



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.



Solveig-projektet

Korttidslagring i solvärmda byggnader — förstudie av magnetit-, vatten- och salthydratlager

**Per Isakson
Johnny Kellner m fl**

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr 81-0374

Plac *Sev*

Per Isakson

Byggeforskningsrådet

Sev

R21:1981

SOLVEIG-PROJEKTET

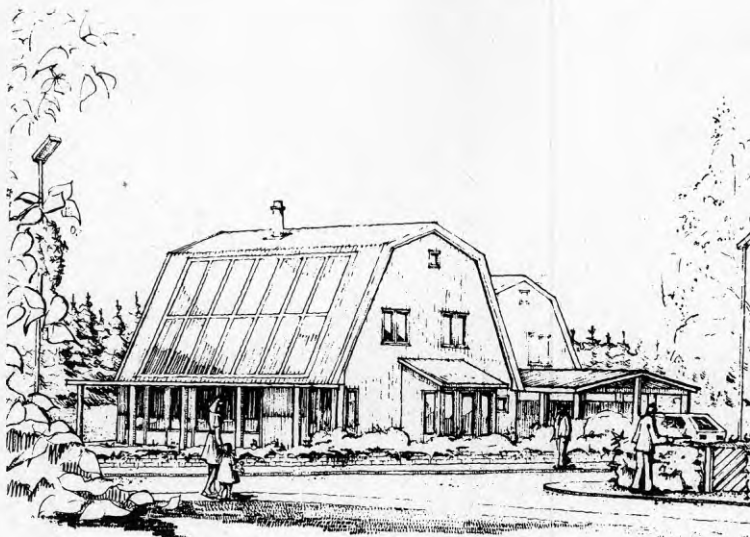
Korttidslagring i solvärmda byggnader
- förstudie av magnetit-, vatten- och
salhydratlager

Bo Carlsson
Hans Stymne
Gunnar Wettermark

Lars Engström
Johnny Kellner

Per Isakson
Bo Mattsson

Mats Jevring



Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
780541-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till VBB AB, Stockholm.

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

R21:1981

ISBN 91-540-3449-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1981 151159

INNEHÅLL

FÖRORD	7	
SAMMANFATTNING	9	
1	INLEDNING	13
1.1	Bakgrund	13
1.2	Värmelagring	14
1.3	Systemtyper	15
2	MÅL OCH PROBLEMAVGRÄNSNING	17
3	PROJEKTUPPLÄGGNING	19
3.1	Skedesindelning	19
3.2	Passiva solvärmestillskott och energihushållning	19
3.3	Systemstudier	20
3.3.1	Datorprogrammet TRNSYS anpassat för Solveig-projektet	22
3.3.2	Datorprogrammet BRIS använt för beräkning av rumsklimat samt värme- och kyleffekter	22
4	BYGGNADERNA	25
4.1	Byggnadsutformning	25
4.2	Byggnadsteknisk utformning	28
5	UPPVÄRMNINGSSYSTEM	31
5.1	Termiska solfångare	31
5.1.1	Den plana tekniska solfångarens detaljproblem	31
5.2	Värmelagring	33
5.2.1	Materialegenskaper hos kalciumkloridhexahydrat av betydelse vid värmelagring	34
5.2.2	Värmelagring, ett värmeväxlings-tekniskt problem	36
5.3	Solvärmesystem för husuppvärmning i relation till använd värmelagringsmetod	40
5.3.1	Kombinationen värmelager - solfångare	40
5.3.2	Vatten- eller luftkyld solfångare	41
5.3.3	Värmeväxlingen vid lagret	42
5.3.4	Värmelagrets effektiva temperatur	42

5.3.5	Vatten- eller luftburet uppvärmningssystem i byggnaden	43
5.3.6	Dimensionering av uteffekten från ett värmelager	43
5.3.7	Principiella frågor vid dimensionering av solvärmesystem	44
5.4	Projektets tre solvärmesystem	45
5.4.1	System AQUA	48
5.4.2	System FERRUM	50
5.4.3	System SAL	52
6	SIMULERING	57
6.1	Inledning	57
6.2	TRNSYS-programmet	58
6.2.1	Att arbeta med TRNSYS	59
6.3	Solinstrålningsdata	60
6.4.1	Simuleringsmodell för byggnaden	62
6.4.2	Simuleringsresultat för byggnaden	64
6.4.3	Simuleringsmodell för solsystem	67
6.4.4	Simuleringsresultat för solsystem	69
6.5	Sammanfattning av simuleringsstudierna	71
7	UTVÄRDERING OCH MÄTPROGRAM	73
7.1	Solvärmesystemet	73
7.2	Delsystem	75
7.2.1	Solfångargruppen	75
7.2.2	Värmelagret	75
7.2.3	Värmedistributionssystemet	75
7.2.4	Värmeåtervinning ur ventilationsluften	75
7.2.5	Byggnaden	77
7.3	Rapportering	78
APPENDIX 1	Verkningsgraden hos plana termiska solfångare	73
BILAGA 1	Korrigerering av solinstrålningsdata	83
BILAGA 2	Upptäckta fel i TRNSYS version 10.1	85
BILAGA 3	Subrutin för smältvärmelager anpassat till datasimuleringsprogrammet TRNSYS	87
BILAGA 4	TRNSYS-subrutin för saltlager	95
LITTERATUR	97

Beteckningar:

E_t	solirradians
F'	effektivitetsfaktor för solfångare
F_R	värmeutbytesfaktor för solfångare
F'_R	värmeutbytesfaktor för kombinationen solfångare/värmelager
k_e	värmeförlusttal för solfångare
$(\dot{m}C_p)$	värmekapacitetsflöde
T_i	inloppstemperatur till solfångare
T_o	utloppstemperatur från solfångare
T_s	värmelagrets effektiva temperatur
T_u	omgivningstemperatur
α	absorptans
$(\alpha\tau)_e$	effektiv absorptans-reflektors-produkt för solfångare
ε	temperaturverkningsgrad för värmeväxling med värmelagret
η	verkningsgrad
τ	transmittans
ϕ	försörjningsgrad, dvs andel solenergi av total betald energi



FÖRORD

Detta arbete har till stor del finansierats genom anslag från Statens Råd för Byggnadsforskning, dels till VBB och Hugo Theorells Ingeniörsbyrå, dels till Institutionen för fysikalisk kemi vid Kungl Tekniska Högskolan.

Rapporten behandlar det första av två skeden, av vilka

- Skede 1 omfattar teoretisk simulering av tre parallellt projekterade solhus, detaljprojektering och kompletterande teoretisk simulering.
- Skede 2 avser praktisk tillämpning i full skala.

Som grund för projektet ligger det arbete som har bedrivits på Institutionen för fysikalisk kemi.

Rapporten har kunnat genomföras tack vare stora arbetsinsatser från:

- Gunnar Wettermark, Institutionen för fysikalisk kemi KTH, som varit forskningsansvarig,
- Bo Carlsson och Hans Stymne, Institutionen för fysikalisk kemi, KTH, som varit ansvariga för värmelagringsfrågorna,
- Johnny Kellner, VBB, som ansvarat för programskrivning, projektledning och byggnadsteknisk energiplanering,
- Per Isakson, KTH, samt Bo Matsson, VBB, som genomfört och utvärderat datorkörningarna,
- Lolle Lundqvist och Maureen Wells, VBB, som svarat för husens arkitektoniska utformning,
- Mats Jevring och Peter Kjaerboe, Hugo Theorells Ingeniörsbyrå, som utformat systemlösningarna,
- Lars Engström, VBB, som samordnat och redigerat rapporten.

Täby kommun, som visat projektet stort intresse och reserverat tomter för tillämpningen i full skala i Skede 2, har genom sin representant Jan Bark direkt deltagit i projektgruppens möten.

Lars Alm, Lars Alm & Co. Elkonsultbyrå, har bidragit med eltekniska råd.

John Mattson Byggnads AB har genom Isidor Andersson och Hans Wivsten bidragit med värdefull entreprenörteknisk sakkunskap.

Wikström Jr AB genom Sven Öfvergård har givit byggnadstekniska råd, och Blomqvists Verkstads AB har genom Rolf Holme och Claes Hasselström lämnat hjälp med den tekniska utformningen av salthydratlagret.

Ingrid Ståhl, VBB, har bidragit med värdefull insats vid layout-arbetet för rapporten.

Stockholm i augusti 1980

Johnny Kellner

SAMMANFATTNING

Projektets huvudsyfte är ett fullskaleexperiment med solvärmeförsörjda byggnader, där uppvärmningssystemet innehåller korttidslagring för värme baserat på kalciumkloridhexahydrat. Dessutom är målsättningen att konstruera och pröva en matematisk modell som kan utnyttjas vid framtida dimensionering av sådana system.

Inledningsvis konstateras att fullständig solvärmeförsörjning av en byggnad kräver ett säsongslager, som med hittills tillämpad teknik med vatten blir av samma volymmässiga storleksordning som byggnaden själv, och vars huvuddel endast utnyttjas fullt en gång per år. Med korttidslagring kan försörjningsgrader på ca 60 % åstadkommas genom lagervolymer på endast någon kubikmeter. För den återstående försörjningen krävs dock någon form av tillsatsvärmeanordning. Från värmeavgivande synpunkt måste ett säsongslagrande system kunna leverera full effekt vid dimensionerande utetemperatur, medan ett korttidslager genom kombinationen med annan värmekälla inte behöver uppfylla ett sådant krav.

Det betonas emellertid att det inte råder något tekniskt motsatsförhållande mellan säongs- och korttidslager. Tvärtom förefaller det rimligt att genom kombination av centrala säsongslager och byggnadsegna korttidslager, baserade på samma solfångare, nå gynnsamma totallösningar. Laddningen av det centrala lagret med sin förhållandevis stora systemtröghet skulle kunna ske sommartid, korttidslagren skulle klara all försörjning vår och höst och urladdningen av det centrala lagret skulle ske under vintermånaderna.

Effektiva korttidslager skulle också kunna utnyttjas för tillvaratagande av överskottsvärme dagtid och uppvärmning nattetid av t ex skolor och arbetslokaler. Även kopplingar till fastbränsleanläggningar och värmepumpar är tänkbara.

Värme kan - förutom genom termokemiska metoder - lagras sensibelt eller latent.

Sensibel värmelagring innebär att ett medium, t ex vatten eller sten, bringas att vandra mellan olika temperaturer vid laddning resp urladdning.

Vid latent värmelagring utnyttjas de värmemängder som binds resp avges då ett ämne smälter eller stelnar. Kombinationer med sensibel lagring är möjliga genom uppvärmning över smältpunkten av lagringsmediet. Normalt strävar man dock mot en optimering av systemet kring lagringsmediets smältpunkt.

Sensibel värmelagring i vatten har prövats både i säongs- och korttidssammanhang. Sten och då särskilt magnetid (järnmalm), som har ovanligt hög värmelagrande förmåga, har också prövats i fullskaleexperiment.

Forskning kring latent värmelagring har pågått länge, men proven utanför laboratorier har varit få. Hittills

saknas underlag för bedömning av ekonomi och längre drift. Det största intresset har knutits till olika salthydrater, kristallvattenbindande salter, med för byggnadsuppvärmning gynnsamma smältpunkter.

Vid Institutionen för Fysikalisk Kemi, KTH, pågår sedan 1975 studier av latent värmelagring med tyngdpunkten på kalciumkloridhexahydrat. Samma salt, men med lägre vattenhalt än dihydratet, är bättre känt som det dammbindande vägsalt som i stora kvantiteter används sommartid. Saltet smälter vid ungefär $+30^{\circ}\text{C}$. En prototyp till värmelager på 200 kg prövas sedan 1978 vid Institutionen och en enhet på 750 kg har konstruerats.

Redan vid projektstarten bedömdes det nödvändigt att låta fullskaleförsök föregås av noggranna simuleringsstudier. Huvudskälet till detta är att ett korttidslager utöver en noggrann egen dimensionering kan sättas in i systemsammanhang först efter noggranna studier, t ex rörande laddning resp urladdning (som kan kräva skilda värmeväxlande komponenter), solfångartyp- och area, styrstrategier och värmedistributionssystem inom byggnaden.

Det bedömdes också intressant att utvidga både simulering och fullskaleförsök till parallella system med sensibel lagring i vatten och magnetit.

Metodiskt valdes att genomföra simuleringen för de tre solvärmesystemen för ett och samma småhus arkitektoniskt och byggnadstekniskt sett. Rent praktiskt avsågs att bygga från de senare synpunkterna identiska hus på tre granntomter i Täby kommun.

Av tillgängliga simuleringsprogram valdes efter grundliga överväganden det sk TRNSYS-programmet från University of Wisconsin, USA. Programmet, som är väldokumenterat från försök inom USA, omfattade redan i utgångsläget alla för projektet nödvändiga subrutiner med undantag av korttidslager baserat på saltsmältning. En sådan subrutin utvecklades däröfr inom projektets ram.

Byggnaderna själva karakteriseras av brutna tak, vilket medger en södervänd solfångarbärande yta på ca 40 m^2 i en för Stockholmsförhållanden nära optimal elevation på 63° mot horisonten.

Fönsterarean är koncentrerad till söderfasaden. I kombination med solavskärmning för sommarförhållanden och en hjärtvägg av tungt material (betong eller tegel) medger detta större solvärmetillskott än en traditionell småhusutförning. Den uppvärmda volymen är nära nog kubisk, vilket tillsammans med isolering över kraven i SBN 75, minimerar transmissionsförlusterna. Detaljutförningen av ytterväggar och vindsbjälklag medger extrem täthet vid praktiskt byggande. Vindfång vid huvudentrén minskar ofrivillig ventilation.

Utförningen av uppvärmningssystemen bygger på noggranna överväganden av hur känd teknik och kommersiellt tillgängliga komponenter på bästa sätt kan kombineras med de skilda krav som de tre olika korttidslagren

ställer. Utanför de apparatrum, där respektive system har sitt hjärta, är värmeinstallationerna i de tre fallen identiska. Värmedistributionen är luftburen och sker vid en konstant temperatur av ca +30°C. Klimatkraven tillgodoses genom varierande luftflöden med individuell styrning rum för rum. Skälet för den låga distributions-temperaturen är främst kalciumkloridhexahydratets smält-punkt, men ett extremt lågtemperatursystem som detta är generellt intressant för flera nya uppvärmningsmetoder än solvärme-korttidslager.

I ett första steg konstruerades byggnaden själv i matematisk modell. Ett solvärmesystem inkluderande ett korttidslager av vatten men utan nämnvärd förfining i fråga om styrstrategi tillfogades. Modellen databehandlades med värden från SMHI's väderstatistik för Stockholm 1971 som ingångsdata.

Därefter kombinerades subrutiner till modeller av de tre "avancerade" systemen.

Simuleringsarbetet medförde oväntade svårigheter. Uppenbart orimliga beräkningsresultat ledde till i och för sig värdefulla upptäckter.

Klimatbandets solinstrålningsvärden under midvintermånaderna visade sig vara alltför gynnsamma. Efter samråd med SMHI har bandet korrigerats.

Under arbetets gång har en ny TRNSYS-version blivit tillgänglig. Långvarig felsökning avslöjade till slut att några subrutiner ändrats utan att detta påpekats i manualen för den nya versionen.

Trots dessa relativa framgångar nödgas projektgruppen konstatera att den successiva förfining av systemuppbyggnaden som simuleringen avsetts stödja inte kunnat genomföras. Omvänt kan heller inte TRNSYS idag presenteras som ett generellt användbart program för liknande arbeten med solvärmesystem.

Arbetet både med byggnaderna/systemen själva och med TRNSYS har å andra sidan nått så långt att steget till fullskaleexperiment kan tas med tillförsikt.

Ett huvudmoment vid mätningen och utvärderingen av ett (salthydrathuset) eller flera parallellprojekterade experimentus skulle just vara att genom ömsesidiga modifieringar av system och matematisk modell nå fram till ett datorprogram, som kan utnyttjas för simulering av ett stort antal solvärmebaserade systemvarianter.



1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

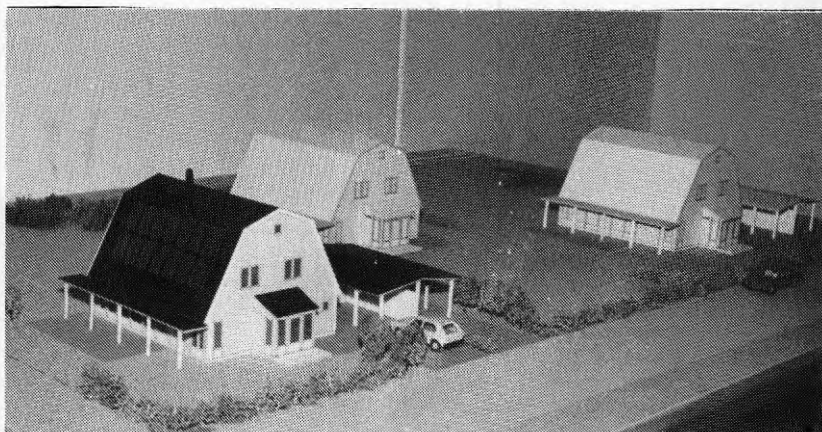
Runt om i världen pågår sedan mitten av 70-talet ett omfattande tekniskt utvecklingsarbete med syfte att direkt utnyttja solstrålning som ersättning för indirekta former av solenergi eller andra energikällor.

Solstrålning är en högvärdig energiform som i princip kan omvandlas till flertalet andra energiformer. Strålningen har emellertid även vid klart väder en låg energitäthet, vilket leder till stora ytbehov för de solfångande anordningarna. Med idag tillgänglig teknik är det främst värmetillämpningar som kommer ifråga.

I Norden är förutsättningarna att utnyttja solenergi begränsade. Det nordliga läget gör att solinstrålningen blir mycket ogynnsamt fördelad mellan sommar och vinter. Tack vare Golfströmmen är vintrarna trots det nordliga läget ganska milda men de är samtidigt molniga och därmed solfattiga. Med Sveriges klimatförutsättningar förefaller trots detta en inriktning mot solvärmeteknik lika motiverad som i många länder med bättre soltillgång. Viktiga skäl är att uppvärmningssäsongen är lång och att nära hälften av vår energiomsättning gäller lågtemperaturvärme.

De stora utvecklingsinsatserna ute i världen kan i många stycken nyttiggöras också i Sverige. Vårt klimat ställer emellertid så speciella krav att en delvis egen solvärmeteknik måste utvecklas.

Den största potentialen för solvärmeutnyttjande finns i bostäder och lokaler. Behovet av tappvarmvattenberedning är nästan konstant under året medan byggnadsuppvärmning kräver mest energi när tillgången till solstrålning är som minst. Värme-lagring är därför en viktig del av de flesta solvärmesystem.



Figur 1.1
Modellfoto från sydost

1.2 Värmelagring

För att ett solvärmesystem i vårt klimat skall kunna täcka hela eller nästan hela värmebehovet för en byggnad måste värme lagras från sommar till vinter. Den lagerkapacitet som erfordras motsvarar nästan halva det totala årsbehovet. Huvuddelen av ett så stort lager utnyttjas bara en gång per år. Endast extremt billiga eller mycket energitäta lagringsmedia kan därför komma ifråga.

Studier har visat att för lager som endast motsvarar ett å två dygns värmebehov vintertid sjunker utnyttjandet drastiskt då lagerstorleken ökas.

Man kan mot denna bakgrund tala om två principiellt tänkbara lagerstorlekar:

- Säsongslager med kapacitet motsvarande ungefär halva av årsbehovet
- Korttidslager med kapacitet motsvarande 0,5 - 1,0 % av årsbehovet

För korttidslagring av solvärme anses en täckningsgrad på 50 - 60 % av årsvärmebehovet vara rimlig.

De två lagertyperna medför förutom skilda behov av kapacitet också olika krav på systemet för övrigt. Eftersom korttidslagret i stor utsträckning laddas och urladdas under uppvärmningssäsongen med dess korta soltider måste verkningsgraden i systemet vara hög. Ett följsamt korttidslager är möjligt att kombinera med ett centralt säsongslager, eftersom bidragen under vinterhalvåret kan minska volymbehovet för det centrala lagret.

I ett litet längre perspektiv kan korttidslagring i saltsmältor bli ett medel att utnyttja den överskottsvärme som dagtid förekommer i vissa byggnader t ex kontorshus och industrier. Värmen i lagret kan sedan användas till uppvärmning nattetid. Eventuellt kan ett sådant saltlager kombinerat med värmepump användas till tappvarmvattenberedning.

Solvärmesystem med enbart korttidslager kräver en kompletterande energikälla - direktverkande el, oljepanna, vedkamin, för att nämna några möjligheter.

Kostnaden för installation och drift av en sådan kompletterande uppvärmningsanordning kan ställas i relation till prisskillnaden mellan ett säsongslager och ett korttidslager. Värderingen måste å andra sidan också ta hänsyn till att solfångarytan i korttidslagrets fall endast utnyttjas till 50 å 60% eftersom värmebehovet under sommarhalvåret är litet och solfångarna därmed blir "överdimensionerade".

Ett system med säsongsvärmelager måste kunna täcka byggnadens hela effekttbehov vid dimensionerande utetemperatur, vilket inte krävs av ett system med korttidslager.

1.3 Systemtyper

Man skiljer översiktligt mellan passiva och aktiva solvärmesystem.

I ett passivt system drivs transporten av värmets och flödenas reglering genom de temperaturskillnader som spontant uppkommer vid solstrålning. Skorstensverkan i en spalt, t ex, är en sådan drivkraft.

Passiva solvärmesystem röner internationellt sett ett ökande intresse. I områden med klara soliga dagar och klara kalla nätter kan stora värmestillskott erhållas av passiva solvärmesystem som t ex kan bestå av stora fönster mot söder och en stor termisk massa inbyggd i huset. Även i vårt klimat kan solinstrålning genom medveten utformning av fönster och byggnad ge väsentliga bidrag till uppvärmningen. På detta område pågår en accelererande utveckling, men mycket återstår att göra.

Aktiva system karaktäriseras av att det insamlade solvärmets transporteras genom systemet med hjälp av mekanisk energi tillförd från en yttre källa. Transporten drivs i allmänhet med el till pumpar eller fläktar. Även reglerfunktionerna i ett aktivt system fordrar normalt en yttre energikälla.

Med den teknik som är tillgänglig idag blir kostnaden för aktiv solvärme relativt hög. En realistisk uppskattning pekar på investeringskostnader för solvärmesystem - även vid serietillverkning - på ca 10 kr per årligt levererad kWh solvärme. En orsak till de höga kostnaderna är att dagens teknik är ganska ofullgånge.

Det är nödvändigt att gå flera vägar i ansträngningarna att sänka kostnaden för solvärme. Man bör söka att

- o utveckla effektivare och mer åldringsbeständiga solfångare till lägre priser
- o utveckla effektivare, mer kompakta och billigare värmelager avsedda för både säsons- och korttidslagring
- o dimensionera och utforma hela system optimalt
- o förenkla installationen i själva byggnaden

Utveckling mot effektivare plana solfångare med hjälp av teknik som selektiva absorbatorytor och evakuerade glastuber pågår. För närvarande dominerar marknaden dock av enkla solfångartyper med svartmålad absorbatoryta och enkelgas.

De vanligaste värmebärarna i aktiva solvärmesystem är luft respektive vatten med tillsats av glykol. Vatten kan medföra problem med frysning, kokning och skador genom läckage, men har stora fördelar då det gäller effektiv värmeöverföring. Med luft undviker man vattnets nackdelar, men eftersom värmeöverföringen mellan luft och värmväxlarytor är dålig och värmekapaciteten

hos luft är låg fordras stora flöden och därmed skrymmande kanaler och stort fläktarbete.

På den svenska marknaden dominerar vattenkylda solfångare. Ett skäl är att de är naturliga i samband med tappvarmvattenberedning - det solvärmeutnyttjande som idag är vanligast.

Lagringstekniken för solvärmesystem är under utveckling. Behållare med vatten är den gängse metoden att lagra värme i ett vattenburet solvärmesystem. Luftburen värme lagras i allmänhet i stenbäddar som är mer skrymmande än ett vattenlager med samma lagringskapacitet.

Ansträngningarna att finna andra metoder för värmelagring inriktas på kemiska system. Smältvärmelagring i substanser med smältpunkter i intervallet $30 - 50^{\circ}\text{C}$ har hittills rönt mest uppmärksamhet. Korttidslagring i aktiva, men i viss mån även passiva solvärmesystem har prövats. Med s k kemiska värmepumpar kan också säsonglagring tänkas ske, eftersom värmelagringstätheter på inemot 1 MWh/m^3 synes uppnåeliga (mot t ex $0,06 \text{ MWh/m}^3$ vid vattenlagring mellan $+ 30^{\circ}\text{C}$ och $+ 80^{\circ}\text{C}$).

I ett solvärmesystem kan kostnaderna för rörledningar, pumpar och reglerutrustning bli lika höga som för solfångare och lager. Erfarenheter av hur solvärmesystem bör utformas och dimensioneras är begränsad. Idag utnyttjas oftast amerikanska erfarenheter utan utredning om hur pass giltiga de är i vårt klimat. Själva systemutformningen kan ge möjligheter att öka solvärmeutbytet.

De fullskaleprojekt, som hittills genomförts i Sverige, har haft till syfte att demonstrera att solvärmesystem även i vårt klimat kan ge väsentliga tillskott till en byggnads värmeförsörjning. Däremot har de inte i så stor utsträckning varit inriktade på att pröva och utvärdera den enskilda detaljens inverkan på systemets verkningsgrad. Hittills vunna erfarenheter är därför i detta avseende av begränsat värde.

Detta projekt har som ett av sina huvudsyften att studera just systemuppbyggnad bl a med successiva simuleringar som hjälp.

Mycket arbete krävs uppenbarligen innan solvärmetekniken kan ges en sådan spridning att väsentliga bidrag till Sveriges energiförsörjning blir tillgängliga till rimliga kostnader.

Solveig-projektet är inriktat på några av de många delproblem som antytts.

Projektets mål är att demonstrera energihushållning genom att i ett första skede parallellprojektera, simulera och utvärdera, och i ett senare skede bygga energisnåla solvärmda hus. Tyngpunkten ligger på systemutformning och korttidsvärmelagring, men genom värmeteknisk passiv solteknik eftersträvas också vinster med hjälp av byggnadstekniska och arkitektoniska medel.

En förutsättning för att idag kunna utnyttja solenergi på ett ekonomiskt sätt är att i största möjliga utsträckning utnyttja standardkomponenter och att åstadkomma en enkel och effektiv styrstrategi i solvärmesystemet. När det gäller själva solfångarna bör produkter anpassade till den skandinaviska marknaden användas.

Tre lagringsmedia och härtill anpassade system studeras parallellt: magnetit, vatten och salthydrat.

