



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

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



Rapport

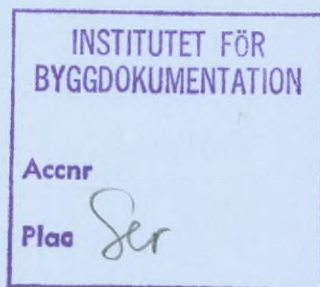
R86:1987

Lyckeboprojektet, solfjärrvärme med säsongslagring i bergrum

**Utvärderingsresultat och
driftserfarenheter**

**Christer Brunström
Carl-Gunnar Hillström**

R/And



Byggeforskningsrådet

R86:1987

LYCKEBOPROJEKTET,
SOLFJÄRRVÄRME MED SÄSONGLAGRING I BERGRUM
Utvärderingsresultat och driftserfarenheter

Christer Brunström
Carl-Gunnar Hillström

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 850832-6
från Statens råd för byggnadsforskning till Stiftelsen
Bergteknisk forskning, Stockholm.

REFERAT

Den första etappen av forsknings- och utvärderingsarbetet avslutades i juli 1986. I rapporten redovisas de viktigaste resultaten och erfarenheterna från projektet fram till denna tidpunkt.

Tillgängligheten för distribuerad värme till fjärrvärmenätet har varit 100 %. Utbytet från solfångarfältet uppfyller ställda krav och systemet i övrigt motsvarar förväntningarna.

Värmeförlusterna från lagret har hittills varit högre än förväntat. Olika möjliga förklaringar till och åtgärder mot detta utreds för närvarande.

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

R86:1987

ISBN 91-540-4788-9
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

Svenskt Tryck Stockholm 1987

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	4
1 BAKGRUND	5
1.1 Allmänt	5
1.2 Solvärme med säsongslager	5
2 UTVÄRDERINGENS MÅLSÄTTNING OCH UPPLÄGGNING	6
3 SYSTEMBESKRIVNING	7
3.1 Allmänt	7
3.2 Driftstrategier	8
4 DRIFTSERFARENHETER	10
5 PRESTANDA	11
5.1 Totalsystemet	11
5.2 Solfångarsystemet	13
5.3 Värmelagret	16
6 OMGIVNINGSPÅVERKEN	19
6.1 Bergstabilitet	19
6.2 Geohydrologi	20
6.3 Vattenkemi	21
6.4 Vegetation	22
7 FRAMTIDA SYSTEM	23
7.1 Systemsimuleringar	23
7.2 Ekonomi	25
8 FORTSATT UTVÄRDERING	27
9 REFERENSER	28
9.1 Referenser, Lyckeboprojektet	28
9.2 Referenser, övrigt	29

SAMMANFATTNING

Lyckeboanläggningen representerar en brytpunkt i utvecklingen av solvärmesystem med säsongslager, såväl tekniskt som ekonomiskt. Anläggningen uppfördes i syfte att utveckla, demonstrera och utvärdera ett storskaligt 100% solvärmebaserat fjärrvärmesystem i kombination med hetvattenlager i öppet berggrund. Den första etappen av forsknings- och utvärderingsarbetet avslutades i juli 1986 och de viktigaste resultaten och erfarenheterna från projektet fram till denna tidpunkt sammanfattas i föreliggande rapport.

Tillgängligheten för distribuerad värme till fjärrvärmenätet blev 100%. Utbytet från solfångarfältet uppfyller ställda krav och systemet i övrigt motsvarar förväntningarna. Tillgång till höga temperaturer i ett solvärmelager säkerställs om en bra skiktning av lagringsvattnet upprätthålls. Den naturliga skiktningen har i Lyckebo hjälpts upp med de rörliga teleskopprören som utnyttjas vid in- och urlagringen. Värmeförlusterna från lagret har hittills varit högre än förväntat. Olika möjliga förklaringar till och åtgärder mot detta utreds för närvarande.

En omfattande kartläggning av spricksystem och vattenföring i berget runt lagret har genomförts. Förändringar som ägt rum sedan berggrundsvattnet värmts till 90°C är mindre väl kända. Sådana förändringar kan vara en förklaring till förhöjda förluster. Flera förlopp i anslutning till ett säsongslager med hetvatten är långsiktiga. Detta gäller till exempel värmeförluster, bergstabilitet, vattenkemi och vegetationspåverkan. Några förändringar i lagrets omgivning med avseende på dessa faktorer har inte kunnat påvisas under den korta drifttid som varit.

Ett solvärmesystem med säsongslager kännetecknas av relativt höga investeringskostnader. Betydande kostnadsreduktioner på komponenter och system har emellertid uppnåtts under de senaste åren. Denna utveckling har skett med bibehållna prestanda och parallellt med ett ökat systemkunnande. Sammantaget innebär detta att det idag, 1987, är möjligt att bygga solfjärrvärmesystem med hög teknisk kvalitet och med betydligt bättre ekonomi än när Lyckeboanläggningen uppfördes. Studier har visat att en värmekostnad på drygt 40 öre/kWh kan klaras i system med 70 till 80% soltäckning. Detta är fortfarande något högre än konkurrerande alternativ, t.ex ett oljebaserat system, men får anses mycket lovande inför framtiden.

Den intensivaste etappen av forsknings- och utvärderingsarbetet med Lyckebo avslutades i juli 1986. De långsamma förlopp, speciellt utvecklingen av värmeförlusterna, som är förknippade med denna typ av system motiverar en fortsättning i någon form. Lyckeboanläggningen kommer även i fortsättningen att utnyttjas för att ge ökade kunskaper inom solvärme- och lagringsområdet.

1 BAKGRUND

1.1 Allmänt

Lyckebo solvärmeanläggning uppfördes i syfte att utveckla, demonstrera och utvärdera ett storskaligt fjärrvärmesystem baserat till 100% på solvärme med säsongslager i öppet bergrum. Anläggningen, som baseras på svensk teknik och svenskt kunnande inom solvärmeområdet, är unik i sitt slag och har rönt ett mycket stort internationellt intresse.

Den intensivaste etappen av forsknings- och utvärderingsarbetet med Lyckebo avslutades i juli 1986. I denna rapport sammanfattas de viktigaste resultaten och erfarenheterna från denna etapp av projektet. I texten refereras till detaljredovisningar och analyser som presenterats fortlöpande i rapporter och konferensbidrag från respektive delprojekt.

Uppsala Energi AB initierade Lyckeboprojektet och är beställare. Projektets start, från idé till idrifttagning har tidigare presenterats (ref. 1-3) liksom medverkande organisationer och företag (finansiärer, leverantörer, entreprenörer). Forsknings- och utvärderingsprogrammet har bekostats av BFR och av Vattenfall.

1.2 Solvärme med säsongslager

Lärdommar och erfarenheter från tidigare stora experimentbyggda solvärmeanläggningar och lagringsprojekt, t.ex. Lambohovprojektet, Ingelstadsprojektet och försökanläggningen i Avesta för hetvattenlagring, spelade en viktig roll vid projekteringen av Lyckebosystemet. Detta ledde till att en väl fungerande anläggning med goda prestanda kunde konstrueras. Även ekonomiskt representerar Lyckebo en brytpunkt i utvecklingen av solvärmesystem genom att såväl lager- som solfångarkostnaden blev avsevärt lägre än i föregående projekt. En utförligare genomgång av svenska befintliga solvärmeanläggningar ges i (ref. 24) tillsammans med allmänna synpunkter på dimensionering och systemuppbyggnad. Anläggningsdata och resultat från Avestaprojektet har publicerats i flera rapporter, t.ex. (ref. 25, 26).

