



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R52:1986

Konvektionshinder i solfångare

En teoretisk och experimentell studie

Sten Löfving

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	
Plac	Sev

K/MW

Byggeforskningsrådet

R52:1986

KONVEKTIONSHINDER I SOLFÅNGARE

En teoretisk och experimentell studie

Sten Löfving

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
850102-8 från Statens råd för byggnadsforskning
till Bolin Innovation AB & Co Kommanditbolag,
Stockholm.

REFERAT

Rapporten behandlar prestanda för solfångare försedda med några varianter på konvektionshinder. En modell som möjliggör beräkning av verkningsgradskurvans utseende med avseende på såväl optisk som termisk effektivitet presenteras.

Dessutom resovisas en serie mätningar som utförts på Statens provningsanstalt beträffande verkningsgrad för ett antal solfångare försedda med olika konvektionshinder samt en mätserie utförda på Älvkarleby-laboratoriet beträffande värmemotstånd i en simulerad solfångare försedd med ett större antal varianter på konvektionshinder.

Resultaten av studien och mätningarna kan i korthet sammanfattas:

- "Klassiska" konvektionshinder av typ bikakestruktur med flera är med hittills kända tillverkningsmetoder för dyra att tillverka för att de ska kunna komma i fråga i solfångare.
- Solfångare försedda med veckade folier som konvektionshinder har värmemotståndsmässigt jämförbara prestanda med solfångare med en eller två plana folier.
- Tack vare att reflektionsförlusterna blir lägre för en rätt veckad folie än för en plan blir solfångares prestanda bättre om man använder en rätt veckad folie än en eller två plana.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R52:1986

ISBN 91-540-4569-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck AB Stockholm 1986

INNEHÅLLSFÖRTECKNING:

	Sida
1. BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	4
2. SAMMANFATTNING	5
3. ALLMÄNT OM KONVEKTIONSHINDER I SOLFÄNGARE.	6
3.1 Två plana folier mellan absorbator och glas.	7
3.2 "Slats"	7
3.3 "V-slats" eller veckad folie	8
4. TEORI FÖR TRANSMISSION AV SOLJUS	10
4.1 Transmission genom veckad folie för solstrålning i andra vinklar än vinkelrätt.	13
5. TEORI FÖR KONVEKTIONSHÄMNING	15
5.1 Exempel på konvektionshinder	15
6. TEORI FÖR MINSKNING AV VÄRMESTRÅLNINGSFÖRLUSTERNA	17
6.1 Interaktion mellan värmestrålning och konvektion	18
7. TEORI FÖR SOLFÄNGARENS k-VÄRDE	19
7.1 Ekvivalent schema för en veckad folie	21
7.2 Resultat av parameterstudier	23
7.3 Teoretiska verkningsgradskurvor.	24
8. RESULTAT AV MÄTNINGAR	25
8.1 Mätningar av k-värde vid Älvkarlebylaboratoriet	25
8.2 Mätningar vid Statens Provningsanstalt	26
9. SLUTSATSER AV TEORI OCH MÄTNINGAR	28
10. REFERENSER	30

1. BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

I denna rapport har följande beteckningar använts:

D = veckningens periodlängd se fig 4
 e = naturliga logaritmens bas (=2,718)
 Gr= Grasshoffs tal se sid 14
 g = Tyngdaccelerationen
 G = Irradians
 k = k-värde (värmegenomgångs-koefficient)
 L = veckningens höjd se fig 4
 m = värmemotstånd
 Nu= Nusselt's tal
 n = brytningsindex
 P = effekt per m²
 T = temperatur i Kelvin

α = veckningsvinkel se fig 4
 β = luftens expansionskoefficient
 ϵ = emissivitet
 η = verkningsgrad
 λ = värmeledningsförmåga
 ν = kinematisk viskositet
 σ = Stephan-Bolztmann's konstant (=5.67 x 10⁻⁸)
 τ = transmissionkoefficient (för värmestrålning)

I vissa fall har dessa beteckningar använts med olika index. Dessa förklaras dock i texten.

2. SAMMANFATTNING:

Rapporten behandlar prestanda för solfångare försedda med några varianter på konvektionshinder. En modell som möjliggör beräkning av verkningsgradskurvans utseende med avseende på såväl optisk som termisk effektivitet presenteras.

Dessutom redovisas en serie mätningar som utförts på Statens provningsanstalt beträffande verkningsgrad för ett antal solfångare försedda med olika konvektionshinder samt en mätserie utförd på Älvkarlebylaboratoriet beträffande värmemotstånd i en simulerad solfångare försedd med ett större antal varianter på konvektionshinder.

Resultaten av studien och mätningarna kan i korthet sammanfattas:

* "Klassiska" konvektionshinder av typ bikakestruktur med flera är med hittills kända tillverkningsmetoder för dyra att tillverka för att de ska kunna komma i fråga i solfångare.

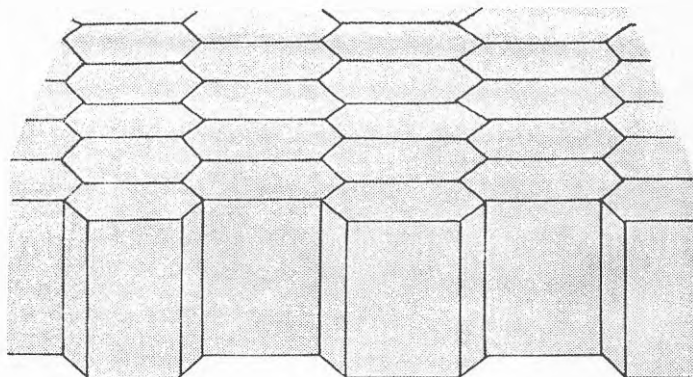
* Solfångare försedda med veckade folier som konvektionshinder har värmemotståndsmässigt jämförbara prestanda med solfångare med en eller två plana folier.

* Tack vare att reflektionsförlusterna blir lägre för en rätt veckad folie än för en plan blir solfångares prestanda bättre om man använder en rätt veckad folie än en eller två plana.

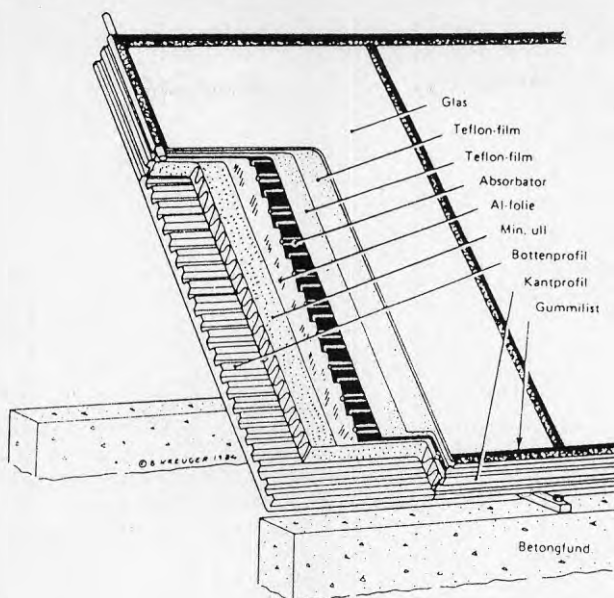
Den kvantitativt viktigaste förlustprocessen i de solfångare som säljs mest av idag är konvektion mellan absorbatör och täckskiva. Detta förhållande har uppstått sedan det har blivit mer eller mindre standard med selektiva absorbatörer varvid värmestrålningsförlusterna reducerats drastiskt.

För dem som ägnar sig åt att konstruera "tredje generationens" solfångare är det därför naturligt att ta sig an konvektionsförlusterna.