Magnetit används i kombination med luftkylda solfångare och har i förhållande till vanliga stenarter omkring dubbelt så stor värmekapacitivet. Vatten och salthydrat kombineras med vattenkylda solfångare. Det salthydrat som studeras smälter vid ca $+30^{\circ}\text{C}$ och leder därmed till ett extremt lågtemperatursystem.

Som tillsatsvärme används el kopplad direkt till det luftburna systemet, bl a av mättekniska skäl, men en förhoppning är att genom projektet öppna vägen för utveckling av å ena sidan elvärme ackumulerad i solvärmelager och å den andra sidan enkla tillsatspannor, kanske för ved och kanske också de kopplade till solvärmelager.

Med dessa utgångspunkter syftar projektets två skeden till:

- a) att utveckla befintliga simuleringsprogram som hjälpmedel för dimensionering och optimering av korttidslagrande solvärmesystem
- b) att såväl teoretiskt (genom simulering) som praktiskt jämföra effekten av tre olika lagringsmetoder på möjligheten att utforma övriga delar av solvärmesystemet på ett ekonomiskt och funktionsmässigt tillfredsställande sätt
- c) att i praktiken jämföra drifterfarenheter och funktionsupplevelser hos de boende

- d) att analysera skillnader i termisk karaktäristik mellan simuleringsprogram och mätningar under praktisk drift. Detta kommer att kunna utgöra utgångspunkt för förbättring och modifiering av solvärmesystemen såväl som för modifiering av de matematiska modellerna i simuleringsprogrammet
- e) att genom a), b), c) och d) skaffa erfarenheter av och utarbeta rutiner för dimensionering och projektering av lokala solvärmesystem med korttidslager
- f) att skaffa erfarenheter av konstruktion och byggande av solvärmesystem baserade på olika korttidslager. De installationstekniska svårigheterna skall härvid speciellt uppmärksammas och analyseras
- g) att analysera kostnaden för byggande av solvärmesystemen
- h) att skaffa erfarenheter av passiv solvärmeteknik
- i) att inordna solvärmekomponenter i en byggnad såväl byggnadstekniskt som arkitektoniskt.

Av praktiska och kostnadsmässiga skäl har projektgruppen valt att studera dessa aspekter med tillämpning på enfamiljshus.

3 PROJEKTUPPLÄGGNING

3.1 Skedesindelning

I det skede 1, som denna rapport behandlar, har tre solvärmesystem baserade på varsin typ av korttidslager för byggnadstekniskt och arkitektoniskt identiska småhus projekterats parallellt. Projekteringen har drivits så långt att noggranna teoretiska data beträffande värmebehov blivit tillgängliga. Två dataprogram, det amerikanska TRNSYS och det svenska BRIS, har använts för simulering av ett års drift. Väderdata från SMHI har utnyttjats. Vissa subrutiner för simulering av de undersökta värmelagren har utvecklats. Avsikten var att successiva modifieringar av systemen och optimeringar av bl a solfångarareor och lagervolymer skulle bli möjliga på basis av simuleringsresultaten.

Fullskaleskedet är väl förberett genom att Täby kommun reserverat tomter för försökshuset och genom att en intresserad entreprenör, John Mattson Byggnads AB, medverkat i förprojekteringen. Tekniken för salthydratlagret har efter utvecklingsarbete vid Institutionen för fysikalisk kemi, KTH, provats i laboratorieskala (200 kg) i ett par år. Inom Solveigprojektet har institutionen i samarbete med Blomqvists Verkstads AB konstruerat en fullskaleenhet (storleksordning 1000 kg).

3.2 Passiva solvärmestillskott och energihållning

I ett normalt hus täcks cirka 10% av det årliga värmebehovet genom solinstrålning. Medveten planering förväntas kunna öka denna andel avsevärt. En genomtänkt orientering av byggnaden och dess fönster är jämte val av lämpliga byggnadsmaterial och konstruktioner huvudförutsättningar.

Den energibesparing som kan uppnås med sådana medel uppstår huvudsakligen under vår och höst. Under vintern är solenergitillskottet litet. Problem i form av besvärande övertemperaturer sommartid kan uppstå.

För Solveig-huset har försök gjorts till en rimlig avvägning av söderorienterade fönsterytor i kombination med solavskärmning.

Husens volym har utformats nära det kubiska idealet för minimala omslutningsytor. Isolering utöver kraven i SBN 75 har projekterats.

En sekundär fördel med en väl tilltagen värmeisoler-
ring av de omslutande ytorna är reduktionen av utifrån
kommande buller. En följd effekt kan emellertid bli
att ljud som genereras inom fastigheten kan upplevas
tydligare än normalt. Omsorg kommer därför att läg-
gas på ljuddämpning framför allt av ventilationsan-
läggningen.

Entréerna är försedda med vindfång. Det ofrivilliga
luftombyte som sker vid öppnande av ytterdörrar är av
en sådan storlek, att ett vindfång ger en icke försum-
bar minskning av en byggnads energiförbrukning.

3.3 Systemstudier

Förutsättningarna för val och dimensionering av de
olika solvärmesystemen kan sammanfattas i följande
punkter:

- Tre olika tekniker för värmelagring skall jämföras:
sensibel värmelagring i magnetit, sensibel värme-
lagring i vatten och latent/sensibel värmelagring
i salthydrat smälta
- Tre hus skall byggas och utvärderas i ett fullskale-
skede
- Det aktiva solvärmesystemet bör täcka minst 50% av
årsvärmebehovet för tappvarmvatten och uppvärmning
- Med undantag för värmelagren skall standardkompo-
nenter användas
- Uppvärmningsbehovet för det enskilda huset skall
hållas lågt genom att byggnaden utförs tät och
välisolerad och förses med anordningar för värme-
återvinning ur ventilationsluften
- Solvärme utnyttjas också passivt. Fönsterarean
koncentreras till söderfasaden och hjärtväggen
mitt i huset ges stor termisk massa
- Som kompletterande värmekälla skall el användas

De skilda värmelagringsmetoderna ställer olika krav
på systemet för övrigt. För att en jämförelse skall
bli meningsfull måste därför själva lagringstekniken
vara utgångspunkten för konstruktionen av det enskilda
solvärmesystemet. Salthydratlagret t ex kan pga lågt
temperaturbehov medge enkla solfångare.

Eftersom passiva solvärmestillskott kan uppträda sam-
tidigt som det aktiva systemet levererar värme, är det
nödvändigt att ta hänsyn till själva byggnadens totala

värmefunktion vid beräkningar av det aktiva systemets värmeflöden.

Trots att de enskilda komponenterna i ett solvärmesystem var för sig är relativt enkla att analysera, är det pga solinstrålningens variationer svårt för att inte säga omöjligt att med manuella beräkningsmetoder förutsäga den totala funktionen för solvärmesystem och byggnad. Genom numeriska experiment med simuleringsprogram är det däremot principiellt möjligt att studera nya idéer före dyrbara och tidsödande fullskaleprojekt.

Numeriska datorsimuleringsberäkningar kan medge bedömning av variationer inom en viss idélösning. Den successiva förfining som därigenom blir möjlig bör också kunna bidra till att öka kunskapen om och förståelsen för solvärmesystem i allmänhet. För ett fullskaleexperiment är sådana studier av värde såväl vid utformningen av byggnaden och värmesystemet som vid planeringen av mätprogrammet och utvärderingen av experimentet.

Flera förenklade beräkningsmetoder för den totala energileveransen från ett solvärmesystem är tillgängliga (Girido 1979, f-chart). Med dessa metoder kan inverkan av solfångarens verkningsgrad, solfångarytan och lagerstorleken i viss mån studeras. Endast f-chart var tillgängligt som datorprogram och en viss osäkerhet råder i fråga om detta programs tillämplighet för svenskt vinterklimat.

För detaljstudier av och jämförelser mellan olika solvärmesystem fordras en matematisk modell som tar hänsyn både till detaljer i systemen, till reglerstrategin och till inverkan av solinstrålningens korttidsvariationer.

Datorprogrammet TRNSYS från University of Wisconsin, som är väldokumenterat och har använts i flera amerikanska projekt bedömdes uppfylla dessa krav. Samtliga simuleringsberäkningar med systeminriktning har skett med TRNSYS.

För kontroll av inomhusklimatets variationer, främst de som beror på samverkan mellan fönsterinstrålning och byggnadsstommens värmelagrande förmåga, har simuleringar med hjälp av det svenska datorprogrammet BRIS genomförts. Inverkan av dimensioner och materialval i byggnadsstommen har på detta sätt kunnat studeras.

Uppbyggnaden av system och datormodeller har utförts i steg. Sedan husen utformats "konstruerades" de i matematisk modell inom TRNSYS ramar. Modellen tar förutom till byggnadens egna värmeegenskaper hänsyn till passiv solinfångning, solavskärmning, värmeåtervinning och värmegivning från boende och hushållsapparater. Några körningar gjordes och rimligheten i resultaten kontrollerades. "Husmodellen" kompletterades därefter med modeller av de olika solvärmesystemen. Avsikten var att sedan genom successiva simuleringsberäkningar kunna modifiera system och styrstrategier. Flera problem, som

närmare redovisas i kapitel 6 SIMULERING, ledde till att detta "växelspel" inte kunnat genomföras i planerad omfattning.

3.3.1 Datorprogrammet TRNSYS anpassat för Solveig-projektet

TRNSYS medger utnyttjande av timvärden från historiska serier av klimatdata.

TRNSYS består av ett antal subrutiner, som från fall till fall kan kombineras för att avbilda det önskade systemet.

Från början tillgängliga subrutiner räcker för simulering av de flesta idag förekommande konventionella solvärmesystem. Däremot saknades en del subrutiner för simulering av komponenter under utveckling.

En komponent, för vilken TRNSYS saknar subrutin, är den typ av värmelager med salthydratsmälta som är aktuell inom Solveig-projektet. En ny subrutin för simulering av ett sådant lager utvecklades därför inom projektet. Jämförelser med vatten- och magnetitlager har därmed kunnat göras inom TRNSYS ramar.

Subrutinen kommer att kunna utnyttjas av alla TRNSYS-användare både vid utvecklingen av salthydratlager i sig och vid simuleringar av hela solvärmesystem byggda på sådan lagringsteknik.

Den numeriska modellen utformades så generell att lager med olika geometrisk konfiguration och kemisk sammansättning skulle kunna simuleras. En avvägning mellan modellens beräkningsnoggrannhet och nyttan från simuleringssynpunkt gjordes.

3.3.2 Datorprogrammet BRIS använt för beräkning av rumsklimat samt värme- och kyleffekter

En beräkning av inomhusklimatets variationer under ett dygn fordrar hänsyn till en rad faktorer, som kan sammanfattas i följande grupper:

- o Yttre belastningar (temperatur och solstrålning)
- o Inre belastningar (personer, belysning etc)
- o Installationens kapacitet
- o Byggnadskonstruktionerna

Uppgifter avseende de två första grupperna kunde i detta sammanhang i princip fås ur klimatdata, tabeller och schematiska antaganden. Installationens karaktistika hade TRNSYS-körningarna gjort tillgängliga.

Den fjärde gruppen fordrar matematiska modeller som endast under vissa speciella förutsättningar kan lösas analytiskt.

Datorprogrammet BRIS som till största delen baseras på grundläggande fysikaliska samband har en hög ambitionsnivå. BRIS medger trots detta enkel och flexibel behandling av skiftande, komplicerade system. Det har genom jämförelse med mätningar befunnits vara mycket tillförlitligt.

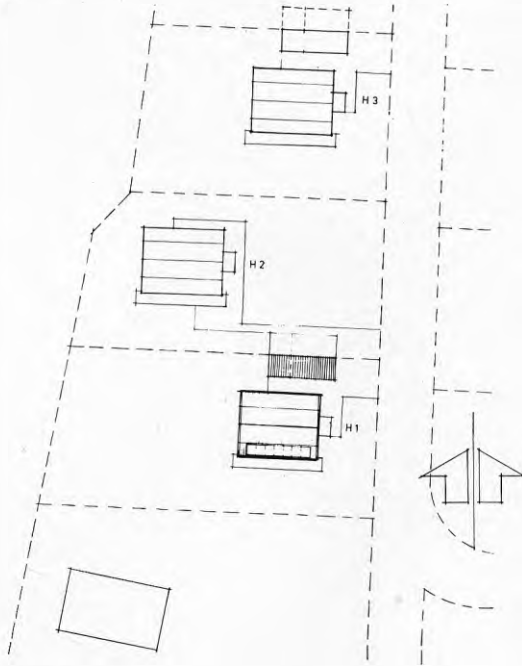
Under projektarbetet har själva byggnadernas inverkan på det termiska klimatet simulerats med BRIS, varvid bl a fönstrens värmebalans och effekten av varierad termisk massa i stommen studerats.



4 BYGGNADERNA

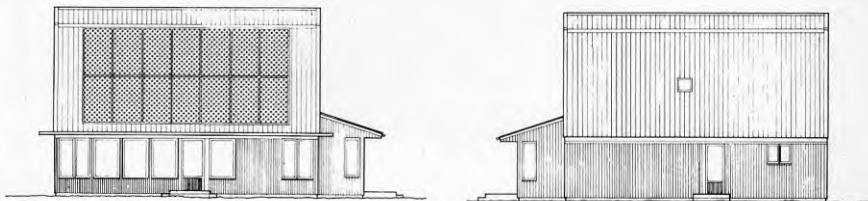
4.1 Byggnadsutformning

De studerade husen bildar en grupp på tre i västra kanten av ett område i Täby, avsett för enbostadshus. Topografi och vegetation medger relativt god solinstrålning även vintertid. Västerut ligger öppen ängsmark.



Figur 4.1
Situationsplan

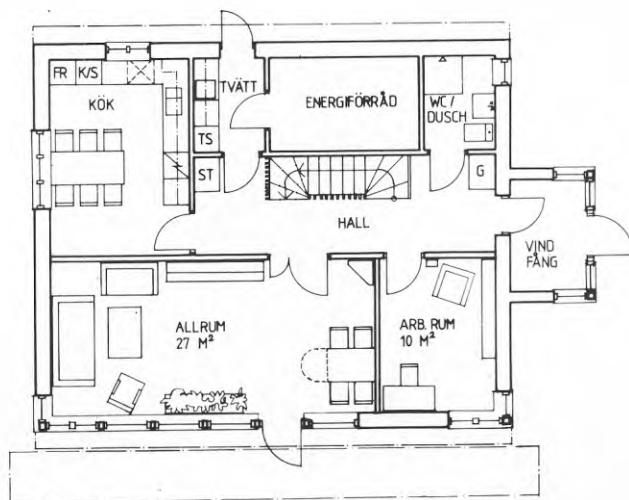
Stora södervända fönster tillför husen både direkt och diffus strålning. Solavskärmning skuggar då solen står som högst men släpper in vår-, höst- och vintersol. För utjämning av inomhusklimatet har den bärande hjärtväggen projekterats för ett tungt material, betong eller tegel. Mot norr är fönsterarean minimerad. Södervända takfall med 63° lutning medger installation av $35\text{--}40\text{ m}^2$ effektiv solfångararea per hus.



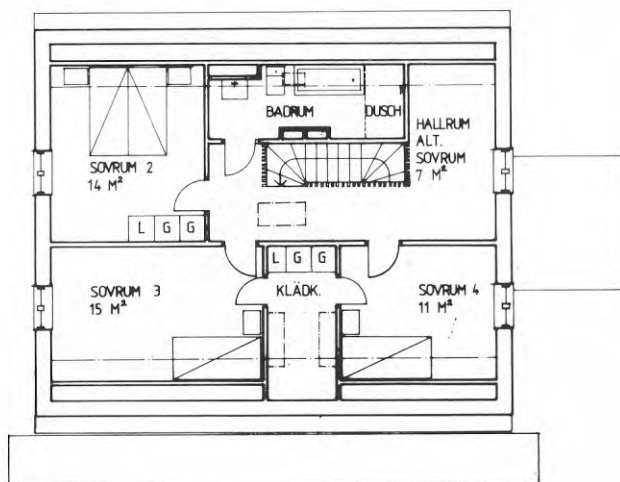
Figur 4.2
Fasad mot söder

Fasad mot norr

Husen har två bostadsplan samt ett vindsplan endast avsett som förråds- och installationsutrymme. Huvudentrén har ett utanpåliggande vindfång, som planeras för lägre rumstemperatur än byggnaden för övrigt. Närmast innanför ligger ett sovrums och toalett med dusch. Vardagsrummet är uppglasat mot söder och har ett smalt utblicksfönster mot väster. Intill köket bildar tvättstugan groventré och samtidigt vindfång.



Figur 4.3
Plan av bottenvåning



Figur 4.4
Plan av överbåning

Planlösningen baseras delvis på att olika aktiviteter ställer skilda krav på komforttemperatur. Vardagsrum och arbetsrum som bör ha en temperatur av ca 20°C orienteras med fördel mot söder. I kök är lämplig temperatur ca 18°C. Måttligt soliga lägen är gynnsamma. Önskemålen om sovrumstemperatur är individuella men nattetid som regel lägre än 20°C. Sovrum kan med fördel placeras i mindre soliga lägen.



Figur 4.5
Fasad mot väster

Byggnaderna skiljer sig från varandra endast genom de detaljer som de olika systemlösningarna kräver.

Husens uppvärmning kommer att ske genom ett luftburet system med cirkulerande varmluft, kombinerat med FT-system för hygienventilation och med värmeåtervinning. Målsättningen för läckförluster har satts till max 0,1 luftomsättningar/h vid normala tryckförhållanden. En hög täthet är en förutsättning för ett väl fungerande luftburet värmesystem.

Fördelarna med ett luftburet system är i sammanhanget framför allt att det medger låga distributionstemperaturer. För balansering av ev övertemperaturer sommartid medger ett sådant system också nattventilation med sval uteluft.

Installation av någon typ av eldstad för vedbränslen är förberedd. Den kan installeras då utvärderingen i skede 2 är slutförd.

Arkitektoniska uttryck för husens energitekniska särart har inte eftersträvats. Exteriören anknyter med sitt brutna tak snarare till traditionellt svenskt byggnadsskick, samtidigt som det lägre takfallet ger en från solfångarsynpunkt idealisk lutning.

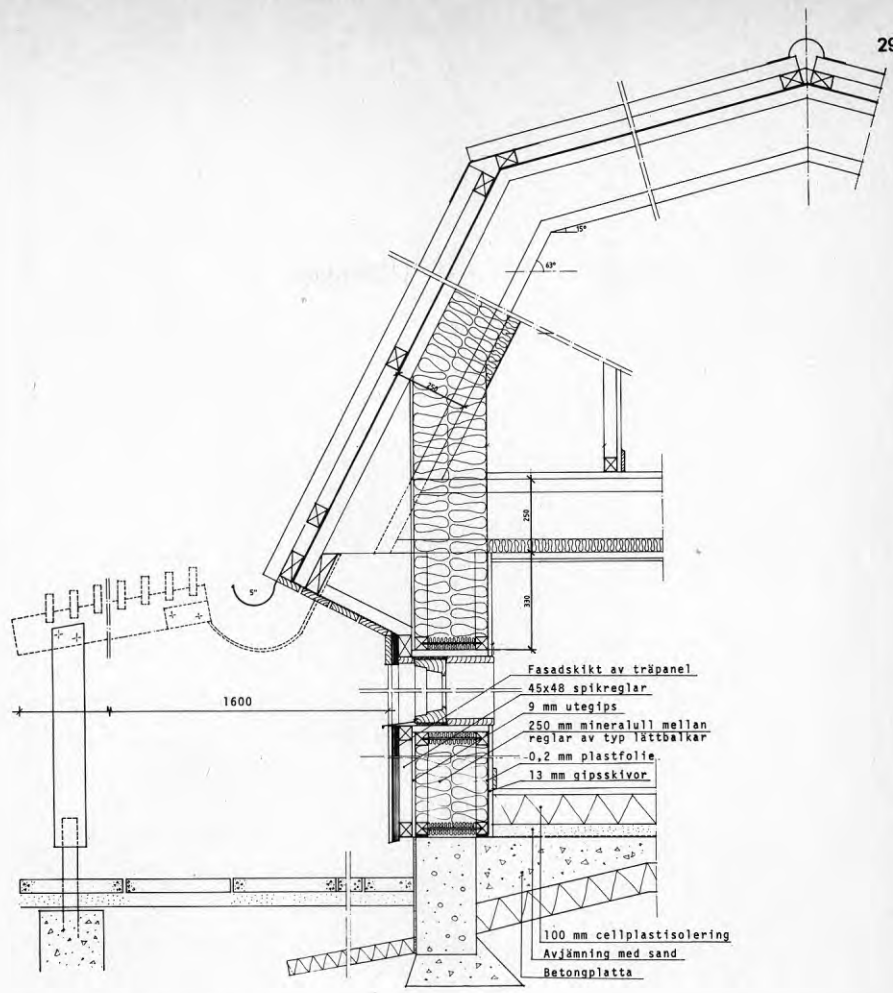
4.2 Byggnadsteknisk utformning

En byggnads omslutningsytor kan i de flesta fall med god ekonomi isoleras betydligt mer än enligt kraven i SBN 75.

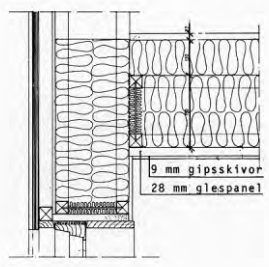
Projektgruppen har inriktat sig på att försöka finna byggnadstekniska lösningar som minskar transmissionsförluster och luftläckage kraftigt, utan att byggkostnaden därför skall behöva öka eller exceptionella konstruktioner skall behöva tillgripas.

Ett av de utvecklingsarbeten som de nya normkraven och stigande energipriser initierat inom byggsektorn är sk sparbalkar, där träribbor förbinds med en tunn skiva till I-balksform. Fördelarna är att samtidigt som virkesåtgången sjunker, reduktionen av en byggnadsdels värmemotstånd genom köldbryggor minskar. Jämfört med motsvarande träbalkar är materialbesparingen ca 50 %. De tunna balkliven förenklar också håltagningar för ledningsdragningar.

- Grundläggning: Betongplatta på mark med 100 mm underliggande cellplastisolering och 100 mm överliggande cellplastisolering plus 22 mm spåntad spånskiva.
- Motiv: Isoleringens placering har övervägts noga. En placering av hela isoleringen under plattan kan tack vare betongens värmeackumulerande egenskaper ge vissa fördelar i form av temperaturutjämnning vid solinstrålning. Komfört i form av de varmare golvytor som överliggande isolering ger har dock prioriterats.
- Ytterväggar: 250 mm mineralullsisolering mellan sparbalkar c 1 200 mm
- Motiv: Fördelarna med regelavståndet c 1 200 mm är att värmeförlusterna genom köldbryggor minskar, och att möjligheterna till noggrant isoleringsutförande ökar utan höjda byggnadskostnader.
- Bärande hjärtvägg: 160 mm betong, motiverat av bidrag till balanseringen av inomhusklimatet genom värmeackumulering.
- Vindsbjälklaget: 350 mm mineralull mellan sparbalkar c 1 200 mm.
- Fönster: 3-glas.
- Övrigt: I övriga delar skiljer sig husens konstruktion inte nämnvärt från normala statligt belånade enfamiljshus.

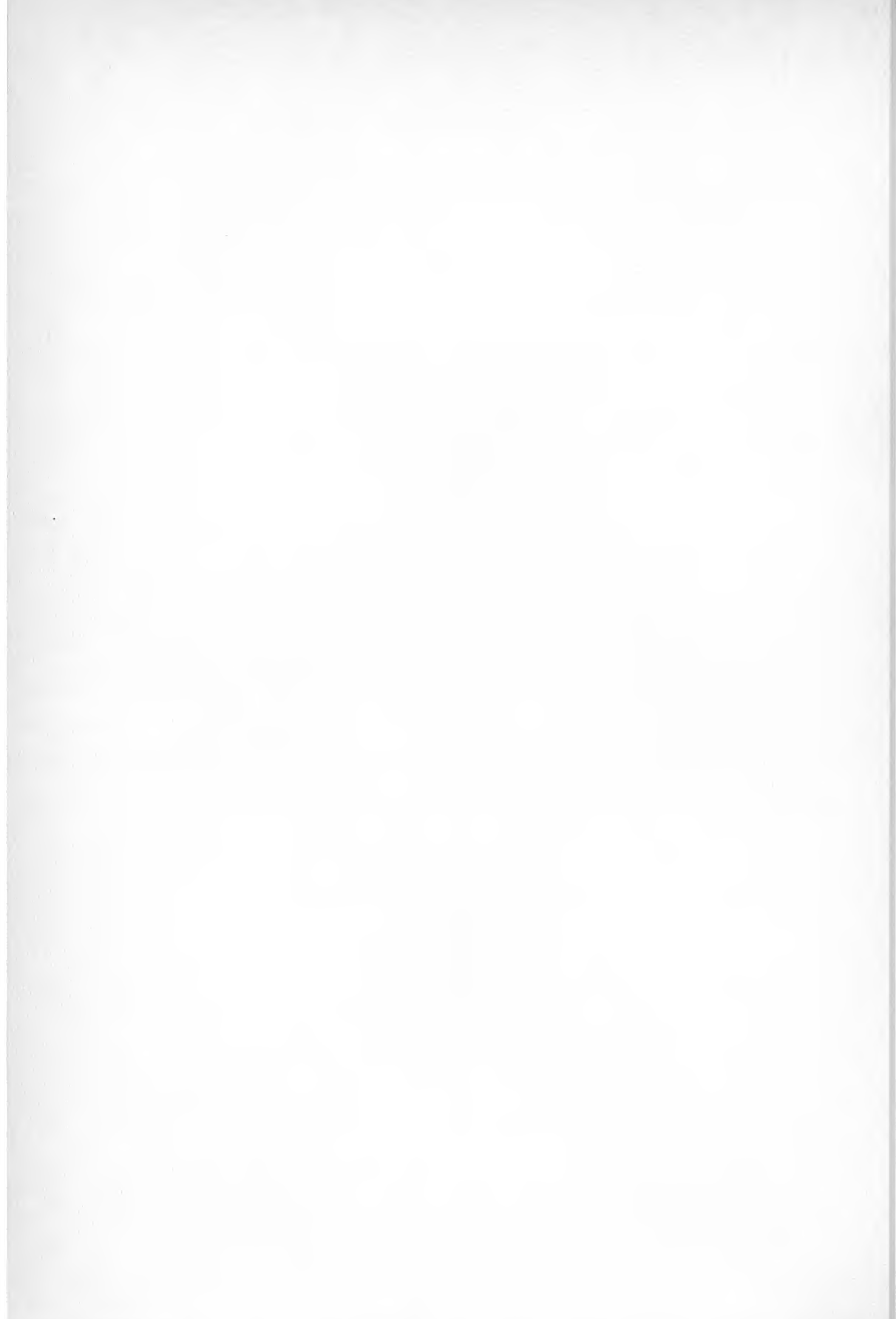


a) Detaljsektion



b) Detalj av takbjälklag vid gavel

Figur 4.6
Vertikalsnitt genom yttervägg



5 UPPVÄRMNINGSSYSTEM

5.1 Termiska solfångare

De närmast följande avsnitten belyser några av de överväganden som projektgruppen ställts inför och antyder komplikationen i simuleringen av en solfångares termiska prestanda. För en ytterligare beskrivning hänvisas till BFR-rapport R35:1978.