För fjärrvärmeproduktion kan c:a 10% av lasten täckas med solvärme utan lagring. I detta fall konkurrerar emellertid solvärmens med billig sommarvärme. För att täcka en större andel krävs lagring, för hög soltäckning säsongslagring. Det billigaste alternativet idag för detta ändamål, för höga temperaturer i stora system, är oisolerade bergrum. Temperaturnivån i fjärrvärmesystem är förhållandevis hög. Storskalig introduktion av solenergi i befintliga svenska fjärrvärmesystem kräver att solfångare och lager kan användas vid höga temperaturer. För att kostnader för lagret skall kunna hållas låg måste vidare temperaturdifferensen mellan topp och botten hållas så hög som möjligt. Av dessa skäl testas i Lyckebo produktion och lagring av solvärme vid temperaturer upp till 95°C. Det nybyggda området, som försörjs med värme, är konstruerat för låga temperaturer på fjärrvärmevattnet så att returtemperaturen blir så låg som möjligt.

2. UTVÄRDERINGENS MÅLSÄTTNING OCH UPPLÄGGNING

Till projektet har knutits en forsknings- och utvärderingsgrupp som har till uppgift att genomföra en teknisk utvärdering av systemfunktionen och att skapa underlag för en bedömning av teknikens konkurrenskraft nu och i framtiden. Vidare skall den kontrollera vattenlagrets inverkan på bergstabiliteten, på grundvattnet och den yttre miljön.

I gruppen svarar Vattenfalls Älvkarlebylaboratorium för den tekniska utvärderingen hos energiförsörjningssystemet och då i första hand bergrumslagret. Studsvik Energiteknik AB ansvarar för utvärdering och analys av solfångaranläggningen. Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) studerar bergstabiliteten. VIAK i Göteborg ansvarar för de geohydrologiska undersökningarna och Firma Markplan i Uppsala har dokumenterat vegetationen på värmelagret. Datorbaserade systemberäkningar och värmeförlustberäkningar har utförts vid Studsvik och vid CTH/Installationsteknik samt i samarbete med Lunds Tekniska Högskola. Detaljerade program för respektive delprojekt har tidigare redovisats (ref. 1).

Utvärderingsresultat har regelbundet diskuterats vid mät- och utvärderingsmöten med representanter från de olika delprojekten. Aktiva deltagare vid dessa möten har även Uppsala Energi varit, som där delgivit erfarenheter från drift och underhåll. VIAK i Gävle svarar för forskningssamordning och tillsammans med Älvkarlebylaboratoriet för totalutvärderingen i denna rapport.

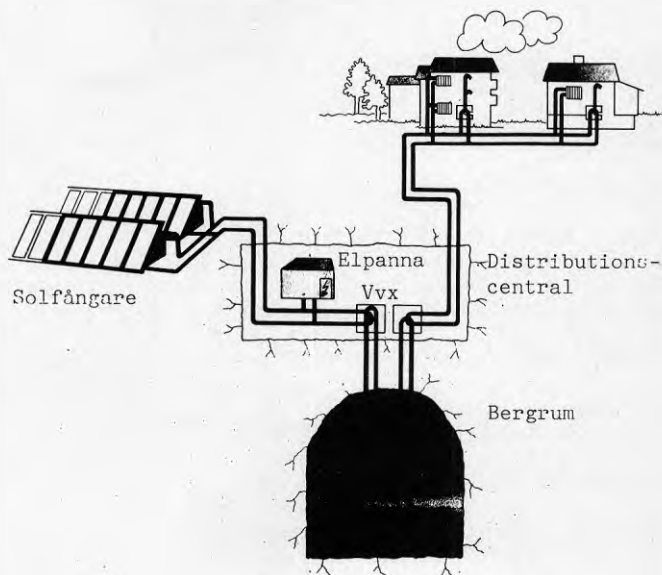
3 SYSTEMBESKRIVNING

3.1 Allmänt

Lyckebo är beläget i Storvreta samhälle 13 km norr om Uppsala. Solvärmeanläggningen byggdes under perioden 1981 till 1983 och från september 1983 sker värmeförsörjningen i området från värmelagret.

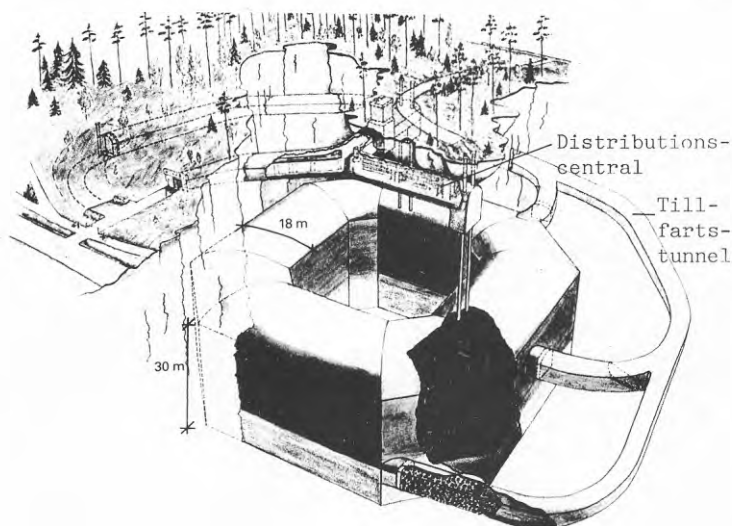
Anläggningen är dimensionerad för att försörja 550 lägenheter och småhus i ett nybyggt bostadsområde med värme och tappvarmvatten. Området är idag utbyggt till 425 bostadsenheter. Värmeförsörjningen sker via ett separat fjärrvärmesystem som arbetar vid låg temperatur, max 70°C under vintern och max 55°C under sommaren.

Systemet består av solfångarfältet med högeffektiva plana solfångare, ett berggrum på 100 000 m³ för säsongslagring och distributionssystemet, figur 3.1. Under en första etapp av projektet har 4 320 m² solfångare installerats. Detta motsvarar 15% av den erforderliga ytan för att täcka hela lasten. Den återstående solfångarytan simuleras med en 6 MW elpanna. Samma elpanna kan även utnyttjas som tillsatsvärmekälla om sådan behövs.



Figur 3.1 Principschema för Lyckebosystemet.

Solfångarna lutar 42° mot horisontalplanet och är riktade mot söder. Det oisolerade berggrummet, vars hjässa är belägen 30 m under markytan, är ringformat med ytterdiametern 75 m, bredden 18 m och höjden 30 m, figur 3.2. Lagret är temperaturskiktat och värme lagras och urlagras på den nivå i lagret där motsvarande temperatur som produceras respektive krävs i lasten finns. Detta åstadkoms med två uppsättningar dubbla höj- och sänkbara teleskopprör. Detaljerad teknisk information för solfångarfält, lager och system har presenterats i flera rapporter, (ref. 1, 4,5).