Om man i ett enkelt räkneexempel antar att det vore möjligt att få luften att stå helt stilla i en standard-solfångare med selektiv absorbatör finner man att k -värdet skulle bli av storleksordningen 2,5 vid 50-100 graders övertemperatur, vilket är ungefär 2 enheter lägre än i det verkliga fallet. Detta är ett ungefärligt mått på hur mycket som finns att vinna med konvektionshinder. Från forskarnas skrivbord har föreslagits ett antal lösningar. En variant som har varit föremål för många studier är s k bikakestrukturer. Se figur 1. Tyvärr är dessa alltför dyra att tillverka varför konstruktörerna har sökt andra vägar, delvis på egen hand. I det följande skall vi kortfattat beskriva några av de koncept för konvektionshämning som i praktiken verkar mest lovande.



Figur 1: S k bikakestruktur, en väl utforskad men dyr variant på konvektionshinder.



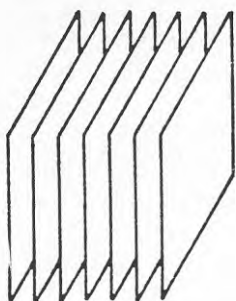
Figur 2. Solfångare försedd med konvektionshinder i form av två plana teflonfolier. Källa "Energi 85" (G26 1984)

Denna konstruktion har använts i "Scandinavian HT" med gott resultat. I en "stor" solfångare med 10 cm tjock baksidesisolering erhöles enligt Ref 1 ett k-värde på 2,8 vid ca 60 graders övertemperatur. Folierna medför reflektionsförluster av storleksordningen 7-9 % vilket innebär att verkningsgradskurvan börjar på en nivå ca 7-9% lägre än motsvarande solfångare utan folier. Såväl teoretiska övervägningar som mätningar inom detta projekt visar detta. Det har dessutom visat sig i uppförda anläggningar att den yttre folien har en tendens att fästa vid frontglaset varvid prestanda försämras.

3.2 "Slats"

Konvektionshindren består av folieremсор som placeras vinkelrätt mot absorbatoren ungefär som persienner.

JG Symons i Australien har gjort omfattande studier av denna typ av konvektionshinder. Se referens 5.

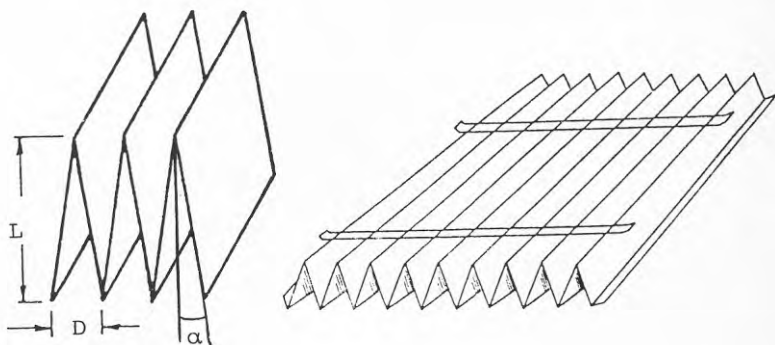


Figur 3. "Slats"

"Slats" kan monteras såväl horisontellt (väst-öst) som lutande (nord-syd) varav den senare något förvånande ger bättre resultat i lutande montering om solfångaren lutar mellan 25 och 75 grader mot horisontalplanet. Prestanda för solfångare försedda med denna typ av konvektionshinder varierar med geometrin, men sol-fångare med k -värde på 2.92 vid normala driftstemperaturer och η_0 -värde på 0,90!! har demonstrerats. Transmissionen varierar med infallsvinkeln, se referens 10, men den är klart högre än för "dubbla plana teflonfolier".

3.3"V Slats" (eller veckad folie)

Om man istället formar en folie enligt figur 4 erhåller man en konvektionshinderande struktur med egenskaper som är snarlika dem för "slats".

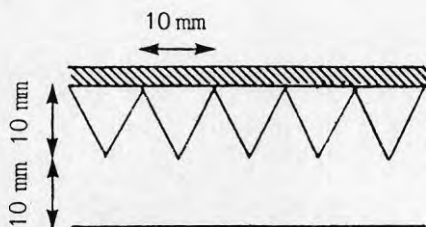


Figur 4: Veckad folie eller s k V-slats.

Den stora fördelen med denna typ av konvektionshinder är att tillverkningskostnaden blir låg jämfört med "slats". Jämfört med "två plana teflonfolier" är reflektionsförlusterna minst 5 %-enheter lägre (se avsnittet om mätningar) vilket har stor betydelse för utbytet.

Samme Symons som har studerat "slats" har också studerat "V-slats" och konstaterat att egenskaperna är snarlika med avseende på verkningsgradskurvans utseende.

Det finns också en Japansk grupp (se referens 6) som har demonstrerat solfångare försedda med veckade folier och med goda prestanda. Konfigurationen framgår av figur 5. Med denna erhöles ett k-värde på 3,83 att jämföra med 5,16 för referenssolfångaren utan konvektionshinder.



Figur 5: Konvektionshinder från referens 6.

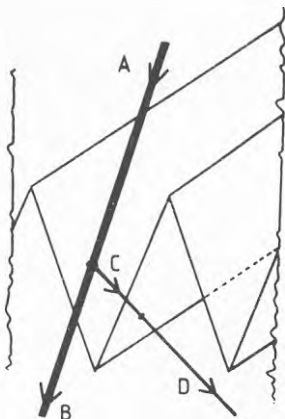
Om man ska konstruera en solfångare som producerar värme vid något så när hög temperatur och med god verkningsgrad måste man lösa problemet att släppa in en stor del av inkommande solljus till absorbatoren samtidigt som de termiska förlusterna från absorbatoren skall vara små. Det är alltså mycket viktigt att ljustransmissionen genom ett konvektionshinder är hög. För tappvarmvattenberedning i Sverige kan man överslagsmässigt räkna med att 1 %-enhets ändring av transmissionen motsvarar en ändring av k -värdet för solfångaren med ca 0,15 enheter. Se referens 1.

Karin Nilsson på inst för teknisk elektronfysik på Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg har i sin Lic-avhandling (Referens 2) rapporterat beräkningar och mätningar på transmissionen för veckade plastfolier.

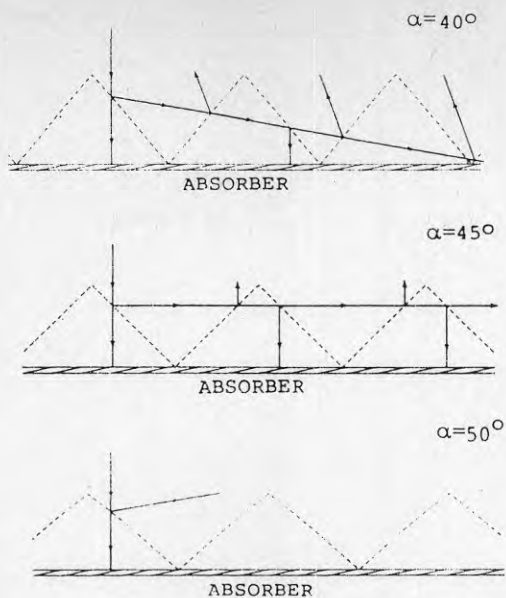
Hennes något förvånande slutsats kan formuleras som följer:

Transmissionen genom en transparent veckad plastfolie blir om veckningen utförs på rätt sätt högre än genom en plan folie av samma material.

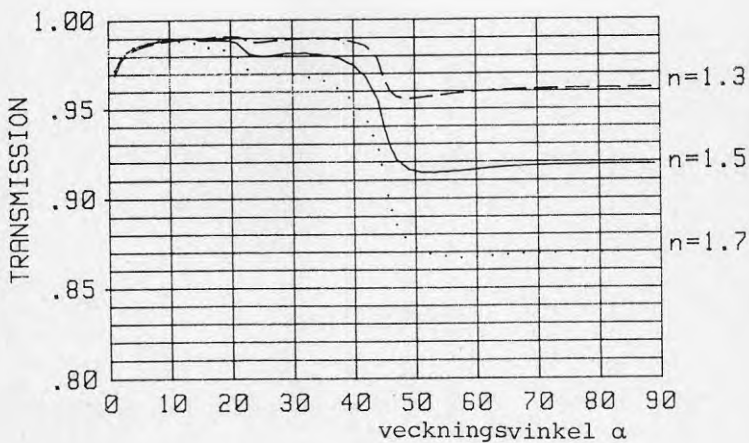
Förklaringen till detta ligger i det faktum att en stor del av det ljus som reflekteras första gången i de "lutande" ytorna (i motsats till fallet med den plana folien) når absorbatoren, om än i en annan vinkel än det direkttransmitterade.



