

Rapport

R15:1982

**Energiproduktionskostnader
för tappvarmvatten- och
uppvärmningssystem med
olika typer av solfångare**

**Lars Risting
Heimo Zinko**

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	
Plac	<i>ser</i>

*✓
ml*

Byggeforskningsrådet

R15:1982

ENERGIPRODUKTIONSKOSTNADER FÖR TAPPVARMVATTEN-
OCH UPPVÄRMNINGSSYSTEM MED OLIKA TYPER AV
SOLFÅNGARE

Lars Risting
Heimo Zinko

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
791352-9 från Statens råd för byggnadsforskning
till Studsvik Energiteknik AB, Nyköping

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

R15:1982

ISBN 3633-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

INNEHÅLL

1	INLEDNING.....	5
2	MÅLSÄTTNING.....	6
3	BERÄKNINGSMETODER.....	8
3.1	Beräkningsprogram.....	8
3.2	Solfångare.....	16
3.3	Solvärmesystem, allmänt.....	22
3.3.1	Tappvarmvatten.....	22
3.3.2	Uppvärmning + tappvarmvatten.....	22
3.3.3	Uppvärmning + tappvarmvatten med värmepump..	23
3.3.4	Solvärmececentral med säsongslager.....	23
3.4	Ekonomisk modell.....	23
4	SOLVÄRMESYSTEM.....	26
4.1	Tappvarmvatten i småhus.....	26
4.1.1	Systembeskrivning.....	26
4.1.2	Resultat, energi.....	27
4.1.3	Resultat, ekonomi.....	33
4.2	Uppvärmomg + tappvarmvatten småhus.....	37
4.2.1	Systembeskrivning.....	37
4.2.2	Resultat, energi.....	40
4.3	Uppvärmning + tappvarmvatten småhus med värmepump.....	46
4.3.1	Systembeskrivning.....	46
4.3.2	Resultat, energi.....	48
4.3.3	Resultat, ekonomi.....	52
4.4	Solvärmececentral.....	55
4.4.1	Systembeskrivning.....	55
4.4.2	Resultat, energi.....	56
4.4.3	Resultat, ekonomi.....	61
5	KONKLUSIONER OCH SAMMANFATTNING.....	63
	REFERENSFÖRTECKNING.....	67

BILAGOR finns tillgängliga hos:
Institutet för byggdokumentation
Hälsingegatan 49
113 31 Stockholm
Telefon:08-34 01 70

1. INLEDNING

År 1977 utvecklade en av författarna (HZ) vid ett forskninguppehåll i Frankrike tillsammans med en fransk medarbetare (Chouard, se (1)) ett datorprogram för snabb, approximativ beräkning av instrålad energi på och insamlad energi av en given solfångaryta. Programmet (SOLOP) är baserat på långtidsmedelvärden av solskenstid och lufttemperatur, och är anpassat till nio klimatzoner i Sverige.

Senare har SOLOP vidareutvecklats för att ta hänsyn till skuggningseffekter vid uppställningar med flera rader solfångare, och till olika typer av solfångare (glasade eller oglasade, fasta eller följande, plana eller koncentrerande).

Huvudresultaten har redovisats i form av tabeller med solfångarnas medeltemperatur som parameter. Programmet har normalt använts för att få en ungefärlig uppfattning om energiproduktionsförmågan för olika solfångartyper samt för approximativa optimeringar av solfångarsystem (lutning, radavstånd, fältstorlek).

Det har många gånger uttryckts önskemål om att tillämpa SOLOP även på konkreta system, t ex för produktion av tappvarmvatten, för husuppvärmning eller för solvärmecentraler. Det rör sig alltså om system med konsumtionsbehov och drifttemperatur som varierar under året. Eftersom den av SOLOP beräknade energiproduktionen är baserad på månadsmedelvärden och resultaten är beräknade för en fiktiv dag i mitten av månaden (som alltså får representera hela månaden som en slags "medeldag") krävs det också att behovsprofilen anpassas till månadsmedelvärden.

Avsikten med detta arbete är att visa att sådana förenklade metoder kan ge användbara resultat, som stämmer väl överens med mätningar som utförts på vissa av de behandlade systemen. Men vi vill här påminna om att SOLOP-modellen är mest lämpad för relativa jämförelser mellan olika solfångartypers förväntade energiproduktion vid längre tids drift, och att den inte kan förutsäga en viss månads eller ett visst års resultat.

Naturligtvis är alla slutsatser beträffande jämförelser mellan olika solfångartyper temporära, såväl solfångarnas prestanda som kostnader förväntas ändra sig i framtiden. Därför har också endast typiska värden antagits för solfångares prestanda och kostnader, något visst fabrikat refereras aldrig till.

Vi hoppas ändå att resultaten för de olika system som här behandlas kan bli riktningssvisande för framtida tillämpningar.

2. MÅLSÄTTNING

"Vilka solfångare skall användas vid en viss tillämpning?" Huvudmålsättningen med detta arbete var just att undersöka denna mycket vanliga fråga. Vi hoppas att denna rapport kan ge några ledtrådar.

Några av de resultat som presenteras nedan är nog överraskande. Detta beror kanske snarare på subjektiva kostnadsbedömningar än på programfel. Resultat av SOLOP-körningar ligger inte alltför långt ifrån t ex TRNSYS-simuleringar.

Utgångspunkten för denna studie är de olika utföranden som solfångare kan uppvisa, från enkla absorberplåtar till högisolerande vakuumrörsolfångare med 1- och 2-glas solfångare däremellan.

Det finns otaliga mätvärden framtagna för dessa olika solfångarutföranden. Typiska värden, tillsammans med två kostnadsalternativ ("billiga" och "dyra"), utgör grunden för kostnads- nyttoanalysen som genomförs i denna rapport. Som det visas i Avsnitt 3 (Figur 6 och 7) kan verkningsgraden beräknas för olika solfångare. Det framgår att de olika solfångartyperna kan tilldelas vissa temperaturområden där de är som mest till sin fördel, dvs producerar mycket energi. Tar man hänsyn också till investeringskostnader kan dock användningsområdet förskjutas, dvs mest energi är inte identiskt med minsta kostnad per kWh.

Tillämpar man de olika solfångartyperna i ett tappvarmvatten- eller uppvärmningssystem, så kan såväl energibehovet såsom temperaturen variera. De ovan nämnda användningsområdena överlappar varandra, och man måste tillgripa en systemsimulering för att få fram energiproduktionen och dess kostnader.

För beräkningarna är det alltså viktigt att utöver energitillgångsprognosen även åstadkomma en energibehovsprognos baserad på månadsmedelvärden. Detta är relativt enkelt för tappvarmvattensystemet, där konstant behov har antagits över hela året. Vid husuppvärmningssystem får man dock anta en viss månadsmedelförbrukning, motsvarande en viss värmedistributionstemperatur. Denna månadsmedel-

förbrukning kommer också indirekt att bestämma solfångarnas drifttemperatur under månaden, och därmed den insamlade energimängden.

Beräkningarna sker i programmet SOLSYS. Vi vill här igen påpeka att vi endast avser jämförelser av olika solfångares energiproduktionsförmåga i en viss tillämpning, och att enstaka dagars utfall i detta sammanhang saknar betydelse. Vi förväntar oss inte heller att resultaten är absolut riktiga, men de ligger inom rimliga osäkerhetsmarginaler och ger en bra möjlighet att göra relativa jämförelser mellan olika system.

I Avsnitt 3 följer en presentation av beräkningsmetoder och av de olika solfångare som använts. De fyra systemtyper som behandlats presenteras också.

I Avsnitt 4 presenteras resultaten.

Avsnitt 5 slutligen sammanfattar resultatet och ger förslag till fortsatta studier.

3. BERÄKNINGSMETODER

3.1 Beräkningsprogram

Fortranprogrammet SOLSYS är framtaget för att man snabbt skall kunna få en uppfattning om energiproduktionsförmågan hos några olika typer av solvärmesystem.

- a) tappvarmvatten för småhus med korttidslager
- b) uppvärmning och tappvarmvatten för småhus med korttidslager
- c) som b) med värmepump
- d) solvärmecentral med säsongslager

Beräkningstiden är cirka 10 - 15 sekunder för ett fall. Huvuddelen av beräkningarna görs av det förutvarande programmet SOLOP. Systemmodellerna är uppbyggda så att de kommunicerar med SOLOP, dvs ett medeldriftdygn räknas fram för varje månad. Kommunikationen består främst i att solfångarnas drifttemperatur blir definierad under hela medeldriftdygnet.

Medeldriftdygnet tas fram på följande sätt för systemtyperna a) - c):

Kriteriet på medeldriftdygnet är att lagertemperaturen skall vara densamma vid dygnets slut som vid dess början.

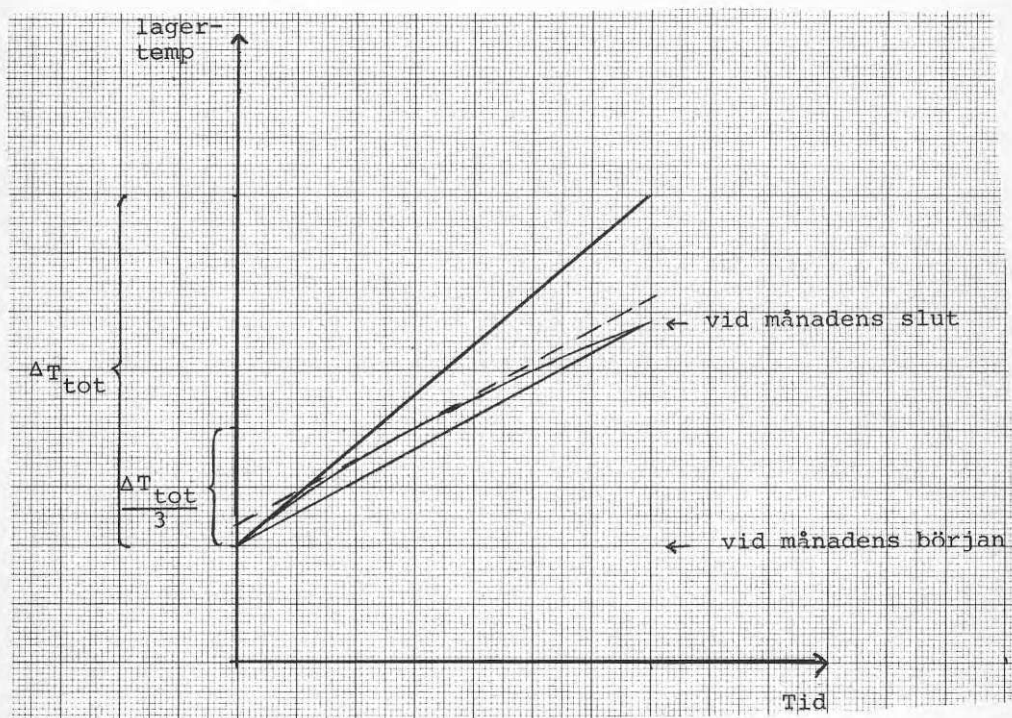
För varje kvart under dygnet räknas fram en energibalans. Ingående energi är eventuell insamlad solenergi, utgående är dels förbrukat energi, dels förluster. Beroende på energinettot och lagervolymen motsvarar detta en ändring av lagrets temperatur. Detta ger en ny lagertemperatur, som kommer att påverka energibalansen för nästa kvart, osv.

För att finna medeldriftdygnet itereras ett par gånger.

För systemtyp d), solvärmecentral, beräknas medeldygnet på annat vis:

Eftersom det är säsongslagring karaktäriseras här medeldygnet av en viss temperaturändring i lagret. Tag t ex månaden maj. Lagertemperaturen stiger under månaden. Temperaturhöjningen sker snabbast i början eftersom solfångarnas verkningsgrad sjunker då temperaturen ökar. Med ett medeldygn menas nu ett dygn då lagertemperaturen stiger med $1/31$ av hela maj månads ökning. Detta medeldygn approximeras på följande sätt:

Vid månadens början har lagret temperaturen T_0 . Med utgångspunkt från denna räknas så fram hur mycket lagertemperaturen ändrar sig med hänsyn till instrålning, förbrukning och förluster under ett dygn. Säg att temperaturen ändras ΔT grader. Detta skulle i första approximation ge för hela månaden $\Delta T_{\text{tot}} \sim 30 \Delta T$. Här har nu antagits att ett mer representativt ΔT för månaden fås vid lagertemperaturen $T_0 + 0.33 \cdot \Delta T_{\text{tot}}$. Faktorn 0.33 är framtagen grafiskt under antagandet att ΔT för lagret avtar linjärt med ökande T_0 . Se Figur 1.



Figur 1

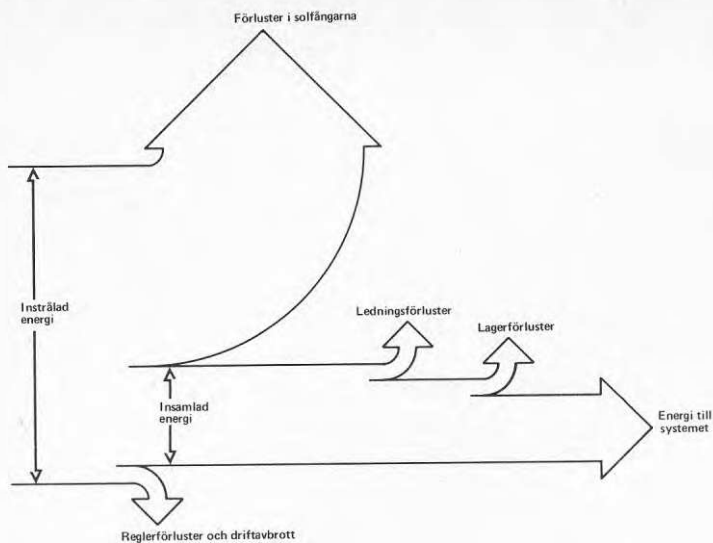
Beräkning av medeldygnet för solvärmecentral-systemet.

Denna faktor kan senare användas för att "kalibrera" programmet mot ett verkligt driftfall.

Genom att göra om beräkningen för medeldriftdygnet vid denna nya lagertemperatur får man fram både medeldygnet och lagertemperaturen vid månadens slut.

