



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**

**R200:1984**

**Solfångares prestanda i områden  
med växlande molnighet**

**Sven-Erik Ransmark**

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	
Plac	Ser

*K  
A111*

**Bygghforskningsrådet**

R200:1984

SOLFANGARES PRESTANDA I OMRADEN  
MED VÄXLANDE MOLNIGHET

Sven-Erik Ransmark

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821229-5  
från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen  
för värme- och kraftteknik, Lunds tekniska högskola, Lund.

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

R200:1984

ISBN 91-540-4302-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck Stockholm 1984



<u>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</u>		Sida
	FÖRORD	ii
	NOMENKLATUR	iii
1	METODDISKUSSION	1
1.1	Tidigare forskningsresultat	1
1.2	Metodik vid hänsynstagande till solfångarens transienter	4
2	SOLSTRALNINGENS INTENSITET	7
3	UTEMPERATUR VID KLART RESPEKTIVE MULET VÄDER	10
4	SOL- OCH MOLNPERIODER I LUND	13
5	SOLVÄRMEANLÄGGNINGENS TRANSIENTEGENSKAPER	23
5.1	Vid uppvärmningsfasen	23
5.1.1	Sammanställning av analytiska uttryck för temperatur- och energitillskott i solfångare	24
5.2	Vid avsvältningsfasen	30
5.2.1	Analytiska uttryck för temperatur- och energiändringen i solfångaren	30
5.3	Vid omväxlande uppvärmning och avsvältning	31
5.3.1	Temperaturförlopp i solfångare enligt analytiska uttryck	31
5.3.2	Beräkning av temperaturförlopp, uttagbar energi och transientverkningsgrad enligt numerisk metod	33
5.3.2.1	Vid fasta sol/molnintervall	33
5.3.2.2	Vid varierande sol/molnintervall	53
5.3.3	Energitillskott och verkningsgrad enligt mätningar	59
6	SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL YTTRELLIGARE STUDIER	64
7	SAMMANFATTNING	65
8	LITTERATURFÖRTECKNING/REFERENSLISTA	67
	Bilaga 1 - 14	71

## FÖRORD

Denna rapport har tillkommit med ekonomiskt stöd från Statens Råd för Byggnadsforskning och utgör en sammanfattning av min avhandling med titeln "Solvärmeanläggningars prestanda i områden med växlande molnighet" [31].

## NOMENKLATUR

A	area	$m^2$
A	konstant i ekvation 3.1-5	dagar
a	konstant i ekvation 2.4	-
a	konstant i ekvation 2.11	$m^{-1}$
B	konstant i ekvation 3.1-5	dagar
b	konstant i ekvation 2.4	-
$C_c$	sol fångarens värmekapacitet hänförd till en punkt i absorbatoren	$J/(m^2K)$
$C_p$	isobar värmekapacitet	$J/(kg K)$
e	nat. logaritmbas	-
EXP( )	$= e^{( )}$	-
F	(i datorskrift) = $\nu$ , frekvens	-/dag
F'	sol fångarens effektivitetsfaktor	-
F''	sol fångarens flödesfaktor	-
$F_R$	sol fångarens värmeomvandlingsfaktor	-
G	massflöde per $m^2$ sol fångare	$kg/(m^2s)$
H	höjd över havet	m
h	värmeövergångskoefficient	$W/(m^2K)$
h	solhöjd över horisonten	grader
$I_{DN}$	direktstrålning mot yta vinkelrät mot strålningsriktningen	$W/m^2$
$I_{dL_K}$	diffus instrålning mot lutande yta vid klar himmel	$W/m^2$
$I_{sc}$	solkonstanten = extraterresta direktstrålningen vid medelsolavstånd	$W/m^2$
$I_T$	total instrålning mot lutande yta	$W/m^2$
k	koefficient i ekvation 4.1-15	-
m	massa	kg
m	relativ atmosfärtjocklek	-
$\dot{m}$	massflöde	kg/s
$n_D$	dagnummer från årets början	
n	exponent i ekvation 4.1	-
Q	energi	J, kWh
$\dot{Q}$	effekt	J/s, W, kW
q	energi per $m^2$ sol fångare	$J/m^2$
$q_L$	förlustenergi per $m^2$ sol fångare	$J/m^2$
$q_L^Z$	förlustenergi per $m^2$ sol fångare när massan $C_c=0$	$J/m^2$
$\dot{q}$	effekt per $m^2$	$W/m^2$

$Q_u$	användbar energi från en solfångare	J
$Q_u^Z$	användbar energi från en solfångare om massan $C_c=0$	J
$\dot{Q}_u$	användbar effekt från en solfångare	W
$\dot{q}_u$	användbar effekt från en plan solfångare pr $m^2$	$W/m^2$
P	(i datorskrift) = $\lambda$ , periodlängd	minuter
S	absorberad solstrålning mer $m^2$	$W/m^2$
T	temperatur	$^{\circ}C$ , K
$T_a$	omgivningstemperatur	$^{\circ}C$
$\bar{T}_a$	dygnsmedeltemperatur	$^{\circ}C$
$\bar{T}_{aK}$	dygnsmedeltemperatur, klara dagar	$^{\circ}C$
$\bar{T}_{aM}$	dygnsmedeltemperatur mulna dagar	$^{\circ}C$
$T_{aK}$	omgivningstemperatur, klara dagar	$^{\circ}C$
$T_{aM}$	omgivningstemperatur, mulna dagar	$^{\circ}C$
$T_f$	fluidens medeltemperatur	$^{\circ}C$
$T_g$	glastäckningens temperatur	$^{\circ}C$
$T_g^Z$	glastäckningens temperatur om massan $C_c=0$	$^{\circ}C$
$T_i$	fluidens inloppstemperatur	$^{\circ}C$
$T_p$	absorbatorplätens medeltemperatur	$^{\circ}C$
$T_u$	fluidens utloppstemperatur	$^{\circ}C$
t	tid	s
$t_{T_i}$	tiden när temperaturen är $T_i$	s
t	timvinkel	grader
$U_L$	solfångarens värmeförlustkoefficient	$W/(m^2K)$
V	volym	$m^3$
x	konstant i ekvation 2.5	h
y	konstant i ekvation 2.5	h
$\alpha$	absorptionskoefficient (absorberad strålningsandel)	-
$\gamma$	solfångarens lutning mot horisontalplanet	grader
$\delta$	solens deklination	grader
$\eta$	verkningsgrad, effektivitet	-
$\eta_{tr}$	transientverkningsgrad	-
$\rho$	densitet	$kg/m^3$

$\lambda$	periodlängd	minuter
$\lambda_D$	dagens längd	minuter
$\nu$	frekvens	-/dag
$\sigma_m$	sannolikhet för moln	-
$\sigma_s$	sannolikhet för sol	-
$\tau$	tid i timmar från årsskiftet	h
$\tau$	tidskonstant	s
$\tau$	transmissionskoefficient (transmitterad strålningsandel)	-
$\tau_m$	molntid	minuter
$\tau_s$	soltid	minuter
$(\tau\alpha)$	transmissions-absorptionsprodukt	-
$\phi$	latitud	grader





## 1 METODDISKUSSION

## 1.1 Tidigare forskningsresultat

I litteraturen, speciellt den amerikanska, anges att en solfångares massa har negligerbar inverkan på solvärmeanläggningens prestanda. Att så skulle vara fallet förefaller en nordbo underligt. Jag har därför undersökt vilka förutsättningar som gällt när man dragit dessa slutsatser.

Klein et al [16] och Duffie & Beckman [10] använder vid sina transientberäkningar en modell som utvecklats av Close [7]. Close anger att han funnit att en intermitterent instrålning vid simuleringar kan ersättas av en sinuskurva. För att visa detta genomför han beräkningar för två olika instrålningsförhållanden, nämligen

$$I = 200 \sin \pi\theta/12 \quad \text{BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) \quad (1.1)$$

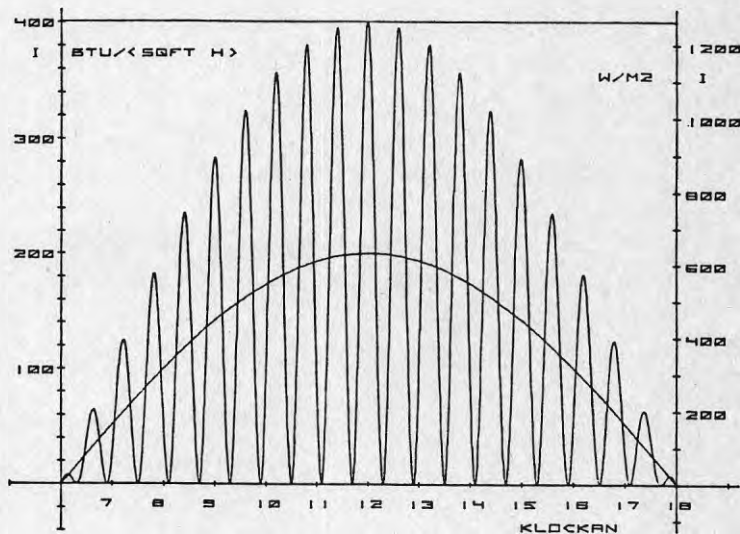
och

$$I = (200 \sin \pi\theta/12)(1 + \cos 40 \pi/12) \quad \text{BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) \quad (1.2)$$

båda ekvationerna givande  $1528 \text{ BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{dag})$ .

$(200 \text{ BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) = 631 \text{ W}/\text{m}^2$ ,  $1528 \text{ BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{dag}) = 4,82 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ dag})$ .)

Dessa båda ekvationer visar jag grafiskt i figur 1.1.



Figur 1.1 Ekvation (1.1) och (1.2).

Close har beräknat systemverkningsgraden för några olika fall och visar att skillnaden vid användandet av de båda instrålningsfunktionerna blir endast ett par procentenheter (till den intermittenta strålningens fördel). När man visuellt blir varse hur instrålningen varierar enligt de båda funktionerna, inser man genast att förhållandet mellan verkningsgraderna beräknade enligt de båda ekvationerna blir starkt beroende av vilken temperaturnivå som gäller, alltså av solfångarens kritiska instrålningseffekt. Skulle denna vara t ex  $600 \text{ W/m}^2$  ger den sinusformade instrålningen ingen effekt medan den intermittenta strålningen har möjlighet att göra detta. Detta gör att Closes slutsats inte är generell användbar.

Utgår man från timmedelvärden på instrålningsintensiteten - vilket är brukligt - ger de båda ekvationerna samma instrålning och följaktligen samma resultat, men detta är inget bevis för metodens riktighet eller användbarhet.

Vid användandet av timmedelvärden, som hela tiden ligger över den kritiska instrålningen, dvs över solfångarens tröskelvärde, blir ändringen av solfångarens temperatur liten - av storleken 1 K per timme (variationer dämpas av fluiden) - varför också ändringen av i solfångaren lagrad energi blir liten. Detta gör att vid ett sådant beräkningssätt den uttagbara energin påverkas endast obetydligt av solfångarens massa. Den energi som lagras när intensiteten ökar, återvinnes dessutom i stort sett när intensiteten avtar. Detta visar sig också i den kalkyl Duffie redovisar som belägg för att transienter skulle ha negligerbar inverkan på den uttagbara energin. Tidssteg på 1 timme är emellertid alldeles för långa vid transientberäkningar för områden med växlande molnighet.

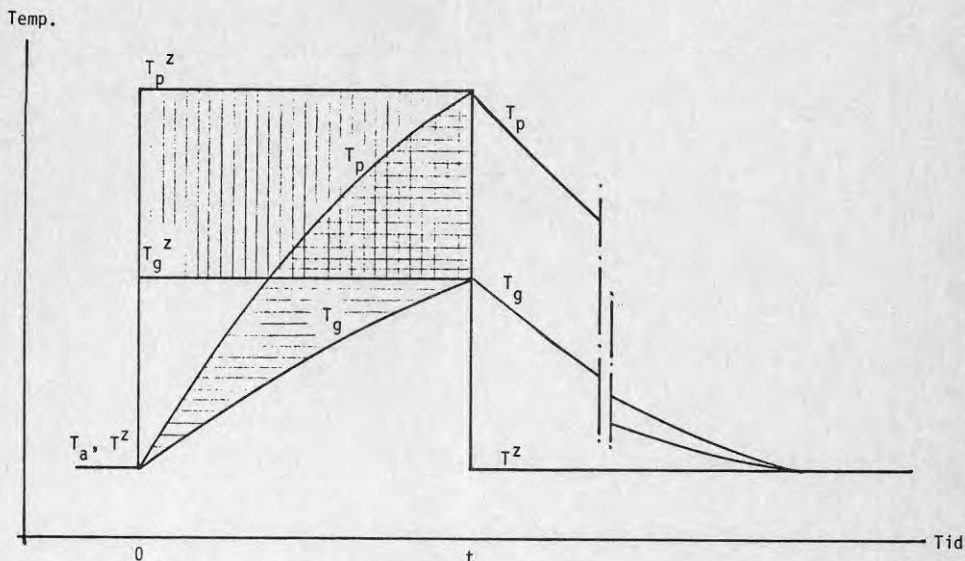
Klein [16] anger transientförlusten till skillnaden mellan förlusten från en solfångare med termisk massa, dvs

$$q_L = \int_0^t \bar{h}(T_p - T_g) dt \quad (1.3)$$

och förlusten från en solfångare utan termisk massa, dvs

$$q_L^Z = \int_0^t \bar{h}(T_p^Z - T_g^Z) dt \quad (1.4)$$

Om man betraktar en sekvens, som startar med att de båda solfångarna har omgivningstemperatur när de utsätts för solbestrålning och som slutar just som solfångaren med termisk massa skulle börja ge effekt, får man ett förlopp som i figur 1.2.



Figur 1.2 Ekvation (1.3) och (1.4)

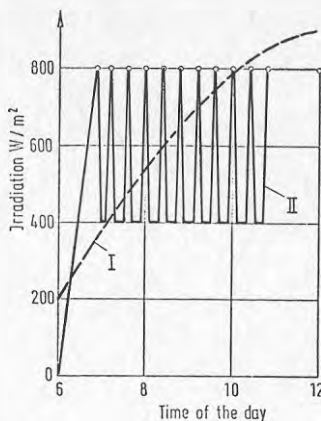
Av figur 1.2 ser man direkt att under den angivna sekvensen förlusten från solfångaren med termisk massa är endast cirka hälften av förlusten från nollkapacitetssolfångaren. Enligt Kleins nomenklatur skulle solfångaren med massa ha lägst transientförlust och således vara bäst. Så är emellertid inte fallet, ty under hela sekvensen har nollkapacitetssolfångaren givit uttagbar effekt medan solfångaren med massa inte givit någon.

Att man bör beakta transienter i solvärmeanläggningar påpekade Hahne [13] 1978. Hans underlag för denna slutsats kan dock diskuteras. Hahne jämför några olika solfångares prestanda vid två olika instrålningsförlopp under dagen - se figur 1.3.

I fall I lyser solen med sinusformad effekt under dagen medan fall II har periodiskt varierande irradians mellan 800 och 400 W/m<sup>2</sup>. I Hahnens exempel värmdes solfångarna upp snabbast i fall II men gav trots detta lägre verkningsgrad än fall I.

Figur 1.3

Olika instrålningsförhållanden enligt Hahne [13].



Eftersom uppvärmningen gick snabbare för fall II än för fall I, måste medeleffekten vid förstnämnda fallet ha varit större än vid det senare - åtminstone fram till dess solfångaren ger uttagbar effekt. Att så också varit fallet framgår av figuren. Figuren visar också, att om man tar hänsyn till instrålningen under hela dagen, blir medelinstrålningen för fall I ca  $650 \text{ W/m}^2$  och för fall II ca  $500 \text{ W/m}^2$ .

Vid en högre instrålningseffekt blir verkningsgraden högre även vid stationära förhållanden om jämförelsen sker vid i övrigt lika förhållanden. Den redovisade lägre verkningsgraden för fall II inrymmer således det sammanlagda inflytandet av lägre instrålningseffekt och varierande instrålningseffekt.

Vid simuleringarna var skillnaden mellan vattnets inloppstemperatur och omgivningens temperatur endast 15 K, ( $35-20^\circ\text{C}$ ). Den lägsta instrålningseffekten,  $400 \text{ W/m}^2$ , i fall II var således större än kollektorns termiska förlusteffekt, vilket medfört att produktionen av uttagbar energi inte avbrutits under simuleringen. Under sådana betingelser är det troligt att den lägre verkningsgraden för fall II mera beror på den lägre instrålningseffekten än på variationer i instrålningseffekt.

## 1.2 Metodik vid hänsynstagande till solfångarens transienter

En sådan beräkningsmetod måste ta hänsyn till hur klimatparametrarna inverkar på solvärmeanläggningens transienter eller hur klimatdynamiken inverkar på solvärmeanläggningens dynamik, samt i

sin tur hur transienterna påverkar den användbara energi som kan tas ut från solfångaren.

Som framgår av avsnitt 1.1 har transientförlusten inte varit ett entydigt definierat begrepp. För att få fram ett praktiskt användbart värde på transienternas inverkan på den från solfångaren uttagbara energin har jag infört begreppet transientverkningsgrad och definierat denna som förhållandet mellan uttagbar energi,  $Q_u$ , och uttagbar energi om solfångaren vore utan massa,  $Q_u^Z$ , dvs

$$\eta_{tr} = \frac{Q_u}{Q_u^Z} \quad (1.5)$$

Med denna definition blir transientförlusten =  $Q_u^Z - Q_u$ .

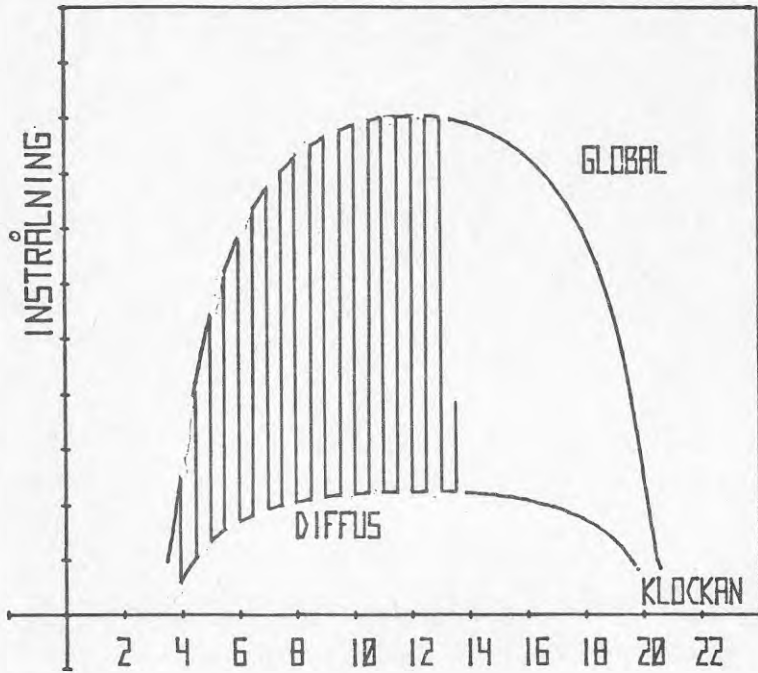
Genom att multiplicera den på vanligt sätt beräknade uttagbara energin från en solfångare under stationära förhållanden,  $Q_u$ , med transientverkningsgraden erhålles den uttagbara energin under transienta förhållanden, dvs

$$Q_{u_{tr}} = \eta_{tr} Q_u \quad (1.6)$$

Tillgängliga klimatdata återspeglar inte klimatets dynamik på grund av att de är medelvärden över lång tid och kan därför ej användas vid transientberäkningar. Även om data med tillräcklig upplösning föreläggat, hade dessa varit mindre lämpade att använda vid beräkning av solfångarnas transientegenskaper, ty beräkningarna skulle ge det samlade resultatet av solfångarnas respektive klimatets inverkan, och det skulle vara svårt att särskilja den ena eller den andra påverkansfaktorns inverkan.

För att kunna påvisa olika konstruktionsparametrars betydelse för effektiviteten vid transienta förlopp har jag beräknat uttagbar energi och transientverkningsgrad under syntetiska dagar, dvs dagar sammansatta av hypotetiskt växlande sol- och molnperioder. Längden på perioderna varieras systematiskt. Vid sol utsätts solfångaren för globalstrålning och vid moln för diffus strålning, som visas schematiskt i figur 1.4. Solstrålningens intensitet och uteluftens temperatur vid dessa växlingar antas följa medelvärdet för tiden ifråga. I kapitel 2 och 3 redogörs för dessa medelvärden.





Figur 1.4 Global och diffus strålning (sol och moln).

Sammanfattningsvis kan man säga att med den metod jag använt kan man särskilja konstruktionsparametrarnas och klimatparametrarnas inverkan på effektiviteten, vilket inte är möjligt med tidigare använda metoder. Därför kan slutsatser som dras av resultaten vid användandet av tidigare metoder inte vara allmängiltiga.



## 2 SOLSTRÅLNINGENS INTENSITET

Strålningens intensitet varierar under året och under dagen på grund av att jordens avstånd från solen varierar, att solstrålar-  
nas vägsträcka genom jordatmosfären varierar och att atmosfärens  
turbiditet (grumlighet) varierar. Genom att bearbeta Lunelunds [25]  
mätdata från sex års mätningar av direktstrålningens intensitet  
klara dagar, har jag kunnat ställa upp en ekvation för atmosfärens  
transmission av solstrålning som funktion av tid, dvs en ekvation  
för beräkning av transmissionskoefficienten  $\tau_{DN}$ . Denna koefficient  
multiplicerad med solarkonstanten,  $I_{SC}$ , ger intensiteten av direkt-  
strålningen, dvs

$$I_{DN}(t) = \tau_{DN}(t) \cdot I_{SC}(t) \quad (2.1)$$

Solarkonstanten är vid jordens medelavstånd till solen enligt  
Thekaekara [38]

$$I_{SC} = 1353 \text{ W/m}^2 \quad (2.2)$$

Eftersom avståndet mellan solen och jorden varierar under året  
och eftersom denna avståndsändring är känd kan en ekvation för  
solarkonstanten som funktion av tid ställas upp:

$$I_{SC}(t) = 1353 + 45,5 \sin(92 - \eta_D) \cdot 360/365 \quad (2.3)$$

$\eta_D$  är dagsnumret från 1 januari.

Transmissionskoefficienten är av formen

$$\tau_{DN}(t) = e^{-(a+b)(t) \cdot m(t)} \quad (2.4)$$

vari  $(a+b)$  är extinktionskoefficienten när strålningen går vinkel-  
rät genom atmosfären (solen i zenit) och  $m$  är den relativa atmos-  
färsmassan (1 när solen är i zenit).

$(a+b)$  representerar det sammanlagda inflytandet av vattenånga och  
förmutsning i atmosfären. Genom anpassning till Lunelunds mätdata  
har jag funnit att  $(a+b)$  som funktion av tiden kan beräknas ur

$$(a+b)(t) = 0,07 + \left( 0,240 + 0,035 \sin \varphi \cos \left[ \frac{(\tau+x)180}{y} \right] \right) \sin^{0,55} h \quad (2.5)$$

$\varphi$  är latituden,  $\tau$  är timmen från årets början och  $x$  och  $y$  ger svängningspunkterna.

För  $\tau < 4728$  timmar sättes  $x = y = 5100$  och  
för  $\tau > 4728$  timmar sättes  $x = y = 4500$ .

Det skall framhållas att ekvation (2.5) är framtagen genom insättning av  $I_{SC}$  enligt ekvation (2.3) i Lunelunds mätadata. Detta innebär att om framtida mätningar ger ett annat värde på  $I_{SC}$  måste ekvation (2.5) korrigeras med hänsyn härtill.

Den relativa atmosfärsmassan brukar i textböcker anges till  $1/\sin h$ . Denna approximation stämmer inte vid låga solhöjder. När solen står t ex vid horisonten ( $h = 0$ ) ger ekvationen en oändligt tjock atmosfärsmassa, vilken skulle helt utsläcka solinstrålningen.

Om man inför ett geometriskt istället för ett trigonometriskt samband i ekvationen för  $m$  erhåller man en bättre anpassning till verkligheten. Med jordradien = 6370 km och radien till atmosfärens ytterskikt = 6380 km (huvuddelen av extinktionen sker i det närmsta 10 km skiktet) erhålles den relativa atmosfärsmassan ur

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

$m$ :s tidsberoende är relaterat till solhöjden  $h$ . Formler för denna finns upptagna i åtskilliga textböcker. Följande samband råder:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t \quad (2.7)$$

vari timvinkeln  $t$  för timmen  $\tau$  är

$$t = [\tau - 24 \cdot \text{integer}(\tau/24) - 12] \cdot 15 \quad (2.8)$$

Deklinationen  $\delta$  beräknas ur

$$\sin \delta = \sin[(\tau - 1902)360/8766] \sin 23,45^\circ \quad (2.9)$$

Extinktionskoefficienten enligt ekvation (2.5) gäller vid havets nivå. Vid högre höjder blir instrålningsförlusten lägre på grund av att strålningen har kortare väg att passera genom atmosfären.

Instrålningförlusten kan tecknas  $I_f$  och då gäller

$$I_f = I_{SC} - I_{DN} \quad (2.10)$$

Enligt Bossel [5] är förlusten som funktion av höjden över havet,  $H$

$$I_f(H) = I_{f|H=0} \cdot e^{-aH} \quad (2.11)$$

med  $a = 0,00014/m$ .

Ekvation (2.1) kombinerad med ekvation (2.10) och (2.11) kan då skrivas

$$I_{DN}(t) = \left(1 - [1 - \tau_{DN}(t)]e^{-aH}\right) I_{SC}(t) \quad (2.12)$$

Förutom av direktstrålning träffas solfångarna av diffus och reflekterad strålning. Denna strålning är olika om himlen är klar eller molnig. Vid beräkningarna i kapitel 5 har den diffusa strålningen under klara dagar använts. Mot en lutande yta blir denna om Pleijels [28] kurva utvärderas

$$I_{dLK} = 122 \sin h (1 + \cos \gamma)(1 - 0,55 \sin h) \quad (2.13)$$

## 3 UTETEMPERATUR VID KLART RESPEKTIVE MULET VÄDER

Solfångare ger i regel uttagbar effekt endast vid solsken, alltså vid klart väder. För att kunna beräkna solfångarnas värmeförluster behöver man därför känna till utetemperaturen vid klart väder. Denna temperatur finns emellertid inte redovisad i Klimatdata för Sverige [37], varför den har antagits enligt följande.

Månadsmedelvärdena på dygnsmedeltemperaturen  $\bar{T}_a$  för Lund enligt Klimatdata följer ganska väl sambandet

$$\bar{T}_a(t) = 8 + 9,6 \sin[\pi(n_D + A)/B] \quad (3.1)$$

vari för

dag nr	1- 31:	A = 264	B = 197
- "	32-200:	A = -116	B = 170
- "	201-365:	A = -101	B = 197

Med utgångspunkt från detta har antagits

för klara dagar (Lund)

dygnsmedeltemperatur  $+7^\circ\text{C}$ , amplitud  $11^\circ\text{C}$   
vilket ger ekvationen

$$\bar{T}_{aK}(t) = 7 + 11 \sin[\pi(n_D + A)/B] \quad (3.2)$$

för mulna dagar (Lund)

dygnsmedeltemperatur  $+8,5^\circ\text{C}$ , amplitud  $8,9^\circ\text{C}$   
vilket ger ekvationen

$$\bar{T}_{aM}(t) = 8,5 + 8,9 \sin[\pi(n_D + A)/B] \quad (3.3)$$

Vidare har antagits att temperaturen under dygnet varierar sinusformat kring dygnsmedelvärdet enligt följande med  $\tau$  = timme från årets början:

vid klart väder (Lund)

$$T_{aK} = 7 + 11 \sin [\pi(\tau/24 + A)/B] + \\ + \{3,5 + 2,5 \sin[\pi(\tau/24 - 105)/182,5]\} \sin[\pi(\tau-8)/12] \quad (3.4)$$

vid mulet väder (Lund)

$$T_{a_M} = 8,5 + 8,9 \sin[\pi(\tau/24 + A)/B] + \\ + \{1,8 + 1,3 \sin[\pi(\tau/24 - 105)/182,5]\} \sin[\pi(\tau - 8)/12] \quad (3.5)$$

vari för

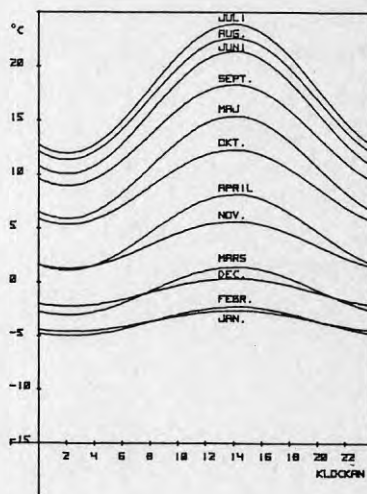
$\tau =$	1- 744	$A =$	264	$B =$	197
$\tau =$	745-4776	$A =$	-116	$B =$	170
$\tau =$	4777-8760	$A =$	-101	$B =$	197

(Beräkningarna i detta avsnitt sker i radianer. Genom att byta ut  $\pi$  mot 180 kan beräkning ske i grader.)

Temperaturen  $T_{a_K}$  respektive  $T_{a_M}$  för den 15:e i varje månad enligt ovanstående ekvationer gällande för Lund visas grafiskt i figur 3.1 respektive 3.2.