Figur 6. Strålen A som antas innehålla 100% effekt delas vid första reflektionen upp i komponenterna B med ca 80% av effekten och C med ca 20% av effekten. Ca 95% av C och hela B når absorbatoren vilket blir 99,2%. En plan teflonfolie transmitterar som jämförelse ca 96%.

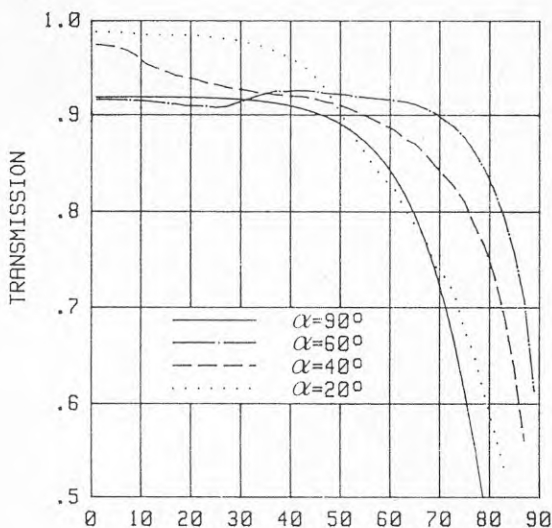


Figur 6a. Strålgångar genom veckade folier. Man ser att den första reflexen kan nå absorbatoren om $\alpha < 45^\circ$.



Figur 7: Transmission för vinkelrätt infallande ljus som funktion av veckningsvinkeln för tre olika brytningsindex för foliematerialet. $n=1,3$ är representativt för teflon, $n=1,5$ är representativt för polyeten mm och $n=1,7$ är representativt för polyester.

I ovanstående figur motsvaras veckningsvinkeln 90° av en plan folie. Man ser att veckningsvinkeln 20° är gynnsam ur transmissionsynpunkt; Transmissionsvärden av storleksordningen 98-99% är enligt den använda teorin möjligt att nå.



Figur 8: Transmission som funktion av infallsvinkel för en plan folie och tre olika veckningsvinklar för veckad folie, brytningsindex = 1,5. Man ser att veckningsvinkeln 20° är den klart bästa för de infallsvinklar som kan bli aktuella för solfångare samt att kurvan ligger över den för plan folie ända upp till 50° . Obs infallsvinkeln varierar i ett plan vinkelrätt mot vecken. Se f.ö avsnitt 4.1.

För att nå de höga transmissioner som teorin visar måste de tillverkade veckade folierna uppfylla ett antal villkor av typen:

- * Radien i vecken måste vara liten.
- * Ytorna mellan två veck måste vara plana.
- * Folien får inte sprida ljus (d v s att den måste vara klar).

Att uppfylla dessa villkor i en industriell produktion är svårt. Man måste räkna med att det kanske inte går att komma så långt som till t.ex. 99,0%. Dock visar mätningar att reflektionsförlusterna som veckade folier orsakar i praktiken är försumbara.

4.1 Transmission genom veckad folie för solstrålning i andra vinklar än vinkelrätt.

Instrålningen mot en solfångare i drift kommer under en säsong från ett spektrum av vinklar. För att kunna ha någon uppfattning om prestanda för solfångare med konvektionshinder på årsbasis måste man veta något om hur konvektionshindrets transmission ser ut över det aktuella vinkelspektrat. När man studerar dessa fenomen blir man tvingad att ta hänsyn till att vinkeln varierar i två plan. Se fig 8.a. Förutom den "vanliga" vinkeln mot normalen måste man också studera inverkan av en sk asimut vinkel γ .

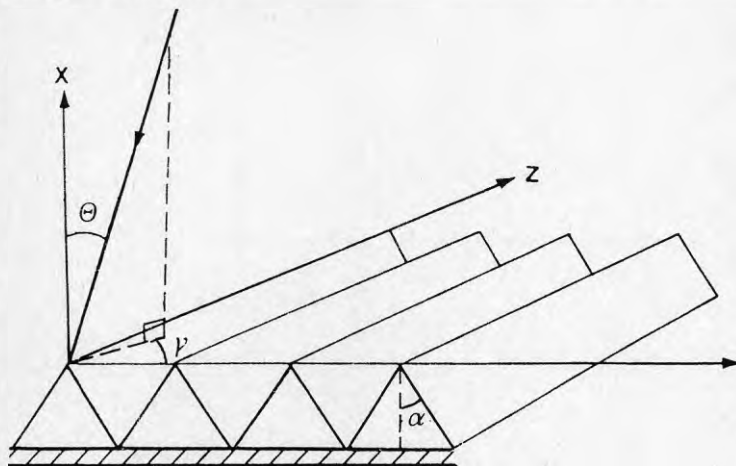
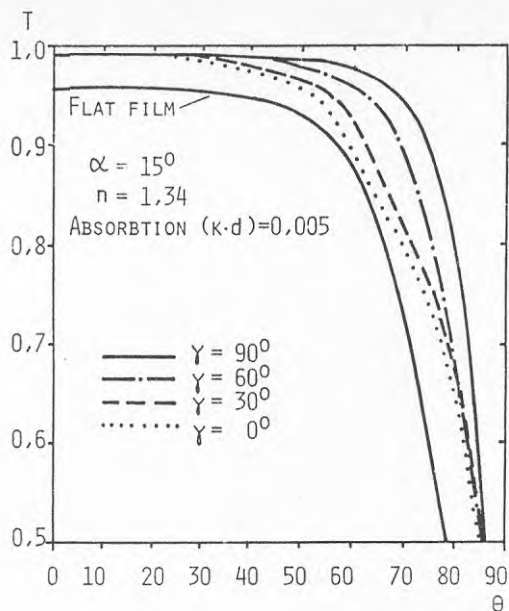


Fig 8.a Definition av strålningens infallsvinklar mot en veckad folie.

Karin Voxlin-Nilsson:s teoretiska studie innefattar även dessa fenomen. En del av hennes resultat sammanfattas i figur 8.b.

Det framgår av figur 8.b. att de förluster som ett konvektionshinder i form av en veckad folie orsakar är små $d v s$ under 4% för alla vinklar där solfångaren ger utbyte och i ett stort vinkelintervall under 2%. Till saken hör att en plan teflonfolie ger 4% reflektionsförluster redan för vinkelrätt infall.



Figur 8.b. Beräknad transmission för en veckad teflonfolie med veckningsvinkeln $\alpha = 15^\circ$ som funktion av infallsvinkel och för fyra olika asimutvinklar.

I referens 10 redovisas mätningar av transmission genom olika typer av konvektionshinder. Mätresultaten sammanfattar man med hjälp av matematiska funktioner som ansluter till mätdata. För veckad folie erhöles följande matematiska samband:

$$\tau = 0,988 \frac{L}{D} x \tan \alpha \cos \gamma \quad (1)$$

Om veckningsvinkeln $\alpha = 15^\circ$ är $L/D = 3,73$. Om man sätter in detta värde i formeln ovan och jämför resultatet med de teoretiska i det vinkelintervall där mätningarna utförts $d v s \theta < 50^\circ$ finner man att dessa mätresultat stämmer väl överens med teorin.

5. TEORI FÖR KONVEKTIONSHÄMNING.

I en normal solfångare utan konvektionshinder transporteras värme bort p g a luftens spontana cirkulation i utrymmet mellan absorbator och täckskiva (som normalt består av glas). Denna cirkulation drives av skillnader i densitet mellan luften utefter täckskivan och den varmare luften vid absorbatoren. Cirkulationen bromsas av viskösa krafter i luften.

