meste af den lagrede varme kan genvindes. Udfra beregningerne i IEA Task 19 (Hastings and Mørck, 1999) kan det betyde en forøgelse i solskoddens ydelse på op til 5%.

6.2. Temperaturforhold i solskodden

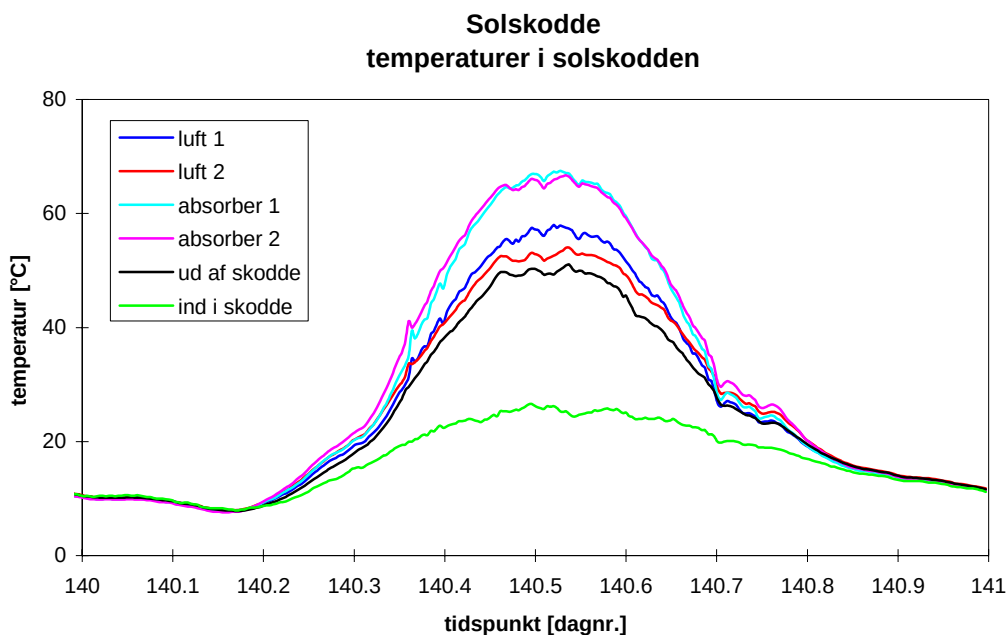
I dette afsnit undersøges temperaturforholdene i prototypen for at muliggøre en vurdering af varmeoverføringsevnen mellem persienne og luft, mindskningen i varmetabet gennem den væg solskodden er monteret foran, samt om der er problemer med temperaturudvidelser.

6.2.1. Varmeoverføringsevne

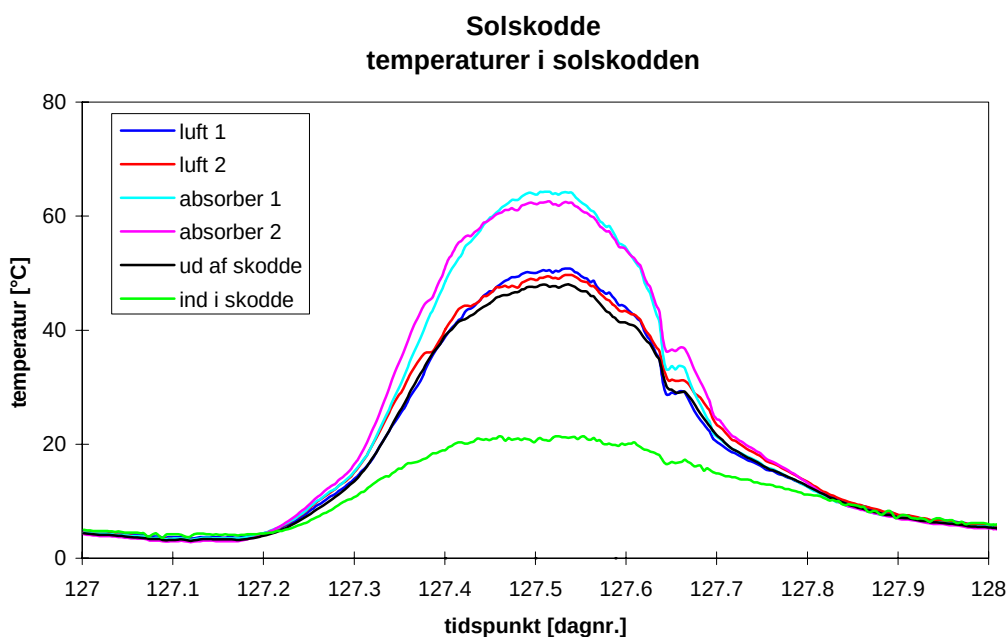
Figur 6.22-24 viser temperaturforholdene i prototypen for henholdsvis d. 20., 7. og 28. maj – dvs. for en volumenstrøm af luft gennem solskodden på henholdsvis ca. 36, ca. 66 og ca. 96 m³/h.

I labelboksen betyder "luft 1" og "absorber 1" henholdsvis lufttemperaturen og persiennetemperaturen i det nederste tredjedelspunkt i solskodden som vist i figur 4.3 og 4.5, mens "luft 2" og "absorber 2" er henholdsvis lufttemperaturen og persiennetemperaturen i det øverste tred-

jedelpunkt i solskodden. ”ind i skodde” og ”ud af skodde” betyder henholdsvis temperaturen af luften til skodden og fra skodden.

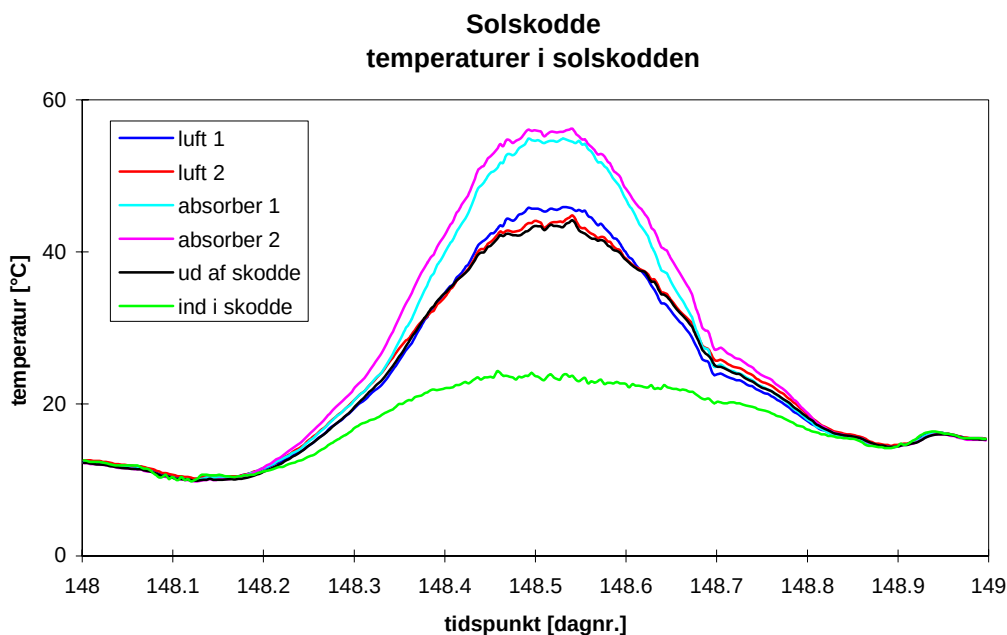


Figur 6.22. Temperaturforhold i solskodden d. 20. maj ved en volumenstrøm af luft gennem solskodden på ca. 36 m³/h.



Figur 6.23. Temperaturforhold i solskodden d. 7. maj ved en volumenstrøm af luft gennem solskodden på ca. 66 m³/h.

Figur 6.22-24 kan ikke sammenlignes direkte, da solindfaldet var forskelligt de tre dage, selv om de alle var klare solskinsdage. Det maksimale udnyttelige solindfald var: 20. maj: 600 W/m², 7. maj: 660 W/m² og 28. maj: 570 W/m².



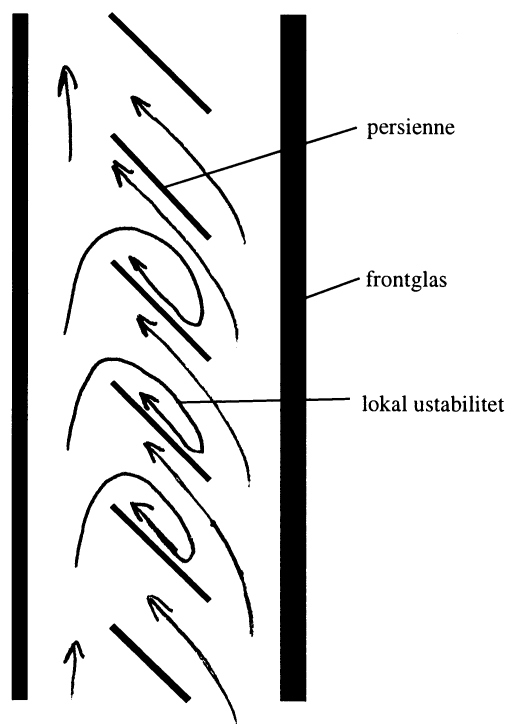
Figur 6.24. Temperaturforhold i solskodden d. 28. maj ved en volumenstrøm af luft gennem solskodden på ca. 96 m³/h.

