



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**

**R87:1987**

**Paraboliska solfångare i  
Sverige**

**Prestanda och potential**

**Birger Johansson**

**Byggforskningsrådet**

R87:1987

PARABOLISKA SOLFÄNGARE I SVERIGE

Prestanda och potential

Birger Johansson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840204-6  
från Statens råd för byggnadsforskning till MAKO Komposit,  
Stockholm.

## REFERAT

En nyutvecklad linjärparabolisk solfångare har provats i Stockholm.

Vid det aktuella driftsfallet var absorbatoren horisontell och orienterad i öst-västlig riktning. Andra alternativa uppställningar med högre solföljningsgrad är möjliga. Datorberäkningar har gjorts för några olika fall för solfångarfält med olika marktäckningsgrad.

Ett driftsfall där speglarna har en fast lutning mot den vertikala rotationsaxeln har undersökts närmare. Beräkningar visar att det genomsnittliga årsutbytet i ett strålningsklimat av Stockholms typ bör hamna mellan 500 och 600 kWh (vid en arbetstemperatur omkring 80°C) vilket är mycket högt.

Anläggningskostnaden för solfångarfält om ca 2000 m<sup>2</sup> solfångare har vid en tredubbel årlig produktionsvolym beräknats till mellan 1500 och 1700 kr/m<sup>2</sup>. Vid betydligt större produktionsvolym beräknas den undre kostnadsgränsen till 1200 kr/m<sup>2</sup>. Solfångartypen bedöms vara konkurrenskraftig gentemot plana högeffektiva solfångare.

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

R87:1987

ISBN 91-540-4790-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1987

Tillägnas  
Conrad Johansson

## FÖRORD

Koncentrerande solfångare har, bl.a. p.g.a. dåliga erfarenheter från tidigare försök och plana solfångares kraftigt förbättrade prestanda, överlag inte bedömts ha någon framtid i Sverige. Detta är dock beklagligt då deras potential är stor även i det svenska klimatet. Endast ett fåtal FoU-projekt i Sverige har rört koncentrerande solfångare, såväl industriellt som institutio-  
nellt. Förhoppningsvis ska det här redovisade projektet bidra något till att ändra på detta förhållande.

Flera personer har på olika sätt bidragit till projektet. Jag vill här framförallt tacka Lisa Johansson och Bertil Nilsson som har varit till ovärderlig hjälp.

Dessutom vill jag särskilt tacka grabbarna på Tepidus, Arne Carlsson och Institutionen för byggnadsteknik för deras stöd och insatser.

Ett varmt tack till alla övriga som på olika sätt hjälpt till att föra projektet framåt.

Stockholm i april 1987

Birger Johansson

INNEHÅLL	Sida
BETECKNINGAR	4
1 SAMMANFATTNING	6
2 KONCENTRERANDE SOLFÅNGARE I SVERIGE	7
2.1 Meteorologiska förutsättningar	7
2.2 Tidigare erfarenheter	11
3 TEORI	12
3.1 Optik	12
3.2 Värmeteori	15
3.2.1 Värmeförluster	15
3.2.2 Transienter	17
4 EN NY SOLFÅNGARKONSTRUKTION	18
4.1 Experimentanläggningen	18
4.2 Mätningar	19
4.3 Resultat	21
4.3.1 Fokusering	21
4.3.2 Försmutsning	21
4.3.3 Åldring	21
4.3.4 Absorbatorsystem	22
4.3.5 Verkningsgrad	22
4.3.5 Circumsolarstrålningens inverkan	25
5 EN SYSTEMSIMULERING	26
5.1 Förutsättningar	26
5.2 Resultat	28
6 PRESTANDA OCH KOSTNADER	30
6.1 Optiska prestanda	30
6.2 Termiska prestanda	31
6.3 Hållbarhet	32
6.4 Kostnader	33
REFERENSER	34

## BETECKNINGAR

a	anger att värdena relaterats till absorbatortan*CR	
B	solångarens öppningsbredd, m	(m)
$c_c$	solångarens värmekapacitet	(J/m <sup>2</sup> ,K) <sub>Sf</sub>
$c_p$	värmekapacitivitet	(J/kg,K)
CR	solångarens koncentrationsfaktor	-
d	deklinationen	(grader)
D	diffus instrålning	(kWh/m <sup>2</sup> )
$D_a$	absorbatorrörets diameter	(m)
$D_g$	glasrörets diameter	(m)
$f$	absorbatordiameterens effektivitetsfaktor	-
F'	solångarens effektivitetsfaktor	-
G	global instrålning	(kWh/m <sup>2</sup> )
h	solhöjd	(grader)
$h_s$	solens timvinkel	(grader)
$h_{ca}$	värmeöverföringstalet genom konvektion mellan absorbatorrör och glasrör	(W/m <sup>2</sup> ,K) <sub>a</sub>
$h_{ra}$	värmeöverföringstalet genom strålning mellan absorbatorrör och glasrör	(W/m <sup>2</sup> ,K) <sub>a</sub>
$h_{rg}$	värmeöverföringstalet genom strålning mellan glasrör och omgivning	(W/m <sup>2</sup> ,K) <sub>a</sub>
$h_v$	värmeöverföringstalet genom konvektion (vind)mellan glasrör och omgivning	(W/m <sup>2</sup> ,K) <sub>a</sub>
i	solstrålarnas infallsvinkel mot normalen till solångarplanet	(grader)
I	direkt instrålning	(kWh/m <sup>2</sup> )
$I_a$	den <u>totala</u> strålning som upptas av absorbatoren	(kWh/m <sup>2</sup> ) <sub>Sf</sub>
$I_{hor}$	den direkta instrålning som faller in mot horisontalplanet	(kWh/m <sup>2</sup> )
$I_s$	den strålning som kommer från solskivan	(kWh/m <sup>2</sup> )
L	latitud	(grader)
$l_s$	solångarens kantförlustfaktor	-
n	dagen på året	-
n	solångarens termiska verkningsgrad	-
$n_0$	solångarens optiska verkningsgrad	-
$n_{cs}$	solångarens geometriska verkningsgrad m.a.p. circumsolarstrålningen inom en konvinkel på 5.5°	-
$n_g$	solångarens geometriska verkningsgrad m.a.p. $I_s$	-
$n_I$	solångarens geometriska verkningsgrad m.a.p. I	-
$n_{sm}$	solångarens optiska verkningsgrad m.a.p. försmutsning	-
$n_{tg}$	solångarens tillgänglighetsfaktor m.a.p. den årliga totala $I_s$ (hänsyn tas endast t.geometriska effekter)	-
$Q_{ut}$	från solångaren erhållen energi	(kWh/m <sup>2</sup> ) <sub>Sf</sub>
Pr	prandtl's tal	-
r	avståndet från en punkt på spegeln till fokus	(m)
Ra	rayleighs tal	-
Re	reynolds tal	-
Sf	anger att värdena beräknats m.a.p. solångarens frontarea	-



skg	skuggfaktor för solfångare i fält. Anger hur stor del av den infallande strålningen som inte skuggas bort av närliggande solfångare	-
$T_a$	absorbatortemperaturen	(K)
$T_{ag}$	temperaturen i mellanrummet mellan glas-och absorbatorrör	(K)
$T_g$	glasrörets temperatur	(K)
$T_h$	himlens strålningstemperatur	(K)
$T_o$	solfångarens omgivningstemperatur	(K)
$t_s$	solskenstiden	(timmar)
$U_L$	solfångarens förlustkoefficient	(W/m <sup>2</sup> , K) <sub>sf</sub>
$v$	vindhastigheten	(m/s)
$\alpha$	absorbatorns absorbtionskoefficient	-
$\alpha_a$	absorbatorns acceptansvinkel	(rad)
$\epsilon_a$	absorbatorns värmestrålningsemitans	-
$\epsilon_g$	glasrörets värmestrålningsemitans	-
$\rho$	spegelns reflektionskoefficient	-
$\sigma$	Stefan Boltzmanns konstant = $5.67 \cdot 10^{-8}$	-
$\tau$	glasrörets transmittans av solstrålning	-
$\nu$	kinematisk viskositet	(m <sup>2</sup> /s)
$\theta$	strålningens infallsvinkel mot spegelns normal efter reflektionen	(grader)
$\Delta T$	$T_a - T_o$	(K)
$\emptyset$	Spegelns öppningsvinkel	(grader)

## 1 SAMMANFATTNING

En nyutvecklade linjärparabolisk solfångare har provats under laboratoriemässiga driftsförhållanden i Stockholm juli-november 1986. Solfångaren utgörs av en sandwich-spegel som vrids kring ett horisontellt, öst-västorienterat absorbatorrör. Absorbatorn är en s.k. heat-pipe med en låg tidskonstant och med en passiv värmetransport från solfångaren.

Konstruktionen har utvecklats med avsikten att sänka tillverkningskostnaden och öka prestanda för denna typ av solfångare. Spegelarna kan följa solen på olika sätt, dels som i experimentanläggningen kring en horisontell öst-västlig axel, dels kring en lutande axel (som de paraboliser som fältprovades i Ingelstad), dels kring en vertikal axel med en fast solfångarlutning och dels 100%-igt solföljande (vertikal axel med variabel solfångarlutning).

Datorsimuleringar har gjorts för olika driftssätt i solfångarfält med varierande marktäckningsgrad. Genom att montera samman flera speglar med varandra till enhetliga moduler och optimera modulplaceringen (minimera skuggningen från andra solfångare), kommer det årliga energiuttaget från ett solfångarfält, i ett strålningsklimat av Stockholms typ, att ligga mellan 500 och 500 kWh/år vid en kyltemperatur på 80°C och en optisk verkningsgrad på 0.75. Värdena räknade per m<sup>2</sup> frontyta. Energiuttaget blir således mellan 50 och 80% högre än för dagens högeffektiva plana solfångare.

En preliminär uppskattning av den totala investeringskostnaden för ett solfångarfält om ca 2 000 m<sup>2</sup> har gjorts. Vid en årsproduktion mellan 5 000 och 7 000 m<sup>2</sup> solfångare beräknas bruttokostnaden, exkl. markkostnad, att hamna mellan 1 500 och 1 700 kr/m<sup>2</sup>. Vid en mycket stor produktionsvolym, motsvarande 50 000 m<sup>2</sup>/år eller mer beräknas den undre kostnadsgränsen för ett större solfångarfält att ligga på 1 200:-/m<sup>2</sup>.