Alla termiska solfångare är i princip uppbyggda kring en svart absorbatoryta som omvandlar strålningsenergin till värme. För att ge användbar värme måste absorbatoren uppnå högre temperatur än uteluften. Därmed blir värmeförlusterna från absorbatoren ett problem. En stor del av utvecklingsarbetet på solfångare syftar till att minska värmeförlusterna från absorbatoren utan att hindra solinstrålningen. Skillnaderna mellan olika solfångare sammanhänger framför allt med hur detta problem lösts.

I koncentrerande solfångare reflekteras den parallella strålningen från solen mot en i förhållande till reflektorn liten absorbatoryta. Värmeförlusterna begränsas genom att absorbatoren är liten. Sådana solfångare kan i klart solsken leverera värme vid mycket höga temperaturer, men de måste vara solföljande och kan inte utnyttja den diffusa strålningen.

Den andra principlösningen är plana solfångare. De är uppbyggda av en absorbatoren som upptar hela solfångarytan. Absorbatoren skyddas från värmeförluster genom isolering på baksidan och glasning på framsidan.

5.1.1 Den plana tekniska solfångarens detaljproblem

Glasningen i en plan solfångare kan utformas på många sätt. Glasningen bör ge ett stort motstånd mot värmetransport men samtidigt transmittera största möjliga del av solstrålningen. Utformningen av glasningen blir en kompromiss mellan dessa två funktionskrav.

Värmetransporten genom luftspalten mellan absorbatoren och glas sker till ca 2/3 genom värmestrålning och till 1/3 genom ledning och konvektion. Eftersom solens temperatur är mycket högre än absorbatorns (6000 K resp ca 350 K) sker respektive strålning inom två väl åtskilda våglängdsintervall. Tack vare detta förhållande är s k selektivt svarta ytor som absorberar solstrålning men hämmar värmeutstrålning möjliga. Sådana ytor tillverkas i dag i industriell skala. De består ofta av ett mycket tunt svart skikt - tjockleken är liten i förhållande till våglängden hos värmestrålningen. En selektivt svart yta kan höja mängden insamlad värme med 10 - 20 % jämfört med en vanlig svartmålad yta.

Nästa möjlighet att öka effektiviteten är att minska solfångarens konvektionsförluster. Luft har mycket liten värmeledningsförmåga och vore en utmärkt isolering om konvektionsrörelserna i spalten mellan absor-

bator och glas kunde förhindras. En rad lovande försök att fylla luftspalten med tvärställda genomsynliga lameller eller bikakestrukturer som förhindrar luftrörelserna pågår. Sådana strukturer dämpar samtidigt värmeutstrålningen och vinster på 10 - 20% kan påräknas. Problemet med tekniken är att finna material som har de rätta fysikaliska egenskaperna samtidigt som de medger en enkel tillverkningsprocess.

Konvektion och värmeledning elimineras helt om utrymmet närmast absorbatoren evakueras. Det finns flera solfångare på marknaden i vilka en selektivt svart absorbatör är innesluten i ett evakuerat glasrör. Sådana solfångare kan ha effektiva k -värden kring $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. De effektiva plan högttemperatursolfångarna består av evakuerade glasrör som fungerar som absorbatörer i en rännformad reflektor med ungefär två gångers koncentration. Effektiva k -värden på $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ har rapporterats.

Naturligtvis har solfångarens optiska verkningsgrad, dvs andelen $(\alpha\tau)_e$ av solinstrålningen som absorberas i absorbatorytan väl så stor betydelse som k -värdet. Faktorn $(\alpha\tau)_e$ är lägre för högttemperatursolfångare än för en konventionell enkelglasad plan solfångare. Det är därför viktigt att välja solfångare med tanke på önskad arbetstemperatur.

Typen av värmebärare - luft eller vätska - har stor betydelse för utformningen av en solfångare. De stora skillnaderna i värmekapacitivetet, värmeledningsförmåga och täthet medför skillnader mellan luft- och vätskekylda solfångare:

- o Temperaturstegringen över vätskekylda solfångare kan begränsas till enstaka grader även med små pumpeffekter (dvs $F_R \sim F'$). *)

Luftkylda solfångare fordrar så stort fläktarbete att detta blir styrande vid dimensioneringen. För att begränsa fläktarbetet arbetar luftkylda solfångare därför med stor temperaturstegring över solfångaren (dvs $F_R < F'$). *)

- o Värmeöverföringen mellan en rörvägg och en strömmande vätska är väsentligt högre än för luft. Värmeväxlingsmotståndet mellan vätska och rörvägg påverkar praktiskt taget inte faktorn F' , medan det i fallet luft har stor betydelse.
- o Luftkylda solfångare kan ganska enkelt utformas så att de får mycket liten tidskonstant, dvs värme kan börja utvinnas nästan momentant när solstrålning träffar solfångaren. För vätskekylda solfångare däremot ökar tidskonstanten avsevärt genom värmekapaciteten hos värmebärarvolymen inom absorbatoren och den låga flödeshastigheten.

*) Se vidare appendix: "Verkningsgraden hos plana termiska solfångare".

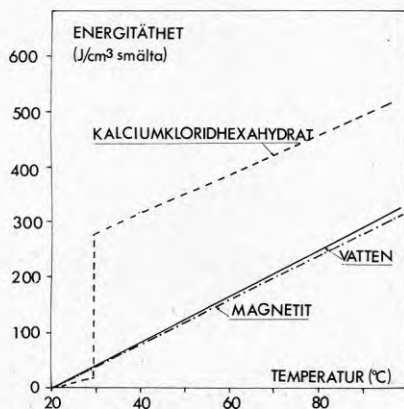
5.2 Värmelagring

Många olika metoder kan användas för lagring av värme. I BFR-rapporten "Lagring av värme" (R70:1978) ges en översikt över de metoder och möjligheter som idag praktiseras eller som i en framtid kan tänkas bli aktuella. Här skall i korthet bakgrunden till de i detta projekt studerade möjligheterna närmare belysas.

Sensibel värmelagring innebär att värme lagras genom temperaturförhöjning hos ett material. Den lagrade mängden värme per mass- eller volymenhet bestäms av produkten mellan temperaturförhöjningen och värmekapacitivet hos materialet. Sensibel värmelagring sker vanligtvis i vatten eller stenmaterial.

Hur effektivt ett material är som sensibelt värmelagringsmedium brukar bedömas med utgångspunkt från dess värmekapacitet per volymsenhet. Vatten intar här något av en särställning med $4,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$. Sten (granit) har en värmekapacitet av $2,1 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ i fast mått dvs utan hänsyn till hålrum. I magnetit kan värmekapaciteten $4,1 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ uppnås, dvs i stort sett samma värde som för vatten.

Latent värmelagring sker allmänt sett genom utnyttjande av det värme som omsätts då ett material ändrar fas (struktur eller aggregationstillstånd). Vanligast i energilagringssammanhang är att utnyttja en smält/kristallisationsprocess. Vid laddning drivs processen med en temperatur överstigande smältpunkten och värme upptas genom att materialet smälter. Vid urladdning anbringas en temperatur understigande smältpunkten och värme frigörs då smältan kristalliserar eller stelnar. Värmelagringskapaciteten kring smältpunkten bestäms av materialets smältvärme.



Figur 5.1
Värmeinhåll vid olika temperaturer hos vatten, magnetit och kalciumkloridhexahydrat (Referenstemperatur = 20°)

Vilket material som kan komma i fråga för användning i en viss tillämpning avgörs främst av materialets smältpunkt i relation till användningstemperaturen. För bostadsuppvärmning framstår material som smälter strax ovanför normal rumstemperatur som intressanta. Flera billiga salthhydrater med smältpunkter kring 30-40°C såsom Glaubersalt ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) och kalciumkloridhexahydrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) har tilltalande karakteristika. Aktuell för användning inom detta projekt är kalciumkloridhexahydrat.

5.2.1 Materialegenskaper hos kalciumkloridhexahydrat av betydelse vid värmelagring

En närmare presentation av kalciumkloridhexahydrats egenskaper som värmelagringsmedium har gjorts i BFR-rapporten "Storage of Low-Temperature Heat in Salt-Hydrate Melts-Calcium Chloride Hexahydrat" (D12:1978) och i "Thermal Performance Tests of a Heat-of-Fusion Storage Unit Based on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ", intern rapport från Institutionen för fysikalisk kemi, KTH.

I korthet har kalciumkloridhexahydrat följande egenskaper: Smältpunkten ligger vid +29,7°C. Smältvärmes är 170 J/g eller 258 MJ/m³ smälta. Värmeomsättningen vid smältning motsvarar per volymsenhet det sensibla värmeinhalten i vatten vid en temperaturhöjning med 61,5°C (Se fig 14). Inom temperaturintervallet 20-90°C leder en jämförelse av värmeinhåll per volymsenhet till 492 MJ/m³ för saltet och 294 MJ/m³ för vatten.

5.2.1.1 Inkongruent smältning

Icke omvändbara sidoreaktioner under smältnings- och kristallisationsprocesserna kan uppträda och resultera i att en allt mindre del av lagringsmediet omsätts som hexahydrat (6-hydrat). Sidoreaktioner av detta slag har oftast sin orsak i att det rena materialet smälter inkongruent. Vid inkongruent smältning bildas ytterligare en fast fas, 4-hydrat, av högre täthet än den ursprungliga, vilket i system utan kraftig omblandning resulterar i en sk fassetparation. Fassetparation förhindrar återbildning av den ursprungliga fasta fasen, och systemets värmelagringskapacitet kring smältpunkten kommer därigenom att minska.

Bildning av 4-hydrat visar sig framför allt vara ett problem vid användning av salt av vissa tekniska kvaliteter. Undertryckning och eliminering av 4-hydratbildning kan emellertid ske genom tillsats av kalciumhydroxid och strontiumklorid-6-hydrat. Metoden kräver dock att saltsmältan är nära homogen. I system utan omblandning finns alltid förutsättningar för att saltkoncentrationsgradienter kan byggas upp och resultera i 4-hydratbildning. Koncentrationsgradienter kan dock motverkas genom en lämplig utformning av värmeväxlingen. Som allmän regel gäller att temperaturen vid botten av lagret skall hållas högre än i resten av systemet. Därigenom ökar den konvektiva omblandningen. En separat intern värmeväxlare som används vid laddning är därför att föredra (se figur 5.3).

Fasseparation kan alltså inträffa till följd av att den temperaturinducerade omblandningen inte blir tillräcklig. Fasseparationen kan dock upphävas och systemet återställas genom omblandning t ex med hjälp av luftinblåsning. En sådan åtgärd kräver ringa tid och blir i sämsta fall aktuell först efter något års drift. För ett korttidslager för solvärme leder fasseparation knappast till några drastiska försämringar i termiska prestanda. Den latent värmelagringskapaciteten ersätts med sensibel värmelagringskapacitet, och följderna blir att lagrets medeltemperatur stiger.

S k aktiv värmeväxling, som beskrivs i avsnitt 5.2.2.2, har bl a den stora fördelen att omblandning direkt ingår som en del av tekniken.

5.2.1.2 Smältans vattenhalt

Vatteninnehållet i lagret kan inte avvika alltför mycket från den kemiska sammansättningen av rent kalciumkloridhexahydrat. Vattenunderskott leder oundvikligen till 4-hydratbildning och måste därför omöjliggöras. Vattenöverskott blir därför nödvändigt men måste ändå hållas lågt. Grovt sett leder ett vattenöverskott på 1 viktprocent till en förlust på ca 10 % i smältvärmeinnehåll. Åtgärder måste därför vidtagas för kontroll av vattenhalten under drift.

5.2.1.3 Underkyllning

Underkyllning innebär att en smälta kan kylas ned till temperaturer som väsentligen understiger smältpunkten utan att någon kristallisation induceras. Tillsats av ett s k nukleeringsmedel motverkar detta fenomen. I fallet kalciumkloridhexahydrat tjänar tillsats av strontiumklorid-6-hydrat som ett effektivt nukleeringsmedel.

5.2.1.4 Lagringsmediets värmeöverförande egenskaper

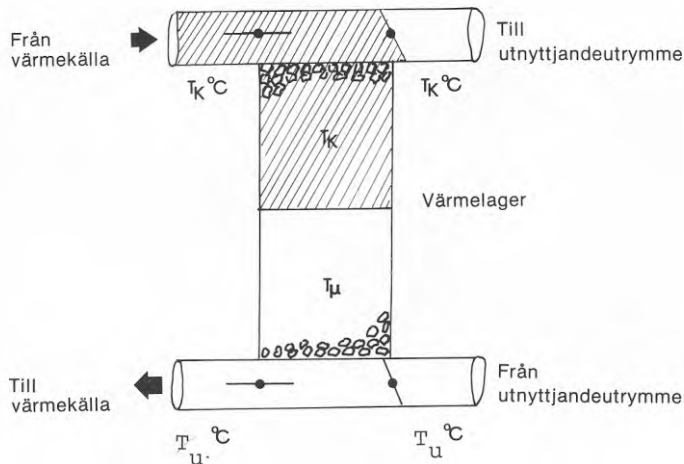
De värmeöverföringsegenskaper som blir relevanta sammanhänger med den använda värmeväxlingstekniken. Allmänt kan sägas att värmekonduktiviteten hos den fasta fasen ($1,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) i hög grad bestämmer värmeeffekten vid uttag av värme genom inbyggda värmeväxlare. Vid laddning kommer ineffekten att bestämmas av värmeöverföringen mellan värmeväxlare och saltsmälta. På grund av framförallt saltsmältans höga viskositet blir värmeöverföringstalet ca 1,5-2 ggr mindre än vad som är fallet vid värmeväxling vatten/vatten. Överföringstalet ligger i storleksordningen $100 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Problemen diskuteras vidare i avsnitt 5.2.2 nedan.

5.2.1.5 Volymförändringar i lagringsmediet

Volymförändringen under smältnings/kristallisationsprocesserna är 11 % och beror på att den fasta fasen har en högre densitet än den flytande. Vid konstruktionen av ett latent värmelager är det viktigt att ta hänsyn till denna effekt och framförallt att se till att stora övertryck inte kan byggas upp lokalt med de skador på konstruktionerna som i så fall kan uppstå.

5.2.2 Värmelagring, ett värmeväxlingstekniskt problem

En hög värmekapacitet (sensibel eller/och latent) på volymsbas avgör inte ensam hur lämpligt ett material är som lagringsmedium. Materialkostnaden och kanske framför allt möjligheten att åstadkomma effektiv värmeväxling till lagringsmediet har många gånger den största betydelsen. Varje lagringsmetod ställer sina krav på värmeväxlingsteknik.



Figur 5.2

Ideal värmeväxling vid sensibel värmelagring i fast bädd.
 T_k är värmekällans temperatur och T_u är utnyttjanderummets.

5.2.2.1 Värmeväxling vid sensibel värmelagring

Värmeväxling vid sensibel värmelagring i fasta material anordnas ofta enligt principen packad fast bädd. Lagringsenheten packas med fasta kroppar i direkt kontakt med ett värmeöverföringsmedium, vanligtvis luft, som fyller utrymmet mellan kropparna. Den stora kontaktytan gör värmeöverföringen mycket effektiv. Lagret utformas normalt så att värmeöverföringsmediet strömmar vertikalt genom bädden. Vid laddning sker detta upptrifån och vid uttag med omkastad flödesriktning (se figur 5.2). En stabilare temperaturskiktning kan därigenom erhållas i bädden samtidigt som värmeväxlingen förbättras. Idealt sett är det möjligt att anordna värmeväxlingen mellan värmekällan via lagret till utnyttjandetrymmet utan något temperaturfall orsakat av värmeväxlingen i lagret. I praktiken kräver detta emellertid mycket stora lagervolymer. Returtemperaturen på värmeöverföringsmediet från lagret till värmekällan hålls alltid vid samma nivå som i utnyttjandetrymmet.

Vid sensibel värmelagring i vatten söker man i viss mån efterlikna de förhållanden som råder i en fast bädd. Således eftersträvas en hög temperaturstratifiering och värmeväxlingen från värmekällan till lagervattnet sker fördelaktigast direkt med vattnet självt som värmeöverföringsmedium. I solvärmertilämpningar kan dock många komplikationer uppstå om direkt värmeöverföring används. Frysning och korrosion i solfångarna måste undertryckas genom tillsats av olika kemikalier, oftast giftiga. I många fall krävs därför att en värmeväxlarbarriär införes mellan solfångare och värmelager.

Vilken typ av sensibelt värmelager som är lämpligast för ett visst ändomål, en fast bädd eller en vattentank, blir ofta en fråga om hur fördelaktigt ett luftburet värmesystem ställer sig till ett vattenburet.

En fast bädds porositet ligger omkring 0,6-0,7, vilket reducerar den effektiva tätheten hos lagringsmediet. Om t ex magnetit används blir dock volymökningen jämfört med vatten i ett korttidslager med viss kapacitet måttlig.

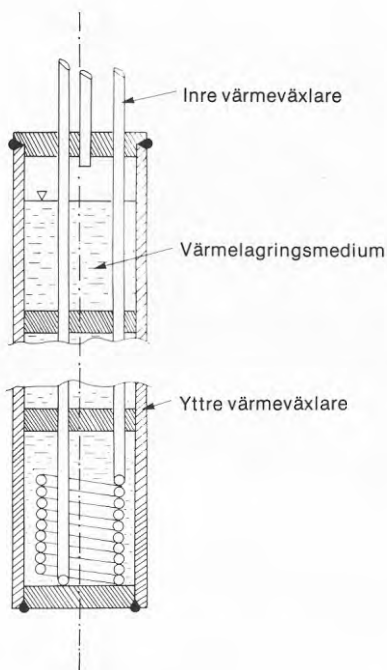
Vid sensibel värmelagring kan värmeförlusterna från själva lagret till omgivningen bli betydande. För korttidslagring utgör detta ett mindre problem. Vid säsongslagring däremot måste lagret överdimensioneras kraftigt för att kompensera för värmeförluster.

5.2.2.2 Värmeväxling vid smältvärmelagring

Om fördelarna med smältvärmelagring skall kunna utnyttjas till fullo ställs höga krav på värmeväxlingstekniken. Utmärkande för smältvärmelagring är att värmeomsättningen skall ske inom ett snävt temperaturintervall.

Värmeväxlingen i ett smältvärmelager kan anordnas på två principiellt olika sätt. Vid s k passiv värmeväxling sker värmeöverföringen via en värmeväxlare i kontakt med lagringsmediet medan den vid s k aktiv värmeväxling vanligen sker via ett värmeöverföringsmedium i direkt kontakt med lagringsmediet, men utan att de två medierna löses i varandra.

Det enklaste och mest beprövade sättet att åstadkomma passiv värmeväxling är att kapsla in lagringsmediet i många små enheter inom ett lager. Kapslarna utgör då själva värmeväxlare (se figur 5.3). Under smältning bestäms transporten av värme huvudsakligen av den möjliga konvektionen i smältan. Under kristallisation försvåras dock värmetransporten i allmänhet av att värmeväxlaren hela tiden täcks av det bildade fasta materialet. För att uppnå effektiv värmeöverföring vid värmeuttag fordras antingen att värmeväxlarytan är stor eller att den kan hållas fri från saltkristaller. Kapselgeometrin bestäms därför av att den omslutande ytan bör vara stor i förhållande till mängden lagringsmedium.

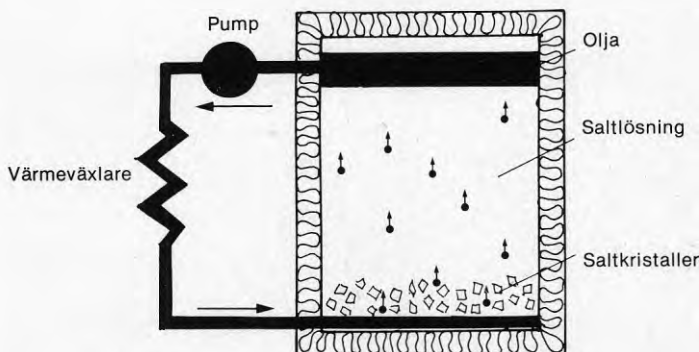


Figur 5.3

Passiv värmeväxlingsteknik vid smältvärmelagring genom inkapsling av saltet i mindre enheter. Vid värmeintag används en intern värmeväxlare med vatten som värmetransportmedium och vid värmeuttag används kapselns utsida för värmeväxling med luft.

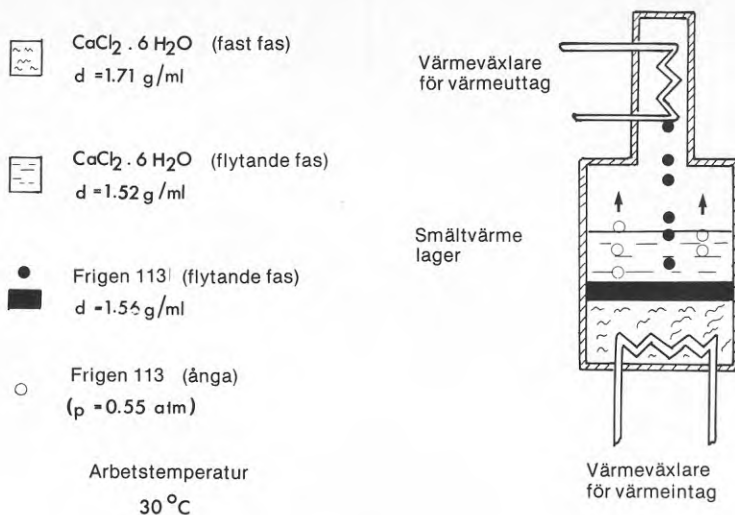
I lager av kalciumkloridhexahydrat ställer också den låga smältpunkten stora krav på värmeväxling vid värmeuttag. För lokaluppvärmningsändamål kan värmeväxlingen med fördel ske direkt till rumsluften. Även vid laddning blir kravet på god värmeväxling högt om fördelen med den låga smältpunkten skall kunna utnyttjas. Vattenburen värme i solfångarkretsen är att föredra. Den latent lagringsmetod som studerats i Solveig-projektet bygger på både luft- och vattenburen värme enligt figur 5.3.

Aktiv värmeväxlarteknik är ett annat sätt att sörja för stor värmeväxlaryta gentemot saltet. Ett i saltet icke lösligt värmeöverföringsmedium tillsätts i direkt kontakt med saltet. En mineralolja med lägre densitet än smältan kan t ex användas. Oljan pumpas i dispergerad form in från botten av saltlagret. Värmetransporten till och från lagret sker från en extern värmeväxlare med mineraloljans hjälp (figur 5.4). Ett annat sätt är att tillsätta ett med saltet icke blandbart tvåfasmedium för värmeöverföring, t ex en freon (figur 5.5). Överföringsmediet skall i vätskefas ha en densitet som överstiger saltsmältans. Värmeväxlingen till och från lagret sker även i detta fall i en extern värmeväxlare men här via överföringsmediets ångfas.



Figur 5.4
Aktiv värmeväxling i ett smältvarmelager enligt principen vätska-vätska. Mineralolja pumpas runt och ger stor värmeöverföringsyta till saltlösningen.

En fördel med dessa aktiva metoder är att behållaren för saltet kan ges ett litet yt/volymsförhållande och en enkel geometri eftersom väggarna inte behöver tjänstgöra som värmeöverförande ytor. En ytterligare fördel med metoderna är den omblandning av saltet som uppkommer under värmeväxlingen, i det första fallet genom att olja pumpas genom saltet, och i det andra fallet genom att värmeöverföringsmediet kokar. Omblandning har, som avsnitt 5.2.1 redovisade, stor betydelse för långtidsstabiliteten hos systemet.



Figur 5.5

Aktiv värmewäxling i ett smältvärme lager enligt principen vätska-vätska-ånga. Ett med saltsmältan icke blandbart tvåfasöverföringsmedium används. Värme tas ut via ångfasen samtidigt som kokning åstadkommes i lagret.

Av de två metoderna för aktiv värmewäxling framstår tvåfasöverföring som i princip fördelaktigare då regleringen av värmewäxlingen kan ske utan mekanisk hjälp och värmeöverföringen i den externa värmewäxlaren genom kondensation blir effektivare. Metoden enl figur 5.5 är under utveckling och kan tänkas bli aktuell under fas 2 av detta projekt.

Valet mellan passiv och aktiv värmewäxlingsteknik blir närmast en ekonomisk fråga. Generellt gäller att ju större lagringskapacitet räknat per erforderlig värmeöverförande yta som krävs, desto fördelaktigare ställer sig den aktiva tekniken framför den passiva.

5.3 Solvärmesystem för husuppvärmning i relation till använd värmelagringsmetod

I ett solvärmesystem spelar värmelagret både rollen som värmesänka och värmekälla. Utmärkande är att värmets omsetts vid låg temperatur.

5.3.1 Kombinationen värmelager - solfångare

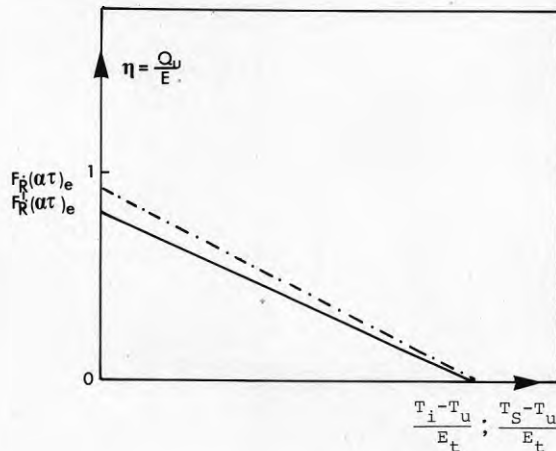
Från systemsynpunkt är det fördelaktigt att betrakta värmelager och solfångare som en enhet. Värmelagret relateras därigenom till solfångarytan vid dimensionering såväl av värmewäxlaren som av lagringskapaciteten.

I första hand bestäms verkningsgraden för ett solvärme-system av själva solfångarens effektiva absorptans-reflek-tans-produkt $(\alpha\tau)_e$, värmeförlusttal k_e och effektivitets-faktor F' . Förhållanden som påverkar dessa parametrar diskuteras i avsnitt 5.1 ovan. Här skall framför allt betydelsen av valet av värmelagringsmetod och värmeväx-lingsteknik diskuteras.