Figur 6.22-24 viser, at absorbertemperaturerne i de to målepunkter næsten er identiske lige som lufttemperaturerne næsten er identiske i figur 6.23-24. Lufttemperaturerne er lidt højere end udløbstemperaturen fra solskodden. Dette indikerer, at der ikke sker en gradvis opvarmning af luften over solskodden, men kun når luften passerer persiennen på sin vej fra forsiden til bagsiden af solskodden. At lufttemperaturen ud af skodden er lavere end lufttemperaturen i tredjedelspunkterne skyldes, at noget luft ikke passerer persiennen, men løber op langs dæklagene. Jo lavere volumenstrøm af luft, jo større del af luften vil ikke passere persiennen, som det også ses af figur 6.22-24. Temperaturen ud af skodden nærmer sig mere og mere lufttemperaturen i tredjedelspunkterne, jo højere volumenstrømme af luft er. Dette er også verificeret ved røgtests. Her sås det tydeligt, at en større del af luften løb op langs dæklaget ved 36 m²/h end ved 66 m²/h. Røgtestene viste desuden, at luftstrømningen var jævn over hele skodden.

Figur 6.22 viser, at de to lufttemperaturer i tredjedelspunkterne ikke er ens – der er en forskel på op til 5°, og hvor lufttemperaturen i det øverste tredjedelspunkt er lavere end i det nederste tredjedelspunkt, mens absorbertemperaturene er ens. Dette er ikke tilfældet ved de to andre volumenstrømme. Fænomenet skyldes sandsynligvis et specielt strømningsfænomen, der opstår i solskodden ved lave volumenstrømme. Røgtest viste, at der opstår lokal ustabilitet i strømningen i området mellem de to tredjedelspunkter. Luft, der allerede har passeret persiennen, slår en krølle (en vortex) ned omkring forsiden af persiennen som vist i figur 6.25. Denne ustabilitet varede kun få sekunder, og skifter hele tiden lokalitet. Derfor er det ikke lykkedes at fotografere fænomenet.

Figur 6.22-24 viser en maksimal temperaturdifferens mellem luft og absorber på 10°C eller derover. Denne temperaturdifferens er udtryk for varmeoverføringsevnen mellem absorber og luft. I almindelige væskesolfangere er denne temperaturdifferens omkring et par grader, hvorimod temperaturdifferensen er meget højere i luftsolfangere på grund af den dårlige varmeoverføringsevne, når luft er involveret. I figur 6.22-24 udgør temperaturstigningen for luf-

ten over absorberen omkring 70% af temperaturdifferencen mellem indløbstemperaturen og absorbertemperaturen. Det er altså en pæn varmeoverføring, der er tale om, sandsynligvis fordi strømningsbilledet er turbulent langs persiennen, da det er en så kort strækning, at strømmingen ikke kan nå at blive fuldt udviklet og dermed meget turbulent.

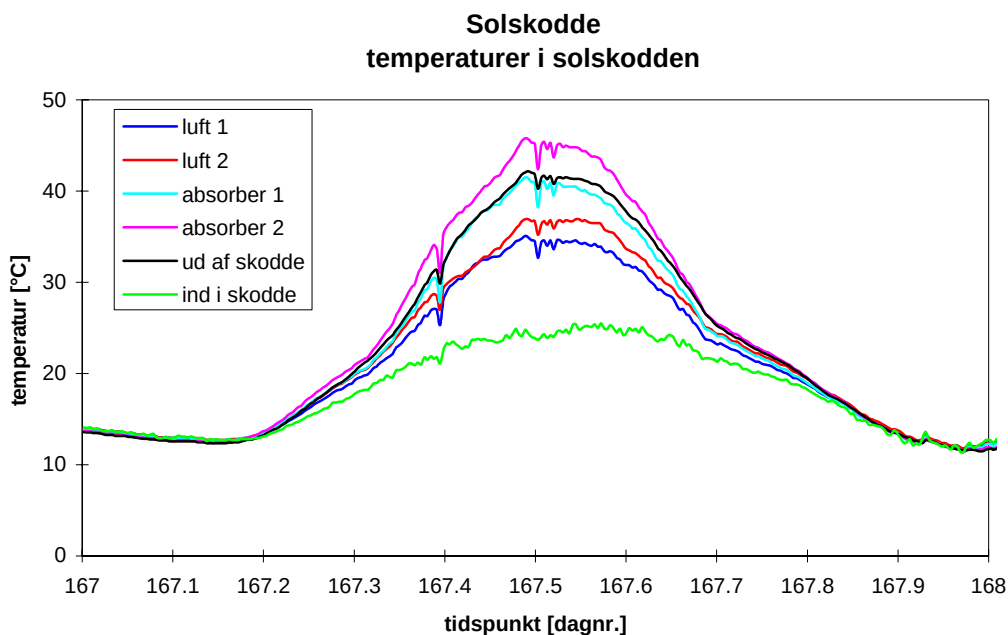


Figur 6.25. Lokal ustabilitet i luftstrømningen der opstår ved lave volumenstrømme.

At varmeoverføringen mellem persienne og luft er tilfredsstillende illustreres yderligere af figur 6.8, hvor solskoddens effektivitet ligger pænt i forhold til de andre solfangere, som typisk har et højere trykfald, hvilket ofte medfører bedre varmeoverføring.

Det kan ikke betale sig at forøge varmeoverføringen, idet det højst sandsynlig vil lede til øget trykfald. Dette vil betyde, at en lavere luftmængde vil blive suget gennem solskodden, hvilket igen vil føre til en lavere varmeoverføring og derfor til en lavere ydelse for solskodden.

Figur 6.26 viser et andet billede end figur 6.22-24. Volumenstrømmen er her ca. 203 m³/h. Denne figur viser et mere traditionelt billede af opvarmningsforløbet i en luftsolfanger. Temperaturen af luften stiger op gennem solskodden, ligesom absorbertemperaturen i det øverste tredjedelspunkt er højere end i det nederste tredjedelspunkt. Det ændrede billede skyldes den højere lufthastighed. Lufthastigheden er i dette tilfælde så høj, at persiennens lameller vibrerer. Varmeovergangen sker her ikke kun i et punkt – ved passage ind gennem persiennen, men hele vejen op.



Figur 6.26. Temperaturforhold i solskodden d. 17. juni ved en volumenstrøm af luft gennem solskodden på ca. 203 m³/h.

6.2.2. Reduktion af varmetab gennem væggen bag solskodden

Figur 6.27-28 viser en sammenligning mellem overfladetemperaturen bag solskodden og på den friteksponerede væg – se figur 4.6. Figur 6.27 er for perioden 11.-15. maj (dagnr. 131-135) (begge dage inkl.), hvor det var overskyet – se figur 6.2, mens figur 6.28 er for perioden 16.-18. maj (dagnr. 136-138) (begge dage inkl.), der er en periode med vekslende skydække og klart vejr. Figurerne viser en beskeden forskel i overfladetemperaturerne <5°C.

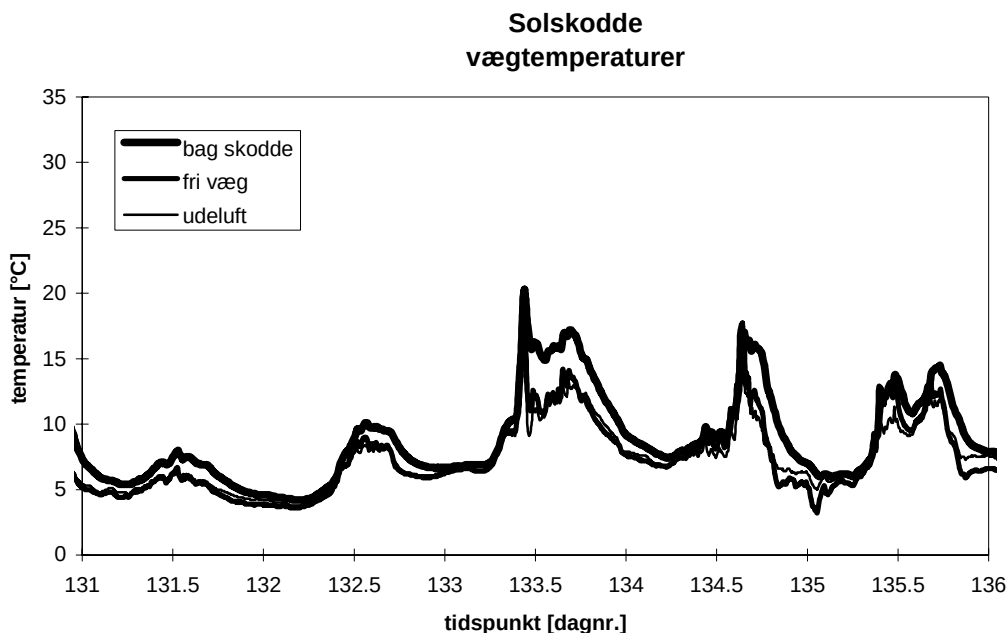
En forøgelse af overfladetemperaturen med f.eks. 3°C vil på årsplan føre til en besparelse i opvarmningsbehovet på under 3 kW/m², for en væg med en U-værdi på 0,3 W/Km², hvis solskodden er foran væggen i gennemsnit 12 timer i døgnet i fyringssæsonen. Foran en væg med en U-værdi på 1 W/Km² vil besparelsen tilsvarende være under 10 kWh/m². Dvs. det er en meget lille besparelse, der er tale om. Den vil helt drukne i usikkerheden på bestemmelsen af solskoddens ydelse og vil derfor ikke blive behandlet yderligere her.