## 2 KONCENTRERANDE SOLFÅNGARE I SVERIGE

## 2.1 Meteorologiska förutsättningar

För att en koncentrerande solfångare som endast har en acceptansvinkel på tre till fem grader för solinstrålning ska kunna fungera, så krävs det naturligt nog direkt solljus. I ett strålningsklimat av mellansvensk kusttyp så tar en 45-gradigt lutande södervänd plan yta emot ca 65% direkt solinstrålning, räknat på totalinstrålningen per år, vid globalstrålningsintensiteter över  $300 \text{ W/m}^2$ . Instrålning vid lägre intensiteter är till största delen oanvändbar för solfångare som arbetar vid medelhöga temperaturer, d.v.s. mellan  $50^\circ\text{C}$  och  $100^\circ\text{C}$ , p.g.a. solfångarnas termiska förluster. För en solföljande yta är motsvarande värde ca 75%. Solfångares förmåga att utnyttja den direkta instrålningen är således av särskilt stort intresse.

Material över strålningen på olika platser i landet, har under en längre tid samlats in av SMHI som värden på globalstrålning mot horisontell yta och också - indirekt - som solskenstid. Sedan 1983 har ett nytt mät-system tagits i bruk på några platser, där även den direkta solinstrålningen registreras. Det material som lagrats och lagras är av stort värde för den teoretiska behandlingen av koncentrerande solfångares prestanda i olika delar av Sverige.

Medelinstrålningen per år av direkt solinstrålning har beräknats för Stockholm, med utgångspunkt från globalstrålningsdata från åren 1961-1980 och med ett beräkningssamband mellan den direkta och den diffusa komponenten för strålning mot horisontell yta, och ett annat samband för förhållandet mellan den direkta instrålningen mot en solföljande och den mot en horisontell yta.

Det första sambandet enligt Liu-Jordan med modifierade konstanter (Josefsson) är:

$$D/G = -1.25 * G / I_{\text{ex}} + 1.04 \quad \text{där } G = D + I_{\text{hor}}. \quad (2.1)$$

$I_{\text{ex}}$  har beräknats till  $2135 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$ .

$$\text{Det andra sambandet: } I / I_{\text{hor}} \quad (2.2)$$

har beräknats dels med dator för latituden  $59.4^\circ$ , under förutsättningen att sannolikheten för solsken är densamma oberoende av tidpunkt och med hjälp av (2.3) (enl. Ransmark), dels med utgångspunkt från SMHI:s mätdata åren 1983-85 för Stockholm.

$$I = I_0 * e^{-a * m} \quad (2.3)$$

$$I_0 = 1353 + 44.9 * \sin(92 - n) \quad (2.4)$$

$n$  är dagens nummer på året.

$$a = 0.07 + (0.24 + 0.035 \cdot \sin(L) \cdot \cos((t+x) \cdot 180/x)) \cdot (\sin(h))^{0.55} \quad (2.5)$$

t är antalet timmar från årets början.  
L är latituden.  
h är solhöjden.

För  $t < 4278$  så är  $x = 5100$   
För  $t > 4278$  så är  $x = 4500$

$$m = (\sqrt{6380^2 + (\sin^2(h) - 1) \cdot 6370^2} - 6370 \cdot \sin(h)) / 10 \quad (2.6)$$

$$\sin(h) = \cos(L) \cdot \cos(d) \cdot \cos(h_s) + \sin(L) \cdot \sin(d) \quad (2.7)$$

$$\sin(d) = 0.398 \cdot \cos(0.9855 \cdot (n - 173)) \quad (2.8)$$

$h_s$  är timvinkeln där  $15^\circ$  svarar mot en timme.  $h_s$  räknas från zenittid (i detta fall är söderriktningen möjlig att använda):

$$h_s = (12 - \text{klockslag}) \cdot 15 \quad (2.9)$$

(2.4), (2.5) och (2.6) insatta i (2.3) ger I som funktion av tidpunkten för klar himmel.

$$I_{\text{hor}} = \sin(h) \cdot I \quad (2.10)$$

En datorberäkning för ett helt år gav

$$I / I_{\text{hor}} = 2.34$$

SMHI:s strålningsdata för Stockholm 1983-86 gav

$$I / I_{\text{hor}} = 2.05$$

Det bör dock observeras att medelinstrålningen för samtliga år endast uppgick till  $885 \text{ kWh/m}^2$  - globalstrålning mot horisontell yta - att jämföra med  $994 \text{ kWh/m}^2$  ett normalår (1961 - 1980). Med månadsmedelvärden för globalstrålningen under denna period och Liu-Jordan-samband för varje månad med konstanter enligt Josefsson, beräknades  $I / I_{\text{hor}}$  med hjälp av (2.3):

$$I / I_{\text{hor}} = 2.21$$

Med medelåret som utgångspunkt beräknades den relativa avvikelserna för perioden 1983-1986 till 0.98, vilket ger

$$I / I_{\text{hor}} = 2.17, \text{ vilket är klart högre än det empiriskt}$$

erhållna 2.06. Denna skillnad kan delvis bero på att horisontavskärmningen har reducerat mätvärdena. Tills vidare rekommenderas dock att det lägre faktorn används i beräkningssammanhang för att inte överskatta I.

Tabell 2.1

Månadsmedelvärden för strålning, kWh/m<sup>2</sup>

Månad	Global G (61-80)	Global G (83-86)	$I/I_{hor}(61-80)^*$	$I/I_{hor}(83-86)^{**}$	Imedel <sup>***</sup>
Jan	10	9	7.80	8.24	21
Feb	27	29	4.42	4.00	42
Mar	71	53	2.89	2.56	106
Apr	108	94	2.20	1.98	117
Maj	162	152	1.91	1.80	171
Jun	185	155	1.80	1.74	198
Jul	162	153	1.83	1.78	162
Aug	131	117	2.00	1.96	141
Sep	78	75	2.44	2.28	93
Okt	38	35	3.45	2.77	47
Nov	14	13	5.68	5.75	28
Dec	7	5	8.18	9.65	15
Totalt	994	886	2.21	2.06	1141

\*Beräknade med (2.3), (2.10) och Liu-Jordan-samband med månadscoefficients enl. Josefsson.

\*\*Erhållna från uppmätta värden på I och G.

\*\*\*Beräknade för ett medelår 1960-1980 med  $I/I_{hor}$ -kvoter för perioden 1983-1986.

Samband (2.1) ger med årsmedelvärdet 994 kWh/m<sup>2</sup> för globalstrålningen G ett medelvärde på  $I_{hor}$  på 539 kWh/m<sup>2</sup>. En solföliande yta i Stockholm kommer då att ta emot ca  $2.06 \cdot 539 = 1110$  kWh/år. Beräkningar f. månadsmedelvärdet (se tab.2.1) ger 1141 kWh. Det förstnämnda värdet bör användas. Horisontavskärmning reducerar detta värde något (se fig.1).

All strålning som registreras av en pyrheliometer kommer inte att utnyttjas av en solfångare med en acceptansvinkel mindre än pyrheliometerns (5.5 - 5.7°). En beräkning för en parabolisk solfångare med en koncentrationsfaktor CR på ca 10 (se avsnitt 3.1) visar att detta värde för en optimalt tillverkad och inställd spegel, ligger på ca 8% av circumsolarstrålningen. Med en genomsnittlig circumsolarstrålning på 10% av den uppmätta direkta strålningen, så innebär detta att  $n_I$ , den geometriska verkningsgraden m.a.p. den uppmätta direkta strålningen, vid ett CR = 10, då blir större än 0.99.

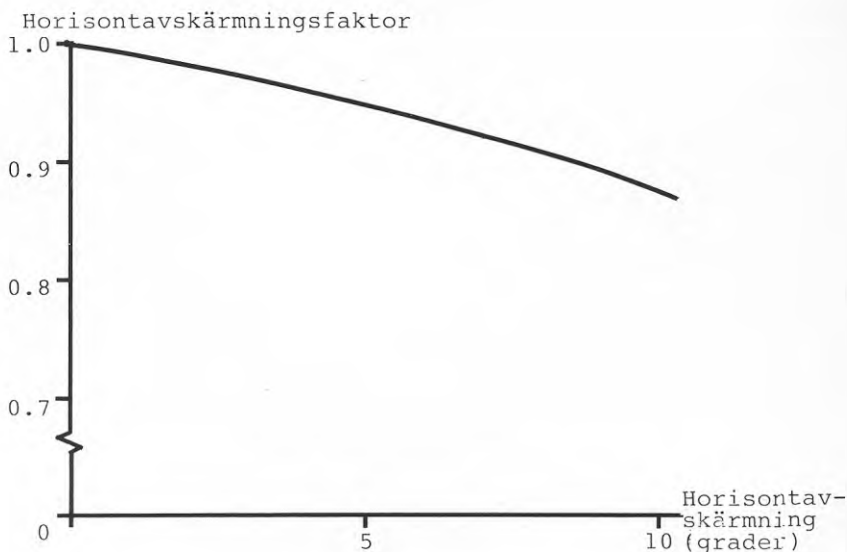


Fig.1 Horisontavskärningsfaktorns betydelse för den årliga totala direkta solinstrålningen vid olika horisontavskärningsgrad.

## 2.2 Tidigare erfarenheter

De främsta drifterfarenheterna för koncentrerande solfångare i Sverige kommer från fyra försöksanläggningar. I Studsvik har man byggt ett par prototyper för lågkoncentrerande solfångare av CPC-typ med CR-värden mellan 4 och 5 (ref. 6 och 7). De har byggt på samma princip: fast monterade på ett solföljande plan. Det har visat sig att sådana solfångare kan producera över  $300 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$  vid driftstemperaturer mellan  $40^\circ$  och  $60^\circ\text{C}$ . Kostnadsbilderna för de provade konstruktionerna syns dock ogynnsamt jämfört med de högeffektiva plana solfångare som utvecklats under 80-talet.