Om man placerar ett konvektionshinder mellan absorbator och täckskiva tvingas luften cirkulera i andra banor. Eftersom den "bromsande" arean blir större minskar strömningshastigheterna varvid värmeflödet också minskar. Värmeflödet p g a konvektion kan på så vis reduceras så långt att det blir försumbart jämfört med den rena värmeledningen.

För att ange hur stora konvektionsförlusterna är brukar man använda sig av Nusselts tal som anger hur många gånger större det aktuella värmeflödet i luften är jämfört med det tänkta fallet att luften stod stilla, och att ingen värmestrålning förekommer. Nusselts tal är alltså 1,0 om ingen konvektion förekommer. Vid endimensionell värmeströmning som kan antas råda i en solfångare gäller således:

$$P = \frac{\lambda}{L} \times Nu \times \Delta T \quad (2)$$

där P = det aktuella värmeflödet i W/m²

Nu = Nusselts tal

λ = luftens värmeledningskoefficient

L = avstånd mellan absorbator och täckskiva

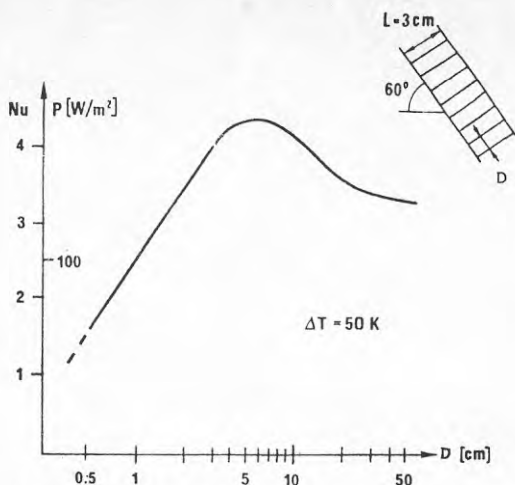
ΔT = temperaturskillnad mellan absorbator och glas

5.1 Exempel på konvektionshinder.

I referens 3 redovisas mätningar på Nu för en variant på konvektionshinder.

Utseendet på kurvan i fig 9 förtjänar en del kommentarer: Kurvan har ett maximum när avståndet D är en till tre gånger större än L för att därefter plana ut på en nivå som ger samma värde på Nu som utan konvektionshinder. Förklaringen till detta är antagligen att strömningen då styrs in i en geometri som ger ett stort värmeflöde. Denna geometri motsvaras ungefärligen av eliptiska banor där elipsens storaxel är parallell med absorbatoren.

Om däremot elipsens storaxel är vinkelrät mot absorbatoren vilket blir fallet när D görs mindre än L blir antalet "konvektionsceller" per ytenhet fler och strömningshastigheterna lägre och därmed Nu.



Figur 9: Nusselts tal för en konvektionshämmande struktur som närmast kan liknas vid en persiennstruktur. Variabeln på x-axeln är avståndet D som definieras i figuren.

Den raka delen av kurvan i figuren täcker det område som är intressant ur konvektionshämningssynpunkt och jag har med hjälp av ref 3 tecknat följande generella matematiska samband för denna del av kurvan.

$$Nu = (0,145 + 0,0456 \ln(D/L)) \times Gr^{0,28} \quad (3)$$

$$\text{där } Gr = \frac{g \times \Delta T \times L^3}{T \times \nu^2} \quad (4)$$

och g = tyngdaccelerationen
 β = luftens expansionskoefficient
 ν = luftens kinematiska viskositet

Värmeflödet i denna struktur kan alltså beskrivas med hjälp av formeln:

$$P_{konv} = Nu \times \frac{\lambda}{L} \times \Delta T \quad (5)$$

där Nu beräknas med hjälp av ovanstående uttryck.

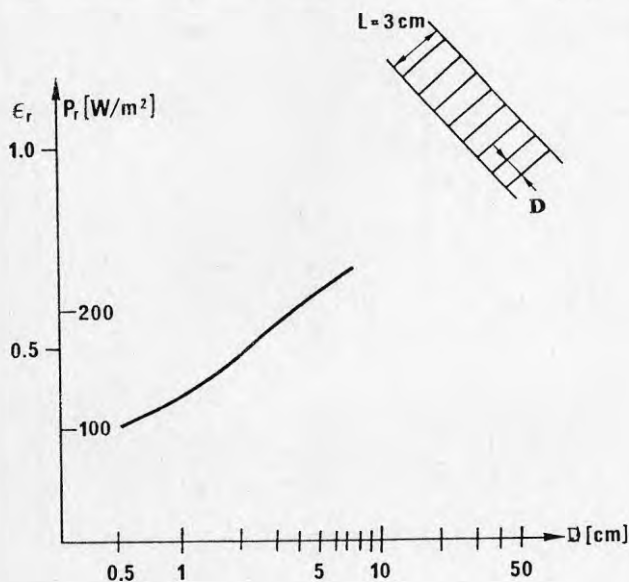
Tyvärr har jag inte haft tillgång till några liknande mätningar på veckade folier. För att kunna genomföra teoretiska parameterstudier på konvektionshinder i form av veckade folier har jag "transformerat" ovanstående resultat genom att anta att:

Nusselts tal blir detsamma i en triangulär cell i en veckad folie som i en rektangulär cell i strukturen i figur 9 om cellernas tvärsnittsarea och höjd är lika. Detta måste betraktas som ett djärvt antagande i brist på bättre och frågan är givetvis hur stort fel detta orsakar på slutresultatet. Man måste räkna med att vissa fel uppstår. Troligt är att Nu i verkligheten kommer att bli något högre än vad denna teori anger.

6. TEORI FÖR MINSKNING AV VÄRMESTRÄLNINGSFÖRLUSTERNA.

En konvektionshämmande struktur minskar inte bara konvektionsförlusterna i en solfångare utan även värme-strålningsförlusterna. Vad som sker fysikaliskt är att en del av den värme-strålning som lämnar absorbatoren absorberas i konvektionshindret, höjer dess temperatur och återstrålas till absorbatoren. De delar av konvektionshindret som ligger närmast absorbatoren blir varmare än de övriga delarna och nettomässigt strålar mer energi tillbaka till absorbatoren än mot täcksivnan. Värme-strålningsförlusterna blir helt enkelt skillnaden mellan det från absorbatoren utåtgående och återgående värme-flödet. För att kvantifiera detta använder man sig av måttet relativ emissivitet ϵ_r som definieras som kvoten mellan aktuellt värme-strålningsflöde och den värme-strålning som skulle ha lämnat samma absorbatoren utan konvektionshinder, allt under förutsättning att ytornas emissivitet är $\epsilon = 1$.

I referens 4 har gjorts en teoretisk analys av värme-strålningen i en "persiennstruktur" och resultaten redovisas i form av den nyss beskrivna kvantiteten relativ emissivitet. Se figur 10. Denna analys tar inte hänsyn till att folien är delvis transparent för värme-strålning. I min modell tar jag emellertid hänsyn till detta. Se kapitlet om teori för solfångarens k-värde.



Figur 10: Relativ emisivitet som funktion av avståndet D från referens 4.

Kurvan i figur 10 kan enligt ref 4 med god noggrannhet approximeras med hjälp av följande formel:

$$\epsilon_r = \ln(e+0,75 \frac{L}{D}) / (1+1,3 \frac{L}{D} - 0,13 \frac{L}{D})^{1,5} \quad (6)$$

Formeln är alltså inte fysikaliskt härledd men väl grundad på en noggrann teoretisk analys och numeriska beräkningar. Denna formel kan på samma grunder som för konvektionshämningen användas som en approximation för triangulära celler i en veckad folie.