5.3.2 Vatten- eller luftkyld solfångare

Värmeväxlingen vid solfångaren kan karakteriseras genom en värmeutbytesfaktor F_R enligt appendix. Storheten $(1-F_R)$ står därmed grovt sett för den del tillgänglig solvärme som går bort i värmeförluster beroende på att värmeväxlingen mellan solfångare och värmetransport-medium ej är ideal. Faktorn F_R beror av värmetrans-portmediets värmekapacitetsflöde. Solfångare med små värmeförluster, dvs litet k_e -värde har i regel höga F_R -värden.

De tre akutella värmelagringsmetoderna skiljer sig främst i fråga om valet av värmetransportmedium. Vatten används vid värmelagring i salt och vatten medan luft är gynnsamt vid värmelagring i magnetit. Från effektivitetssynpunkt är enligt solfångarekvationen (appendix) vatten att före-dra framför luft främst beroende på vattnets högre värme-kapacitivitet. Att åstadkomma stora massflöden med luft ställer sig också svårare än med vatten.



(- - - -):

Verkningsgraden hos en solfångare som funktion av inloppstempera-turen T_i vid konstant omgivningst-emperatur T_u och solirradians E_t

$$(\eta = F'_R [(\alpha\tau)_e - k_e (T_i - T_u) / E_t])$$

(—):

Verkningsgraden hos ett solvärme-system som funktion av värmelag-rets effektiva temperatur T_s vid konstant omgivningstemperatur T_u och solirradians E_t

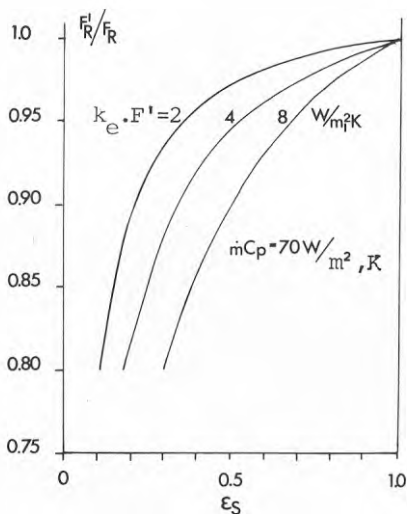
$$(\eta = F_R [(\alpha\tau)_e - k_e (T_s - T_u) / E_t])$$

Figur 5.6

Ett solvärmesystems totalverkningsgrad kan uttryckas genom en ekvation som är analog med den vanliga sol-fångarekvationen (enligt appendix) Grafiskt kan det-ta illustreras som i figuren, där T_u och E_t är kon-stanta.

5.3.3 Värmeväxlingen vid lagret

Värmeväxlingen mellan solfångare och värmelager kan ske med eller utan värmeväxlarbarriär i lagret. Med en sådan barriär kan värmeväxlingen karakteriseras genom parametern F'_R/F_R (se figur 5.7). Storheten $1-F'_R/F_R$ kan ses som den andel tillgänglig solvärme som bortgår i form av värmeförluster i solfångaren beroende på att värmeväxlingen i lagret ej är ideal. Vid ideal och direkt värmeväxling blir $F'_R/F_R = 1$. Parametern F'_R/F_R beror starkt av solfångarens egenskaper, vilket illustreras i figur 5.7. Vid dimensionering av lagrets värmeväxlare förefaller det vara rimligt om F'_R/F_R hamnar på ungefär samma värde som F_R .



Figur 5.7
Kvoten mellan F'_R/F_R som funktion av temperaturverkningsgraden hos värmeväxlaren i värmelagret ϵ_S . Sambandet återges för olika värden på $k_e \cdot F'$. Värmekapacitetsflödet hos värmetransportmediet $mCp = 70 W/m^2 \cdot K$.

I ett saltlager är en värmeväxlarbarriär som regel nödvändig. I ett vattenlager kan en värmeväxlarbarriär behövas t ex för att förhindra blandning mellan solfångarkretsens transportmedium och tappvatten. I fallet magnetit föreligger en naturlig värmeväxlarbarriär med så stor yta att värmeväxlingen blir praktiskt taget ideal.

5.3.4 Värmelagrets effektiva temperatur

Lagrets effektiva temperatur vid värmeväxlingen bestämmer i hög grad ett solvärmesystems verkningsgrad (se figur 5.6). Temperaturen beror på lagrets energiinnehåll

och blir därigenom beroende av lagerstorleken. Ett smältvärmelager med låg omvandlingstemperatur har i detta avseende klara fördelar framför sensibla värmelager (se figur 5.1) Vid sensibel värmelagring utformas lagret oftast så att en temperaturskiktning uppstår. Solfångarna kan därmed hela tiden matas med den lägsta temperaturen i lagret. Det temperaturintervall som kan utnyttjas begränsas dock av solfångarens verkningsgrad. Användes ett lågt flöde genom solfångaren för att öka temperaturförhöjningen minskar även faktorn F_R (jfr ovan).

I vattenkylda solfångare brukar temperaturförhöjningen variera mellan ca 5-15°C. Skillnaden i termiska prestanda mellan ett lågtemperatursmältvärmelager och en vattentank blir därigenom stor. Effekten av temperaturstratifiering i vattentanken synes vid en direkt jämförelse med smältvärmelager spela mindre roll. I en luftkyld solfångare brukar temperaturförhöjningen i medeltal ligga kring ca 30°C.

5.3.5 Vatten- eller luftburet uppvärmningssystem i byggnaden

Valet av transportmedium för värmeväxlingen till själva byggnaden står i en viktig relation till den tillgängliga lagertemperaturen. Tidvis mycket låga lagertemperaturer ger luftburen värme många fördelar framför vattenburen. Luftburen värme medger direkt värmeväxling från lager till rumsluft. För ett saltvärmelager, som största delen av eldningssäsongen arbetar kring en så låg temperatur som 30°C, framstår luftvärmeväxling som klart fördelaktig. För ett vattenlager är det däremot mera osäkert om luft ger de flesta fördelarna. I en vattentank är lagertemperaturen i medeltal högre än i ett saltlager. För ett magnetitlager är luftburen värme det naturliga alternativet.

5.3.6 Dimensionering av uteffekten från ett värmelager

Då solvärmesystem, som i detta projekt, inte dimensioneras för fullständig täckning av värmebehoven borde kraven på uteffekt från värmelagret kunna ställas relativt lågt. Behovet av maximal uteffekt föreligger i stort sett under perioder då tillgänglig solvärme i medeltal överensstämmer med medelvärmebehovet. Under vintern verkar den tillgängliga lagrade energimängden begränsande och under resten av året värmebehovet.

Jämför man behovet av värmeväxlingseffekt i lagret vid laddning respektive värmeuttag finner man som regel att kraven vid laddning är väsentligt högre. Den tid som står till buds är minst tre gånger längre för värmeuttag än för solinfångning. Används samma värmeväxlare vid laddning som vid värmeuttag blir laddningskraven därför som regel dimensionerande.

Drivenergin för värmeväxlingen i form av pump- eller fläktarbete blir speciellt betydelsefull i lågtemperatursystem där ju stora massflöden erfordras. Att avväga värmeöverföringsytor och övriga systemdelar så att drivenergin kan hållas låg är en viktig del av dimensioneringen av ett solvärmesystem.

Resonemanget ovan om dimensionering av uteffekt från värmelagret förutsätter att tillsatsvärme kan erhållas utan effektrestriktioner. I det generella fallet är el som tillsatsvärme från denna synpunkt diskutabel. I de provhus projektet syftar till är el emellertid motiverat med tanke på de mätningar och utvärderingar som planeras.

5.3.7 Principiella frågor vid dimensionering av solvärmesystem

Aktiva solvärmesystem avser ofta produktion av både tappvarmvatten och värme för lokalkomfort. Målet i detta projekt är att konstruera system som ger en täckning av de sammanlagda värmebehoven på minst 50%.

5.3.7.1 Tappvarmvattenberedning

Produktion av tappvarmvatten utgör den del av husets energi försörjning som lättast kan göras lönsam med hjälp av solvärme. Den uppenbara orsaken är att behovet fördelar sig jämt över året. Utgående tappvarmvatten kräver dock värme vid en relativt hög temperatur (55°C) samtidigt som ingående kallvatten håller låg temperatur. Dessa temperaturkrav gör att solvärmesystem oftast utrustas med en separat tappvarmvattenberedare (för ca 1 dygns behov) placerad så att värmeväxling kan ske vid den högsta tillgängliga temperaturen från solfångaren. Den låga temperaturen på ingående tappvatten kan samtidigt ökas genom förvärmning från värmelagret.

5.3.7.2 Husuppvärmning med solvärme

Husets uppvärmningsbehov är den dominerande dimensioneringsfaktorn för solvärmesystemet. Vid dimensionering kan man grovt sett utgå från följande:

- Totala solfångarytan relativt totala värmebehovet och solinstrålningen sätter en övre gräns för försörjningsgraden
- Totala värmelagringskapaciteten relativt fluktuationerna i värmebehov och solinstrålning bestämmer hur nära denna gräns man kan komma.

Balansen mellan tillgång till solstrålning och behov av värme bestämmer således värmelagrets storlek. Vid korttidsvärmelagring kommer maximal lagringskapacitet att krävas under de månader av året då tillgång en på "skördad"

solvärme i medeltal är lika stor som medelvärmebehovet, dvs i regel under månaderna mars och oktober.

5.3.7.3 Förhållandet mellan erforderliga lager- volymer för vatten, magnetit och salt enligt amerikanska TRNSYS-studier

Den värmelagringskapacitet som krävs blir beroende av klimatet och husets konstruktion. Det kan ändå vara på sin plats att i korthet referera några resultat erhållna med dataprogrammet TRNSYS för solvärmesystem planerade i Wisconsin, USA (D.J. Morrison, S.F. Abdel-Khalik: Solar Energy 20 (1978) sid 57).

Det visar sig vid dessa beräkningar att försörjningsgraden påverkas betydligt kraftigare av variationer i solfångaryta och solfångarkvalitet än i lagerstorlek. Lagerstorleken inverkar nämnvärt på försörjningsgraden endast vid mycket små lager. Vid sensibel värmelagring lönar det sig därför, enligt beräkningarna, föga att öka värmelagringskapaciteten per solfångararea över $0,2 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ solfångaryta.

Vid smältvärmelager med glaubersalt (omvandlingspunkt vid 32°C) rör det sig om en mängd salt per solfångararea av $20 \text{ kg}/\text{m}^2$.

För ett hus med 25 m^2 solfångaryta hamnar man i lagerstorlekar omkring

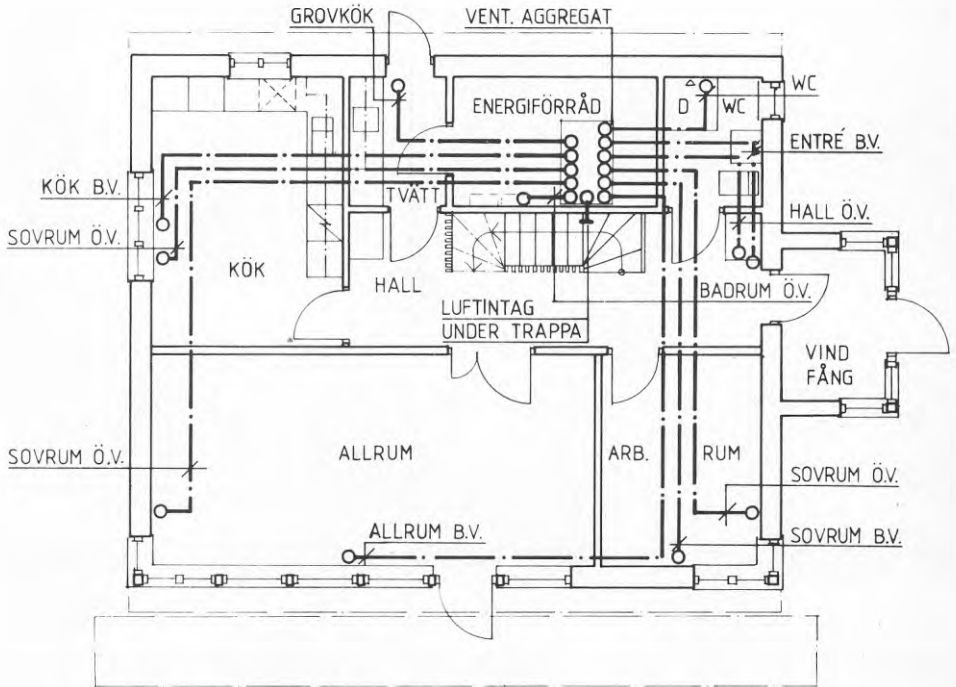
1 200 kg vatten	(1,2 m ³ vatten)
6 250 kg sten	(4 m ³ stensädd med en porositet av 0,6)
500 kg glaubersalt	(0,38 m ³ saltsmälta)

Magnetit i stället för sten bör kunna leda till en halvering av den fasta bäddens volym. Användning av kalciumkloridhexahydrat i stället för glaubersalt torde däremot inte nämnvärt förändra den erforderliga volymen. Att observera är att själva värmeväxlingsanordningarna också kräver volym.

5.4 Projektets tre solvärmesystem

Alla tre husen uppvärms med cirkulerande varmluft. För distribution av varmluften är varje enskilt rum separat kanalanslutet till ett centralt luftbehandlingsaggregat. Runda isolerade tilluftskanaler installeras i mellanbjälklaget. I bottenvåningen tillförs luften i tak vid yttervägg och blåses in mot rummet. Tilluftsdonet består av en ca två centimeter hög spalt lika lång som rummet. I övervåningen tillförs luften under fönster i golv eller i vägg och blåses rakt upp efter yttervägg. Varje rum har termostat som styr ett spjäll i rummets egen tilluftskanal. Tilluftstemperaturen är konstant

till samtliga rum och värmeförseln till ett rum styrs endast genom individuell termostatreglering av flödet. Vid maximalt värmebehov är tilluftstemperaturen ca $+35^{\circ}\text{C}$. Maximala flöden ger lufthastigheter i tilluftsdonens öppningar på ca 0,2-0,4 m/s beroende på rummets värmebehov.



SAMTLIGA KANALER FÖRLAGDA I BJÄLKLÄG
MELLAN BOTTENVÅNING OCH ÖVERVÅNING

Figur 5.8
Bottenplan

Om så önskas kan tilluftstemperaturen styras efter utetemperaturen, vilket medger en bättre genomluftning av rummen.

Frånluften tas centralt från endast ett ställe i huset, företrädesvis i någon zon där man normalt ej vistas, t ex under trappan i hallen.

SBN 75 (kap 36:4) ger krav på minimum luftväxling med uteluft. För projektets hus blir flödet ca $200 \text{ m}^3/\text{h}$. Systemet ger dock möjlighet att variera uteluftsflödet från 0 % till 100 %. Speciellt under varma sommarperioder torde möjligheten till 100 % uteluftsflöde bli värdefullt, då man nattetid kan få in svalare luft. Under uppvärmningssäsongen körs anläggningen normalt med dimensionerande minimum uteluftsflöde.

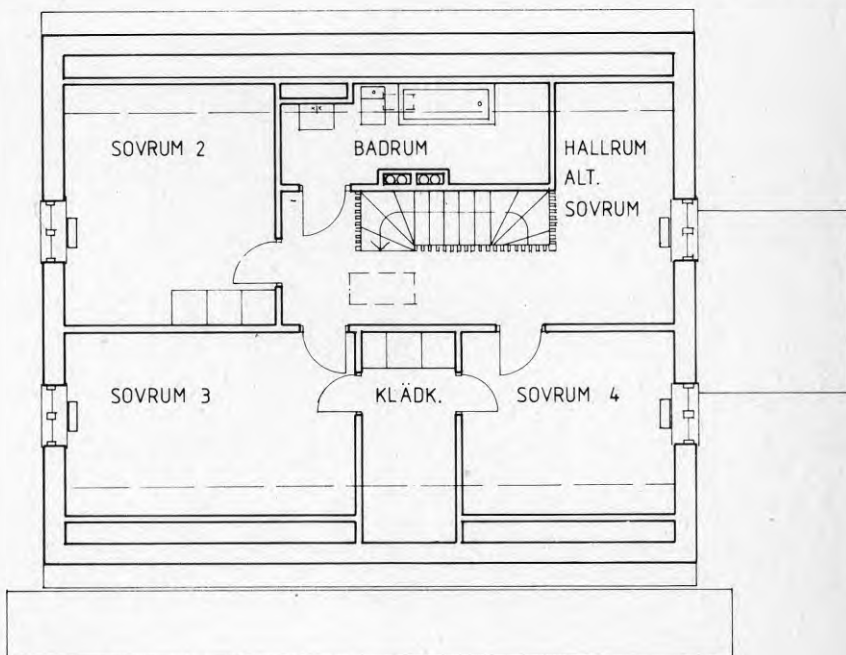
Den till huset inkommande uteluften passerar under uppvärmningssäsongen en värmeväxlare där frånluften överför sin energi till den inkommande luften. En förbi-gång förbi värmeväxlaren för frånluften gör det möjligt att slopa värmeöverföring när den inte är önskvärd.

Också stödvärmesystemet är identiskt i alla tre husen. Det består av ett direktelbatteri, placerat närmast efter fläkten i ventilationsaggregatet. Batteriet klarar hela husets effektbehov när så behövs. El kopplas in endast om lagringsenheten ej kan leverera tillräcklig effekt till systemet. Avsikten är att elbatteriet skall lyfta upp temperaturen till korrekt nivå, efter det att lagret tillfört luften sin maximalt tillgängliga effekt.

Effekten från direktelbatteriet styrs från den central som även reglerar övriga funktioner i uppvärmningssystem och solvärmsystem.

I samtliga hus består tappvarmvattenberedaren av en dubbelmantlad förrådsberedare, där vatten från solvärmsystemet cirkuleras i det yttre omslutande utrymmet. Själva tappvarmvattnet passerar den inre tanken.

Systemet strävar efter att hålla en tappvarmvattentemperatur av $+55^{\circ}\text{C}$. När solvärmsystemet inte kan klara detta, tillförs energi till tappvarmvattnet från en elpatron. Elpatronen svarar för hela effektbehovet för tappvarmvatten när solsystemet inte kan lämna något bidrag.



Figur 5.9
Övervåning

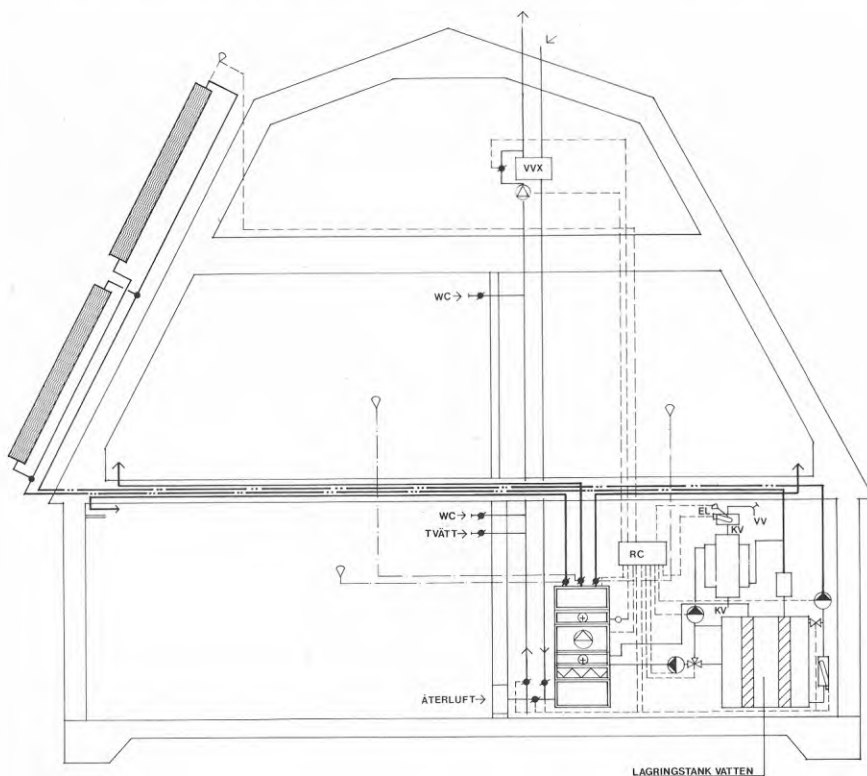
5.4.1 System AQUA

Systemet bygger på sensibel lagring i vatten av solvärme från vattenkylda solfångare.

Varmvattenackumulatoren består av en isolerad (100 mm mineralull) stående cylindrisk plasttank med 2 m³ rymd. Genom användning av plast (glasfiberarmerad polyester) undviks korrosionsproblem. Metall finns endast i anslutningarna (mässing) samt i solfångare, värmebatteri och framledningarna till dessa komponenter (koppar).

Solfångarsystemet töms då frostrisk föreligger. Dräneringen sker enligt solfångarfabrikantens rekommendationer. Genom tömningen av solfångarsystemet kommer vattnet i lagringstanken ofta att syresättas. Speciella anordningar för att förhindra syresättning planeras dock inte.

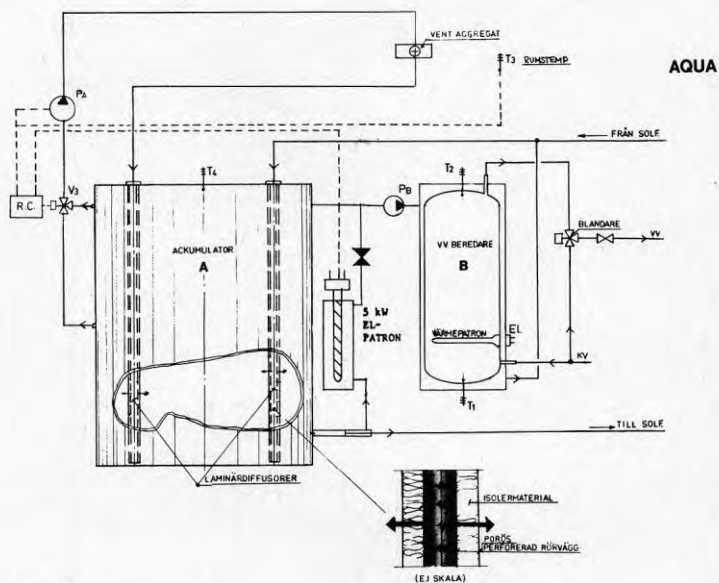
Akkumulatorvattnet cirkuleras genom solfångarna när dessas temperatur överstiger den vid ackumulatorns botten. Returvattnet matas in i tanken via en speciell fördelare som sørjer för att vattnet når sin rätta temperaturnivå utan omblandning.



Figur 5.10a
Systemutformning i AQUA-huset

Varmvattenberedning sker genom att ackumulatorns varma toppvatten cirkuleras genom beredarens yttermantel så snart temperaturen i varmvattenberedarens botten understiger den hos ackumulatorns toppvatten. Elberedarens värmepatron höjer därefter vid behov varmvattentemperaturen till 55°C.

För byggnadsuppvärmning matas varmvatten från ackumulatorns mittuttag till vätske-luftbatteriet. Uttagen effekt regleras med en tyristorstyrd cirkulationspump, P_A . Om effekten inte räcker till trots fullt varvtal på pumpen, blandas varmt toppvatten in via ventilen V_3 . Detta betyder att det tillgängliga värmet i undre delen av tanken inte räcker för uppvärmning. När V_3 har öppnats något slås därför tillsatsvärmen till. Tillsatsvärme och elackumulering sker med en elpatron placerad i en förbiledning mellan botten och toppen på ackumulatorntanken. Härvid utnyttjas själv-cirkulationseffekten. Systemet strävar således efter att alltid hålla övre halvan av ackumulatorntanken fylld med för uppvärmningsändamål tillräckligt varmt vatten.



Figur 5.10b
Lagringssystemet i AQUA-huset, detaljer

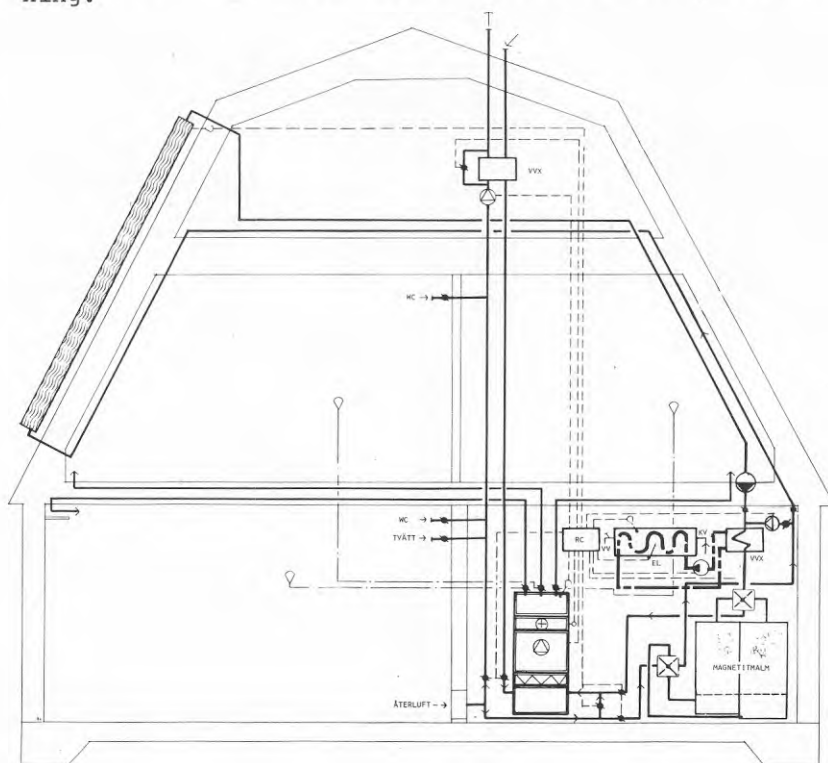
Genom den just beskrivna reglerstrategin utgör den övre delen av lagringstanken en ackumulator för tillsatsvärme under uppvärmningssäsongen. Med tyristorstyrning av värmepatronen i ackumulatornkretsen kan topp effekter i elbelastningen undvikas. Värmepatronen regleras så att

husets totala effektbelastning exklusive tillsatsvärmebatteriet i fläktsystemet aldrig överskrider ett visst värde - t ex 5 kW. När spis, ugn etc används minskas alltså effekten hos tillsatsvärmaren. Under perioder när 5 kW effekt inte räcker till att värma upp huset kommer alltmer av ackumulatorns varma toppvatten att tas i anspråk, dvs ackumulatorns övre del töms på lagrat värme. I sista hand går tillsatsvärmebatteriet in utan effektbegränsning.

5.4.2 System FERRUM

Systemet bygger på sensibel lagring i magnetit av solvärme från luftkylda solfångare.