Den försöksanläggning som man huvudsakligen refererar till när det gäller koncentrerande solfångare, är den tidiga versionen av Ingelstadsanläggningen. Där provades linjära paraboliska solfångare som tillverkats kommersiellt. Spegelarna utgjordes av försilvrat glas och varje spegel vreds kring ett absorbatorrör med lutningen  $35^\circ$  mot horisontalplanet. Varje spegels frontarea var  $3.14 \text{ m}^2$ . 12 st speglar var seriekopplade och styrdes av en gemensam drivenhet. Värmeutbytet blev för åren 1981 och 1982, 160 respektive  $200 \text{ kWh/m}^2$  vid medeldriftstemperaturerna  $71^\circ$  och  $76^\circ\text{C}$ . Säsongsverkningsgraden blev omkring 0.30. Säsongerna löpte fr.o.m. mars t.o.m. september (11).

Det dåliga utfallet gjorde att solfångarna byttes ut mot högeffektiva plana som kunnat producera över  $300 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$  vid driftstemperaturer omkring  $60^\circ\text{C}$ .

Laboratorieprovningar av de paraboliska solfångarna vid Vattenfalls Älvkarlebylaboratorium (5) har dock visat att solfångarnas möjliga prestanda är betydligt högre. 1984 och 1985 producerades 322 respektive  $362 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$  vid driftstemperaturerna  $63^\circ$  respektive  $70^\circ\text{C}$ . Detta kan jämföras med värdena för högeffektiva plana solfångare (SS-Ht) som testats parallellt. 1984 blev utbytet för denna  $353 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$  vid  $67^\circ\text{C}$  och 1985 blev utbytet  $327 \text{ kWh/m}^2$  vid  $75^\circ\text{C}$ . Detta indikerar att vid en driftstemperatur omkring  $70^\circ\text{C}$ , så ger de bågiga solfångarmodellerna jämförbara energimängder.

Att de paraboliska solfångarna vid det stora fältförsöket i Ingelstad uppvisade betydligt lägre prestanda anses enligt Älvkarlebylaboratoriet huvudsakligen bero på att den mekaniska fokuseringsmekaniken gjorde solfångarna svåra att justera. Dessutom har Ingelstad ett strålningsklimat med en relativt sett låg direkt instrålning. Den systemtekniska lösningen skapade onödigt stora termiska förluster. Sammanfattningsvis kan sägas att den provade solfångaren uppvisar allvarliga systemproblem och att energiutbytet relativt anläggningskostnaden gör denna solfångare svårplacerad.



## 3. Teori

## 3.1 Optik

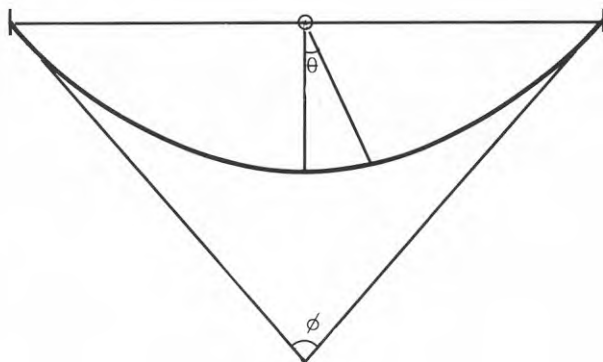


Fig.2

Den paraboliska formen för spegeln beskrivs av ekvationen

$$r = \frac{1 + \cos\theta}{2 \sin\theta} \frac{B}{1 + \cos\theta} \quad (3.1)$$

$\theta$  är öppningsvinkeln enligt fig.

B är öppningsbredden.

CR är den geometriska koncentrationsfaktorn och definieras som öppningsarea/absorbatorarea. För en linjär parabol blir (med cylindrisk absorbator)

$$CR = B / (\pi \cdot D_a) \quad (3.2)$$

där  $D_a$  är absorbatordiametern.

Den verkliga koncentrationsfaktorn blir högre då en stor del av absorbatorn inte tar emot strålar från spegeln. Här är acceptansvinkeln  $\alpha_a$  den parameter som bör användas vid en matematisk behandling av optiken.

$$\alpha_a = f \cdot D_a / r \quad (3.3)$$

f är en faktor som anger hur stor del av  $D_a$  som utgör den "arbetande" diametern. Strålar som träffar absorbatorn ut mot sidorna kommer till stor del p.g.a. de stora infallsvinklarna och därmed följande reflektionsförluster, inte att kunna utnyttjas. Värdet på f ligger normalt mellan 0.80 och 0.87.



Speciellt vid höga CR-värden, från 20 och uppåt, kan det vara av intresse att matematiskt behandla hur stor del av strålningen från sjäva solskivan som missar absorbatoren p.g.a. spegelytans spridning av strålningen. Spegelarna är inte helt jämna och under förutsättning att ojämnheter är slumpvis utbredda, så kan spridningen av infallande strålar behandlas med hjälp av olika fördelningsfunktioner. Då detta är av sekundärt intresse vid de CR-värden på ca 10 som är aktuella i detta arbete, hänvisas till (10) och (18). Använder man speglar av dålig kvalitet kan det dock även vid dessa relativt låga CR-värden inträffa att strålar från solskivan kan missa absorbatoren.

Av betydligt större intresse är istället systemfelen. Dessa kan utgöras av större avvikelser från den ideala paraboliska formen och av dålig solföljning. Det senare fallet visade sig tydligt i Ingelstadsanläggningen. Det är av stor vikt att formar, fixturer etc. som används vid tillverkningen av speglarna håller en hög precision.

Vid en bra kvalitet på solfångarna så blir de förstnämnda systemfelen eliminerade. Solföljningen är mera komplex och är avhängig både av tillverkningen och driften.

Det är huvudsakligen strålning från själva solskivan, som upptar en konvinkel på ca  $0.5^\circ$ , som utnyttjas av de paraboliska solfångarna. Vid många instrålningsfall bör även den omgivande strålningen, den s.k. circumsolarstrålningen, beaktas. Lite arbete har gjorts för att studera dess storlek vid olika väderlekstyper. (16) har dock gjort en teoretisk studie för flera typer av atmosfär. Där visar det sig att två fall skapar en förhöjd andel circumsolarstrålning. Det första fallet är ett marint klimat med hög luftfuktighet. Där uppgår circumsolarstrålningen till mellan 1% och 10% av strålningen från själva solskivan, beräknat för  $50^\circ$  solhöjd och tre olika aerosolbelastningar. För  $20^\circ$  solhöjd ligger motsvarande värden mellan 3% och 23%.

Det andra fallet är när cirrusmoln förekommer. Här blir circumsolarstrålningen särskilt markant enligt studien. Här uppgår den till mellan 15% och 100% av strålningen från sjäva solskivan. I bägge fallen har en konvinkel på  $10^\circ$  använts. Då cirrusmoln är vanligt förekommande (de är ofta så tunna att de inte uppmärksammas men ändå påverkar strålningen) så har en matematisk behandling av deras inverkan på den optiska verkningsgraden gjorts.

Med utgångspunkt från (16) har en approximativ ekvation som beskriver strålningens beroende av avståndet från solskivans mittpunkt ställts upp:

$$I(x) = I_S + A \int_{0.005}^a C/(1+Cx) dx \quad (3.4)$$

$I_S$  är solstrålningen från sjäva solskivan.

$a$  är vinkelavståndet från solskivans mittpunkt (i rad).

För ett beräkningsfall som i brist på tillgängliga data satts som ett typfall för cirrusmoln så blir konstanterna:

$$A = 0.2 I_S$$

$$C = 115$$

$a = 0.048$  vilket svarar mot halva öppningsvinkeln för en standardpyrheliometer. Detta relaterar den strålning som är möjlig att utnyttja till den uppmätta.

Med ovanstående värden erhålls en circumsolarstrålning vars storlek uppgår till 27% av den med pyrheliometer uppmätta. Följande formel härleddes för att bestämma hur stor del av circumsolarstrålningen som är möjlig att utnyttja:

$$g = \left( \frac{\arcsin((fD_a / r(\theta) - 2r(\theta)d)/x) + \arcsin((fD_a / r(\theta) + 2r(\theta)d)/x)}{\pi} \right) \quad (3.5)$$

d är fokuseringsfelet i radianer.

(3.5) måste modifieras om fokuseringsfelet är större än  $(fD_a/2 + 0.005r)/2$  eftersom då även en del av strålningen från solskivan hamnar utanför den effektiva absorberdiametern. (3.5) användes tillsammans med (3.4) för att beräkna fokuseringsfelens inverkan:

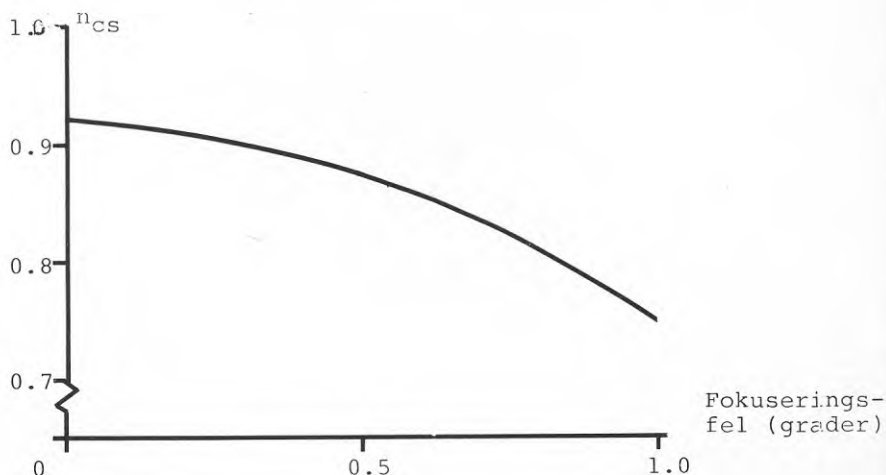
$$n_{CS} = \int_0^{\theta_{\max}} \int_0^{0.048} g(x)(1+C*2.75)/(1+Cx)*h(\theta) dx d\theta \quad (3.6)$$

Integrationen görs över hela öppningsbredden medelst  $\theta$ .

$$h(\theta) = 1/[1 + ((\cos\theta\sin\theta - \sin\theta(1+\cos\theta))/(\sin^2\theta + \cos\theta * (1+\cos\theta)))^2]^{1/2} \quad (3.7)$$

$h(\theta)$  relaterar  $\theta$  till den infallna energimängden. Förhållandet  $dI/d\theta$  minskar ju med ökande  $\theta$ .  $h(\theta)$  svarar mot förhållandet öppningsarea/spegelarea för den aktuella positionen på spegeln.