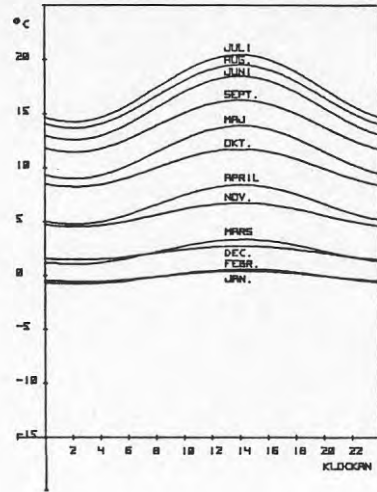
Figur 3.1

Temperaturens dygnsvariation i Lund klara dagar den 15:e i respektive månad enligt ekvation 3.4.



Figur 3.2

Temperaturens dygnsvariation  
i Lund målna dagar den 15:e  
i respektive månad enligt  
ekvation 3.5.





## 4 SOL- OCH MOLNPERIODER I LUND

Tillgängliga klimatdata ger ej någon upplysning om hur solmängden under dagen fördelas på perioder. För att få en uppfattning om detta har jag mätt solperiodernas respektive molnperiodernas längd och antal i Lund [30]. Den vanligast förekommande solperiodlängden visade sig vara 1,0 minut och den vanligast förekommande molnperiodlängden 0,25 minut.

Sol- och molnperioderna följer ett mycket bestämt fördelningsmönster när det gäller periodernas frekvens som funktion av periodlängden. Det är möjligt att detta mönster följer någon redan känd fördelningsfunktion, men eftersom frekvensekvationen visade sig kunna representeras av räta linjer i ett log-log-diagram har jag valt att uttrycka frekvensen med hjälp av två konstanter,  $k$  och  $n$ . För solperioder mellan 0 och godtycklig längd,  $\lambda_s$ , mellan 1,0 minut och dagens längd,  $\lambda_D$ , kan frekvensen beräknas ur

$$\int_0^{\lambda_s} dv = k \int_0^{\lambda_s} d\lambda + k \int_1^{\lambda_s} \lambda^{-n} d\lambda = k + k \frac{\lambda_s^{1-n} - 1}{1-n} = k \left( \frac{\lambda_s^{1-n}}{1-n} \right) \quad (4.1)$$

och för molnperioder mellan 0 och  $\lambda_m$  med ( $0,25 < \lambda_m \leq \lambda_D$ ) ur

$$\begin{aligned} \int_0^{\lambda_m} dv &= 0,25^{-n} k \int_0^{0,25} d\lambda + k \int_{0,25}^{\lambda_m} \lambda^{-n} d\lambda = 0,25^{1-n} k + k \left[ \frac{\lambda_m^{1-n} - 0,25^{1-n}}{1-n} \right] = \\ &= k \left[ \frac{\lambda_m^{1-n} - 0,25^{1-n}}{1-n} \right] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Dagens längd erhålles ur tabellverk eller beräknas ur latitud  $\varphi$  och deklination  $\delta$ :

$$\lambda_D = \frac{2}{15} \text{ arc cos } (- \tan \varphi \tan \delta) \quad (4.3)$$

Sammanlagda tiden  $\tau$  för en viss periodlängd  $\lambda$  under en tidsrymd är frekvensen  $v$  för periodlängden under denna tidsrymd gånger periodlängden, dvs

$$\tau(\lambda) = v(\lambda) \cdot \lambda \quad (4.4)$$

Integrerat över en dag ger detta soltid  $\tau_S$  resp. molntid  $\tau_m$  för dagen.

För perioder mellan 0 och godtycklig längd  $\lambda$  erhålles analogt med ekvationerna (4.1) och (4.2) för solperioder:

$$\int_0^{\lambda_S} d\tau_S = \int_0^{\lambda_S} k\lambda d\lambda + \int_1^{\lambda_S} k\lambda^{1-n} d\lambda = \frac{k}{2} + k \left[ \frac{\lambda_S^{2-n-1}}{2-n} \right] = k \left[ \frac{\lambda_S^{2-n-0,5n}}{2-n} \right] \quad (4.5)$$

för molnperioder:

$$\int_0^{\lambda_m} d\tau_m = \frac{0,25^{2-n} k}{2} + k \left[ \frac{\lambda_m^{2-n-0,25^{2-n}}}{2-n} \right] = k \left[ \frac{\lambda_m^{2-n-0,5 \cdot 0,25^{2-n}}}{2-n} \right] \quad (4.6)$$

För den tid mätningar pågått har  $k$  och  $n$  i ovanstående ekvationer beräknats och finns sammanställda i [30]. För solperioderna har  $n$  varierat mellan 1,4 och 2,2 och  $k$  mellan 4,3 och 88. Lågt  $n$ -värde gäller för dagar då soltiden varit uppdelad på ett fåtal perioder och ett högt  $n$ -värde gäller då soltiden varit uppdelad på många småperioder.

$k$  och  $n$  varierar inte oberoende av varandra. Förutom av varandra är de en funktion av dagens längd,  $\lambda_D$ , och sannolikheten för sol,  $\sigma_S$ , under dagen. Sambandet framgår av följande:

Soltiden  $\tau_S$  under en dag är

$$\tau_S = \lambda_D \sigma_S \quad (4.7)$$

men är även = ekvation (4.5). Därav följer att

$$k \left[ \frac{\lambda_D^{2-n-0,5n}}{2-n} \right] = \lambda_D \sigma_S \quad (4.8)$$

och

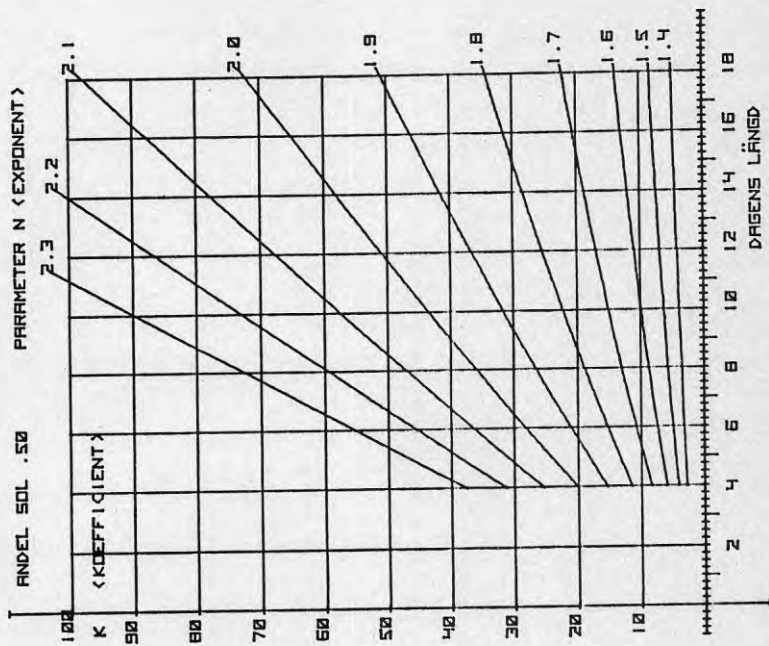
$$k = \frac{\lambda_D \sigma_S}{\frac{\lambda_D^{2-n-0,5n}}{2-n}} \quad (4.9)$$

För specialfallet  $n = 2$  gäller

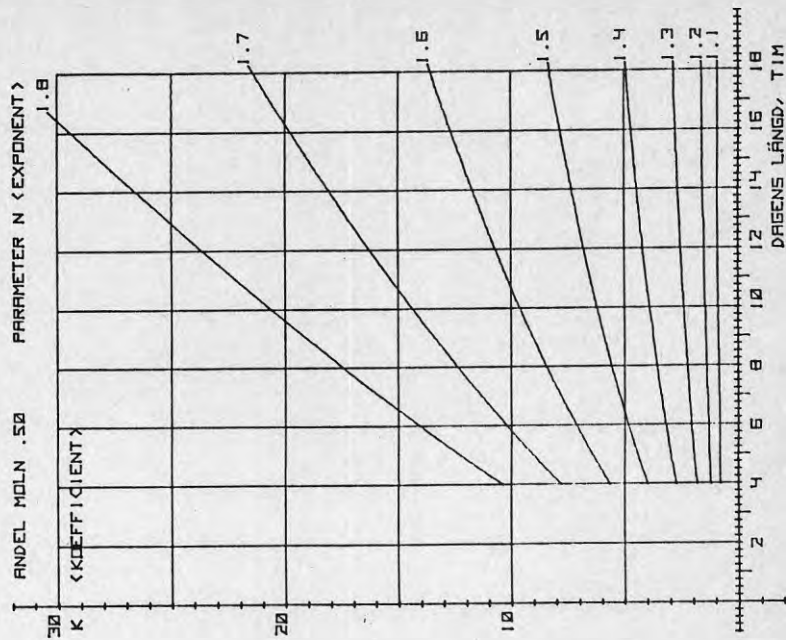
$$k = \frac{\lambda_D \sigma_S}{0,5 + \ln \lambda_D} \quad (4.10)$$

Ekvationerna (4.9) och (4.10) visas grafiskt i figur 4.1 för  $\sigma_S = 0,5$ .

Figur 4.1 Sammanhörande värden på koefficienten k och exponenten n i ekvation (4.1) till (4.15) som funktion av dagens längd och vid 50% solandel.



Figur 4.2 Sammanhörande värden på koefficienten k och exponenten n i ekvation (4.1) till (4.15) som funktion av dagens längd och vid 50% solandel.



För molnperioderna har under mätningarna  $n$  varierat mellan 1,2 och 1,8 och  $k$  mellan 1,5 och 26. Sambandet mellan  $n$  och  $k$  framgår av följande.

Om sannolikheten för moln är  $\sigma_m$  gäller för molnperioderna

$$\tau_m = \lambda_D \sigma_m = \lambda_D (1 - \sigma_s) \quad (4.11)$$

och

$$k \left[ \frac{\lambda_D^{2-n} - 0,5 \cdot 0,25^{2-n} \cdot n}{2-n} \right] = \lambda_D \sigma_m \quad (4.12)$$

$$k = \frac{\lambda_D \sigma_m}{\frac{\lambda_D^{2-n} - 0,5 \cdot 0,25^{2-n} \cdot n}{2-n}} \quad (4.13)$$

Ekvation (4.13) visas grafiskt i figur 4.2 för  $\sigma_m = 0,5$ . Det skall anmärkas att de angivna värdena på  $k$  och  $n$  för sol respektive molnfrekvenser är medelvärden och gäller för dagar med sol. Helmulna dagar är således frånräknade. Det skall vidare anmärkas att har frekvens ekvationen för solperioderna fastställts eller antagits är även frekvens ekvationen för molnperioderna uppbounden, ty molnperiodernas frekvens ekvation måste ge totalt lika många molnperioder under dagen som solperiodernas frekvens ekvation ger solperioder ( $\pm 1$  styck).

Med utgångspunkt från frekvens ekvationerna kan de enskilda sol- respektive molnperiodernas längd under en dag beräknas. När under dagen de olika perioderna inträffar ger emellertid ekvationen ingen upplysning om.

Enligt ekvation (4.1) är frekvensen för solperioder som är kortare än  $\lambda_s$ :

$$v = k \left( \frac{\lambda_s^{1-n} - n}{1-n} \right)$$

Härur kan  $\lambda_s$  lösas, vilket ger

$$\lambda_s = 10^{\frac{\log \left[ \frac{v(1-n)}{k} + n \right]}{1-n}} \quad (4.14)$$

Om man startar med att sätta  $\nu=k$  och sedan successivt ökar  $\nu$  med 1 erhålles gränserna för alla solperioder längre än 1 minut.  $k$  är frekvensen för alla perioder upp till 1 minut, vilket framgår av ekvation (4.1) om  $\lambda_s$  sättes = 1.

För de sålunda erhållna periodgränserna beräknas soltiden med hjälp av ekvation (4.5). Skillnaden mellan soltiderna för två närliggande periodgränser ger längden på en solperiod. Beräknas skillnaderna mellan soltiderna för alla närliggande periodgränser erhålles alla solperioderna längre än 1 minut.

Molnperiodernas längd kan beräknas på motsvarande sätt. Enligt ekvation (4.2) är frekvensen för molnperioder som är kortare än  $\lambda_m$ :

$$\nu = k \left[ \frac{\lambda_m^{1-n} - 0,25^{1-n} \cdot n}{1-n} \right]$$

varur erhålles

$$\lambda_m = 10 \frac{\log \left[ \frac{\nu(1-n)}{k} + 0,25^{1-n} \cdot n \right]}{1-n} \quad (4.15)$$

Soltiden för alla solperioder mellan 0 och  $\lambda_s$  under en dag enligt ekvation (4.5) dividerat med dagens totala soltid ger andelen sol för dessa perioder. På samma sätt ger molntiden för alla molnperioder mellan 0 och  $\lambda_m$  under en dag enligt ekvation (4.6) dividerat med dagens totala molntid andelen moln för dessa perioder.

Ovanstående ekvationer har använts vid uppgörandet av följande figurer och tabeller.

Figur 4.3 visar för dag nr 87 några olika frekvensfunktioner för solperioderna alla givande 50% sol under dagen.

Figur 4.4 visar andelen sol och figur 4.5 antal solglimtar som funktion av längd för frekvensfunktioner enligt figur 4.3.

Tabell 4.1 visar solperioderna längre än 1 minut för frekvensfunktionerna enligt figur 4.3.

För dag nr 174 visas motsvarande i figur 4.6 - 4.8 och i tabell 4.2.

Solfångare som finns på marknaden idag har i allmänhet en tidskonstant på ca 30 minuter då de ej ger uttagbar effekt och en tidskonstant på endast ett par minuter när de ger uttagbar effekt. Detta gör att de ej förmår utnyttja energin i korta solperioder. Vid 50% sol kan man förvänta sig att solperioderna följer någon av frekvenskvationerna i figur 4.3 respektive 4.6 eller någon mellanliggande. Vilken det än blir är det endast den längsta solperioden som har sådan varaktighet att dagens solfångare hinner utnyttja dess energi. Av tabell 4.1 och 4.2 framgår att de längsta solperioderna upptar ca 40 till 80% av dagens soltid. Således utan att göra andra beräkningar över transienternas betydelse kan man dra den slutsatsen att de kan förorsaka en förlust på omväxlande 60 till 20%, som nuvarande beräkningssätt ej tar hänsyn till.



Tabell 4.1 Solperioder under dag nr 87 vid sol 50% av dagens längd vid olika frekvensfunktion (enligt figur 4.3).  
 Perioderna ordnade från kortaste till längsta solperiod.  
 Tid i minuter.

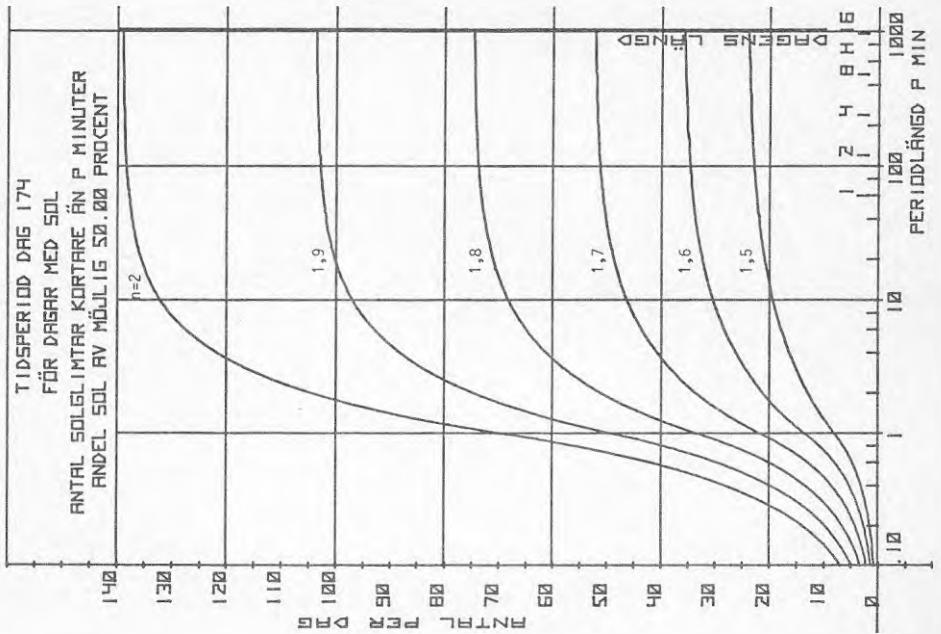
Antal per. < 1,0 min (medellängd 0,5 min)	FÖRDELNINGSEKVIATION						
	$v = 52,764x^{-2}$	$v = 39,007x^{-1,9}$	$v = 26,287x^{-1,8}$	$v = 17,508x^{-1,7}$	$v = 11,273x^{-1,6}$	$v = 7,048x^{-1,5}$	
53 st	38 st	26 st	18 st	11 st	7 st		
1.010	1.013	1.012	1.030	1.047	1.075		
1.029	1.068	1.068	1.093	1.149	1.254		
1.050	1.070	1.104	1.163	1.270	1.430		
1.071	1.101	1.151	1.231	1.351	1.530		
1.116	1.133	1.206	1.326	1.485	1.744		
1.148	1.204	1.317	1.438	1.632	1.958		
1.195	1.243	1.383	1.565	1.841	2.326		
1.220	1.284	1.452	1.680	2.021	2.741		
1.248	1.324	1.522	1.800	2.202	3.202		
1.279	1.374	1.618	2.178	3.023	3.668		
1.319	1.424	1.714	2.402	3.282	4.159		
1.344	1.477	1.808	2.572	3.528	4.681		
1.379	1.526	1.901	2.741	3.761	5.241		
1.425	1.575	2.021	2.916	3.982	5.842		
1.496	1.622	2.071	3.095	4.200	6.485		
1.560	1.668	2.121	3.276	4.424	7.170		
1.640	1.713	2.178	3.456	4.654	7.900		
1.725	1.758	2.231	3.636	4.889	8.675		
1.815	1.803	2.281	3.816	5.130	9.500		
1.910	1.848	2.331	3.996	5.376	10.375		
2.010	1.893	2.381	4.176	5.627	11.300		
2.115	1.938	2.431	4.356	5.882	12.275		
2.225	1.983	2.481	4.536	6.142	13.300		
2.340	2.028	2.531	4.716	6.407	14.375		
2.460	2.073	2.581	4.896	6.677	15.500		
2.585	2.118	2.631	5.076	6.952	16.675		
2.715	2.163	2.681	5.256	7.232	17.900		
2.850	2.208	2.731	5.436	7.517	19.175		
2.990	2.253	2.781	5.616	7.807	20.500		
3.135	2.298	2.831	5.796	8.102	21.875		
3.285	2.343	2.881	5.976	8.402	23.300		
3.440	2.388	2.931	6.156	8.707	24.775		
3.600	2.433	2.981	6.336	9.017	26.300		
3.765	2.478	3.031	6.516	9.332	27.875		
3.935	2.523	3.081	6.696	9.652	29.500		
4.110	2.568	3.131	6.876	9.977	31.175		
4.290	2.613	3.181	7.056	10.307	32.900		
4.475	2.658	3.231	7.236	10.642	34.675		
4.665	2.703	3.281	7.416	10.982	36.500		
4.860	2.748	3.331	7.596	11.327	38.375		
5.060	2.793	3.381	7.776	11.677	40.300		
5.265	2.838	3.431	7.956	12.032	42.275		
5.475	2.883	3.481	8.136	12.392	44.300		
5.690	2.928	3.531	8.316	12.757	46.375		
5.910	2.973	3.581	8.496	13.127	48.500		
6.135	3.018	3.631	8.676	13.502	50.675		
6.365	3.063	3.681	8.856	13.882	52.900		
6.600	3.108	3.731	9.036	14.267	55.175		
6.840	3.153	3.781	9.216	14.657	57.500		
7.085	3.198	3.831	9.396	15.052	59.875		
7.335	3.243	3.881	9.576	15.452	62.300		
7.590	3.288	3.931	9.756	15.857	64.775		
7.850	3.333	3.981	9.936	16.267	67.300		
8.115	3.378	4.031	10.116	16.682	69.875		
8.385	3.423	4.081	10.296	17.102	72.500		
8.660	3.468	4.131	10.476	17.527	75.175		
8.940	3.513	4.181	10.656	17.957	77.900		
9.225	3.558	4.231	10.836	18.392	80.675		
9.515	3.603	4.281	11.016	18.832	83.500		
9.810	3.648	4.331	11.196	19.277	86.375		
10.110	3.693	4.381	11.376	19.727	89.300		
10.415	3.738	4.431	11.556	20.182	92.275		
10.725	3.783	4.481	11.736	20.642	95.300		
11.040	3.828	4.531	11.916	21.107	98.375		
11.360	3.873	4.581	12.096	21.577	101.500		
11.685	3.918	4.631	12.276	22.052	104.675		
12.015	3.963	4.681	12.456	22.532	107.900		
12.350	4.008	4.731	12.636	23.017	111.175		
12.690	4.053	4.781	12.816	23.507	114.500		
13.035	4.098	4.831	12.996	23.992	117.875		
13.385	4.143	4.881	13.176	24.482	121.300		
13.740	4.188	4.931	13.356	24.977	124.775		
14.100	4.233	4.981	13.536	25.477	128.300		
14.465	4.278	5.031	13.716	25.982	131.875		
14.835	4.323	5.081	13.896	26.492	135.500		
15.210	4.368	5.131	14.076	27.007	139.175		
15.590	4.413	5.181	14.256	27.527	142.900		
15.975	4.458	5.231	14.436	28.052	146.675		
16.365	4.503	5.281	14.616	28.582	150.500		
16.760	4.548	5.331	14.796	29.117	154.375		
17.160	4.593	5.381	14.976	29.657	158.300		
17.565	4.638	5.431	15.156	30.202	162.275		
17.975	4.683	5.481	15.336	30.752	166.300		
18.390	4.728	5.531	15.516	31.307	170.375		
18.810	4.773	5.581	15.696	31.867	174.500		
19.235	4.818	5.631	15.876	32.432	178.675		
19.665	4.863	5.681	16.056	33.002	182.900		
20.100	4.908	5.731	16.236	33.577	187.175		
20.540	4.953	5.781	16.416	34.157	191.500		
20.985	4.998	5.831	16.596	34.742	195.875		
21.435	5.043	5.881	16.776	35.332	200.300		
21.890	5.088	5.931	16.956	35.927	204.775		
22.350	5.133	5.981	17.136	36.527	209.300		
22.815	5.178	6.031	17.316	37.132	213.875		
23.285	5.223	6.081	17.496	37.742	218.500		
23.760	5.268	6.131	17.676	38.357	223.175		
24.240	5.313	6.181	17.856	38.977	227.900		
24.725	5.358	6.231	18.036	39.602	232.675		
25.215	5.403	6.281	18.216	40.232	237.500		
25.710	5.448	6.331	18.396	40.867	242.375		
26.210	5.493	6.381	18.576	41.507	247.300		
26.715	5.538	6.431	18.756	42.152	252.275		
27.225	5.583	6.481	18.936	42.802	257.300		
27.740	5.628	6.531	19.116	43.457	262.375		
28.260	5.673	6.581	19.296	44.117	267.500		
28.785	5.718	6.631	19.476	44.782	272.675		
29.315	5.763	6.681	19.656	45.452	277.900		
29.850	5.808	6.731	19.836	46.127	283.175		
30.390	5.853	6.781	20.016	46.807	288.500		
30.935	5.898	6.831	20.196	47.492	293.875		
31.485	5.943	6.881	20.376	48.182	299.300		
32.040	5.988	6.931	20.556	48.877	304.775		
32.600	6.033	6.981	20.736	49.577	310.300		
33.165	6.078	7.031	20.916	50.282	315.875		
33.735	6.123	7.081	21.096	50.992	321.500		
34.310	6.168	7.131	21.276	51.707	327.175		
34.890	6.213	7.181	21.456	52.427	332.900		
35.475	6.258	7.231	21.636	53.152	338.675		
36.065	6.303	7.281	21.816	53.882	344.500		
36.660	6.348	7.331	21.996	54.617	350.375		
37.260	6.393	7.381	22.176	55.357	356.300		
37.865	6.438	7.431	22.356	56.102	362.275		
38.475	6.483	7.481	22.536	56.852	368.300		
39.090	6.528	7.531	22.716	57.607	374.375		
39.710	6.573	7.581	22.896	58.367	380.500		
40.335	6.618	7.631	23.076	59.132	386.675		
40.965	6.663	7.681	23.256	59.902	392.900		
41.600	6.708	7.731	23.436	60.677	399.175		
42.240	6.753	7.781	23.616	61.457	405.500		
42.885	6.798	7.831	23.796	62.242	411.875		
43.535	6.843	7.881	23.976	63.032	418.300		
44.190	6.888	7.931	24.156	63.827	424.775		
44.850	6.933	7.981	24.336	64.627	431.300		
45.515	6.978	8.031	24.516	65.432	437.875		
46.185	7.023	8.081	24.696	66.242	444.500		
46.860	7.068	8.131	24.876	67.057	451.175		
47.540	7.113	8.181	25.056	67.877	457.900		
48.225	7.158	8.231	25.236	68.702	464.675		
48.915	7.203	8.281	25.416</				



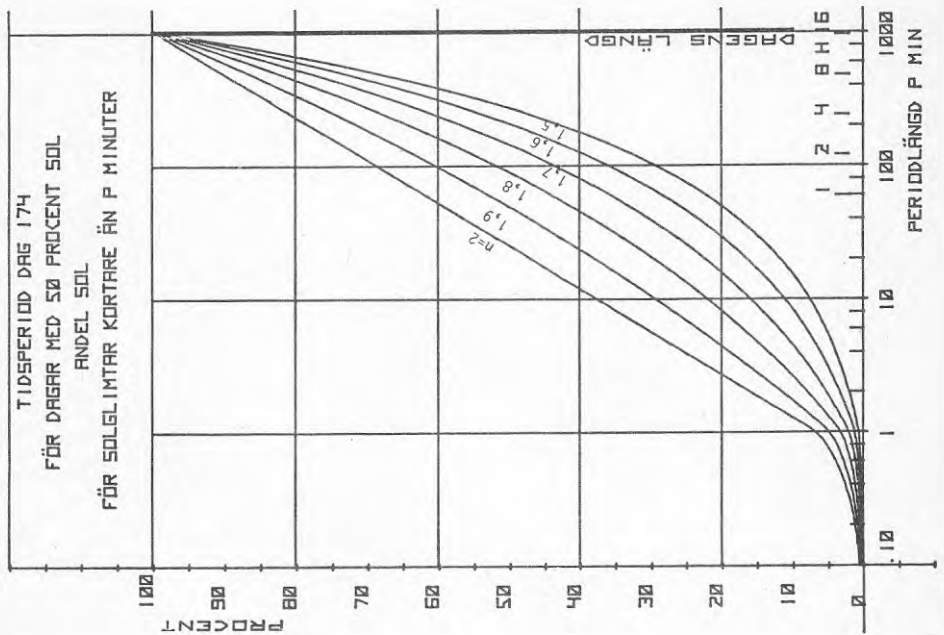
Tabell 4.2 Solperioder under dag nr 174 vid sol 50% av dagens längd vid olika frekvensfunktion (enligt figur 4.6).  
Perioderna ordnade från kortaste till längsta solperiod.  
Tid i minuter.