Figur 3.2 Värmelagret

3.2 Driftstrategier

För styrning, reglering och övervakning av Lyckebosystemet installerades ett datorbaserat styrsystem. Detta innehåller 14 renodlade, delvis kombinerbara, driftfall (ref. 1). Ett teleskopprör i varje par jobbar mot övre halvan av lagret medan det andra jobbar mot nedre halvan. Detta erfordrar t.ex för laddning av lagret två olika driftfall. Då lagret är mindre än halvfullt sker laddningen via ena paret av teleskopprör medan för mer än halvfullt lager sker laddningen via de nedre teleskopprören i respektive par.

Elpannan regleras så att ett solfångarfält med totalt 29 000 m² solfångare med prestanda enligt de installerade modulerna simuleras. Baserat på erhållen värme och temperatur från det installerade solfångarfältet under dagen styrs värmeproduktionen från elpannan under efterkommande natt. Korrekt värmeproduktion har prioritet före korrekt temperatur. I fall då eftersläpning för elvärme uppstår ackumuleras detta och avräknas snarast möjligt. Elpannan kan även utnyttjas som tillsatsvärmekälla om sådan behövs.

Som värmebärare i solfångarkretsen utnyttjas en 50% lösning med vatten och propylenglykol. Dimensionerande temperaturhöjning i kretsen är ca 40°C och värmeväxlingen mot mellankulverten sker med en plattvärmväxlare. Flödet i solfångarkretsen och i inlagringskretsen styrs inom ett givet område beroende av solinstrålningen. Grundtanken är att producera mesta möjliga vatten vid temperaturnivån 90 till 95°C. Ett driftfall med lägre temperaturkrav utnyttjas under uppvärmningsperioder (morgontimmar) för kretsen liksom för ett vårdriftfall. Olika strategier för hur dessa driftfall skall utnyttjas har testats under åren.

Framledningstemperaturen i distributionsnätet bestäms dygnsvis beroende av aktuell utelufttemperatur. Temperaturen varierar mellan maximalt 70°C under vintern och är som lägst 55°C. Returledningstemperaturen bestäms av abonnenternas värmesystem, där returerna under 40°C har eftersträvats.

4 DRIFTSERFARENHETER

Det första verkliga driftåret, efter en uppvärmningsperiod under 1983, sträcker sig från 1:a april 1984 till 31:a mars 1985. En andra cykel avslutades i mars 1986. Värmeanläggningen har fungerat under dessa två år utan några allvarliga driftavbrott. Tillgängligheten för distribuerad värme till fjärrvärmenätet blev 100%.

Styrning och reglering av elpannan har inte fungerat som avsett. Värmesimuleringen släpade efter och fullbordades under första cykeln först i månadsskiftet oktober/november och under andra cykeln i början av oktober. Inte heller temperatursimuleringen har kunnat uppnås, utan elpannan har ofta levererat värmen vid något för hög temperatur. Dessa förhållanden har försvårat utvärderingen av system- och lagerfunktion.

Anläggningens komplexitet orsakas mycket av solfångarsimuleringen med elpanna, och är således inte relevant för framtida solvärmecentraler. Inköringen av alla driftfall var besvärligare och tog längre tid än väntat. Flera av dessa har sedan i praktiken inte utnyttjats. Till exempel har all värmeproduktion skett via lagret och aldrig direkt från solfångare eller elpanna till distributionen.

Frågan om hur lagrets kapacitet skall utnyttjas fullt ut har diskuterats vid ett antal tillfällen. När lagret börjar bli tomt uppstår en konflikt mellan att ta ut så mycket värme som möjligt ur lagret och de marginaler som krävs innan tillsatsvärmning startas för en säker leverans. När lagret börjar bli fullt finns en motsvarande konflikt där inte allt kallt vatten i lagrets botten kan utnyttjas för att säkerställa att kylning för solfångarna finns tillgänglig. Någon strategi för behandling av dessa frågor har ännu inte utarbetats.

Solfångarfältet är inte inhängnat och har periodvis utsatts för sabotage. Täckglas har krossats med sprängsten från en hög placerad allt för lockande i anslutning till fältet. Krossade glas har kunnat bytas utan driftavbrott varför endast försumbara produktionsbortfall har orsakats av detta.

Åska har vi några tillfällen orsakat driftstopp i solfångarfältet. Reglerautomatiken är inte tillräckligt skyddad mot denna typ av störningar. Kokning har ägt rum vid ett antal tillfällen med stilleståndsperioder varierande mellan en dag och två veckor som följd. Halv- eller helt automatisk återfyllning och återstart av solfångarkretsen efter avbrott är en viktig detalj att ta hänsyn till vid konstruktion av stora solfångarfält.

5. PRESTANDA

5.1 Totalsystemet

Mätssystemet har varit i drift sedan april 1984. Här presenterade resultat representerar två årscykler, alltså perioden fram till och med mars 1986. Data har registrerats som timmedelvärden av relevanta effekter, temperaturer, flöden och ventilstatus (ref. 9). Mätningarna har skett via reglerdatorn. Detta har inneburit avbrott vid driftproblem och speciellt under 1:a cykeln i samband med intrimning av driftfall. Vissa perioder har avbrotten varit besvärande långa och därmed påverkat kvalitén på mätresultaten. Saknade och felaktiga timvärden i databasen har som regel ersatts med motsvarande månadsmedelvärde för aktuell timme.

Prestanda för anläggningen har presenterats i en slutrapport för första årscykeln (ref. 9) samt i ett flertal konferensbidrag och artiklar, (ref. 5-8, 10-14). Den uppmätta värmebalansen från de första två årscyklerna summeras i Tabell 5.1.

Tabell 5.1 Årlig värmebalans för systemet

	1984/85 (GWh)	1985/86 (GWh)
Distribution	7.91	8.10
Solvärme - solfångare	1.24	1.27
- simulering	7.72	7.38
Tillsatsvärme	3.02	2.00
Värmeförluster	3.14	3.01
Ökat/minskat värmeinnehåll i lagret	+0.93	-0.46

Motsvarande årsmedeltemperaturer för laddning och urladdning av lagret uppmätt på båda sidor om bergrumsvärmeväxlaren summeras i Tabell 5.2. Tabellen visar energiviktade framledningstemperaturer, T_e , definierade enligt

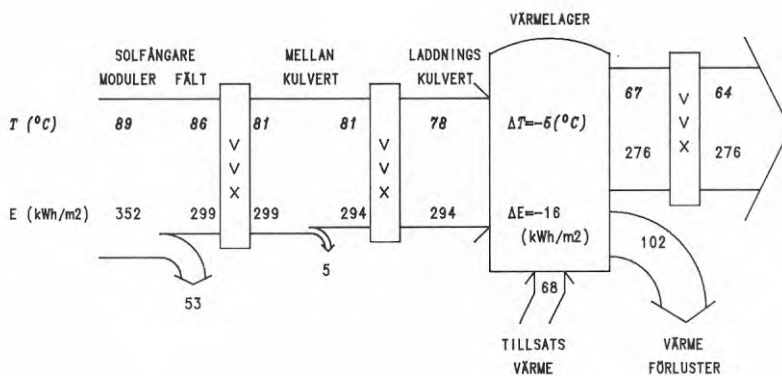
$$T_e = \frac{\sum_j T_j \cdot E_j}{\sum E_j}$$

med T_j och E_j som sammanhörande temperatur och energi för uppmätta timmedelvärden. Av tabellerna framgår att värmeinnehållet i lagret och därmed medeltemperaturen är olika vid början respektive vid slutet av en årscykel.