Om natten, når solskodden er foran den franske dør, vil der forsat blive suget luft ind gennem hullerne i væggen – med mindre skydeventilen er lukket. Med åben skydeventil vil hullerne i væggen ikke forøge varmetabet gennem væggen, idet den varme, der ellers ville undslippe gennem hullerne, bliver suget ind igen sammen med den friske luft.

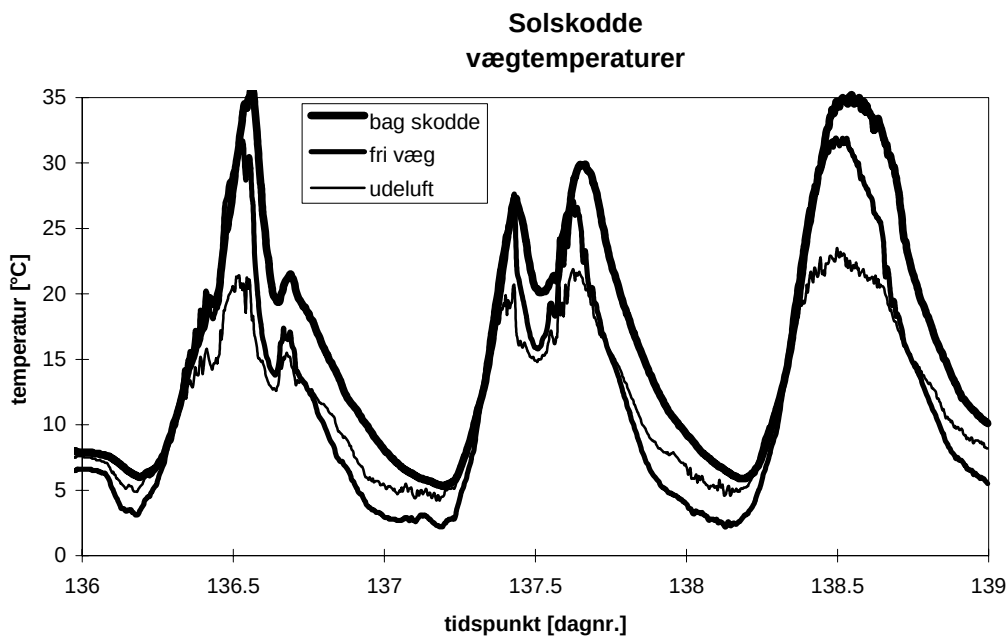
6.2.3. Problemer med temperaturudvidelser

Det eneste problem, der er konstateret med temperaturudvidelse af solskoddens komponenter, er med bagpladen i plast. På grund af en større temperaturudvidelseskoefficient for polycarbonat (som bagpladen er lavet af) i forhold til aluminium, buer bagpladen så langt ud, at den støder mod væggen. Dette har i visse situationer gjort det umuligt at bevæge solskodden.

Plast blev anvendt for at mindske vægten af solskodden. Men på baggrund af erfaringerne med prototypen anbefales det, at bagpladen i den endelige version af solskodden udskiftes med glas, selv om det vil gøre solskodden tungere.



Figur 6.27. Udelufttemperaturen samt overfladetemperaturen på væggen bag solskodden og på en frit eksponeret væg – 11.-15. maj.



Figur 6.28. Udelufttemperaturen samt overfladetemperaturen på væggen bag solskodden og på en frit eksponeret væg – 16.-18. maj.

6.3. Reduktion af varmetabet gennem den franske dør

Når solskodden er foran den fransk dør, reduceres U-værdien gennem døren. Det har ikke været muligt at måle reduktionen i U-værdien for den franske dør, da det er så små varmestrømme, der er tale om, at det kræver en "guarded hot box" at fastlægge reduktionen i U-værdien. I stedet er besparelsen beregnet.

Solskodden består af to lag glas med en persienne imellem. Persiennen er sort udadtil og blank indadtil. Solskodden vil derfor strålingsmæssigt virke som en trelagsrude med en lavemissiv belægning, men konvektionsmæssigt som en mellemting mellem en to- og trelagsrude, da persiennens lameller har en vinkel på 45°. U-værdien for solskodden antages derfor at være en middelværdi mellem en tolagsrude (1,7 W/Km²) med en lavemissiv belægning og en trelagsrude også med en lavemissiv belægning (1,3 W/Km²), dvs en U-værdi på 1,5 W/Km².

Hvis U-værdien af døren er 3 W/m²K, reduceres den til 1 W/m²K, mens hvis U-værdien er 1,8 W/m², vil denne blive reduceret til 0,8 W/m². Hvis solskodden i gennemsnit er foran døren i 12 timer pr. dag i fyringssæsonen, vil den årlige besparelse være i størrelsesordenen 85 og 45 kWh/m² for henholdsvis en dør med en U-værdi på 3 og 1,8 W/m² forudsat, at solskodden slutter rimelig tæt. For en fransk dør på 2,5 m² (lig det transparente areal i eksemplet i afsnit 6.1.6) vil besparelsen altså blive 210 og 110 kWh pr. år.

6.4. Solskodden som solskorsten

Om sommeren er der ikke brug for forvarmning af friskluft, men derimod ofte brug for køling ved hjælp af koldere frisk luft. Der har derfor også været tanker fremme om at anvende solskodden som solskorsten om sommeren. Det skal da være muligt at lukke hullerne i top og bund og i stedet åbne i bunden ind til lejligheden og i toppen ud til det fri. På den måde vil skodden ved hjælp af selvcirkulation kunne trække luft ud af lejligheden – luft som da kan erstattes med koldere luft gennem et vindue på nordsiden. I dette tilfælde er det nødvendigt at åbne et vindue på nordsiden, så der kan komme tilstrækkelig med luft ind i lejligheden til både at føde afkastventilationen og solskodden, da afkastventilationen ellers vil suge forvarmet luft ind i lejligheden "baglæns" gennem solskodden.

På baggrund af de målte tryktab over prototypen og de fundne effektivitetsligninger fra tabel 6.2, er det muligt at bestemme hvilken volumenstrøm af luft, solskodden er i stand til at trække gennem lejligheden. På baggrund af effektivitetsligningerne, er det muligt at bestemme udløbstemperaturen ved en given volumenstrøm af luft og et givent solindfald. Herefter kan drivtrykket over solskodden bestemmes ved hjælp af nedenstående ligning.

$$\Delta p = h \cdot g \cdot (\rho_{\text{ind}} - \rho_{\text{ud}})$$

hvor h er højdeforskellen mellem ind- og udløb [m],

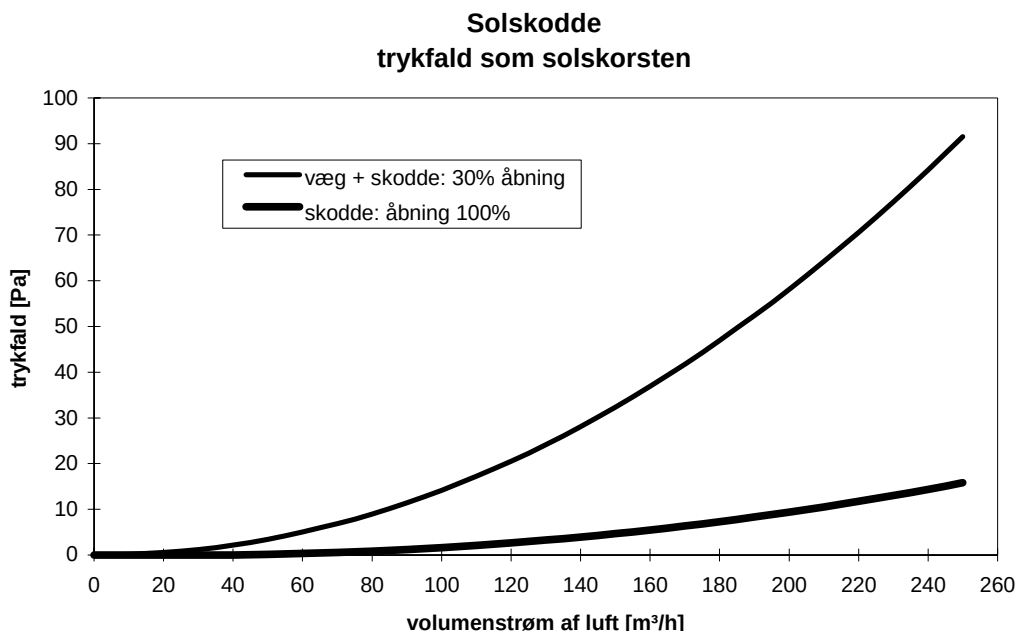
g er tyngdeaccelerationen = 9,8 m/s²,

ρ_{ind} er densiteten af indløbsluften [kg/m³],

ρ_{ud} er densiteten af udløbsluften [kg/m³].