Antal per. < 1,0 min. (medellängd 0,5 min.)	FÖRDELNINGSEKVIATION							
	70 st	49 st	33 st	22 st	14 st	8 st		
	$v = 69,554 \cdot z^2$	$v = 49,204 \cdot z^2$	$v = 33,306 \cdot z^2$	$v = 21,642 \cdot z^2$	$v = 13,561 \cdot z^2$	$v = 8,237 \cdot z^2$		
1.007	1.010	1.015	1.024	1.038	1.057	1.085		
1.002	1.031	1.047	1.074	1.107	1.146	1.192		
1.003	1.062	1.116	1.187	1.264	1.347	1.435		
1.005	1.096	1.174	1.262	1.359	1.464	1.575		
1.006	1.135	1.234	1.343	1.461	1.588	1.723		
1.007	1.179	1.298	1.427	1.565	1.712	1.868		
1.008	1.226	1.365	1.514	1.671	1.837	2.012		
1.009	1.276	1.435	1.594	1.769	1.944	2.176		
1.010	1.329	1.516	1.698	1.897	2.125	2.359		
1.011	1.384	1.609	1.817	2.047	2.271	2.564		
1.012	1.441	1.714	1.950	2.184	2.404	2.711		
1.013	1.500	1.831	2.088	2.338	2.562	2.876		
1.014	1.561	1.960	2.204	2.508	2.736	3.061		
1.015	1.624	2.101	2.335	2.692	2.928	3.266		
1.016	1.689	2.254	2.481	2.891	3.144	3.491		
1.017	1.757	2.420	2.641	3.103	3.282	3.736		
1.018	1.827	2.599	2.817	3.335	3.444	3.999		
1.019	1.899	2.790	3.009	3.587	3.622	4.279		
1.020	1.974	2.994	3.217	3.859	3.817	4.574		
1.021	2.051	3.211	3.441	4.151	4.023	4.884		
1.022	2.131	3.441	3.681	4.464	4.244	5.208		
1.023	2.213	3.684	3.936	4.800	4.481	5.546		
1.024	2.297	3.941	4.206	5.160	4.734	5.898		
1.025	2.384	4.212	4.491	5.544	5.003	6.264		
1.026	2.473	4.497	4.791	5.952	5.288	6.644		
1.027	2.564	4.796	5.106	6.384	5.589	7.038		
1.028	2.657	5.109	5.436	6.840	5.906	7.446		
1.029	2.752	5.436	5.781	7.320	6.239	7.868		
1.030	2.849	5.777	6.141	7.824	6.588	8.304		
1.031	2.948	6.132	6.516	8.352	6.953	8.754		
1.032	3.049	6.502	6.906	8.904	7.334	9.218		
1.033	3.152	6.886	7.311	9.480	7.731	9.696		
1.034	3.257	7.284	7.731	10.080	8.144	10.188		
1.035	3.364	7.696	8.166	10.704	8.574	10.694		
1.036	3.473	8.122	8.617	11.352	9.020	11.214		
1.037	3.584	8.563	9.084	12.024	9.482	11.750		
1.038	3.697	9.019	9.567	12.720	9.960	12.306		
1.039	3.812	9.490	10.066	13.440	10.454	12.882		
1.040	3.929	9.976	10.579	14.184	10.964	13.478		
1.041	4.048	10.477	11.107	14.952	11.490	14.094		
1.042	4.169	10.992	11.650	15.744	12.032	14.730		
1.043	4.292	11.521	12.208	16.560	12.590	15.386		
1.044	4.417	12.064	12.781	17.400	13.164	16.062		
1.045	4.544	12.621	13.369	18.264	13.754	16.758		
1.046	4.673	13.192	13.972	19.152	14.360	17.474		
1.047	4.804	13.777	14.590	20.064	14.982	18.210		
1.048	4.937	14.376	15.223	21.000	15.620	18.966		
1.049	5.072	14.989	15.871	21.960	16.274	19.742		
1.050	5.209	15.616	16.534	22.944	16.944	20.538		
1.051	5.348	16.257	17.211	23.952	17.630	21.354		
1.052	5.489	16.912	17.902	24.984	18.332	22.190		
1.053	5.632	17.581	18.607	26.040	19.050	23.046		
1.054	5.777	18.264	19.326	27.120	19.784	23.922		
1.055	5.924	18.961	20.059	28.224	20.534	24.818		
1.056	6.072	19.672	20.806	29.352	21.300	25.734		
1.057	6.222	20.397	21.567	30.504	22.082	26.670		
1.058	6.374	21.136	22.342	31.680	22.892	27.626		
1.059	6.527	21.889	23.131	32.880	23.724	28.602		
1.060	6.682	22.656	23.934	34.104	24.578	29.598		
1.061	6.839	23.437	24.751	35.352	25.454	30.614		
1.062	6.997	24.232	25.582	36.624	26.352	31.650		
1.063	7.157	25.041	26.427	37.920	27.272	32.706		
1.064	7.318	25.864	27.285	39.240	28.214	33.782		
1.065	7.481	26.701	28.157	40.584	29.170	34.878		
1.066	7.646	27.552	29.043	41.952	30.142	35.994		
1.067	7.812	28.417	29.943	43.344	31.130	37.130		
1.068	7.980	29.296	30.856	44.760	32.134	38.286		
1.069	8.149	30.189	31.782	46.192	33.154	39.462		
1.070	8.320	31.096	32.721	47.640	34.190	40.658		
1.071	8.492	32.017	33.672	49.104	35.242	41.874		
1.072	8.666	32.952	34.635	50.584	36.310	43.110		
1.073	8.841	33.899	35.610	52.080	37.394	44.366		
1.074	9.018	34.859	36.596	53.592	38.494	45.642		
1.075	9.196	35.831	37.593	55.120	39.610	46.938		
1.076	9.376	36.815	38.601	56.664	40.742	48.254		
1.077	9.557	37.811	39.620	58.224	41.890	49.590		
1.078	9.739	38.819	40.650	59.800	43.054	50.946		
1.079	9.922	39.839	41.691	61.392	44.234	52.322		
1.080	10.107	40.871	42.743	62.992	45.430	53.718		
1.081	10.293	41.915	43.805	64.608	46.642	55.134		
1.082	10.480	42.971	44.878	66.240	47.870	56.570		
1.083	10.669	44.039	45.961	67.888	49.114	58.026		
1.084	10.859	45.119	47.054	69.552	50.374	59.502		
1.085	11.050	46.211	48.157	71.232	51.650	61.000		
1.086	11.242	47.315	49.270	72.928	52.942	62.518		
1.087	11.436	48.431	50.393	74.640	54.250	64.056		
1.088	11.631	49.559	51.526	76.368	55.574	65.614		
1.089	11.827	50.699	52.669	78.112	56.914	67.192		
1.090	12.024	51.851	53.822	79.872	58.270	68.790		
1.091	12.222	53.015	54.985	81.648	59.642	70.408		
1.092	12.421	54.191	56.158	83.440	61.030	72.046		
1.093	12.621	55.379	57.341	85.248	62.434	73.704		
1.094	12.822	56.579	58.534	87.072	63.854	75.382		
1.095	13.024	57.791	59.737	88.912	65.290	77.080		
1.096	13.227	59.015	60.950	90.768	66.742	78.798		
1.097	13.431	60.251	62.173	92.640	68.210	80.536		
1.098	13.636	61.499	63.406	94.528	69.694	82.294		
1.099	13.842	62.759	64.649	96.432	71.194	84.072		
1.100	14.049	64.031	65.902	98.352	72.710	85.870		
1.101	14.257	65.315	67.165	100.288	74.242	87.688		
1.102	14.466	66.611	68.438	102.240	75.790	89.526		
1.103	14.676	67.919	69.721	104.208	77.354	91.384		
1.104	14.887	69.239	71.014	106.192	78.934	93.262		
1.105	15.099	70.571	72.317	108.192	80.530	95.160		
1.106	15.312	71.915	73.630	110.208	82.142	97.078		
1.107	15.526	73.271	74.953	112.240	83.770	99.016		
1.108	15.741	74.639	76.286	114.288	85.414	100.974		
1.109	15.957	76.019	77.629	116.352	87.074	102.952		
1.110	16.174	77.411	78.982	118.432	88.750	104.950		
1.111	16.392	78.815	80.345	120.528	90.442	106.968		
1.112	16.611	80.231	81.718	122.640	92.150	109.006		
1.113	16.831	81.659	83.101	124.768	93.874	111.064		
1.114	17.052	83.099	84.494	126.912	95.614	113.142		
1.115	17.274	84.551	85.897	129.072	97.370	115.240		
1.116	17.497	86.015	87.310	131.248	99.142	117.358		
1.117	17.721	87.491	88.733	133.440	100.930	119.496		
1.118	17.946	88.979	90.166	135.648	102.734	121.654		
1.119	18.172	90.479	91.609	137.872	104.554	123.832		
1.120	18.399	91.991	93.062	140.112	106.390	126.030		
1.121	18.627	93.515	94.525	142.368	108.242	128.248		
1.122	18.856	95.051	95.998	144.640	110.110	130.486		
1.123	19.086	96.599	97.481	146.928	111.994	132.744		
1.124	19.317	98.159	98.974	149.232	113.894	135.022		
1.125	19.549	99.731	100.477	151.552				

Figur 4.8 Antal solglimtar vid solfrekvensfunktioner enligt figur 4.6.



Figur 4.7 Solandel vid solfrekvensfunktioner enligt figur 4.6.



## 5. SOLVÄRMEANLÄGGNINGENS TRANSIENTEGENSKAPER

Temperaturen i olika delar av ett solvärmesystem vid transienta förhållanden har betydelse dels vid beräkning av därav förorsakade förluster, dels vid bestämning av anläggningens driftsstrategi. De förluster det är frågan om är

- 1) den energi som går åt för att värma upp solfångarna och rör-system till värmemagasinetns temperatur, alltså energiupptagningen innan anläggningen kan börja ge uttagbar energi, och
- 2) den energi som förloras vid felaktig strategi, t ex att varm fluid får cirkulera genom solfångaren när instrålningseffekten är för låg för att anläggningen skall kunna ge effekt.

Förlusterna enligt 2) kan elimineras men ej förlusterna enligt 1), därför kommer i det följande händelseförloppen vid uppvärmnings- respektive avsvältningsfaserna att analyseras, så att det skall bli möjligt att storleksmässigt bestämma transientförlusterna.

### 5.1 Vid uppvärmningsfasen

Uppvärmningsfasen kan karakteriseras av följande moment:

1. Solfångaren och rörsystem inklusive fluiden har under natten antagit omgivningstemperatur, dvs utetemperatur. Fluiden rör sig ej.
2. Solen kommer fram och solfångaren börjar värmas upp.
3. När solfångaren uppnått inställd temperatur (= några grader över magasinstemperaturen) startar pumpen fluiden. Fluiden går då in i solfångaren och har en temperatur enligt punkt 1.
4. Den varma fluiden i solfångaren ersätts av en svalare. Under detta moment värms både den svala och den varma fluiden. Under denna "tömningstid" har fluiden som lämnar solfångaren en högre temperatur än starttemperaturen.
5. Efter "tömningstiden" faller utgående fluidtemperatur språngvis.

6. Temperaturen enligt punkt 5 gäller under den tid det tar att "tömma" rörledningssystemet.
7. Skulle rörledningens "tömningstid" vara kortare än solfångarens kan det passera flera temperaturfronter genom solfångaren innan denna "tömts" och jämvikt uppstått.
8. Är rörledningens "tömningstid" längre än solfångarens, matas solfångaren med magasinstemperatur efter det rörledningen "tömts".
9. Efter det rörledningen "tömts" enligt punkt 8 tar det ytterligare "tömningstiden" för solfångaren innan temperaturen i solfångaren stabiliserats.

Punkt 6 förutsätter att det finns en värmeväxlare eller shuntventil vid magasinet, så att detta ej tillförs vatten förrän rörledningssystemet "tömts". Finnes ej värmeväxlare eller shuntventil tar "tömningen" av rörledningen bara halva tiden jämfört med punkterna 6, 7 och 8, dvs tiden för att "tömma" ledningen från magasinet till solfångaren. Under denna tid uppstår det en förlust på grund av att det svala vattnet i ledningen från solfångaren till magasinet pumpas in i magasinet och sänker medeltemperaturen i detta.

#### 5.1.1 Sammanställning av analytiska uttryck för temperatur- och energitillskott i solfångare

Med användande av den av Close [7] införda förenklingen att man låter en punkt i absorberplåten representera hela solfångaren härleds nedanstående analytiska uttryck.  $C_c$  är därvid solfångarens effektiva värmekapacitet per  $m^2$  solfångaryta. Hur  $C_c$  beräknas framgår av t ex Duffie & Beckman [10].

Det förutsättes att förhållandena är konstanta och att kollektor-temperaturen  $T_p =$  omgivningstemperaturen vid tiden  $t(0)$ .

Vid stillastående fluid, dvs när uttagbar effekt = 0

Energitillskottet i solfångaren

$$q(t) = S\tau(1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.1)$$



med

$$\tau = \frac{C_C}{U_L} \quad (5.2)$$

Temperaturtillväxten

$$T_p(t) = S\tau(1 - e^{-t/\tau}) + T_a \quad (5.3)$$

Stagnationstemperaturen

$$T_p \max = \frac{S}{U_L} + T_a \quad (5.4)$$

Vid cirkulerande fluid, vars inloppstemperatur = utetemperaturen

Energi- och temperaturtillväxten blir samma som vid stillastående fluid men tidskonstanten blir

$$\tau = \frac{C}{U_L}(1 - F_R) \quad (5.5)$$

vari  $F_R$  är det från Hottel-Williers ekvation [14] kända uttrycket, som gör det möjligt att beräkna solfångarens förluster med utgångspunkt från vattnets inloppstemperatur, som är känd, istället för från solfångarens medeltemperatur, som är okänd.

Den uttagbara värmeeffekten från solfångaren är

$$\dot{Q}_U = F_R A [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (5.6)$$

med

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{AU_L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{F'U_L A}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (5.7)$$

$F'$  är solfångarens effektivitetsfaktor, dvs förhållandet mellan värmemotståndet från kollektorytan till omgivningen och värmemotståndet från kollektorns fluid till omgivningen. Vid helt kyld kollektoryta kan  $F'$  sättas till 1.

Eftersom  $F_R$  brukar vara 0,98 - 0,95 är tidskonstanten vid cirkulerande fluid endast 2 ä 5% av tidskonstanten vid stillastående fluid.

Stagnationstemperaturen

$$T_{p \max} = (1 - F_R) \frac{S}{U_L} + T_a \quad (5.8)$$

Vid cirkulerande fluid, vars inloppstemperatur är godtycklig

Energitillskottet

$$q(t) = \begin{cases} S\tau_1(1 - e^{-t/\tau_1}) & \text{om } t < t_{T_i} \quad (5.9) \end{cases}$$

$$q(t) = \begin{cases} C_c(T_i - T_a) + S\left(1 - \frac{U_L(T_i - T_a)}{S}\right)\tau_2\left(1 - e^{-\frac{t - t_{T_i}}{\tau_2}}\right) & \text{om } t \geq t_{T_i} \quad (5.10) \end{cases}$$

med

$$\tau_1 = \frac{C_c}{U_L} \quad (5.11)$$

och

$$\tau_2 = \frac{C_c}{U_L}(1 - F_R) \quad (5.12)$$

Temperaturtillväxten

$$T_p(t) = \begin{cases} S\tau_1(1 - e^{-t/\tau_1})/C_c + T_a & \text{om } t < t_{T_i} \quad (5.13) \end{cases}$$

$$T_p(t) = \begin{cases} \left[ C_c(T_i - T_a) + S\left(1 - \frac{U_L(T_i - T_a)}{S}\right)\tau_2\left(1 - e^{-\frac{t - t_{T_i}}{\tau_2}}\right) \right] / C_c + T_a & \text{om } t \geq t_{T_i} \quad (5.14) \end{cases}$$

(5.14) är lika med

$$T_p(t) = S\left(1 - \frac{U_L(T_i - T_a)}{S}\right)\tau_2\left(1 - e^{-\frac{t - t_{T_i}}{\tau_2}}\right) / C_c + T_i \quad (5.15)$$

Stagnationstemperaturen

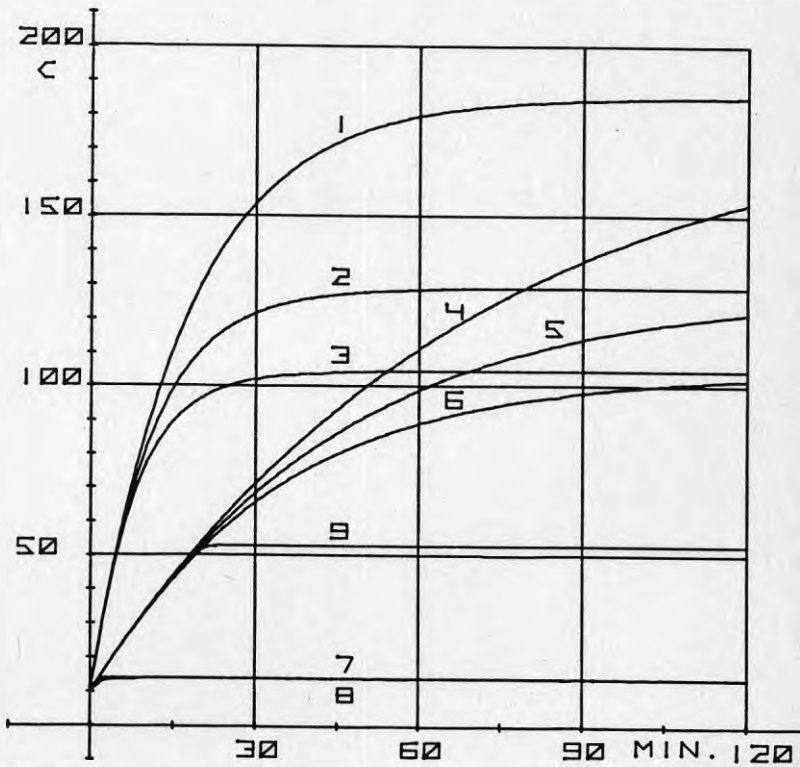
$$T_{p \max} = F_R T_i + (1 - F_R) \left( \frac{S}{U_L} + T_a \right) \quad (5.16)$$

Figur 5.1 Temperaturstegringen i solfångare med olika tidskonstant och med och utan cirkulerande vatten.

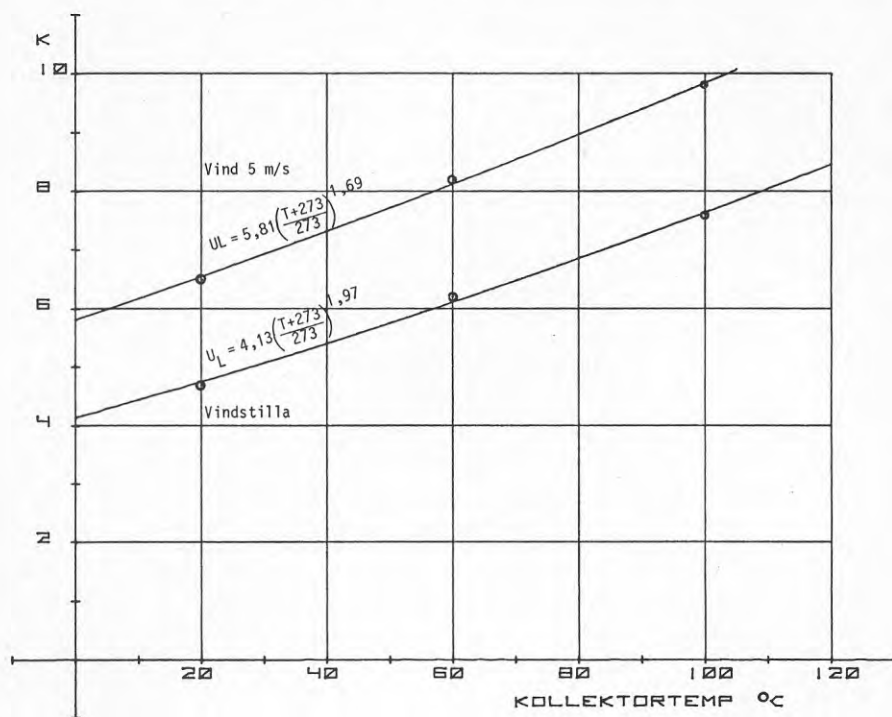
Data:  $I = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $(\tau\alpha) = 0,7$ ,  $U_{L0} = 4,0 \text{ W/(m}^2/\text{K)}$ ,  $F' = 1$ ,

$$U_L = U_{L0} \left( \frac{T+273}{273} \right)^n, T_a = +10^\circ\text{C}$$

Kurva 1	$C_c = 4,19 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$	$G = 0$	$n = 0$	
" 2	- " -	- " -	$n = 1$	
" 3	- " -	- " -	$n = 1,9$	
" 4	$C_c = 16,74 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$	- " -	$n = 0$	
" 5	- " -	- " -	$n = 1$	
" 6	- " -	- " -	$n = 1,9$	
" 7	$C_c = 4,19 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$	$G = 0,02$	$n = 0$	$T_i = +10^\circ\text{C}$
" 8	$C_c = 16,74 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$	- " -	$n = 1,9$	- " -
" 9	- " -	- " -	- " -	$T_i = +50^\circ\text{C}$



Figur 5.2  $U_L$ -värdet (k-värdet) för firma Teknoterms solfångare som funktion av kollektortemperatur. © data enligt Statens Provningsanstalt.



Med användande av ovanstående ekvationer har solfångaretemperaturerna i figur 5.1 beräknats. För de fall där  $U_L$  är en funktion av absorbatortemperaturen har vid beräkningarna använts  $U_L$  för föregående tidssteg.

En solfångares  $U_L$ -värde är inte konstant utan växer med solfångarens temperatur. Hur stor tillväxten blir beror på solfångarens konstruktion. När en solfångare testas vid Statens Provningsanstalt beräknas  $U_L$ -värdet (k-värdet) vid tre olika temperaturer. Genom kurvanpassning till de tre  $U_L$ -värdena kan en ekvation för  $U_L$ -värdets temperaturberoende erhållas. För t ex firma Teknoterms plana solfångare erhålles figur 5.2. Av denna ser man att vid vidstillan är  $U_L = 4,13 \left( \frac{T+273}{273} \right)^{1,97}$  och vid vind 5 m/s är  $U_L = 5,81 \left( \frac{T+273}{273} \right)^{1,69}$ .

Som framgår av ekvationerna (5.5) och (5.12) är solfångarens tidskonstant när solfångaren är i drift, ( $\tau_2$ ), endast en bråkdel av den tidskonstant som gäller innan solfångaren uppnått driftstillstånd, ( $\tau_1$ ).

Man kan också visa att

$$\tau_2 = F_R \tau_3 \quad (5.17)$$

vari  $\tau_3$  är solfångarens tömningstid, dvs

$$\tau_3 = \frac{V}{\dot{m} \rho} \quad (5.18)$$

med  $V$  = fluidens volym i solfångaren,  $\rho$  = fluidens densitet och  $\dot{m}$  = fluidens massflöde genom solfångaren.

Tidskonstanten vid drift,  $\tau_2$ , är således mindre än tömningstidskonstanten,  $\tau_3$ , vilket kanske tydligare visar att  $\tau_2$  är av betydligt lägre storleksordning än  $\tau_1$ .

Sambandet mellan solfångarens värmeomvandlingsfaktor  $F_R$  och dess tidskonstanter belyses ytterligare i bilaga nr 14.

## 5.2 Vid avsvlningsfasen

Avsvlningsfasen kan karakteriseras av f"oljande moment:

1. Solf"angaren ger effekt och "ar i fortfarighetstillst"and.
2. Solen g"ar i moln, varvid solf"angaren och r"orsystemet b"orjar svalna.
3. Cirkulationspumpen forts"atter att g"a den tid det tar att "t"omma" solf"angaren, dvs att s"anka temperaturen i hela solf"angaren till  $T_i$ , vilket i regel tar 1 "a 2 minuter.
4. N"ar utg"ående solf"angaretemperatur sjunkit till magasinets bottentemperatur stoppar pumpen.

### 5.2.1 Analytiska uttryck f"or temperatur- och energi"andringen i solf"angaren.

I det "ogonblick solf"angaren inte l"angre ger uttagbar energi "ar temperaturen i solf"angaren och r"orsystemet  $T_p$ . R"aknat fr"an denna tid avtar energin och temperaturen i solf"angaren - om "ovriga faktorer "ar konstanta - enligt f"oljande:

$$q(t) = C_c (T_{p|t=0} - T_a) \cdot e^{-t/\tau} \quad (5.19)$$

$$T_p(t) = (T_{p|t=0} - T_a) \cdot e^{-t/\tau} + T_a \quad (5.20)$$

vari tidskonstanten  $\tau$  blir densamma som under uppv"armningsfasen, n"amligen

$$\tau = \frac{C_c}{U_L}$$



### 5.3 Vid omväxlande uppvärmning och avsvälning

#### 5.3.1 Temperaturförlopp i solfångare enligt analytiska uttryck

Om en solfångare exponeras för en konstant strålningsintensitet vid konstant utetemperatur och vid konstant  $U_L$ -värde och om strålningen dessemellan plötsligt avbryts kan temperaturförloppet i solfångaren beräknas med hjälp av ekvationerna i de föregående avsnitten. Sådan beräkning har gjorts i [31] för varierande instrålningsintensitet, för varierande effektiv värmekapacitet i solfångaren och för varierande längd på sol- och molnperioderna. Exempel härpå visas i figurer 5.3 a-d.

Som framgår av dessa ökar temperatursvängningarnas amplitud med minskande värmekapacitet i solfångaren och med ökande längd på sol/molnperioderna. I exemplen har det inte tagits ut någon användbar energi, men under den tid temperaturen ligger över önskad temperatur skulle energi kunna uttagas. Är den önskade temperaturen t ex  $80^{\circ}\text{C}$  ser man att den tunga solfångaren inte når upp till denna, vilket emellertid den lätta solfångaren gör. Andelen av tiden som detta sker är längre vid det längre exponeringsintervallet än vid det korta. Detta framgår enklast därav, att om man höjer upp önskad temperatur till  $90^{\circ}\text{C}$ , så ger inte heller den lätta solfångaren uttagbar energi i fallet med kort exponeringsintervall.

Exemplen visar att om en solfångare utsätts för solstrålning 50% av möjlig soltid, är det inte betydelselöst hur soltiden är fördelad under dagen och det är ej heller betydelselöst om solfångaren har stor eller liten termisk massa.

Figur 8.4

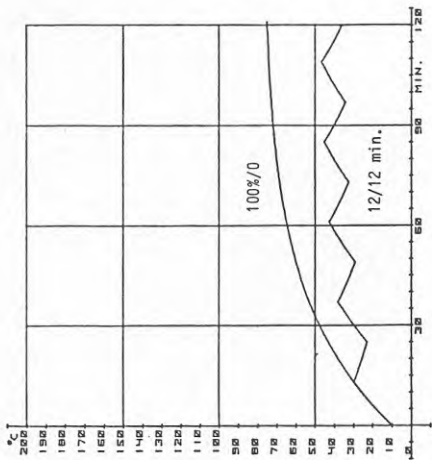
a - b

Temperaturförloppet i solfångare med

$$I = 500 \text{ W/m}^2, U_L = 4 \text{ W/(m}^2\text{K)}, U_L = U_L \left( \frac{T+273}{273} \right), (\tau\alpha) = 0,7,$$

$$T_a = 10^\circ\text{C}, A = 1,0 \text{ m}^2, G = 0 \text{ kg/s}, C_c = 12 \text{ kJ/K.}$$

Sol/molnförhållande = 12/12 resp. 6/6 min. samt 100%/0.



a

Figur 8.4

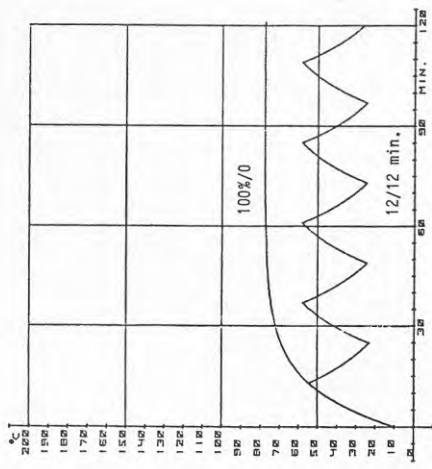
c - d

Temperaturförloppet i solfångare med

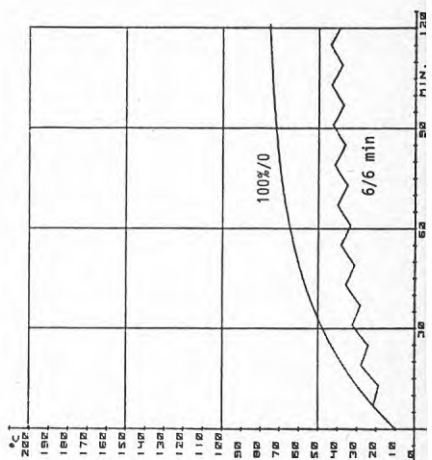
$$I = 500 \text{ W/m}^2, U_L = 4 \text{ W/(m}^2\text{K)}, U_L = U_L \left( \frac{T+273}{273} \right), (\tau\alpha) = 0,7,$$

$$T_a = 10^\circ\text{C}, A = 1,0 \text{ m}^2, G = 0 \text{ kg/s}, C_c = 4 \text{ kJ/K.}$$

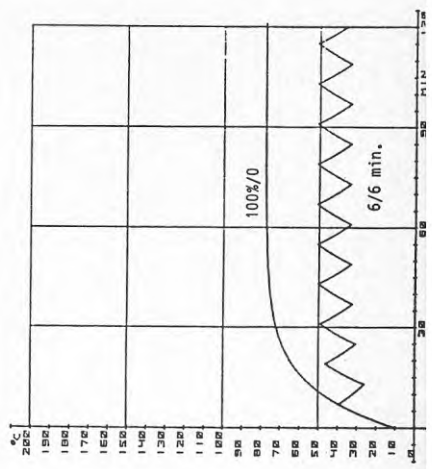
Sol/molnförhållande = 12/12 resp. 6/6 min. samt 100%/0.



c



b



d

### 5.3.2 Beräkning av temperaturförlopp, uttagbar energi och transientverkningsgrad enligt numerisk metod

#### 5.3.2.1 Vid fasta sol/molnintervall

De i föregående avsnitt redovisade ekvationerna för temperatur- och energitillväxt i solfångare är lösningar till differentialekvationer och förutsätter att faktorerna i differentialekvationerna är konstanta. Vid verkliga förhållanden är faktorerna inte konstanta och då kan det vara lämpligare att lösa differentialekvationerna numeriskt.

För att visa olika parametrars inverkan på en solfångares effektivitet har jag utgått från följande ekvation:

$$C_c \frac{dT_p}{dt} = S - U_L (T_p - T_a) - 2GC_p \left[ \frac{1 - \frac{F_R}{F_T}}{1 - F_R} \right] (T_p - T_i) \quad (5.21)$$

Ekvationen säger att energiupplagringen i solfångaren är lika med instrålningen som når absorbatoren minus värmeförlusterna minus uttagen energi. När  $F'=1$  har fluiden samma temperatur som absorbatoren och fluidens temperaturstegring i solfångaren blir

$$T_u - T_i = 2(T_p - T_i) \quad (5.22)$$

Ekvation (5.21) har lösts numeriskt enligt Runge-Kuttas metod och för följande värden på de valbara parametrarna:

Latitud =  $56^\circ$  (Lund)

Plana solfångare, riktade åt söder, lutande  $45^\circ$

Fluid = vatten

Massflöde  $G = 0,02; 0,01; 0,005$  resp.  $0,0015$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  när solfångaren ger effekt, annars 0.

$F' = 1$

$(\tau\alpha) = 0,8$  resp.  $0,72$

$U_{L_0} = 0,3$  resp.  $6$   $\text{W/m}^2\text{K}$

$n = 1$  i  $U_L = U_{L_0} \left( \frac{T_p + 273}{273} \right)^n$

$C_c = 0,2; 4,186; 12,558$  resp.  $25,116$  kJ/m<sup>2</sup>K

Dag nr 87, 174 resp. 348 och i något fall även för dag nr 130 och 260.