Tabell 5.2 Årsmedelvärden av leveranstemperatur, primär- och sekundärsida av bergrumsvärmeväxlaren

	1984/85		1985/86	
	prim.	sek. (°C)	prim.	sek.
Laddning, solfångare	72	68	81	78
" elpanna	88	84	88	85
Urladdning, distribution	64	66	64	67
Ökad/minskad medeltemperatur i lagret		+7		-5

Energi- och temperaturflödet genom Lyckebosystemet, från solfångarmodulen ner till lagret och ut till distribution, för en solig timme, ett soligt dygn samt för en hel månad har redovisats i (ref. 13). Analysen visade på oväntat stora värmeförluster i solfångarfältets distributionssystem, samt på ett onödigt stort temperaturfall över värmeväxlaren vid solfångarfältet. Figur 5.1 visar motsvarande resultat summerat för hela 2:a årscykeln. Årsutbytet och temperatur ut från solfångarmodulerna har härvid uppskattats utgående från mätningar under septemner 1985 (ref. 8) kompletterade med mätningar under sommaren 1986 (ref. 17). Observeras bör också att lagerförlusternas andel av produktionen gäller uppmätta värmeförluster. Alltså vid en högre lagertemperatur och en längre laddningsperiod än vad solfångarutbytet motiverar (orsakad av problemen med simuleringen). Slutligen bestäms distributionstemperaturen av lastens lågtemperaturkaraktär. En högre temperatur vore möjlig att utnyttja från lagret. Totalsystemets verkningsgrad, distribuerad värme i förhållande till primärt producerad värme, blev för andra årscykeln enligt figur 5.1 66%.



Figur 5.1 Värmefflöde och temperatur från solfångarmodul via lager till last för 2:a årscykeln.

5.2 Solfångarsystemet

Detaljerad registrering av solfångarfältets prestanda pågick från juli 1983 fram till december 1985. Timmedelvärden av data för solfångarfältet samt meteorologiska data samlades in (ref. 14). Resultaten har distribuerats i månadssammanställningar samt i sammanfattande årsrapporter (ref. 15, 16). Mätningarna har även utnyttjats för garantiutvärderingen av solfångarfältet.

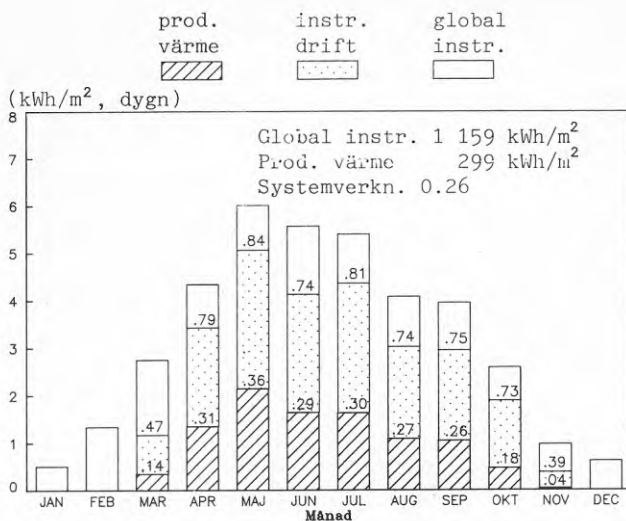
Årsresultaten för 1984 och för 1985 sammanfattas i Tabell 5.3. Den högre solfångartemperaturen under 1985 erhöles genom en ändring av reglerstrategin och borde lett till något lägre värmeproduktion från solfångarna jämfört med 1984. Att så inte blev fallet förklaras av att solinstrålningen var extremt låg 1984. Den uppmätta värmeproduktionen ligger inom, för 1985 väl inom, föreskrivna intervall. Det höga temperaturfallet över värmeväxlaren förklaras av en ogynnsam flödesfördelning som följd av den flödesstyrning som används. I figur 5.2 visas hur solinstrålningen och solvärmeproduktionen är fördelad mellan olika månader 1985. Verkningsgraden är högst i maj och avtar sedan på grund av stigande temperatur i lagret.

Tabell 5.3 Årsresultat för solfångarsystemet

	1984		1985	
Instrålning solf.plan, MWh/m ²	1.00		1.16	
Värmeproduktion, kWh/m ²	291		299	
Utelufttemp, °C (mars-nov.)				
- dygn	7.8		5.9	
- under drift	13.8		12.7	

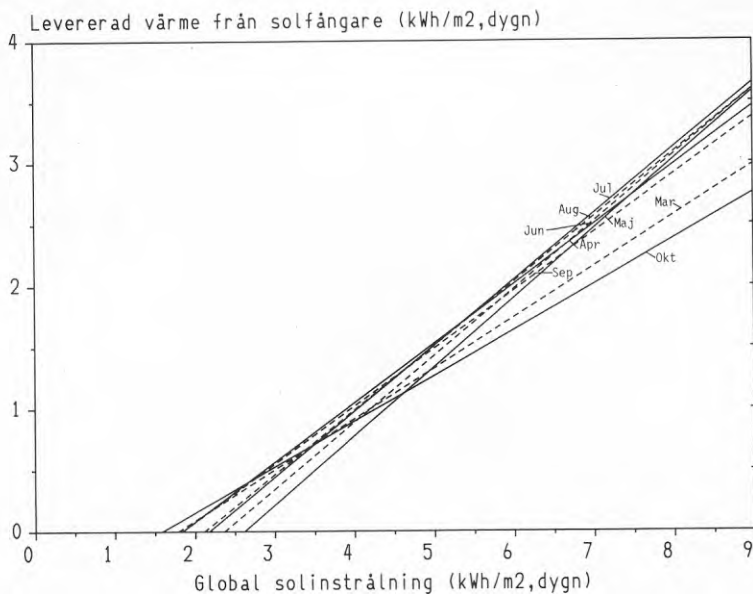
	prim. sek.		prim. sek.	

Temp vvx, °C (mars-nov.)				
- tidsmedel, drift	53	47	60	54
- tidsmedel, framledning	63	59	70	65
- energivikt., drift	62	55	68	61
- energivikt., framledning	76	70	84	78



Figur 5.2 Månadsvis instrålning och producerad solvärme, 1985.