I fig.3 visas hur den geometriska verkningsgraden m.a.p. circumsolarstrålningen,  $n_{CS}$ , varierar med fokuseringsfelets storlek för en solfångare när  $\theta = 90^\circ$  och  $CR=10$ .



### 3.2 Värmeteori

#### 3.2.1 Värmeförluster

En typisk absorbatorkonfiguration för en linjär parabol är en cylindrisk absorlator omgiven av ett glasrör. Mellanrummet mellan rören kan vara luftfyllt eller evakuerat. P.g.a. de små avstånden mellan glasrör och absorlator som vanligen förekommer, 5 - 20 mm, så sker värmeöverföringen från absorbatoren huvudsakligen genom konduktion förutom genom strålning.

Ett reducerat lufttryck ned mot någon torr, reducerar konvektionsförluster. För att även de konduktiva förlusterna ska reduceras nämnvärt måste trycket sänkas betydligt. Den teknik som då måste utnyttjas ställer stora krav på material och utformning av fogar m.m. Generellt sett gäller att utnyttjande av vakuum inte är kostnads-effektivt vid temperaturer under 100°C.

(21) presenterar en väl genomarbetad teknik för beräkning av förlustkoefficienten  $U_L$  för en linjär konfiguration, sammanfattad nedan.

$$U_L = [(h_{ra} + h_{ca})^{-1} + D_a/D_g (h_{rg} + h_v)^{-1}]^{-1} \quad (3.8)$$

$$h_{ra} = \sigma (T_a^2 + T_g^2) (T_a + T_g) / [1/\epsilon_a + (D_a/D_g)(1/\epsilon_g - 1)] \quad (3.9)$$

$$h_{ca} = 0.0003064 T_{ag}^{0.7} Ra^{0.25} / (D_a \ln(D_g/D_a)) \quad (3.10)$$

$$T_{ag} = (T_a + T_g) / 2 \quad (3.11)$$

$$Ra = 0.1025 * 10^{20} (T_a - T_g) (\ln(D_g/D_a))^4 Pr / (T_{ag}^{4.4} (1/D_a^{0.5} + 1/D_g^{0.5})^5) \quad (3.12)$$

$$h_{rg} = \sigma \epsilon_g (T_g^2 + T_h^2) (T_g + T_h) \quad (3.13)$$

$$h_v = Nu * 0.000485 T_o^{0.7} / D_g \quad (3.14)$$

$$Nu = 0.148 Re^{0.533} \quad (5000 < Re < 50000) \quad (3.15)$$

$$Nu = 0.583 Re^{0.471} \quad (Re < 5000) \quad (3.16)$$

$$m = D_a (h_{ra} + h_{ca}) / (D_g (h_{rg} + h_v)) \quad (3.17)$$

$$T_g = (m T_a + T_o) / (1 + m) \quad (3.18)$$

$$Re = D_g v / \nu \quad (3.19)$$

Tab.3.1  $\nu$  (den kinematiska viskositeten för luft)

$T_O$ , K	$\nu$ , $m^2/s * 10^5$
273	1.34
283	1.43
293	1.52
303	1.62

$\epsilon_g$  kan för glaströr sättas till 0.88.

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8}$$

Pr kan sättas till 0.705 för temperaturer under 373 K.

$T_h$  (himmelns strålningstemperatur) kan ligga flera tiotals grader under omgivningstemperaturen  $T_O$ . Särskilt låg kan den bli vid mycket klar atmosfär.

$\nu$  vindhastighetens medelvärde är förutom ortens faktiska vindförhållanden också beroende av den läggivande effekt som flera solfångare i ett fält kan skapa.

En faktor av betydelse vid beräkning av den effektiva förlustkoefficienten är solfångarens verkningsgradsfaktor  $F'$ . Den är framförallt avhängig av  $U_L$  och  $k_i$  som är värmeöverföringstalet mellan absorberaryta och inre värmetransporterande media. Flänsverkningsgraden kan i allmänhet sättas =1 för de absorberatorutföranden som är av intresse.

$$F' = 1 / (1 + U_L / k_i) \quad (3.20)$$

$F' > 0.99$  gäller i allmänhet och ett  $F' < 0.98$  torde vara ovanligt vid  $U_L$ -värden  $< 10 \text{ W/m}^2, \text{K}$  (relaterat till absorberarytan) och  $CR > 10$ . Det framgår att  $k_i$  inte behöver vara särskilt hög för att ett  $F' > 0.99$  ska erhållas.

För att beräkna en absorberatorkonfigurations effektiva  $U_L$  så måste även hänsyn tas till kantförluster, speciellt vid absorberatorgenomföringar. Vid en god konstruktion så är dock dessa försumbara. Vid ett  $\epsilon_a = 0.1$  så blir ett enligt ovan beräknat  $U_L$ -värde ca  $5 \text{ W/m}^2, \text{K}$  om  $CR$  sätts = 10. Det innebär då ett effektivt  $U_L = 0.5 \text{ W/m}^2, \text{K}$  relaterat till solfångarens frontyta.  $80^\circ \text{ C}$  absorberatortemperatur ( $T_a$ ) har antagits.

### 3.2.2 Transienter

Genom sin lägre absorbatormassa och eventuellt också lägre innehåll av värmebärandevätska, så erhåller de koncentrerande solfångarna bättre prestanda vad avser transientberoendet än motsvarande för plana solfångare. En faktor som dock starkt kan reducera denna effekt och vända på förhållandet är koncentrerande solfångares lägre utnyttjande av den diffusa instrålningen. En väsentlig faktor för transientberoendet är temperaturskillnaden mellan drift (vid solsken) och stagnation (vid molnperioder mellan solskenstillfällena).

Stagnationstemperaturen kan överslagsvis erhållas ur sambandet

$$n_0 D / CR = U_L (T_{\text{stagn.}} - T_O) \quad (3.21)$$

För ett icke-evakuerat absorbatarrangemang så innebär detta i allmänhet en stagnationstemperatur  $10^\circ - 40^\circ\text{C}$  över omgivningstemperaturen. Här är beroendet av molnperiodernas frekvens och längd av betydelse för transientverkningsgraden vid driftstemperaturer högre än  $T_{\text{stagn}}$ . Det saknas tillräckligt med material för att kunna uppställa transientverkningsgrader med någon större noggrannhet. Allmänt kan det dock sägas att de för linjära parabler med CR omkring 10 ligger från 0.90 och uppåt.

Följande ekvation beskriver transienta förlopp utan värmeuttag från solfångaren:

$$T_a = T_O + I_a / U_L - (I_a / U_L - (T_{a0} - T_O)) \exp(-U_L t / c_c) \quad (3.22)$$

$U_L$  är relaterad till absorbatorytan.

$$I_a = n_0 (I + D / CR)$$

$T_{a0}$  är absorbatorns utgångstemperatur.

$T_O$  är omgivningstemperaturen.

$t$  är tiden i sekunder.

$c_c$  är den effektiva värmekapaciteten

(3.22) kan i modifierad form användas för att beräkna temperaturförloppet när värmebäraren cirkulerar.

## 4 EN NY SOLFÅNGARKONSTRUKTION

## 4.1 Experimentanläggningen

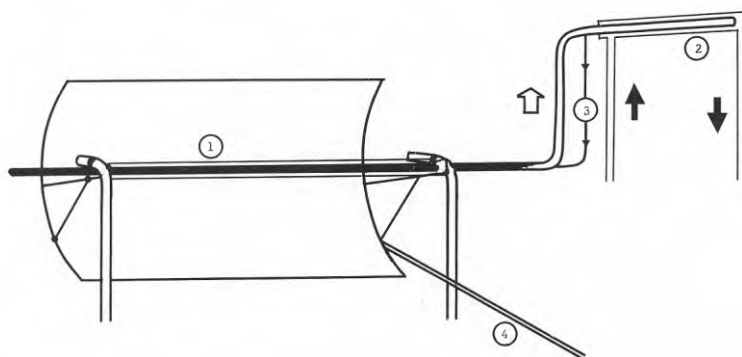


Fig.5

Anläggningens uppbyggnad framgår schematiskt av fig.5. Absorbatorröret (1) är horisontellt och orienterat i öst-västlig riktning. En parabolisk spegel med öppningsbredden 1.8 m och frontytan  $5.4 \text{ m}^2$ , vrids m.h.a. ett elmotordrivet ställdon, förbundet med spegeln via hävarmen (4), runt absorbatorröret. I viloläge är spegeln vänd upp och ned för att reducera försmutsningen av spegelytan och det glasrör som omger absorbatorn.

Absorbatorn är utformad som en heat-pipe och värmetransporten från denna sker genom förångning av arbetsmediet. Ångan strömmar till kylaren (2) där den kondenserar och avger en stor del av sitt värmeinnehåll. Kylaren utgörs av ett dubbelväggigt rör. Den termostaterade kylarvätskan cirkulerar kontinuerligt i mellanrummet mellan de bägge rörväggarna och håller kondensorn vid en konstant övertemperatur relativt omgivningstemperaturen. Denna övertemperatur var under huvuddelen av drifttiden 25 grader.



Kondensatet strömmar tillbaka till absorbatoren genom energimätaren (3) som registrerar volymflödet av kondensat. Kondensatmängden är approximativt direkt proportionell mot den från absorbatoren erhållna energin.

Spegeln är tillverkad av fem separata element som monterats samman till en enhet. Varje element är uppbyggt som en sandwich med en kärna av cellplast och ytskikt av metall. Tjockleken på spegeln uppgår till ca 70 mm. Själva reflektormaterialet utgörs av en aluminiserad plastfolie som fästs på den inre ytterplåten. Litteraturvärden anger  $p$  till 0.85 för folien.