Andel sol under dagen = 20, 33 1/3, 50 resp. 100%.

Solperiodernas längd vid intermitterent sol = 6, 12, 30 minuter resp. dagens längd.

Molnperiodernas längd vid intermitterent sol = 0, 6, 12, 24, 30, 60 resp. 120 minuter.

$T_i = 50$  resp.  $70^\circ\text{C}$ .

Solfångaren inklusive fluid antas under natten ha antagit omgivningens temperatur,  $T_a$ .

Flödet har startat när temperaturen uppnått en temperatur 5K högre än  $T_i$ .

Parametern  $S$ , som motsvaras av  $I_T(\tau\alpha)$  i ekvation (5.6), har beräknats med hjälp av instrålningsdata enligt kapitel 2.

Vid beräkningarna har samtidigt solfångaretemperaturen och användbara energin plottats som funktion av tiden. Ett urval av dessa diagram visas i bil. 1-13. Erhållna energimängden under dagen respektive transientverkningsgraden  $\eta_{tr}$ , definierad enligt ekvation (1.5), visas i figurerna 5.4 - 5.17 som funktion av effektiv värmekapacitet,  $U_L$ -värde, inloppstemperatur, andel sol under dagen respektive dagnummer. Energimängden vid 100% sol, dvs sol från morgon till kväll, har i diagrammen reducerats till hälften vid 50% andel, till 1/3 vid 33 1/3% solandel och till 1/5 vid 20% solandel.

Figur 5.4 visar den uttagbara energimängden från en solfångare med  $U_{L0} = 6$  W/(m<sup>2</sup>K) och  $T_i = 50^\circ\text{C}$  för tre olika dagar som funktion av solfångarens effektiva värmekapacitet och med sol/molnperiodernas längd som parameter - alla parametrarna givande 50% sol under dagen. Därav framgår att den uttagbara energin inte påverkas nämnvärt av den termiska massan om solen lyser från morgon till kväll. Detta är helt i överensstämmelse med vad andra forskare redovisat. Om instrålningen däremot fördelas på kortare och flera intervall så avtar den användbara energin när solperiodernas längd avtar. Av diagrammen framgår också, att energin avtar snabbare med ökad termisk massa ju kortare dagen är.

Figur 5.5 visar transientverkningsgraden,  $\eta_{tr}$ , för samma fall som figur 5.4.

Vid ett givet  $U_L$ -värde för solfångaren ökar tidskonstanten med den termiska massan. Enligt figur 5.5 sjunker transientverkningsgraden med stigande värmekapacitet för ett givet sol/molnförhållande. Av samma figur ser man att för en given värmekapacitet ökar transientverkningsgraden med ökande längd på sol/molnperioderna. Enligt figuren är transientverkningsgraden för en solfångare med en värmekapacitet av  $12 \text{ kJ/m}^2\text{K}$  och vid 12/12 minuter sol/moln 0,70. Jämför man med en solfångare som har halva värmekapaciteten, alltså  $6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$  men för övrigt är lika med den tyngre, och som exponeras i sol/molnperioder som är hälften, alltså 6/6 minuter, så blir även i detta fall transientverkningsgraden 0,70. Man torde således istället ha kunnat rita upp diagrammet med tidskonstanten som abscissa och exponeringstiderna i form av procent av tidskonstanten som parameter. En sådan presentation skulle dock kunna leda till missförstånd, ty transientverkningsgraden är inte primärt en funktion av tidskonstanten utan av de i tidskonstanten ingående faktorerna,  $U_L$ -värdet och effektiva värmekapaciteten  $C_c$ . Således varierar transientverkningsgraden med  $U_L$ -värdet även om tidskonstanten vore oförändrad.

Figurerna 5.6 och 5.7 visar samma som figurerna 5.4 och 5.5 men gällande för 33 1/3 sol under dagen.

Figurerna 5.8 och 5.9 visar samma som 5.4 och 5.5 men gällande för 20% sol under dagen.

En jämförelse mellan de olika diagrammen visar, att  $\eta_{tr}$  avtar snabbare med ökad termisk massa ju kortare del av dagen solen lyser. Detta belyses också av figur 5.10, i vilken  $\eta_{tr}$  har plottats som funktion av andel sol under dagen för en given solfångare.

Figurerna 5.11 och 5.12 visar samma som figurerna 5.4 och 5.5 men gällande för  $T_i = 70^\circ\text{C}$ .

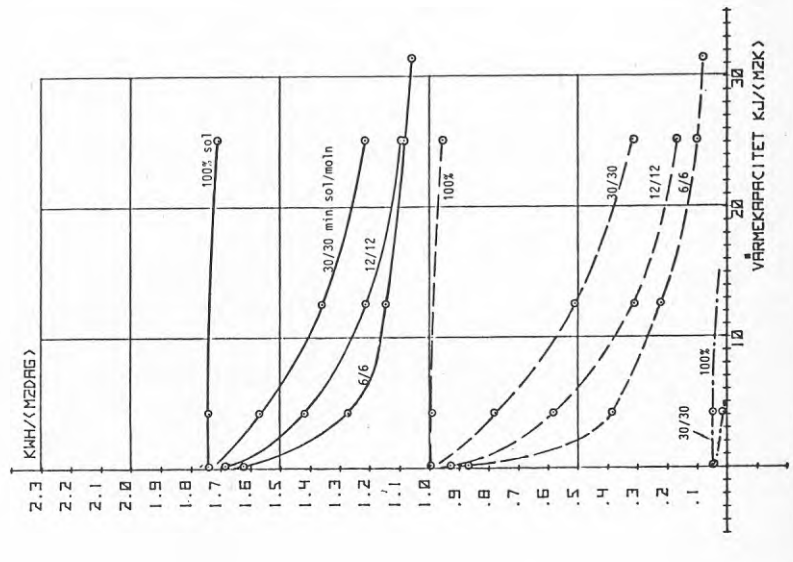
En jämförelse mellan figur 5.5 och 5.12 visar, att  $\eta_{tr}$  avtar snabbare med ökad termisk massa vid högre inloppstemperatur,  $T_i$ .

Figur 5.4

Energiutbytet i kWh/(m<sup>2</sup>dag) för solfångare vid varierende effektiv värme kapacitet och varierende sol/mo införhållanden och vid följande data:

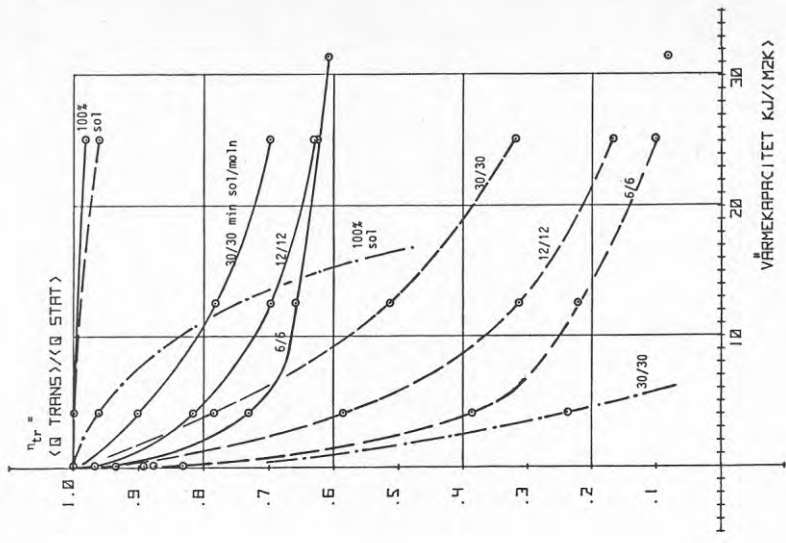
$U_0 = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,  $(\alpha) = 0,8$ ,  $T_i = 50^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_s = 50\%$ ,  $\gamma = 45^\circ$ ,  
 $\phi = 56^\circ$  (Lund),  $G = 0,02 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}$ .

— = dag 174      kurvorna för 100% sol redovisar  
 - - - = dag 87      hälften av energiutbytet vid  
 - · - · = dag 348      en hel dags solsken.



Figur 5.5

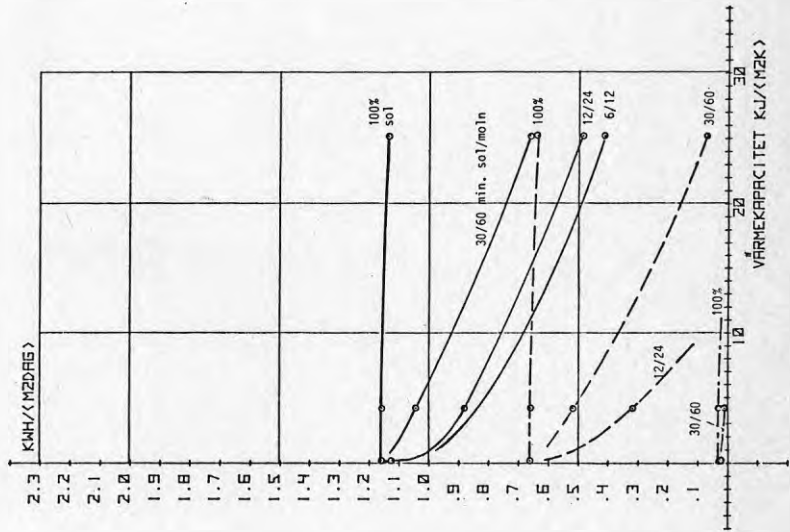
Transientverkningsgraden för solfångarna enligt figur 5.4.





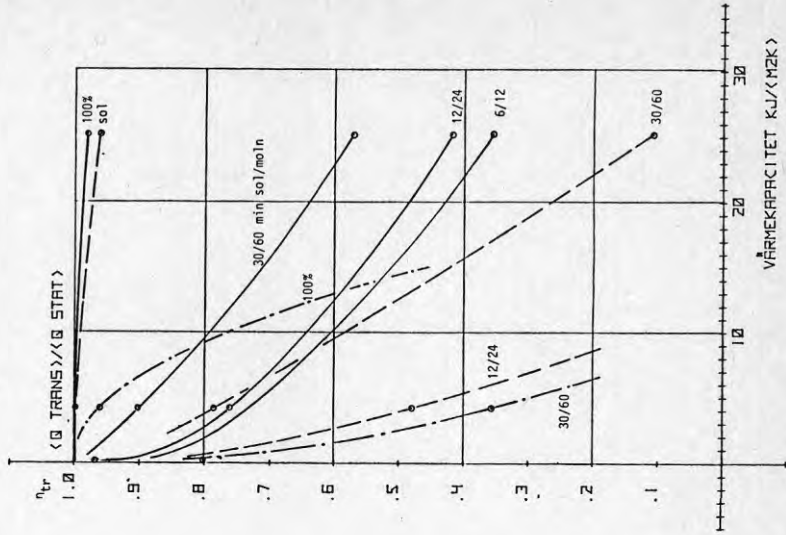
Figur 5.6

Samma som figur 5.4 men  $\sigma_s = 33 \frac{1}{3} \%$ .  
Kurvorna för 100% sol redovisar en tredjedel av energitbytet vid en hel dags solskin.



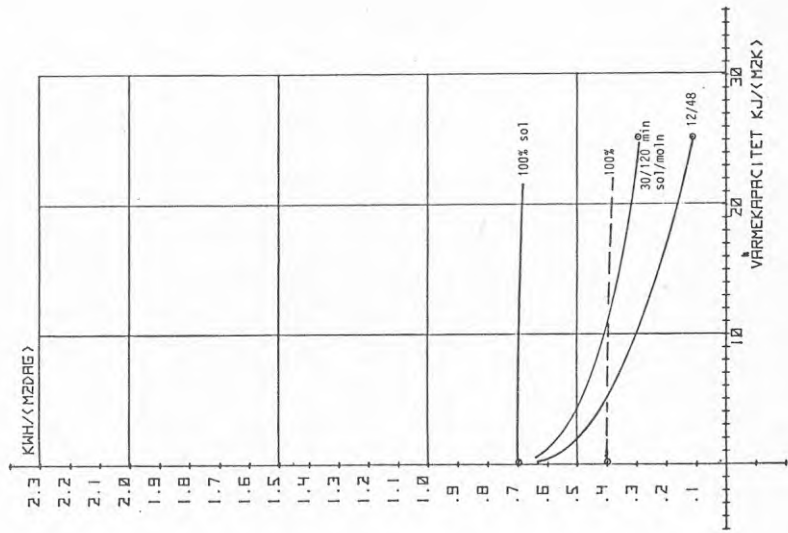
Figur 5.7

Transientverkningsgraden för solfångare enligt figur 5.6

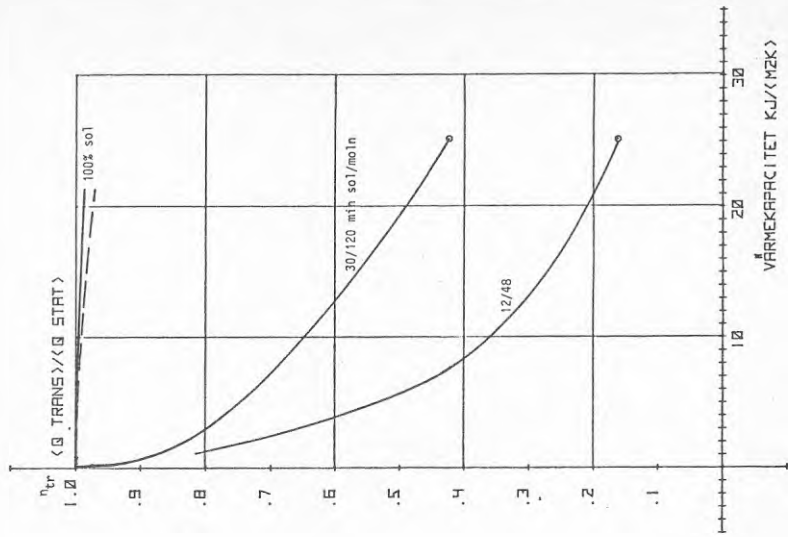


Figur 5.8

Samma som figur 5.4 men  $\alpha_s = 20\%$ .  
 Kurvorna för 100% sol redovisar en femtedel av energiutbyttet  
 vid en hel dags solstken.

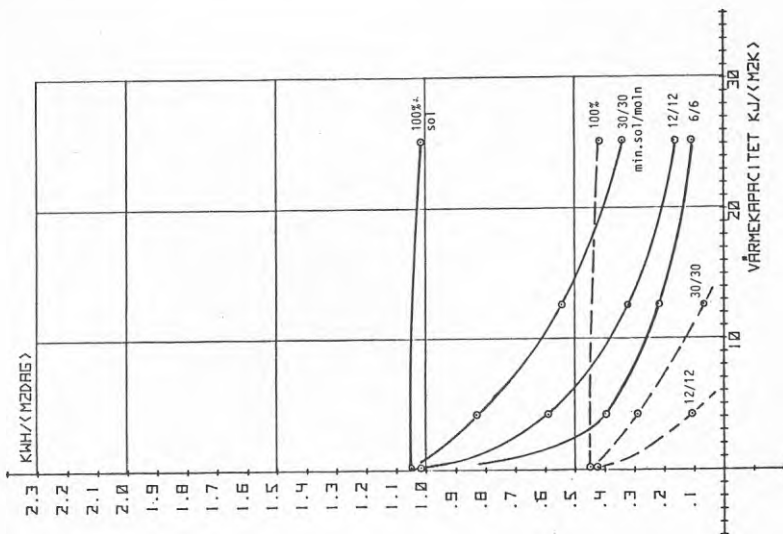


Figur 5.9  
 Transientverkningsgraden för solfångare enligt figur 5.8



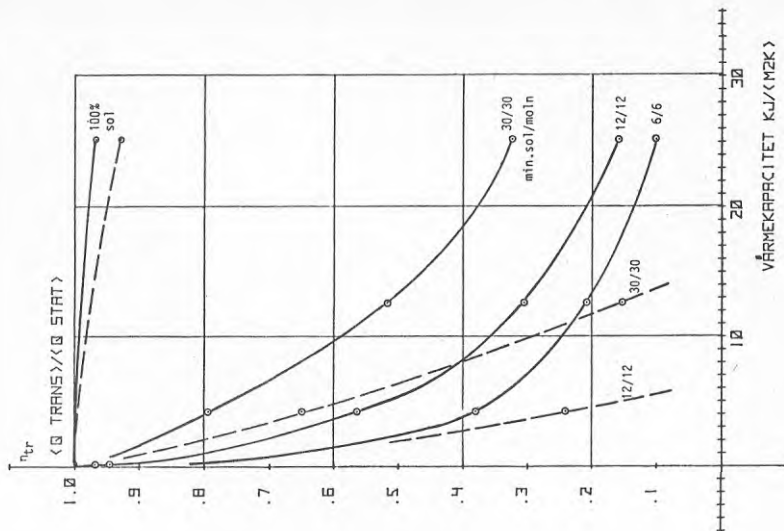


Figur 5.11 Samma som figur 5.4 men  $T_i = 70^{\circ}\text{C}$ .



Figur 5.12

Transientverkningsgraden för solfångare enligt figur 5.11



I figur 5.13 har  $\eta_{tr}$  plottats som funktion av inloppstemperaturen för en given solfångare. Därav framgår att  $\eta_{tr}$  avtar med stigande inloppstemperatur,  $T_i$ .

Figurerna 5.14 och 5.15 visar samma som 5.4 och 5.5 men gällande för  $U_{L0}$ -värde = 3,0 W/(m<sup>2</sup>K).

En jämförelse mellan diagrammen visar att  $\eta_{tr}$  avtar snabbare med ökad värmekapacitet vid stigande  $U_L$ -värde.

I figur 5.16 har  $Q(U_L)/Q(U_L=0)$  plottats som funktion av solfångarens  $U_L$ -värde. Den användbara energin avtar med stigande  $U_L$ -värde. Figuren visar att detta avtagande sker snabbare ju kortare sol/molnperioderna är, respektive ju kortare dagen är.

Transmissionsproduktens ( $\tau\alpha$ ) inverkan på verkningsgraden har också undersökts. Då beräkningarna genomförts för endast två värden som ligger nära varandra, ( $\tau\alpha$ )=0,80 respektive 0,72, är det föga upplysande att redovisa dessa i diagramform, varför resultatet anges i tabellform. ( $\tau\alpha$ )-värdena motsvarar transmissionen genom 2 respektive 3 glas.

**Tabell 5.1** Förhållandet mellan nyttiggjort färme vid ( $\tau\alpha$ )=0,72 respektive 0,80. För övrigt gäller  
 Ort: Lund Dag nr 174  
 Plan solfångare Starttemp. 5 K över  
 Lutning 45°, mot söder magasinstemperatur  
 $U_{L0} = 6$  W/(m<sup>2</sup>K)  $G = 0,02$  kg/(m<sup>2</sup>s)  
 $C_c = 12,56$  kJ/(m<sup>2</sup>K)

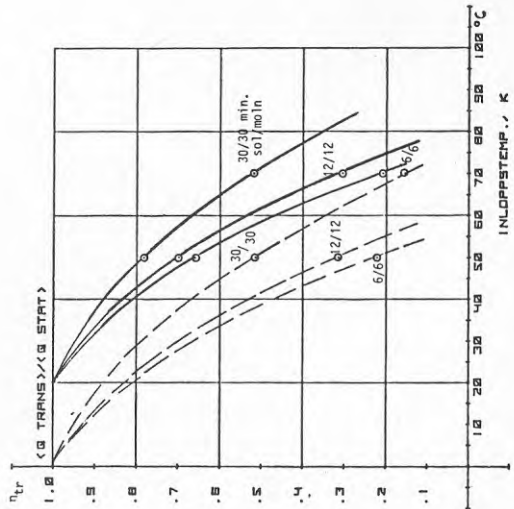
Sol	MoIn	( $\tau\alpha$ )	Magasinstemperatur			
			50°C		70°C	
			kWh	%	kWh	%
100%	0	0,80	3,447	100	2,065	100
100%	0	0,72	2,810	81,5	1,527	74,0
30 min	30 min	0,80	1,360	100	0,543	100
30 min	30 min	0,72	1,053	77,4	0,332	61,1

Figur 5.13

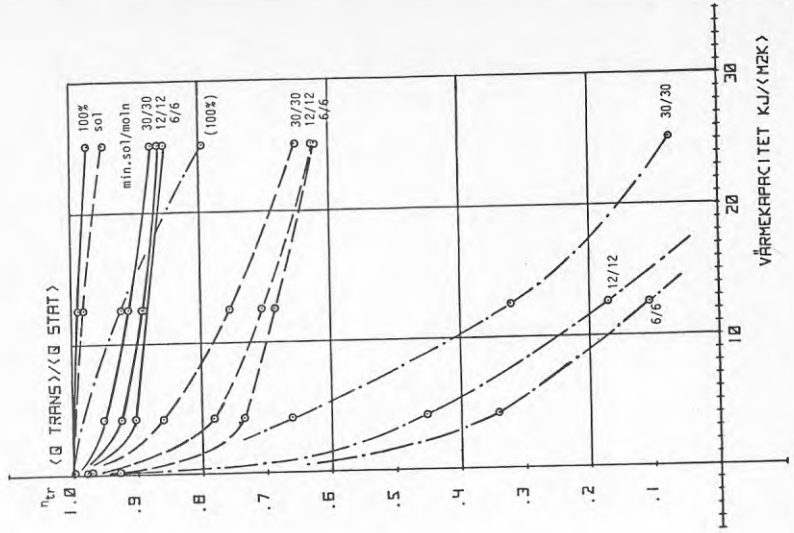
Transientverkningsgraden vid varierende inloppstemperatur för solfångare vid följande data:  
 $U_L = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $(\tau\alpha) = 0,8$ ,  $C = 12,56 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $\gamma = 45^\circ$ ,  
 $\phi = 56^\circ$  (Lund),  $\sigma_s = 50\%$ ,  $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .

———— = dag 174;  $\bar{T}_a = +20^\circ\text{C}$

----- = dag 87;  $\bar{T}_a = +1^\circ\text{C}$



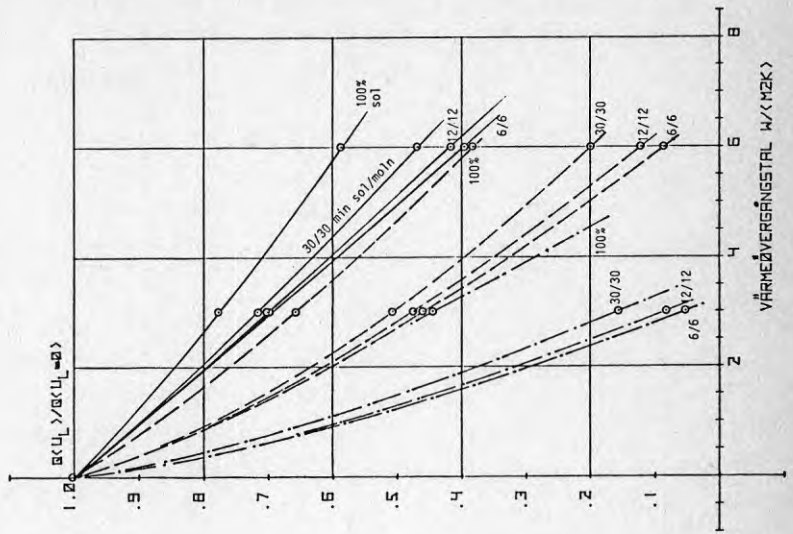
Figur 5.15 Transientverkningsgraden för solfångare enligt figur 5.14



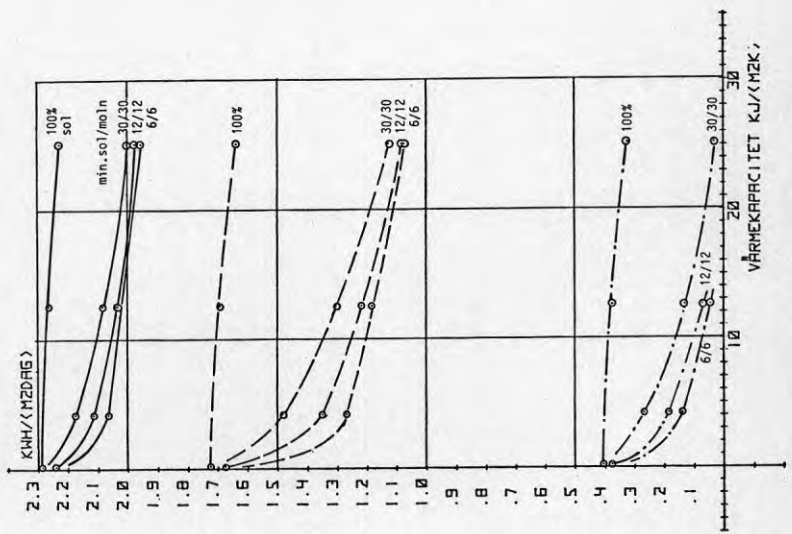


Figur 5.16 Relativa energiutbytet vid varierande värmeövergångstal  $U_{L_0}$  för solfångare vid följande data:  
 $C_c = 12,56 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $(\tau\alpha) = 0,8$ ,  $T_i = 50^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_s = 50\%$ ,  $\gamma = 45^\circ$ ,  
 $\phi = 56^\circ$  (Lund),  $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .  $T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}$ .

— = dag 174  
 - - - = dag 87  
 - · - · = dag 348



Figur 5.14 Samma som figur 5.4 men  $U_{L_0} = 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



VÄRMEKAPACITET  $\text{KJ}/(\text{M}^2\text{K})$

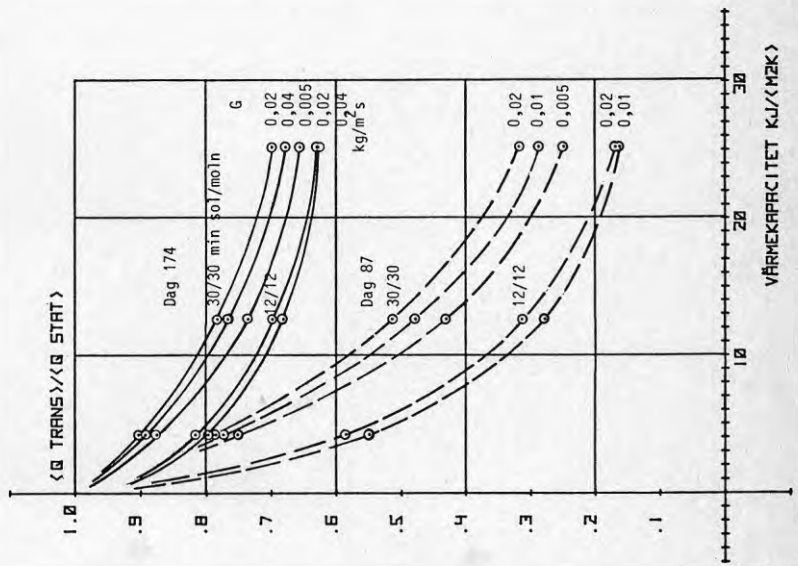
Det anses att försmutsning av en solfångares glas har mycket liten inverkan på nyttiggjord värme. Av tabellen kan man dock se att en försmutsning som inte reducerar transmissionen mer än om solfångaren försågs med ytterligare en ren glasskiva, reducerar vid angivna förhållanden den uttagbara energin med 18,5% vid 100% sol och 50°C magasinstemperatur och med 22,6% vid omväxlande 30 minuter sol och 30 minuter moln. Vid 70°C magasinstemperatur blir motsvarande värden 26,0 respektive 38,9%. Värdena gäller för dag nr 174. Vid kortare dagar förorsakar försmutsningen procentuellt ännu större förluster.

Som framgår av tabellens huvud är angivna procentsatser inga verkningsgrader. Den vid 50°C magasinstemperatur,  $(\tau\alpha) = 0,80$  och 30/30 minuter sol/moln nyttiggjorda energimängden 1,360 kWh motsvarar en transientverkningsgrad av 78,2%.

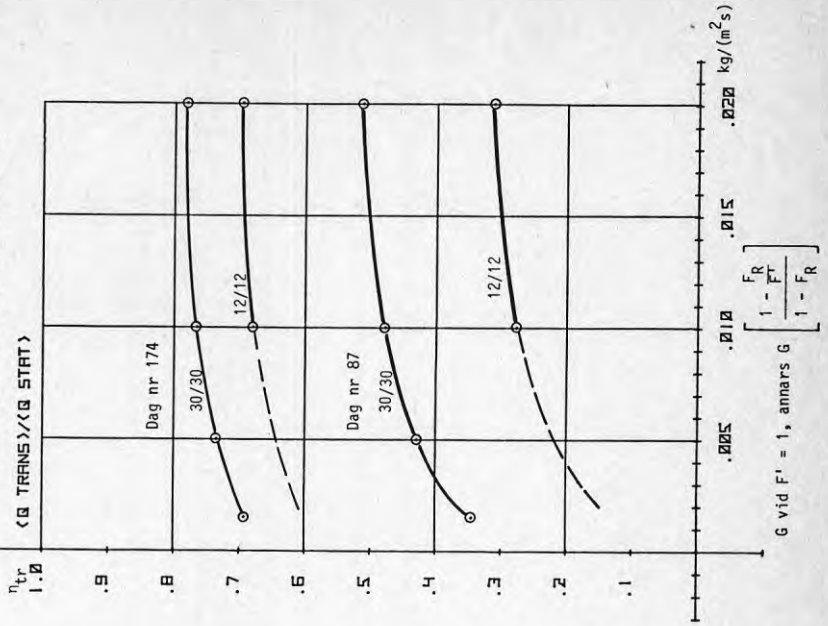
Figur 5.17 visar transientverkningsgraden för en del av fallen i figur 5.5, men dessutom vid olika massflöden genom solfångaren. Härav framgår att transientverkningsgraden sjunker med minskande massflöde. Detta framgår också av figur 5.18, som visar transientverkningsgraden som funktion av massflöde för en solfångare med effektiv värmekapacitet  $C_C = 12,56 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ . Abscissan i diagrammet gäller även för  $G(1 - \frac{F_R}{F_T})(1 - F_R)^{-1}$ , varför diagrammet även visar inflytandet av ändring i  $F'$  och/eller  $F_R$  om uttrycket inom klammer beräknas. I figur 5.19 visas detta uttryck som funktion av  $F'$  vid två olika värden på  $U_L$ . Därav kan man utläsa att om man ändrar en solfångarkonstruktion så att  $F'$  minskar från 1 till 0,96 men  $U_{L0}$  bibehålles oförändrat vid 6,0, sjunker uttrycket inom parentes från 1 till 0,5. Detta innebär att konstruktionsändringen påverkar transientverkningsgraden lika mycket som en minskning av massflödet från 0,02 till 0,01  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) när  $F'$  är 1.