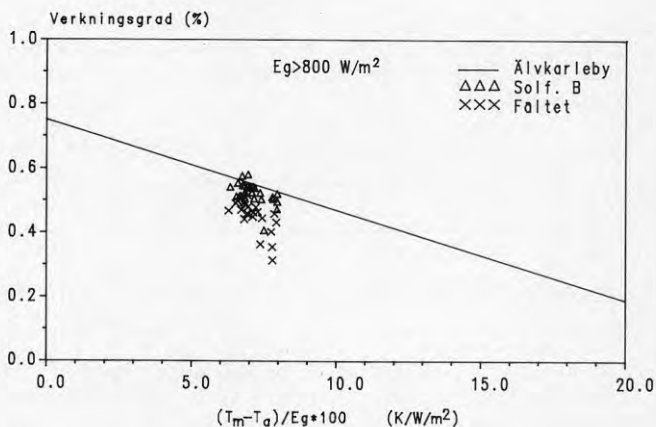
Figur 5.3 visar input/output karakteristiken för solfångarfältet, med regressionslinjer för dygnsvärden månadsvis för perioden mars till oktober 1985. Linjerna för april till september har alla nästan samma lutning. Avvikelserna för mars och oktober beror på solfångarnas driftvillkor, främst lägre lufttemperatur men även skuggning i fältet under oktober.



Figur 5.3 Månadsvis input/output karakteristik, mars till oktober 1985.

Inkopplingen av solfångarmodulerna till en gruppsslinga är i Lyckebo gjord enligt s.k. Tischerman-koppling. Den principen skall ge likvärdiga tryckfall över modulerna och därmed en jämn flödesfördelning. Manuella avläsningar av uttemperaturen från varje kollektorrad har också visat på en mycket jämn fördelning i fältet.

Under september 1985 och sommaren 1986 har Älvkarlebylaboratoriet kompletterat mätningarna på solfångarfältet med en detaljerad studie av prestanda för enskilda solfångarmoduler och förluster i fältets distributionsystem. Resultaten visade på betydligt större distributionsförluster inom fältet än förväntat (ref. 8, 17). Enskilda moduler uppvisade prestanda i överensstämmelse med momentana verkningsgrader för solfångaren uppmätt i laboratorium (ref. 27), figur 5.4. Verkningsgraden för hela fältet ligger emellertid betydligt lägre och integrerat över en länge period är fältförlusterna cirka 15%. Det vill säga 15% av solfångarnas värmeproduktion går förlorad i systemdynamik och via värmeförluster huvudsakligen i den otillräckligt isolerade luftförlagda kulverten. Föreskrivet utbyte från solfångarfältet har emellertid uppnåtts trots de stora förlusterna.



Figur 5.4 Momentan verkningsgrad för Lyckebo-solfångaren uppmätt i Älvkarleby jämfört med mätpunkter (timmedelvärden) för solfångarmodul och för hela fältet i Lyckebo.

5.3 Värmelagret

Lagrets termodynamiska prestanda kan beskrivas med en verkningsgrad η enligt (ref. 28),

$$\eta = \eta_E \eta_T$$

där η_E är energiverkningsgraden och η_T är temperaturverkningsgraden enligt,

$$\eta_E = \frac{E_i - E_f}{E_i} \quad \eta_T = \frac{T_u - T_g}{T_i - T_g}$$

E_i = inlagrad värmemängd under en cykel

E_f = lagrets värmeförluster under samma cykel

T_i, T_u = medeltemperatur, energiviktad, av iladdad resp. urlagrad värme

T_g = lagrets ostörda omgivningstemperatur, 6.5°C för berget i Lyckebo.

Med resultat enligt Tabell 5.1 och Tabell 5.2 och utan kompensering vid beräkning av η_T för förändrad medeltemperatur i lagret erhöles för de två årscyklerna verkningsgrader enligt Tabell 5.4.

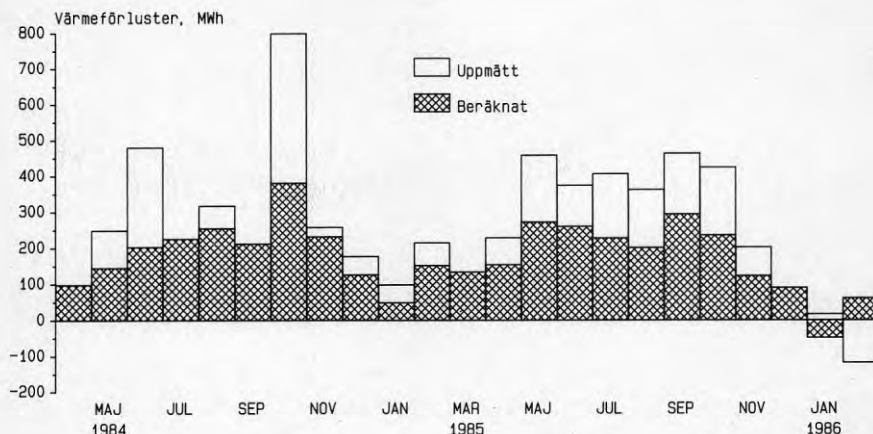
Tabell 5.4 Årsverkningsgrader för värmelagret.

År	η_E	η_T	η
1984/85	0.74	0.78	0.58
1985/86	0.72	0.78	0.56

Behovet av tillsatsvärme i anläggningen kommer successivt att avta. De höga värmeförlusterna från lagret förväntas minska avsevärt under de kommande åren när omgivande berg har blivit uppvärmt. Den relativt blygsamma minskningen från första till andra årscykeln förklaras av en ökning med cirka 6°C av årsmedeltemperaturen i lagret. Detta temperaturberoende för lagerförlusterna har också bekräftats med datorsimuleringar.

De uppmätta förlusterna enligt Tabell 5.1 är emellertid betydligt högre än vad som förväntas från datorberäkningar. I figur 5.5 jämförs månadsvis uppmätta värmeförluster med beräknade under de två årscyklerna. Uppmätta förluster har erhållits genom att subtrahera månadssummor av urlagrad värme och förändrat värmeinnehåll i lagret från ilagrad värme under månaden. Det bör noteras att även vid små mätfel kan detta förfarande ge upphov

till stor relativ onoggrannhet för resultatet. Datorberäkningar har utförts med program utvecklade vid Lunds Tekniska Högskola (ref. 29). Förutsättningarna är värmeledning, $\lambda=3.1 \text{ W/m,K}$, i berget vid cylindrisk geometri, baserat på dygnsvis uppmätta temperaturer för vattnet i lagret.