6.1 Interaktion mellan värmestrålning och konvektion.

I min modell betraktar jag konvektionen och värmestrålningen som två separata processer som kan superponeras. Detta är inte helt riktigt. Man kan visa att om temperaturen i konvektionshindret avtar linjärt i värmeflödets riktning är processerna separabla. Frågan är då hur stora avvikelserna från en linjär temperaturprofil blir och hur stora fel detta orsakar. En del av svaret finns i det faktum att om Nusselts tal är nära 1,0 så är temperaturprofilen nästan linjär och approximationen tillåten. Till saken hör att det tekniskt intressanta området är det där Nusselts tal ligger mellan 1 och 1,5; om det är större än så utnyttjar man inte de möjligheter som finns att nå låga k-värden.

7. TEORI FÖR SOLFÅNGARENS k-VÄRDE

Värmeflöden som orsakas av såväl konvektion, värme-strålning och värmeledning ökar med den drivande temperaturskillnaden. När värmeflödet sker mellan två plan, d v s endimensionellt, kan man beskriva värmeflöden per m^2 med hjälp av följande formler:

$$P = \frac{\Delta T}{m} \quad \text{eller} \quad P = k \times \Delta T \quad (7)$$

där: P = värmeflödet i W/m^2
 k = värmegenomgångskoefficienten (jfr k-värde)
 m = värmemotståndet
 ΔT = den drivande temperaturskillnaden mellan två plan

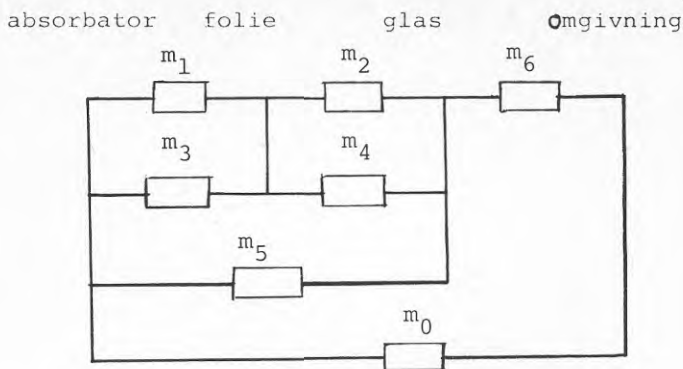
Om processerna inte är linjära med avseende på ΔT blir k och m funktioner av ΔT .

I en solfångare försedd med konvektionshinder pågår samtidigt ett antal processer som för värme från den varma absorbatoren till omgivningen. För var och en av dessa processer kan man definiera en drivande temperaturskillnad mellan två plan och ett värmemotstånd mellan samma två plan. Detta gör att man alltid kan beskriva den totala processen med hjälp av ett "nät" av värmemotstånd. Det nät av värmemotstånd man då erhåller kan med metoder från ellära reduceras till ett enda värmemotstånd. När detta är gjort är solfångarens k-värde bestämt. Om man känner olinjäriteterna i de olika processerna kan man genom iteration bestämma temperaturerna i de olika planen och på så vis ta hänsyn till dessa. Se referens 9.

Denna teknik demonstreras här för en solfångare försedd med en plan folie som konvektionshinder enligt följande figur:



Figur 11: Solfångarstruktur med en plan folie som konvektionshinder.



Figur 11a: Ekvivalent värmemotståndsschema för solfångarstrukturen i figur 11.

- m_0 representerar isoleringen.
 m_1 representerar konvektionen mellan absorbator och folie.
 m_2 representerar konvektionen mellan folie och glas.
 m_3 representerar värmestrålning mellan absorbator och folie.
 m_4 representerar värmestrålning mellan folie och glas.
 m_5 representerar värmestrålning mellan absorbator och glas d v s den del som transmitteras av folien.
 m_6 representerar värmemotståndet mellan glaset och omgivningen.

Vi antar att:

- $m_0 = 3$ (motsvarar 12 cm mineralull)
 $m_1 = 0,36$ (denna siffra är beräknad m h a ref.8)
 $m_2 = 0,36$
 m_{3-5} kan beräknas med hjälp av följande teori:

Värmeinstrålningens energiflödet mellan två parallella isothermiska icke-transparenta ytor bestäms av formeln:

$$P_s = \frac{\sigma \times (T_1^4 - T_2^4) \times \tau}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad \text{där:} \quad (8)$$

- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ (en naturkonstant)
 T = ytornas temperaturer i grader Kelvin
 ϵ = ytornas emissiviteter
 indexen 1 och 2 står för yta 1 resp 2.

τ = transmissionskoefficienten för ev. mellanliggande skikt.

Värmemotståndet för denna process blir: $m_s = (T_1 - T_2) / P_s$ (9)

Eftersom : $T_1^4 - T_2^4 = (T_1^2 + T_2^2) \times (T_1 + T_2) \times (T_1 - T_2)$ (10)

$$\text{g\u00e4ller } m_s = \frac{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}{\tau \times (T_1^2 + T_2^2) \times (T_1 + T_2) \times \sigma} \quad (11)$$

Vi approximerar emissiviteten f\u00f6r folien med fomeln:
 $\epsilon_f = 1 - R - \tau_f$ d\u00e4r R \u00e4r foliens reflektionskoefficient
 f\u00f6r v\u00e4rmestr\u00e5lning. Vi antar att $R = 0,05$ och finner:

$$m_3 = \frac{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{0,95-\tau} - 1}{\sigma \times (T_a^2 + T_f^2) \times (T_a + T_f)} \quad m_4 = \frac{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{0,95-\tau} - 1}{\sigma \times (T_f^2 + T_g^2) \times (T_f + T_g)}$$

$$m_5 = \frac{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1}{\sigma \times (T_a^2 + T_g^2) \times (T_a + T_g)} \quad (12) \quad (13) \quad (14)$$

Dessa formler \u00e4r inte helt korrekta eftersom de inte tar h\u00e4nsyn till foliens IR-transparens p\u00e5 ett helt korrekt s\u00e4tt samt att en v\u00e4gl\u00e4ngdsviktning borde utf\u00f6rts. Det visar sig emellertid att slutresultatet ej p\u00e5verkas i n\u00e5gon st\u00f6rre utstr\u00e4ckning av dessa saker. Indexen a, f, och g st\u00e5r f\u00f6r absorbator, folie och glas.

Efter ins\u00e4ttning av:

$\epsilon_a = 0,2$, $\tau = 0,6$, $T_a = 273+80$, $T_g = 273+20$, $T_f = 50^\circ\text{C}$
 finner vi att $m_3 = 0,78$, $m_4 = 0,45$ och $m_5 = 1,105$
 m_6 antas vara $0,047$ (motsvarar vindstyrkan 4 m/s).

N\u00e4r vi nu k\u00e4nner v\u00e4rderna p\u00e5 m_{1-6} kan vi succesivt reducera ner n\u00e4tet med metoder fr\u00e5n ell\u00e4ran.

Slutresultatet blir att solf\u00e5ngarens k-v\u00e4rde \u00e4r $3,07$ vid temperaturen 80°C .

7.1 Ekvivalent schema f\u00f6r en veckad folie:

Samma metod kan anv\u00e4ndas om folien \u00e4r veckad under f\u00f6ruts\u00e4ttning att man k\u00e4nner dess v\u00e4rmotst\u00e5nd med avseende p\u00e5 konvektion och v\u00e4rmestr\u00e5lning. I avsnitt 5 och 6 finns formler f\u00f6r v\u00e4rmefl\u00f6det p g a v\u00e4rmsstr\u00e5lning resp. konvektion i en veckad folie (1) & (2). Dessa formler ger oss v\u00e4rmotst\u00e5nden f\u00f6r konvektion resp v\u00e4rmestr\u00e5lning i en veckad folie.

Dessa v\u00e4rmotst\u00e5nd blir:

$$m_s = \frac{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_r} - 1}{\sigma (T_1^2 + T_f^2) (T_1 + T_f)} \quad \text{resp} \quad m_k = \frac{L}{\lambda \times \text{Nu}} \quad (15) \quad (16)$$

D\u00e4r ϵ_1 \u00e4r emissiviteten f\u00f6r den yta mot vilken str\u00e5lningsutbytet sker och ϵ_r tas fr\u00e5n formel (2) och Nu tas fr\u00e5n formel (1).