I beräkningarna tas hänsyn till värmeförluster i rör och lager, och även till att energiutbytet minskar till följd av att regleringen inte hinner reagera på alla solglimtar samt att systemet av olika anledningar är ur funktion en del av tiden. Denna tillgänglighetsfaktor, som framkommer vid många mätanalyser (t ex IEA-samarbetet för vakuumrörsolfångare) har satts till 85 %. Vi förväntar oss således att de erhållna resultaten är någorlunda realistiska och att de ska kunna jämföras med pågående experiment.

Figur 2 visar summariskt det energiflödesdiagram som ligger till grund för SOLSYS.



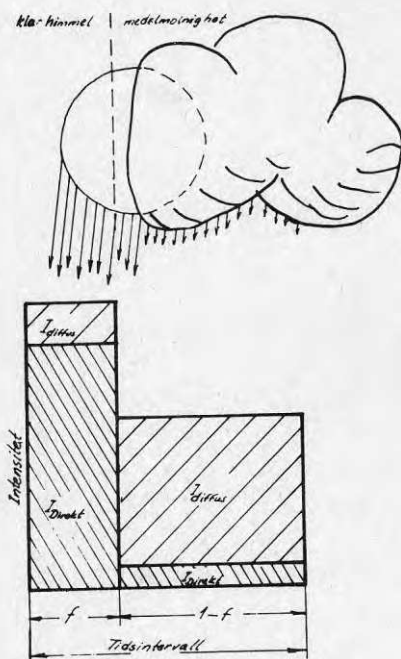
Figur 2

Energiflödet.

Programmet SOLOP är baserat på månadsmedelvärden för solinstrålning, lufttemperatur och antal soltimmar per månad. Det tar hänsyn till fördelning av direkt och diffus solstrålning under molnfria och molniga förhållanden. Varje kvartstimme under ett medeldygn i en månad (den 15 i varje månad) indelas i ett intervall med global solstrålning från klar himmel och ett intervall för medelmolniga förhållanden. Se Figur 3.

Beräkningen av intervallängden och den diffusa strålningsintensiteten för den mulna tiden baseras på en teori utvecklad av Dogniaux (2).

Som grundmått för intervallängden tjänar förhållandet verkliga solskenstiden till maximalt möjliga solskenstiden. Vid tillämpningen för Sverige indelas landet i nio klimatzoner. Månadsmedelvärdena är baserade på ett 30-årsgenomsnitt för månadsmedeltemperatur (dag respektive dygn) och solskenstid. Programmet har testats mot det utförliga TRNSYS-programmet, som är baserat på klimatets aktuella timvärden från 1971. Resultaten överensstämde inom 5 % (3) för plana respektive linjära koncentrerande solfångare.



Figur 3

Illustration för beräkning av solenergi enligt SOLOP-programmet.

Följande ingångsparametrar kan väljas för SOLOP:

Solfångare

Optisk transmissionskoefficient	$\langle \alpha \tau \rangle$
Absorptionsförmåga för diffust ljus	α_d
Värmeförlustkoefficient	β (W/m ² K)
Värmeförlustkoefficient, andra ordningen	c (W/m ² K ²)

Geometri

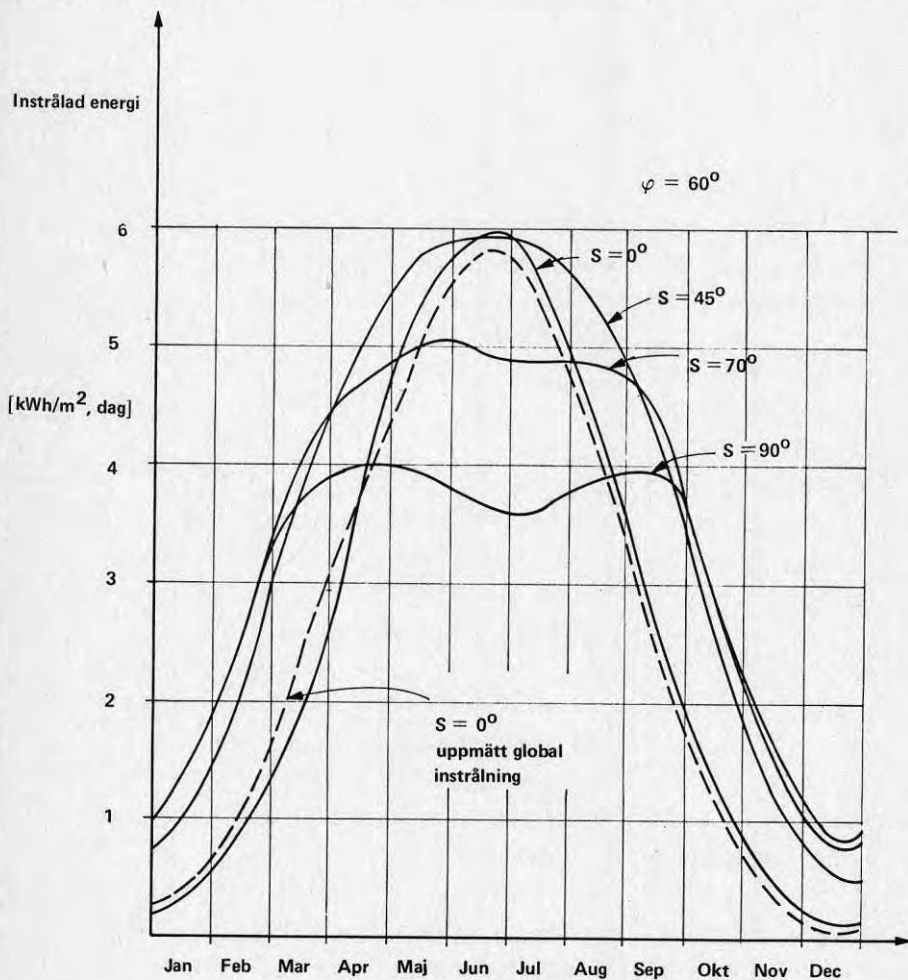
Lutning mot horisontalplanet	s
Orientering mot söder	θ
Höjd	h (m)
Bredd	b (m)
Radavstånd	d (m)
Antal rader	n
Breddgrad	ρ
Horisontavskärningsvinkel	δ

Klimat

Lufttemperatur	30 års
Soltimmar per månad	månads- medelvärden

SOLOP räknar i två steg. I steg ett beräknas för varje kvart under medeldygnet hur mycket energi som infaller mot solfångarna, uppdelat för de molnfria och medelmolninga intervallen dels i direkt, dels i diffust ljus. I steg två beräknas sedan hur mycket av denna infallande energi som under varje kvart fångas in. Detta görs med kunskap om solfångarnas prestandaparametrar och vid önskade absorbatordrifttemperaturer. Insamlad energi från direkt respektive diffust ljus beräknas separat.

Av Figur 4 framgår beräknad och uppmätt instrålning mot en horisontell yta i Stockholm samt även beräknad instrålning mot ytor med olika lutning.



Figur 4

Beräknad och uppmätt instrålning mot en horisontell yta i Stockholm. Beräknad instrålning mot ytor med olika lutning.

3.2 Solfångare

För att bedöma olika solfångares roll för energiproduktionen i ett visst system, kan vi anta successiva "förbättringar" av solfångarna, t ex ett byte av en svartmålad absorbdatoryta till en yta med selektiv beläggning, för att beräkna dels de marginella energivinsterna, dels de marginella kostnaderna som "förbättringen" medför.

Vi tar en svart, oisolerad ("naken"), vattenkyld absorbdator (lågtemperatursolfångare). Denna är med säkerhet det billigaste solfångaralternativet, och är tillräckligt bra för låga temperaturer. Utbytet minskar dock avsevärt vid högre drifttemperaturer på grund av höga konvektionsförluster.

Som första åtgärd kan vi "förbättra" solfångaren genom att isolera den på sidorna och baktill, samt sätta på ett frontglas. Det uppstår absorptionsförluster i glaset, men glasning + isolering ger en avsevärd minskning av värmeförlusterna, så att solfångaren blir effektivare vid högre temperaturer (plan, 1-glas solfångare). Naturligtvis har den också blivit betydligt dyrare.

Nästa steg blir att ytterligare minska värmeförlusterna genom att introducera ett selektivt skikt, som minskar strålningsförlusterna (plan, 1-glas selektiv solfångare). Marginalkostnaderna för det selektiva skiktet är relativt små, och solfångarna kan användas vid ännu högre temperatur.

Ett alternativt sätt att förbättra solfångaren är att minska konvektionsförlusterna med ett tilläggs-glas (plan, 2-glas solfångare). Kostnad-

erna för det andra glaset är i allmänhet (av konstruktionsskäl) relativt höga. Värmeförlustminskningen blir inte heller så hög som för de flesta selektiva ytor. Dessutom tillkommer ytterligare transmissionsförluster, så att detta alternativ inte verkar lika bra som införandet av ett selektivt skikt.

Naturligtvis kan man sätta tilläggsglas även på selektiva solfångare, men den marginella energivinsten blir även här liten jämfört med kostnaderna. Vi bortser här från detta alternativ. Ett steg vidare är att bygga in en selektiv absorbatör i ett evakuerat glaströr (vakuumrörsolfångare). Härmed reduceras både strålnings- och konvektionsförlusterna till en låg nivå. Vakuumrör är ännu relativt dyra, och används oftast tillsammans en reflektorkonstruktion (aluminiumreflektor) som avsevärt nedsätter transmissionskoefficienten. Å andra sidan sparar man ett antal rör. Denna solfångare lämpar sig bäst för högre temperaturer. Nya konstruktioner utan bakreflektor är dock på väg.

Ett annat sätt att minska värmeförlusterna är att minska den värmeupptagande ytan av absorbatören. Detta kan åstadkommas genom strålningskoncentration. I vårt beräkningsfall sker denna med hjälp av en dubbel parabolreflektor av typ CPC, med koncentrationsfaktor 4.

Den strålningskoncentrerande solfångaren måste dock monteras på ett sådant sätt att den följer solen, vilket fördyrar dess tillämpning. Följningen innebär dock större solutnyttjande, vilket avsevärt förbättrar det årliga energiutbytet. Denna solfångare är bäst lämpad för

solvärmecentraler med följningsanordningar, t ex roterande plattform. Figur 5 illustrerar dessa stegvisa "förbättringar" av solfångaren.

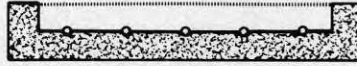
I Figur 6 ges en sammanställning av de olika solfångarnas momentanverkningsgrad som funktion av skillnaden mellan absorbatormedeltemperatur och lufttemperatur.

Figur 7 visar den förväntade årsproduktionen (för Stockholmsklimat) för de olika solfångarna som funktion av medeldrifttemperaturen i absorbatorn.