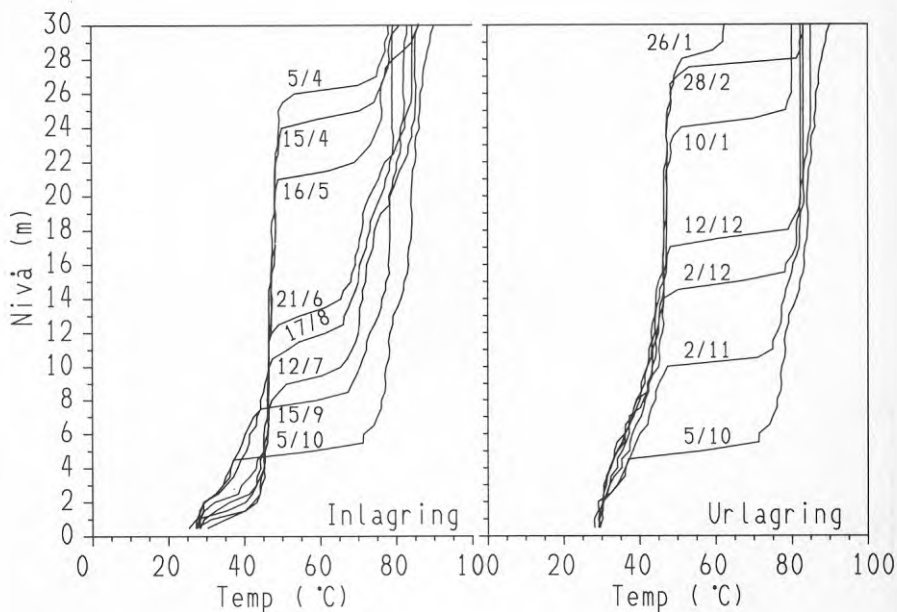
Figur 5.5 Månadsvis uppmätta och beräknade värmeförluster från lagret.

Orsaken till den stora skillnaden mellan uppmätta värmeförluster och vad som förväntas från värmeledning kommer att utredas i en fortsättning av Lyckeboprojektet. Tänkbara förklaringar som studeras är,

- Konvektiva förluster via sprickor i det omgivande berget. Hett vatten antas lämna lagret i toppen på bergrummet och via den vattenfyllda transporttunnel som omger bergrummet ersättas av svalare vatten längre ner. Tunneln behövdes under byggnadsperioden och utnyttjas idag som expansionskärl för lagringsvattnet genom en anslutning mellan botten på bergrummet och tunneln.
- Osäkerheter i beräkningsförutsättningarna. Speciellt bergets värmekonduktivitet och extra förluster från teleskopörsschakt och transporttunneln.
- Grundvattenrörelser.

Som jämförelse kan nämnas att för värmelagret i Avesta, helvattenlagring i 15 000 m³ oisolerat bergrum, erhöles en mycket god överensstämmelse mellan uppmätta och beräknade värmeförluster (ref. 26). Samma typ av beräkningsprogram och principiella utvärderingsmetoder har utnyttjats inom de båda projekten.

En bibehållen temperaturskiktning i lagret har garanterats med hjälp av de rörliga teleskopsrören. Levererad temperatur från solfångarfältet placeras med hjälp av dessa alltid på rätt temperaturnivå i lagret, varvid omblandning undviks. Den goda skiktningen framgår av figur 5.6 som visar några utvalda temperaturprofiler för berggrumsvattnet från i- och urladdningsfaserna under den andra årscykeln.



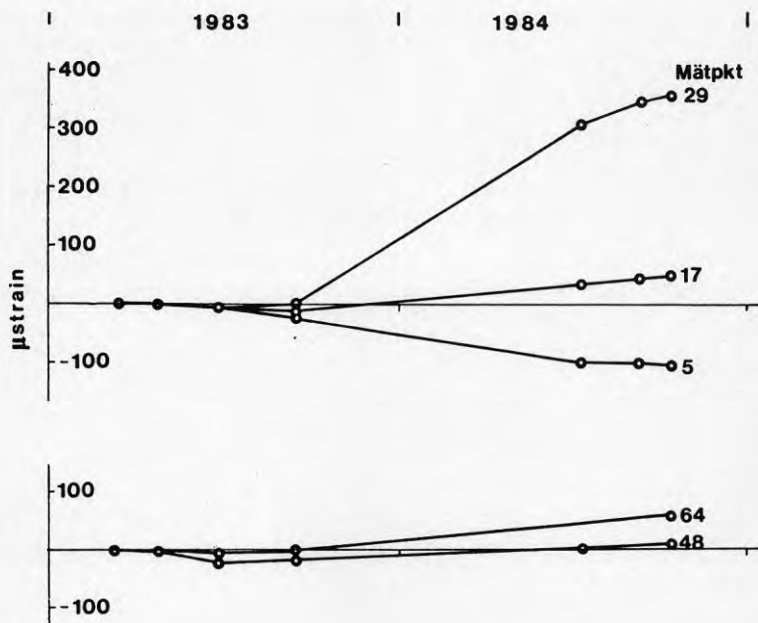
Figur 5.6 Representativa temperaturprofiler för berggrumsvattnet från den andra årscykeln.

6 OMGIVNINGSPÅVERKAN

6.1 Bergstabilitet

De bergmekaniska studierna i Lyckebo omfattar huvudsakligen registrering av deformationer i två mäthål i anslutning till lagret. Frågeställningarna är av samma karaktär som i Avesta-projektet där ett mer omfattande forskningsprogram rörande bergtekniska frågor har genomförts (ref. 25). De begränsade insatserna i Lyckebo skall endast ses som ett komplement till dessa studier.

Mätningarna av termiska deformationer av berget har koncentrerats till det som är unikt för Lyckebolagret, nämligen mittpelaren. Två mäthål borrades från markytan. Det ena rakt över hjässan av bergrummet och det andra genom hela pelarens höjd. En utförlig beskrivning av mätprogram samt en redogörelse av erhållna resultat från perioden april 1983 till oktober 1984 har givits i (ref. 18, 19). Töjningen är försumbar genom hela pelaren utom i ett begränsat område strax ovan bergrummets hjässan, där en mycket kraftig expansion ägt rum. Denna expansion har fortsatt under mätperioden, figur 6.1, och hänför sig av allt att dömma till ett sprickplan. Mycket stora deformationer (10 till 15 mm) har uppmätts inom en zon av 1-2 m tjocklek i båda mäthålén.



Figur 6.1 Töjningar vid några valda nivåer i mäthålét genom pelaren som funktion av tiden. De tre övre kurvorna hänför sig till punkter ovanför hjässans nivå på avstånden 5, 17 och 29 m från markytan. De två undre till punkter i själva pelaren på avstånden 48 och 64 m från markytan. De stora töjningarna i zonen mellan 31 till 35 m från markytan har här undvikits.

Frågan om den typ av stora deformationer som erhållits ovanför bergrummet kan vara allvarlig för bergets stabilitet är svår att besvara. En tillförlitlig bedömning kräver cirka 15 års mätningar för denna typ av lager. Läget för dagen ger emellertid ingen orsak till oro för bergstabiliteten så länge inga ytterligare deformationer uppstår. Sprickplanets inverkan på konvektiva värmeförluster genom grundvattenrörelser är trolig, och bör utredas inom ramen för fortsättningen av projektet.