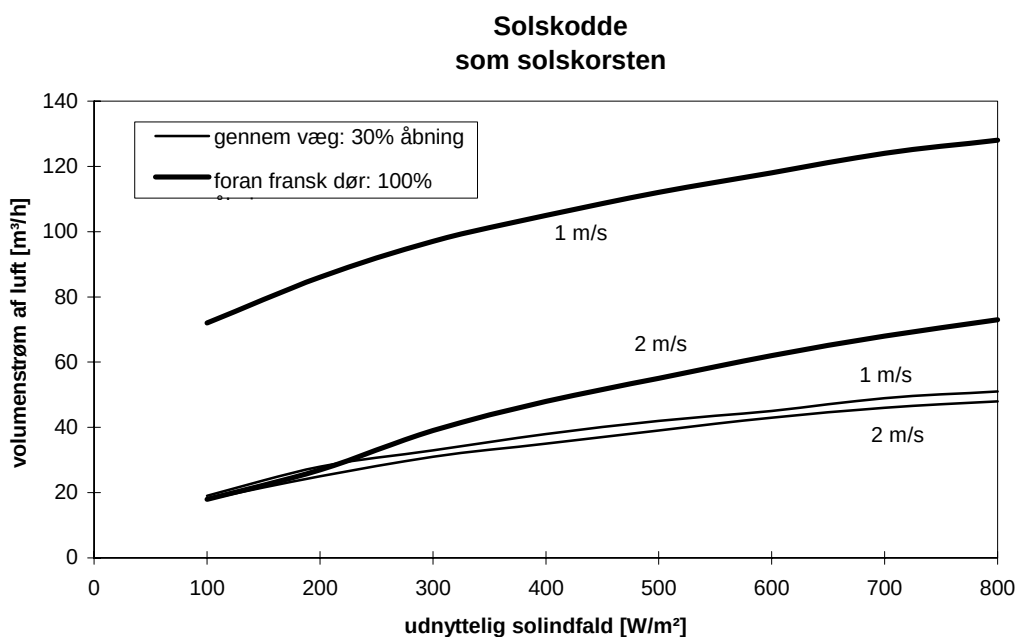
Der undersøges to tilfælde: Det ene tilfælde er solskodden placeret foran væggen, og der er anbragt kanaler mellem rum og solskodde gennem væggen til bunden af solskodden – lige som til toppen af solskodden. Tryktabet over solskodden + væg er da identisk med kurven for

30% i figur 4.3. I det andet tilfælde er solskodden placeret foran den åbenstående fransk dør. Hullerne i top og bund svarer her til 100% åbning af hullerne i toppen af prototypen, da det her er muligt at lave et større hulareal. Tryktabet for dette tilfælde fås ved at trække tryktabet over væggen for 100% i figur 4.5 fra tryktabet over skodde + væg for 100% i figur 4.3. De to tryktab er vist som funktion af volumenstrømmen i figur 6.29.



Figur 6.29. Trykfaldet over solskodden for de to tilfælde der undersøges for solskodden som solskorsten.

Figur 6.30 viser den volumenstrøm af luft, solskodden kan trække ud af lejligheden afhængig af det udnyttelige solindfald og vindhastigheden.



Figur 6.30. Den opnåelige volumenstrøm gennem solskodden, når den fungerer som solskorsten – placeret henholdsvis foran væggen og en åbenstående fransk dør.

Som det ses af figur 6.30, kan solskodden som solskorsten placeret foran en åbenstående fransk dør suge $\frac{1}{2}$ -1 gang den volumenstrøm ($126 \text{ m}^3/\text{h}$) bygningsreglementet foreskriver for lejligheder med mekanisk ventilation. Solskodden har således et potentiale for at fungere som solskorsten. Dette er kendt teknik – f.eks. i Italien, hvor solfangeren i et specielt luftsolvarmekoncept (Barra-Castantini) om sommeren udnyttes som solskorsten til køling af lejligheder (Hastings, 1999). Udnyttelse af solskodden som solskorsten kræver udvikling af spjæld til top og bund til skift mellem vinter- og sommerdrift.

På grund af det store tryktab gennem væggen, fungerer solskodden mindre godt som solskorsten placeret foran væggen. Denne placering som solskorsten giver desuden problemer om vinteren, idet kanalerne gennem væggen ved bunden af solskodden vil danne en betydelig kuldebro med deraf følgende komfortproblemer og forøget rumopvarmningsbehov.

7. Funktionel og visuel evaluering

Efter at have været monteret på forsøgsvæggen i ca. 2 måneder blev solskodden inspiceret for at gennemføre en funktionel og visuel evaluering af solskodden.

7.1. Funktionel evaluering

I afsnit 6.2.3 blev det nævnt, at polycarbonatpladen, der danner bagvæg i solskodden, skal udskiftes med glas, da polycarbonatpladen buler så meget ud, at denne berører væggen. Der var valgt polycarbonat som bagplade, fordi dette er lettere end glas. Prototypen vejer 69 kg. Hvis polycarbonatpladen udskiftes med glas, vil vægten forøges til 81 kg. Vægten af solskodderne til Istedgade 43 vil med to glas blive ca. 80 kg, hvis der vælges en ensidig skodde. En todelt model bør derfor overvejes, selv om den bliver dyrere.

Der skal bruges en del kræfter for at rulle prototypen hen foran den franske dør. De første 20-30 cm er ikke så svære, mens det er vanskeligt at skyde den de sidste 10-20 cm. Det er tildels fordi, der her er en dårlig arbejdsstilling, men specielt fordi bunden af prototypen støder mod dørtrinnet, idet prototypen vrider en lille smule.

Problemet kan løses på flere måder: Solskodden bør rykkes længere ud fra væggen, så afstanden optager skævheder i væg og solskodden – afstanden bør da være omkring 2 cm. En styreskinne i bunden af solskodden hele vejen hen i stedet for som nu ét styrehjul op i bunden af solskodden placeret på væggen til højre for den franske dør (set udefra). Dette vil dog betyde en større friktion og dermed forøge den kraft, der er nødvendig for at skyde solskodden frem og tilbage. En tredje mulighed er at lave solskodden lettere. Det er glasset, der udgør den største del af vægten - specielt hvis begge dæklag er af glas – se tabel 6.4. Glasset kan evt. erstattes af hårdt opspændte forstærkede teflonfolier på en aluminiumsramme. Dette vil betydeligt reducere vægten af solskodden og samtidig øge transmitansen for solindstrålingen. Dog vil der specielt for den indvendige folie være risiko for beskadigelse.

Efter 1,5 måned med konstant volumenstrøm af luft gennem solskodden har der lagt sig støv og små insekter (dog ikke så mange) på persiennens lameller – mest i den nederste del af solskodden. Dog mindre end forventet med en ind sugning så tæt ved jorden. Støvbelægning på lamellerne vurderes - med baggrund i erfaringer fra traditionelle solfangere – ikke at have en målelig effekt på solskoddens ydelse. Støvbelægning er derfor hovedsagelig et visuelt problem. Støvbelægningen kan kun svagt anes på 5 meters afstand. Når solskodderne samtidigt kommer op i højden, så man kikker ind parallelt med lamellerne (og parallelt ned mellem lamellerne indefra) vil støvbelægningen ikke give visuelle problemer, måske undtagen for solskodder placeret på stuelejligheder, hvor det tilgængeligt er let at komme til at rense solskodderne.

Rengøring af solskodden er muliggjort ved at dæklaget er hængslet i den ene side. Solskodden kan åbnes ved at løsne få skruer i den anden side. Dette muliggør indvendig rengøring af glasset samt rengøring af persienne og filter i bunden af solskodden. Tyngden og størrelsen af frontglasset betyder dog, at det er nødvendigt at være to personer, når solskodden skal åbnes f.eks. for rengøring – en til at holde frontglasset og en til at pudse glassene og rengøre persiennen.

Der er ikke konstateret kondensdannelse i solskodden. Dette kan dog forekomme på klare nætter. Denne kondens vil hurtigt forsvinde ved solopgang. Placeringen af luftindtaget vendende nedad i bunden af solskodden bevirker, at slagregn ikke kan trænge ind i solskodden og gøre eventuelle støvansamlinger våde. Det vurderes derfor, at risikoen for opvækst af mikroorganismer i solskodden er minimal, da solskodden holdes tør af sollyset i kombination med den kontinuerlige luftstrøm gennem solskodden. Tilgængæld kan det underste bæreprofil udgøre et problem, idet vand og snavs kan ophobes på dette profils vandrette flade. Det skal derfor sikres, at vand og snavs kan løbe af.

Lige efter montagen af solskodden blev der observeret fugleklatrer på det yderste dæklag. Dette kan blive et stort problem i byen, hvor der er mange duer. Bæreprøfilen skal derfor sikres med et dueværn – f.eks. i form af en tynd wire. Derimod er det ikke muligt at duesikre det nederste profil, da skodden kører hen over denne i hele profilers længde. Profilers funktion er at bære styrehjulet i bunden af skodden og hindre indkik op i skoddens indsugning. Profiler er derfor ikke nødvendig, da styrehjulet kan bæres af en vinkel og indkik kan hindres med et profil påsat solskodden.