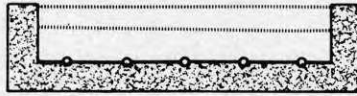
0-glasad



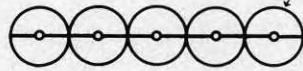
1-glas



2-glas

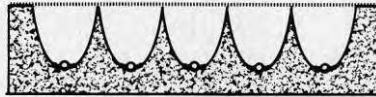


Vakuumrör



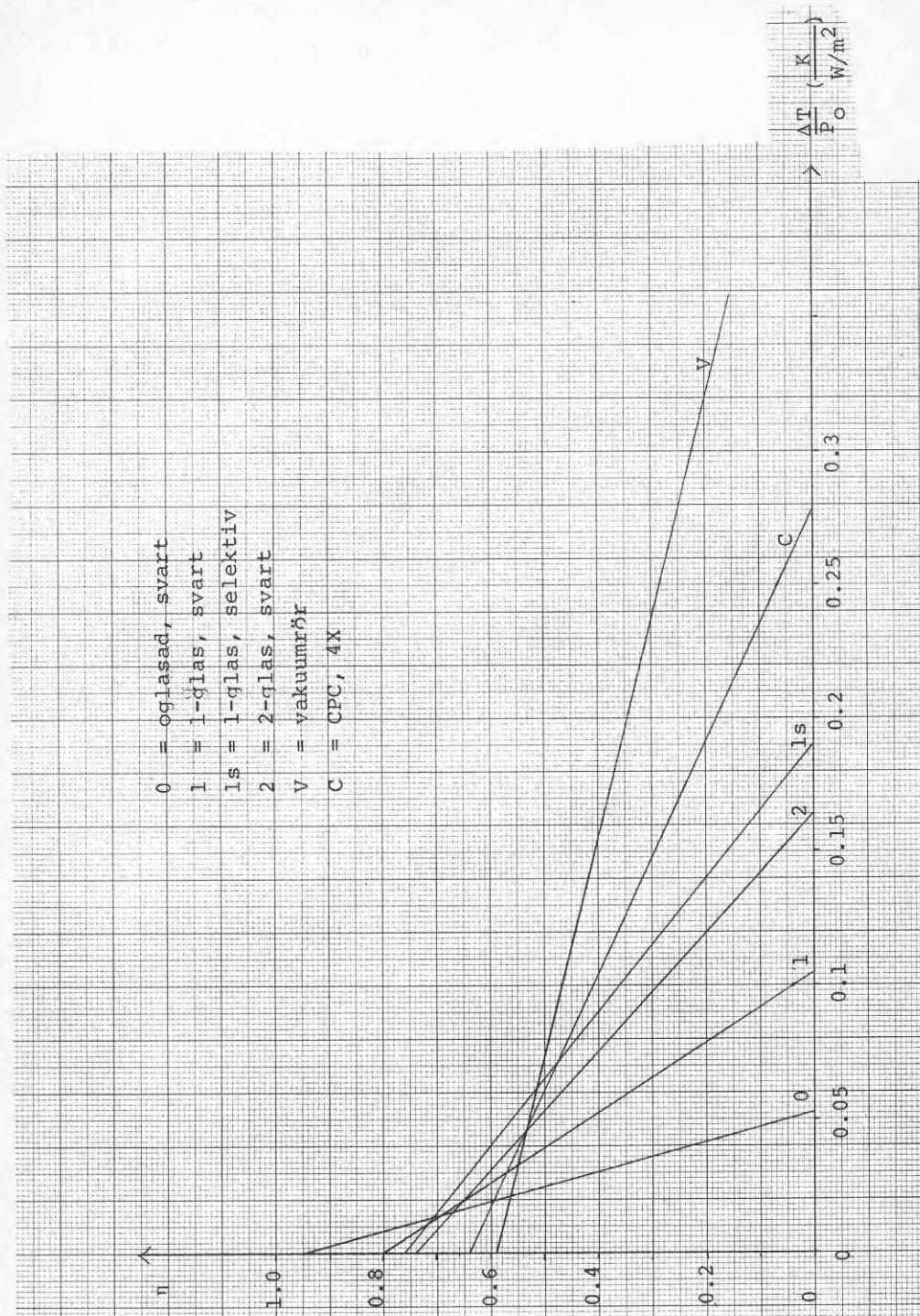
Evakuerat glaströr

CPC



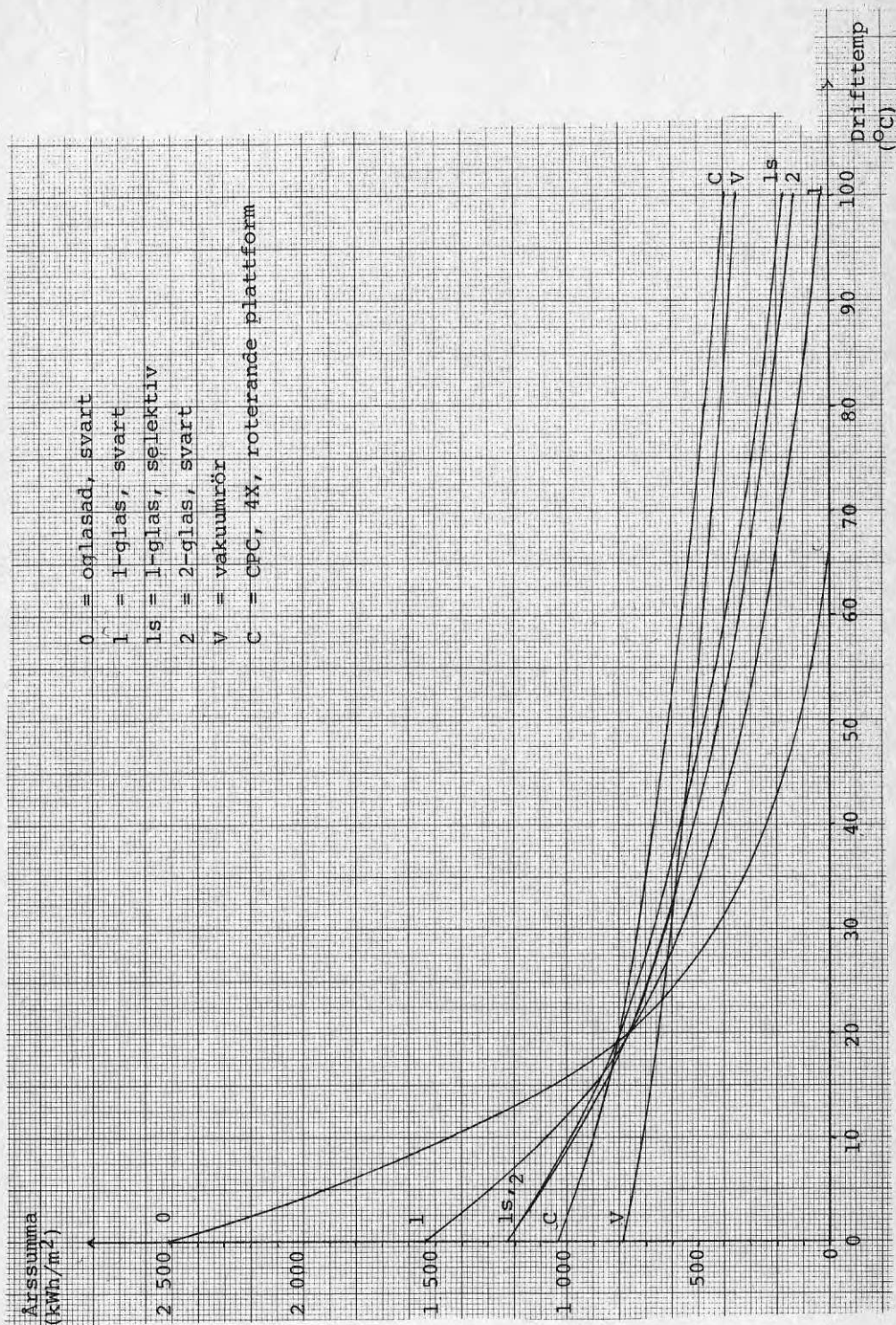
Figur 5

De olika solfångartyperna.



Figur 6

Olika solfångares momentanverkningsgrad (linjärapproximation av ΔT -beroendet).



Figur 7

Årsutbytet för olika solfångare vid Stockholms-klimat.

De karaktäristiska värden som använts för olika solfångartypers prestanda är de som redovisas i Tabell 1.

Tabell 1

Olika solfångartypers prestandaparametrar.

Solfångartyp	$\alpha \tau$	β
Oglasad, svart	0.95	18.0
1-glas, svart	0.80	7.6
1-glas, selektiv	0.76	$4.0 + 0.008 \cdot \Delta T$
2-glas, svart	0.74	$4.5 + 0.006 \cdot \Delta T$
Vakuüm rör	0.59	$1.22 + 0.002 \cdot \Delta T$
CPC, 4X	0.64	2.3

3.3 Solvärmesystem, allmänt

Nedan ges en översiktlig beskrivning av de fyra solvärmesystem som ingår i denna studie. Det rör sig om fyra bassystem, som i verkligheten förekommer i många varianter. Här exemplifieras några förenklade grundfall.

3.3.1 Tappvarmvatten

Systemet består typiskt av omkring 8 - 12 m² takmonterade solfångare, ett korttidslager på omkring 300 liter och en extra konventionell varmvattenberedare. Den årsförsörjningsgrad (levererad solenergi per år dividerat med årsbehovet) man kommer upp till är normalt 40 - 60 %.

3.3.2 Uppvärmning + tappvarmvatten

Större system än bara tappvarmvatten. Solfångarytan är typiskt cirka 20 - 30 m² (takmonterat), lagervolymen (vatten) 1 - 2 m³. Tillsatsvärme behövs även här under många dagar med låg solinstrålning. Försörjningsgraden kan typiskt vara 30 - 50 %.

3.3.3 Uppvärmning + tappvarmvatten med värme- pump

Lagret kan här vara större än i motsvarande system utan värmepump. Dock knappast större än 5 m³. Endast vattenlager har medtagits. Solfångarytan kan även här vara cirka 30 m², Värmepumpen arbetar mellan en kall sida (förångare), eventuellt mer som är solenergilagret, och en varm (kondensor), som är radiatorkretsen.

50 - 60 % försörjningsgrad är rimligt.

3.3.4 Solvärmecentral med säsongslager

Här har huvudsakligen räknats på 2 system av skilda storleksordningar:

- a) simulering av Studsviksanläggningen, dvs 120 m² solfångare och 640 m³ lager för ett hus som kräver ungefär 20 MWh/år
- b) ett tänkt fullskalesystem som skall täcka hela behovet för 400 lägenheter som vardera drar ungefär 12 MWh/år (uppvärmning + tappvarmvatten), storleken blir ungefär 14 000 m² solfångare och 50 000 m³ lager (vatten)

3.4 Ekonomisk modell

I de ekonomiska beräkningarna har följande modell använts:

Solfångarna antas tillhöra endera av typerna

- a) oglasad, svart
- b) 1-glas, svart
- c) 1-glas, selektiv
- d) 2-glas, svart
- e) vakuümör
- f) CPC (4X)

Prismässigt har räknats med 2 alternativ, ett "dyrt", som är ungefär dagens prisnivå, och ett "billigt", som är en förväntad nivå vid mitten av 80-talet, baserad på indikationer från industrin. I detta sammanhang kan vi dock bortse från tidsperspektivet och endast diskutera två prisalternativ.

Priset per kvadratmeter solfångare framgår av Tabell 2.

Tabell 2

Antagna priser på solfångare.

Solfångartyp	billiga (Kr/m ²)	dyra (kr/m ²)
Oglasad, svart	300,-	300,-
1-glas, svart	700,-	900,-
1-glas, selektiv	800,-	1 100,-
2-glas, svart	900,-	1 200,-
vakuumrör	1 000,-	1 500,-
CPC 4X	700,-	1 000,-

Övriga kostnader antas vara för ett system i taget:

Tappvarmvatten

- a) Rör + installation: 6 000,-, fast kostnad
- b) Lager: ett kärl med volymen $V = 300$ liter kostar 4 000,-, för andra volymer är priset proportionellt mot $V^{0.65}$

Uppvärmning + tappvarmvatten

- a) Rör m m: 14 000,-, fast kostnad
- b) Lager: 2 500,- för ett 1.0 m³ lager (trycklöst med värmeväxlare), för andra volymer enligt $V^{0.65}$

Uppvärmning + tappvarmvatten med värmepump

- a) som ovan
- och b)
- c) Värmepump: en värmepumpsanläggning med effekten $P = 10$ kW kostar 30 000,-, för andra effekter är priset proportionellt mot $P^{0.65}$

Solvärmecentral

- a) Rör och VVS: 300,- per kvadratmeter solfångare
- b) Lager: 110,- per kubikmeter lager + en fast kostnad på 300 000,-
- c) Stativ till solfångare: 100,- per kvadratmeter lockyta på lagret, 300,- per kvadratmeter markyta (då solfångarna inte får plats på lagrets lock)

Då totalkostnaden för ett system enligt ovanstående divideras med den årligen levererade solenergin får man ett mått (uttrycks i kr/(kWh/år)) på systemets kostnadseffektivitet.

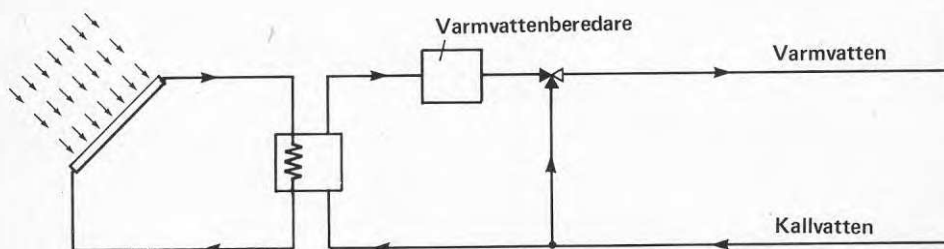
De ovan nämnda kostnaderna härrör från uppgifter från tillverkare och VVS-installatörer. Solfångarpriserna inkluderar inte stativ, ty de antas vara takmonterade utom i systemtyp d), solvärmecentral, då stativkostnaderna tas upp separat.

Kostnaderna för VVS-system och värmepumpar motsvarar gällande enetreprenörpriser på marknaden (1980 års nivå).

4. SOLVÄRMESYSTEM

4.1 Tappvarmvatten i småhus4.1.1 Systembeskrivning

Systemmodellen är uppbyggd enligt Figur 8.



Figur 8

Tappvarmvattensystem.

Kallvatten tas in i korttidslagret, varifrån det cirkuleras till solfångarna och värms. Alternativt är solfångarkretsen skild från tappvarmvattensystemet med en värmeväxlare i lagercisternen.

Från lagret tas sedan varmvatten.

Ifall lagertemperaturen är lägre än önskad varmvattentemperatur antas att en efterföljande konventionell varmvattenberedare höjer temperaturen till den önskade. Ifall lagertemperaturen är högre än önskad varmvattentemperatur antas att vattnet från lagret blandas med förbishuntat kallvatten i lagom mängd.

Varmvattenberedaren och lagret kan också tänkas vara sammanbyggda i en enhet.

I utskriften kan man utläsa (månadsvis och årssummor) instrålad energi, insamlad energi, solenergibidrag till tappvarmvatten, totalt energibehov för tappvarmvatten och lagrets medeltemperatur.

Exempel på utskrift finns i Bilaga A.

4.1.2 Resultat, energi

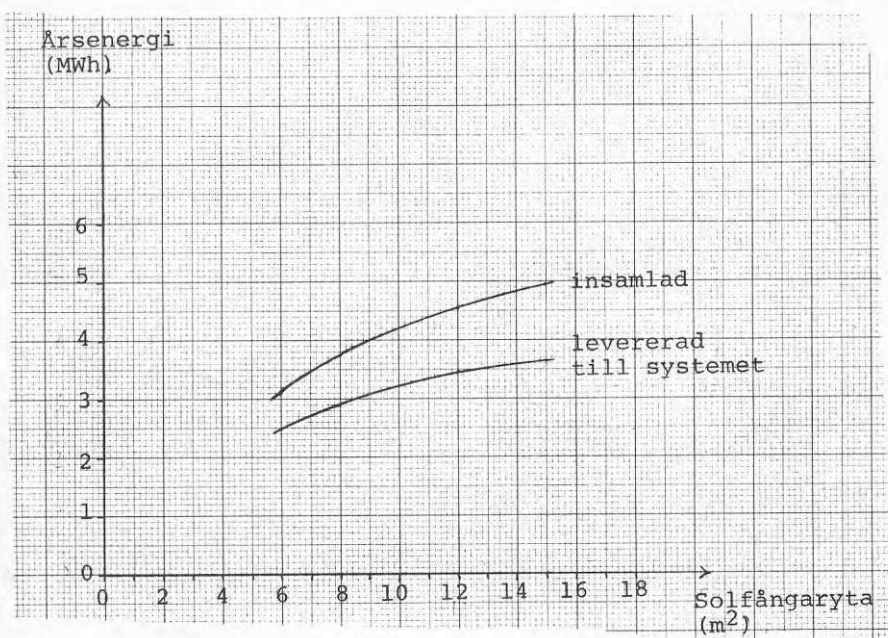
Förutom solfångartypen har följande parametrar varierats för att studera deras inverkan på systemets uppförande: solfångarnas yta, solfångarnas lutningsvinkel, lagrets volym.

Varmvattenbehovet har antagits vara 300 liter per dygn vid 50°C som måste värmas från 10°C, vilket motsvarar energibehovet 13.9 kWh/dygn. Med hänsyn till programmets karaktär har det bedömts som meningslöst att använda någon dygnsprofil för varmvattenanvändningen; åtgången är jämnt fördelad över dygnets alla 15-minuterperioder.

För förlustberäkningarna har antagits att lagret är försett med en 3 cm tjock isolering, $\lambda = 0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Rörledningarna på taket antas vara 20 m långa, med 2 cm irsolering, $\lambda = 0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Latituden är genomgående satt till 60°, ingen horisontavskärmning har äknats med, solfångarna antas alltid sitta på ett tak som är vänt rakt mot söder.