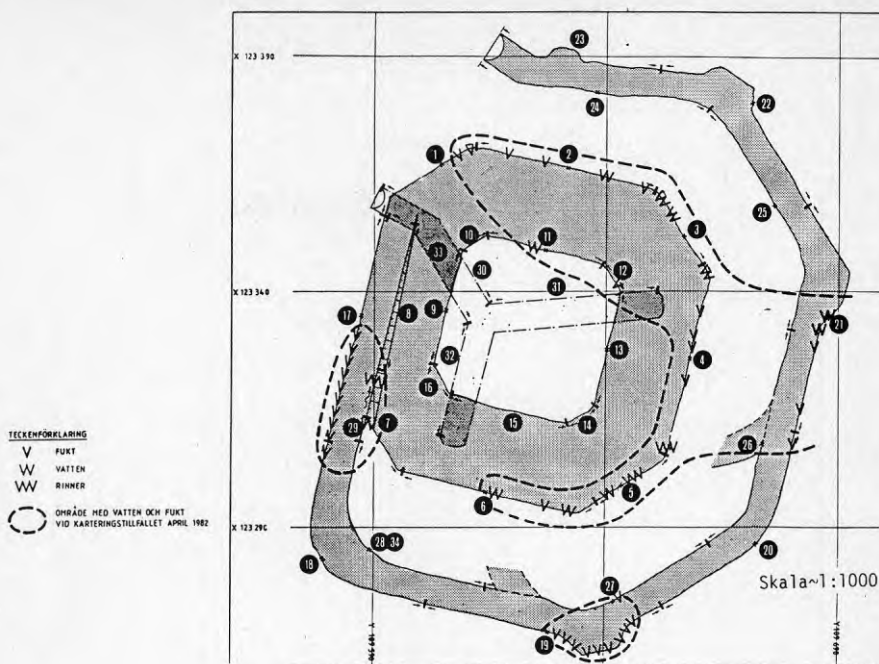
6.2 Geohydrologi

Geohydrologiska förundersökningar utfördes för tre bergplintar i Lyckebo. Bergrummet utfördes inom en plint med mycket gott berg och mycket litet inläckage. Efter färdigställandet utfördes en omfattande sprickkartering i bergrummet. En strukturerad sammanfattning av de geohydrologiska förundersökningarna, undersökningar under byggandet samt en jämförelse mellan prognos och verkligt utfall har tidigare redovisats (ref. 20).

I figur 6.2 visas resultat från kartering av vatteninläckage och fukt i det färdigbyggda bergrummet. Berget är, som tidigare nämnts, av mycket god kvalitet, men innehåller också partier med bredare eller smalare zoner av dåligt berg. Vatten och fukt har huvudsakligen påträffats på östra bergrumsväggen samt på västra, södra och östra transportväggen. Inläckaget uppmättes vid färdigt bergrum till cirka 110 l/min, vilket var något lägre än förväntat.

Grundvattenflödet genom bergrumspintan är mycket begränsat. Flödet har utgående från provpumpningsdata beräknats till cirka $3 \cdot 10^{-5}$ m³/s. Om trycket i det vattenfyllda bergrummet hålls vid den naturliga grundvattennivån, kommer därmed grundvattenflödet genom plinten att vara begränsat. Vattenföringen runt bergrummet påverkas även av i vilken utsträckning plinten dränerats i samband med utsprängningen. Slutligen är eventuella förändringar av bergets geohydrologiska egenskaper orsakat av temperaturcyklingen i lagret idag okända.

Värmeledningsförmågan λ hos berget runt värmelagret bestämdes utgående från mineralsammansättningen tagen från en borrhärla. Det sammanvägda resultatet blev $\lambda=3.1$ W/m,K.



Figur 6.2 Resultat från kartering av vatteninläckage och fukt.

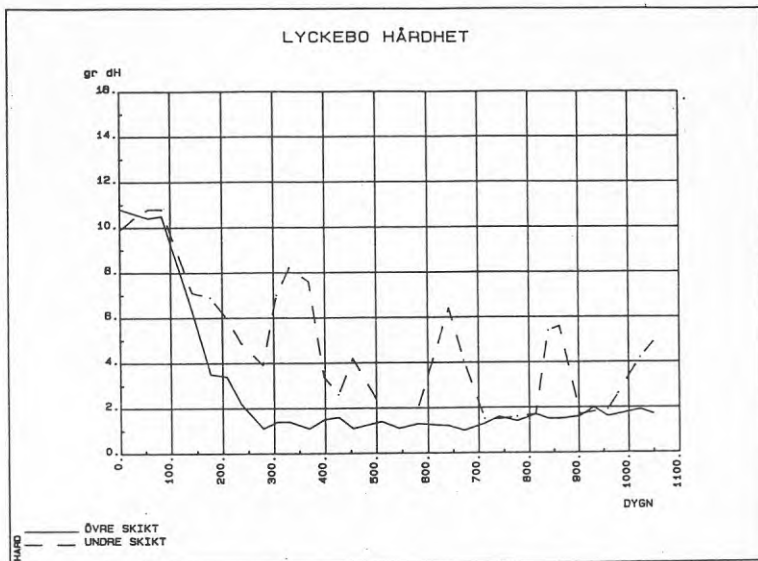
6.3 Vattenkemi

Vattenkemiska prover har uttagits på ackumulatorvattnet en gång per månad sedan april 1983. Resultaten har därefter sammanställts, analyserats och jämförts med laboratorieundersökningar och med erfarenheter från Avestaprojektet (ref. 21).

Laboratorieförsöken visar på en långsam jonurlakning från granitmaterial men visar också på att en relativt kraftig urlakning sker då betongmaterial reagerar med hett vatten. Uppföljningen i Lyckebo visar att ökningen av vattnets joninnehåll går långsammare än vad som kunde förutses utifrån dessa försök.

Det ursprungliga vattnet innehöll för höga kalciumhalter, vilket omedelbart gav sig till känna som en kalkutfällning i ledningar och värmväxlare under anvärmningsskedet. Efter avhärdning har emellertid inga liknande problem konstaterats.

Med utgångspunkt från det bakgrundsmaterial som insamlats om vattenkemiförändringarna kan det konstateras att det inte finns några tecken som tyder på att dramatiska förändringar kommer att ske inom den närmaste framtiden.



Figur 6.3 Totalt hårdheten på två nivåer i lagret som funktion av drifttiden.

Grundvattnet runt värmelagret innehåller en förhöjd halt av kloridjoner. Genom inläckage till bergrummet av grundvatten ökas även lagringsvattnets kloridhalt. Grundvatteninläckaget avspeglas också på den totala hårdheten, figur 6.3, som speciellt i lagrets undre del varierar kraftigt över året. Variationerna i hårdhet tyder på ett utbyte av vatten mellan lager och omgivning.

6.4 Vegetation

Vegetationen och marktemperaturen på värmelagret har dokumenterats mycket noggrant (ref. 22). Målet är att fastställa vegetationens utbredning, sammansättning och utveckling så att eventuella förändringar i framtiden skall kunna påvisas och analyseras. Provytor har placerats ut på ett sätt så att de förväntas utsättas för ett minimum av slitage från de boende. På detta sätt bör eventuella förändringar orsakade av värmelagret kunna utläsas. Vidare har ett referensområde med likartade förhållanden som över lagret valts ut och dokumenterats på motsvarande sätt.