Därefter återstår att placera dessa värmemotstånd på rätt ställen i ett ekvivalent schema av samma typ som i det förra exemplet.

Vissa problem uppstår beträffande hur motstånden ska placeras i schemat när den veckade folien inte fyller upp hela utrymmet mellan glas och absorbatör d v s när det finns en spalt mellan den veckade folien och absorbatoren resp. glaset. De teorier som finns gäller ju bara för det fallet när konvektionshindret "ligger an" mot ett plan. Detta spelar ingen roll för värmestrålningen men i det fallet att konvektionshindret ligger an mot glaset och det är en spalt till absorbatoren får man felaktiga resultat om man använder konfigurationen i Fig 12 till vänster. Om man delar upp motstånden i två delar och sammanbinder deras mittpunkter som i figur 12 till vänster kommer man betydligt närmare sanningen.

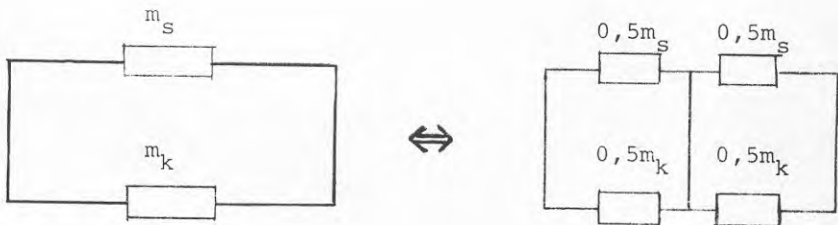
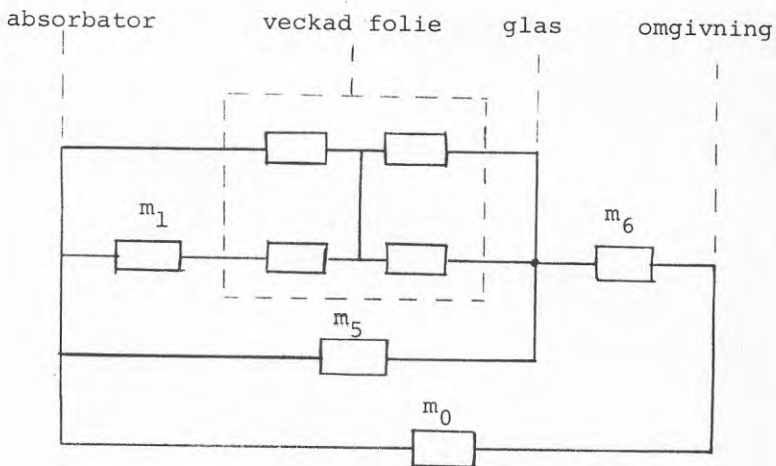


Fig 12: Ekvivalent schema för en veckad folie.

Detta ekvivalenta schema kan användas i ett schema för solfångare enligt figur 13.



Figur 13: Ekvivalent schema för en solfångare försedd med konvektionshinder i form av veckad folie.

Detta schema tillsammans med de tidigare beräknade värdena på värmemotstånden som ingår möjliggör studium av inverkan av ett antal parametrar såsom:

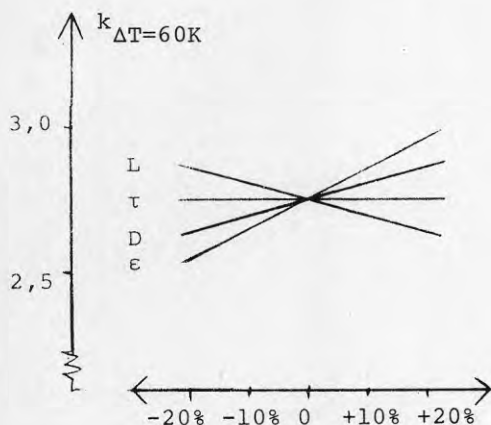
- * Konvektionshindrets tjocklek. (mättet L figur 4)
- * Avståndet mellan vecken. (mättet D i figur 4)
- * Foliens transmission av IR-strålning.
- * Absorbatorns emissivitet.

7.2 Resultat av parameterstudier

Jag har varierat ett antal parametrar på ett systematiskt sätt och redovisar dessa studier i form av följande figur. En parameter i taqet har varierats kring ett standardfall motsvarande fall 1 i figur 15.

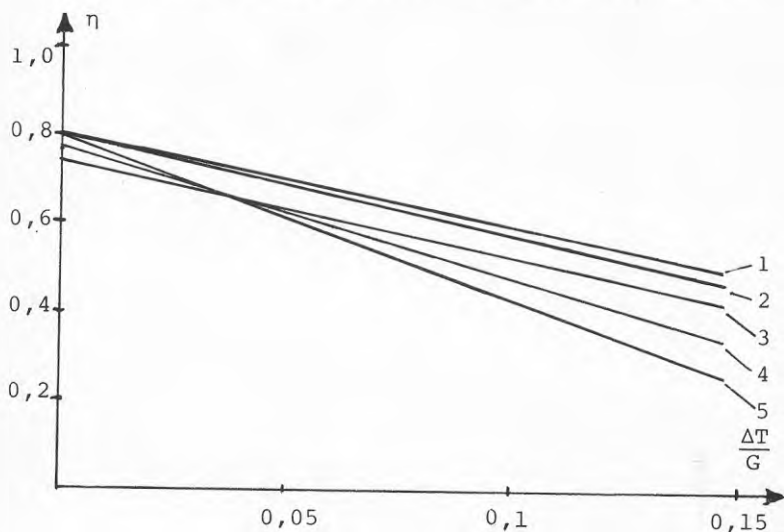
Resultaten av dessa parameterstudier är i korthet följande:

- * k-värdet sjunker om konvektionshindrets tjocklek (avståndet L i figur 4) ökar.
- * k-värdet sjunker om veckningens periodlängd (d v s D i figur 4) minskar.
- * k-värdet påverkas obetydligt av foliens IR-transmission när absorbatorns emissivitet är ca 0,2. För högre värden på emissiviteten är det fördelaktigt att använda folie med lägre IR-transmission och vice versa.
- * k-värdet är starkt beroende av absorbatorns emissivitet när foien IR-transmission är relativt hög (som teflonfoliens 0,7). Beroendet blir mindre för folier med lägre IR-transmission.



Figur 14: Resultat av små förändringar av parametrarna: L (tjocklek), τ (IR-transmission), D (avstånd mellan vecken) och ϵ (absorbatorns emissivitet) kring ett standardfall motsvarande fall 1 i figur 15.

Jag har gjort beräkningar med hjälp av teorin ovan som bestämmer k -värdet för en oändligt stor solfångare för olika temperaturer vilket gör att man får en god uppfattning om verkningsgradskurvans utseende om man kombinerar denna teori med tidigare beskriven teori för den veckade foliens transmission av solstrålning. I figuren har jag också lagt i kurvor för andra solfångartyper beräknade med samma teori.



Figur 15: Beräknade verkningsgradskurvor för en tänkt solfångare försedd med ett konvektionshinder i form av veckade folier där $L=22$ mm och $D=9,5$ mm (1), Dito men med $L = 15$ mm (2) samt en solfångare med konvektionshinder i form av två resp en planateflonfolier (3 och 4) samt en solfångare utan någon form av konvektionshinder (5). Samtliga solfångare är försedda med selektiv absorberator och täcksiva av glas.