Betydelsen av solfångarnas area

För att studera detta beräknades en serie fall med följande gemensamma data: taklutning 45° , solfångare av typ 1-glas, selektiv, 300 liter lagervolym. Resultatet av dessa visas i Figur 9.



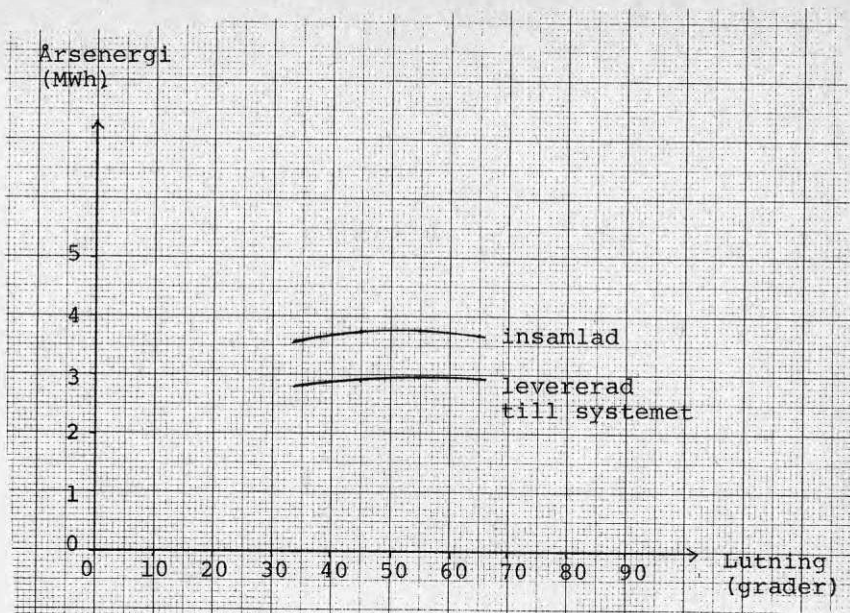
Figur 9

Betydelsen av solfångararean i ett tappvarmvattensystem. Solfångarnas lutning = 45° , typ 1-glas, selektiv. Lagervolymen = 300 l.

Vid lagervolymen 300 liter verkar det rimligt att begränsa sig till ca 12 m^2 solfångare. För större areor går en allt större del av energin till förluster.

Solfångarnas lutning

Inverkan av detta studeras genom att följande fall beräknades med olika lutningar: solfångare 8 m^2 , 1-glas, selektiv, 300 liter lagervolym. Resultat enligt Figur 10:



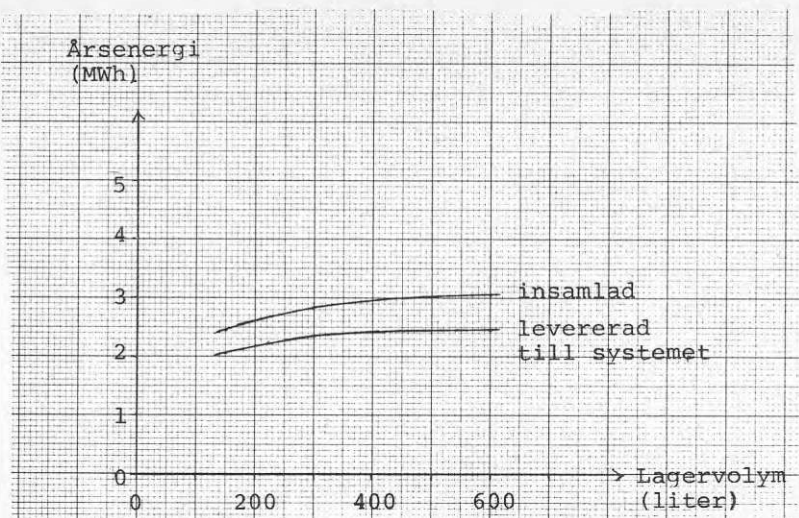
Figur 10

Betydelsen av solfångarnas lutningsvinkel i ett tappvarmvattensystem. 8 m² solfångare av typ 1-glas, selektiv. 300 l lagervolym.

Som framgår av Figur 10 så finns inget starkt lutningsberoende för energiproduktionen. Optimum tycks dock ligga mellan 50° och 60° lutning.

Lagervolymens betydelse

För att studera den kördes en serie fall med följande gemensamt: solfångare area 12 m², typ oglasad, svart, lutning 55°. Resultat enligt Figur 11.:

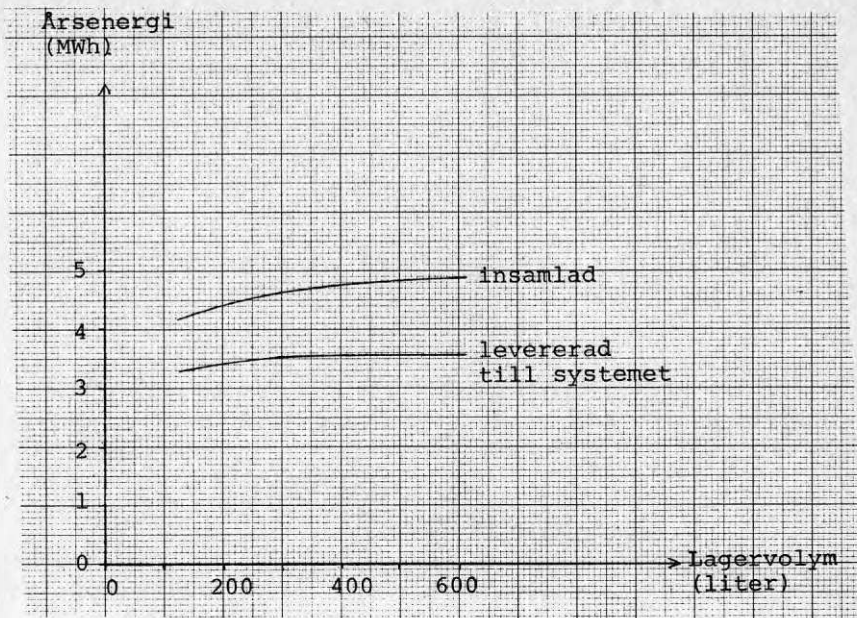


Figur 11

Betydelsen av lagervolymen i ett tappvarmvatten-system. Solfångare av typ oglasad, svart, lutning 55° , area 12 m^2 .

Mer än omkring 300 liters lagervolym tycks i detta fall inte vara energiekonomiskt - lagerförlusterna ökar med volymen.

I Figur 12 visas resultatet av motsvarande körningar med solfångare av typ 1-glas, selektiv.



Figur 12

Betydelsen av lagervolymer i ett tappvarmvatten-system. Solfångare av typ 1-glas, selektiv, lutning 55° , area 12 m^2 .

Olika solfångare

Ett system med 300 liters lagervolym och taklutning 45° beräknades för både 8 m^2 och 12 m^2 solfångare av olika typer. Resultatet presenteras i Tabell 3:

Tabell 3

Olika solfångartypers energiproduktionsförmåga i ett tappvarmvattensystem med 8 respektive 12 m² solfångare i 45° lutning och 300 l korttidslager.

8 m² solfångare

Solfångare typ	Insamlad årsenergi (MWh)	Levererad årsenergi (MWh)	Årsförsörjningsgrad (%)	Försörjningsgrad bästa månaden (%)
Oglasad, svart	2.39	1.99	39	70
1-glas, svart	3.08	2.49	49	83
1-glas, selektiv	3.73	2.90	57	91
2-glas, svart	3.50	2.76	54	88
vakuurmör	3.81	1.97	58	91

12 m² solfångare

Solfångare typ	Insamlad årsenergi (MWh)	Levererad årsenergi (MWh)	Årsförsörjningsgrad (%)	Försörjningsgrad bästa månaden (%)
Oglasad, svart	2.79	2.31	45	79
1-glas, svart	3.76	2.98	59	94
1-glas, selektiv	4.54	3.44	68	100
2-glas, svart	4.29	3.30	65	99
vakuurmör	5.02	3.60	71	100

Utav detta framgår att vakuurmörsolfångare och därefter selektiva, 1-glas solfångare har den bästa energieffektiviteten för tappvarmvattensystem. I nästa avsnitt visas dock att även oglasade solfångare är intressanta av ekonomiska skäl.

Från Tabell 3 framgår även årsförsörjningsgraden för de olika systemen. Årsförsörjningsgraden är definierad som den bråkdel av årsenergiebehovet som täcks av solenergi. I sista kolumnen anges

även försörjningsgraden för bästa månaden (juli). Med hänsyn till det faktum att beräkningsprogrammet är baserat på långtidsmedelvärden måste dessa siffror tas med en nypa salt, men de resultat som erhålls för t ex selektiva 1-glas solfångare (8 m²) ligger helt inom gränserna för det som normalt förväntas av tappvarmvattensystem samma månad.

4.1.3 Resultat, ekonomi

De fall som beräknats ovan har också behandlats ekonomiskt. Se först på variation av lagervolymer: ett system består av 12 m² oglasade, svarta solfångare, lutning 55°. Kostnaderna blir då för några olika lagervolymer:

Volym 100 liter	ger totalkostnad	11 600 kr	eller	6:32 per kWh/år
" 150 liter	"-	12 100 kr	"	5:87 per kWh/år
" 300 liter	"-	13 600 kr	"	5:89 per kWh/år
" 600 liter	"-	15 900 kr	"	6:51 per kWh/år

Även detta pekar på ett lager om högst cirka 300 liter. Mindre lager kan också användas med fördel.

Inverkan av solfångarnas area: se på ett system med oglasade solfångare, lutning 45°, lagervolym 300 liter.

Kostnaderna blir för några olika areor:

Arean 8 m ²	ger totalkostnad	12 400 kr	eller	6:23 per kWh/år
" 12 m ²	"-	13 600 kr	"	5:89 per kWh/år
" 15 m ²	"-	14 500 kr	"	5:87 per kWh/år
" 20 m ²	"-	16 000 kr	"	6:05 per kWh/år

Ett annat system består av l-glas, selektiva solfångare, lutning 45° , lager 300 liter. För några olika areor blir kostnaderna då:

a) billiga

Arean	6 m ²	ger totalkostnad	14 800 kr	eller	5:97 per kWh/år
"	8 m ²	"-	16 400 kr	"	5:66 per kWh/år
"	12 m ²	"-	19 600 kr	"	5:70 per kWh/år
"	15 m ²	"-	22 000 kr	"	6:00 per kWh/år

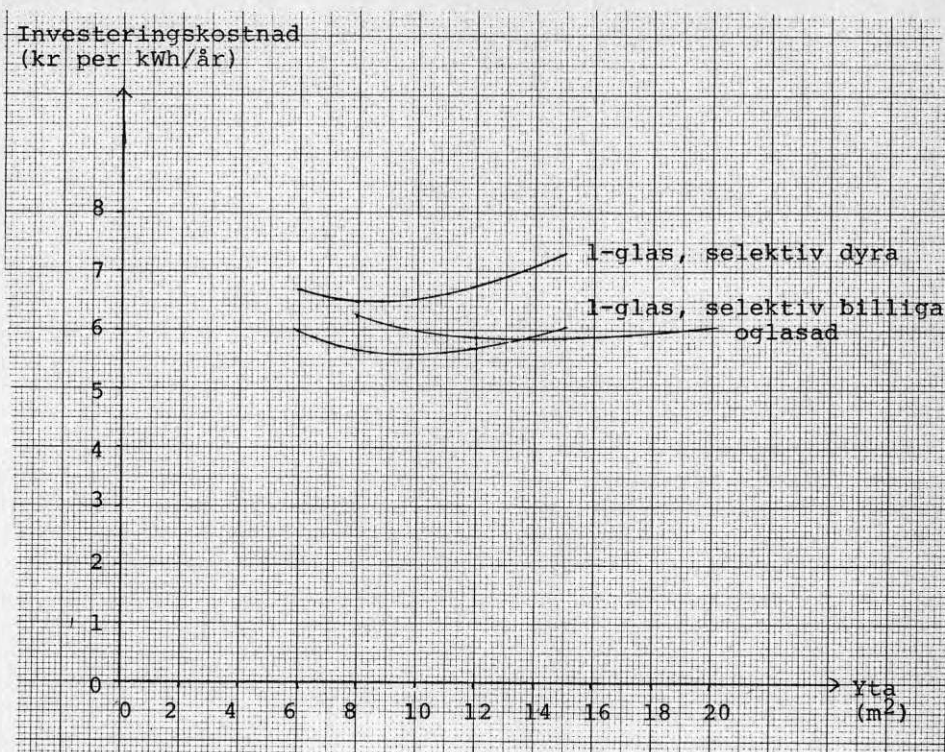
Se också Figur 13.

b) dyra

Arean	6 m ²	ger totalkostnad	16 600 kr	eller	6:69 per kWh/år
"	8 m ²	"-	18 800 kr	"	6:48 per kWh/år
"	12 m ²	"-	23 200 kr	"	6:74 per kWh/år
"	15 m ²	"-	26 500 kr	"	7:30 per kWh/år

Se också Figur 13.

För l-glas, selektiva solfångare ligger tydligen kostnadsoptimum på ett system med cirka 8 m² solfångare, medan det i fallet oglasade kan löna sig att gå upp till omkring 15 m².



Figur 13

Investeringskostnadens beroende av solfångararean i ett tappvarmvattensystem. Solfångarnas lutning = 45° , lagervolymen = 300 l.

För att jämföra de olika solfångartypernas kostnadsnivåer med varandra har följande jämförelse gjorts: Kostnaderna för ett system med 300 liter lager och solfångarlutning 45° har räknats fram för dels 8 m^2 , dels 12 m^2 solfångare. Resultatet av detta presenteras i Tabell 4.

Tabell 4

Jämförelse mellan kostnadseffektiviteterna för olika solfångartyper i ett tappvarmvatten-system. Lagervolym 300 l, solfångarnas lutning 45°.

Solfångare typ	8 m ² , billiga/dyra		12 m ² , billiga/dyra		Investerings- kostnad (kr/(kWh/år))
	Försörj- nings- grad (%)	Investerings- kostnad (kr)	Försörj- nings- grad (%)	Investerings- kostnad (kr)	
Oglasad, svart	39	12 400/12 400	45	13 600/13 600	5:89/5:89
1-glas, svart	49	15 600/17 200	59	18 400/20 800	6:17/6:98
1-glas, selektiv	57	16 400/18 800	68	19 600/23 200	5:70/6:74
2-glas, svart	54	17 200/19 600	65	20 800/24 400	6:30/7:39
Vakuurnrör	58	18 000/22 000	71	22 000/28 000	6:11/7:77

I det dyra alternativet blir slutsatsen att det blir billigast med ett system bestående av 12 m² oglasade solfångare + 300 liter lager.