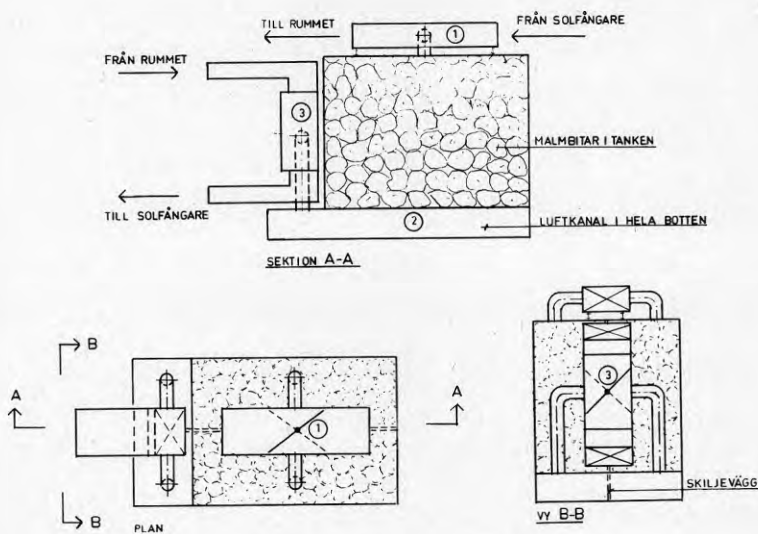
Lagringsmaterialet är krossad magnetit (järnmalm) med stenstorlek 3-5 cm. Behållaren är en platsbyggd trälåda med ca 3 m³ rymd. Utvändigt isolering utgörs av 100 mm mineralull. I botten finns ett 10 cm högt luftfördelningsutrymme som avskiljs från stensbädden med ett kraftigt stål nät, vilande på distansklotsar. För att undvika luftkanaler längs väggarna kläs dessa före fyllning med 50 mm mineralull. Lagret är vertikalt delat i två lika stora delar med en lufttät mellanvägg. Varje del har en toppanslutning och en bottenanslutning.



Figur 5.11
Systemutformning i FERRUM-huset

Genom lagrets tudelning blir det möjligt att ladda lagret med solvärme samtidigt som uppvärmningsbehov föreligger och inladdning sker utan att svårigheter uppstår med balansering av luftflödena i de två kretsarna. Genom speciella vippventiler kan solfångarflödet styras till toppanslutningen på endera halvan av lagret. Solfångarkretsen ansluts alternativt till den halva som har den lägsta botten temperaturen. Samtidigt styrs returluften från huset till botten av den motsatta lagerhalvan. Effektuttaget styrs genom en shunt i returluften så att en större eller mindre del av returluften passerar lagret.

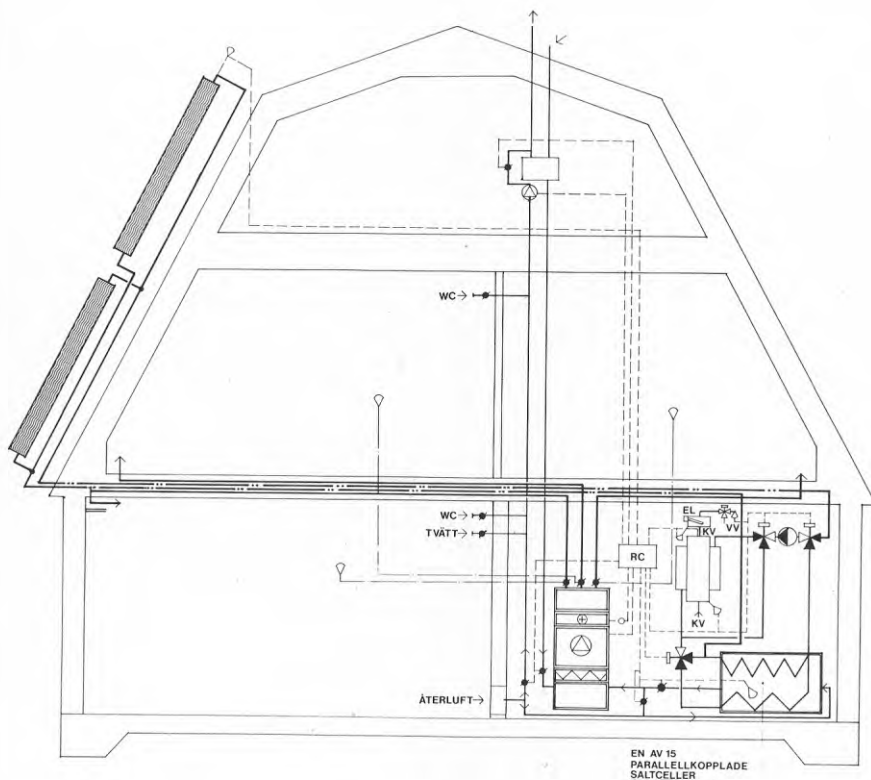
Den varma luften från solfångarkretsen passerar ett luft-vattenbatteri för varmvattenberedning. En shuntledning förbi solfångaren används för varmvattenberedning när solfångarna inte är i drift. En fläkt i shuntledningen driver därvid luft från övre delen av en lagerhalva förbi luft-vattenbatteriet och tillbaka till botten av samma lagerhalva.



Figur 5.12
Lagringssystemet i FERRUM-huset, detaljer

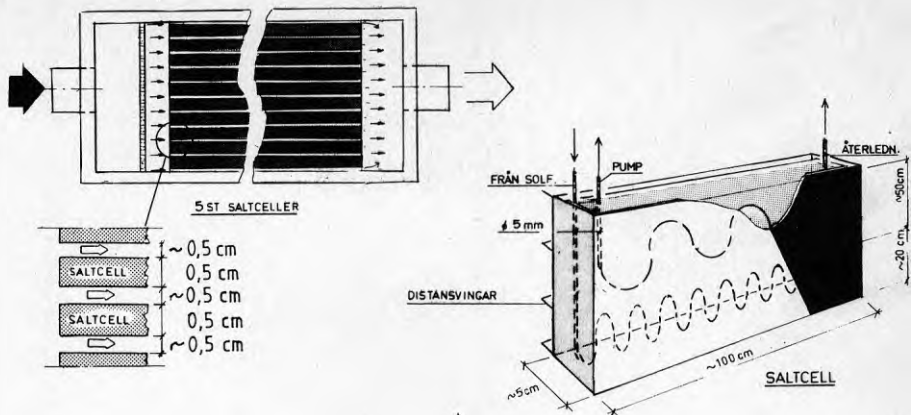
5.4.3 System SAL

Systemet bygger på latent/sensibel värmelagring i kalciumkloridhexahydrat av solvärme från vattenkylda solfångare.



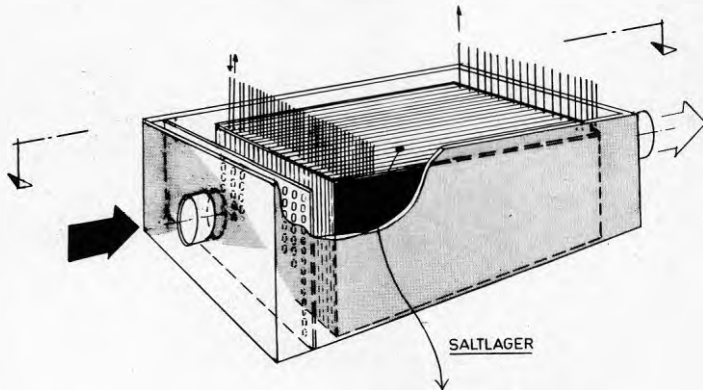
Figur 5.13
Systemutformning i SAL-huset

Lagringsenheten består av 15 saltfyllda rektangulära behållare ställda parallellt i en rektangulär låda. Varje behållare är dimensionerad för en solfångaryta motsvarande ca 2 m². De dimensioner som anges i figuren skall ses som mått på storleksordningen.



Figur 5.14
Lagringssystemet i SAL-huset, detaljer

Behållarna tillverkas av glasfiberarmerad polyester. Ena långsidan av varje behållare är på utsidan försedd med ett antal längsgående ribbor. Dessa bildar begränsningar i en luftspalt på ca 5 mm mellan behållarna.

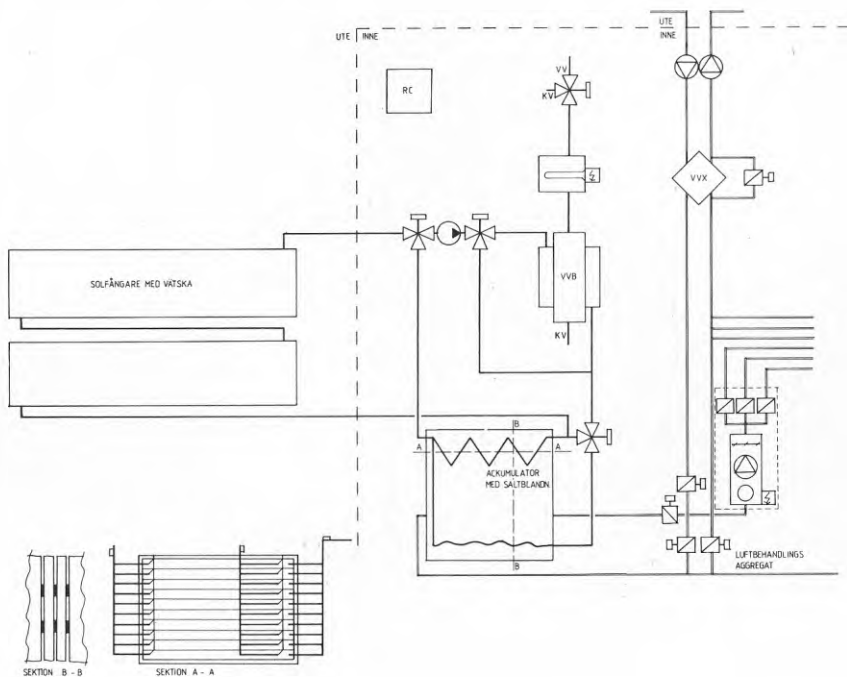


Figur 5.15
Lagringssystemet i SAL-huset, detaljer

Varje behållare innehåller två värmeväxlarslingor med lika stora mantelytor avsedda för vattenburen värme.

Materialet i slingorna är tvärbunden polyeten (PEX). Den nedre rørslingan placeras nära botten av behållaren. Genom detta arrangemang ökar den konvektiva omblandningen i saltsmältan vid laddning, vilket har stor betydelse för långtidsstabiliteten hos lagringsmediet, se 5.2.1.1.

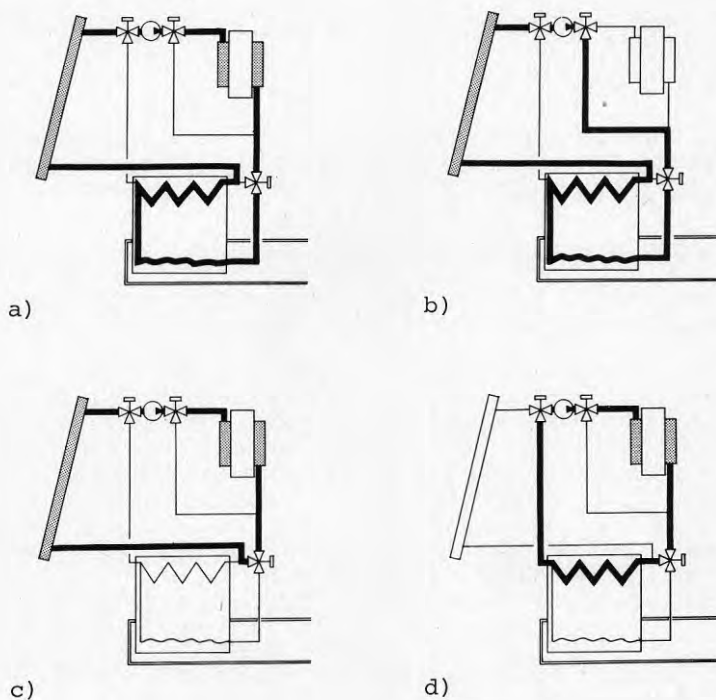
Då vattentemperaturen i solfångarkretsen överstiger saltvärmelagrets tillförs saltbehållarna värme via ett rörsystem som knyter samman solfångare, tappvarmvattenberedare och de dubbla rørslingorna i saltbehållarna. Vattnet passerar först de undre rørslingorna. Vattenflödet styrs genom ON/OFF-reglering. Då temperaturen i lagret överstiger 70°C stängs vattenflödet automatiskt av.



Figur 5.16
SAL-systemet, principschema

Systemet prioriterar uppvärmning av tappvarmvatten. Värme till varmvattenberedaren kan tas antingen direkt från solfångaren eller direkt från saltvärmelagret. Vid uppvärmning av tappvarmvatten från lagret används enbart den övre rørslingan i behållarna, varvid den konvektiva omblandningen i saltsmältan ökar. Då endast en begränsad temperaturhöjning är möjlig med hjälp av saltet, sker den resterande temperaturhöjningen till $+55^{\circ}\text{C}$ med hjälp av den elpatron som finns i tappvarmvattenberedaren.

Vid uppvärmningsbehov i huset får frånluften från huset passera lagret i luftspalterna mellan saltbehållarna. Luftflödet regleras så att maximalt erforderlig temperatur erhålls. Trots att saltet är ett extremt lågtemperaturmedium kan dess temperatur väsentligt överstiga smältpunkten. När varmelagret inte kan klara effektbehovet för husets uppvärmning - då lagret antingen är helt urladdat eller erforderlig uteffekt alltför stor - tillförs extra energi av elbatteriet i ventilationsaggregatet.



Figur 5.17
SAL-systemet, fyra driftfall.

- a) solinfångning med samtidig varmvattenberedning och laddning av lagret.
- b) solinfångning med enbart laddning av lagret.
- c) solinfångning med enbart varmvattenberedning.
- d) varmvattenberedning med hjälp av lagrad solvärme.

Ingen ackumulering av tillsatsvärme i saltlagret planeras. Orsaken är att lagrets arbetstemperatur bör hållas kring saltets smältpunkt, vilket ger stora fördelar vid laddning med solvärme men leder till låga möjliga urladdningseffekter jämfört med t ex direktelvärm.



6. SIMULERING

6.1 Inledning

Ett omfattande arbete har nedlagts på simulering av de olika solvärmesystemens termiska funktion. Syftet med detta arbete var på kort sikt att stödja projekteringen av solvärmesystemen och på längre sikt att skaffa erfarenheter och kunskaper så att simulering kan bli ett ingenjörsmässigt hjälpmedel i framtida projekt.

Större delen av simuleringarna har genomförts med det amerikanska datorprogrammet TRNSYS som beskrivs närmare i avsnitt 6.2.

Under projektets gång har två olika TRNSYS-versioner utnyttjats, nämligen 9.2 och 10.1. Version 10.1, som använts under större delen av projektet innehåller en rad förbättringar jämfört med 9.2 men tyvärr också två programmeringsfel i tidigare korrekta rutiner. Manualen nämner överhuvudtaget inte att dessa rutiner överarbetats. Felen beskrivs i bilaga 2.

Under en tid förbisågs dessa fel. Effekten av dem är inte alltid så stor men både arbete och tid har förlorats av denna orsak.

TRNSYS innehåller modeller av de flesta komponenter som förekommer i solvärmesystem och med undantag av subrutinen för saltlagret har endast redan tidigare utvecklade TRNSYS-komponenter använts i systemmodellerna. Subrutiner för saltlager redovisas i bilaga 3.

SMHIs uppmätta timvärden på solinstrålningen i Stockholm under 1971 har efter vissa korrigeringar använts som indata vid simuleringarna. SMHIs data för 1971 betraktas som relativt representativa och har därför rekommenderats för beräkningar av solvärmesystem. Den med okorrigerade data beräknade värmeleveransen från solfångarna under vinterhalvåret blev dock osannolikt stor. Detaljstudier av väderdata visade många uppenbart för höga värden på direkt solinstrålning.

Problemet har lösts provisoriskt inom projektet genom sammanställning av en ny serie solinstrålningsvärden. I denna serie är alla osannolikt stora timvärden ur 1971 års mätserie ersatta med uppskattade värden. Solinstrålningsdata diskuteras vidare i avsnitt 6.3.

En detaljerad datormodell av byggnaden med fönsterinstrålning och intern värmeproduktion tillsammans med hela solvärmesystemet är stor och ganska otymplig. En sådan modell fordrar dessutom långa körtider och blir därför dyrbar att arbeta med. Därför valdes att göra en självständig modell av byggnaden utan solvärmesystem. Med denna har effekten av främst byggnadsutformning och passiva solvärmestillskott studerats. Därefter har energibehovet beräknats timme för timme för en viss inomhustemperatur och en vald byggnadsutformning. Dessa energibehov har sedan använts som indata i fler-

talet körningar med solvärmesystem. Metoden förenklar arbetet och begränsar datorkostnaderna. Energibehovet är emellertid sällan helt oberoende av uppvärmningsformen och genom att beräkna energibehovet i förväg avhänder man sig t ex möjligheten att låta rumstemperaturen sjunka till ett något lägre värde innan köpt energi utnyttjas. De fel i beräkningen av totala energinivåer som eventuellt införs genom uppdelningen i två steg torde vara försumbara. I fråga om temperaturförloppen, som är speciellt viktiga soliga dagar, bortfaller möjligheten att konstatera eventuella skillnader mellan olika system. TRNSYS saknar emellertid en husmodell med vilken detaljerade studier av inomhustemperaturen är möjlig, varför inte heller denna aspekt talar för att simulera husets uppvärmningsbehov parallellt med varje simulering av ett solvärmesystem. I avsnitt 6.4.1 och 6.4.2 beskrivs husmodellen och några resultat av simuleringar av hus utan solvärmesystem. Det beräknade årliga uppvärmningsbehovet (dvs exkl varmvatten) för Solveig-husen är så lågt som 8 MWh.

Eftersom ingångsdata för solstrålning i detta projekt skiljer sig från vad som använts vid andra studier av solvärmesystem i svenskt klimat, har detaljerade beräkningar för de tre systemen kompletterats med ett mindre komplicerat system som får tjäna som referens. Denna modell beskrivs i avsnitt 6.5.1.

I avsnitt 6.5.2 redovisas därefter några resultat från simuleringsberäkningarna med den förenklade modellen. Beräkningarna av funktionen hos Aqua-, Ferrum- och Salsystemen har - beroende på de svårigheter med väderdata och programmeringsfel i TRNSYS-koden som nyss antytts - inte kunnat stödja projekteringsarbetet på det sätt, som projektet hade som delmål. En rad resultat har varit användbara, men endast få beräkningar är som helhet tillfredsställande. Framför allt är inbördes jämförelser mellan systemen med utgångspunkt från simuleringsresultat närmast ogörliga. Av detta skäl begränsas redovisningen till resultat från simuleringen med den förenklade modellen.

Det praktiska arbetet med TRNSYS diskuteras i avsnitt 6.2.1.

6.2. TRNSYS-programmet

Datorprogrammet TRNSYS från Solar Energy Laboratory, Univ of Wisconsin, består av ett huvudprogram, som administrerar beräkningarna, ett tjugotal subrutiner, som innehåller modeller av de vanligaste komponenterna i solvärmesystem inklusive byggnadsdelar samt subrutiner för in- och utmatning. En TRNSYS-modell av ett solvärmesystem konstrueras genom att egenskaperna för de ingående komponenterna specificeras. Sammanknytningen av komponenterna till ett system sker genom precisering av källorna för de olika komponenternas insignaler. Inloppstemperaturen för värmelagret t ex sätts lika med utloppstemperaturen från solfångaren. Hänsyn till värmeförlusterna från röret mellan solfångare och lager

kan tas genom att införa en modell av ett rör mellan de båda komponenterna. Då blir inloppstemperaturen för lagret lika med utloppstemperaturen från röret vars inloppstemperatur i sin tur är lika med utloppstemperaturen från solfångaren. Andra storheter som överförs mellan 'komponenterna' är flöden och kontrollsignaler av olika slag. Med TRNSYS kan man på detta sätt konstruera en ganska noggrann avbildning av ett system i dess helhet.

Det finns alltså inte en given TRNSYS-modell för ett visst solvärmesystem utan det är möjligt att konstruera allt från ganska enkla till mycket detaljerade modeller. Detaljeringsgraden bör väljas med hänsyn till de frågeställningar man vill ha besvarade men även till vilka resurser i tid och datorkapacitet som står till förfogande.

För en beräkning med TRNSYS fordras generellt väderdata (solinstrålning, utetemperatur och ev vindhastighet timme för timme) samt uppgifter om varmvattenförbrukning.

Under simuleringen beräknas ett jämviktstillstånd för systemet för varje tidssteg (normalt mellan 15 min och en timme). En beräkning med TRNSYS är normalt deterministisk. Inga slumpantal av något slag utnyttjas, varför en viss uppsättning av indata tillsammans med en viss modell alltid ger ett bestämt resultat.

6.2.1 Att arbeta med TRNSYS

TRNSYS har en fortrankod på 7300 rader, som kunde vara både bättre strukturerad och mer kommenterad.

En simuleringsberäkning för ett visst system över ett år kostar i datortid 200-1000 kr - beroende på systemets komplexitet och tidstegets längd.

Indata för en modellbeskrivning omfattar ett par hundra korta rader och uppåt. Detta projekts systembeskrivningar har omfattat drygt fyra hundra rader per modell. Det största bekymret i arbetet med TRNSYS är dock resultatutskrifternas omfång och dåliga strukturering. Det räcker inte att få resultat i form av månadsvärden på t ex instrålad energi, insamlad energi och andelar solvärme till varmvatten resp uppvärmning. Det fordras dessutom så många delresultat att kvaliteten på simuleringen som helhet kan bedömas. Det har varit mer regel än undantag att effekten av en förändring i systemutformningen inte blir den förväntade. Då uppstår frågor av typen: Slarvfel i systembeskrivningen? Fungerar regleringen som det var tänkt? Är TRNSYSs komponentmodeller relevanta för problemställningen? Var det resultatet för den förra systemvarianten som var "felaktig"? Är det rent av fel på användarnas intuitiva uppfattning?

Det behövs ofta omfattande utskrifter för att finna svaren, men å andra sidan är det lätt att drunkna i rad-skrivarutskrifter. Den rätta metoden är naturligtvis att börja med enkla systemlösningar och sedan successivt införa de finesser man vill pröva. För varje ny variant bör man göra körningar med utskrifter av timvärden för korta utvalda perioder - t ex en mars- och en julivecka. Först när en variant står sig inför detaljgranskning av resultaten bör man köra längre perioder med begränsade utskrifter. En del av problemen beror på att tids- och medelbrist frestat till genvägar.

En metod som visat sig bra är att rutinmässigt lagra timvärden av något tiotal kritiska storheter på skiva som utnyttjas vid kontrollen. Nästa steg är att konstruera några program som presenterar dessa storheter på ett lättillgängligt sätt.

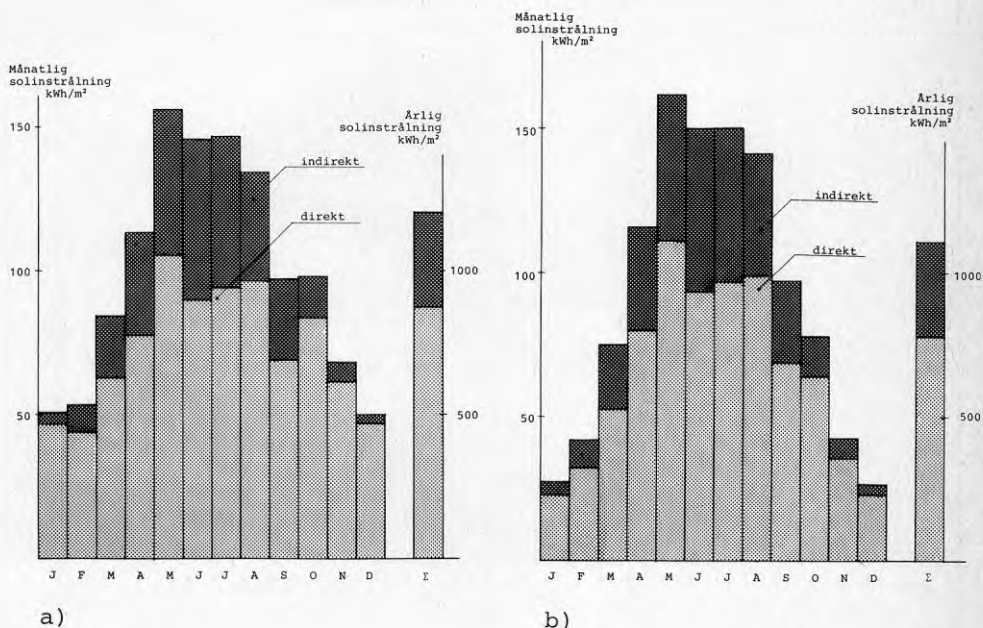
Sammanfattningsvis kan sägas att sanningen "rubbish in gives rubbish out" gäller även för TRNSYS och att TRNSYS har få spärrar mot "rubbish in".

6.3 Solinstrålningsdata

Den mängd värme som ett solvärmesystem kan leverera beror först och främst på solinstrålningens storlek. Tillförlitligheten hos varje energiberäkning av ett solvärmesystem är därför helt beroende av kvaliteten hos de värden på solinstrålning man använder. Den tillgängliga statistiken över solinstrålning i Sverige innehåller för vintermånaderna så stora fel att beräkningar ger ungefär två gånger för höga värden på insamlad solenergi under dessa månader. Detta saknar praktisk betydelse för dimensionering av solvärmesystem med säsongslager, medan det påverkar dimensioneringen av solvärmesystem med korttidslager. Överskattningen blir i detta fall större ju högre total andel av värmeförbrukningen som täcks med solvärme. Samtidigt överskattas den marginella nyttan av ökad solfångaryta. Bortsett från andra problem med solinfångning vintertid står solen då så lågt att solfångare i praktiken ofta ligger i skugga. Kvaliteten på solinstrålningsdata har därför kanske inte så stor betydelse, men för att uppskatta vad som är möjligt med goda solfångare under gynnsamma yttre omständigheter fordras realistiska data.

Inom detta projekt har problemet lösts provisoriskt genom korrigerande av SMHIs väderband. Samtliga orimligt höga och i något fall låga värden under oktober-mars har ersatts med nya uppskattade med hjälp av de data för molnighet och solskenstid, som också finns registrerade på väderbandet. Ungefär vartannat värde har ersatts för december och januari. Den använda tidsserien för denna period kan alltså inte längre kallas mätvärden.