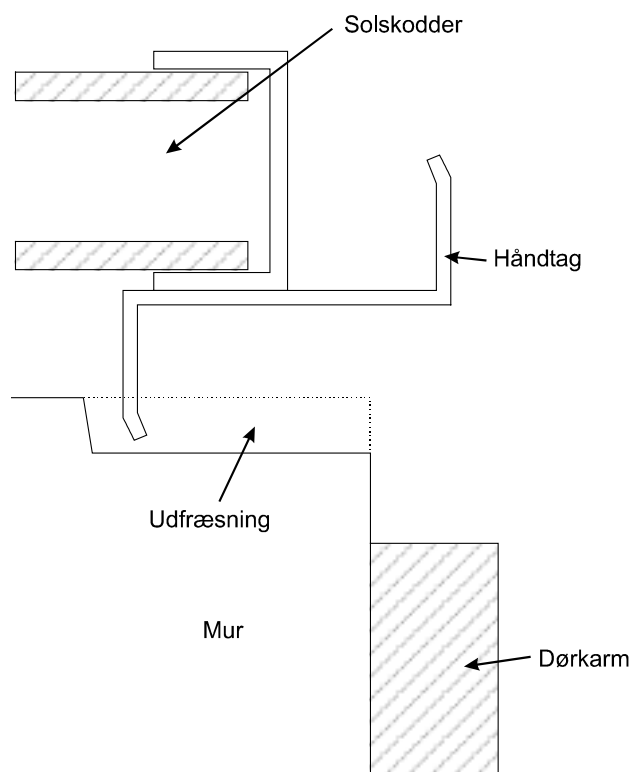
Når solskodden er foran den franske dør, er indsugningshullerne frit tilgængelige som vist i figur 3.5. Der bør derfor monteres insektnet mellem mur og profil udfor hullerne. Insektnettet skal have en stor maskestørrelse for undgå et for stort trykfald over nettene.

Når solskodden fungerer som solafskærmning om sommeren, vil solskodden ved selvcirkulation af luft føre varme ind til mellemrummet mellem solskodde og dør eller direkte ind i lejligheden, hvis døren er åben. Dette er problematisk, da formålet med solskodden som solafskærmning netop er at holde varmen fra solen ude. Derfor bør profiler, der danner overgang mellem solskodde og huller i væggen – se figur 3.5 – føres hele vejen hen over den franske dør. Dog skal der ikke være huller i profiler over døren. Den lille spalte mellem solskodde og profil vil bevirke, at der ikke kan opnås et tilstrækkeligt drivtryk i solskodden til at drive en nævneværdig mængde varme ind i lejligheden. Ved hjælp af teorien i afsnit 6.4 er den maksimale volumenstrøm beregnet til under 10 m³/h.

Der er ingen håndtag på prototypen til at trække denne frem og tilbage. Problemet er, at håndtaget på indersiden skal kunne skydes ind forbi dørkarm og væg. Derfor er en placering af solskodden 2 cm udfra væggen hensigtsmæssig. I renoveringssager, hvor dørkarmen typisk trækkes lidt ind i forhold til væggen, er muligheden for placering af håndtag yderligere forbedret. Dog er det sandsynligvis nødvendigt at lave en udfræsning (på ca. 20 x 3 x 1-2 cm³ (h x b x d)) i væggen på højre side af døren (set forfra) i ca. 1 meters højde for at skabe plads til det indvendige håndtag, når solskodden er foran væggen som vist på figur 7.1. Figur 7.1 viser et profil, der danner begge håndtag – til både at trække solskodden for og fra. Håndtagsprofilen og dermed udfræsningen i muren skal kun være ca. 20 cm høj.

7.2. Visuel evaluering

Som det fremgår af figur 3.2, virker væggen tung og lukket, når solskodden er trukket hen foran døren. Dette vil sandsynligvis ikke være tilfældet om aftenen, hvor der siver lys ud mellem persiennens lameller, men er et problem, når solskodden om dagen virker som solafskærmning eller beboerne har glemt at trække skodden fra om morgenen. Her kan en lysere farve på solskoddens ramme bløde lidt op, men kan ikke helt fjerne det lukkede præg, da den franske dør bag solskodden ofte vil danne en mørk baggrund.



Figur 7.1. Principskitse af en simpel håndstagsløsning til solskodden.

Bæreprofilet bør som ved prototypen bibeholdes i en lys farve. Dog bør profilet, der danner overgang til hullerne gennem væggen under bæreprofilet (se figur 3.5), have en mørk farve for at opnå en mindre tydelig markering af hullerne, når solskodden er placeret foran døren.

Figur 7.2-4 viser fotografier taget ud gennem den franske dør i forsøgsvæggen for at visualisere ændringen af udsynet, når solskodden er foran den franske dør. Persiennens lameller er på indersiden blanke. Dette bevirker, at lamellerne virker mindre synlige, end hvis de f.eks. var hvide. Der er stort set frit udsyn nedad, hvilket er vigtigt i etageejendomme, hvor det er ønskeligt at kunne se ned på gaden eller ned i gården. Ligeud er der mindre udsyn, men stadig nok til at kunne genkende omgivelserne. Det var oprindeligt tanker om at gøre det muligt at dreje lamellerne valgfrit, når solskodden er foran døren, for at sikre frit udsyn. Dette indebar, at der skulle laves en mekanisme, der sikrer, at lamellerne automatisk bliver vinklet i 45°, når solskodden bliver skudt tilbage foran væggen. Det er muligt at lave en sådan mekanisme, men det blev vurderet, at fordyrelsen af solskodden ville blive for stor.

7.3. Arkitektens vurdering

I det følgende giver arkitekterne fra C.F. Møllers Tegnastue deres vurdering af prototypen:

Skodden fremtræder i prototypen meget tæt på de intentioner, der ligger bag udviklingen af dette stykke funktionelle design.

Rammekonstruktionen og ophæng mv. er nedbragt til et absolut minimum.



Figur 7.2. Udsigten gennem forsøgsmurens franske dør uden solskodden foran.



Figur 7.3. Udsigten gennem forsøgsmurens franske dør med solskodden foran.



Figur 7.4. Udsigten gennem forsøgsmurens åbne franske dør med solskodden foran.

Skodden vil kunne ophænges på mange af bygningstypologierne, enten som bånd eller enkelt-siddende.

Bevægeligheden af skodden har været genstand for mange diskussioner, og det ligger fast, at den valgte udformning er for svært bevægelig. Dette kan afhælpes ved enten at udføre skodden som tosidig eller forbedre ophæng mv.

Skodden bør endvidere forsynes med et nemt tilgængeligt håndtag, placeret på indersiden, hvilket vil lette bevægeligheden betydeligt.

De fastmonterede persienner kan virke lukkede for udsyn, når skodden er placeret i stilling foran dør. Der har tidligere været diskuteret en mulighed for at kunne kipe persiennen mellem de to lag glas. Det blev i første omgang besluttet at udelade denne mulighed i prototypen.

Afslutningen på indersiden af væggennemføringen skal afklares. En diskret udseende smal rist bør anvendes.

Rengøringsproblematikken bør overvejes nøje. I prototypen er udført en sidehængt glastrude, som åbnes og rengøres fra lift ved etagebyggeri. Man kunne blive en smule betænkelig for den fortsatte funktionalitet af oplukke over tid.

8. Referencer

- Bisgaard, N.F., 1974. Opvarmning og ventilation 1 – Varmetransmission. Akademisk Forlag. ISBN 87-500-1483-8.
- Bygge- og Boligstyrelsen, 1995. Bygningsreglement 1995. Boligministeriet.
- C.F. Møllers Tegnastue, 1997. Solskodder – et bevægeligt solpanel. Udviklingsrapport.
- Clausen, I., 1999. SolEnergiCenter Danmark, Teknologisk Institut Energi. Personlig kontakt.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, New York. ISBN 0-47-05066-0.
- Glent & CO A/S, 1977. Glent Ventilation.
- Hastings. S.R (Ed), 1999. Solar Air Systems – Built Examples. James&James. ISBN: 1 873936 85 0.
- Hastings. S.R and Mørck, O. (Eds), 1999. Solar Air Systems – Design Handbook. 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.
- Jensen, S.Ø., 1986. Konstruktion af solfangere – en håndbog/idebog. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse 173.
- Jensen, S.Ø., 1990. Results from Tests on a Multi-Function Solar Energy Panel. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse 213.
- Jensen, S.Ø., 1994. Test of the Summer House Package from Aids Miljø. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 94-1.
- Kristiansen, F. og Jensen, S.Ø., 1994. Forøgelse af solvarmeanlægs ydelse. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse 264.
- McClenahan, D., 1995. Performance of the Perforated-Plate/Canopy Solarwall at GM Canada, Oshawa. CANMET/Natural Resources Canada.
- Morhenne, J. og Langensiepen, B., 1997. Collector Modelling and Validation Report of the TRNSYS Collector Type used in TRNSAIR. Büro für Umweltverträgliche Energiesysteme. Wuppertal.
- Nielsen, J.E., 1995. Brugervejledning til KVIKSOL - et program til simulering af solvarmeanlæg. Version 5.2. Prøvestationen for Solenergi, DTI Energi.
- Saustруп Kristiansen, H., 1978. Formler til varmetransmission. Polyteknisk Forlag. Lyngby.

Bilag A

Måling af undertryk i en lejlighed i Eriksgade 1

Bilag B

Model til beregning af effektiviteten af skolskodder

Model til beregning af effektiviteten af solskodder

Som det fremgår af målingerne i kapitel 5 er solskoddens effektivitet meget afhængig af den aktuelle vindpåvirkning. Desuden er prototypen af tekniske grunde lidt forskellig fra de solskodder, der skal sættes op i Istedgade 43. Prototypen har jernholdig glas som dæklag og oversiden af persiennen, der vender mod solen, er blank, sort. Anvendelse af jernfrit glas og en mat, sort overfalde på persiennen vil forbedre solskoddens effektivitet.

Det er ikke muligt i nærværende projekt at måle effektiviteten af solskodden ved alle vindhastigheder, ligesom det ikke er muligt at foretage målinger på forskellige udformninger af dæklag og persienne-overflade.