I det billiga alternativet lönar det sig däremot bäst med 8 m² solfångare av typ 1-glas, selektiv.

Det kan alltså för tappvarmvattensystemet vara befogat att, beroende på solfångarkostnader, välja mellan två systemalternativ. Enkla, oglasade solfångare, 12 m² respektive selektiva 1-glas solfångare, 8 m².

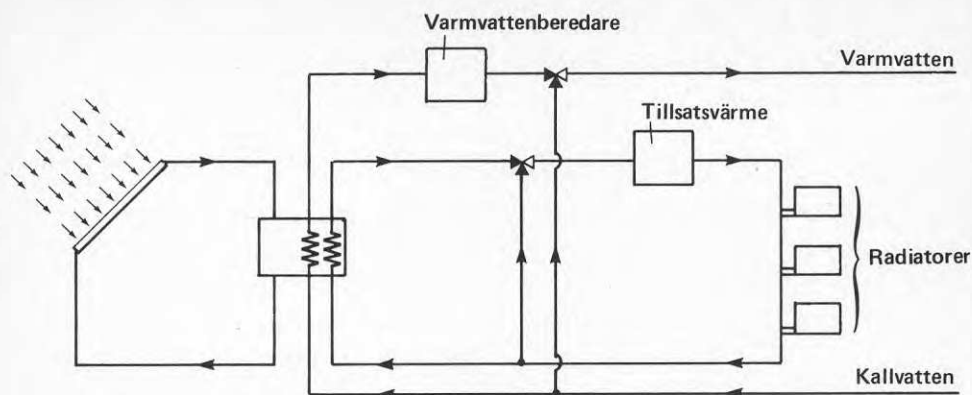
Alternativet 8 m² oglasade solfångare medför de lägsta investeringskostnaderna räknat i kronor, men försörjningsgraden är då 39 %, jämfört med 57 % för 8 m² selektiva 1-glas.

Ett system med selektiva 1-glas-solfångare med samma försörjningsgrad (39 %) som oglasade solfångare (4.5 m² solfångare, 200 l lager) skulle medföra en kostnad av 6:21 kr/(kWh/år) (billiga) eller 6:87 (dyra) och är således inte billigare . De övriga solfångartyperna, inklusive vakuumsolfångare, blir antingen dyrare eller mindre effektiva i drift.

4.2 Uppvärmning + tappvarmvatten småhus

4.2.1 Systembeskrivning

Uppvärmningssystemet antas fungera enligt Figur 14.



Figur 14

System för uppvärmning och tappvarmvatten.

Följande förenklade antaganden görs: Returvattentemperaturen från radiatorerna antas vara konstant = 20°C . Flödet genom radiatorerna antas konstant och så stort att effekten med maximalt temperaturfall över radiatorerna är tillräcklig för årets kallaste dag. Det som regleras beroende på uppvärmningsbehovet är alltså enbart framledningstemperaturen till radiatorerna. Maximala framledningstemperaturen antas här vara 60°C . Då lagertemperaturen är högre än den framtemperatur som krävs antas att en del av returvattnet shuntas förbi lagret så att rätt framtemperatur erhålles.

Då lagertemperaturen är lägre än 20°C antas att allt returvatten shuntas helt förbi lagret.

Tappvarmvattensystemet antas fungera likadant som i systemet med bara tappvarmvatten (typ a)), med undantag av att det uppvärms i ett genomströmningsbatteri i det trycklösa lagret.

I utskriften kan man utläsa instrålad energi, insamlad energi, solenergi till tappvarmvatten, totalt energibehov tappvarmvatten, solenergi till uppvärmning, totalt energibehov uppvärmning och medeltemperaturen i lagret. Dels månadsvis, dels årssummor. Exempel på utskrift finns i Bilaga B.

Grundförutsättningar för huset

Tappvarmvattenbehovet har antagits vara detsamma som för tappvarmvattensystemet, dvs 300 liter per dygn, temperatursteg 10°C till 50°C , eller 13.9 kWh/dygn. Uppvärmningsbehovet har beräknats enligt följande:

Huset antages vara välisolerat med en bostadsyta av 120 m^2 , och en total omslutande yta av 300 m^2 , varav 20 m^2 fönster. K-värdet är $0.25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $1.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ för fönster. Detta ger transmissionsförluster $280\cdot 0.25 + 20\cdot 1.8 = 110\text{ W/K}$. Lägger man till ventilationsförluster 40 W/K så fås ett totalt effektbehov 150 W/K . Detta räknas per grad under 16°C . Gratiseffekten av personvärme och hushållsel är satt till 500 W .

Lagret har antagits vara försett med 10 cm isolering, $\lambda = 0.03\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, rörledningarna har antagits ha 2 cm isolering, $\lambda = 0.04\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

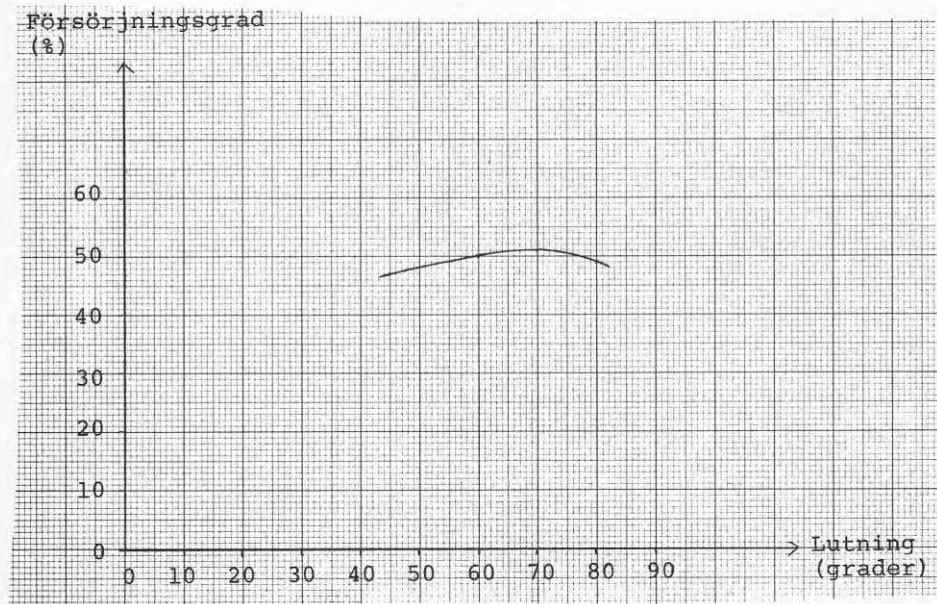
Latituden är 60° , horisontavskärningsvinkeln är noll, solfångarna antas vända rakt mot söder.

4.2.2 Resultat, energi

Betydelsen av solfångarnas lutning

Eftersom energibehovet för uppvärmning är störst på vintern då solen står lågt kan man vänta att maximala årsförsörjningsgraden för ett givet system fås vid en brantare lutningsvinkel än vad man fick i fallet tappvarmvatten. Där fanns ju ett flackt maximum vid cirka 55°.

Ett hus med behov enligt ovan simulerades med 30 m² solfångare av typ 1-glas, selektiv och ett lager på 2.0 m³. Årsförsörjningsgradens beroende av lutningsvinkeln syns i Figur 15:



Figur 15

Årsförsörjningsgraden beroende av solfångarnas lutningsvinkel i ett system för uppvärmning och tappvarmvatten. Lagervolym 2 m³, solfångare av typ 1-glas, selektiv, area 30 m².

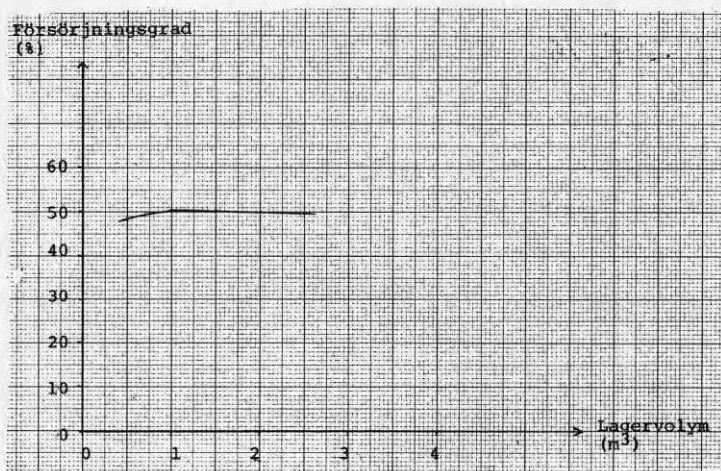
Maximum ligger alltså vid cirka 70° lutning. Som "standardfall" har använts ett system som består av 30 m² solfångare av typ 1-glas, selektiv, med 70° lutning, och ett lager på 2.0 m³. Med ett effektbehov enligt vad som sagts ovan blir årsbehovet 12.2 MWh totalt, varav 58 % till uppvärmning och 42 % till tappvarmvatten.

Instrålad energi är 38.3 MWh/år eller 1.3 MWh/(m²·år). Insamlad energi är 7.9 MWh/år, vilket ger en total årsverkningsgrad på 21 %. Energi levererad till nytta är 6.1 MWh/år, eller med andra ord en årsförsörjningsgrad på 50 %.

Jämförelser har sedan gjorts utgående från standardfallet.

Lagervolymens betydelse

För att se hur försörjningsgraden beror av lagervolymen testades också andra lagervolymer mot standardfallet. Resultatet ses i Figur 16.



Figur 16

Årsförsörjningsgradens beroende av lagervolymen i ett system för uppvärmning och tappvarmvatten. 30 m² solfångare av typ 1-glas, selektiv, lutning 70°.

Ett alltför stort lager tjänar inte någonting till, lika lite här som i fallet tappvarmvatten. Optimum i detta fall ligger vid ungefär 1.0 - 1.5 m³ lagervolym.

Olika solfångare

En serie beräkningar gjordes enligt standardfallet med olika solfångartyper. Resultatet av detta redovisas i Tabell 5.

Tabell 5

Olika solfångartypers energiproduktionsförmåga i ett system för uppvärmning och tappvarmvatten.

Solfångare typ	Insamlad årsenergi (MWh)	Levererad årsenergi (MWh)	Års-försörjningsgrad (%)
Oglasad, svart	4.61	4.23	34
1-glas, svart	6.05	5.37	44
1-glas, selektiv	7.95	6.12	50
2-glas, svart	6.79	5.92	48
Vakuümör	8.14	6.57	54

Vakuümör-solfångarna visar upp bäst resultat, därefter kommer typen 1-glas, selektiv.

4.2.3 Resultat, ekonomi

Standardfallet med 30 m² solfångare av typ 1-glas, selektiv provades med lagervolymer 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 och 2.5 m³.

Kostnaderna redovisas i Tabell 6.

Tabell 6

Lagervolymens inverkan på investeringskostnaden för ett system för uppvärmning och tappvarmvatten. Solfångare av typ 1-glas, selektiv.

Volym (m ³)	Årsförsörj- grad (%)	billiga/dyra		Investerings- kostnad (kr/(kWh/år))
		Investerings- kostnad (kr)	Investerings- kostnad (kr)	
0.5	48	39 600/48 600	6:78/8:29	
1.0	51	40 500/49 500	6:57/8:04	
1.5	51	41 300/50 300	6:71/8:17	
2.0	50	41 900/50 900	6:85/8:32	
2.5	49	42 500/51 500	6:98/8:46	

Mest ekonomiskt verkar vara att ha ett lager på ungefär 1 m³.

Solfångarnas area

För att illustrera solfångarareans inverkan beräknades några fall med oglasade solfångare, lutning 70°, enligt Tabell 7.

Tabell 7

Solfångarareans inverkan på investeringskostnaden för ett system för uppvärmning och tappvarmvatten. Solfångare av typ oglasad, svart.

Solfångar- area (m ²)	Lager- volym (m ³)	Årsförsörj- ningsgrad (%)	Investerings- kostnad (kr)	Investerings- kostnad (kr/(kWh/år))
20	1.0	28	22 500	6:50
20	1.5	29	23 300	6:68
20	2.0	29	23 900	6:85
30	1.0	34	25 500	6:21
30	1.5	34	26 300	6:33
30	2.0	34	26 900	6:36
40	1.5	37	29 300	6:49
40	2.0	37	29 900	6:59
40	3.0	38	31 100	6:90

Detta tyder på att 30 m² är nära den optimala ytan för oglasade solfångare.

En motsvarande serie kördes också med solfångare av typ l-glas, selektiv. Lutningen är också här satt till 70°. Resultatet ses i Tabell 8.

Tabell 8

Solfångarareans (och lagervolymens) inverkan på investeringskostnaden för ett system för uppvärmning med tappvarmvatten. Solfångare av typ l-glas, selektiv.

Solfångar- area (m ²)	Lager- volym (m ³)	Årsförsörj- ningsgrad (%)	Investerings- kostnad (kr)	Investerings- kostnad (kr/(kWh/år))
30	1.0	50	40 500/49 500	6:73/8:23
30	1.5	50	41 300/50 300	6:83/8:32
20	1.0	43	32 500/38 500	6:21/7:36
20	1.5	44	33 300/39 300	6:30/7:43
15	0.3	36	27 100/31 600	6:10/7:11
15	0.5	38	27 600/32 100	5:94/6:90
10	0.3	30	23 100/26 100	6:25/7:06

Kostnadsoptimum tycks här ligga på omkring 15 m² solfångare. Årsförsörjningsgraden är dock bara 38 % vid denna yta, jämfört med 50 % vid 30 m².

Solfångartyp

Standardfallet (30 m² solfångare, 2 m³ lager) har beräknats för de olika solfångartyperna.

Resultat i Tabell 9.

Tabell 9

Olika solfångartypers kostnadseffektivitet i ett system för uppvärmning och tappvarmvatten. 30 m² solfångare, 2 m³ lager.