Korrigeringsproceduren, som beskrivs kortfattat i bilaga 1 har genomförts på grundval av rekommendationer och synpunkter från Lars Dahlgren, SMHI. Resultatet av korrigeringarna framgår av figur 6.1 och 6.2.



a)

b)

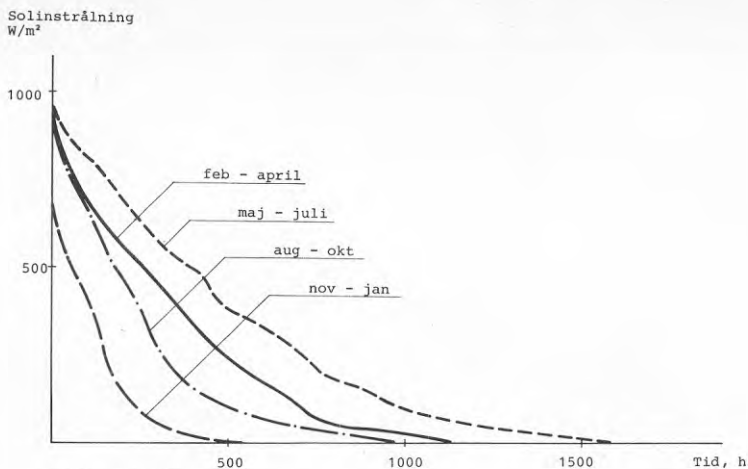
Figur 6.1
Månadssummor av den globala solinstrålningen mot en södervänd yta med 60° elevering och utan horisontavskärmning. I diagrammet är globalstrålningen uppdelad i en övre indirekt del och en nedre direkt del.

a) ursprungliga soldata från SMHI gällande Stockholm 1971.

b) korrigerade soldata.

Månadssummor av den globala solinstrålningen mot en södervänd yta med 60° lutning och utan horisontavskärmning. I diagrammet är globalstrålningen uppdelad i en övre indirekt del och en nedre direkt del.

1:2 avser korrigerade soldata och 1:3 avser ursprungliga soldata från SMHI gällande Stockholm 1971.



Figur 6.2

Varaktighetsdiagram över globalinstrålningen mot en södervänd yta med eleveringen 60° . Värdena är beräknade ur de korrigerade timvärden för solinstrålningen (Stockholm 1971) som används för beräkningarna inom projektet.

6.4.1 Simuleringsmodell för byggnaden

Byggnadens värmebalans har studerats med ett antal simuleringsberäkningar med TRNSYS. En årsserie av värmebehovet timme för timme har samtidigt iordningställt att användas som indata till beräkningarna av själva solvärmesystemen.

Byggnadens konstruktion är beskriven i avsnitt 4.2 ovan. Följande indata har utnyttjats:

Nettoareor:

Nedre plan	86 m ²
Övre plan	72 m ²
Tot area	158 m ² exkl vindfång 5 m ²

Omslutningsareor mot det fria:

	Area m ²	Söder m ²	Norr m ²	Öster m ²	Väster m ²	k-värde W/m ² °C
Väggar *	135	42	51	36,5	35,5	0,15
Tak	60	-	-	-	-	0,11
Golv	86	-	-	-	-	0,13
Fönster **	17	9,5	1,5	2,5	3,5	1,8 ***
Dörrar ****	4,0	1,0	1,0	2,0	-	1,0

* Till vägg räknas area upp till ök takbjälklag

** Fönster på vindsvåning och vindfång ej inräknade

*** Avser mörker-k-värde

**** Glasandel i dörr ingår i fönsterarea

Ventilation

Totalt ventilerad volym	380 m ³
Styrd luftomsättning	0,5 oms/h
Ofrivillig luftomsättning	0,1 oms/h
Återluft	1,6 oms/h

Skärmtaketets utformning och placering framgår i princip av fig 4.6.

För persiennernas avskärningsfaktor F gäller

$$F = \begin{matrix} 1 & \text{okt-mars} \\ 0,75 & \text{april-sept} \end{matrix}$$

Modellen av själva byggnadsskalet har konstruerats med hjälp av följande TRNSYS-komponenter: väggar (type 17), sadeltak med vind (type 18), rum och platta på mark (type 19), solavskärmning (type 34) samt fönster (type 35). Modellerna för väggar, tak och rum följer beräkningsmetoder som anges i ASHRAE Handbook of Fundamentals.

Dessa metoder innebär i flera avseenden kraftiga förändringar i jämförelse med de grundläggande fysikaliska sambanden. Speciellt gäller detta icke-stationär värmeledning. De valda metoderna ger tillräcklig noggrannhet för energiberäkningar över längre tidsperioder men kan ge relativt stora fel för de snabba temperaturförlopp som t ex uppträder i ett södervänt rum en solig dag.

Beträffande väggmodellen har svårigheter att få fram relevanta värden på de s k "transfer coefficients" lett till bortseende från värmekapaciteten i väggarna. Eftersom väggarna är lätta blir felkällan liten. Rumsmodellen innehåller en inomhustemperatur som representerar lufttemperaturen, yttemperaturerna i rummets begränsningsytor och temperaturen hos "rummets värmekapacitet".

Enligt TRNSYS-modellen är all den massa i byggnaden som är uppvärmd till inomhustemperatur hänförlig till "rummets värmekapacitet". Detta innebär i allmänhet en kraftig överskattning av den termiska massans temperaturutjämnande effekt under dygn och kortare perioder. För en dämpning av denna effekt har i rumsmodellen (något godtyckligt) hjärtväggens tjocklek reducerats till 80 mm. I modellen tas hänsyn till gipsskivor, möbler m m genom att 8 MJ/K adderas till rummets värmekapacitet.

Modellen, som den beskrivits ovan, är en "en-nods-modell", dvs den representerar en termisk massa omgiven av värmeisolering.

För att beräkningsmässigt ta hänsyn till att värme som tillförs rummet inte omedelbart medför höjd rumstemperatur delas bidrag från t ex sol, personer och apparater upp i ett antal tillskott som successivt tillförs under en följd av tidssteg.

Noggranna lösningar av värmeledningsekvationen är möjliga men fordrar så omfattande numeriska beräkningar att det är ekonomiskt omöjligt att använda sådana metoder i TRNSYS. Den valda metoden är alltså en kompromiss mellan möjlig beräkningsnoggrannhet och erforderlig beräkningskapacitet där det varit nödvändigt att ta stor hänsyn till datorkostnaderna.

Beträffande solinfall genom fönstren beräknas effekten av skärmtaket (se figur 4.6) med god noggrannhet medan hänsyn till inverkan av persienner och gardiner tas genom multiplikation med en konstant avskärmningsfaktor. Hänsyn till horisonten tas genom att den direkta solinstrålningen och markreflexionen av denna sätts till noll då solhöjden är mindre än en viss vinkel- för flertalet beräkningar 15° . Ingen hänsyn tas till solljusets riktningsfördelning i rummet.

Övrig gratisvärme beräknas schablonmässigt som en konstant faktor gånger varmvattenförbrukningen.

Energibehovet för varmvattenberedning har med utgångspunkt från BFR-rapport R10:1974 antagits till:

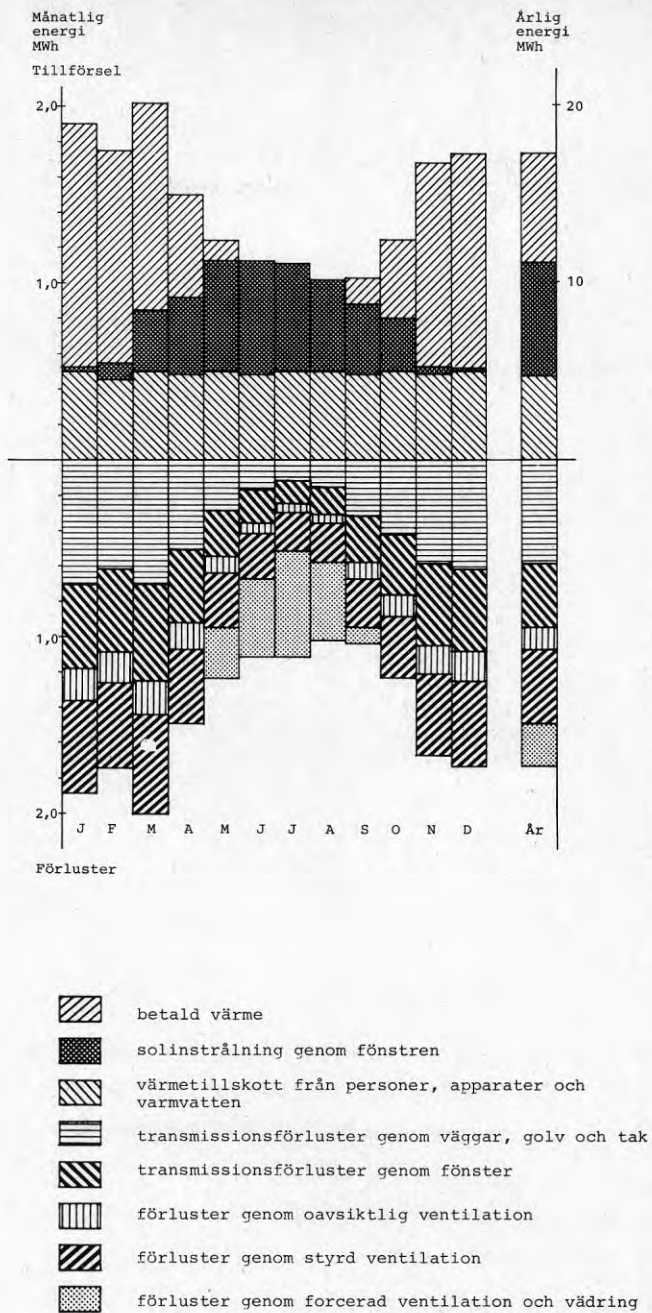
Mån	Jan	Febr	Mars	April	Maj	Juni
kWh/mån	330	300	360	400	330	300
Mån	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dec
kWh/mån	170	300	360	370	420	380

Ventilationssystemet har ett antal olika driftsfall. Normalt sker värmeväxling mellan till- och frånluft med en konstant temperaturverkningsgrad av 50 %. Då rumstemperaturen överstiger 23°C kopplas värmeväxlingen ur. Om uteluftens temperatur är lägre än rumstemperaturen forceras ventilationen för undvikande av övertemperaturer.

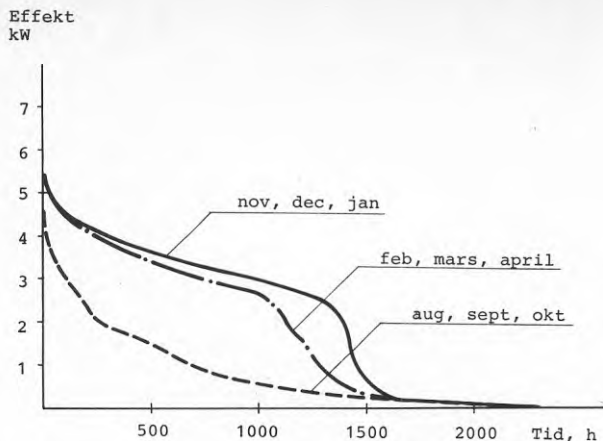
Uppvärmning sker under dagtid till 21°C och nattetid 2200-0600 till 18°C .

6.4.2 Simuleringsresultat för byggnaden

Byggnadens värmebalans framgår av fig 6.3. Som diagrammet visar är värmeförlusterna från Solveig-huset små och de kompenseras till stor del av 'gratisvärmerna' från apparater, personer och varmvatten. Det är i praktiken sannolikt svårt att utnyttja så mycket av solinstrålningen mot fönstren som erhålles beräkningsmässigt. Värmebehoven kan också redovisas i form av varaktighetsdiagram.



Figur 6.3
Beräknad värmebalans för Solveighuset



Figur 6.4
Varaktighetsdiagram för eleffekten för uppvärmning för Solveighuset. Knäet på kurvan för vintermånaderna beror på att ingen effekt erfordras under en del av natten p.g.a. husets värmekapacitet i kombination med nattsänkningen av inomhustemperaturen.

Det kan vara intressant att genom TRNSYS-beräkningen jämföra värmeförlusterna för ett solveig-hus med den från ett lika stort hus i samma läge med k-värden och tillåten fönsterarea enligt SBN 75. Fönsterfördelningen i respektive hus har antagits vara:

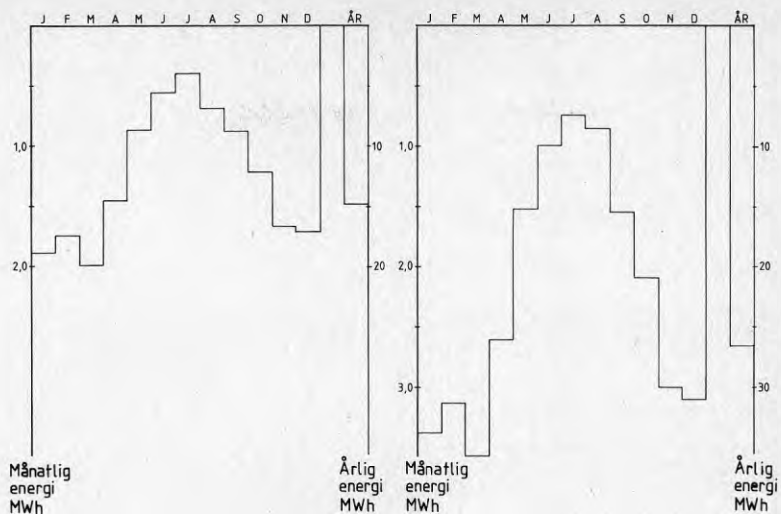
Fönsterareor, m²

Väderstreck	Solveig	SBN 75
Söder	9,5	7,0
Väster	3,5	6,6
Norr	1,5	2,5
Öster	2,5	5,0

Isoleringsgrad, k-värden, W/(m²·k)

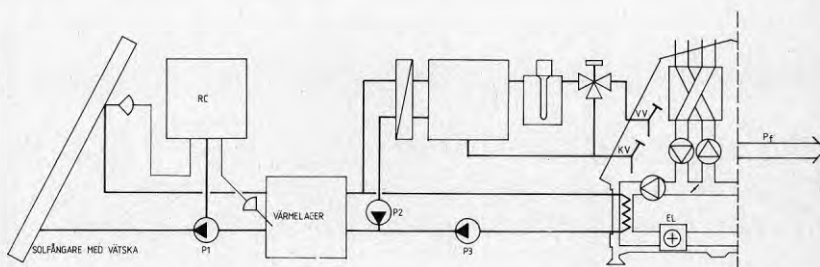
Byggnadsdel	Solveig	SBN-75
Bottenbjälklag	0,13	0,30
Väggar	0,15	0,30
Vindsbjälklag	0,11	0,20
Fönster	1,8	2,0

Den ofrivilliga ventilationen i Solveig-husen har enligt ovan antagits till 0,1 oms/h. I SBN-huset bedöms 0,25 oms/h vara ett realistiskt värde. Ingen värmeväxling av ventilationsluften sker i SBN-huset. Beräkningen genomfördes i ett tidigt skede, då horisontavskärmningen antogs vara 5 grader.



Figur 6.5
Beräknade värmeförluster för Solveighuset (t v) resp ett lika stort SBN-hus (exklusive forcerad ventilation och vädring).

6.4.3 Simuleringsmodell för solsystem

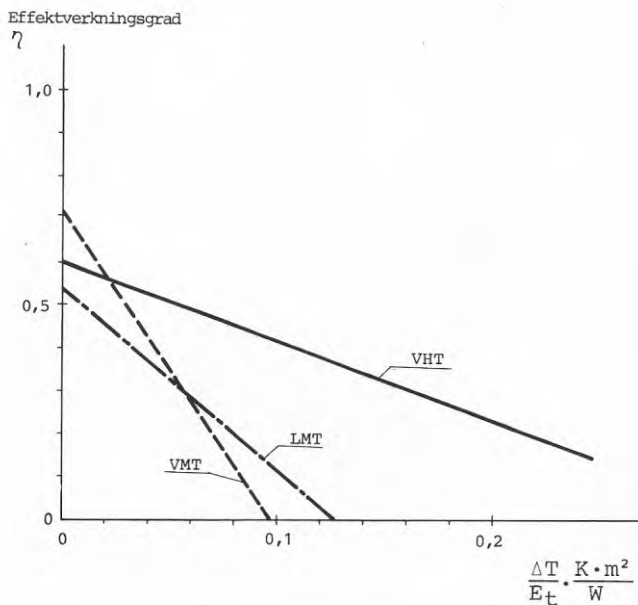


Figur 6.6
Schematisk framställning av simuleringsmodellen för referenssystemet. Värmeförlusten P_f har erhållits genom simulering av hus utan solvärmesystem.

Modellen för solvärmesystemet, se figur 6.6, bygger helt på befintliga TRNSYS-rutiner. Solfångaren har modellerats med Type 1, mode 1. Valda värden på verkningsgrader och horisontavskärmning framgår av figur 6.7 och 6.8. Värmelagret är liksom varmvattenberedare och förvärmningstank enkla vattentankar utan skiktning. De har modellerats med Type 4.

Regleringen är också representerad på enklast tänkbara sätt. Vatten cirkulerar genom solfångarkretsen då energivinst i tanken uppstår. Cirkulation genom förvärmningstank och varmluftsaggregatet sker då värmebehov föreligger och temperaturen i tanken samtidigt är tillräcklig för utnyttjande.

Belastningsbeskrivande indata är solstrålning enligt avsnitt 6.3 och byggnadens värmebehov enligt 6.4.1 och 6.4.2 ovan.



Data för solfångare

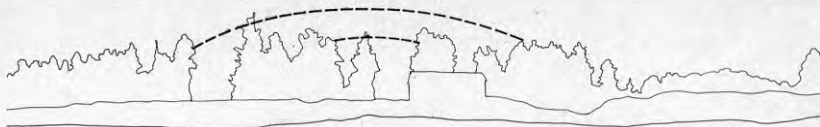
typ	F'	α	τ	k	motsvarar
VHT	0,95	0,90	0,70	1,94	Teknoterm HT
VMT	0,96	0,94	0,80	7,6	Teknoterm SU
LMT	0,71	0,95	0,80	5,9	Solaron 2000

Figur 6.7
Effektverkningsgrad, η , för de solfångare som används i beräkningarna:

$$\eta = F'(\alpha\tau)_e - k_e \frac{\Delta T}{E_t}$$

där

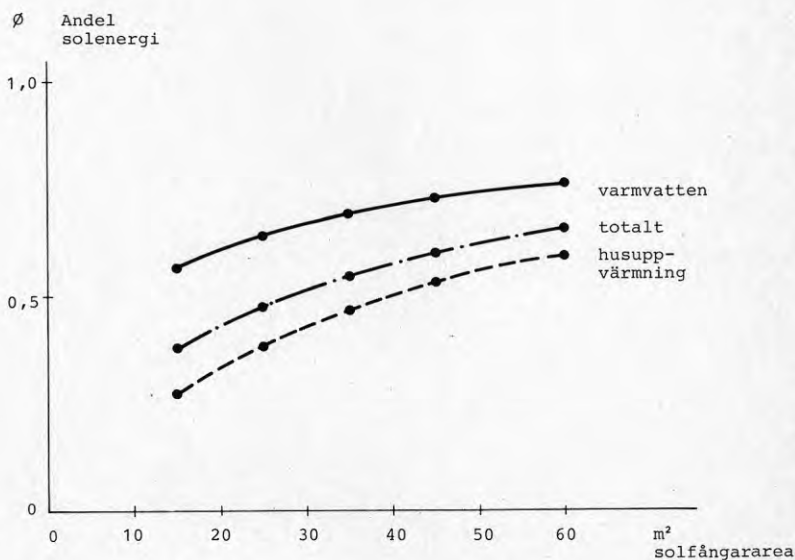
$$\Delta T = (T_i + T_o)/2 - T_u$$



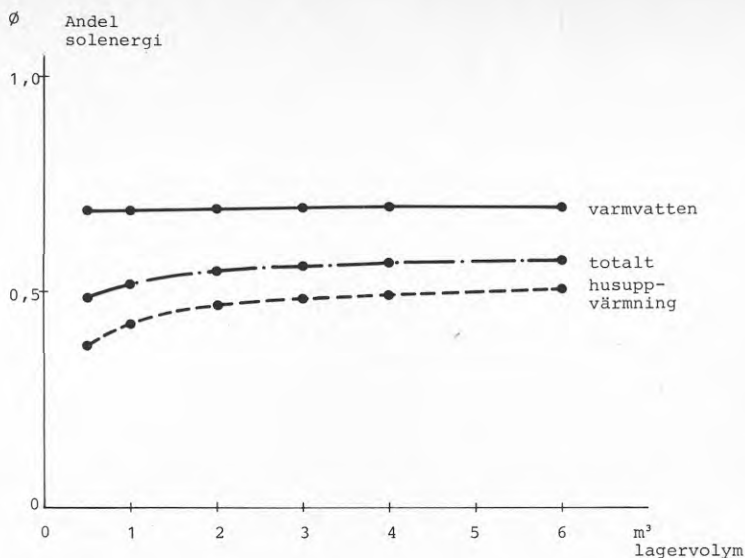
Figur 6.8
Horisonten sedd från mitten av solfångaren på SAL-huset.
Ungefärliga solbanor för 21 december och 21 januari vi-
sas.

6.4.4 Simuleringsresultat för solsystem

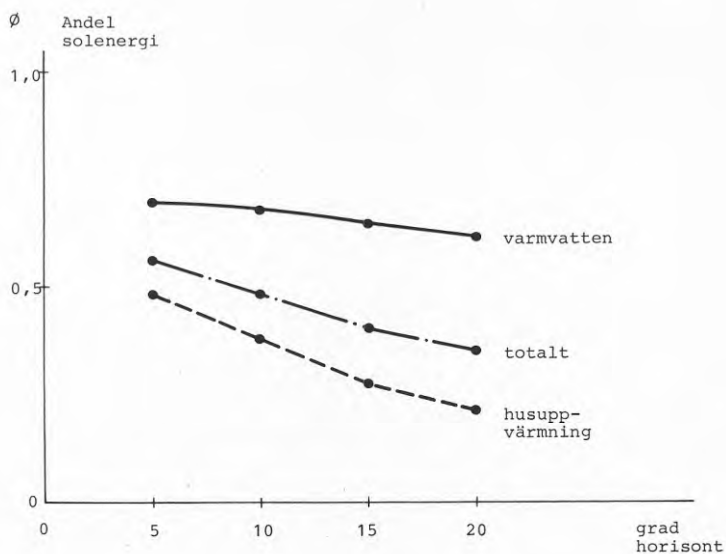
Ett huvudintresse i solvärmesystem med korttidslager är att studera hur försörjningsgraden varierar med solfångarkvalitet, solfångararea, horisontavskärmning och lagerstorlek. De följande diagrammen redovisar detta för den förenklade referensmodellen.



Figur 6.9
Andelen solenergi, \emptyset , som funktion av solfångararean,
för uppvärmning av varmvatten och totalt för referens-
systemet med Solveighuset som last. Värmelager 3 m^3
vatten. Solfångare VHT. Horisontavskärmning 5° .



Figur 6.10
Andelen solenergi som funktion av lagerstorleken för uppvärmning, varmvatten och totalt för referenssystemet med Solveighuset som last. Solfångare 35 m² VHT. Horisontavskärmning 5°.



Figur 6.11
Andelen solenergi som funktion av horisontavskärmningen för uppvärmning, varmvatten och totalt för referenssystemet med Solveighuset som last. Värmelager 3 m³ vatten. Solfångare 35 m² VHT.

En jämförelse mellan årliga värmeproduktionen i MWh för en enkelglasad solfångare VMT och en bra högtemperaturfångare VHT i ett enkelt vattensystem med 35 m² solfångare och ett vattenlager på 2 m³ ger följande värden:

Solfångar- typ	Varmvatten			Uppvärmning		
	Sol MWh	El MWh	Andel sol	Sol MWh	El MWh	Andel sol
VMT	2,26	1,80	0,56	2,35	5,28	0,31
VHT	2,82	1,27	0,69	3,56	4,03	0,47

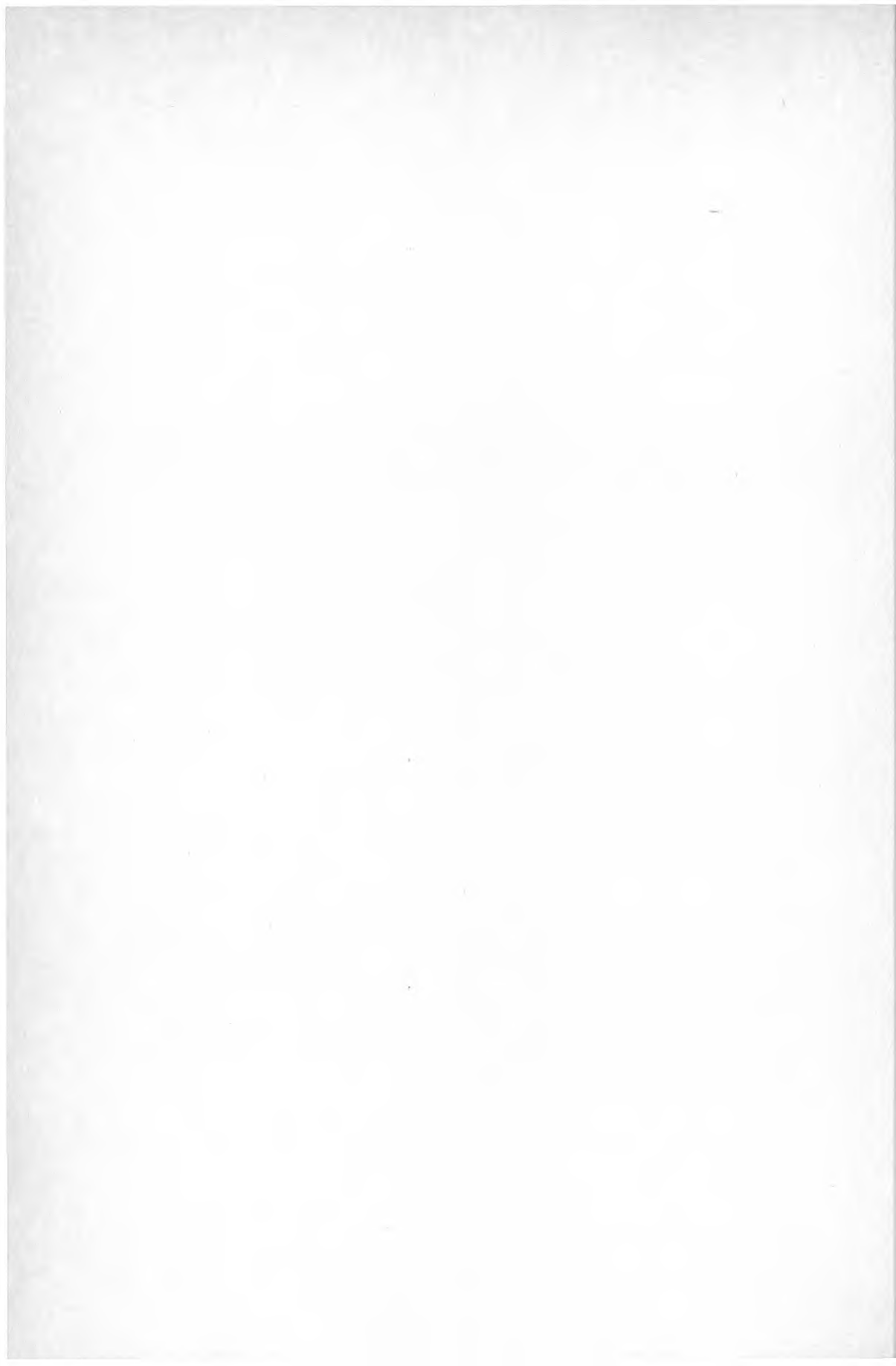
Simulering av de tre projekterade systemen ÅQUA, FERRUM och SAL visar genomgående samma tendenser för försörjningsgradens beroende av de studerade parametrarna.