Är  $F'$  ej lika med 1 innebär en ändring av massflödet att även  $(1 - \frac{F_R}{F_T})(1 - F_R)^{-1}$  ändrar sig, eftersom  $F_R$  är en funktion av  $G$  enligt ekvation (5.7), ( $G = \dot{m}/A$ ). Sambandet åskådliggöres i figur 5.20 för solfångare med  $U_{L0} = 6,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  och vid  $T_i = 50^\circ\text{C}$ . Vid t ex  $G = 0,10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  och  $F' = 0,98$  ger figur 5.20 värdet 0,008, vilket används som ingångsvärde i figur 5.18 för uttagning av transientverkningsgraden.

Figur 5.17  
 Transientverkningsgraden för solfångare.  
 Samma som figur 5.5 men dessutom vid andra massflöden.



Figur 5.18  
 Transientverkningsgraden som funktion av massflödet  $G$  vid  $F' = 1$ , resp. som funktion  $G(1 - \frac{F_R}{F'}) (1 - F_R)^{-1}$  för solfångare vid av produktten  
 dag nr 87 resp. 174,  $C_c = 12,56 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $U_L = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $T_i = 50^\circ\text{C}$   
 Starttemp =  $55^\circ\text{C}$ ,  $(\tau\alpha) = 0,8$ ,  $\sigma_s = 50\%$ ,  $\gamma = 45^\circ$ ,  $\phi = 56^\circ$  (Lund),  
 sol/molnperioder 30/30 resp. 12/12 min.

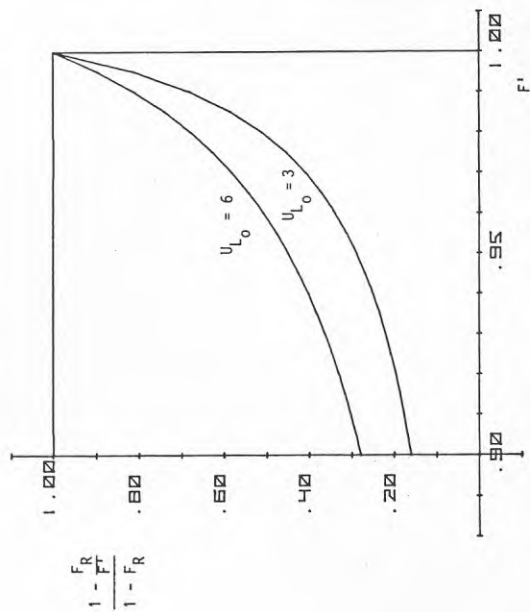


Figur 5.19 Uttrycket  $(1 - \frac{F_R}{F})^{-1}$  som funktion av  $F'$  för solfångare med

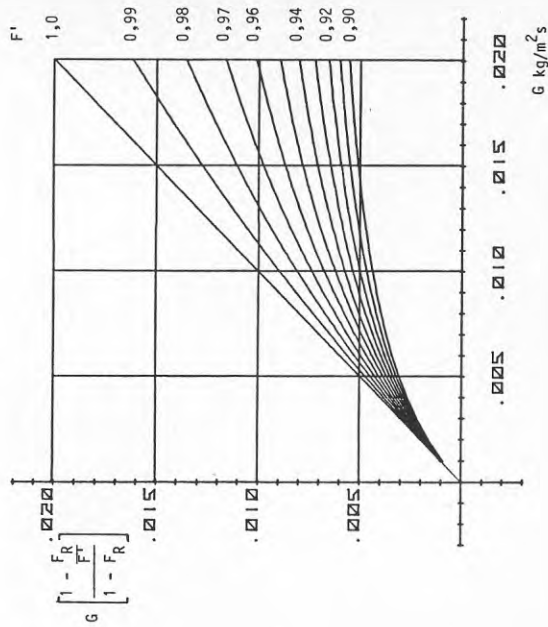
följande data:

$G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ ,  $T_i = 50^\circ\text{C}$ ,  $U_{L_0} = 3$  resp.  $6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$$U_L = U_{L_0} \cdot \frac{T_i + 273}{273}, \quad F_R \text{ enligt ekvation (5.7)}$$



Figur 5.20 Produkten  $G(1 - \frac{F_R}{F})(1 - F_R)^{-1}$  som funktion av massflödet  $\dot{m}$  vid varierande värde på  $F'$ ,  $U_{L_0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,  $T_i = 50^\circ\text{C}$ .



För att förhindra upprepade till- och frånslagningar av cirkulationspumpen, låter man solfångartemperaturen stiga några grader över inloppstemperaturen innan pumpen startar [15]. I USA låter man denna övertemperatur vara 10 ä 20 K. För att belysa övertemperaturens inverkan på den uttagbara energin, har energimängden för en dag som funktion av övertemperaturen beräknats för en solfångare vid ett visst sol/molnförhållande. Som framgår av figur 5.21 avtar den uttagbara energimängden betydligt vid ökande övertemperatur.

I figur 5.22 redovisas den uttagbara energimängden per dag som funktion av dag på året, dels för en solfångare med termiska massan = 0 och 50% sol, dels för en solfångare med effektiva termiska massan = 25,12 kJ/(m<sup>2</sup>K) och vid 30/30 minuter sol/molnförhållande. Ytorna mellan abscissan och respektive kurva är ett mått på under året insamlad energimängd. Hade skillanden mellan övre och undre kurvan varit konstant, hade ytorna varit kongruenta och då hade följande likhet gällt:

$$\frac{Q_u(C) \text{ år}}{Q_u(C=0) \text{ år}} = \left[ \frac{\hat{Q}_u(C)}{\hat{Q}_u(C=0)} \right]^2 \quad (5.23)$$

med  $\hat{Q}_u$  = energimängden bästa dagen.

Nu är ytorna inte kongruenta, varför den transienta årsmedelverkningsgraden får beräknas, varvid gäller

$$\eta_{tr} \text{ år} = \frac{\sum_{d=1}^{365} Q_u(C)}{\sum_{d=1}^{365} Q_u(C=0)} < (\hat{\eta}_{tr})^2 \quad (5.24)$$

med  $\hat{\eta}_{tr}$  = transientverkningsgraden bästa dagen.

I figur 5.23 har värdena enligt figur 5.22 normerats till  $\hat{Q}_u(C)$  och därur kan för ifrågavarande solfångare direkt uttagas att

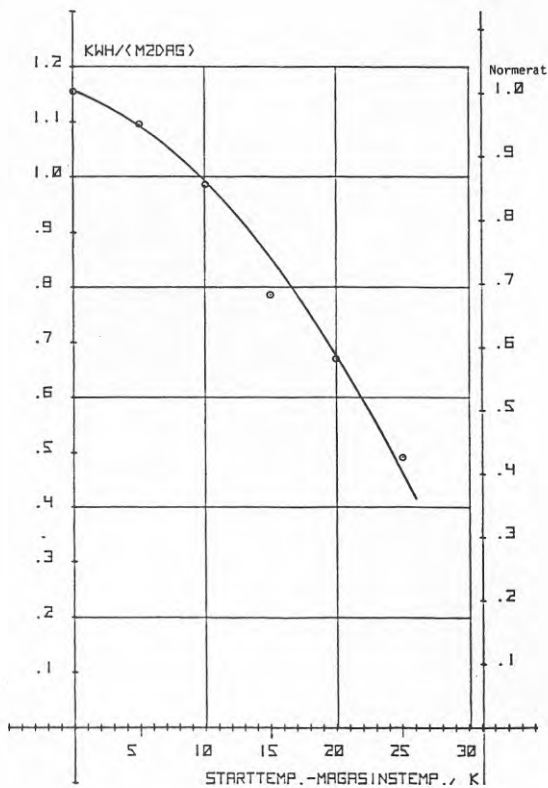
$$\eta_{tr} \text{ år} < 0,7^2$$

vilket gäller om sol/molnförhållandet hela året är 30/30 minuter.

Figur 5.21

Energiutbytet vid varierande övertemperatur vid pumpstart för solfångare vid följande data:

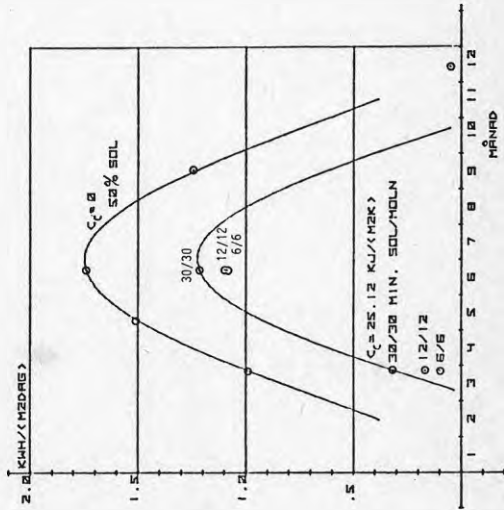
Dag = 174,  $C_c = 25,12 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $U_L = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $(\tau\alpha) = 0,8$ ,  
 $T_i = 50^\circ\text{C}$ ,  $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ , 12/12 minuter sol/moln.





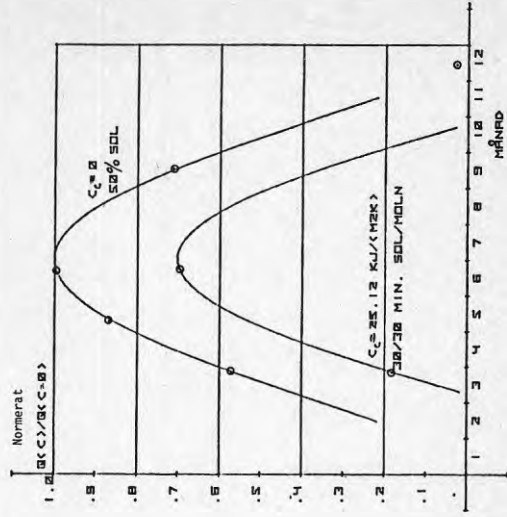
Figur 5.22

Energiutbytet i kWh/(m<sup>2</sup>dag) under året för solfångare vid  $\gamma = 45^\circ$ ,  $\phi = 56^\circ$  (Lund),  $T_i = 50^\circ\text{C}$ ,  $C_c = 0$  resp. 25, 12 kJ/(m<sup>2</sup>k),  $U_L = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $(-\tau\alpha) = 0,8$ ,  $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ .



Figur 5.23

Samma som Figur 5.22 men normalerat. Utbytet bästa dag för solfångaren med  $C_c = 0$  satt till 1.



En sammanfattning av ovanstående jämförelser visar att om man varierar en parameter i taget och låter övriga vara konstanta, så avtar transientverkningsgraden med

- stigande effektiv värmekapacitet
- stigande  $U_L$ -värde
- avtagande  $(\tau\alpha)$
- avtagande dagslängd
- avtagande sol/molnperiodlängd
- avtagande solandel under dagen
- stigande temperaturnivå i solfångare
- stigande övertemperatur vid pumptillslag
- avtagande massflöde  $G$
- avtagande  $F'$
- avtagande  $F_R$

För att ytterligare belysa detta har figur 5.24 gjorts upp. Figuren visar hur transientverkningsgraden för nedan redovisade solfångare procentuellt ändras om en parameter i taget procentuellt förändras medan de övriga parametrarna är konstanta.

Utgångsdata gäller för en plan solfångare och är som följer:

$$C_c = 12,56 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$U_{L_0} = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$n = 1 \text{ i } U_L = U_{L_0} \left( \frac{T_p + 273}{273} \right)^n$$

$$F' = 1$$

$$(\tau\alpha) = 0,8$$

$$\gamma = 45^\circ \text{ mot söder}$$

$$T_M = 323 \text{ K } (50^\circ\text{C})$$

$$\text{Starttemp} = 328 \text{ K } (55^\circ\text{C})$$

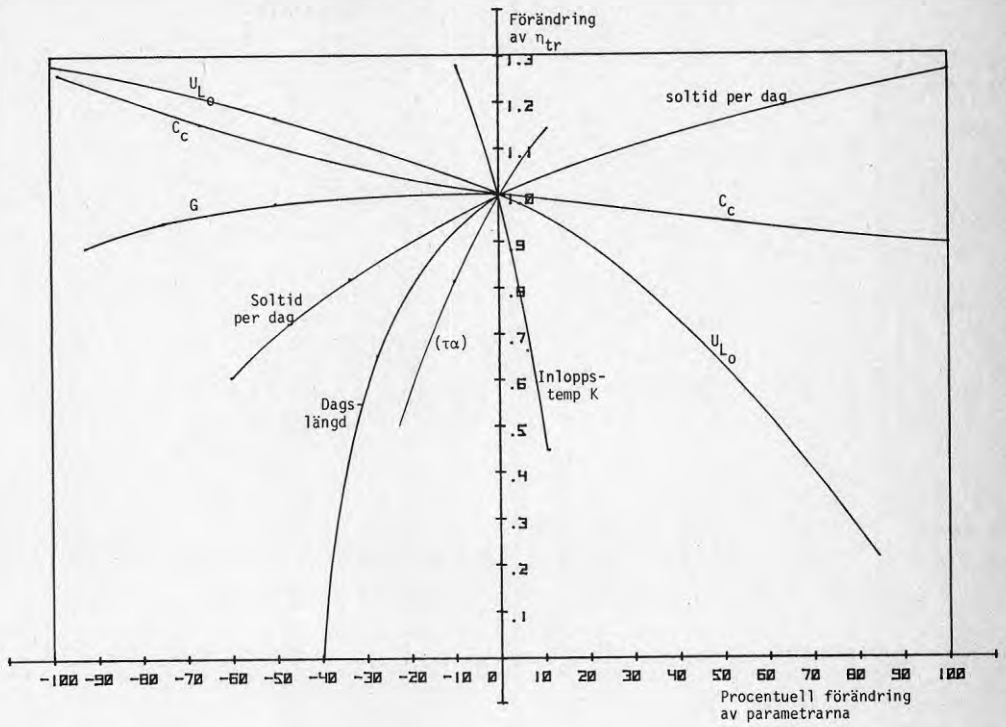
$$G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$$

$$\text{Dagens längd} = 17,258 \text{ h}$$

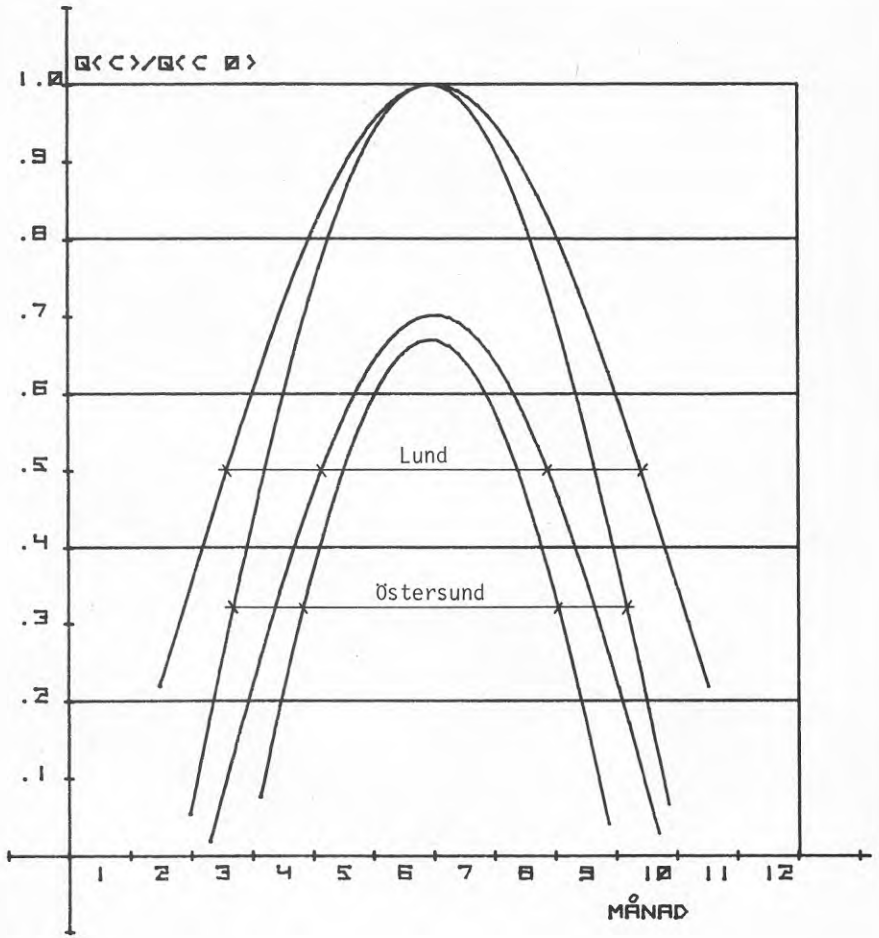
$$\varphi = 56^\circ \text{ (Lund)}$$

$$\text{Solperiodlängd} = \text{molnperiodlängd} = 30 \text{ minuter}$$

Figur 5.24 Transientverkningsgradens förändring vid en procentuell förändring av en parameter i taget gällande för en viss solfångare med data enligt text



Figur 5.25 Samma som figur 5.23 men gällande även för latitud  $63^{\circ}\text{N}$  (Östersund)



Dessa utgångsdata ger transientverkningsgraden 78,2%, vilket i figur 5.24 satts till 1,0.

Kurvorna gäller enbart för den redovisade solfångaren. Ändras mer än en parameter i taget blir den resulterande förändringen av transientverkningsgraden inte lika med produkten av respektive parameters förändring av transientverkningsgraden.

Eftersom transientverkningsgraden avtar med dels minskande instrålningseffekt, dels ökande skillnad mellan solfångaretemperatur och omgivningstemperatur, kommer transientverkningsgraden att bli beroende av var solvärmeanläggningen är stationerad. Vid för övrigt lika förhållanden kommer transientverkningsgraden att bli lägre ju längre norrut anläggningen är placerad. För att belysa detta har transientverkningsgraden för en anläggning enligt figur 5.22 men med placeringsort Östersund istället för Lund beräknats. Resultatet visas i figur 5.25.

#### 5.3.2.2 Vid varierande sol/molnintervall

De i förra avsnittet framräknade transientverkningsgraderna,  $\eta_{tr}$ , är baserade på sol/molnfördelningar under dagen som inte existerar i verkligheten. Värdet i de konstlade fördelningarna ligger i att man inte behöver känna de verkliga fördelningarna för att kunna påvisa vilka faktorer som inverkar på den användbara energimängd som kan erhållas från en solfångare vid transienta förlopp.

Givetvis skulle det vara värdefullt om en genomsnittlig transientverkningsgrad kunde beräknas för en verklig dag. Eftersom förloppen ej är linjära, existerar ingen medeldag för vilken beräkningen kan ske. Blandar man slumpmässigt sol- och molnperioderna som kan erhållas ur frekvenskvationerna [30] och gör detta t ex 1000 gånger och beräknar den uttagbara energimängden för var och en av dessa 1000 dagar och tar medelvärdet av dessa, får man ett medelvärde som inte kan vara riktigt. Anledningen till detta är att ett sådant medelvärde skulle förutsätta att det inte existerade något samband mellan två näraliggande solperioders längd. Ett samband måste dock rimligen finnas, eftersom växlingen mellan sol och moln bestäms av det för dagen aktuella vädret, vilket därigenom kommer att influera samtliga sol- och molnperioder under dagen.

Blandningen av sol- och molnperioder borde kunna ske med hjälp av någon statistisk modell. En sådan redovisas också i [31]. Emellertid saknas tillräckligt statistiskt underlag för bestämning av storleken av de i modellen ingående konstanterna. Jag har därför inte använt denna modell för att visa hur varierande sol/molnintervall påverkar transientverkningsgraden utan istället förfarit på följande sätt.

Jag har för dag nr 87 och 174 valt ut frekvenskvationer för sol- respektive molnperioder, som legat i mitten vid mina mätningar. Dessa dagars sammansättning framgår av figurerna 5.26 - 5.29. Sol- och molnperioderna har jag blandat på två olika sätt - ett som är gynnsamt och ett som är ogynnsamt för solfångaren. För båda dessa dagar har temperaturförloppet, användbara energimängden samt transientverkningsgraden beräknats för solfångare med olika effektiv värmekapacitet. Se figurerna 5.30 och 5.31 samt bilagorna 12 och 13.

Utgångsläget har varit att solen varit framme 50% under dagen. Vid den bästa fördelningen träffades solfångaren av 74,0% sol vid dag nr 174 och 60,8% vid dag nr 87. Vid den sämsta fördelningen blev motsvarande värden 29,7 respektive 41,2%. Anledningen till att det kunde bli så lågt värde för sommardagen beror på att dagarna fick börja med den längsta solperioden. För sommardagen hann alltså solen lysa en längre tid innan solen gick upp över solfångarens horisont.

För solfångaren enligt figur 5.10 har transientverkningsgraden vid "bästa" och "sämsta" sol/molnfördelning lagts in i figur 5.32 Dessa får anses representera ytterlighetsfall. För genomsnittsdagen kommer transientverkningsgraden att bli mindre än vid "bästa" och högre än vid "sämsta" sol/molnfördelning. Ett band har i figuren lagts in för vardera dagen (dag nr 87 respektive 174) som ett tänkbart medelvärdesområde.

Vid dag nr 174, som har solsannolikheten 50% i Lund, skär genomsnittsbandet vid 50% sol 30-minuterskurvan. Transientverkningsgraden,  $\eta_{tr}$ , beräknad med hjälp av fasta 30-minutersintervall av sol och moln, kan således gälla för "verkliga" dagar. Tills dess mer statistiskt material framkommer, får detta gälla som en hypo-



Solförhållanden dag nr 87

Frekvensfunktion:

$$v = 52,784 \cdot \lambda^{-2,0}$$

Antal perioder

$$\leq 1,0 \text{ min} = 53 \text{ st}$$

$$> 1,0 \text{ min} = 52 \text{ st}$$

Periodernas medellängd:

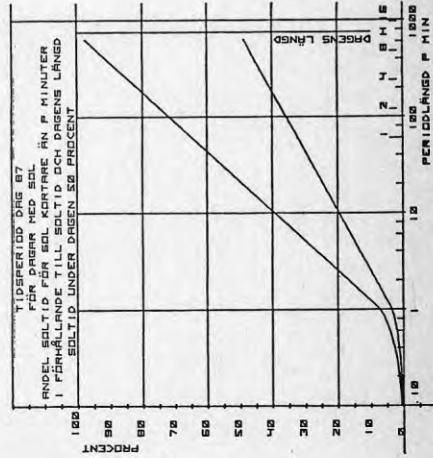
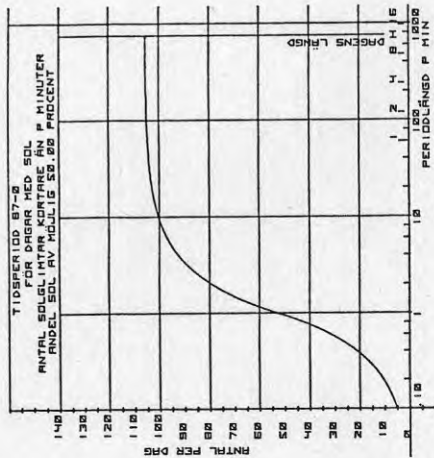
$$\text{samtliga} = 3,58 \text{ min}$$

$$> 1,0 \text{ min} = 6,72 \text{ min}$$

Specifikation över perioder

$$> 1,0 \text{ min:}$$

1.010  
1.029  
1.050  
1.071  
1.093  
1.116  
1.140  
1.166  
1.192  
1.220  
1.248  
1.278  
1.310  
1.344  
1.379  
1.416  
1.455  
1.496  
1.540  
1.586  
1.635  
1.687  
1.743  
1.803  
1.866  
1.935



Figur 5.27

Frekvensfunktion:

$$v = 16,480 \cdot \lambda^{-1,696}$$

Antal perioder

$$\leq 1,0 \text{ min} = 81 \text{ st}$$

$$> 1,0 \text{ min} = 23 \text{ st}$$

Periodernas medellängd

$$\text{samtliga} = 3,56 \text{ min}$$

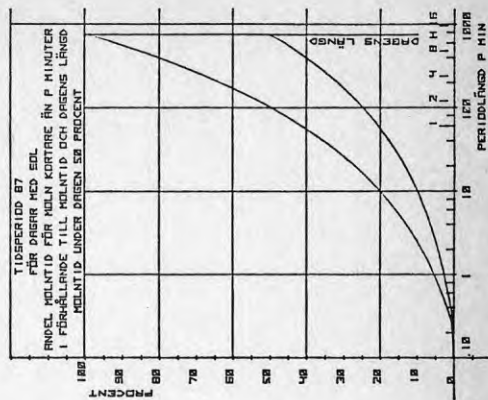
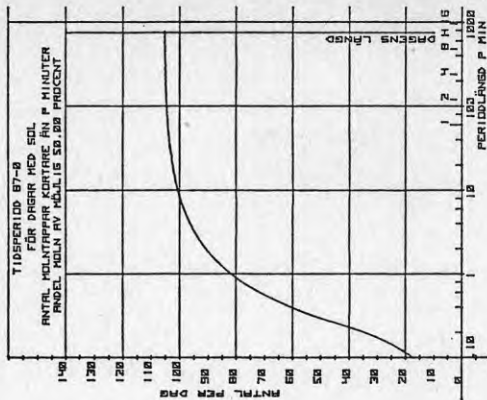
$$> 1,0 \text{ min} = 14,80 \text{ min}$$

Specifikation över perioder

$$> 1,0 \text{ min:}$$

1.031  
1.059  
1.074  
1.259  
1.354  
1.463  
1.587  
1.729  
1.896  
2.091  
2.323  
2.602  
2.944  
3.365  
3.910  
4.616  
5.571  
6.918  
8.931  
12.192  
18.175  
31.811  
237.213

Molnförhållanden dag nr 87



Figur 5.28 Solförhållanden dag nr. 174

Frekvensfunktion:

$$v = 33,307 \cdot \lambda^{-1,8}$$

Antal perioder

- ≤ 1,0 min = 33 st
- > 1,0 min = 41 st

Periodernas medellängd

- samtliga = 7,0 min
- > 1,0 min = 12,22 min

Specifikation över perioder

- > 1,0 min:

1.015	2.490
1.047	2.444
1.081	2.327
1.116	3.035
1.154	3.272
1.194	3.545
1.236	3.861
1.282	4.233
1.331	4.674
1.382	5.085
1.436	5.456
1.493	5.870
1.553	6.370
1.617	6.922
1.682	7.513
1.750	8.139
1.820	8.803
1.892	9.506
1.967	10.247
2.045	11.023
2.125	11.833
2.205	12.673
2.285	13.543
2.365	14.441
2.445	15.366
2.525	16.317
2.605	17.293
2.685	18.293
2.765	19.316
2.845	20.361
2.925	21.427
3.005	22.513
3.085	23.619
3.165	24.744
3.245	25.890
3.325	27.041
3.405	28.206
3.485	29.384
3.565	30.574
3.645	31.774
3.725	32.984
3.805	34.203
3.885	35.431
3.965	36.667
4.045	37.911
4.125	39.161
4.205	40.416
4.285	41.676
4.365	42.941
4.445	44.211
4.525	45.476
4.605	46.744
4.685	48.013
4.765	49.279
4.845	50.544
4.925	51.806
5.005	53.063
5.085	54.316
5.165	55.563
5.245	56.803
5.325	58.034
5.405	59.256
5.485	60.469
5.565	61.673
5.645	62.867
5.725	64.051
5.805	65.224
5.885	66.376
5.965	67.516
6.045	68.644
6.125	69.759
6.205	70.861
6.285	71.950
6.365	73.026
6.445	74.089
6.525	75.139
6.605	76.176
6.685	77.199
6.765	78.206
6.845	79.197
6.925	80.171
7.005	81.127
7.085	82.064
7.165	82.982
7.245	83.881
7.325	84.761
7.405	85.621
7.485	86.461
7.565	87.281
7.645	88.081
7.725	88.871
7.805	89.641
7.885	90.391
7.965	91.121
8.045	91.831
8.125	92.521
8.205	93.191
8.285	93.841
8.365	94.471
8.445	95.081
8.525	95.671
8.605	96.241
8.685	96.781
8.765	97.301
8.845	97.791
8.925	98.261
9.005	98.711
9.085	99.141
9.165	99.551
9.245	99.941
9.325	100.311
9.405	100.661
9.485	100.991
9.565	101.301
9.645	101.591
9.725	101.861
9.805	102.111
9.885	102.341
9.965	102.551
10.045	102.741
10.125	102.911
10.205	103.061
10.285	103.191
10.365	103.301
10.445	103.391
10.525	103.461
10.605	103.511
10.685	103.541
10.765	103.551
10.845	103.541
10.925	103.511
11.005	103.461
11.085	103.391
11.165	103.301
11.245	103.191
11.325	103.061
11.405	102.911
11.485	102.741
11.565	102.551
11.645	102.341
11.725	102.111
11.805	101.861
11.885	101.591
11.965	101.301
12.045	100.991
12.125	100.661
12.205	100.311
12.285	99.941
12.365	99.551
12.445	99.141
12.525	98.711
12.605	98.261
12.685	97.791
12.765	97.301
12.845	96.781
12.925	96.241
13.005	95.671
13.085	95.081
13.165	94.471
13.245	93.841
13.325	93.191
13.405	92.521
13.485	91.831
13.565	91.121
13.645	90.391
13.725	89.641
13.805	88.871
13.885	88.081
13.965	87.281
14.045	86.461
14.125	85.621
14.205	84.761
14.285	83.881
14.365	82.981
14.445	82.061
14.525	81.121
14.605	80.171
14.685	79.197
14.765	78.206
14.845	77.199
14.925	76.176
15.005	75.139
15.085	74.089
15.165	73.026
15.245	71.950
15.325	70.861
15.405	69.759
15.485	68.644
15.565	67.516
15.645	66.376
15.725	65.224
15.805	64.051
15.885	62.867
15.965	61.673
16.045	60.469
16.125	59.256
16.205	58.034
16.285	56.781
16.365	55.506
16.445	54.209
16.525	52.891
16.605	51.551
16.685	50.181
16.765	48.781
16.845	47.351
16.925	45.891
17.005	44.401
17.085	42.881
17.165	41.331
17.245	39.751
17.325	38.141
17.405	36.501
17.485	34.831
17.565	33.131
17.645	31.401
17.725	29.641
17.805	27.851
17.885	26.031
17.965	24.181
18.045	22.301
18.125	20.391
18.205	18.451
18.285	16.481
18.365	14.481
18.445	12.441
18.525	10.371
18.605	8.281
18.685	6.171
18.765	4.041
18.845	1.891
18.925	0.721
19.005	0.541
19.085	0.411
19.165	0.311
19.245	0.231
19.325	0.171
19.405	0.131
19.485	0.091
19.565	0.071
19.645	0.051
19.725	0.041
19.805	0.031
19.885	0.021
19.965	0.011
20.045	0.001