Absorbatorröret är ett svartkromaterat kopparrör med ett nickelanslag. Absorbatoren omges av ett glasrör.

Styreelektroniken är programmerad så att solfångaren vid tillräcklig ljusintensitet, registrerad genom en specialkonstruerad givare, vrids från sitt viloläge tills det att den vänt sig vinkelrätt mot solen. Om solen eventuellt hunnit gå i moln på de 3 - 5 minuter det tar för spegeln att vridas i läge, så fortsätter vridningen tills det att spegeln hänger nära nog horisontellt.

Spegelns exakta läge vid solsken detekteras via två givare placerade under en skuggskärm mitt på spegeln. Endast förändringar av strålningsbelastningen på givarna av tillräcklig längd och intensitet medför några lägesjusteringar.

Om solen inte lyst under en 20-minuters period kommer spegeln att vridas till sitt viloläge. Denna funktion syftar både till att minska partikelbeläggningen via damm och pollen och att minska den försmutsande effekten av lätta korta regn.

#### 4.2 Mätningar

Då spegelelementen är de första proverna som tillverkats med den formskumningsteknik som använts, har de lämnat en del att önska ifråga om ytjämnhet. Speciellt de yttre delarna, räknat på bredden, led av en bucklighet som gjorde att de maskerades med en mattsvart plast för att inte ge ett missvisande resultat. Vid en större tillverkning med mindre hantverksmässighet är denna bucklighet ett lätt överkomligt problem.

Den effektiva spegelytan reducerades efter maskeringen till endast 2.2 m<sup>2</sup>. Även en del av den resterande ytan syntes något bucklig vid en visuell betraktelse. Anledningen var förutom brister vid tillverkningen ett buckligt plåtmaterial. En svårförklarlig defekt, som syntes som flera spridda fläckar av fina repor i plastytan, har troligen påverkat resultatet något. Den mest närliggande förklaringen, men ändå inte helt tillfredsställande, är att en presenning som legat över den omonterade spegeln under några månader, har släppt och att presenningen vid blåst har slagit mot spegeln.

Energimätaren arbetar genom att släppa tillbaka kondensatet till absorbatoren i form av distinkta volymer och registrera antalet sådana. Kondensatvolym är proportionell mot förångningsvärme för arbetsmediet, vid konstanta driftsbetingelser. Antalet kondensatvolymer summerades per timme och skrevs ut på en printer. Felet är approximativt  $\pm$  en volymsenhet per timme. Felet är av samma storleksordning för längre driftsperioder och relativfelet minskar således med driftstiden. För enskilda timmar med energiutbyten på mer än  $100 \text{ Wh/h, m}^2$  varierar relativfelet mellan  $\pm 2\%$  och  $\pm 10\%$  beroende på energimängden.

Mätningar på solfångaren gjordes kontinuerligt under perioden sep - nov 1986. Endast timmar mellan 9 och 15 utnyttjades p.g.a. de skuggningsförluster som uppstod genom omgivande utrustning.

Från början var solfångaren avsedd att köras vid en driftstemperatur på ca  $80^\circ\text{C}$ , men p.g.a. den starkt reducerade spegelytan och systemets höga förlustkoefficient,  $6.7 \text{ W/K}$ , så arbetade solfångaren med en kondensortemperatur endast  $25 \pm 2^\circ \text{C}$  över omgivningstemperaturen. Systemets värmekapacitivitet uppgick till  $23 \text{ kJ/K}$ , avsevärt högre än vad som är fallet i en större solfångaranläggning med samma principlösning.

För att reducera effekten av den höga värmekapaciteten konstanthölls systemtemperaturen exkl. kondensorn  $3 \pm 1^\circ$  under kondensortemperaturen med ett värmeband. Vid drift av solfångaren steg temperaturen i absorbatoren till ca  $3^\circ\text{C}$  över kondensortemperaturen innan något effektuttag kunde noteras. Vid optimala instrålningsförhållanden låg absorbatortemperaturen  $8 - 10^\circ\text{C}$  över kyltemperaturen. Den höga temperaturdifferensen berodde dels på det låga drivande trycket för ångtransporten vid de aktuella temperaturerna, men framförallt på värmemotståndet på kondensorns kalla sida.

Mätningar av temperaturen i absorbatorsystemet gjordes med en digital termometer med en felvisning på  $\pm 0.4^\circ\text{C}$ . Observera att temperaturen på själva absorbatorytan inte uppmättes annat än vid ett par kontroller. Absorbatorytans medeltemperatur uppskattas inte överstiga den kontinuerligt uppmätta med mer än  $3^\circ\text{C}$ .

Mätdata avseende strålning och utetemperatur har erhållits från SMHI:s mätstation på KTH i Stockholm, belägen ca  $500 \text{ m}$  från solfångaren. Då de kortaste mätintervallen varit en timma, så har inte detta avstånd ansetts ha någon inverkan på mätresultatet annat än möjligen för enstaka timmar med en låg andel direkt solinstrålning och med växlande molnighet. För månadsmedelvärden och verkningsgradskurvor anses denna diskrepans betydelslös.



## 4.3 Resultat

### 4.3.1 Fokusering

Mekaniken arbetar steglöst och inställningsnoggrannheten av spegeln beror på givare och styrelektronik. Strålningsgivarna utformades för att minimera vinkelkänsligheten. Vid några tillfällen måste känsligheten korrigeras manuellt. Givarna registrerar även den diffusa strålningen och vid en hög diffus instrålning kan de ge signal trots att solen inte lyser, eller lyser mycket svagt. F.ö. har fokuseringen fungerat väl. Ett problem som börjat visa sig är att de enskilda reflektorelementen p.g.a. egentygnden glidit något relativt varandra så att fokus hamnar något olika på absorbatorröret beroende på om det är mitt- eller ytterelementen. Mätresultaten tyder dock inte på att det har haft någon större inverkan på verkningsgraden.

### 4.3.2 Försmutsning

Utomlands har försmutsningen visat sig vara ett stort problem för parabolerna. De solfångare som provats av Vattenfall i Älvkarleby har inte uppvisat någon påtaglig verkningsgradsreduktion p.g.a. smuts.

Den här aktuella solfångaren rengjordes efter exponering utomhus i ett halvår. Någon förändring av verkningsgraden noterades ej (<2%). Däremot kunde det visuellt observeras att rengöringen, som efter en kraftig spolning med kranvatten under några minuter avslutades med torkning med en fönsterskrapa, avlägsnade en mindre mängd smuts. Solfångaren som monterats på ett tak strax utanför Stockholms innerstad, uppvisade detta goda resultat huvudsakligen genom att den vändes upp och ned när den inte var i drift.

Förutom partikelbeläggning vid torr väderlek så är regn i storstadsmiljö ofta försmutsande genom att de tvättar ur atmosfären. Hårda långvarigare regn kan dock ha en renande effekt. Solfångaren utsattes inte för regn.

### 4.3.3 Åldring

Spegelytor är ett kritiskt kapitel när det gäller koncentrerande solfångare. Den här aktuella spegeln har varit utomhus för kort tid för att några speciella ålderssymptom ska ha börjat uppträda. Samma typ av aluminiumbelagd plastfolie har fritt exponerats för väder och vind under fyra år i Jämtland. Tidvis har den varit vattendränkt. Visuellt kan endast en obetydlig korrosion och delaminering noteras på den. Skadorna täcker uppskattningsvis mindre än en promille av den totala spegelytan. Man får dock komma ihåg att det lokala korrosionsklimatet är av största betydelse. Ett västkustklimat med en hög halt luftföroreningar kan påverka detta material betydligt mera negativt.

#### 4.3.4 Absorbatorsystem

Heat-pipeprincipen har visat sig väl tillämpbar för absorbatorrör under de aktuella driftförhållandena. Den totala rörlängden inklusive kondensorn uppgår till ca 9 m. Då systemet arbetat med undertryck har det varit av största vikt att eliminera otätheter. Lödningarna har gjorts med omsorg. Vid energimätaren har dock limning använts vid några skarvar. Det visade sig uppstå några mindre läckor som efter ett tidsödande arbete kunde tätas. En enkel vakuumpump har via en vakuutät ventil varit kopplad till kondensorn för att kunna suga ut restgaser vid behov. Den har använts ungefär varannan vecka då absorbatortemperaturen stigit ca 3° C över det optimala värdet, p.g.a. icke kondenserbara gaser i systemet som höjt arbetstrycket. Sådana gaser kan förutom genom läckor också uppstå genom korrosion och andra nedbrytningsprocesser i systemet.

Försök gjordes med en förhöjd absorbatortemperatur på ca 50° C. Det visade sig att temperaturdifferensen mellan absorbator och kylkrets då minskade från 7° till 4°. Huvuddelen av den återstående temperaturdifferensen härrör från den relativt låga värmeöverföringskoefficienten på kondensorns kalla sida.

#### 4.3.5 Verkningsgrad

Varje timme på dagen har behandlats separat så att inverkan från infallsvinkeln har kunnat studeras. Den verkningsgradsekvation som använts ser ut som följer:

$$n = n_0(h) - F'U_L(T_a - T_o)/(I + 2.5D/CR) \quad (4.1)$$

$$n_0(h) = n_0(90^\circ) \cos(i)sk(i) \quad (4.2)$$

sk(i) är skuggningsfaktorn vid olika infallsvinklar. Det är diverse ställningsrör, motvikter m.m. som sänker den från 1 till extremfallet 0.80 (45° infallsvinkel och låg solhöjd).

$n_0(90^\circ)$  är nollförlustverkningsgraden vid vinkelrätt infall.

i infallsvinkeln har beräknats utifrån formler för solens läge samt med tidsekvationen. Den intresserade hänvisas till (9).

Faktorn 2.5 i 4.1 har använts för att korrelera absorbatorlängden till den effektiva spegelytan.