6.5 Sammanfattning av simuleringsstudierna

Simuleringsstudierna har givit en rad värdefulla erfarenheter, av vilka några ytligt sett kan förefalla negativa.

- o Det är möjligt att med måttliga insatser genomföra parameterstudier för ett och samma system, t ex beträffande solfångarearea, lagervolym och värmeväxlingsytor, medan jämförelser mellan olika systemlösningar eller m a o parallellprojektering är betydligt mer krävande
- o Resultaten visar att försörjningsgraden endast påverkas marginellt av lagervolymen, något mer av solfångarearean och påtagligt av solfångarens prestanda
- o Resultaten visar att korttidslager för ett småhus i svenskt klimat oavsett lagringsmediet inte bör vara större än en eller ett par kubikmeter
- o Trots att TRNSYS sedan fem år använts i många projekt innehåller programmet fortfarande odokumenterade programmeringsfel, av vilka några har avslöjats inom detta projekt

Sammantaget har arbetet visat att ett kvalificerat utnyttjande av TRNSYS är så krävande att förstagångsansvändning i varje fall för enstaka småskaliga objekt knappast är ekonomiskt realistisk.



7 UTVÄRDERING OCH MÄTPROGRAM

Utvärderingen av fullskaleexperimentet skall i första hand inriktas på funktionen hos värmelagret respektive solvärmesystemet som helhet och för dessa skall detaljerade mätningar och analyser genomföras. Beträffande övriga delsystem och själva byggnadens värmebalans är ambitionsnivån lägre.

Mätningarna skall förutom att ge underlag för utvärderingen användas för att löpande kontrollera systemets drift.

Mätprogrammets syfte kan sammanfattas i nedanstående punkter:

- o Bestämma solvärmesystemets och då speciellt värmelagrets termiska prestanda
- o Bestämma lagrets långtidsegenskaper
- o Jämföra teoretiskt beräknade prestanda med experimentellt bestämda. I detta fall kunna avgöra hur lämpligt datorprogrammet TRNSYS är som dimensioneringsverktyg.
- o Samla underlag för konstruktion av framtida solvärmesystem
- o Samla underlag för framtagning av empiriska modeller för solvärmesystem
- o Samla underlag för en ekonomisk bedömning av denna typ av solvärmesystem

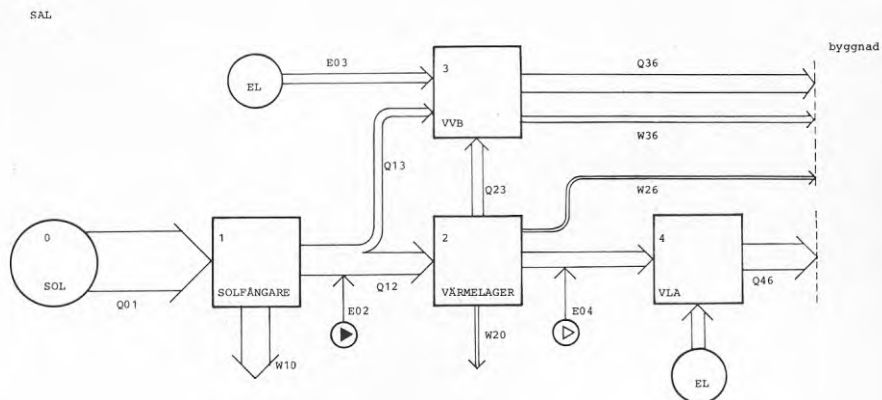
7.1 Solvärmesystemet

Ett solvärmesystem i vårt klimat måste fungera väl för att i praktiken samla in teoretiskt uppskattade energimängder.

Utvärderingen av solvärmesystemet är alltså en viktig del av projektet. I första hand är syftet att studera olika systemutformningars - främst vad gäller värmelagret - betydelse för energiproduktionen. Systemet har utformats så, att en rad olika effekter med gynnsam inverkan på termiska funktionen, skall tillvaratas. Eftersom flera av dessa effekter var för sig är små fordras en noggrann uppföljning dels för att mäta effekten, dels för att säkerställa funktionen.

Utvärderingen av solvärmesystemet skall ske i växelverkan med simuleringsstudier med TRNSYS. Detta förväntas ge stora möjligheter att dra mer generella slutsatser. Genom jämförelse mellan uppmätta och beräknade värden är det lättare att bedöma funktioner - och upptäcka felfunktioner - både i beräkningsmodellen och det verkliga systemet.

Samtliga större energiflöden i systemet skall bestämmas genom mätningar och beräkningar, (se figur 7.1 och tabell 7.1).



Beteckningar

Q = värme, E = elenergi, W = värmeförluster

Figur 7.1

Diagram över större energiflöden i solvärmesystemet

Beteckning	Benämning	
Q01	solinstrålning mot solfångarna	mätas
Q12	infångad solvärme till lagret	mätas
Q13	infångad solvärme till VVB	mätas
Q23	värmefrån lagret till VVB	mätas
Q24	värmefrån lagret till VLA	mätas
Q32	värmefrån VVB till lager	mätas
Q36	värmefrån VVB till byggnad	mätas
E01	energi för drift av pump	mätas
E03	elenergi till VVB	mätas
E04	elenergi till VLA	mätas
W10	värmeförlust från solfångare	beräknas
W20	värmeförlust från värmelager till omgivning	beräknas
W26	värmeförlust från värmelager till byggnad	beräknas
W36	värmeförlust VVB till byggnad	beräknas

Tabell 7.1

Förteckning över energistorheter

I ett solvärmesystem förloras normalt en mycket stor del av solenergin genom värmeförluster från solfångare, värmelager och ledningar. Det är alltså gynnsamt för systemverkningsgraden att temperaturnivåerna hålls nere. Systemet ifråga är i hög grad konstruerat med tanke på detta och därför skall också flertalet temperaturnivåer vid vilka värme överförs och lagras mätas.

För att utvärderingen av energibalanser skall vara meningsfull fordras att man säkert vet hur systemet har fungerat. I mätprogrammet ingår därför total tid som systemet befinner sig i olika driftsfall samt antalet växlingar mellan driftsfall.

7.2 Delsystem

7.2.1 Solfångargruppen

Syftet med mätningarna är vad solfångarna beträffar främst att avgöra om av fabrikanten angivna prestanda uppfylls och om en jämn flödesfördelning inom gruppen erhålls.

7.2.2 Värmelagret

Uppföljningen av värmelagrets funktion är projektets viktigaste uppgift. Mätningarna i värmelagret skall ge underlag dels för att noggrant bestämma energiflödena och samhörande temperaturer dels för att följa förändringar i de enskilda lagringselementens funktion. Beträffande bestämning av energiflödena fordras inga mätningar utöver dem som fordras för solvärmesystemet som helhet. För funktionskontrollen av de enskilda lagringselementen mäts dels tre yttemperaturer på olika höjd på varje element dels värmebärartemperaturerna vid varje elements in- och utlopp.

7.2.3 Värmedistributionssystemet

Flertalet rum försörjs med luftburen värme genom separat kanal från varmluftsaggregat i apparatrummet. Tillluftsflödena, som är variabla, styrs av en termostat i varje rum.

För att kartlägga funktionen av luftdistributionssystemet mätes luftflöden till vissa rum, där nattsänkning av temperaturen är önskvärd.

7.2.4 Värmeåtervinning ur ventilationsluften

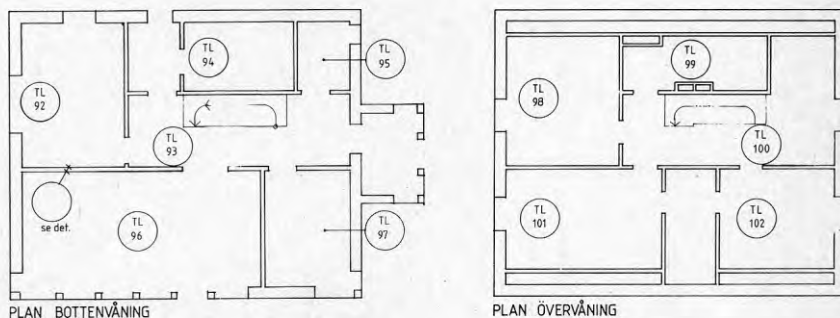
Syftet med dessa mätningar är att bestämma värmeåtervinningens effektivitet.

Mätningar görs av lufttemperaturer före och efter värmeväxlare. Till- och frånluftsflöde samt läge på spjället i shunten mäts.

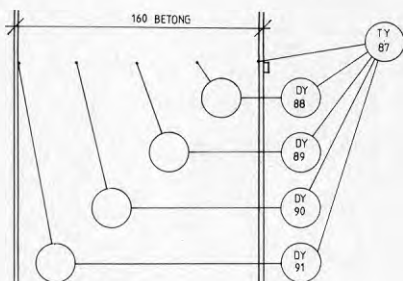
7.2.5 Byggnaden

Byggnadens totala energiförbrukning påverkas i hög grad av brukarvanor, som är svåra att ta kvantitativ hänsyn till vid utvärderingen, speciellt som projektet endast omfattar ett hus.

För att kontrollera byggnadsskalet skall tryckprovning i kombination med termografering utföras vid ett antal tillfällen (se bilaga).



Figur 7.22
Mätpunkter för inomhustemperaturer



Figur 7.23
Mätpunkter för temperaturer i hjärtväggen

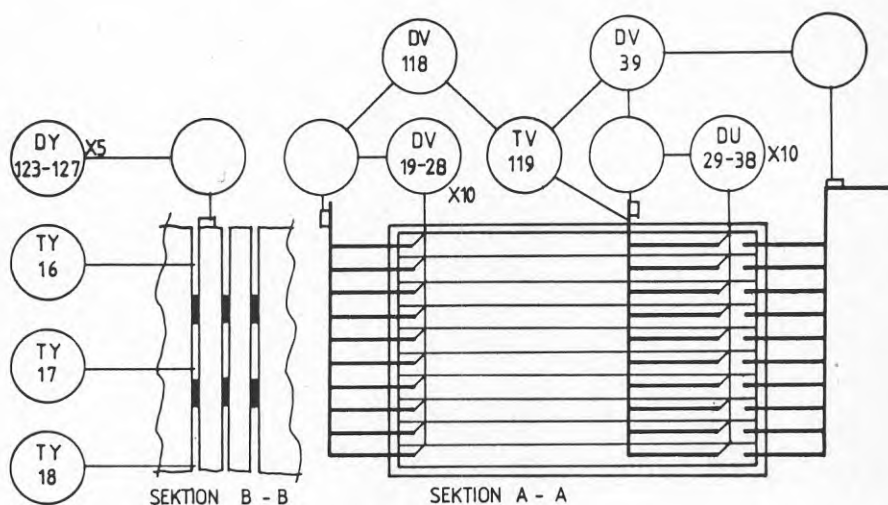
Beteckningar för figur 7.2, 7.22, 7.23, 7.24

Mätpunktsbeteckningar är sammansatta av två bokstäver och ett löpnummer.

första bokstav	första bokstav	följande bokstav
C villkor	N antal	-L luft
D differenstemp	P tryck	-V vatten
E elenergi	Q värmeenergi	-Y yta
F flöde	R referens	
H tid	T temperatur	
K kontroll	V ventil	
L läge	W irradians	

GT = temperaturgivare i reglersystemet

Beträffande de byggnadstekniska åtgärder som gjorts för att tillvarata passiv solvärme skall en begränsad utvärdering ske. Temperaturer i södervända rum registreras. Temperaturer på flera nivåer i ett snitt i hjärtväggen mäts. Dessa mätningar skall användas för att uppskatta värmetransport ut och in genom hjärtvägg. Solinfall genom fönstren beräknas med hjälp av registreringar av instrålningen mot vertikala ytor.



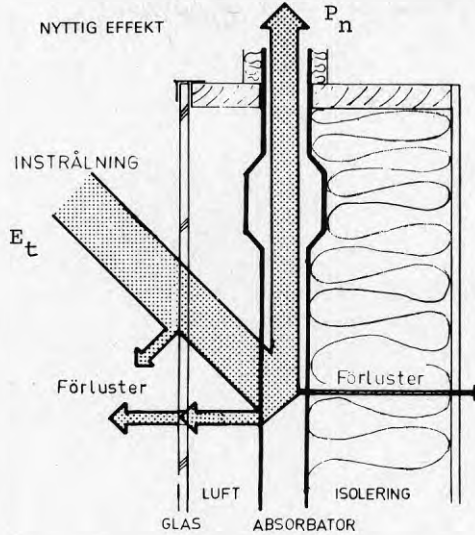
Figur 7.24
Mätpunkter i värmelagret. Flertalet temperaturmätpunkter, TY, avser yttemperaturer. Se även figur 7.2

7.3 Rapportering

Rapporteringen skall i tillämpliga delar följa de riktlinjer som ges i IEAs rapporteringsmall för solvärmesystem.

VERKNINGSGRADEN HOS PLANA TERMISKA SOLFÅNGARE

Den termiska funktionen hos en plan solfångare är i princip enkel.



Figur A.1
Termisk solfångare
(Ur VVS, Solvattenvärmare för sommarbruk 1977)

Mot en solfångare med arean A faller strålningen $A \cdot E_t$ in mot glasningen, där en del förloras genom reflektion och en annan del absorberas. Av instrålningen transmitteras $\tau \cdot A \cdot E_t$ genom glasningen och träffar absorbatoren, där en mindre del reflekteras medan $\alpha \cdot \tau \cdot A \cdot E_t$ absorberas och omvandlas till värme.

En del, P_n , av detta värme överförs till och transporteras bort med en värmebärare. För att användbar värme skall kunna utvinnas måste absorbatoren hålla väsentligt högre temperatur än omgivningen och följaktligen förloras värme, P_f , till omgivningen. Förlusten är approximativt proportionell mot temperaturdifferensen mellan absorbatoren, T_a , och omgivningen, T_u , och kan skrivas

$$P_f = k_e (T_a - T_u) \cdot A$$

där k_e är solfångarens effektiva förlustkoefficient.

Detta kan sammanfattas med ekvationen:

$$P_n = A [\alpha \cdot \tau \cdot E_t - k_e (T_a - T_u)]$$

Vi har hittills bortsett från en rad detaljer såsom absorption och reflektion i ett eller flera glasskikt,

temperaturgradienterna i absorbatoren, rikttningsberoendet hos transmittans och absorptans och transmissionsmotståndets temperaturberoende.

Effekten av upprepad reflektion och av värmeupptagning i glaset p_g absorberad strålning inkluderas i produkter $\alpha \cdot \tau$ som därför skrivs $(\alpha \tau)_e$. Absorbatorplåten kyls av värmebäraren längs inbyggda kanaler. Plåten mellan dessa antar en något högre temperatur än kanalväggarna som i sin tur antar en något högre temperatur än värmebäraren. Värmeförlusterna är därför i realiteten större än om hela plåten hållit samma temperatur som värmebäraren. Genom att införa faktorn F_R tar man hänsyn till detta. Samtidigt görs sambandet mer "ingenjörspanpassat" genom att absorbatortemperaturen T_a ersätts med inloppstemperaturen T_i .

$$F_R = \frac{\text{till värmebäraren överförd effekt}}{\text{den effekt som skulle överförts till värmebäraren om hela absorbatorytan hållit inloppstemperaturen } T_i}$$

Den infångade effekten P_n kan nu tecknas:

$$P_n = F_R \left((\alpha \tau)_e \cdot E_t - k_e (T_i - T_u) \right)$$

Solfångarens verkningsgrad erhålls som kvoten P_n/E_t eller:

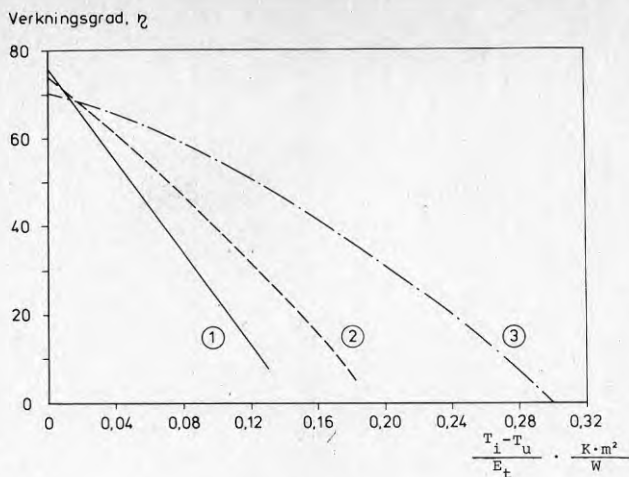
$$\eta = F_R \left((\alpha \tau)_e - k_e (T_i - T_u)/E_t \right) \quad (\text{jfr figur A.1})$$

Faktorn F_R beror dels på solfångarens konstruktion, dels på värmebärarens temperaturstegring i absorbatoren och därmed på flödesthastigheten. Ibland är det en fördel att skriva verkningsgraden i en form som ej beror av temperaturstegringen:

$$\eta = F' \left((\alpha \tau)_e - k_e \left[(T_i + T_o)/2 - T_u \right] / E_t \right)$$

där $F' = \frac{\text{till värmebäraren överförd effekt}}{\text{den effekt som skulle överförts om hela absorbatorytan hade hållit medeltemperaturen } (T_i + T_o)/2}$.

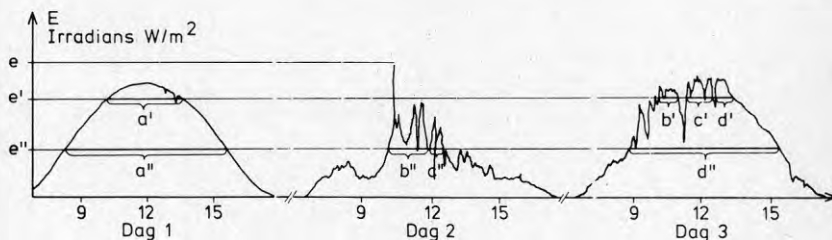
För vätskekylda solfångare kan skillnaden mellan F_R och F' i allmänhet försummas medan den för luftkylda solfångare har avgörande betydelse.



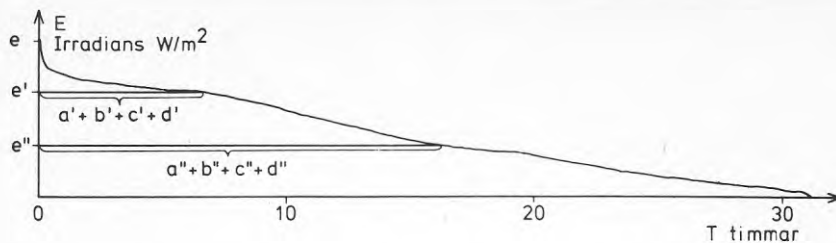
Figur A.2
Verkningsgraden för några plana solfångare. Glasningens k -värde är proportionellt mot kurvornas lutning. I figuren ges verkningsgraden för en ordinär solfångare 1 med två glas, en solfångare med selektivt svart absorbatör 2 samt för en solfångare med mycket högt värmemotstånd hos glasningen 3. (Ur BFR-rapport R35:1978.)

Figur A.2 visar verkningsgraden, η , som funktion av $(T_i - T_u)/E_t$ för några solfångartyper. Det är svårt att med utgångspunkt från denna figur bedöma vilken effektiv verkningsgrad en solfångare får vid en viss tillämpning.

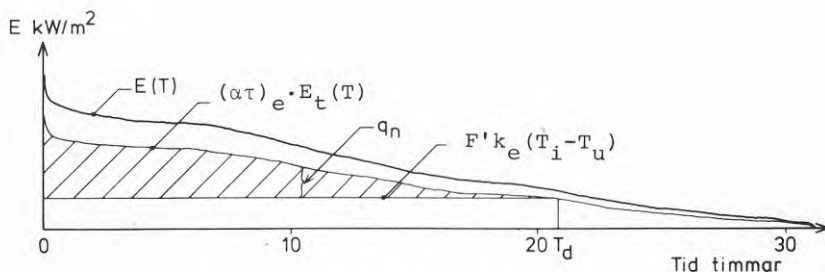
Ett bättre sätt är att grafiskt illustrera instrålning, insamlad effekt och förluster och renodla detta till varaktighetsdiagram enligt figur A.3, A.4 och A.5.



Figur A.3
Instrålningen mot en undersökt yta under tre på varandra följande dagar. Ytan under kurvan är ett mått på den energi som totalt strålat in mot ytan. (Ur BFR-rapport R35:1978.)



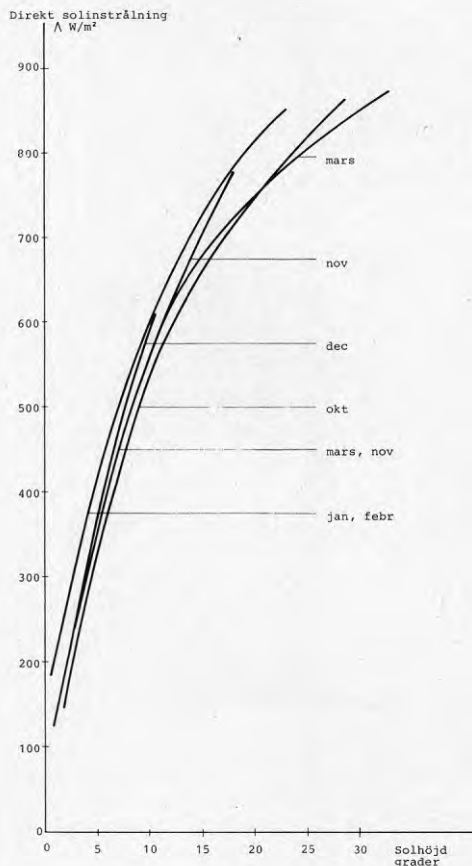
Figur A.4
Varaktighetsdiagram över instrålningen för de tre dagarna i figur A.3. Här har de uppmätta värdena på irradiansen ordnats efter storlek så att tidsaxeln nu anger den totala tid som irradiansen varit större än ett visst värde. Ytan under denna kurva är lika stor som den samlade ytan under de tre kurvorna. (Ur BFR-rapport R35:1978).



Figur A.5
Grafisk uppskattning av den insamlade energin Q_n med hjälp av ett varaktighetsdiagram över instrålningen. Det framgår av en jämförelse med ekvationen i figur A.1 att den insamlade energin Q_n motsvaras av den streckade ytan i figuren. Värmeförlusterna från solfångaren motsvaras approximativt av ytan under $F'k_e(T_i - T_u)$ och "förlusterna av solstrålning" ges av ytan mellan kurvorna $E(T)$ och $F'(\alpha \tau)_e E_t(T)$. Den totala drifttiden T_d under perioden ges av skärningen mellan kurvorna $F'(\alpha \tau)_e E_t(T)$ och $F'k_e(T_i - T_u)$. (Ur BFR-rapport R35:1978).

SMHI:s mätvärden för Stockholm 1971 innehåller för månaderna oktober-mars en stor andel osannolikt höga solinstrålningsvärden. Felen beror i vissa fall - speciellt vid klart väder - på att rimfrost avsatt sig på mätinstrumentet. Systematisk felvisning hos instrumentet vid låga solhöjder är en annan orsak. Dessutom bidrar minst en oidentifierad felkälla.

Korrigering har skett genom att ersätta värden, som faller utanför vissa gränser, med uppskattade värden. Däremot har inga försök till korrigering av systematiska fel gjorts.



Direkt solinstrålning vid klart väder som funktion av solhöjden under olika månader. Kurvorna är anpassade till värden som uppmätts med pyrhelionometer i Visby. (SMHI)

För korrigeringsproceduren har timvärden för solskens-tid, andel molntäckt himmel samt global och indirekt solstrålning mot en horisontell yta som finns på väderbandet utnyttjats. Hänsyn har inte tagits till att andelen moln är ett momentanvärde registrerat enligt borgerlig tid medan solinstrålningen avser summor registrerade enligt sann soltid. För korrigeringsproceduren har dessutom ett omfattande material av manuella pyrheliometermätningar av direkt solinstrålning samt mätningar av indirekt solinstrålning i båda fallen från Visby använts (se figur 1:1). Dessa data, som är opublicerade, har erhållits genom Lars Dahlgren, SMHI.

Data har behandlats timme för timme, dvs ingen hänsyn har tagits till värden från angränsande timmar. Procedurens första steg är att med ledning av solskens-tid och molnighet klassificera värdet som klart, molnigt eller mulet.

- o Klart väder då $SS > 54$ och $M \geq 3/8$ eller
då $M \geq 2/8$ vid lågt solstånd
- o Mulet väder då $SS = 0$ och $M = 0$
- o Molnigt väder i övriga fall

där SS = solskens-tid i minuter/timme och M = andel molntäckt himmel.

För klart väder har sedan den direkta instrålningen jämförts med ett värde, som beräknats ur "Visbydata", och om mätvärdet är mer än 10 % större än det beräknade värdet har det beräknade värdet utnyttjats. För den indirekta komponenten har på analogt sätt ett ur "Visbydata" beräknat värde utnyttjats om mätvärdet är mindre än 70 % eller större än 200 % av det beräknade.

Vid molnigt väder beräknas ett direktinstrålningssvärde genom att multiplicera "Visbyvärdet" för klart väder med det största värdet av andelen solskens-tid under timmen, $SS/6$, och andelen icke molntäckt himmel under samma timme, $(1-M)$. Vid jämförelsen accepteras sedan mätvärdet så som rimligt om det är mindre än 120 % av det beräknade värdet. Behandlingen av den indirekta strålningen är analog med den för klart väder.

Beträffande mulet väder antas att det endast finns en indirekt komponent och att denna är lika med det största av mätvärdena för global respektive indirekt strålning.

UPPTÄCKTA FEL I TRNSYS VERSION 10.1

Källkoden till version 10.1 av TRNSYS är i jämförelse med källkoden till föregående version 9.2 till stora delar omskriven. Motiven till olika förändringar är främst något eller flera av följande:

- . underlätta segmentering
- . förbättra källkodens läsbarhet
- . införa möjligheter att modellera ytterligare varianter av solvärmesystem
- . förenkla användandet

Förändringarna, som alltså är omfattande, är endast delvis dokumenterade i manualen till version 10.1. Bl a saknas en beskrivning av möjligheten att genom indata välja mellan olika modeller för hur inflödet fördelas i en skiktad vattentank.