Figur 5.29 Moförhållanden dag nr 174

Frekvensfunktion:

$$v = 12,239 \cdot \lambda^{-1,583}$$

Antal perioder

- ≤ 1,0 min = 53 st
- > 1,0 min = 20 st

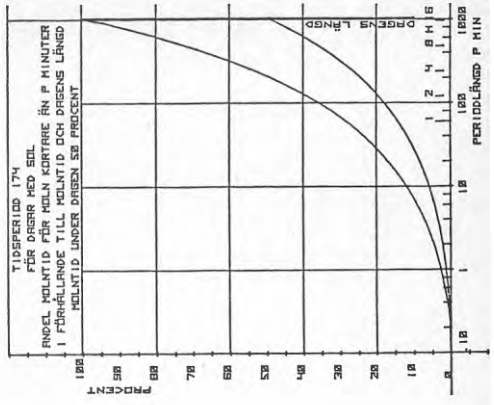
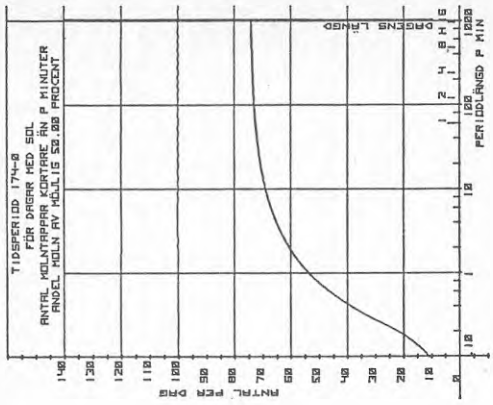
Periodernas medellängd

- samtliga = 6,96 min
- > 1,0 min = 23,97 min

Specifikation över perioder

- > 1,0 min:

1.043	4.735
1.136	5.874
1.244	7.513
1.368	10.035
1.514	14.211
1.683	22.026
1.890	33.914
2.137	50.574
2.423	75.139
2.749	108.035
3.116	158.035
3.524	232.026
3.971	339.914
4.459	505.574
5.000	751.389
5.600	1080.350
6.270	1580.350
7.000	2320.261
7.800	3399.141
8.670	5055.741
9.600	7513.891
10.600	10803.501
11.670	15803.501
12.800	23202.611
14.000	33991.411
15.270	50574.111
16.600	75138.911
18.000	108035.011
19.470	158035.011
21.000	232026.111
22.670	339914.111
24.400	505741.111
26.200	751389.111
28.000	1080350.111
29.870	1580350.111
31.700	2320261.111
33.600	3399141.111
35.500	5057411.111
37.400	7513891.111
39.300	10803501.111
41.200	15803501.111
43.100	23202611.111
45.000	33991411.111
46.900	50574111.111
48.800	75138911.111
50.700	108035011.111
52.600	158035011.111
54.500	232026111.111
56.400	339914111.111
58.300	505741111.111
60.200	751389111.111
62.100	1080350111.111
64.000	1580350111.111
65.900	2320261111.111
67.800	3399141111.111
69.700	5057411111.111
71.600	7513891111.111
73.500	10803501111.111
75.400	15803501111.111
77.300	23202611111.111
79.200	33991411111.111
81.100	50574111111.111
83.000	75138911111.111
84.900	108035011111.111
86.800	158035011111.111
88.700	232026111111.111
90.600	339914111111.111
92.500	505741111111.111
94.400	751389111111.111
96.300	1080350111111.111
98.200	1580350111111.111
100.100	2320261111111.111

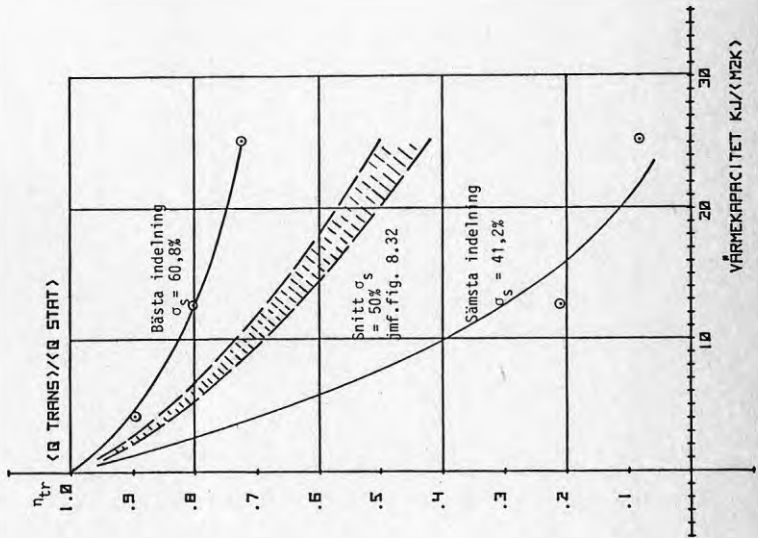


Figur 5.30

Transientverkningsgraden för solfångare vid varierande effektiv värme kapacitet och vid olika indelning av givna sol- och molnperioder och vid följande data:

Dag = 87,  $U_L = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $(\alpha) = 0,8$ ,  $T_i = 50^\circ\text{C}$ ,  $\gamma = 45^\circ$ ,  
 $\phi = 56^\circ$  (Lund),  $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .  $T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}$ .

Solperioder enligt figur 5.26. Molnperioder enligt figur 5.27.  
 50% sol under dagen.

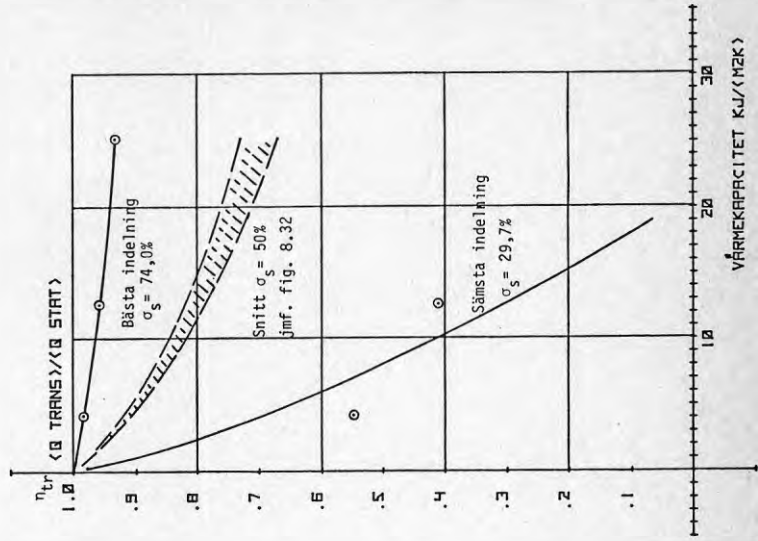


Figur 5.31

Transientverkningsgraden för solfångare vid varierande effektiv värme kapacitet och vid olika indelning av givna sol- och molnperioder och vid följande data:

Dag = 174,  $U_L = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $(\alpha) = 0,8$ ,  $T_i = 50^\circ\text{C}$ ,  $\gamma = 45^\circ$ ,  
 $\phi = 56^\circ$  (Lund),  $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .  $T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}$ .

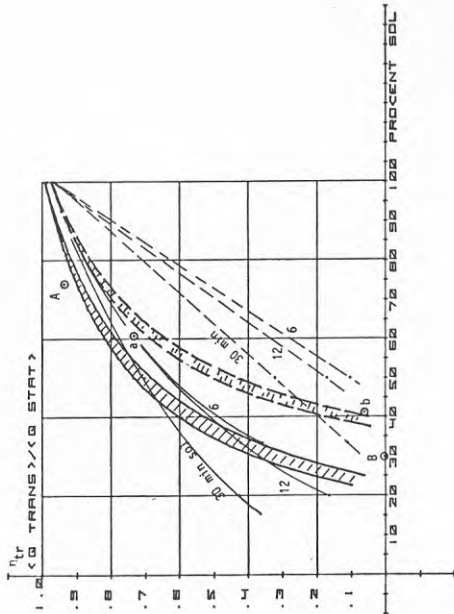
Solperioder enligt figur 5.26. Molnperioder enligt figur 5.27.  
 50% sol under dagen.



Figur 5.32

Transientverkningsgraden vid varierande solandel under samma förhållanden som figur 5.10, men dessutom vid "bästa" indelning för dag nr 174, Punkt A  
 " " " " dag nr 87, " a  
 vid "sämsta" indelning för dag nr 174, Punkt B  
 " " " " dag nr 87, " b

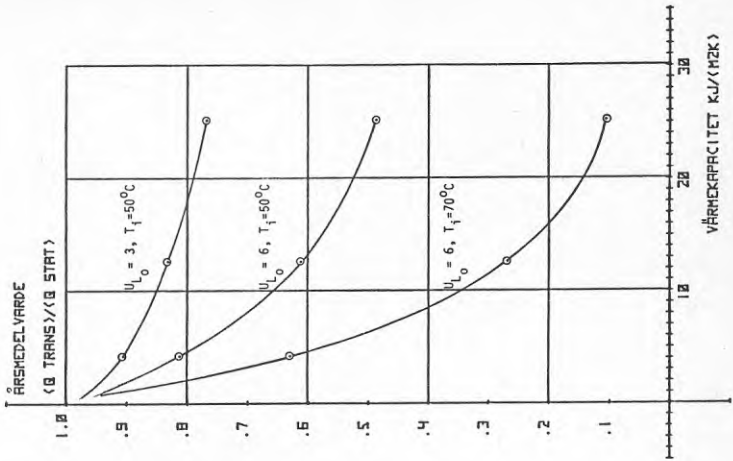
||||| snittvärde för dag nr 174  
 ||||| " " dag nr 87



Figur 5.33

Förväntat årsmedelvärde av transientverkningsgraden vid varierande effektiv värmekapacitet hos solfångaren och vid 3 olika fall:

$U_L = 3$  resp.  $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , ( $\alpha = 0,8$ ),  $T_i = 50$  resp.  $70^\circ\text{C}$ ,  
 $\gamma = 45^\circ$ ,  $\phi = 56^\circ$  (Lund),  $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  
 $T_{\text{start}} = 55$  resp.  $75^\circ\text{C}$ .



tes. För andra orter torde det gå att på motsvarande sätt finna representativa längder på sol/molnperioderna.

Antar man att 30/30-minutersintervallen skulle vara representativa för alla solfångare, kan man med hjälp av transientverkningsgraden, beräknad efter dessa intervall för årets längsta dag, beräkna förväntat årsmedelvärde för  $\eta_{tr}$  enligt ekvation (5.23). Detta har gjorts för tre olika fall i figur 5.33.

### 5.3.3 Energitillskott och verkningsgrad enligt mätningar

Beräkningarna i föregående avsnitt visar att energibortfallet på grund av solfångarnas transientegenskaper kan bli betydande, vilket återspeglas i låga transientverkningsgrader. Eftersom resultaten strider mot uppgifterna från USA, måste beräkningarna ställas mot mätningar gjorda i Skandinavien, som har andra väderförhållanden än USA.

I ref. [9] redogöres för tre års driftserfarenheter från sex olika solfångarekonstruktioner. Solfångarna har tillsammans 52 m<sup>2</sup> yta och är monterade på Dansk Kedelforenings kontorshus i Ålborg (lat. 57°). Man har mätt dels momentanverkningsgraden för var och en av solfångaretyperna, dels gemensamt upptagen energi som funktion av instrålad energi.

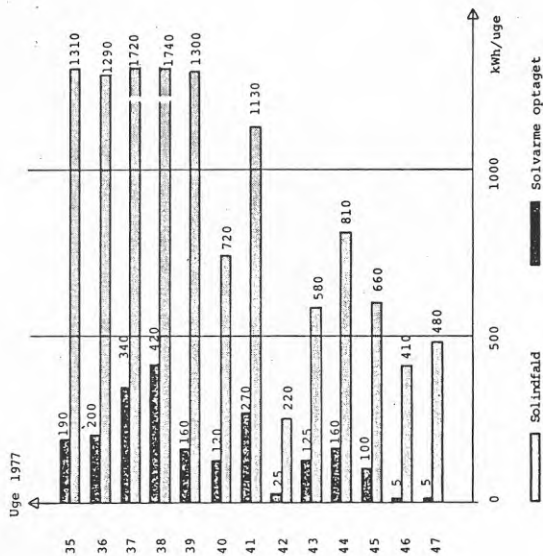
Vid en solinstrålning av 1 kW/m<sup>2</sup>, vid 48,7°C temperatur på ingående vatten och vid ett massflöde av i genomsnitt 0,015 kg/(m<sup>2</sup>s) erhölls momentanverkningsgraderna 73,1; 63,4; 54,2; 44,8; 32,2 resp. 50,2%. Årsmedelverkningsgraden 1977 blev 17,9%.

Den högsta momentana verkningsgraden gäller för den enklaste solfångaren, som bestod av svartmålad värmeledningsradiator med ett täckglas. Vatteninnehållet var 6 l/m<sup>2</sup>.

Figur 5.34 från ref. [9] visar instrålad och upptagen energi per vecka.

Författarens kommentar härtill är:

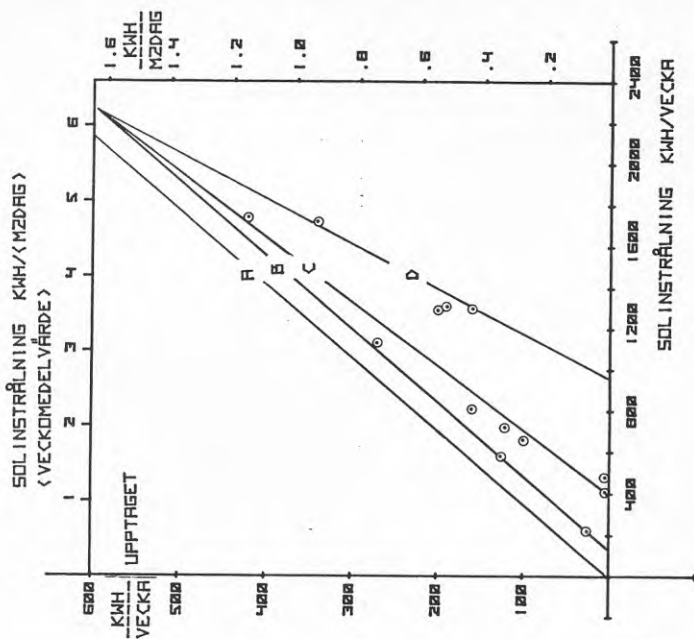
Figur 5.34 Veckovärden av solinstrålning och upptaget värme för solvärmeanläggning i Ålborg, Danmark (9).



SOLINDFALD OG SOLVARME OPTAGET, UGEVÆRDIER

Figur 5.35 Solfångarnas energiuptagning, som funktion av solinstrålning. © Data enligt figur 8.34.

○ Kurva A: Uppskattat maximum om  $\tau_{tr}$  vore 1.  
 Kurva B: Max. uppmätt. Gymsamma sol/moInförhållanden.  
 Kurva C: Medianvärde.  
 Kurva D: Min. uppmätt. Ögynnsamma sol/moInförhållanden.





"Undersökningen visar att solfångarnas verkningsgrad är starkt beroende av solintensitetens variation, ty man kan få högst olika utbyte under två dagar med i övrigt lika stor solinstrålning, om solintensiteten den ena dagen är konstant och den andra dagen varierande på grund av växlande molnighet."

För att få fram konsekutiva kurvor och därigenom mer information har jag plottat upptagen energi som funktion av instrålad energi, figur 5.35, med data från figur 5.34.

Maximalt instrålad energi mot en yta vänd åt söder och lutande  $60^\circ$  mot horisontalplanet, har jag för en dag i vecka nr 38 beräknat till  $6,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{dag})$ . I figur 5.35 har lagts in kurvor genom maximipunkterna (B) och minimipunkterna (D), samt en kurva (C) för meridianvärdena. Kurvorna måste vid max-effekt sammanfalla - i detta fall på linjen för  $6,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{dag})$ . Dessutom har lagts in en kurva (A) gällande för en trolig effekt, om solfångarna inte hade någon värmekapacitet. Kurva B, C resp. D genom instrålad energi ger solfångarnas totalverkningsgrad,  $\eta_{\text{tot}}$ , som funktion av instrålad energi (figur 5.36). Samma kurvor genom kurva A ger solfångarnas transientverkningsgrad,  $\eta_{\text{tr}}$ , som funktion av instrålad energi (figur 5.37).  $\eta_{\text{tot}}$  genom  $\eta_{\text{tr}}$  ger  $\eta_{\text{stat}}$ . I detta fall med gjorda antaganden blir  $\eta_{\text{stat}} = 28\%$  (oberoende av storleken på instrålad effekt). Eftersom den uppmätta totalverkningsgraden över året var  $17,9\%$ , blir den genomsnittliga transientverkningsgraden,  $\eta_{\text{tr}} = 17,9/28 = 64\%$ .

Spannet mellan högsta och lägsta verkningsgrad är betydande. Hade mätningarna skett under flera år hade spannet kanske blivit ännu större. I vilket fall som helst erfordras flera års mätningar för att möjliggöra beräkning av ett statistiskt medelvärde.

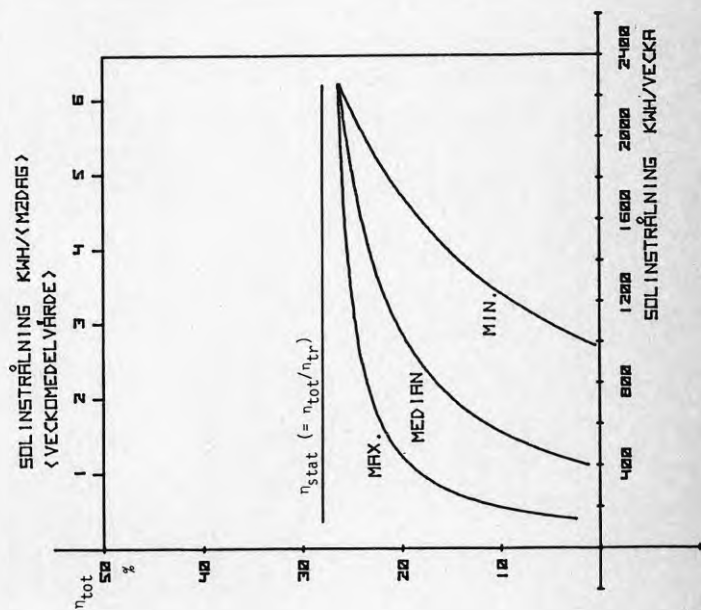
Även om figur 5.37 inte är helt jämförbar med figur 5.32, därför att den minskande instrålningen i figur 5.37 är en funktion av både ökad molnighet och kortare dag, så visar en jämförelse att transientverkningsgraden är av den storlek som framgår av de teoretiska beräkningarna. Jämförelsen visar också, att vid stor solandel ligger  $\eta_{\text{tr}}$  över värdet för 30-minuterskurvan, medan vid liten solandel ligger  $\eta_{\text{tr}}$  under samma kurva. Eller med andra ord: vid stor solandel är solperioderna längre än 30 minuter och vid liten solandel är de kortare än 30 minuter.



Det framräknade årsmedelvärde 64% på  $\eta_{tr}$  för de danska solfångarna ligger ungefär mitt i fältet på figur 5.33.

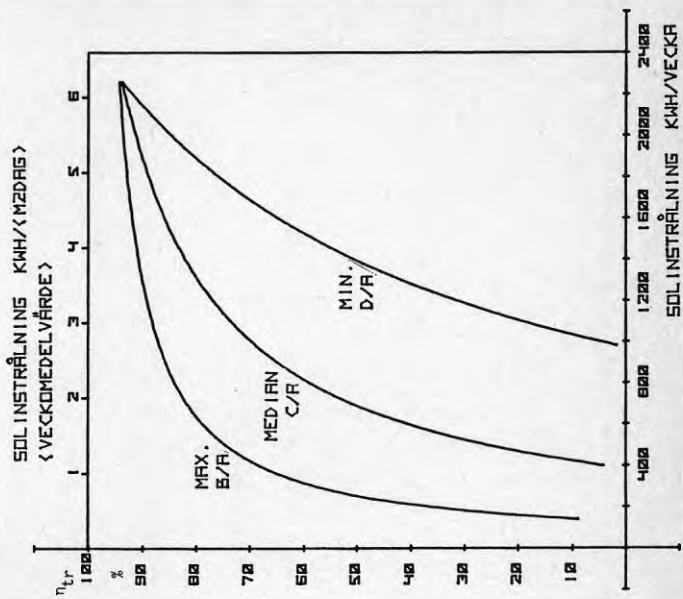
Figur 5.36

Totalverkningsgrad resp. statisk verkningsgrad för solfångare enligt figur 5.34 och 5.35.



Figur 5.37

Transientverkningsgrad för solfångare enligt figur 5.34 och 5.35, beräknad från data enligt figur 5.36.



## 6. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL YTTRELLIGARE STUDIER

Den genomförda studien visar, att i klimat med växlande molnighet gäller ej den vedertagna uppfattningen, att en solfångares termiska massa är negligerbar vid beräkning av den energi som kan nyttiggöras i en solfångare, Tvärtom visar studien, att massan kan ha stor betydelse för solfångarens effektivitet.

En fråga man kan ställa sig är, om de gjorda avgränsningarna för studien påverkar slutsatsens allmängiltighet. Eftersom solfångarna karakteriseras av sina konstruktionsparametrar, anser jag att så inte är fallet. Självfallet gäller de för Lund framräknade värdena på transientverkningsgraden inte generellt, men beräkningsmetoderna är generella och gäller för alla solfångare och alla uppställningsorter. Detta innebär, att de parametrar som styr den plana solfångarens effektivitet, även styr t ex en koncentrerande solfångares effektivitet.

Det går inte att fastställa någon genomsnittlig transientverkningsgrad för någon ort förrän klimatdata med tillräcklig upplösning tagits fram. Dock anser jag, att liksom man accepterar att använda instrålningsdata som egentligen gäller för Helsingfors, kan man använda transientverkningsgrader som beräknats för Lund, åtminstone till dess bättre klimatunderlag föreligger. När så är fallet kan man beräkna transientverkningsgraden för godtycklig solfångare, med godtyckligt medium och med godtycklig placeringsort, genom att i ekvationerna sätta in aktuella värden på t ex konstruktions- och klimatparametrarna.

De mätningar som Statens Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI) påbörjat beträffande solintensitetens variation, kan förmodligen ligga till grund för transientberäkning när mätningarna blir klara. Eftersom det kommer att dröja många år innan tillräcklig mängd data föreligger för att kunna beräkna statistiska medelvärden, skulle det vara önskvärt om SMHI kunde statistiskt bearbeta det material man redan har över klimatet för olika orter och ställa upp trendtabeller över sol- och molnperioder i likhet med vad som gjorts i kapitel 4, samt fastställa konstanterna i den fördelningsekvation som omnämns i kapitel 5.3.2.2 eller i någon annan lämplig fördelningsekvation.

Transienta förlopp i solvärmeanläggningar har tidigare endast i begränsad omfattning analyserats. För bl a svenska förhållanden torde dessa ha största tillämplighet då det gäller att korrekt uppskatta den energimängd som i olika solvärmeanläggningar kan nyttiggöras.

Vid studier av transienta förlopp i solvärmeanläggningar krävs uppgifter om momentanvärden på olika klimatparametrar. Timmedelvärdesstatistik är ej användbar i detta sammanhang. Det för studierna erforderliga dataunderlaget baseras bl a på egna mätningar av sol- och molnperiodernas längd och frekvens i Lund under en tvåårsperiod och på mätningar av Lunelund av solintensiteten som funktion av solhöjd. Lunelunds data har bearbetats och en ekvation för intensiteten av direktstrålningen som funktion av tiden och ortens latitud har ställts upp.

För solfångare med varierande värmekapacitet beräknas solfångartemperatur och användbar energi då solstrålningens dynamiska förlopp och andra relevanta parametrar varieras systematiskt.

Beräkningar visar, att vid pendlande instrålningensintensitet pendlar kollektortemperaturen kring ett medelvärde som bestäms av medelvärdet på instrålningensintensiteten oberoende av pendlingens frekvens. Detta innebär, att temperaturamplituden minskar då pendlingsfrekvensen ökar, vilket kan innebära att en solvärmeanläggning, som vid ett statiskt betraktelsesätt skulle givit användbar energi, ej når upp till önskad temperatur i det dynamiska fallet.

En transientverkningsgrad,  $\eta_{tr}$ , införs som förhållandet mellan aktuell energi och energi som skulle erhållits, om solfångarens värmekapacitet vore 0.

Om solen lyser från morgon till kväll är  $\eta_{tr}$  nära 1 och är en mycket svag funktion av solfångarens värmekapacitet. Vid växlande sol och moln däremot, blir  $\eta_{tr}$  en stark funktion av värmekapaciteten. Dessutom avtar  $\eta_{tr}$  med alla funktioner eller parametrar som minskar den uttagbara effekten i det stationära fallet. Dvs  $\eta_{tr}$  avtar med stigande värmeförlustkoefficient, med avtagande transmissions-absorptions-produkt, avtagande dagslängd, avtagande andel sol under dagen, med stigande temperatur i solfångaren, etc.

Det visas, att årsmedelvärdet av transientverkningsgraden är mindre än kvadraten på transientverkningsgraden för årets längsta dag.

Genom att tillämpa ovan redovisade slutsatser på en från tidigare undersökningar oberoende mätserie avseende en solvärmeanläggning i Danmark framgår, att för en given anläggning varierar  $\eta_{tr}$  kraftigt med solintensitetens variation under dagen. För att ur detta stora spann få fram ett medelvärde fordras många års mätningar. Tills dess sådana föreligger, framförs som en hypotes, att  $\bar{\eta}_{tr}$  (längsta dag) beräknas - åtminstone för Lund som har solsannolikheten 50% - som om dagen bestod av perioder av omväxlande 30 minuter sol och 30 minuter moln.

## 8. LITTERATURFÖRTECKNING/REFERENSLISTA

- 1 Adamson, Bo, Backman, Harry E.: Glas i hus, Esselte Studium AB.
- 2 Beard, J.T., Iachetta, F.A., Lilleleht, L.V., Huckstep, F.L., May, W.B.: Design and Operational Influences on Thermal Performance of "Solaris" Solar Collector, Journal of Engineering for Power, Oct. 1978, vol. 100.
- 3 Bliss, Jr., Raymond, W.: The Derivations of Several "Plate-Efficiency Factors" Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors, Solar Energy, vol. 3, pp. 55-64, (1959):4.
- 4 Borglin, Stig: Föreläsningar i "Solteknik" 1977-78 vid institutionen för Värme- och kraftteknik, Lunds Tekniska Högskola.
- 5 Bossel, Ulf: Sonnenstand, Bestrahlungsdauer und Kosinusstunden für geneigte Flächen, Solentec Report SR-1, Solentec, Adelebsen, BRD.
- 6 Brown, Gösta, Isfält, Engelbrekt: Solinstrålning och solavskärmning. Rapport R19:1974, Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm.
- 7 Close, D.J.: A Design Approach for Solar Processes, Solar Energy Journal, vol. 11, pp. 112-22 (1967).
- 8 Collares-Pereira, H., and Rabl, A.: Derivation of Method for Predicting Long Term Average Energy Delivery of Solar Collectors, Solar Energy, vol. 23, pp. 223-233 (1979).
- 9 Dansk Kedelforening: Solvarmeanlæg, 3 års driftserfaringer, Jan. 1980.
- 10 Duffie, John A., Beckman, William A.: Solar Energy Thermal Processes, John Wiley & Sons, New York 1974.
- 11 Ericsson, John: Om solvärmens användande som mekanisk drivkraft, Acta Universitatis Lundensis, 1868.
- 12 Girdo, Valdis: Grundläggande förutsättningar för soluppvärmning av byggnader i Skandinavien, Rapport R108:1978, Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm.