For alligevel at kunne fastlægge solskoddens effektivitets afhængighed af vindhastighed samt for at kunne bestemme merydelsen for solskodden, hvis dæklaget udskiftes med jernfrit glas, og der anvendes en mat, sort overflade på persiennen, bliver der i det følgende udviklet en matematisk model af solskodden, da det ikke har været muligt at finde en eksisterende model, der kunne anvendes.

Der findes to principielt forskellige modeltyper:

- En meget detaljeret og eksakt model, der eksplicit tager hensyn til alle fysiske forhold i solskodden
- En simpel model som kalibreres på baggrund af målinger

Der er ikke muligt i nærværende projekt at udvikle en detaljeret og eksakt model af solskodden - dette ville kræve en indsats i størrelsesordenen af et Phd-studium. Desuden vurderes det, at specielt strømningsforholdene omkring persiennen er så kompliceret, at en simpel, men kalibreret model sandsynligvis vil give bedre resultater end en detaljeret model.

Det forventes på baggrund af målingerne, at det er i forhold til varmeoverføringsevnen mellem persienne og luft (repræsenteret ved volumenstrømmen af luft) samt vindpåvirkning, at modellen skal kalibreres for at opnå det bedste resultat.

B.1. Model

Den simple model af solskodden er udviklet på baggrund af (Duffie og Beckman, 1980). Ligningsnumrene i parentes refererer til ligningerne i (Duffie og Beckman, 1980). Ved mere strømnings tekniske ligninger er anvendt (Saustруп Kristensen, 1978).

Der tages udgangspunkt i formlerne for en traditionel luftsolfanger med luftstrømningen mellem absorberen og dæklaget som vist i figur B.1. I solskodden er luftstrømningen på begge sider af persiennen og gennem persiennen. Dette tages der højde for ved at varmeoverføringskoefficienterne h_1 , h_1 og h_r i ligningerne ganges med to for at illudere en dobbelt så stor varmeoverføringsevne, fordi persiennen bestryges af luft på begge sider.

$$U_L = \frac{U_t + U_b}{1 + \frac{(U_t + U_b)h_2}{h_1h_2 + h_1h_r + h_rh_2}}$$

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{h_r U_t}{h_r h_1 + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}}$$

$$h_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

Figur B.1 Analytisk udtryk for en luftsolfangner med luftstrømningen mellem dæklag og absorber (Duffie og Beckman, 1980).

h_r i figur B.1 kan idet $T_1 \approx T_2 \approx T_{p,m}$ tilnærmes til:

$$\frac{1}{2}h_r = \frac{4\sigma T_{p,m}^3}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.10.3)$$

hvor ϵ_1 er emittansen af dæklaget,
 ϵ_2 er emittansen af absorberen (persiennen),
 $T_{p,m}$ er middeltemperaturen af absorberen [K].

h_1 og h_2 antages her som en tilnærmelse at være identiske:

$$\frac{1}{2}h_1 = \frac{1}{2}h_2 = \text{Nu} \frac{\lambda}{D_H} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Nu findes af følgende formel:

$$\text{Nu} = \left(4.9 + \frac{0,0606(\text{Re Pr } D_H/L)^{1,2}}{1 + 0,0909(\text{Re Pr } D_H/L)^{0,7} \text{Pr}^{0,17}} \right) \quad (3.14.7)$$

$$D_h = \frac{4B \cdot s}{2(B + s)}$$

$$\text{Re} = \frac{U \cdot D_H}{\nu}$$

hvor L er længden af absorberen i luftstrømningens retning = højden af dæklaget [m],
 B er bredden af absorberen = bredden af dæklaget [m],
 s er den totale spaltehøjde = spalten mellem dæklagene minus persiennens horisontale udstrækning - i prototypen 0,03 [m],
 U er luft hastigheden [m/s] = $V/B \cdot s$,
 V er volumenstrømmen af luft [m³/s],
 λ er luftens varmeledningsevne [W/mK],
 ν er luftens kinematiske viskositet [m²/s]

Ved regression af tabelværdierne i (Glent, 1977) fås følgende udtryk for de termiske størrelser for luft:

$$Pr = 0,7153 - 0,0001 \cdot T_m \quad [-]$$

$$\lambda = 0,0243 + 0,000071 \cdot T_m \quad [W/mK]$$

$$\nu = (13,309 + 0,0873 \cdot T_m + 0,0001 \cdot T_m^2) \cdot 10^{-6} \quad [m^2/s]$$

hvor T_m er middeltemperaturen af luften i solskodden.

Varmetabskoefficienten findes som:

$$U_L = U_t + U_b \quad [W/m^2K]$$

hvor U_t er varmetabet gennem dæklaget $[W/m^2K]$,

U_b er varmetabet gennem bagsiden $[W/m^2K]$.

$$U_t = 5,7 + 3,8 \nu \quad [W/m^2K] \quad (3.15.2)$$

hvor ν er vindhastigheden foran solskodden $[m/s]$.

(3.15.2) indeholder udelukkende det konvektive varmetab til omgivelserne, men ikke strålingstab. Men da varmetabet til omgivelserne er en af de to faktorer i modellen, der skal kalibreres, anvendes (3.15.2) som første approksimation.

U_b er vanskelig at bestemme analytisk, idet den skabes af spalten mellem det bageste glas og væggen. I stedet defineres den som en vis brøkdel af forsidetabet U_t :

$$U_b = x \cdot U_t$$

hvor x er en faktor bestemt udfra målingerne.

Flowfaktoren findes som:

$$F'' = \frac{1}{n} (1 - e^{-n}) \quad (6.7.5)$$

$$n = \frac{U_L F'}{mc_p}$$

hvor m er massestrømmen af luften $= V \cdot \rho \quad [kg/s]$,

ρ er luftens massefylde $[kg/m^3]$,

c_p er luftens termiske kapacitet $[J/kgK]$.

$$\rho = 1,2922 - 0,00453 \cdot T_m + 0,000011 \cdot T_m^2 \quad [kg/m^3]$$

$$c_p = 1005 \quad \text{for} \quad T_m < 40^\circ C$$

$$\begin{array}{ll} 997+0,2 T_m & \text{for } 40 \leq T_m \leq 60 \\ 1009 & \text{for } T_m > 60^\circ\text{C} \end{array} \quad [\text{J/kgK}]$$

Herefter kan den samlede effektfaktor for solfangerens findes:

$$F_R = F' \cdot F''$$

Effekten ud af solfangeren kan da beregnes som:

$$q_u = F_R (I(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)) = F_R I(\tau\alpha) \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{da} \quad T_i = T_a$$

hvor I er solindfaldet $[\text{W/m}^2]$,

$(\tau\alpha)$ er absorptions-transmittansproduktet for absorber/dæklag,

T_i er indløbstemperaturen af luft, der er udeluft og derfor lig T_a $[\text{°C}]$.

Udløbstemperaturen af luften fra solfangeren bliver da:

$$T_u = T_i + \frac{q_{u,l} \cdot B \cdot L}{m_l c_{p,l}} \quad [\text{°C}]$$

Middellufttemperaturen til bestemmelse af de termiske størrelser Pr , λ , ρ og c_p kan herefter beregnes:

$$T_m = T_i + \frac{q_u}{U_L F_R} (1 - F'') \quad [\text{°C}] \quad (6.8.2)$$

B.2. Beregning

Beregningen af q_u findes som en iterativ proces, hvor der først gættes på værdier for $T_{p,m}$ og T_m . De nye beregnede værdier af $T_{p,m}$ og T_m indsættes derefter. Iterationen fortsætter til ændringen for q_u mellem to iterationer kommer under en vis værdi - under 0,1%.

Modellen er implementeret i et mindre edb-program.

Følgende parametre udskrives af programmet:

- q_u effekten ud af solfangerens $[\text{W/m}^2]$,
- eff solskoddens effektivitet $[\%]$,
- $T_{p,m}$ middelabsorbertemperatur $[\text{°C}]$,
- T_i indløbstempertur til solfangeren $[\text{°C}]$,
- T_m middeltemperaturen af luften $[\text{°C}]$,
- T_u udløbstemperatur fra solfangeren $[\text{°C}]$,

Følgende input-parametre er nødvendige i ovenstående beregninger:

Startgæt:	T_p :	middelabsorbertemperaturen [$^{\circ}\text{C}$],
	T_m :	middellufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$],
Vejr:	I :	solindfaldet [W/m^2],
	T_a :	udelufttemperaturen [$^{\circ}\text{C}$],
	v :	vindhastighed [W/m^2].
Dæklag/:	$(\tau\alpha)$:	det effektive transmissions-absorptionsprodukt for dæklag/absorber,
absorber	ϵ_1 :	emittansen af dæklaget,
	ϵ_p :	emittansen af absorberen,
	B :	bredden af dæklaget,
	L :	længden af dæklaget.
Luft:	T_i :	indløbstemperaturen af luft [$^{\circ}\text{C}$],
	V :	volumenstrømmen af luft [m^3/s],
	s :	den totale spaltebredde for luftstrømningen. Spalten mellem de to glas minus persiennens horisontale udstrækning.

B.3. Kalibrering af modellen

Effektiviteten for prototypen er som beskrevet i kapitel 5 målt ved diskrete værdier af volumenstrømmen af luft gennem solskodden. Med udgangspunkt i disse effektiviteter kalibreres den udviklede model.