Solfångartyp	Årsförsörjningsgrad (%)	billiga/dyra	
		Investeringskostnad (kr)	Investeringskostnad (kr/(kWh/år))
Oglasad, svart	34	26 900/26 900	6:36/6:36
1-glas, svart	44	38 900/44 900	7:25/8:37
1-glas, selektiv	50	41 900/50 900	6:85/8:32
2-glas, svart	48	44 900/53 900	7:59/9:11
Vakuümör	54	47 900/62 900	7:30/9:58

Med denna storlek på systemet lönar det sig tydligen bäst att använda solfångare av oglasad typ. Med selektiva solfångare ökar dock försörjningsgraden från 34 % till 50 %, marginal kostnader blir ca 50 öre/(kWh/år).

Med hänsyn till resultatet i Tabell 8 är det också av intresse att jämföra de olika solfångartyperna i ett billigare system med lägre årsförsörjningsgrad. De olika solfångartyperna kördes alltså i ett fall med 15 m² solfångare, lutning 70°, och ett lager på 500 liter. Resultatet ses i Tabell 10.

Tabell 10

Olika solfångartypers kostnadseffektivitet i ett system för uppvärmning och tappvarmvatten, 15 m² solfångare, 0.5 m³ lager.

Solfångartyp	Årsförsörjningsgrad (%)	billiga/dyra	
		Investeringskostnad (kr)	Investeringskostnad (kr/(kWh/år))
Oglasad, svart	24	20 100/20 100	6:73/6:73
1-glas, svart	33	26 100/29 100	6:55/7:31
1-glas, selektiv	38	27 600/32 100	5:90/6:86
2-glas, svart	37	29 100/33 600	6:51/7:52
Vakuümör	39	30 600/38 100	6:40/7:96

För att belysa systemstorlekens (eller försörjningsgradens) inverkan på kostnaderna beräknades ytterligare ett par fall:

- a) Oglasade, svarta solfångare, 45 m², lagervolym 3 m³ och
- b) 1-glas, selektiva solfångare, 10 m², lagervolym 0.4 m³.

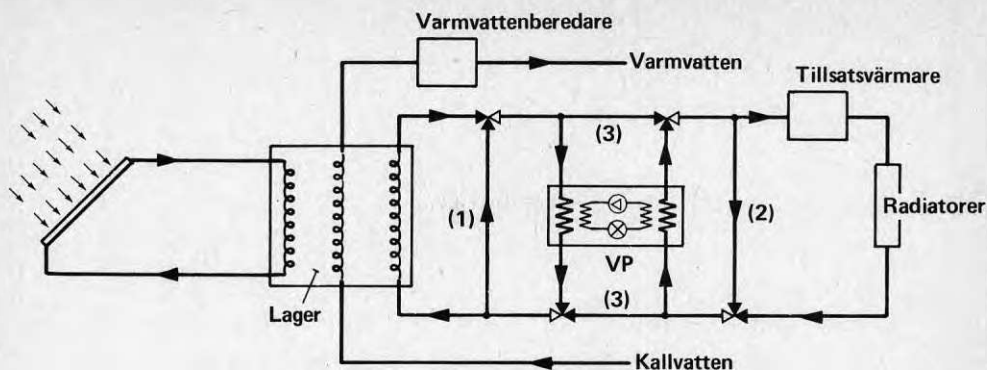
För fall a) blev försörjningsgraden 39 %, investeringskostnader 32 600,- eller 6:94 kr/(kWh/år), för fall b) blev försörjningsgraden 30 %, investeringskostnaden 23 400,- (billiga) alternativet 26 400,- (dyra) eller räknat per kWh/år 6:30 alternativt 7:11.

För båda dessa solfångartyper är det tydligen så att det finns en optimal försörjningsgrad som ligger mellan 30 och 40 %.

4.3 Uppvärmning + tappvarmvatten småhus med värmepump

4.3.1 Systembeskrivning

Systemmodellen uppbyggd enligt Figur 17.



Figur 17

Värmepumpsystem för uppvärmning och tappvarmvatten.

Radiatorerna antas fungera som i motsvarande system utan värmepump, dvs med konstant flöde och returtemperatur.

I normalfallet då värmepumpen går är shuntarna (1) och (3) stängda. En del varmvatten shuntas förbi radiatorerna genom (2) för att få maxflöde genom kondensorn, och lågt ΔT .

Värmepumpens kondensortemperatur antas ligga 5 K över framledningstemperaturen till radiatorerna. Förångartemperaturen antas vara 7 K lägre än lagertemperaturen. Verkningsgraden antas vara 58 % av Carnot-verkningsgraden $T_{\text{hög}} / (T_{\text{hög}} - T_{\text{låg}})$.

Då lagertemperaturen är högre än nödvändig framledningstemperatur till radiatorer antas att värmepumpen stängs av och att vattnet shuntas förbi genom (3). Liksom i systemet utan värmepump sker då reglering även med hjälp av shunten (1) för att inte få för hög framledningstemperatur. Då lagertemperaturen går under $+1^{\circ}\text{C}$ antas att värmepumpen slås av och att uppvärmningsenergi-behovet täcks till 100 % av en elektrisk tillsatsvärmare.

Tappvarmvattensystemet antas fungera likadant som tidigare med den skillnaden att soltappvarmvattensystemet bara träder i funktion då lagertemperaturen är så hög eller uppvärmningsbehovet så lågt att värmepumpen inte är i drift.

I utskriften av resultatet kan man utläsa insträlad energi, insamlad energi, solenergi levererad till uppvärmning, totalt energibehov för uppvärmning, solenergi levererad till tappvarmvatten, totalt energibehov för tappvarmvatten, lagerförluster, rörförluster och lagrets medeltemperatur. Dels månadsvis, dels som årssummor. I Bilaga C finns ett exempel på datorutskrift.

4.3.2 Resultat, energi

Lagervolymens inverkan

Standardfallet är baserat på ett hus som konsumerar energi på samma sätt som i det motsvarande systemet utan värmepump, dvs det drar 150 W/K och har gratis-effekten (från personer och hushållsel) 500 W, tappvarmvattenbehovet är 13.9 kWh/dygn.

Ett system med 30 m² oglasade solfångare med lutning 70° har simulerats med olika lagervolymer. Resultatet ses i Figur 18.



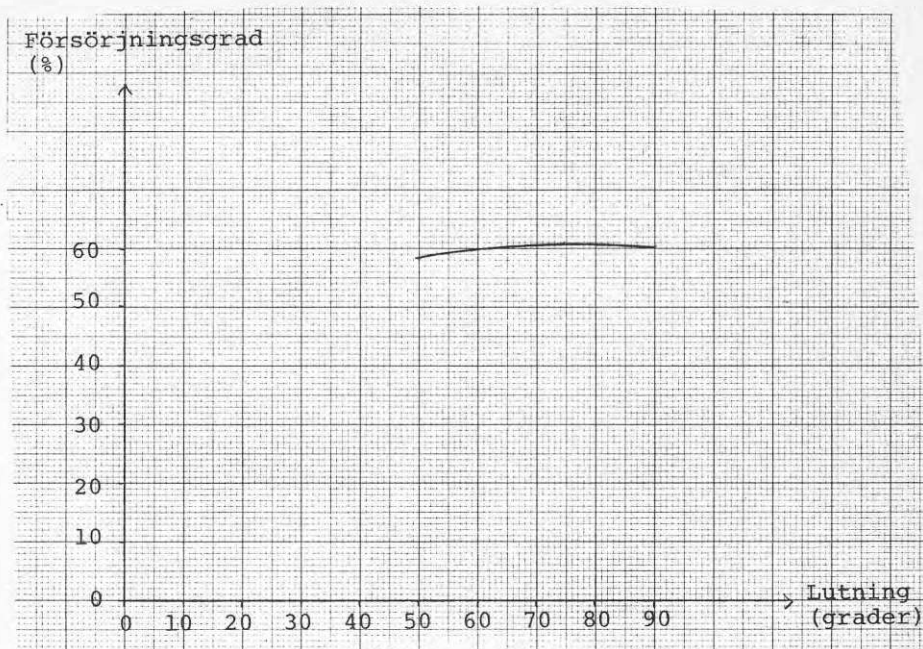
Figur 18

Årsförsörjningsgradens beroende av lagervolymen i ett värmepumpsystem för uppvärmning och tappvarmvatten. 30 m² oglasade solfångare, lutning 70°.

Eftersom lagerförlusterna kommer huset tillgodo blir beroendet av lagervolymen endast svagt.

Solfångarnas lutning

30 m² 1-glas, selektiva solfångare med 2 m³ lager prövades vid olika lutningsvinklar. Resultat framgår av Figur 19.



Figur 19

Årsförsörjningsgradens beroende av solfångarnas lutningsvinkel i ett värmepumpsystem för uppvärmning och tappvarmvatten. 30 m² solfångare av typ 1-glas, selektiv, lagervolym 2 m³.

Eftersom effekttopparna uppstår under vinterhalvåret, ligger optimum vid branta lutningsvinklar, liksom för systemet utan värmepump, vilket man kunde vänta.

Olika solfångare

För att jämföra de olika solfångartypernas energiproduktionsförmåga gjordes en jämförelse utgående från ett system bestående av 30 m² solfångare, lutning 70°, lagervolym 2 m³. Resultat i Tabell 10 nedan.

Tabell 10

Olika solfångartypers energiproduktionsförmåga i ett värmepumpsystem för uppvärmning och tappvarmvatten.

Solfångare typ	Insamlade årsenergi (MWh)	Levererad årsenergi (MWh)	Årsförsörjningsgrad (solandel) (%)
Oglasad, svart	6.76	6.32	51
1-glas, svart	7.97	7.07	58
1-glas, selektiv	8.79	7.37	60
2-glas, svart	8.52	7.25	59
Vakuumsör	9.42	7.04	58

Utav de olika solfångarna ger 1-glas, selektiv bäst resultat.

Jämfört med systemet utan värmepump kommer man upp i lite högre försörjningsgrad vid given solfångaryta. För 1-glas selektiva ökade försörjningsgraden från 50 % till 60 %.

Det är anmärkningsvärt att system med samma försörjningsgrad här skiljer sig väsentligt beträffande insamlad energi. Det beror först och främst på de höga lagertemperaturerna och också höga lagerförlusterna på sommaren. Solfångare med lägre värmeförlustkoefficient kommer då att samla in mera energi, som dock bara går till förluster.

I Tabell 11 nedan visas en jämförelse mellan energibalanserna för oglasade och 1-glas svarta respektive selektiva solfångare.

Tabell 11

Jämförelse mellan energibalanser för olika solfångare i värmepumpsystem. Solfångararea 30 m², lutning 70°, lagervolym 2 m³.

(energier i MWh/år)	Oglasad	1-glas, svart	1-glas, selektiv
Solenergi till uppvärmning	3.9	4.2	4.4
Eloenergi till uppvärmning	3.2	2.9	2.7
Solenergi till tappvarmvatten	2.3	2.8	3.0
Eloenergi till tappvarmvatten	2.8	2.3	2.1
Medeltemp lager juli (°C)	50	71	93
Medeltemp lager januari (°C)	2	2	2

4.3.3 Resultat, ekonomi

Lagervolymens inverkan

Ett system med 30 m² oglasade solfångare, lutning 70° och med en 10 kW värmepump varierades med olika lagervolymer. Kostnaderna blev:

Volym	1 m ³	gav totalkostnad	55 500 kr	eller	9:32 kr/(kWh/år)
"	2 m ³	"	56 900 kr	"	9:00 kr/(kWh/år)
"	5 m ³	"	60 100 kr	"	9:19 kr/(kWh/år)
"	10 m ³	"	64 200 kr	"	9:65 kr/(kWh/år)
"	20 m ³	"	70 500 kr	"	10:42 kr/(kWh/år)

Som man kunde vänta sig är det inte heller i detta fall motiverat att ha ett för stort lager. En storlek på omkring 2 m³, möjligen upp till 5 m³ kan vara motiverad.

Solfångartypen

De fem solfångartyperna prövades med ett system på 30 m² solfångare, lutning 70°, lager 2 m³, värmepump på 10 kW. Resultatet ses i Tabell 12.

Tabell 12

Olika solfångares kostnadseffektivitet i ett värmepumpsystem för uppvärmning och tappvarmvatten. Solfångaryta 30 m², lagervolym 2 m³.

Solfångartyp	Årsförsörjningsgrad (%)	billiga/dyra	
		Investeringskostnad (kr)	Investeringskostnad (kr/(kWh/år))
Oglasad, svart	51	56 900/56 900	9:00/9:00
1-glas, svart	58	68 900/74 900	9:75/10:60
1-glas, selektiv	60	71 900/80 900	9:76/10:98
2-glas, svart	59	74 900/83 900	10:33/11:57
Vakuümör	58	77 900/92 900	11:06/13:19

Som framgår av Tabell 12, är det i detta fall fördelaktigast att använda sig av oglasade solfångare. Det beror på de låga lagertemperaturerna under vintermånaderna, då samtidigt energibehovet är störst. För att i någon mån optimera systemstorleken prövades också några system med annan solfångararea och lagervolym. Det är oglasade och 1-glas, selektiva solfångare, lutning 70°, 10 kW värmepump. Resultatet framgår av Tabell 13 och 14.

Tabell 13

Kostnadseffektiviteten för några olika stora system med värmepump för uppvärmning och tappvarmvatten. Solfångare av typ oglasad, svart, lutning 70°.

Solfångar- area (m ²)	Lager- volym (m ³)	Årsförsörj- ningsgrad (%)	Investerings- kostnad (kr)	Investerings- kostnad (kr/(kWh/år))
30	2	51	56 900	9:00
20	2	45	53 900	9:69
20	1	43	52 500	9:89
15	1	39	51 000	10:50

Tabell 14

Kostnadseffektiviteten för några olika stora system med värmepump för uppvärmning och tappvarmvatten. Solfångare av typ 1-glas, selektiv, lutning 70°.

Solfångar- area (m ²)	Lager- volym (m ³)	Årsförsörj- ningsgrad (%)	billiga/dyra	
			Investerings- kostnad (kr)	Investerings- kostnad (kr/(kWh/år))
40	2	65	79 900/91 900	10:22/11:75
30	2	60	71 900/80 900	9:76/10:98
20	2	53	63 900/69 900	9:81/10:73
20	1	52	62 500/68 500	9:82/10:77
20	0.5	50	61 600/67 600	10:01/10:99
15	1	47	58 500/63 000	10:21/11:00
15	0.5	45	57 600/62 100	10:37/11:18

Det tycks alltså inte löna sig att gå ned i systemstorlek; det kostnadsoptimala systemets storlek ligger omkring 30 m² solfångare med 2 m³ lager för 1-glas, selektiva, och 50 m² med 2.5 m³ lager för oglasade.