CR = 10.6 (räknat på hela öppningsbredden)

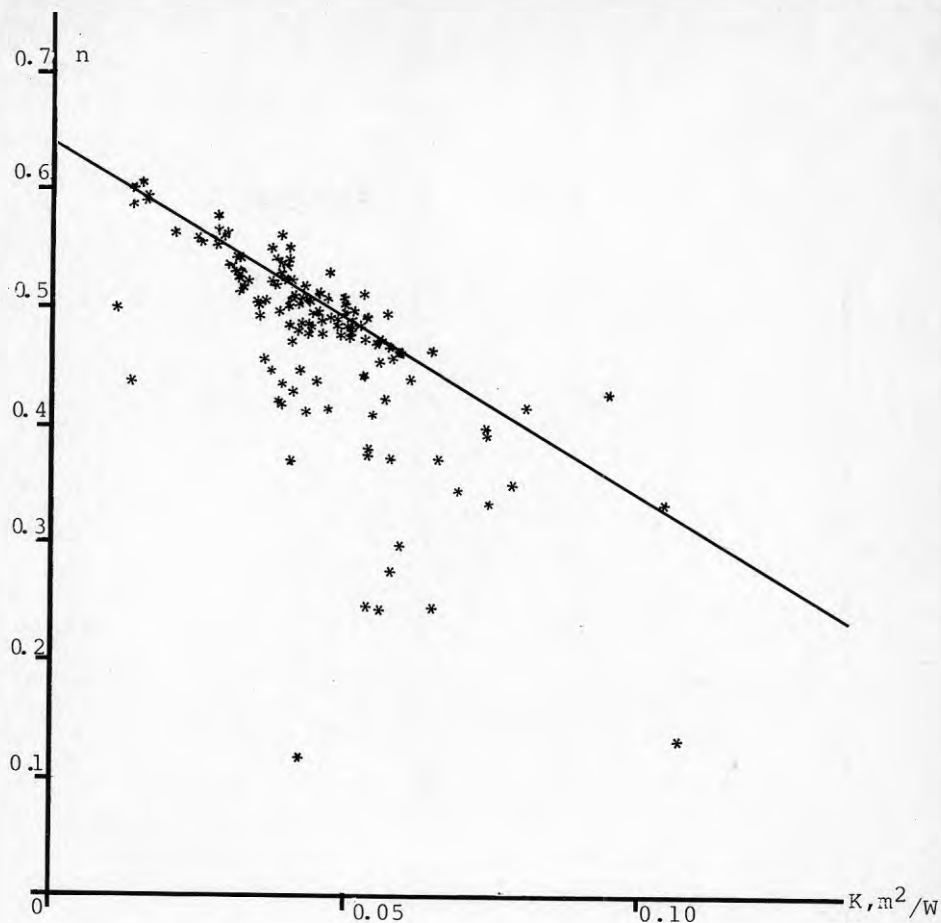


Fig. 6. Verkningsgraden hos solfångaren för en instrålningsgeometri som svarar mot tiden 12 - 13 den 1/10. Värdena är korrigerade m.a.p. bidraget från den diffusa instrålningen (se 4.1).  $F'U_L$  har beräknats genom linjär regression och bestämts till  $3.0 \text{ W/m}^2, \text{K}$  (räknat på den aktiva delen av spegeln- för en fullt utnyttjad spegel blir värdet  $1.2 \text{ W/m}^2, \text{K}$ ). Observera att endast timmar med fullständig sol har använts vid beräkningen av linjen i fig.

Tabell 4.1 Medelvärden sep- nov 86 för olika timmar

	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15
$n_0^*$	0.37	0.52	0.62	0.54	0.55	0.39
$n_0^{**}$	0.40	0.53	0.63	0.64	0.55	0.42
$\Delta T, K$	26.4	28.1	30.9	30.7	31.5	28.9
$n_{sep}$	0.25 (0.95)	0.39 (0.96)	0.52 (0.98)	0.53 (0.97)	0.43 (0.96)	0.28 (0.96)
$n_{okt}$	0.19 (0.93)	0.33 (0.87)	0.45 (0.92)	0.47 (0.93)	0.38 (0.94)	0.23 (0.89)
$n_{nov}$	-	0.31 (0.92)	0.43 (0.97)	0.45 (0.99)	0.34 (0.93)	0.15 (0.94)

$$U_L = 3.0 \text{ W/m}^2, K$$

\*  $n_0$  har beräknats ur verkningsgradskurvor liknande den i fig.6.

\*\*  $n_0$  har beräknats teoretiskt med korrektion för infallsvinklar och skuggning. Som utgångsvärde har ett  $n_0 = 0.67$  använts för vinkelrätt infall mot spegeln.

Värdena i tab. är korrigerade m.a.p. under månaderna ändrade infallsvinklar.

Värden inom ( ) anger hur stor del av det teoretiskt möjliga utbytet som uppnåtts. De lägre värdena under oktober beror huvudsakligen på ett större antal timmar med en liten andel sol. Förutom transientförluster har då även den tid det tagit för automatiken att ställa in solfångaren spelat in.

För en välkonstruerad något större solfångare kan  $F'U_L$  variera från 0.5 till 0.8  $\text{W/m}^2, K$  vid driftstemperaturer från 50° till 200°C. Bortsett från transienta förlopp så svarar den aktuella driften då mot en driftstemperatur ca 150°C ! över omgivningstemperaturen. Med den aktuella värmekapaciteten 10  $\text{kJ/m}^2, K$  och ett temperaturgap på mellan 6° och 12°C mellan drift-och vilotemperatur (solfångaren varmhölls 3° under kondensortemperaturen), så innebär det att den välkonstruerade solfångarens värmekapacitet hamnar i området 0.4 - 0.8  $\text{kJ/m}^2, K$ . Ett kapacitetsvärde för en heat-pipeabsorbator bör hamna någonstans där, vid samma CR och rördimension. I praktiken så svarar alltså driftsbetingelserna för experimentanläggningen mot en drift vid ca 150°C för en större välkonstruerad solfångare med samma geometri.

## 4.3.5 Circumsolarstrålningens inverkan

Med utgångspunkt från fig.3 så finner man att med ett fokuseringsfel på  $1^\circ$  så utnyttjas den med pyrheliometer uppmätta circumsolarstrålningen till ca 75%. Det innebär att med en circumsolarstrålning som uppgår till 30% av strålningen från solskivan, så blir den optiska verkningsgraden  $0.94 n_0$ . En perfekt fokusering ger motsvarande värde  $0.98 n_0$ . Cirrustäcket är då relativt kraftigt. Man kan alltså förvänta sig att finna ett mätbart samband för den här aktuella solfångaren som visar på cirrustäckets inverkan. Nu saknades utrustning för att mäta circumsolarstrålningen. För att ändå kunna få en indikation om sambandet på empirisk väg, så har timverkningsgrader för olika kvoter mellan I och D satts in i ett diagram (fig 7). Varje timvärde har dividerats med det värde som erhålls vid skärningspunkten med linjen i fig.5 för samma värde på x-axeln.

Med logaritmisk regression har den heldragna linjen konstruerats. Den streckade kurvan är ett uppskattat genomsnittligt samband som bygger på avsnitt 3.1. Den lodräta linjen markerar en för året 1985 för Stockholm beräknad genomsnittlig kvot I/D under registrerad solskenstid.

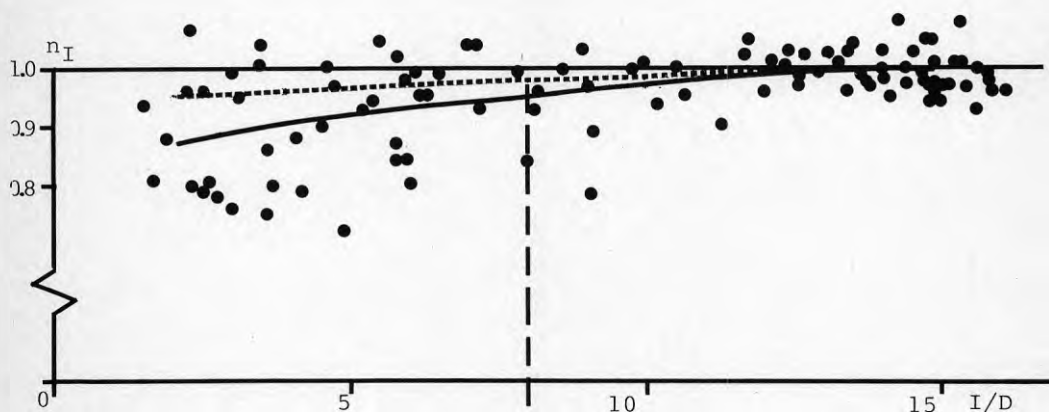


Fig.7 Diagram över verkningsgradens beroende av kvoten I/D.

Det är dock viktigt att komma ihåg att fig. endast ev. visar en indikation på ett relativt kraftigt samband. Solfångarens respons för den diffusa instrålningen kan ha överskattats vilket bör ge en motsvarande effekt. Likaså kan fokuseringen ha fungerat sämre vid lägre värden på direktinstrålningen (lägre kvotförhållande). Författaren anser att ytterligare forskning bör kartlägga circumsolarstrålningens inverkan dels vad gäller den del som registreras som direkt strålning, dels vad gäller den del som registreras som diffus och som kan anses sträcka sig ett tiotal grader från sjäva solskivan.

## 5 EN SYSTEMSIMULERING

## 5.1 Förutsättningar

Resultat från beskrivna laboriemätningar bedömdes som så gynnsamma att en datorsimulering för solfångare i ett större fält har gjorts. Där har fyra speglar monterats samman till en större modul om ca 40 m<sup>2</sup>. Vidare vrids speglarna med öst-västlig solföljning (se fig.8).