Tre fel, som uppenbarligen införts i samband med omskrivningen, har upptäckts. Samtliga förekommer i programpartier vars motsvarigheter i version 9.2 inte hade motsvarande fel. Två av felen förekommer i subrutinen för vattentanken för vilken manualen ej anger att någon revidering skett.

Problem 1 (TYPE 19)

Värmebalansen för rumsrutinen (Type 19) går inte ihop, vilket beror på att rummet i modellen tillgodoräknas personvärmets två gånger.

Type 19 rad 107 lyder

$$K = K + 10$$

skall lyda

$$K = K + 11$$

Problem 2 (TYPE 4)

Den värmemängd som tillförs en last från värmelagret (Type 4) avviker något från den värmemängd som tillförs värmelagret även då detta är förlustfritt. Detta beror på att värmets som överförs till lasten /flöde . värmekapacitet (utloppstemp- inloppstemp)/ beräknas före den slutgiltiga beräkningen av utloppstemperaturen. Den senare bestämmer energiminuskningen i tanken.

En lösning av problemet är att ta bort rad 186 i Type 4 som lyder

$$QTANK = FLWL \times (T(1) - TL)$$

och införa raden

$$QTANK = FLWL \times (OUT(1) - TL)$$

efter rad 190.

Problem 3 (TYPE 4)

Stora skillnader i tillförd och uttagen energi från en vattentank kan uppträda om denna är skiktad och har en elpatron som sitter under översta skiktet.

En lösning på problemet är att införa följande rader

$$QBTOT = 0$$

införs efter rad 180

och raden

$$QBTOT = QBADD + QB(K) + QBTOT$$

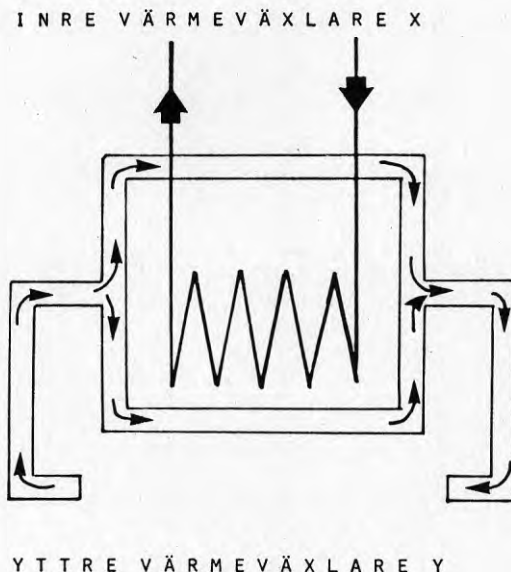
införs efter raden 181.

SUBROUTIN FÖR SMÄLTVÄRMELAGER ANPASSAT
TILL DATASIMULERINGSPROGRAMMET TRNSYS

Den matematiska modellen bygger på en stationär beskrivning av värmetransporten i värmelagret. Lagringsmediets värmeöverföringsegenskaper bestäms av lagrets energiinnehåll och värmeväxlarnas geometri. En mera utförlig beskrivning av bakgrunden till modellen kan erhållas från följande referenser:

"Heat Transfer Properties of a Heat-of-Fusion Store Based $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ". B Carlsson and G Wettermark. Solar Energy 24 (1980) 239.

"Calculation of the Thermal Performance of a Heat-of-Fusion Storage Unit Based on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ". B Carlsson. Intern rapport från institutionen för fysikalisk kemi KTH, 1980.



Figur B1
Principschema för smältvärmelagret

Det värmelager som beskrivs i subrutinen illustreras schematiskt i figur B1. Lagret kan kopplas till två separata värmeväxlarkretsar X och Y. Krets X representerar en inre värmeväxlare, att användas företrädesvis vid laddning av värmelagret. Krets Y representerar en yttre värmeväxlare att användas företrädesvis vid värmeuttag. Massflödet av värmetransportmediet i de båda kretsarna styrs lämpligen med ON/OFF reglering.

Beräkningsinnehåll

Subrutinen har medvetet gjorts enkel för att möjliggöra snabba beräkningar. In- och uteffekter beräknas genom följande uttryck:

$$Q = (\dot{m}C_p) \cdot \epsilon \cdot (T_{in} - \bar{T}_M) \quad (1)$$

där Q = värmeeffekt
 $(\dot{m}C_p)$ = värmekapacitetsflödet för värmetransportmediet
 ϵ = temperaturverkningsgrad för värmeväxlare
 T_{in} = ingående värmetransportmediums temperatur
 \bar{T}_M = lagrets effektiva temperatur. Under smältningen och kristallisationen sätts denna temperatur lika med saltsmältans, se nedan.

Temperaturverkningsgraden ϵ

Temperaturverkningsgraden ϵ kan tas som en experimentellt bestämbar storhet, men kan även beräknas med följande uttryck:

$$\epsilon = 1 - \exp(-h_{tot} \cdot A / (\dot{m}C_p)) \quad (2)$$

där h_{tot} = totala värmeöverföringstalet för övergången värmetransportmediet/lagringsmedium
 A = aktiv värmeväxlaryta
 $(\dot{m}C_p)$ = värmekapacitetsflöde för värmetransportmediet

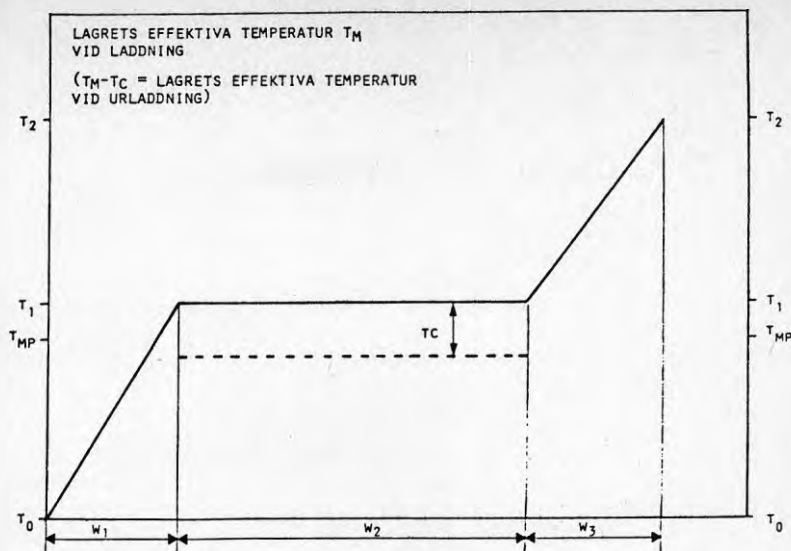
Subrutinen förutsätter förenklat att temperaturverkningsgraden ϵ är oberoende av variationer i laddningsgrad och temperatur. Den förstnämnda approximationen är främst motiverad vid laddning av värmelagret, men kan även vara rimlig att göra vid värmeuttag, om mängd lagringsmedium i förhållande till den värmeöverförande ytans storlek är liten. Approximationen innebär också att hänsyn ej tas till att den aktiva delen av värmeväxlarytan varierar som en följd av skillnaden i täthet mellan saltsmältan och saltkristallerna.

Berättigandet att göra den andra approximationen, att temperaturberoende av ϵ kan försummas, sammanhänger främst med hur lagringsmediets effektiva temperatur definieras i den använda beräkningsmodellen.

Lagringsmediets effektiva temperatur \bar{T}_M

Lagringsmediets effektiva temperatur beräknas primärt med utgångspunkt från lagrets energiinnehåll. Energiinnehållet sättes därvid lika med noll vid en vald referenstemperatur.

Ett smältförlopp tas som utgångspunkt för att beräkna lagrets effektiva temperatur som funktion av värmeinnehållet enligt figur B2.



W_1 = Värmeinnehållet mellan T_0 och T_1 , fås ur uttrycket $W_1 = (1-X) \Delta H_F + C_{PS} (T_{MP} - T_0) + C_{PL} (T_1 - T_{MP}) + C_{PA} (T_1 - T_0)$

W_2 = Smältvärmeinnehållet fås ur uttrycket $W_2 = X \cdot \Delta H_F$

W_3 = Värmeinnehållet mellan T_1 och T_2 fås ur uttrycket $W_3 = C_{PL} (T_2 - T_1) + C_{PA} (T_2 - T_1)$

ΔH_F = Smältvärme (kJ/kg)

X = Bråkdel av lagringsmediet som smälter idealt, dvs isotermt

C_{PS} = Spec värme för fast fas (kJ/kg, K)

C_{P1} = Spec värme för smältan (kJ/kg, K)

C_{PA} = Spec värme för resten av systemet som ej utgörs av lagringsmedium (kJ/K, kg lagringsmedium)

T_0 = Referenstemperaturen, där $W = 0$ ($^{\circ}\text{C}$)

T_{MP} = Smältpunkt ($^{\circ}\text{C}$)

T_1 = Smältans temperatur under smältningen ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = Maximalt tillåtna temperaturen för värmelagret

Figur B2
Lagrets värmeinnehåll

I temperaturområdet W_2 enligt figur B2 sker själva smältprocessen. På grund av konvektiv värmeöverföring till lagringsmediet kommer saltsmältan där att hålla en temperatur, som överstiger den egentliga smältpunkten. Används t ex kalciumkloridhexahydrat som lagringsmedium hamnar som regel saltsmältans temperatur ca 2°C över smältpunkten och påverkas i ringa grad av storleken på värmeflödet. I subrutinen sätts i detta fall lagrets effektiva temperatur under smältningen till en nivå 2°C över dess smältpunkt, dvs vid temperaturen T_1 enligt figur B2. På detta sätt kan också temperaturverkningsgraden ϵ enkelt beräknas. Finns experimentella samband enligt ekvation (1) att tillgå kan T_1 oftast väljas, så att ϵ kan sättas konstant och oberoende av temperaturen.

I temperaturområdet W_1 och W_3 enligt figur B2 ändras lagringsmediets medeltemperatur proportionellt mot värmeinnehållet. Den effektiva medeltemperaturen hos lagringsmediet vad avser värmeväxlingen kommer därför att skilja sig från den egentliga medeltemperaturen som ges av värmeinnehållet. Om en hög beräkningsnoggrannhet inom temperaturområdena W_1 och W_3 önskas, bör en lagringsenhet uppdelas i mindre delar, och beräkningar utföras på varje del för sig. Vid TRNSYS-simuleringar kan lagringsenheten beskrivas genom seriekoppling av flera subrutinmodeller. Vad gäller ϵ kan denna som en första approximation sättas lika med dess värde inom W_2 .

Om lagringsmediets kemiska sammansättning avviker från den stökiometriska kommer smältningen ej att ske vid en konstant temperatur utan inom ett temperaturintervall nedanför smältpunkten. I salhydratsystem föreligger t ex som regel ett visst vattenöverskott. I modellen (se figur B2) ges möjlighet att grovt korrigera för denna effekt. Man definierar den bräddel av lagringsmediet som smälter idealt och tillordnar dess latent värmeinnehåll till W_2 samt fördelar resten av lagringsmediets latent värmeinnehåll jämnt inom temperaturintervallet T_0 och T_1 .

Figur B2 bildar underlag för beräkning av lagringsmediets effektiva temperatur T_M vid laddning av värmelagret. Vad gäller uttag av värme kan i princip samma samband användas inom områdena W_1 och W_3 . Inom temperaturområdet W_2 ligger dock saltsmältans temperatur under smältpunkten (för kalciumkloridhexahydrat ofta ca $0,5^\circ\text{C}$ under smältpunkten). Smältans temperatur uppvisar även en mycket liten variation med värmeflödet. För att vid värmeuttag kunna definiera temperaturverkningsgraden ϵ och möjliggöra beräkningar av densamma måste således lagrets effektiva temperatur T_M korrigeras inom temperaturområdet W_2 . Korrigeringen görs i denna subrutin enkel genom att införa en korrektionsterm TC (se figur B2). Förfarandet innebär dock att i gränsområdet mellan W_1 och W_2 samt mellan W_2 och W_3 ett fel uppträder vid beräkningen av lagrets effektiva temperatur. Felen är dock motriktade och energiområdena där felen uppträder små. Att observera är också att de transienta ändringarna i lagrets temperatur försummas vid växelvis värmeintag och värmeuttag.

Värmeläckage från värmelagret

Smältvärmelager konstrueras ofta så att lagringsmediet inkapslas i mindre enheter och att värmeväxling sker med den yttre kapselytan som värmeöverförande yta. S k värmeläckage sker därigenom endast då värmeväxlarkretsen ej används. Okontrollerat värmeuttag beräknas därför här genom att antaga att ett visst läckflöde föreligger i värmeväxlarkretsen Y, trots att det kontrollerbara flödet är lika med noll.

Subrutinens uppbyggnad

En lista över subrutinprogrammet redovisas i det följande. In- och utdata från subrutinen till huvudprogrammet samlas i matrisen XIN resp OUT. Materialdata för smältvärmelagret samlas i matrisen PAR. Nedan följer en inputinstruktion med beteckningslista. Vissa parametrar illustreras även i figur B1 och B2.

Inputmatrisen XIN

- XIN (1): XTI: Temperatur på ingående värmtransportmedium i värmväxlarkrets X ($^{\circ}\text{C}$)
- XIN (2): XG: Massflöde av värmtransportmedium i värmväxlarkrets X (kg/h)
- XIN (3): YTI: Temperatur på ingående värmtransportmedium i värmväxlarkrets Y ($^{\circ}\text{C}$)
- XIN (4): YG: Massflöde av värmtransportmedium i värmväxlarkrets Y (kg/h).

Outputmatrisen OUT

- OUT (1): XTO: Temperatur på utgående värmtransportmedium i värmväxlarkrets X ($^{\circ}\text{C}$)
- OUT (2): XG: Massflöde av värmtransportmedium i värmväxlarkrets X (kg/h).
- OUT (3): YTO: Temperatur på utgående värmtransportmedium i värmväxlarkrets Y ($^{\circ}\text{C}$)
- OUT (4): YG: Massflöde av värmtransportmedium i värmväxlarkrets Y (kg/h)
- OUT (5): W: Aktuella värmeinnehållet i lagret räknat från en vald referenstemperatur (kJ).
- OUT (6): TM: Lagrets aktuella effektiva temperatur vid ett laddningsförlopp (se figur B2).
- OUT (7): XQ: Värmeeffekt till lagret från värmväxlarkrets X (kJ/h).

OUT (8): -YQ: Värmeeffekt från lagret till värmewäxlarkrets Y (kJ/h)

OUT (9): -ZQ: Värmeläckage från lagret (kJ/h)

Parametermatrisen PAR

PAR (1): XCP: Spec. värme för värmetransportmedium i värmewäxlarkrets X (kJ/kg, K)

PAR (2): YCP: Spec. värme för värmetransportmedium i värmewäxlarkrets Y (kJ/kg, K)

PAR (3): M: Mängd värmelagringsmedium (kg)

PAR (4): TC: Skillnad mellan smältans temperatur under kristallisationen och smältans temperatur under smältningen ($^{\circ}\text{C}$) (Figur B2)

PAR (5): XEP: Temperaturverkningsgrad för värmewäxlingen med lagret i värmewäxlarkrets X

PAR (6): YEP: Temperaturverkningsgrad för värmewäxlingen med lagret i värmewäxlarkrets Y

PAR (7): T0: Vald referenstemperatur vid vilken värmeinnehållet $W = 0$.

PAR (8): W_1/M : Lagrets värmeinnehåll per viktsenhet inom temperaturintervallet T0 och T1

PAR (9): T1 Smältans temperatur under själva smältningsförloppet ($^{\circ}\text{C}$)

PAR (10): W_2/M : Lagringsmediets smältvärmeinnehåll vid temperaturen T_1 i lagret (kJ/kg) (Figur B2)

- PAR (11): T2: Maximala temperaturen som lagret och smältan får anta ($^{\circ}\text{C}$)
- PAR (12): W_3/M : Lagrets värmeinhåll i temperaturintervallet mellan T_1 och T_2 (kJ/kg) (Figur B2)
- PAR (13): ZG: Parameter för bestämning av värmeläckaget genom lagret. Här okontrollerbart massflöde av värmetransportmedium i värmeväxlarkrets Y (kg/h)
- PAR (14): WS: Startvärde på värmeinhållet (kJ/kg)
- PAR (15): TMS: Startvärde för lagrets effektiva temperatur vid värmeinhållet WS

TRNSYS-SUBROUTIN FÖR SALTLAGER

Bilaga 4

```

1      SUBROUTINE TYPE29 (TIME, XIN, OUT, T, DTTD, PAR, INFO)
2      LOGICAL FIRST
3      DIMENSION XIN (10), OUT (10), PAR (15), INFO (9)
4      COMMON/SIM/TIME0, TFINAL, DELT
5      INFO (6) = 9
6      JA = 0
7      99  CONTINUE
8      ZDT = DELT
9      XT1 = XIN (1)
10     XGCP = XIN (2) * PAR (1)
11     YT1 = XIN (3)
12     YGCP = XIN (4) * PAR (2)
13     TC = PAR (4)
14     XEP = PAR (5)
15     YEP = PAR (6)
16     T0 = PAR (7)
17     W1 = PAR (8) * PAR (3)
18     T1 = PAR (9)
19     W2 = PAR (10) * PAR (3)
20     T2 = PAR (11)
21     W3 = PAR (12) * PAR (3)
22     W4 = W1 + W2
23     ZGCP = PAR (13) * PAR (2)
24     IF (INFO (7).GT.-1) GOTO 10
25     OUT (5) = PAR (14)
26     OUT (6) = PAR (15)
27     10  CONTINUE
28     IF (INFO (7).GT.0) GOTO 11
29     W0 = OUT (5)
30     TMO = OUT (6)
31     11  CONTINUE
32     W = W0
33     TM = TMO
34     XTO = XIN (1)
35     YTO = XIN (3)
36     ZQ = 0.
37     XQ = 0.
38     YQ = 0.
39     IF (XGCP.EQ.0.) GOTO 1
40     XTO = 0
41     IF (TM.LT.XT1) GOTO 111
42     IF (TM.GT.T1) GOTO 111
43     IF (TM.LT.T1) GOTO 111
44     XTC = TC
45     111  XQ = XGCP * XEP * (XT1 - TM - XTC)
46         XTO = XT1 - XQ / XGCP
47     1   IF (YGCP.EQ.0.) GOTO 2
48     YTC = 0.
49     IF (TM.LT.YT1) GOTO 112
50     IF (TM.GT.T1) GOTO 112
51     IF (TM.LT.T1) GOTO 112
52     YTC = TC
53     112  YQ = YGCP * YEP * (YT1 - TM - YTC)
54         YTO = YT1 - YQ / YGCP
55     GOTO 12
56     2   YTC = 0.
57     IF (TM.LT.YT1) GOTO 110
58     IF (TM.NE.T1) GOTO 110
59     YTC = TC
60     110  ZQ = ZGCP * YEP * (YT1 - TM - YTC)
61     12  CONTINUE
62     W = W + (XQ + YQ + ZQ) * ZDT
63     IF (W.GT.W1) GOTO 121
64     TM = T0 + W * (T1 - T0) / W1
65     GOTO 13
66     121  IF (W.GT.W4) GOTO 122
67         TM = T1
68     GOTO 13
69     122  TM = T1 + (W - W4) * (T2 - T1) / W3
70     13  CONTINUE
71     IF (TM.LT.T2) GOTO 200
72     XTO = XIN (1)
73     XIN (2) = 0.
74     IF (JA.EQ.2) GOTO 200
75     JA = JA + 1
76     GOTO 99
77     200  CONTINUE
78     OUT (1) = XTO
79     OUT (2) = XIN (2)
80     OUT (3) = YTO
81     OUT (4) = XIN (4)
82     OUT (5) = W
83     OUT (6) = TM
84     OUT (7) = XQ
85     OUT (8) = -YQ
86     OUT (9) = -ZQ
87     RETURN
88     END

```

Exempel på parameteruppsättning vid körning med ett smält-
värmelager baserat på saltet kalciumkloridhexahydrat

I värmeväxlarkrets X används vatten och i värmeväxlarkrets Y används luft som värmetransportmedium.

$$\text{PAR (1)} = 4,18 \text{ (kJ/kg, K);}$$

$$\text{PAR (2)} = 1,00 \text{ kJ/kg,K;}$$

$$\text{PAR (3)} = M \text{ kg;}$$

$$\text{PAR (4)} = -3^{\circ}\text{C;}$$

$$\text{PAR (5)} = 0,6;$$

$$\text{PAR (6)} = 0,7;$$

$$\text{PAR (7)} = 15^{\circ}\text{C;}$$

$$\text{PAR (8)} = 45,2 \text{ kJ/kg;}$$

$$\text{PAR (9)} = 32^{\circ}\text{C;}$$

$$\text{PAR (10)} = 162 \text{ kJ/kg;}$$

$$\text{PAR (11)} = 70^{\circ}\text{C;}$$

$$\text{PAR (12)} = 111 \text{ kJ/kg;}$$

$$\text{PAR (13)} = 0,01 \cdot YG \text{ kg/h;}$$

$$\text{PAR (14)} = 0;$$

$$\text{PAR (15)} = 15^{\circ}\text{C;}$$

$$\Delta H_F = 170 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{PS} = 1,44 \text{ kJ/kg, K;}$$

$$C_{P1} = 2,32 \text{ kJ/kg, K;}$$

$$C_{PA} = 0,6 \text{ kJ/kg, K; } x = 0.95$$

se figurtext B2

LITTERATUR

Wettermark, G, Carlsson, B & Stymne, H, 1978, Lagring av värme - En översikt över metoder och möjligheter. BFR-rapport R70:1978 (finns även i engelsk version BFR-rapport D2:1979).

Carlsson, B, Stymne, H & Wettermark, G, 1978, Storage of Low-Temperature Heat in Salt Hydrate Melts - Calcium Chloride Hexahydrate. BFR-rapport D12:1978.

Carlsson, B, Schmidt, A, Györki, A, Stymne, H & Wettermark, G, 1980, Storage of Low-Temperature Heat in Salt Hydrate Melts - Thermal Performance Tests of a Heat-of-Fusion Storage Unit Based on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Intern rapport från institutionen för Fysikalisk Kemi KTH.

Carlsson, B, Stymne, H, Schmidt, A & Wettermark, G, 1979, Aktiv tvåfasvärmewäxling - En ny metod att överbrygga svårigheter vid smältvärmelagring med salthydrater. Intern rapport från institutionen för Fysikalisk Kemi KTH.

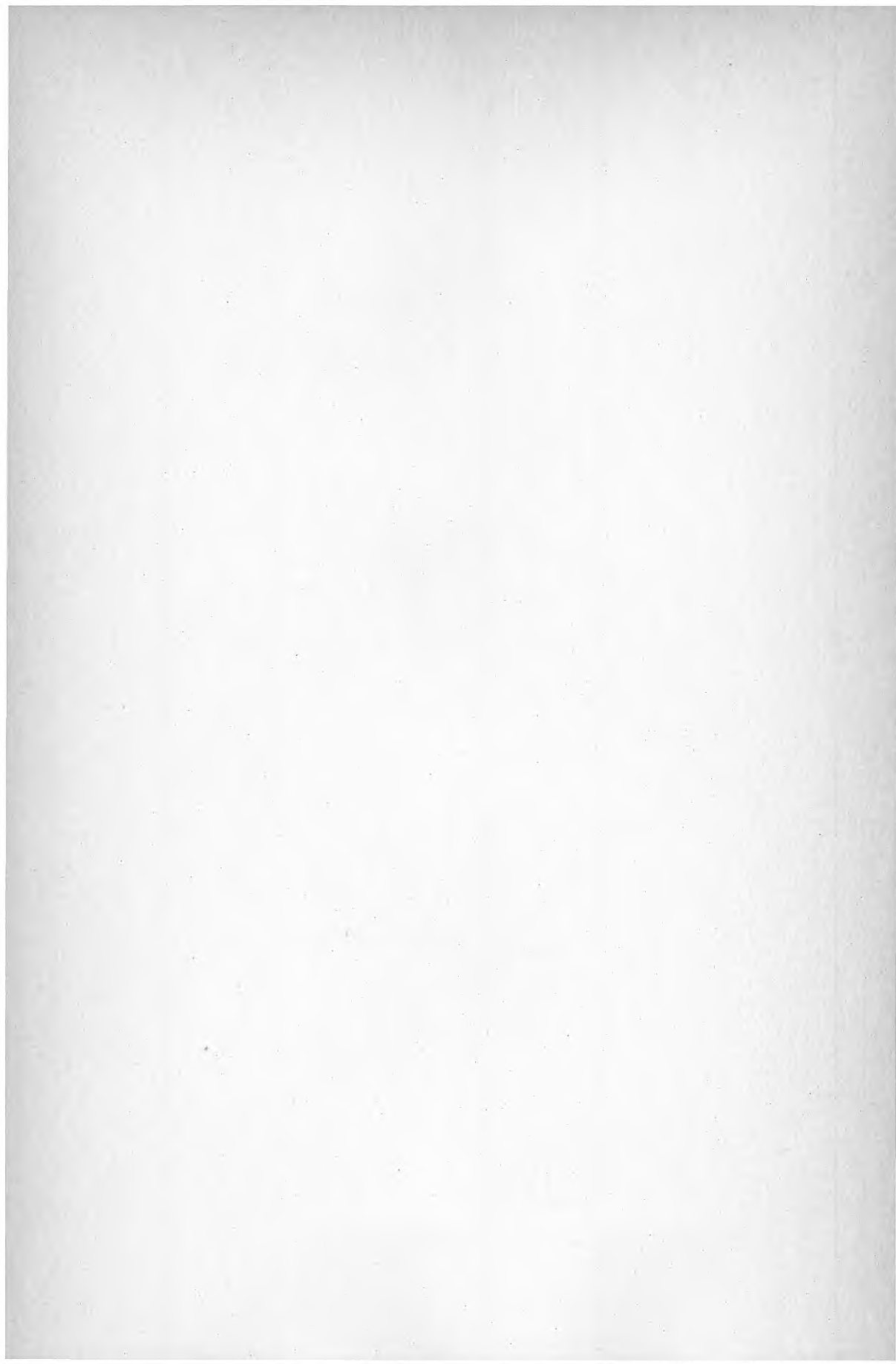
Carlsson, B & Wettermark, G, 1980, Heat-Transfer Properties of a Heat-of-Fusion Store Based on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Solar Energy 24, p 239.

Carlsson, B, 1980, Calculation of the Thermal Performance of a Heat-of-Fusion Storage Unit Based on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Intern rapport från institutionen för Fysikalisk Kemi KTH.

Isakson, Per, 1978, Plana termiska solfångare. En fysikalisk bakgrund. BFR-rapport R35:1978.

Widegren, Karin, 1977, Möjlig användning av solfångare i befintlig stadsbebyggelse - en inventering. BFR Rapport R86:1977.







**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
781541-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till VBB AB, Stockholm.**

R21: 1981

ISBN 91-540-3449-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700321

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirka pris: 35 kr exkl moms