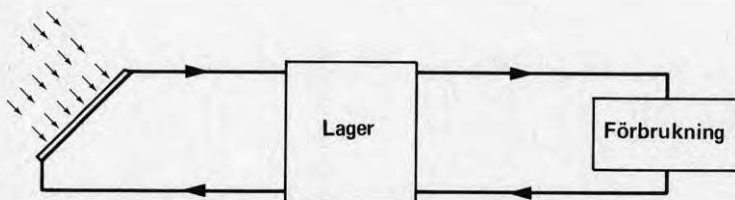
Intressant är att värmepumpsystemet enligt denna modell alltså ger högre årsförsörjningsgrad än ett system med samma solfångarearea utan värmepump, men däremot lönar det sig inte ekonomiskt. Prisskillnaden ligger omkring 3 kr per kWh/år.

Det billigaste alternativet blir alltså oglasade solfångare, som dock ligger betydligt högre i kostnadsnivå än oglasade eller 1-glas, selektiva solfångare i system utan värmepump. Det får dock beaktas att solfångare i detta sammanhang endast har behandlats som solenergikollektorer utan att hänsyn har tagits till upptagning av energi tillförd genom kondensation eller regn.

4.4 Solvärmecentral

4.4.1 Systembeskrivning

Systemuppbyggnad enligt Figur 20.



Figur 20

System för 100 % årsförsörjningsgrad med solvärmecentral och säsongslager.

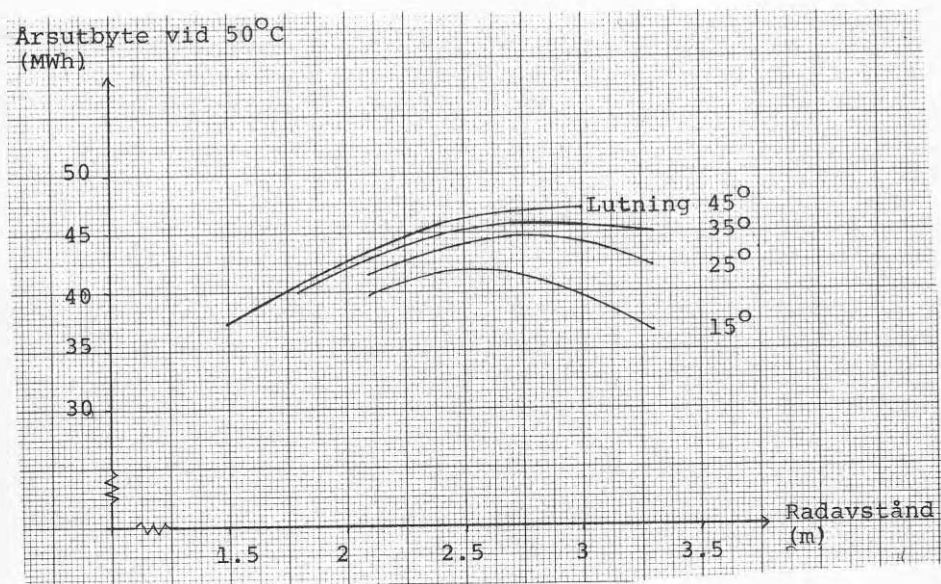
I modellen antas att behovet för uppvärmning och tappvarmvatten tas till 100 % från lagret. Skiktning i lagret simuleras inte.

I utskriften av resultatet kan man utläsa instrålad energi, insamlad energi, solenergi till uppvärmning, solenergi till tappvarmvatten, lagerförluster, ledningsförluster, energibalans och lagertemperatur vid månads slut. Månadsvis och årssummor. Ett exempel på utskrift finns i Bilaga D.

4.4.2 Resultat, energi

Då man i dessa stora system har flera rader solfångare tillkommer skuggningsfenomen som komplicerar beräkningarna. För att få en uppfattning om skuggningseffekterna gjordes först några rena SOLOP-körningar, dvs utan systemsimulering. Med en given lockyta att placera solfångarna på varierades solfångarnas radavstånd och lutningsvinkel.

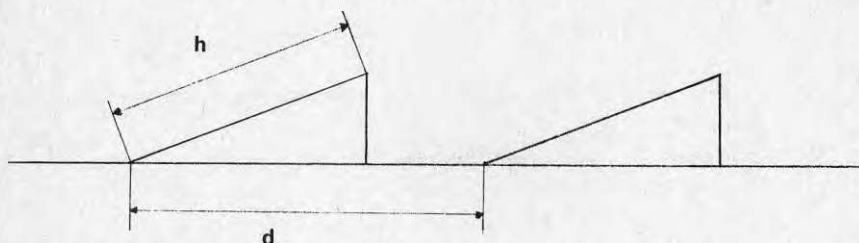
Resultatet utav detta visas i Figur 21.



Figur 21

Årsutbyte vid given lockyta för uppställning av solfångare. Solfångarhöjd 2.1 m.

I vårt beräkningsexempel förutsatte vi kollektorer av typ CPC, 4X. Solfångarna antogs vara 2.1 m höga. Definition av solfångarnas höjd och radavstånd i Figur 22.



Figur 22

Definition av solfångarnas höjd = h , och radavstånd = d .

Data är tagna från Studsvikansläggningen, som ju i verkligheten har ett radavstånd som är 2.7 m och en lutning på 25° .

Resultatet antyder att man ligger nära, men inte på energioptimum i den verkliga anläggningen. Lutningen skulle kunna vara lite större.

Här skall anmärkas att vid optimeringsberäkningarna som skedde inför byggandet av Studsviksanläggningen ingick naturligtvis även andra parametrar än insamlad årsenergi.

Därefter simulerades Studsviksanläggningen med hela systemet.

Solfångarytan är 120 m^2 , lagervolymen 640 m^3 , huset antas dra 400 W/K under 20°C , gratis-effekten antas vara 4.1 kW , fönsterytan 20 m^2 . Tappvarmvattenbehovet är noll.

För att se på skuggningseffekten gjordes en serie körningar som redovisas i Tabell 15.

Tabell 15

Simulering av Studsviks solvärmecentral med olika sätt att utnyttja lockytan för solfångarplacering. Årsnettot är energiinnehållet i lagret vid årets slut minus energiinnehållet vid årets början.

nr	Solfångarnas lutning (grader)	area (m ²)	radantal	avstånd (m)	energi (kWh/(m ² ·år))	Insamlad (MWh)
1	25	98	5	3.3	395	-1.10
2	25	108	6	3.0	371	-0.24
3	25	120	7	2.7	339	0.16
4	25	135	8	2.4	297	-0.25
5	35	98	5	3.3	414	0.10
6	35	108	6	3.0	384	0.65
7	35	120	7	2.7	347	0.75
8	35	135	8	2.4	303	0.26
9	45	98	5	3.3	422	0.63
10	45	108	6	3.0	389	1.04
11	45	120	7	2.7	351	1.06

Det verkliga Studsvikssystemet motsvaras av nummer 3 i Tabell 15.

Slutsatsen av detta blir att man skulle kunna få något högre utbyte av anläggningen genom att öka solfångarnas lutningsvinkel. Exempelvis skulle man kunna ta bort en rad och minska solfångarytan till 108 m, öka lutningsvinkeln till 35° och därigenom få bibehållet eller något högre utbyte.

Det kan vara av intresse att jämföra Studsviks-simuleringen med uppmätta värden för den verkliga anläggningen. En jämförelse med 1980 års uppmätta data ger:

(energi i MWh/år)	Verkligt	Simulerat
Insamlad energi	36.8	40.7
Rörförluster		
solfångare-lager	1.4	
lager-förbrukning		3.0 totalt
Lagerförluster	18.4	22.2
Solenergi till uppvärmning	17.5	15.4

Simulering av fullskalesystem

Data för en simulerad solvärmecentral för 400 lägenheter:

Vardera lägenheten antas ha ett effektbehov på 120 W/K och en gratis effekt av personvärme + hushållsel på 600 W. Fönsterytan är satt till 15 m² per lägenhet, tappvarmvattenåtgången till 11 kWh/lägenhet och dygn. Detta borde uppskattningsvis ge ett totalt årsbehov på ungefär 4 500 - 5 000 MWh/år. För att klara detta torde det gå åt omkring 14 000 m² solfångare och ett lager på ungefär 50 000 m³.

Lagerdimensionerna är satta till toppdiameter 80 m, bottendiameter 60 m, höjd 10.2 m. Detta ger en volym 52 300 m³, en lockyta 5 030 m², sidoyta 3 140 m² och bottenyta 2 830 m².

Isoleringen är antagen vara 30 cm tjock med $\lambda = 0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ i lock och $\lambda = 0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ i sidor och botten.

Vidare är det antaget 3 000 m rör mellan solfångarna och lagret med 1.2 cm isolering, $\lambda = 0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 1 500 m rör (kulvert) mellan lagret och förbrukarna med 5 cm isolering, $\lambda = 0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Antar man sedan att solfångarna är 2.1 m höga, står med radavstånd 3 m (och lutning 45°) samt att lockarea kan utnyttjas effektivt till 90 % för solfångare så får man plats med 3 200 m² solfångare på lagrets lock enligt Studsviksmodell. Resten måste placeras på separata plattformar, som t ex roterar på en grund vattendamm.

Horisontavskärmningen antas vara 10°.

Starttemperaturen vid årsskiftet är satt till 45°C. Är systemet rätt dimensionerat blir lagrets temperatur vid årets slut densamma som vid årets början.

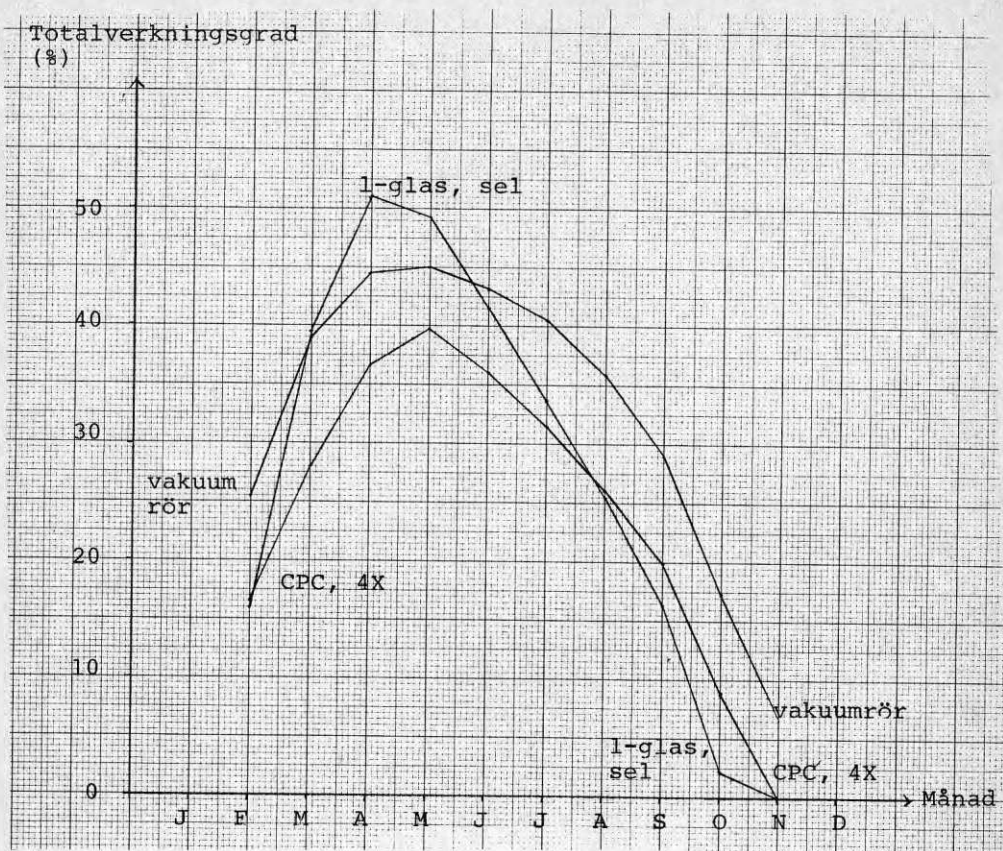
I jämförelserna nedan mellan olika solfångare är lagret detsamma, men solfångararean har varierats tills temperaturen vid årets slut ligger strax över 45°C, dvs årsnettot är positivt. En jämförelse mellan olika solfångare i ett system enligt ovan visas i Tabell 16 nedan:

Tabell 16

Solvärmecentral för täckning av 100 % av energi-behovet för 400 lägenheter. Den nödvändiga sol-fångararean för några olika typer av kollektorer.

	Insamlad årsenergi (kWh/m ²)	Solfångar- area (m ²)
1-glas, selektiv	430	12 200
CPC, 4 X	373	14 000
Vakuüm rör	469	11 100

I Figur 23 visas hur totalverkningsgraden (insamlad energi under ett dygn dividerat med instrålad energi under ett dygn) varierar under året. På grund av horisontavskärmningen, insamlas ingen energi alls.



Figur 23

Totalverkningsgraden månadsvis för 3 olika typer av solfångare i ett tänkt fullskalesystem med solvärmecentral för 400 lägenheter.

Det är påfallande att de selektiva solfångarna uppnår den högsta systemverkningsgraden av dessa system i april, där lagertemperaturen är relativt låg. (Se solfångarnas verkningsgrad i Figur 6.)

4.4.3 Resultat, ekonomi

Solvärmecentraler av den storlek som utprovas i Studsvik är alldeles för små för att vara ekonomiskt intressanta.

För fullskaleanläggningen enligt ovan fås kostnaderna som visas i Tabell 17.

Tabell 17

Kostnadseffektiviteten för olika solfångartyper.
System = solvärmecentral för 400 lägenheter.

Solfångartyp	billiga/dyra	
	Investeringskostnad (Mkr)	Investeringskostnad (kr/(kWh/år))
1-glas, selektiv	23.7/27.4	5:12/5:91
CPC, 4X	25.1/29.2	5:41/6:32
Vakuumsrör	24.3/29.8	5:24/6:44

I ett längre tidsperspektiv kan man tänka sig att priset för solfångare och stativ sjunker ytterligare ungefär 30 % under det "billiga" alternativet, och att även kostnaderna för lagret minskar något. Investeringskostnaden för systemet med CPC-solfångare kan då bli 21 Mkr eller 3:50 kr/(kWh/år).