- 13 Hahne, E., Fisch, N., Arafam A.: The Flat Plate Solar Collector. Its Steady-State and Transient State Behaviour, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, (International Symposium - Workshop on Solar Energy, June 1978, Cairo).
- 14 Hottel, H.C. och Whillier, A.: Evaluation of Flat-Plate Solar Collector Performance. Trans. of the Conference of the Use of Solar Energy, Vol. II, Thermal Processes, University of Arizona.
- 15 Kesselring, P.: Débit et critère d'enclenchement de la pompe d'un circuit de capteurs à eau chaude, *Energi Solaire* 3/79, 4/79.
- 16 Klein, S.A., Duffie, J.A., Beckman, W.A.: Transient Considerations of Flat-Plate Solar Collectors, *Journal of Engineering for Power Transactions of the ASME*, April 1974, pp. 109-113.
- 17 Klein, S.A.; Calculation of Flat-Plate Collector Loss Coefficients, *Solar Energy*, Vol. 17, pp. 79-80 (1975).
- 18 Klein, Sanford Alan: A Design Procedure for Solar Heating Systems, Ph.D. thesis, 1976, University of Wisconsin-Madison.
- 19 Klein, S.A.: Calculation of Flat-Plate Collector Utilizability, *Solar Energy*, Vol. 21, pp. 393-402 (1978).
- 20 Klein, S.A. and Beckman, W.A.: A General Design Method for Closed-Loop Solar Energy Systems, *Solar Energy*, Vol. 22, pp. 269-282 (1979).
- 21 Lindgren, Georg: Institutionen för Matematisk Statistik, Lunds Universitet, personliga samtal.
- 22 Liu, Benjamin Y.H., Jordan, Richard, C.: The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, *Solar Energy*, Vol. 4, pp. 1-19 (1960):3.



- 23 Liu, Benjamin, Y.H., Jordan, Richard C.: A Rational Procedure for Predicting the Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors, *Solar Energy*, Vol. 7, pp. 55-74 (1963):2.
- 24 Lodén, Kerstin, Liljekvist, Gösta H., Mathiessen, Olev: *Astronomi och geofysik*, Almqvist och Wiksell, Stockholm.
- 25 Lunelund, Harald: *Värmestrålning och ljusstrålning i Finland*, Acta Band XII (1936), Svenska Tekniska Vetenskapsakademien i Finland.
- 26 McWeigh, J.C.: *Sun Power, An Introduction to the Applications of Solar Energy*, Pergamon International Library.
- 27 Mattsson, Jan, O.: *Naturgeografiska Institutionen, Lunds Universitet, personliga samtal*.
- 28 Pleijel, Gunnar: *Fönstrets värmebalans, Särtryck 3:1959, Statens Nämnd för Byggnadsforskning 1959, Stockholm*.
- 29 Rabl, Ari: *Yearly Average Performance of the Principal Solar Collector Types*, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, SERI/TR-631-716, Jan. 1981.
- 30 Ransmark, S-E.: *Mätning av sol- och molnperioder i Lund 1979-1981*, LTH, Institutionen för Värme- och kraftteknik, 1982.
- 31 Ransmark, S-E.: *Solvärmeanläggningars prestanda i områden med växlande molnighet. Dissertation. LTH, Institutionen för Värme- och kraftteknik, 1982*.
- 32 Rapp, Donald, Hoffman, A.A.J.: *On the Relation Between Insolation and Climatological Variables*, *Energy Conversion*, Vol. 17, pp. 163-172.
- 33 Sayigh, A.A.M.: *Solar Air Conditioning in a Hot Arid Climate*, 2nd Miami International Conference on Alternative Energy Sources, 1979.

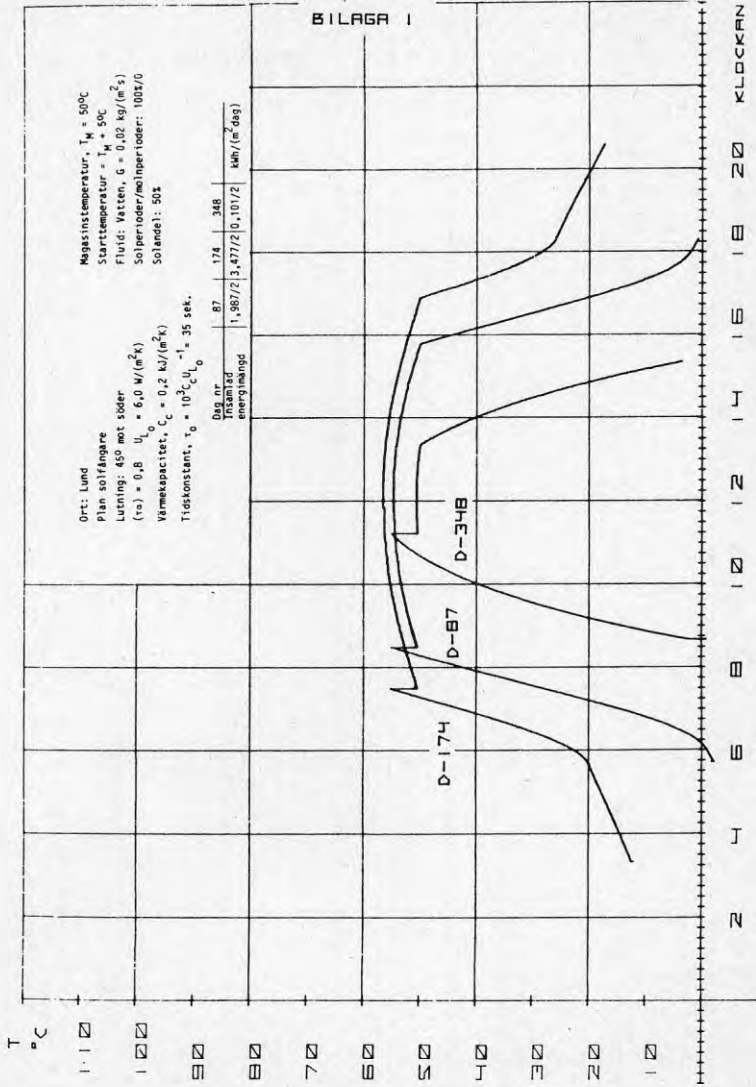
- 34 Smith, Charles C., Weiss, Thomas A.: Design Application of the Hottel-Willier-Bliss Equation, Solar Energy, Vol. 19, pp. 109-113 (1977).
- 35 Stickford, Jr., George, H.: An Averaging Technique for Predicting the Performance of a Solar Energy Collector System, Battelle Columbus Laboratories Columbus, Ohio. (Sharing the Sun! Solar Energy Conference Winnipeg, Canada, Aug. 1976.)
- 36 Swanson, S.R., Boehm, R.F.: Calculation of Long Term Solar Collector Heating System Performance, Solar Energy, Vol. 19, pp. 129-138 (1977).
- 37 Taesler, Roger: Klimatdata för Sverige, Statens Institut för Byggnadsforskning 1972, Stockholm.
- 38 Thekaekara, M.P.: Solar Energy Outside the Earth's Atmosphere, Solar Energy, Vol. 14, pp. 109-127 (1973).

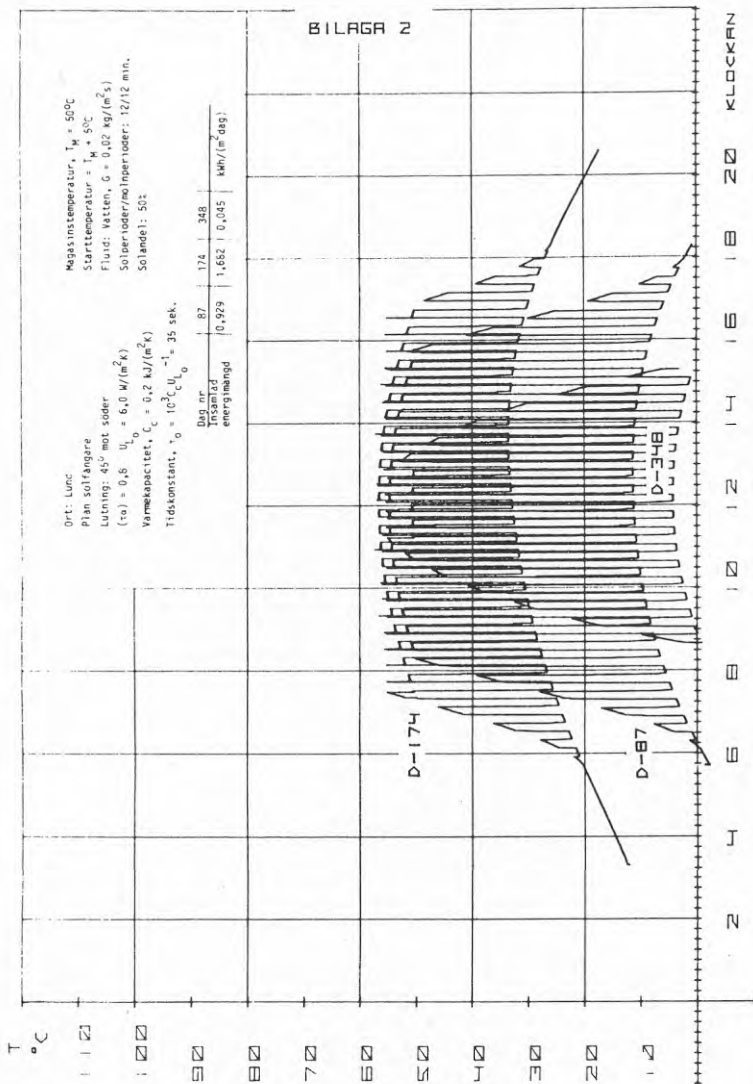
I "Solvärmeanläggningars prestanda i områden med växlande molnighet" har hänvisning skett till ovanstående referenser. I denna sammanfattande rapport har en del av hänvisningarna utelämnats.

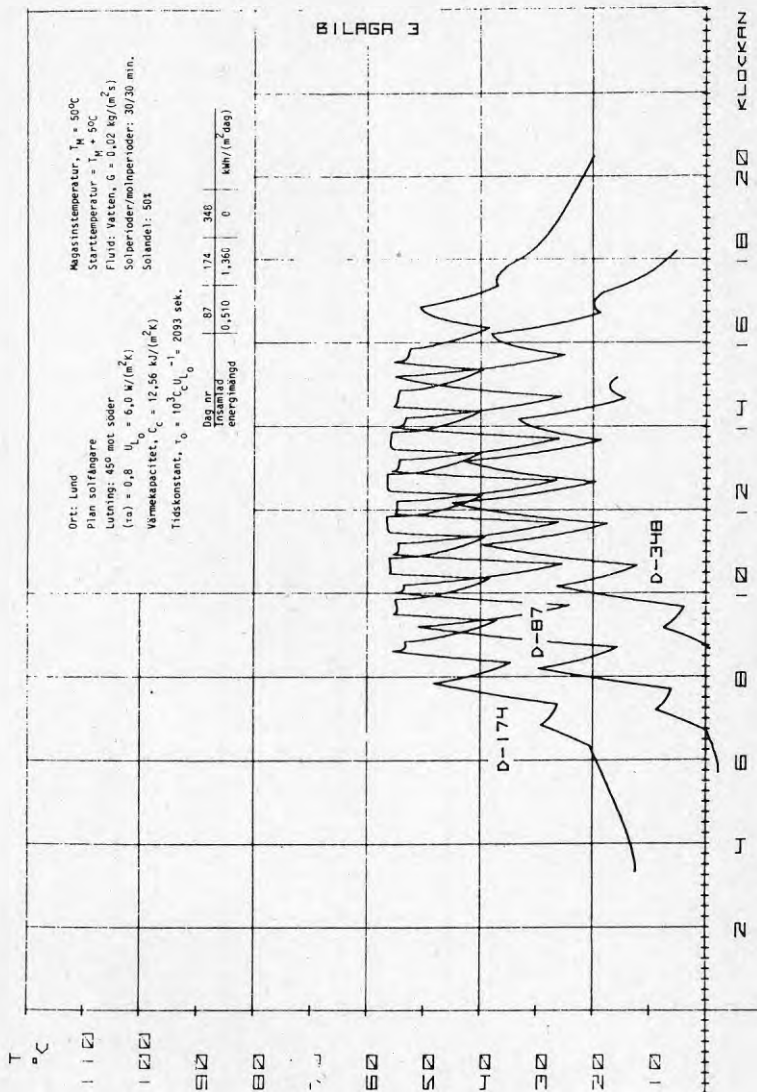
#### BILAGA 1-13

utgör ett urval av de diagram som plottats samtidigt med beräkningarna i kapitel 5.

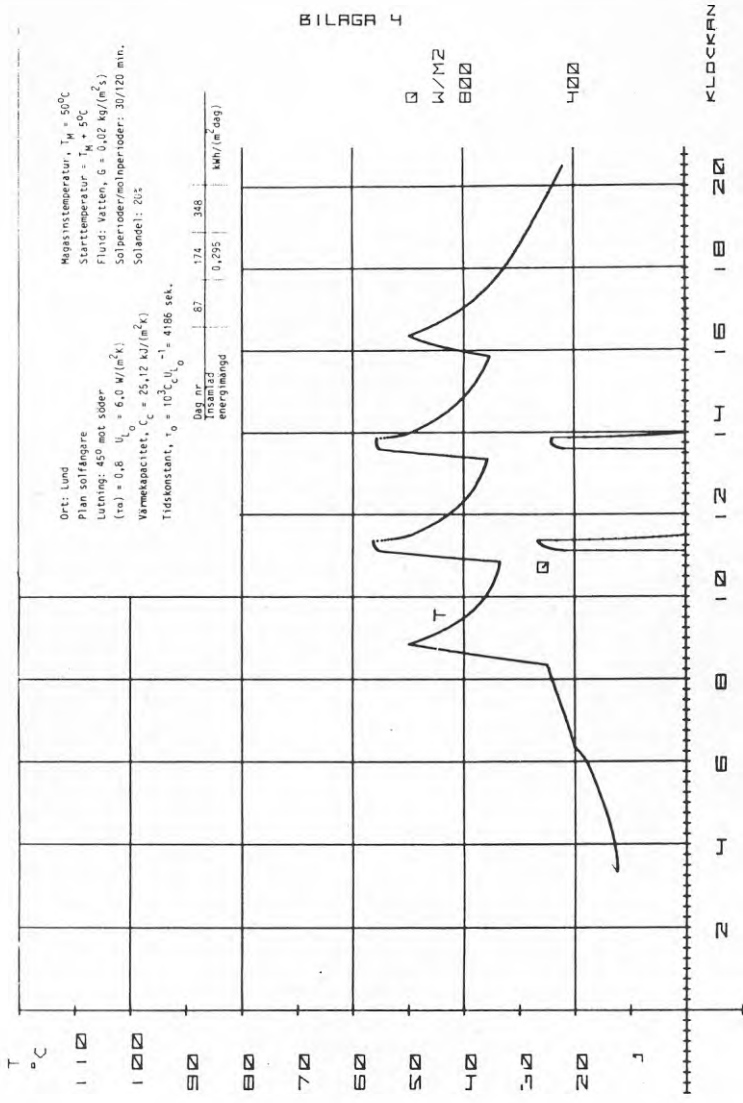
Enligt den använda beräkningsmodellen är temperaturen densamma överallt i solfångaren så länge pumpen inte går. Det är denna medeltemperatur som redovisas i diagrammen. När pumpen går, varierar temperaturen inom solfångarna. Den redovisade temperaturen i dessa fall är utloppstemperaturen.