B.3.1. Bestemmelse af bagside-varmetabet

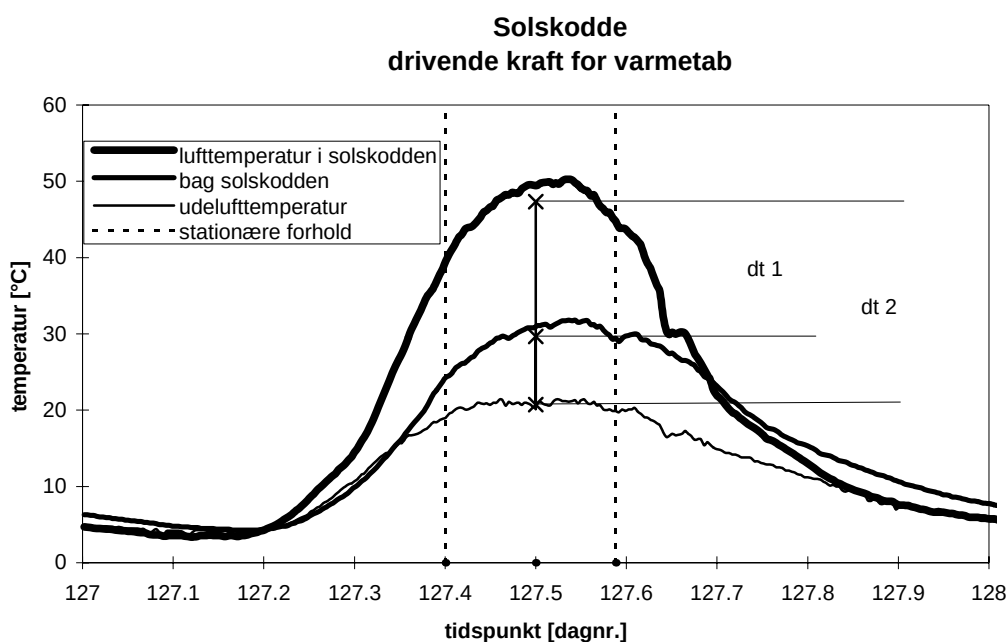
I første omgang bestemmes den brøkdelt (x) som bagsidetabet udgør af forsidetabet.

Som en første approksimation gøres dette meget primitivt ved at sige, at U_b er lige så meget mindre end U_t , som differencen mellem middellufttemperaturen i solskodden og temperaturen i spalten mellem solskodde og væg (dt 1 i figur B.2) er mindre end differencen mellem middellufttemperaturen i solskodden og udelufttemperaturen (dt 2 i figur B.2).

Tabel B.1 viser de fundne x -værdier for de forskellige volumenstrømme af luft gennem solskodden.

Tabel B.1 viser en svag sammenhæng mellem x -værdien og vindhastigheden – dog modsat af forventet. Det var forventet, at x -værdien ville falde med vindhastigheden, da der er læ bag solskodden. Dette er ikke tilfældet, x -værdien stiger tværtimod ofte med vindhastigheden, hvilket indikerer at vinden i høj grad også kommer om bag solskodden. Der er ikke nogen klar sammenhæng med volumenstrømmen af luft gennem solskodden.

Da vindafhængigheden er en af de to faktorer, der kalibreres for, vil dette kompensere for unøjagtigheden i bestemmelsen af x -værdien. Derfor anvendes der her en middelværdi af x -værdierne i tabel B.1 = 0,64.



Figur B.2. Graf til fastlæggelse af x-værdien til bestemmelse af bagsidetabet for en volumenstrøm gennem solskodden på ca. 65 m³/h for d. 7. maj.

Dato	Volumenstrøm af luft m ³ /h	Vindhastighed m/s	x-værdi
19. maj	36,6	2,4	0,69
20. maj	35,8	3,0	0,73
7. maj	65,4	2,5	0,66
18. maj	66,1	1,1	0,59
28. maj	96,3	2,5	0,71
2. juni	93,2	1,1	0,58
16. juni	203,8	1,3	0,58
17. juni	203,3	2,0	0,58
19. juni	204,7	1,4	0,61

Tabel B.1. x-værdi til bestemmelse af U_b .

B.3.2. Kalibrering af modellen med hensyn til varmeoverføring og vindpåvirkning

Til kalibreringen anvendes de målte værdier for volumenstrøm af luft gennem prototypen, vindhastigheden foran prototypen samt effektiviteten i tabel 5.1.

Udover disse værdier benyttes følgende fysiske værdier for prototypen:

($\tau\alpha$): 0,67. τ : transmittansen for solstråling gennem 6 mm jernholdigt glas angi-

ves i (Jensen, 86) til 0,8.

α : det har ikke været muligt at få absorptansen fra fabrikanten: (Glent, 1977) angiver reflektansen for sort, glinsende lak til 0,12, dvs. en absorptans på 0,88. (Clausen, 1999) angiver på baggrund af SolEnergiCenter Danmarks erfaring med overflader en absorptans på 0,8. Her anvendes en middelværdi på 0,84.

ε_1 : angives af (Bisgaard, 1974) til 0,88.

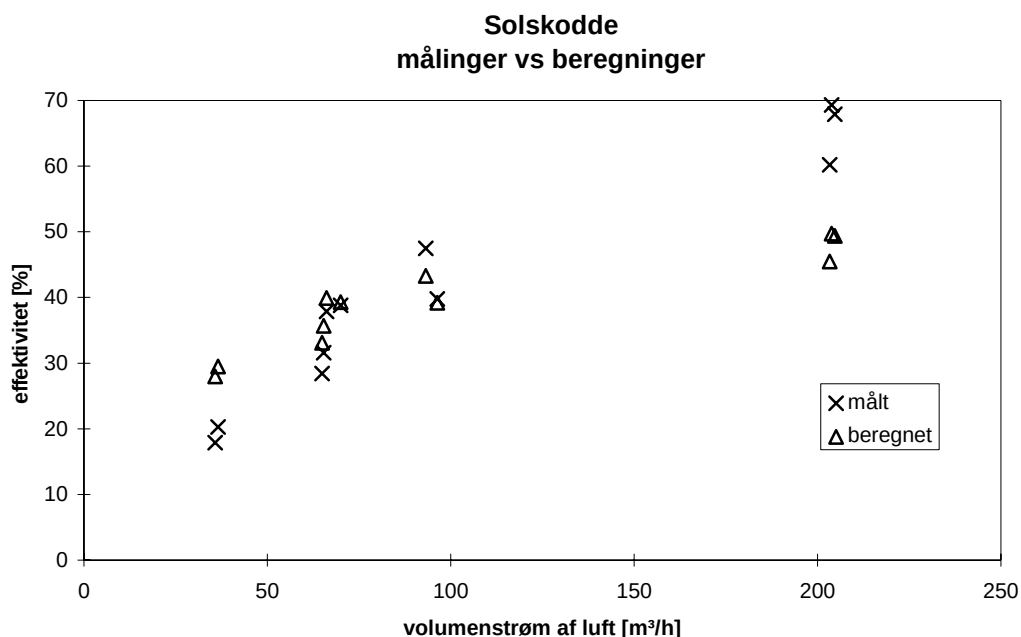
ε_p : antages at være lig absorbtansen: 0,84.

B : 1,17 m.

L : 2,05 m.

s : 0,03 m.

Figur B.3 viser en sammenligning mellem målte effektiviteter og effektiviteter beregnet med den ovenfor beskrevne teori.

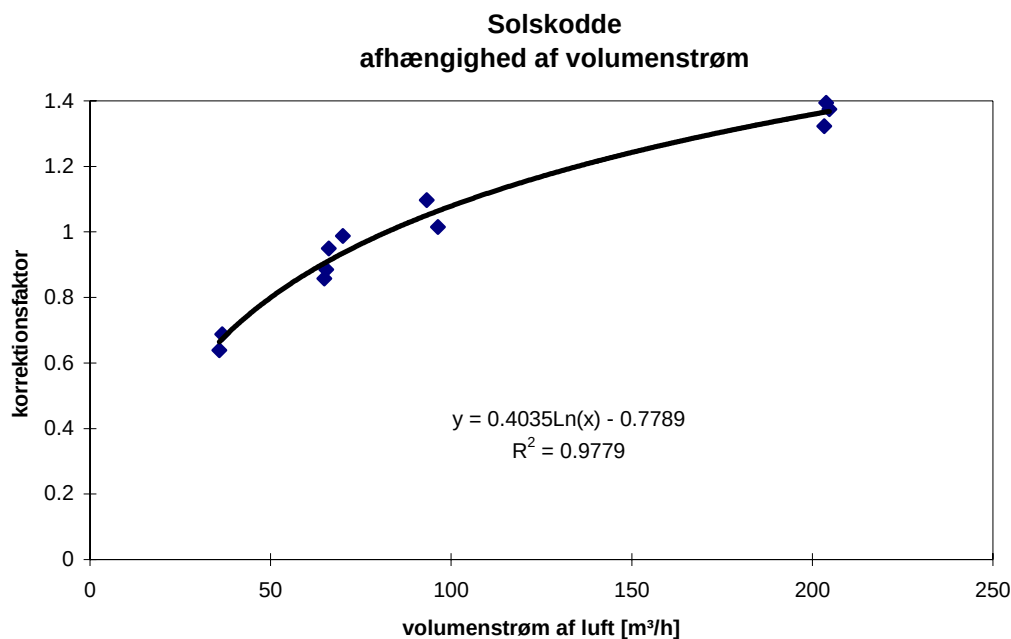


Figur B.3. Sammenligning mellem målte og beregnede effektiviteter.