5. KONKLUSIONER OCH SAMMANFATTNING

Studien avser en jämförande kostnadsanalys för olika typer av solfångare tillämpade i några typiska solvärmesystem. Systemen har definierats på så enkelt sätt som möjligt, för att underlätta en analys av de väsentliga faktorer som påverkar systemekonomin. Huvudmålsättningen är att studera vilka typer av solfångare som helst skall användas i olika system.

Vi är medvetna om att resultaten i denna studie är alltför generaliserande, och att det är farligt att typisera solfångare så som här gjorts beträffande prestanda och kostnader. Ändå tror vi att vi har lyckats på fram representativa data för solfångare och system enligt dagens utvecklingsläge. Mot slutet av projekttiden har vi också fått kunskap om nya vakuumrörsolfångare med väsentligt bättre prestanda än vad som här antagits. Detta kan förändra några av slutsatserna, men så kommer det förhoppningsvis alltid att vara: utvecklingen försätter och bättre produkter kommer. Utan denna förhoppning kanske man annars borde lägga ned solenergiverksamheten. Ett av huvudresultaten utav denna studie är nog de enkla, oglasade solfångarnas överraskande starka position när det gäller småhustillämpningar. Denna solfångartyp kan med fördel användas för tappvarmvattenproduktion, framför allt när man endast förvärmer kallvatten, som är brukligt i de flesta system. Visserligen är det något lönsammare att ha 8 m² 1-glas selektiva solfångare än 12 m² oglasade, men det senare alternativet medför de lägsta investeringskostnaderna, och kan vara ett intressant alternativ för villaägare.

Situationen är likartad för ett solenergibaserat uppvärmningssystem för småhus (inklusive tappvarmvatten). Resultatet här är att det mindre (15 m²) systemet med 1-glas, selektiva solfångare är mest lönsamt, men inte alltför långt ifrån kommer ett system med oglasade solfångare, som även här medför de lägsta investeringskostnaderna. Försörjningsgraden i dessa fall ligger omkring 38 % respektive 34 %. Förutsättningen är att ett lågtemperaturrediatorsystem används för uppvärmningen.

Vad gäller solfångarsystem med värmepumpar så dominerar av naturliga skäl de oglasade solfångarna som värmekälla. Dessa system är dock dyrare än "rena" solfångarsystem utan värmepump.

Beträffande de övriga typerna av solfångare (1- eller 2-glas svart och vakuumrör) kunde vi inom ramen för de antagna prestanda- och kostnadsvärdena inte hitta någon tillämpningsnisch bland de undersökta systemen. Undantaget är solvärmecentraler typ Studsvik, där vakuumrörsolfångare ligger nära 1-glas selektiva och något bättre än måttligt koncentrerande CPC-solfångare. Det skall dock sägas att skillnaderna mellan de olika solfångarna många gånger är så små att de ligger inom de verkliga kostnadsskillnaderna för konkreta produkter.

Beträffande försörjningsgraden kan vi konstatera att det, som väntat, är olönsamt att ha för låga eller för höga försörjningsgrader. Mellan 40 % och 60 % för tappvarmvattensystem, omkring 30 % - 40 % för villavärmesystem (uppvärmning + varmvatten) och cirka 45 % - 60 % för värmepumpsystem tycks vara optimalt för Sverige. Undantaget är naturligtvis stora solvärmecentraler, där

100 % försörjningsgrad inte bara har beräknats, utan även nästan uppnåtts i Studsvik. Inte oväntat blir dessa system även de billigaste av alla, även om man tar hänsyn till lagrets stora kostnader.

Som ett biresultat får anmärkas att simuleringen av Studsviks solvärmecentral gav ett resultat som stämde överraskande väl med vad som uppmätts av Bengt Perers (6).

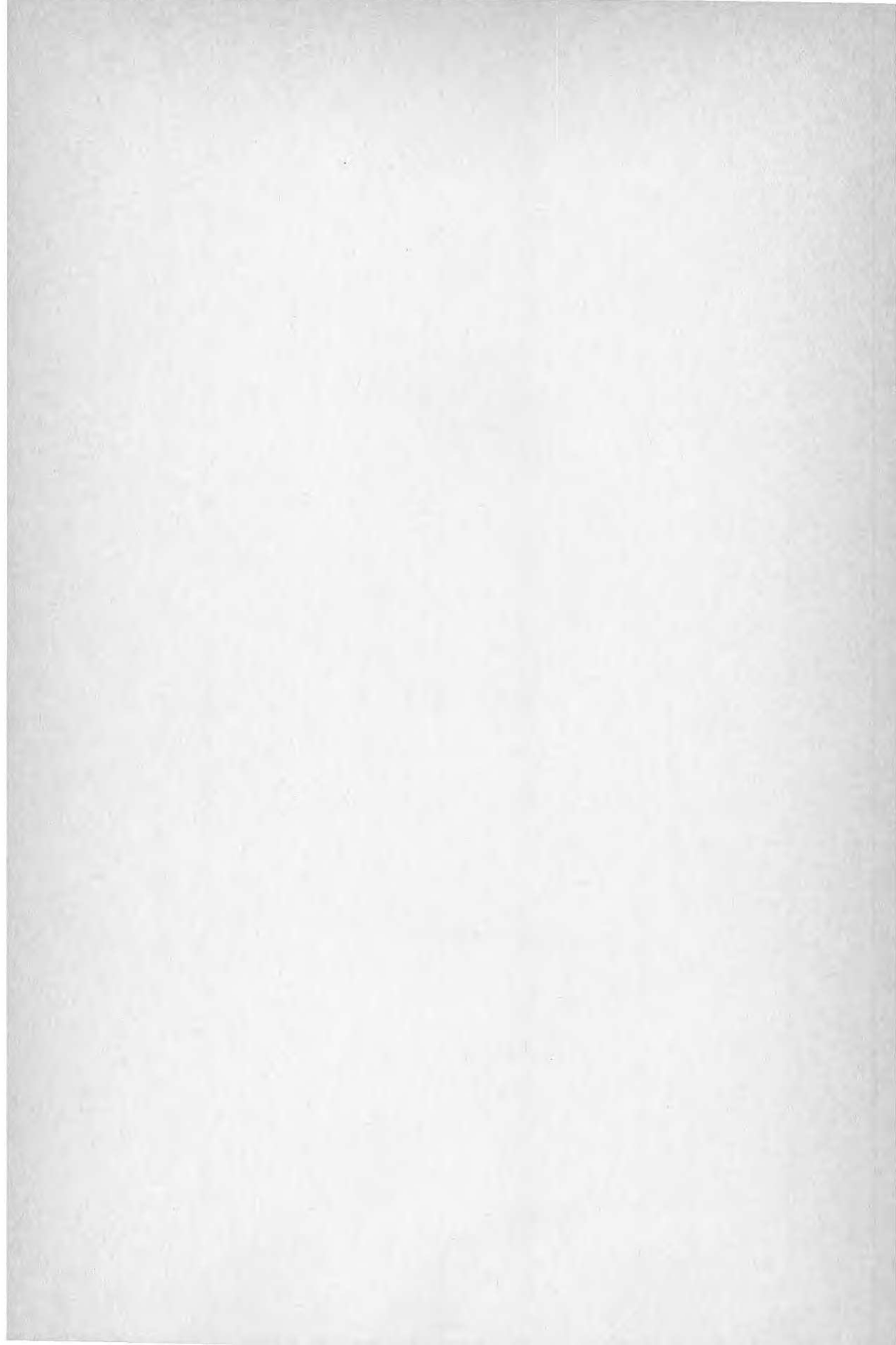
Det absoluta kostnadsläget, som bygger på uppgifter från industrin, kastar tyvärr en mörk skugga över solenergitillämpningar i småskaliga system. Kostnaderna ligger omkring 6 kr/kWh årskapacitet för såväl tappvarmvatten som uppvärmningssystem, och det krävs således en kraftig minskning av systemkostnaderna för att verklig ekonomi skall uppnås. Att kombinerade värmepumpsolfångarsystem i dagens läge är ett dyrt sätt att använda solenergi hänger troligen ihop med småskaligheten. I större system tror vi att detta kan vara ett lönsamt alternativ. Vi hade dock inte möjlighet att undersöka detta inom projektets ram. Sammanfattningsvis kan vi konstatera att trenden tycks vara att två solfångaralternativ kommer att dominera. Enkla, svarta, oglasade absorbatörer (typ energitak eller liknande) respektive hög-effektiva plana solfångare med selektivt skikt. På sikt kan kanske även vakuumrörsolfångare komma i fråga, ifall deras kostnader kan reduceras.

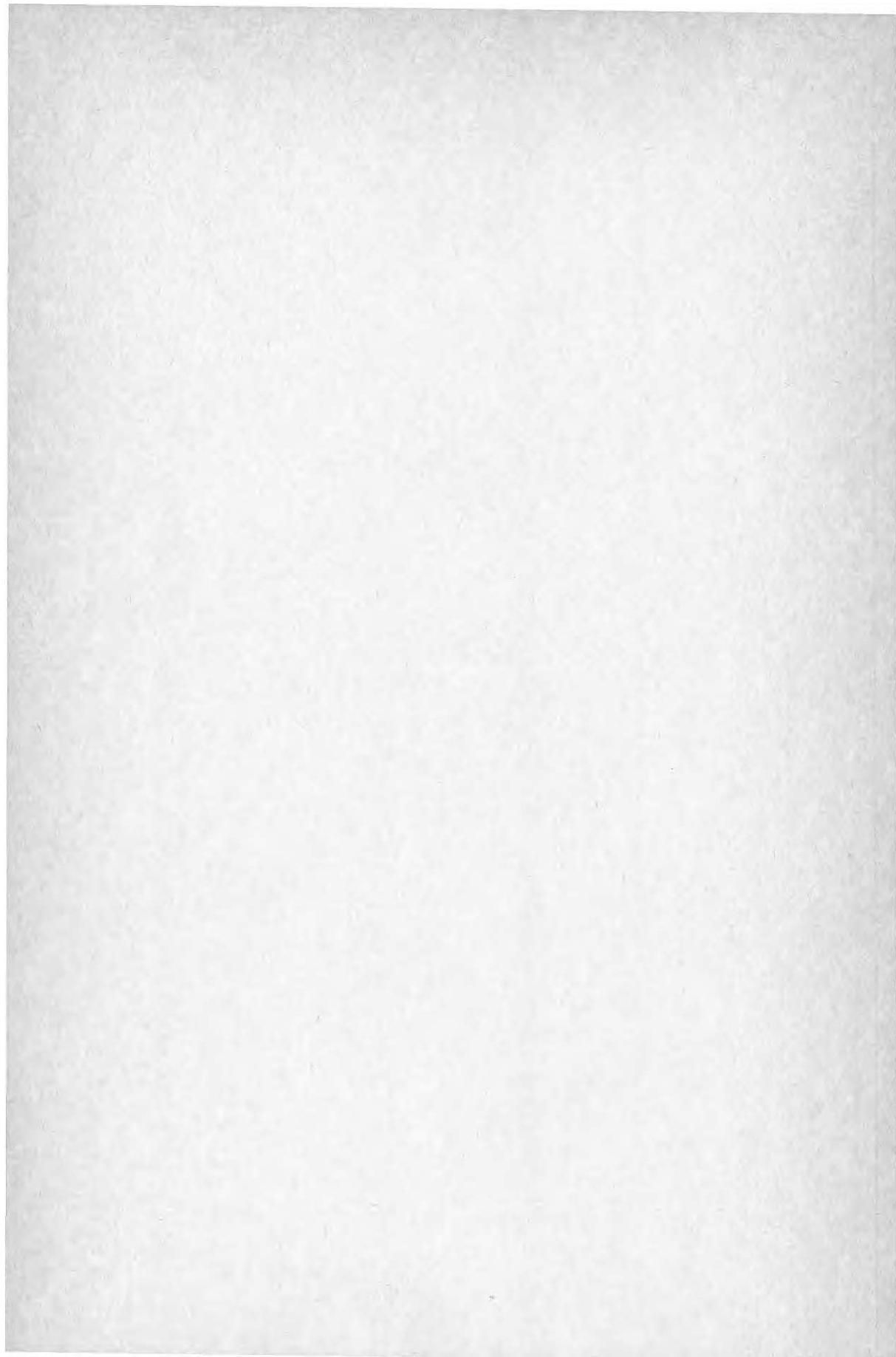
Som avslutning vill vi här föreslå att ett experiment- och demonstrationsprojekt inleds i syfte att undersöka huruvida det ovan presenterade resultatet beträffande tillämpningen av enkla, oglasade solfångare i system för husuppvärmning

och tappvarmvattenberedning utan värmepump kan verifieras. En möjlighet vore att bygga upp några identiska tappvarmvattensystem med artificiellt styrd konsumtionsprofil, för att på objektivet sätt kunna jämföra olika solfångares energiproduktionsförmåga. Måhända skulle vi komma att få uppleva överraskande resultat.

REFERENSFÖRTECKNING

1. ZINKO, H och CHOUARD, P
A model for calculation of the utilisable solar energy in Sweden.
Electricité De France HE 112 NS 1131, 1978.
2. DOGNIAUX, R
Programme de calcul pour la prédétermination précise des éclairagements énergétiques et lumineux en relation avec l'utilisation de l'énergie solaire.
Comptes, Revue internationale d'Héliotechnique.
3. FRANCHISSEUR, R och ZINKO, H
Solar heating of heavy fuel oil stored in rock caverns.
Part II - TRNSYS Simulation.
Studsvik Report E3-79/27, 1979.
4. GIRDO, V
Solvärmesystem för husuppvärmning i Skandinavien: Beräkning av möjliga energitillskott från solvärmesystem.
Arbetsrapport, projekt Solenergi byggnader, KTH 1976.
5. PETERSON, F och RINGBLOM, L
Varmvattenberedning med hjälp av solenergi - förutsättningar och kostnader.
Byggeforskningen R83:1978.
6. PERERS, B och ROSÉEN, R
Solvärmecentralen i Studsvik.
Resultat 1980.
Studsvik Report E1-80/141, 1980.
7. DUFFIE - BECKMAN
Solar energy thermal processes.
John Wiley & Sons, 1974.





Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
791352-9 från Statens råd för byggnadsforskning
till Studsvik Energiteknik AB, Nyköping.

R15: 1982

ISBN 91-540-3633-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700515

Abonnemangsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirkapris: 30 kr exkl moms