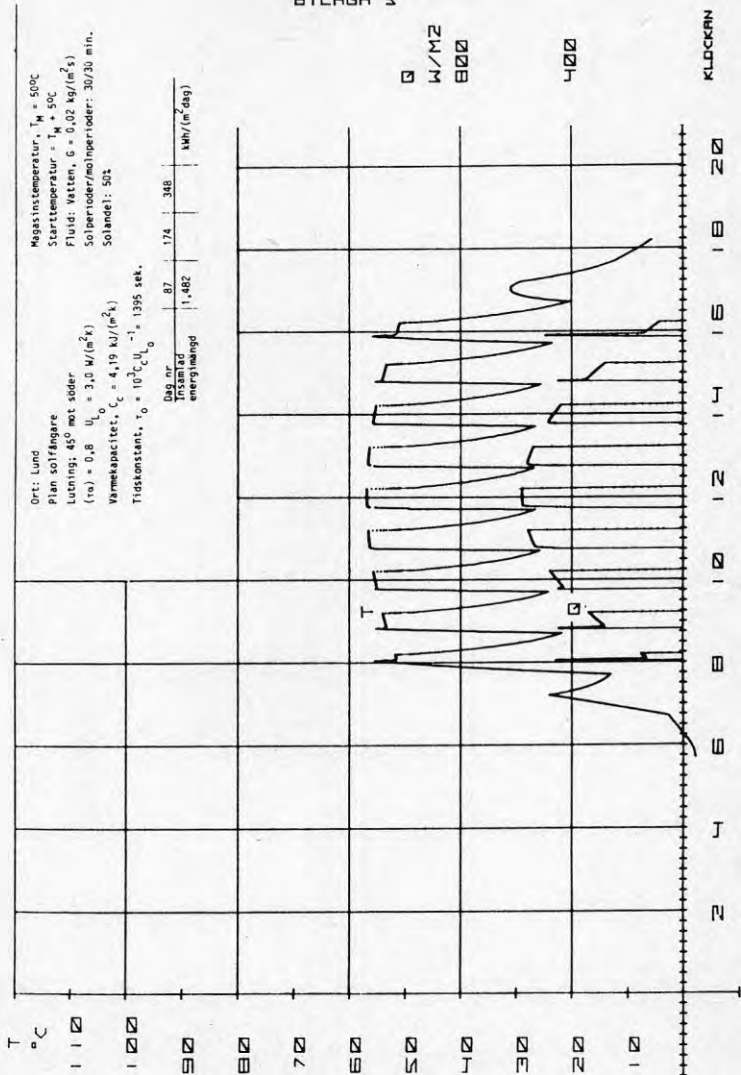




BILAGA 4

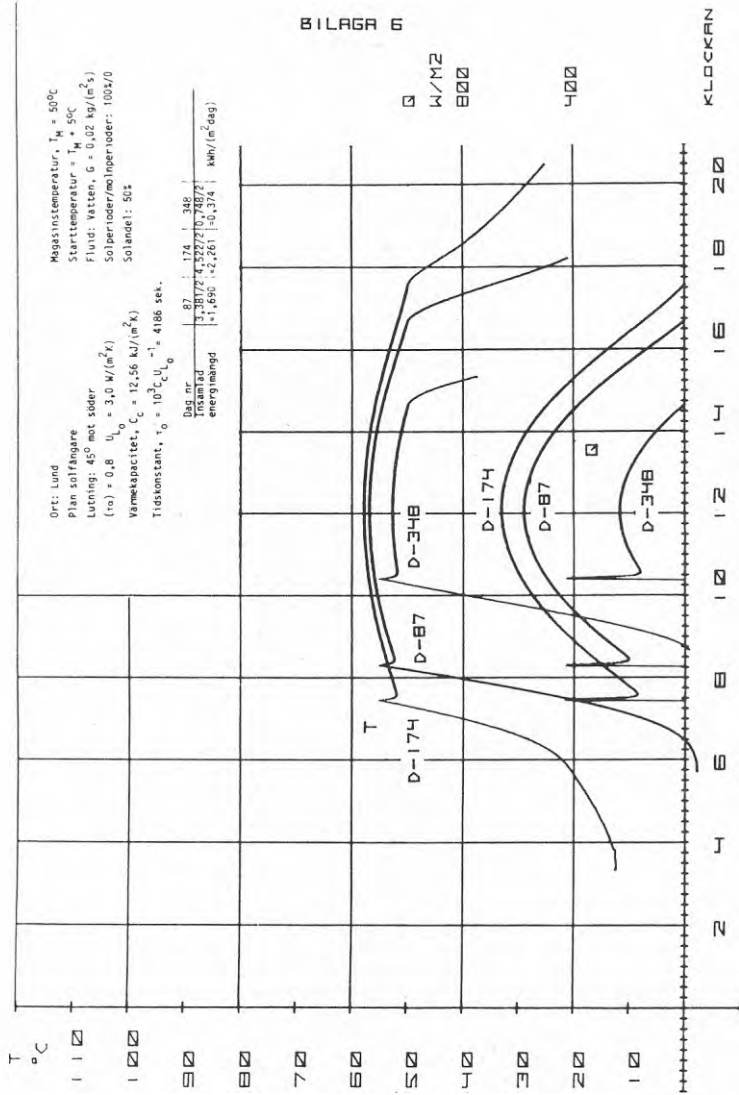


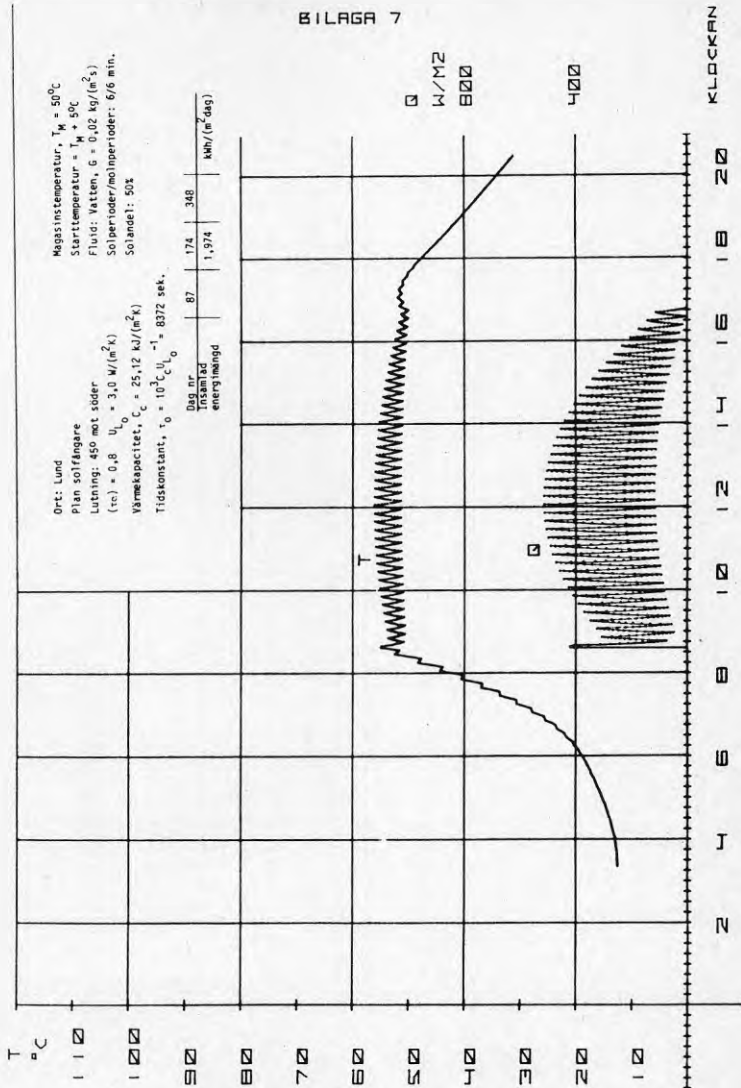
BILAGA 5



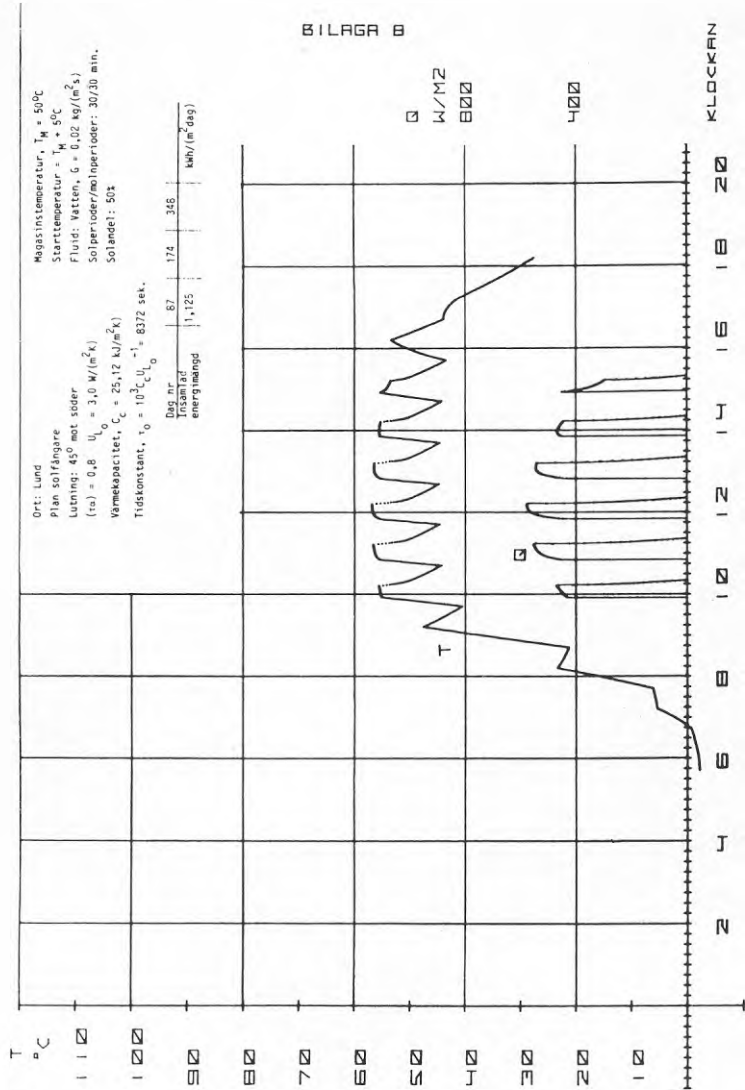


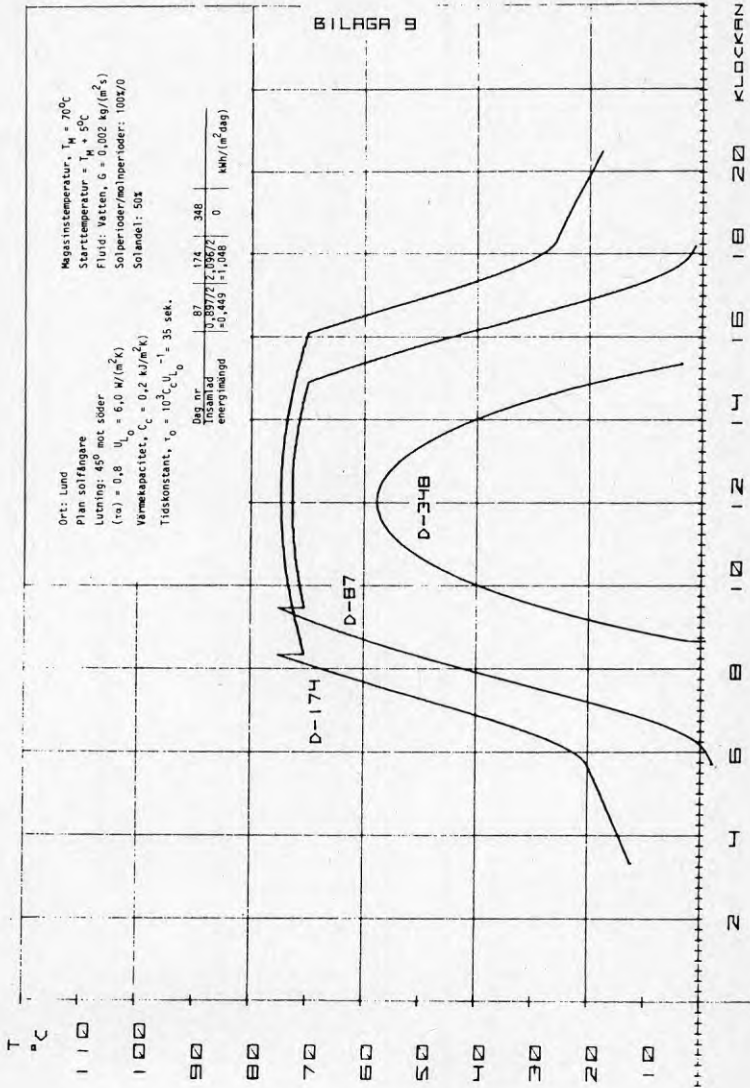
BILAGA 6

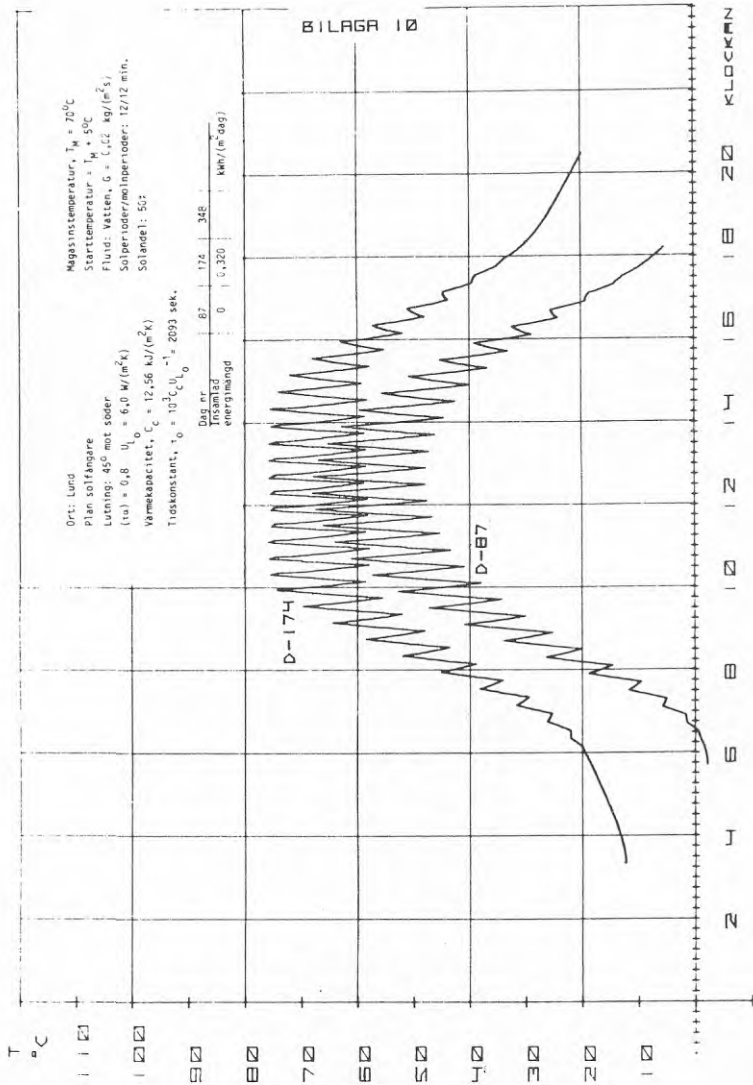


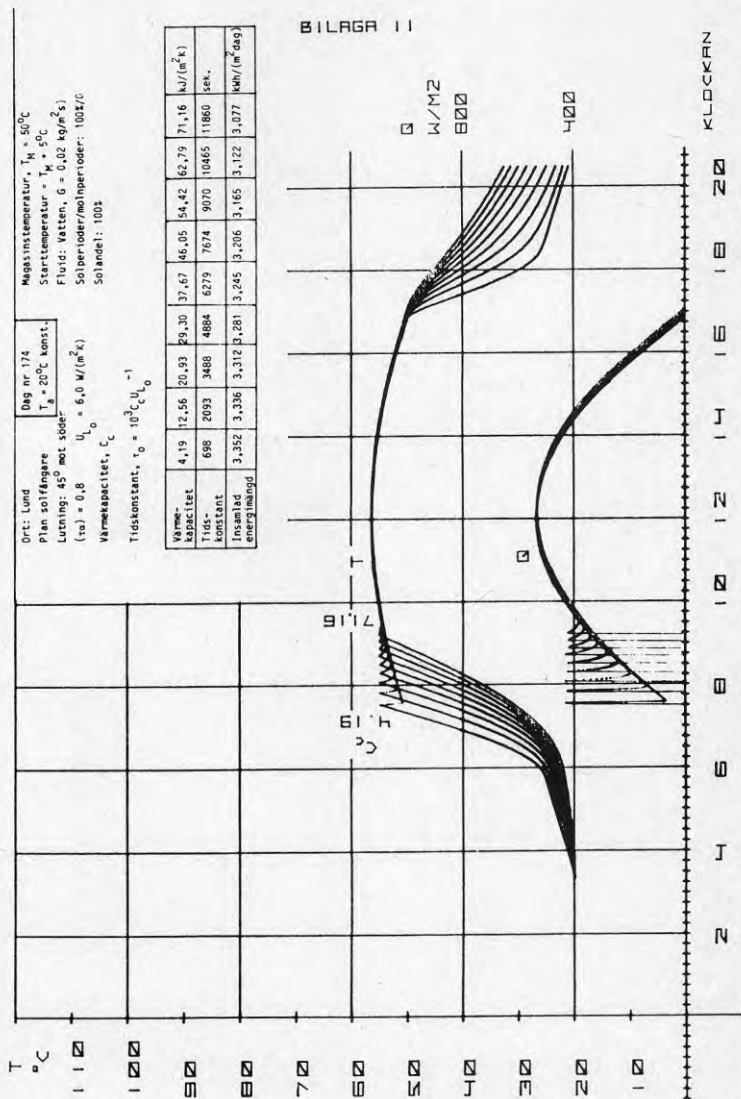


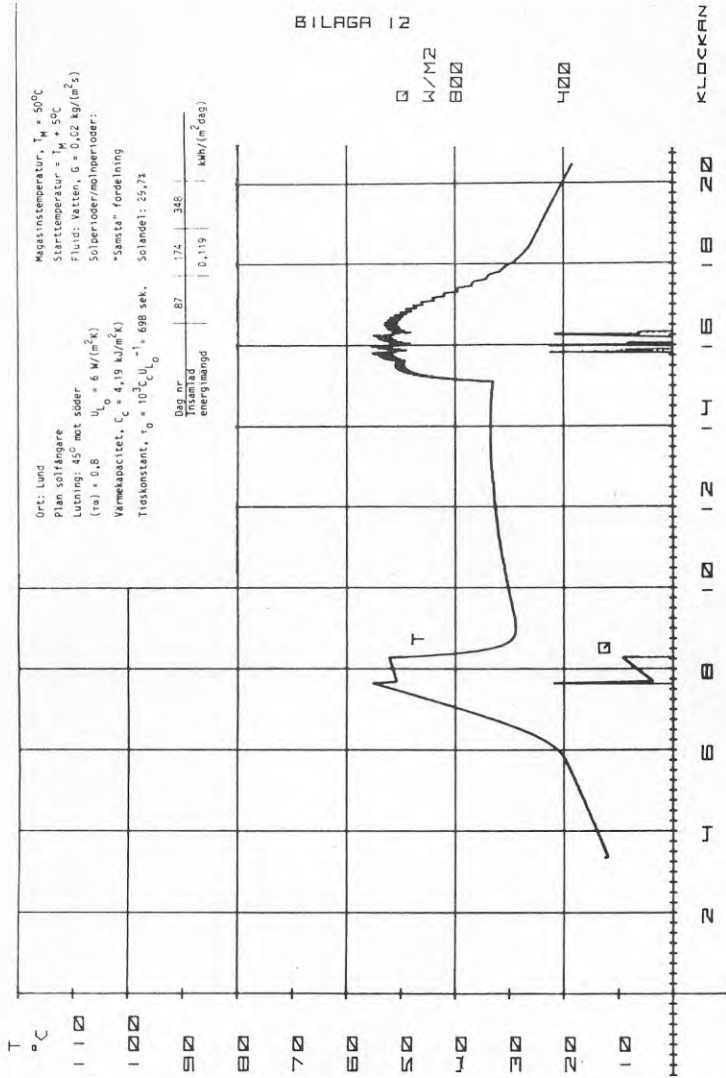
BILAGA B



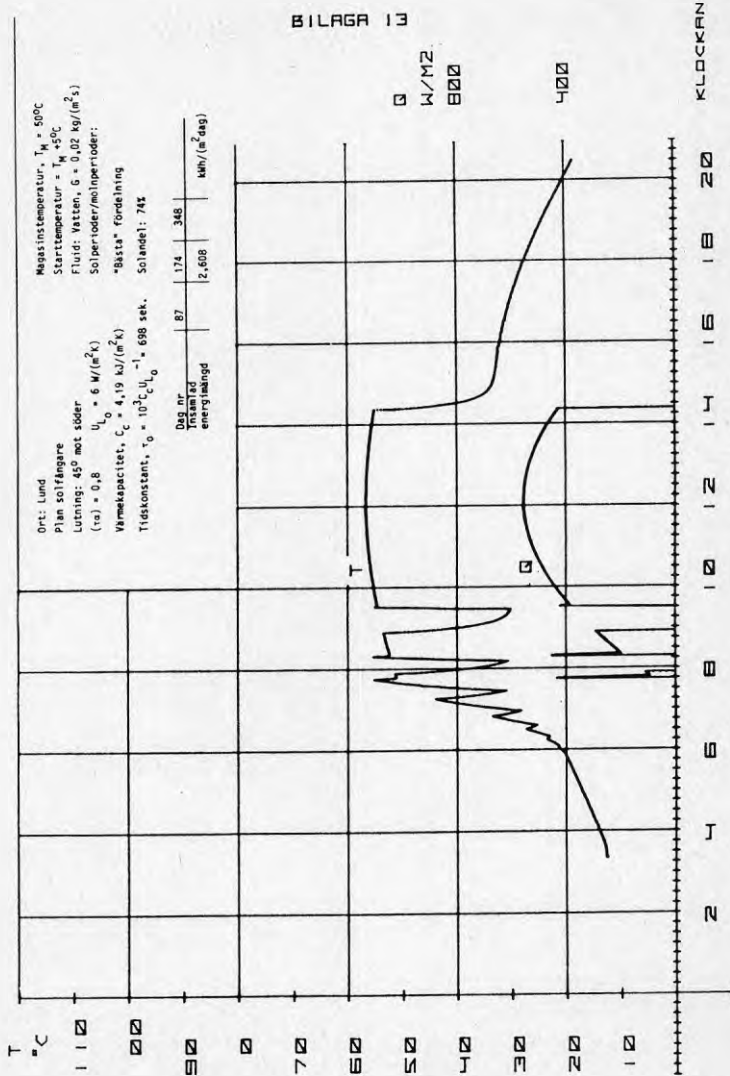












Solfångarens massa ingår inte i ekvationen för beräkning av uttagbar effekt  $\dot{Q}_u$  från solfångaren, ekvation (5.6). Detta betyder emellertid inte att massan inte skulle ha någon inverkan på  $\dot{Q}_u$ , vilket visas av följande.

Enligt tidigare gäller för 1 m<sup>2</sup> solfångare

$$\tau_1 = \frac{C_c}{U_L} \quad (\text{A:1})$$

$$\tau_2 = (1-F_R)\tau_2 \quad (\text{A:2})$$

$$\tau_2 = F_R\tau_3 \quad (\text{A:3})$$

$$\tau_3 = \frac{V}{G \cdot p} \quad (\text{gäller vid likformig vattenfördelning}) \quad (\text{A:4})$$

(A:2) och (A:3) ger

$$(1-F_R)\tau_1 = F_R\tau_3 \quad (\text{A:5})$$

$$\frac{1-F_R}{F_R} = \frac{\tau_3}{\tau_1} = \frac{1}{F_R} - 1 \quad (\text{A:6})$$

$$\frac{1}{F_R} = 1 + \frac{\tau_3}{\tau_1} = \frac{U_L V}{C_c G p} \quad (\text{A:7})$$

$$F_R = \frac{1}{1 + \frac{U_L V}{C_c G p}} = \frac{1}{1 + \frac{U_L V C_p}{C_c G \rho C_p}} \quad (\text{A:8})$$

med

$$\frac{V C_p}{\rho C_c} = \varphi = \text{andelen effektiv termisk massa i fluiden}$$

erhålles

$$F_R = \frac{1}{1 + \frac{U_L \varphi}{G C_p}} \quad (\text{A:9})$$

Med konstanta värden för  $U_L$  och  $G$  avtar  $F_R$  med stigande värden för  $\varphi$  (gränsvärdet för  $\varphi$  är 1). Man kan dock inte ändra på  $\varphi$  utan att det får inverkan på  $U_L$ . Detta framgår tydligt om man ritar upp  $F_R$  efter dels ekv. (5.7) och dels (A:9). Detta har gjorts i figurerna A:1 och A:2 som visar  $F_R$  för vatten som fluid och med varierande  $U_L$ ,  $G$ ,  $\varphi$  och  $F'$ .

För  $G = 0,02$ ,  $U_L = 8$  och  $F' = 0,8$  blir enligt figur A:1  $F_R = 0,77$ . Vid dessa  $G$  och  $U_L$  får enligt figur A:2  $F_R$  inte vara mindre än 0,91. Kombinationen  $G = 0,02$ ,  $U_L = 8$ ,  $F' = 0,8$  är således orimlig om vattenfördelningen är likformig i solfångaren. För att inte erhålla sämre  $U_L$ -värde än 8 måste solfångaren göras med bättre  $F'$ -värde än 0,8.

Det matematiska sambandet mellan  $\varphi$  och  $F'$  erhålles genom att sätta ekvation (5.7) lika med ekvation (A:9):

$$\frac{GC_p}{U_L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{F' U_L}{GC_p}\right) \right] = \frac{1}{1 + \frac{U_L \varphi}{GC_p}} \quad (\text{A:10})$$

$$1 - \exp\left(-\frac{F' U_L}{GC_p}\right) = \frac{U_L}{GC_p \left(1 + \frac{U_L \varphi}{GC_p}\right)} = \frac{1}{\frac{GC_p}{U_L} + \varphi} \quad (\text{A:11})$$

$$1 - \frac{1}{\frac{GC_p}{U_L} + \varphi} = \exp\left(-\frac{F' U_L}{GC_p}\right) \quad (\text{A:12})$$

$$\ln\left(1 - \frac{1}{\frac{GC_p}{U_L} + \varphi}\right) = -\frac{F' U_L}{GC_p} \quad (\text{A:13})$$

$$F' = -\frac{GC_p}{U_L} \ln\left(1 - \frac{1}{\frac{GC_p}{U_L} + \varphi}\right) \quad (\text{A:14})$$

Lägsta  $F'$ -värdet erhålles när  $\varphi$  är max, dvs 1:

$$F'_{\min} = -\frac{GC_p}{U_L} \ln\left(1 - \frac{1}{\frac{GC_p}{U_L} + 1}\right) \quad (\text{A:15})$$

Ekvation A:12 kan skrivas

$$\frac{\frac{GC_p}{U_L} + \varphi - 1}{\frac{GC_p}{U_L} + \varphi} = \exp\left(-\frac{F' U_L}{GC_p}\right) \quad (\text{A:16})$$

vilken kan utvecklas till

$$\frac{GC_p}{U_L} + \varphi = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{F' U_L}{GC_p}\right)} \quad (\text{A:17})$$

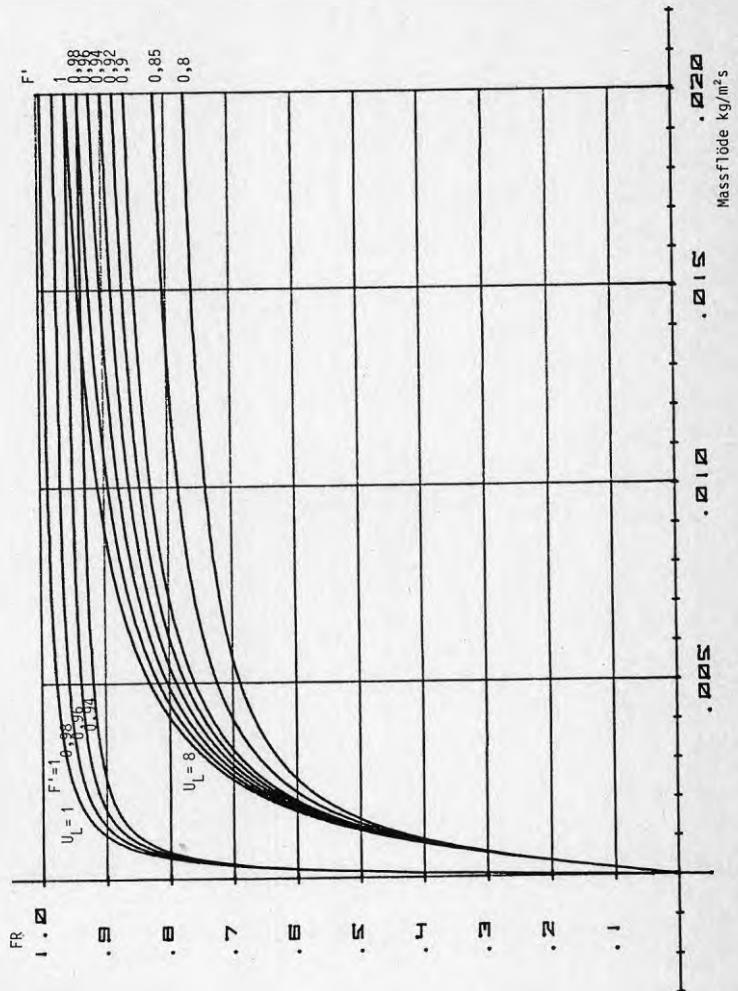
$$\varphi = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{F' U_L}{GC_p}\right)} - \frac{GC_p}{U_L} \quad (\text{A:18})$$

Lägsta  $\varphi$ -värde solfångaren kan ha erhålles när  $F'$  är max, dvs 1:

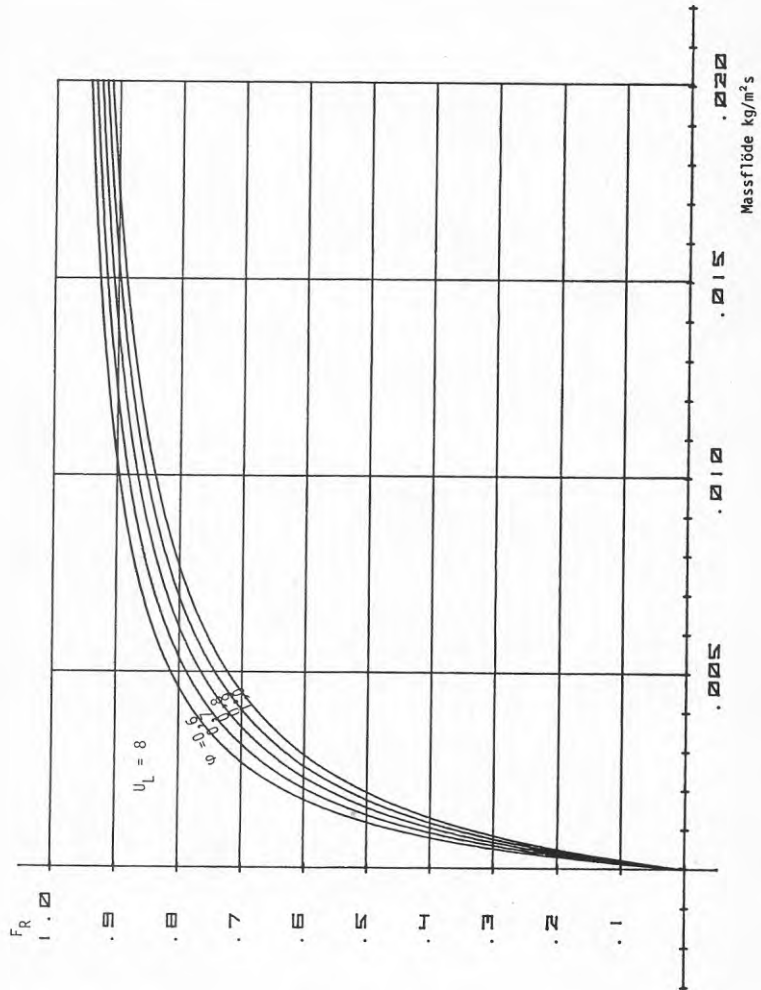
$$P_{\min} = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{U_L}{GC_p}\right)} - \frac{GC_p}{U_L} \quad (\text{A:19})$$

Ekvationerna (A:14), (A:15) och (A:19) visas grafiskt i figurerna A.3, A.4 och A.5.

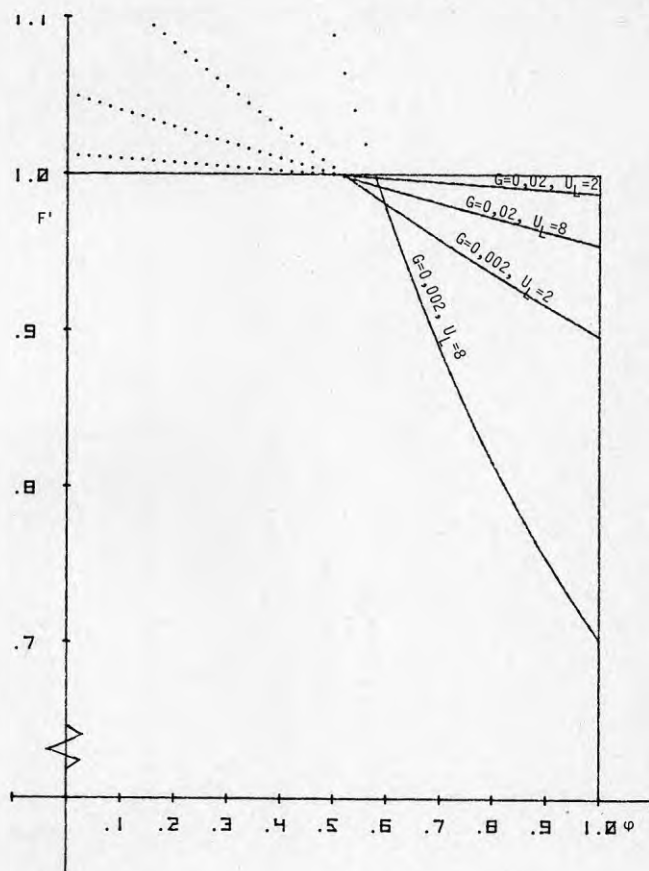
Figur A:1  $F_R$  som funktion av massflödet genom solfångaren vid olika  $U_L$  och  $F'$



Figur A.2  $F_R$  som funktion av massflödet genom solfångaren vid  $U_L = 8$  och med andelen effektiv termisk massa i fluiden som parameter.

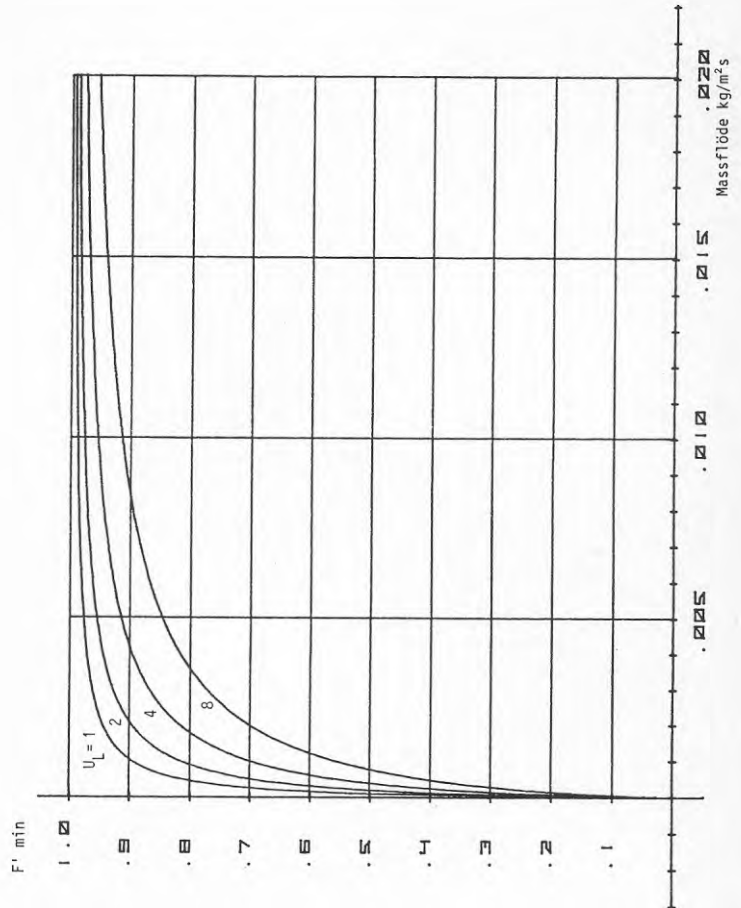


Figur A:3  $F'$  som funktion av andelen effektiv termisk massa i fluiden vid olika massflöden och  $U_L$ . Enligt ekv. (A.14).

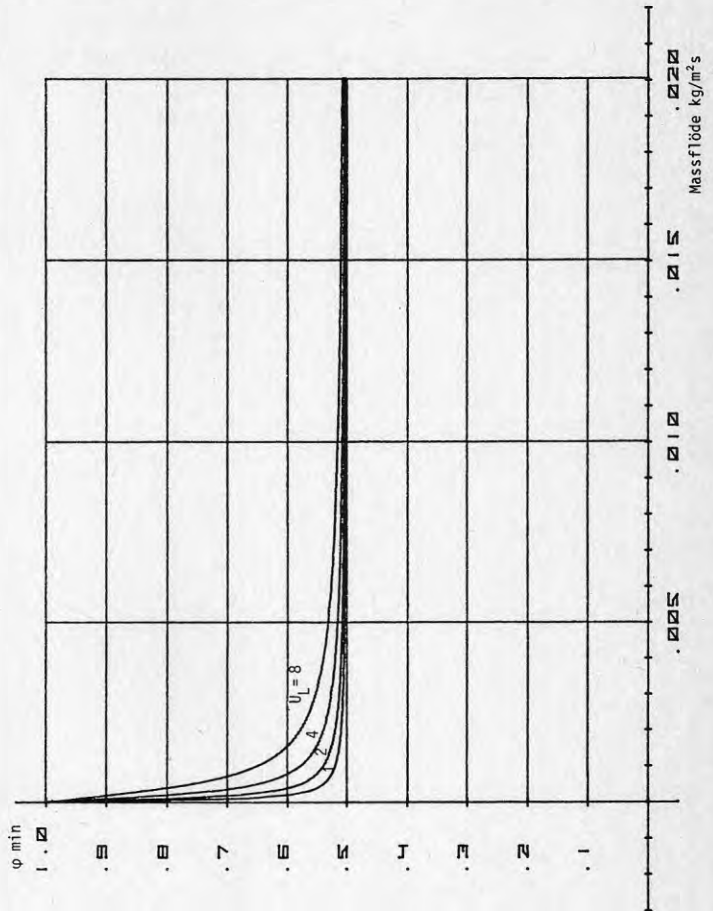




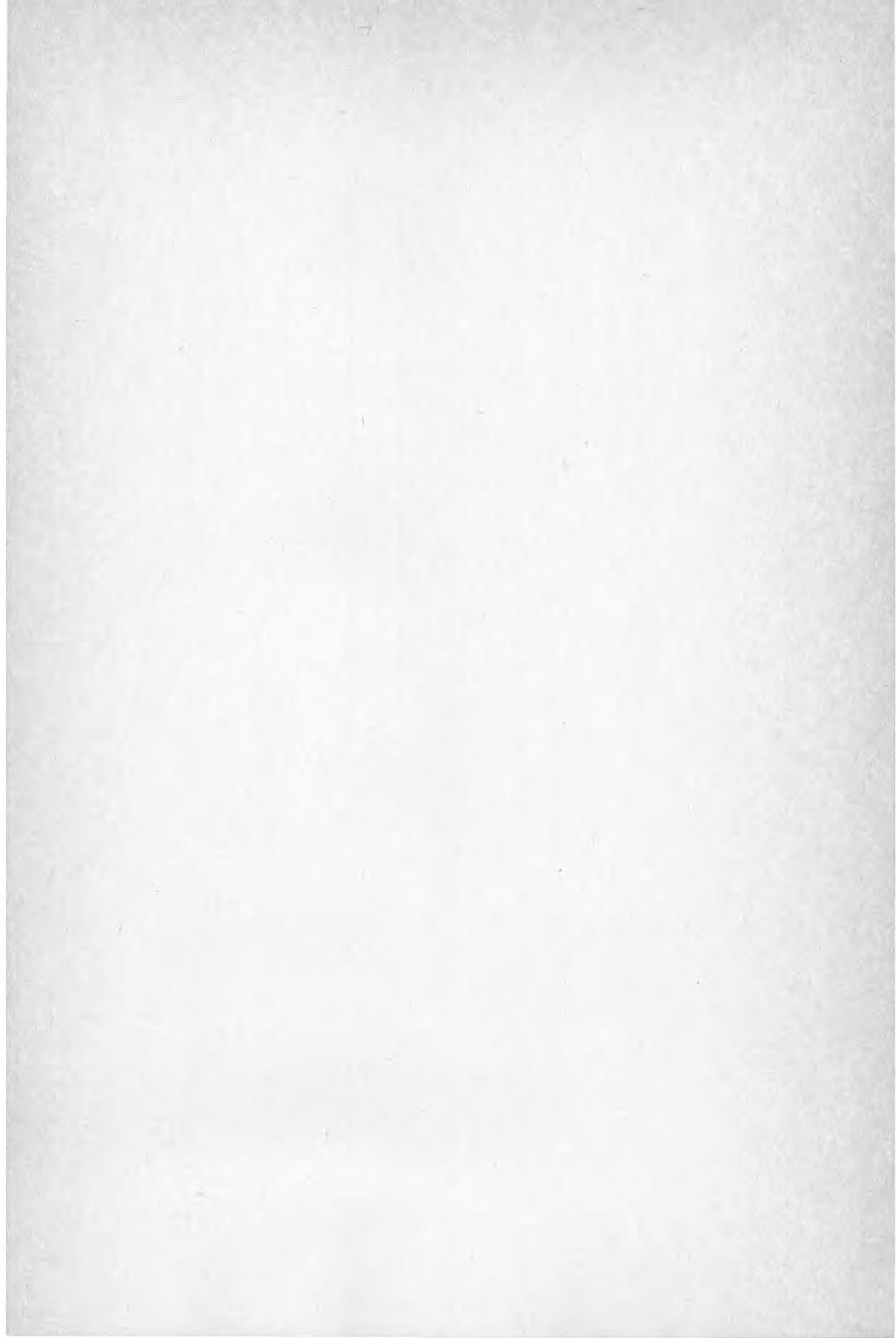
Figur A:4  $F'$  om hela termiska massan ligger i fluiden. Vid olika  $U_L$  enligt ekv. (A.15).



Figur A:5 Andelen termisk massa i fluiden när  $F'=1$ . Vid olika  $U_L$  enligt ekv. (A.19).















**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821229-5  
från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen  
för värme- och kraftteknik, Lunds högskola, Lund.**

**R200: 1984**

**ISBN 91-540-4302-6**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6704200  
Ingår ej i abonnemang**

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

**Cirkapris: 40 kr exkl moms**