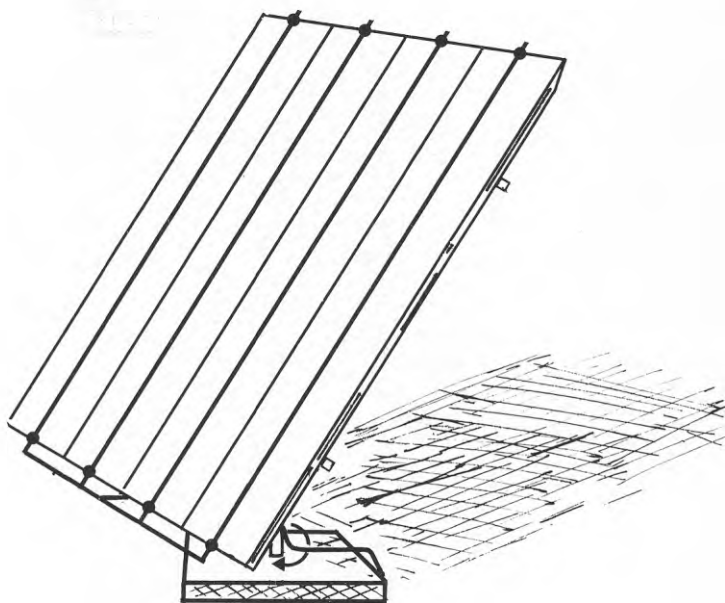


Fig.8 Solfångarmodul som använts vid datorsimulering.

Anledningen till detta är tre:

- Högre strålningsutnyttjande p.g.a. anläggningsgeometrin.
- Högre fokuseringsnoggrannhet.
- Kraftigt reducerade tidsförluster från ett defokuserat till ett fokuserat läge.



För jämförelsens skull har en anläggning med ett solfångarutförande som experimentanläggningen, med en horisontell öst-västlig absorbatör, och en anläggning uppbyggd som den tidigare Ingelstadsanläggningen också simulerats i programmet. Dessutom har en plan yta med  $40^\circ$  lutning medtagits.

Simuleringen har endast gjorts m.a.p. den mängd direkt solstrålning absorbatörerna tar emot under ett år vid de olika systemutförandena. Termiska effekter har alltså inte lagts in i programmet.

Erhållna värden gäller för latituden  $50^\circ$ . Värdena är endast relativa, men bör kunna multipliceras med årsmedelvärden på den totala direkta instrålningen för orter i mellansverige (med lämpliga horisontavskärmningsfaktorer - se fig.1) för att ge den tillgängliga direkta strålningsenergin.

Anläggningarna har antagits ha "oändlig" utsträckning och horisontavskärmningen har satts till  $4^\circ$ . Det innebär att den tillgängliga strålningen relateras till all direkt instrålning vid solhöjder över  $0^\circ$ , men att solfångarfältet inte belyses förrän vid solhöjden  $4^\circ$ . För beräkning av strålningen under året har samband från avsnitt 2.1 använts.

Någon hänsyn har inte tagits till circumsolarstrålning eller övrig diffus instrålning.

Tillgängligheten har studerats för några olika marktäckningsgrader.

Följande verkningsgradssamband har använts:

$$n_{tg} = n_0 \cos(i) (1 - 0.2(1/\cos(i) - 1))(skg - ls) \quad (5.1)$$

$n_{tg}$  är den del av den direkta strålningen som upptas av absorbatören vid optimal fokusering.

$skg$  är skuggfaktorn som anger den del av strålningen som inte skuggas bort av närliggande solfångare.

$ls$  är kantförlustfaktorn som anger hur stor del av den strålning som reflekteras från spegeln som inte träffar absorbatören.

system (1): Ny modulkonstruktion  
 ö-v rot. Fast lutning mot horisontalplan:  $50^\circ$   
 $ls = 0.1 \tan(i) - 0.03$ , om  $ls < 0$  så är  $ls = 0$

system (2) Ingelstadsmodellen  
 ö-v rot. n-s rotationsaxel med lutningen  $40^\circ$   
 Axelavstånd i samma rad:  $1.44 \times$  spegelbredden  
 $ls = 0.1 \tan(i)$

system (3): Experimentanläggningsmodellen  
 n-s vridn. Ö-v rotationsaxel, horisontell  
 $l_s = 0.01$

system (4): Plan södervänd  
 fast Lutning  $40^\circ$  mot horisontalplanet  
 $l_s = 0.01$   
 Faktorn 0.2 i (5.1) ersatt med 0.1 (lägre  
 beroende av infallsvinkeln)

Samtliga system har ett  $n_0 = 0.75$ .

Resultatet är åskådliggjort i fig.9.

## 5.2 Resultat

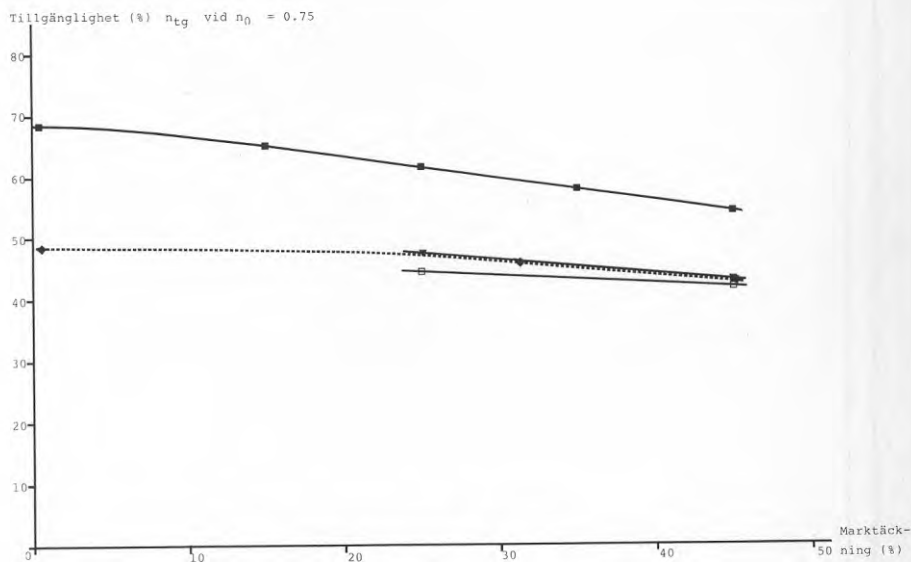


Fig.9 Beräknad tillgänglighet av den årliga mängden direkt instrålning mot en solföljande yta på  $50^\circ$  latitud för solfångarfält avsatt mot solfångarnas marktäckningsgrad (öppningsyta/markyta). Se avsnitt 5.1 för förutsättningar. OBS! Multiplicera med  $n_0/0.75$  för andra  $n_0$ -värden.

- System (1) Öst-västlig rotation runt vertikal axel. Solfångarlutning mot horisontalplan:  $50^\circ$ .
- ◆ System (2) Ingelstadsmodellen.  $40^\circ$  lutning.
- ▼ System (3) Experimentmodellen. Horisontell öst-västlig absorbatör.
- System (4) Plan solfångare.  $40^\circ$  lutning.



Det visar sig att det är en markant skillnad mellan tillgängligheten av direkt strålning för system (1) och för övriga system. Det beror framförallt på två saker:

- En låg skuggningsgrad från omkringliggande solfångare.
- En hög cosinusfaktor i (5.1).

En annan intressant iakttagelse är att de bägge andra systemen som bygger på paraboliska solfångare ligger väldigt lika och att tillgängligheten relativt en plan solfångare endast ligger 5 - 10% högre.

Räknat på en årsinstrålning på 1000 kWh direkt solljus och en marktäckningsgrad på 30%, så innebär det att:

System (1) tillgodogör sig 600 kWh.

System (2) och system (3) tillgodogör sig 450 kWh.

System (4) tillgodogör sig 430 kWh.

## 5 PRESTANDA OCH KOSTNADER

## 5.1 Optiska prestanda

Med dagens teknik är följande värden på de optiska parametrarna att se som optimala vid en serieproduktion:

$$\alpha = 0.97 \quad \text{med ett } \epsilon = 0.15$$

$$\tau = 0.97$$

$$\rho = 0.95$$

Vid CR = 10 och med en hög precision vid tillverkningen kan  $n_G$ , den geometriska förlustfaktorn vid vinkelrätt infall, sättas till 0.98.

Verkningsgraden avseende den uppmätta direkta instrålningen och den del av den som är möjlig att utnyttja,  $n_I$ , kan vid en fokuseringsnoggrannhet på  $\pm 0.2^\circ$  sättas till 0.99 (uppskattat optimalt värde).

$n_{SM}$  - försmutsningsverkningsgraden kan med utgångspunkt från experimentanläggningen sättas till 0.98 för en dynamisk jämviktssituation i ett lokalklimat med låg atmosfärisk partikelhalt och frekventa regn.

$$n_0 = n_G n_I n_{SM} F' \tau \alpha \rho \quad (6.1)$$

$F'$  kan sättas = 1.

Ovanstående värden på de optiska parametrarna ger då ett maximalt värde på  $n_0$  vid drift på:

$$n_0 = 0.85$$

Flera faktorer bidrar dock till att pressa  $n_0$  nedåt. Aldring av det speglade metalliska skiktet. Aldring av det transmittanta täckskiktet med ökad absorption och ljusspridning som följd. Svårigheter att hålla en jämn hög kvalitet vid tillverkningen av ytorna. Kostnader vid produktionen. Brister i fokuseringen av speglarna. Lägre faktiska värden på  $n_I$ , beroende dels på fokuseringsnoggrannheten, dels på en större andel circumsolarstrålning och dels på en större ljusspridning från spegeln.

Används aluminiumbelagda speglar istället för försilvrade, något som kan förbättra korrosionshårdigheten, så minskar  $\rho$  med ned mot 10%-enheter.

Det är således flera osäkerhetsfaktorer som spelar in när en verklig optisk verkningsgrad ska förutsägas för en anläggning som ska vara i drift 10 - 20 år. Av den största betydelsen för det verkliga  $n_0$  vid längre drift är korrosionshårdigheten hos speglarna (se vidare avsnitt 6.3). Följande värden kan dock ansättas som överslagsmässiga riktvärden tills mer data framkommer över de olika materialens åldringsbeständighet och för de olika verkningsgradsparametrarna.

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.95 \\ \tau &= 0.96 \\ \rho &= 0.90 \\ n_g &= 0.97 \\ n_I &= 0.97 \\ n_{sm} &= 0.97\end{aligned}$$

Resultterande  $n_0$  blir 0.75

## 5.2 Termiska prestanda

Vid CR-värden omkring 10 så hamnar solfångarnas  $U_L$ -värde mellan 0.45 och 0.55 W/m<sup>2</sup>,K för en väl genomförd absorbatorkonstruktion, utan att mellanrummet mellan absorbatör- och glaströr är evakuerat. Räknet på ett helt system så kan värdet ligga mellan 0.65 och 0.85 W/m<sup>2</sup>,K.