8. RESULTAT AV MÄTNINGAR

8.1 Mätningar på k-värde vid Älvkarlebylaboratoriet.

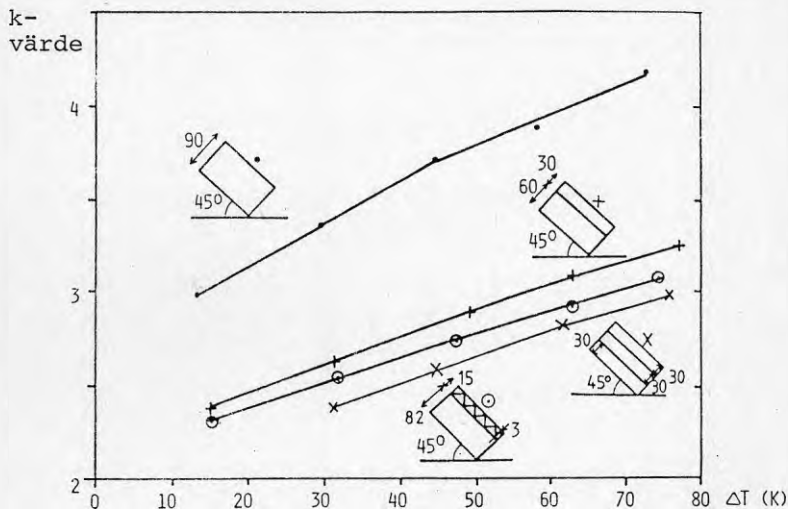
För att ge underlag för optimering av geometrin i den konvektionshämmande strukturen har inom projektet utförts en serie jämförande mätningar vid Älvkarlebylaboratoriet.

Dessa mätningar syftar bl a till att besvara följande typ av frågor:

- * Hur stort är k-värdet för veckade folier jämfört med en resp 2 plana?
- * Hur förändras k-värdet när höjden (L) varieras?
- * Hur långt ifrån glaset skall konvektionhindret placeras i en solfångare?
- * Hur påverkas k-värdet av solfångarens lutning mot horisontalplanet?
- * Hur förändras k-värdet när solfångaren vrids 90° så att vecken lutar mot horisontalplanet.

Mätningarna har utförts i en utrustning som består av en ram av styrencellplast i vilken man har placerat en plåt. Denna plåt är på baksidan kraftigt isolerad med styrencellplast och på framsidan är den belagd med ett selektivt skikt (SUNSTRIP). Plåten kan värmas elektriskt med en reglerbar och mätbar effekt. Genom att mäta temperaturen på plåten och i rummet samt den tillförda effekten i stationärtillstånd kan k-värdet mellan plåten och omgivningen bestämmas. Genom att placera olika konvektionshinder och glas framför plåten kan man simulera olika varianter på solfångare och mäta deras k-värde.

Jag presenterar en del av resultaten i form av ett diagram och en del i form av kvalitativa slutsatser i avsnitt 9.



Figur 16: k-värden för tre olika varianter på konvektionshinder resp normal enkelglasad solfångare.

8.2 Mätningar vid Statens provningsanstalt.

Inom projektets ram har utförts en serie mätningar bl a med avseende på solfångares verkningsgradskurva på Statens Provningsanstalt. Syftet med dessa var att på ett systematiskt sätt undersöka hur teori och verklighet stämmer överens. Ett antal solfångare tillverkades som endast skiljer sig åt beträffande konvektionshindren. För samtliga solfångare gäller:

Yttermåtten är ca 1 x 2 m.

Bakåttisoleringen består av 80 mm PUR (Rectisol).

Avståndet mellan glas och absorbatör är ca 70 mm.

Ramen består av aluminium som närmast absorbatören är isolerad med 20 mm Rectisol.

1. Referenssolfångare:

Denna solfångare försågs inte med någon form av konvektionshinder men var i övrigt identisk med de övriga.

Verkningsgradkurveparametrarna blev: $\eta_0 = 0,72$, $k_0 = 3,95$, $k_1 = 0,0218$. Se figur 16.

2. Solfångare med konvektionshinder i form av två plana FEP teflonfolier mellan absorbatör och glas.

Verkningsgradkurveparametrarna blev: $\eta_0 = 0,66$, $k_0 = 2,99$, $k_1 = 0,0153$.

Kommentar: Under provet "sackade" den undre folien ner mot absorbatören vilket troligen medför att mätningen ger ett k_0 -värde som är ett par tiondelar för högt.

3. Solfångare försedd med konvektionshinder i form av 15 mm hög veckad FEP teflonfolie.

Veckningsperioden var 9,5 mm och höjden 15 mm, konvektionshindret placerades så att en spalt på 20 mm erhöles mellan detta och glaset.

Verkningsgradkurveparametrarna blev: $\eta_0 = 0,73$, $k_0 = 2,89$, $k_1 = 0,0126$.

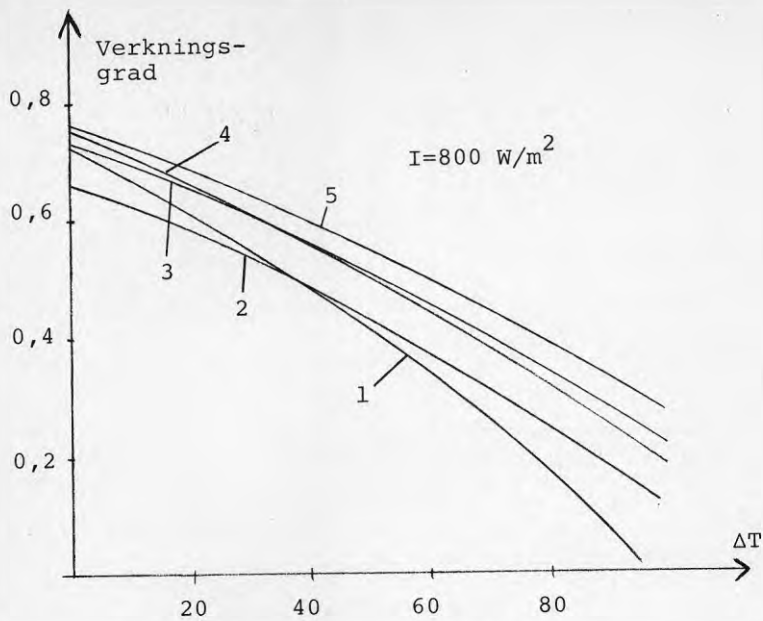
4. Solfångare med konvektionshinder i form av 22 mm hög veckad FEP teflonfolie och försedd med glas med låg järnhalt.

Veckningsperioden var som tidigare 9,5 mm. På att denna variant inte var lika styv som nr 3 kunde inte lika god tätning erhållas mot kantisoleringen.

Verkningsgradkurveparametrarna blev: $\eta_0 = 0,76$, $k_0 = 3,55$, $k_1 = 0,0109$.

5. Samma solfångare som 3 men försedd med glas med låg järnhalt.

Verkningsgradkurveparametrarna blev: $\eta_0 = 0,77$, $k_0 = 3,02$, $k_1 = 0,0108$.



Figur 17: Verkningsgradskurvor från Statens Provningsanstalt, siffrorna hänför sig till numreringen i texten ovan.

9. SLUTSATSER AV TEORI OCH MÄTNINGAR.

Syftet med studien av veckade folier som konvektionshinder har bl a varit att veckningsgeometrin d v s parametrarna L och D ska bestämmas så att så goda prestanda erhålles till så lågt pris som möjligt. Prestanda kan sammanfattas med parametrarna som definierar verkningsgradskurvan η_0, k_0 och k_1 och kostnaden för konvektionshindret kan anses vara proportionell mot folieåtgången per m^2 absorbtoryta.

Transmission:

η_0 är proportionell mot transmissionskoefficienten för solljus genom konvektionshindret. Denna bestäms i det ideala fallet av materialet i folien och av veckningsvinkeln.

Enligt teori och försök skall veckningsvinkeln ligga i intervallet 10 till 40° för vinkelrätt infallande ljus se figur 7. Om man tar hänsyn till att transmissionen skall vara hög även för snett infall (d v s för infallsvinklar upp till $40-50^\circ$) finner man att α inte bör vara större än ca 20° .

I sådana fall bör transmissionvärden för vinkelrätt infall av storleksordningen $0,98$ kunna nås.