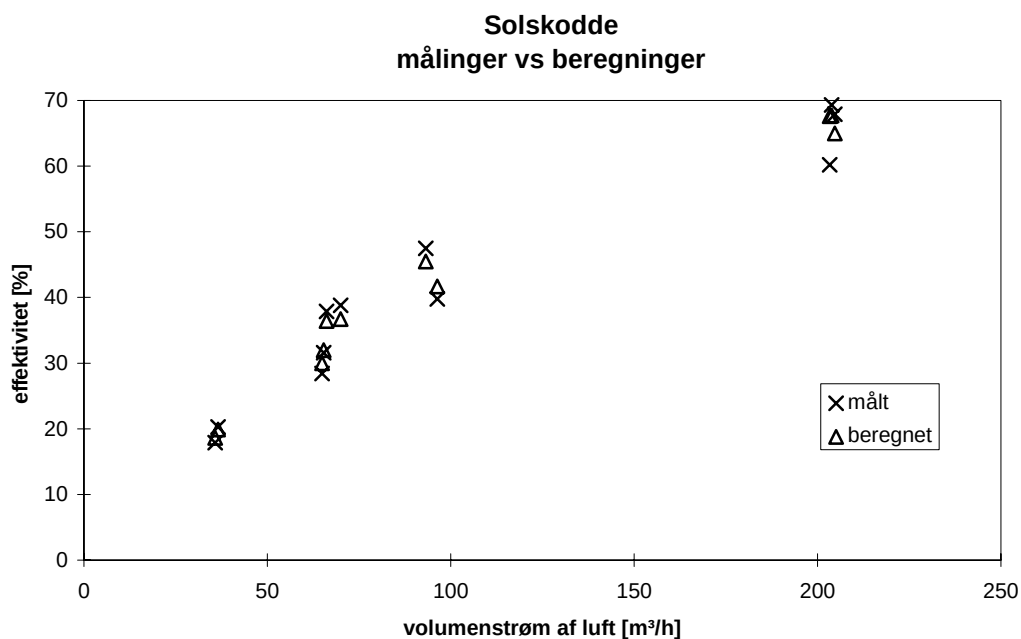
Figur B.3 viser en rimelig overensstemmelse mellem målte og beregnede effektiviteter. Dog ses der som forventet en afvigelse afhængig af volumenstrømmen af luft og vindpåvirkningen.

På baggrund af figur B.3 kalibreres modellen først med hensyn til volumenstrømmen af luft. Korrektionsfaktoren for volumenstrømmen af luft er vist i figur B.4. Som det ses af figur B.4, er der en pæn sammenhæng mellem forskellene mellem målte og beregnede effektiviteter i figur B.3 og volumenstrømmen af luft. Regressionsudtrykket i B.4 anvendes derfor i modellen for solskodden.

Resultatet af beregninger med den ny model kalibreret på baggrund af volumenstrømmen af luft er vist i figur B.5.



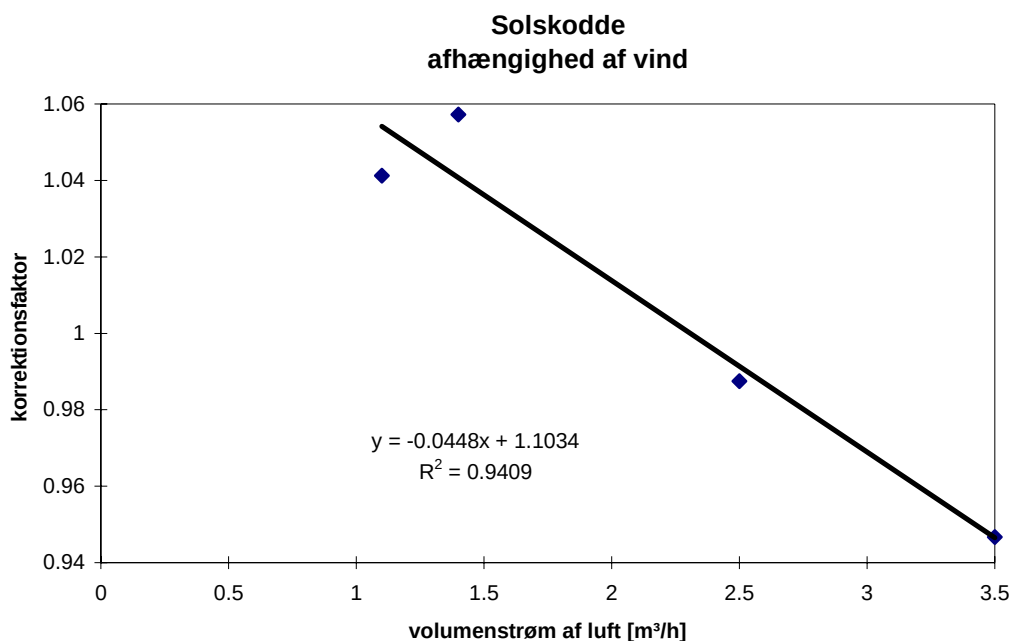
Figur B.4. Forskellen mellem målte og beregnede effektiviteter afhængig af volumenstrømmen af luft gennem solskodden.



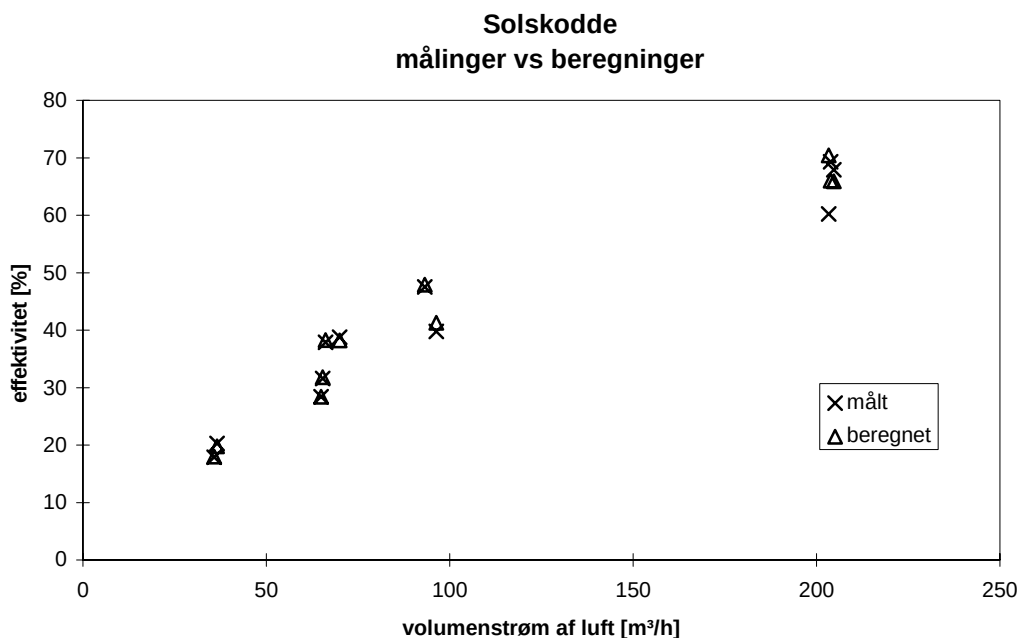
Figur B.5. Sammenligning mellem målte effektiviteter og effektiviteter beregnet med den nye model kalibreret på baggrund af volumenstrømmen af luft.

Figur B.5 viser nu en god overensstemmelse mellem målinger og model med hensyn til volumenstrømmen af luft, mens vindafhængigheden er lidt ved siden af. På baggrund af figur B.5 kalibreres modellen derfor med hensyn til vindafhængigheden. Korrektionsfaktoren for vindafhængigheden er vist i figur B.6 for en volumenstrøm på ca. 96 m³/h. Modellens vindafhængighed kalibreres på baggrund af 96 m³/h, da disse målinger ligger tættest på solskoddens arbejdsområde, og fordi vindafhængigheden er væsentlig mere diffus end afhængigheden af

volumenstrømmen af luft. Som det ses af figur B.6, er der en knap så pæn sammenhæng mellem forskellene mellem målte og beregnede effektiviteter som i figur B.4. Regressionsudtrykket anvendes alligevel i modellen for solskodden. Resultaterne fra kørsler med modellen kalibreret både på baggrund af volumenstrømmen af luft og vindafhængigheden er vist i figur B.7.



Figur B.6. Forskellen mellem målte og beregnede effektiviteter afhængig af vindpåvirkningen på solskodden.



Figur B.7. Sammenligning mellem målte effektiviteter og effektiviteter beregnet med modellen kalibreret på baggrund af både volumenstrømmen af luft og vindafhængighed.

Som det ses af figur B.7, er der nu en god overensstemmelse mellem målinger og beregninger undtagen for volumenstrømme på 200 m³/h. Da solskoddens normale arbejdsområde vil være under 100 m³/h, har dette ingen betydning. Der er derfor ikke brug for yderligere kalibrering.

Modellen er usikker på i hvert fald et punkt: Absorptionsevnen for persiennen er ikke kendt, men estimeret. Modellen bør ikke anvendes udenfor dens kalibreringsområde: Volumenstrøm af luft: 30-100 (200) m³/h og vindhastighed: 1-3,5 m/s.

Modellen anvendes til bestemmelse af solskoddens effektivitet i afsnit 5.1.4.