För att undersöka uppvärmningsförloppens inverkan på utbytet har en översiktlig studie gjorts för 1985 för en systemkapacitet på 800 J/m<sup>2</sup>,K. Instrålningsdata för Stockholm har använts. Absorbatortemperaturen har satts till 80°C. Transientverkningsgraden  $n_{tr}$  blev då 0.96. Den låga värmekapaciteten gör att även kortare solperioder kan utnyttjas och att uppstartningstiderna blir mycket korta. Följande ekvation beskriver det årliga energiutbytet från ett solfångarsystem:

$$Q_{ut} = n_{tr} n_0 n_{tg} I / 0.75^* - U_L (\overline{T_a - T_o}) t_s \quad (5.2)$$

där  $n_{tg}$  är tillgängligheten enligt fig.9.

$I$  är den årliga totala direkta instrålningen mot en solföljande yta.

$t_s$  är drifttiden i timmar/1000. Solfångarnas drifttid kan approximativt sättas = 0.95\* solskenstiden som mätts upp för orten.

(5.2) har använts för att beräkna  $Q_{ut}$  för system (1) för ett stockholmskt medelår med  $I = 1100$  kWh/m<sup>2</sup>,år.  $\overline{T_a - T_o}$  har satts till 70°C.  $U_L$  till 0.7 W/m<sup>2</sup>,K och värmekapaciteten  $c_c$  till 800 J/m<sup>2</sup>,K.  $Q_{ut}$  blir då

$$Q_{ut} = 565 \text{ kWh/m}^2, \text{år} \quad , \text{vid en marktäckningsgrad på 25\%}.$$

Detta är ett mycket högt värde jämfört med andra typer av solfångare som provats under motsvarande förhållanden. Det visar också att det svenska instrålningsklimatet är intressant för relativt högkoncentrerande solfångare.

\*Observera att kurvorna i fig.9 är konstruerade med ett antaget värde på  $n_0 = 0.75$  och att detta måste elimineras i (5.2).

### 6.3 Hållbarhet

Det är särskilt en komponent i de koncentrerande paraboliska solfångarna som är kritisk vad det gäller livslängden och det är spegeln. Från framförallt Amerika kommer data om åldringsskador på solspeglar efter en tids drift. En relativt omfattande forskning har lagts ned på att förbättra hållbarheten med målsättningen att få fram speglar med en ekonomisk livslängd på 20 år. De speglar som har varit särskilt ingående studerade är försilvrade glasspeglar, framförallt på grund av silvrets höga reflektionskoefficient, ca 0.95. Silver-speglarna har varit särskilt utsatta för korrosionsangrepp. På marknaden har nu även försilvrade plastmaterial för solfångarbruk börjat visa sig. Det återstår dock att se hur dessa material stoppar under längre perioder.

Förutom silver så är aluminium ett intressant högre-flekterande material med en optimal reflektion på ca 90%. I praktiken blir dock reflektionen någon procentenhet lägre. Såväl glas som plast har aluminiumbelagts och använts som speglar. Aluminium kan även användas i form av anodiserad elektrolytiskt polerad plåt där ett tunt transmittant oxidskikt skyddar den underliggande metallen från korrosionsangrepp. Aluminium uppvisar allmänt bättre beständighet än silver och kan ge speglar som svarar mot kravet på 20 års livslängd.

Rostfri blankglödgad stålplåt är ett material med en god åldringsbeständighet, men med en lägre reflektionskoefficient än för silver och aluminium, 0.60 - 0.65.

De svenska förhållandena är dock relativt annorlunda än för de miljöer där solspeglar vanligen provats. Lägre temperaturer och vindstyrkor, renare luft och mindre sol! är faktorer som gynnsamt bidrar till att öka livslängden för spegelytor. De svenska erfarenheterna av olika material är dock mycket begränsade och en mer omfattande utvärdering av olika material, både genom fält- och laboratorieprov, bör göras. De erfarenheter som finns är dock positiva: Försilvrade glasspeglar uppvisar efter fem år utomhus en försumbar reduktion av den direkta reflektionen. En aluminiumbelagd plastfolie uppvisar efter fyra års hård miljöexponering i östra Jämtland endast obetydliga visuella skador. Rostfria viltspeglar efter de svenska vägarna syns klara miljöpåfrestningarna relativt väl.

Övriga solfångarkomponenter som absorbatorrör, glasrör, reglermekanik och styrelektronik är inte kritiska och kan med en genomtänkt tillverkningsfilosofi väl klara ett krav på en 20-årig livslängd, möjligen med något enstaka byte av någon särskilt påkänd komponent.

#### 6.4 Kostnader

En preliminär kalkyl avseende anläggningskostnaden för ett större solfångarfält med en systemlösning som svarar mot den för system(1) i kap.5 har gjorts. Resultatet bör inte ses som annat än en indikation på ungefär var den verkliga kostnadsnivån kan hamna. Materialpriser mars 1987 har använts. Den svåraste biten att beräkna är tillverkningstiden vid de olika momenten och här har en överslagsmässig behandling gjorts med utgångspunkt från tillverkningstider för den i kap.4 beskrivna experimentsolfångaren och med de tillverkningstider som kan anses genomsnittliga för motsvarande moment inom verkstads- och byggnadsindustrin. Dessutom har en del kostnadsdata för andra solfångaranläggningar tagits med i bedömningen.

Förutsättningarna som gällt är följande:

Årlig tillverkningsvolym : 5-7000 m<sup>2</sup> solfångare

Storlek på solfångarfält : 2000 m<sup>2</sup>

Ett avkastningskrav på 20% på satsat kapital.

12.85% byggoms.

Markkostnader ingår ej.

Marktäckningsgrad 30%

Kostnad inkl. värmeväxlare mellan solfångarfält och yttre värmekrets.

Bruttokostnad : 1500 - 1700 kr/m<sup>2</sup>

Vid mycket stora produktionsvolymerna, omkring 50 000 m<sup>2</sup> per år, så beräknas den undre kostnaden för motsvarande solfångarfält att bli 1200 kr/m<sup>2</sup>. FoU rörande nya konstruktioner och nya material kan sänka denna kostnad, men författaren gör bedömningen att gränskostnaden för ett solfångarfält med linjära paraboliska solfångare kommer att hamna 20-30 % över motsvarande kostnad för högeffektiva plana solfångare. Det ska vägas mot ett 50 - 80% högre energiutnyttjande vid driftstemperaturer mellan 70° och 80°C och ännu högre vid högre driftstemperaturer.

## REFERENSER

1. Josefsson, W., En relation mellan diffus solstrål-  
solstrålning och globalstrålning för Stockholm,  
R138:1981, Byggeforskningsrådet (1981).
2. Larsson, M., Karlsson, B., Brunström, C., The Depen-  
dence of the Efficiency of a Solar Collector on  
the Absorption of Diffuse Radiation in a Cloudy  
Climate, Vattenfall(Älvkarleby) (1983).
3. Neidlinger, H., Schissel, P., Polymer Glazings for  
Silver Mirrors, Solar Energy Materials 14, 327-329  
(1985).
4. Brunström, C., Karlsson, B., Larsson, M., Climatic  
Limitations and Collector Performance in the middle  
of Sweden, UL-FUD-B 86:19, Vattenfall(Älvkarleby)(1986).
5. Persson, J., Ingelstads paraboliska solfångare,  
UL-FUD-B 84:18, Vattenfall(Älvkarleby)(1983).
6. Perers, P., Roseen, R., Solvärmecentralen i Studsvik  
Resultat 1980, R59:1981, Byggeforskningsrådet (1981).
7. Luthman, K., Koncentrerande solfångare i plastkupol,  
Studsvik Report EI-83/150 (1984).
8. Perers, B., Holst, P., The Södertörn Solar District  
Heating Test Plant - Results 1982-1985, Studsvik  
Report 87/1 (1987).
9. Perers, B., Zinko, H., Holst, P., Analytical model for  
the daily energy input/output relationship for solar  
collector systems, Dokument D11:1985, Byggeforsknings-  
rådet (1985).
10. Kreider, J.F., Kreith, F., Solar Energy Handbook,  
McGraw-Hill, Inc.(1981).
11. Jilar, T., Solvärmeteknik i stor skala; Ingelstad-  
en värmecentral utan värmepump, R103:1984, Byggeforsk-  
ningsrådet (1984).
12. Ransmark, S-E., Solfångares prestanda i områden med  
växlande molnighet, R200:1984, Byggeforskningsrådet(1984).
13. SMHI, Instrålningsdata för Stockholm (1983-1986).
14. Wilson, G., Svensson, L., Karlsson, B., The Long  
Ground-Based Flat-Plate(LGB)Collector, UL-FUD-B-85:28  
Vattenfall (1985).
15. Bauman et.al, Polymers and Mirror Materials, Am.Chem.  
Soc.220 (1983).
16. Thomalla, E., Köpke, P., Müller, H., Quenzel, H.,  
Circumsolar radiation calculated for various atmo-  
spheric conditions, Solar Energy, Vol.30, 557-587(1983).
17. Welford, W.T., Winston, R., The optics of nonimaging  
concentrators, Academic Press (1978).
18. Kreider, F., Medium and high temperature solar  
processes, Academic Press (1979).

19. Sayigh, A.A.M., Solar Energy Engineering, Academic Press (1977).
20. Deffenbaugh, D.M., Green, S.T., Svedeman, S.J., (art. ang. dammdegradation), Solar Energy vol.36 139-146, Pergamon Press (1986).
21. Bhowmik, N.C., Mullick, S.C., Calculation of tubular absorber heat loss factor, Solar Energy vol.35 219-225 (1985).











**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840204-6  
från Statens råd för byggnadsforskning till MAKO Komposit,  
Stockholm.**

**R87: 1987**

**ISBN 91-540-4790-0**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6707087**

**Abonnemangsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang**

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

**Cirkapris: 33 kr exkl moms**