Värmemotstånd i konvektionshindret:

Den viktigaste mekanismen som påverkar värmemotståndet för en solfångare försedd med konvektionshinder i form av veckad folie är att man lyckas reducera luftrörelserna jämfört med fallet utan konvektionhinder. Dessa luftrörelser ökar när L (höjden) och D (delningen) (se figur 4) ökar. Samtidigt ökar det område där luftrörelserna minskar i storlek när L ökar. En tumregel i dessa sammanhang är att luft som befinner sig inom ca 1 cm från en yta bromsas av viskösa krafter. Detta innebär att D inte bör vara större än ca 1 till 2 cm för att konvektionshindret skall fungera effektivt.

Sammanfattningsvis finner vi att α bör ligga mellan 10 och 20° , att D bör vara högst $1-2$ cm och att L bör vara så stor som möjligt. Dessa grova kriterier ger att värmemotståndet bör öka med L när L varierar mellan 1 och 6 cm.

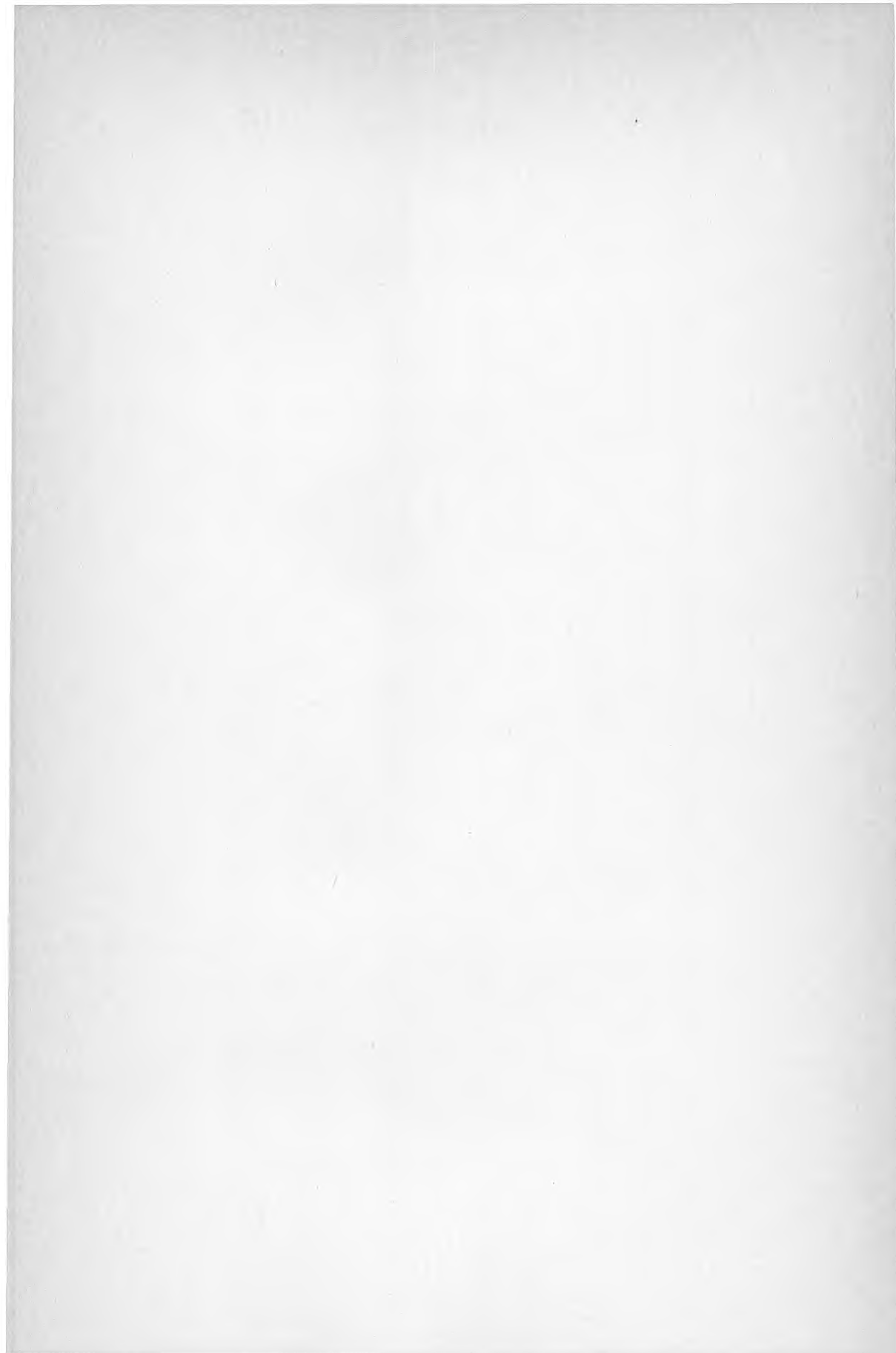
Många fler synpunkter finns att lägga på detta t.ex. att man av stabilitetsskäl måste använda tjockare foliematerial för stora värden på L vilket fördyrar konstruktionen.

Av det totala mätaterialet drog vi följande slutsatser:

- * Transmissionen genom den veckade folien är i enighet med teorin nära 1, d v s att de optiska förluster den orsakar är i praktiken försumbara. Det faktum att η_0 blir högre med konvektionshinder än utan kan förklaras av att flänsverknings graden F' ökar något när k -värdet minskar. Se ref 9.
- * De provade konvektionshindren sänker k_0 -värdet med drygt 1 enhet i solfångarnas normala arbetsområde vilket är i god överensstämmelse med teorin. Att man inte når de k -värden som teorin ger beror på att kantförluster m m bidrar till k -värdet med grovt räknat 0,5 enheter. Detta märks bl a när man jämför prestanda för stora solfångare med prestanda för små.
- * Det är mycket viktigt att den veckade folien ansluter väl till kantisoleringen så att luftläckaget mellan utrymmet under och över konvektionshindret minimeras
- * Det är ganska okritiskt hur tjock spalten mellan den veckade folien och glaset är. Det bästa resultatet erhöles dock när spalten var ca 15 mm.
- * k -värdet försämras när den veckade folien vrides 90° så att vecken lutar.
- * k -värdet försämras med ca 0,5 enenhet om tätningen upptill och nedtill är dålig och endast obetydligt om tätningarna i sidled är dåliga.

Referenslista:

1. Björn Karlsson och Mats Larsson: Solar Energy in the Swedish district heating network. Vattenfall, Älvkarlebylaboratoriet. nr UL-FUD-B 84:9.
2. Karin Nilsson: Solar transmission through a V-corrugated plastic film. Chalmers Tekniska högskola Sektion E. nr 19L.
3. B.A. Meyer m.fl.: An interferometric Investigation of heat Transfer in Slat Solar Collector Cells. Sun, Mankind's Future Source of Energy, Proc. of the 1978 Annual Meeting of the American Section of the Int. Solar Energy Soc. sid 635-639.
4. D.K. Edwards: Solar and Infrared Characteristics of Sinusoidal Honeycomb. Se ref 3 sid 622-628.
5. J.G. Symons m fl: Flat-Plate solar Collectors with slat Convection Supressing Devices. Solar Energy Society, ANZ Section, Meeting on "Solar Energy Coming of Age" Brisbane November 1982.
6. Ishibashi T och Ishida M.: Improved Flat Plate Solar Collectors With V-corrugated Transparent Insulator, Solar World Forum Proceedings of the International Solar Energy Society Congress, Brighton, England 23-28 Augusti 1981, Utgiven av D.O. Hall and J. Morton, Pergamon Press, Oxford 1982, s 189-201.
7. ENERGI-85, BFR G26: 1984.
8. K.G.T Hollands et al: Free convection across inclined air layers. Journal of heat transfer 98 no 2 s 189, 1976
9. Duffie & Beckman: Solar Engeneering of thermal prcesses, John Wiley & sons New York 1980.
10. J G Symmons: The solar Transmittance of Some Convection Supression Devices for solar Energy Applications: An experimental Study. Journal of Solar Energy Engineering. Vol 104/251.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 850102-8
från Statens råd för byggnadsforskning till Bolin Innovation
AB & Co Kommanditbolag, Stockholm.**

R52: 1986

ISBN 91-540-4569-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

**Art.nr: 6706052
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 25 kr exkl moms