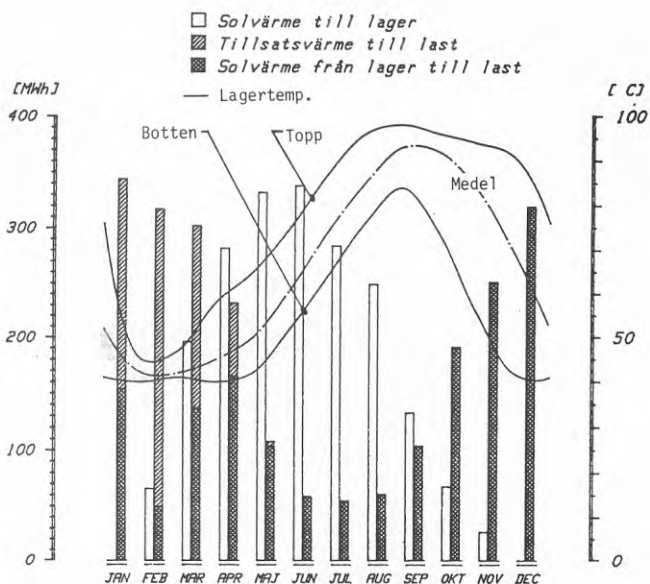
7 FRAMTIDA SYSTEM

7.1 Systemsimuleringar

Inom systemsimuleringsgruppen har främst frågor rörande driftstrategi, dimensionering, lokalisering och kostnadsminimering för solvärmeanläggningar med säsongslager behandlats. Beräkningsresultat har stämts av mot två års mätningar i Lyckebo med två olika simuleringsprogram, MINSUN (ref. 30) som körts vid Studsvik Energiteknik och SIMSYS (ref. 31) vid Avdelningen för Installationsteknik/CTH. Båda programmen visade sig kunna efterlikna de uppmätta förhållandena i Lyckebo mycket väl.

Valet av driftstrategi för ett solfångarfält i kombination med säsongslager står i första hand mellan reglering med konstant flöde eller med variabelt flöde i solfångar- och inlagringskretsen. Ett konstant flöde kan väljas högt eller lågt medan ett variabelt flöde kan regleras mot olika krav på temperatur. Vidare kan in- och utmatning i lagret ske enligt olika principer, till en eller flera fasta nivåer alternativt med t.ex teleskoprör vid "rätt" temperaturnivå. Konstant flöde liksom fasta in- och utmatningsnivåer medför att väsentliga förenklingar i systemuppbyggnad är möjliga. Den detaljerade analysen av dessa alternativ (ref. 24) resulterade i att ett lågt konstant flöde i solfångare- och inlagringskrets är att föredra före ett högt konstant flöde eller ett variabelt flöde. Vidare antyder simuleringarna att en enkel systemlösning med få fasta in- respektive utlopp i lagret är obetydligt sämre än en mer komplicerad. Det konstaterades även att möjligheten till en direkt förbindelse mellan solfångare och värmelast inte är av intresse.

Som ett exempel på simuleringsresultat med SIMSYS visas i figur 7.1 resultat vid konstant flöde för den systemlösning som rekommenderas för framtida projekt (ref. 24). Systemet är obetydligt mer komplicerat än det enklast tänkbara. Inlagring sker vid två nivåer, till toppen om flödet är varmare än toppens temperatur annars till en nivå på 25% av höjden. Urlagring kan på liknande sätt ske från två nivåer. Exemplet gäller en mindre anläggning med isolerat lager, men är i princip också tillämpligt på större system. Klimatet motsvarar medelår i södra Sverige och solfångarna är av plan högeffektiv typ.



Figur 7.1 Värmebehov i lasten, värmeutbyte i solfångarna och temperaturer i lagret för enkel systemlösning vid konstant lågt flöde, medelår i södra Sverige.

Allmänna synpunkter på systemuppbyggnad och dimensioneringskriterier för solvärmecentraler redovisas i (ref. 24), där även anläggningen i Lyckebo kommenteras tillsammans med övriga jämförbara svenska system. Lyckebo systemet dimensionerades för 100% värm täckningsgrad. En solvärmeanläggning med årslager har så höga kapitalkostnader att den måste utnyttjas maximalt under sin livstid, det vill säga all producerad värme måste utnyttjas varje driftsäsong. För att undvika överdimensionering med hänsyn till naturliga variationer i solinstrålning och värmebehov, anses idag att den dimensionerande täckningsgraden bör ligga på högst 80%. Detta då data för ett medelår används. En bättre dimensionering i Lyckebo, baserad på detta samt på de senaste årens utveckling och erfarenheter, skulle kunna se ut enligt nedan.

 Förutsättningar: Enkel systemuppbyggnad

	Värmebehov	8 500 MWh
	Solfångarutbyte	330 kWh/m ² ,år (medeltemp. 70°C)
	Lagerförluster	15% (stationärt tillstånd)
	Värmetäckningsgrad	80%
	Lagringskapacitet	60% (av levererad energi)
Resultat:	Solfångarproduktion	8 000 MWh
	Solfångararea	24 000 m ² (2.8 m ² /MWh last)
	Lagringsvolym, $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$	83 000 m ³ (3.4 m ³ /m ² solfångare)

För att studera inverkan av solvärmeanläggningens lokalisering jämfördes resultat för en anläggning placerad i norra Sverige, Luleå klimat, med samma anläggning och samma typ och mängd av hus anslutna placerad i södra Sverige, Stockholms och Göteborgs klimat. Resultaten visar att för samma anläggning erhålls en väsentligt lägre värmetäckningsgrad i norra Sverige. Detta kompenseras emellertid av en mindre erforderlig lagervolym så att solvärmekostnaden inte blir väsentligt högre. Om dimensioneringen görs för samma täckningsgrad erhålls ett något sämre utbyte och därmed en något högre värmekostnad i norra Sverige.

7.2 Ekonomi

Investeringskostnaden för hela projektet med värmelager, 4 320 m² solfångare, elpanna och distributionssystem uppgick till 39 miljoner kronor 1983. De två huvudposterna i investeringen är bergrummet på 14.5 miljoner och solfångarsystemet på 8.5 miljoner kronor inklusive markarbeten och ställningar. Om solfångarfältet hade byggts ut till 100% hade anläggningen kostat drygt 80 miljoner kronor (ref 1).

Sedan Lyckeboanläggningen byggdes har flera utvecklingssteg tagits inom solvärmeområdet.

- Solfångarpriserna i Sverige har sjunkit med cirka 30% sedan 1982 med bibehållna eller bättre prestanda. Fortsatt utveckling pågår.
- Större lager förbättrar ekonomin för denna del avsevärt. Ett bergrum dubbelt så stort som i Lyckebo kan byggas med 50% ökad investering.

- Förenklad systemuppbyggnad. Utvecklingen sedan Lyckebo har visat att samma utbyte kan erhållas med enklare systemlösning. Vidare bör den dimensionerande solvärmeandelen i anläggningen ligga under 100%, någonstans i intervallet 70 till 80%.

Simuleringsprogrammet MINSUN (ref. 30) är i första hand avsett för kostnadsminimering i stora solvärmesystem. Beräkningar har utförts för två systemstorlekar, samma storlek som i Lyckebo och ett fyra gånger så stort system. Utgångspunkter har varit idag kända kostnader och prestanda för solfångarfält, oisolerade berggrum och system. Vidare har hänsyn tagits till ovanstående förbättringar avseende dimensionering och systemuppbyggnad. Den ekonomiska analysen baseras på annuitet vid 4% real ränta, 40 års avskrivning för lagret, 20 år för solfångarna, 30 år för övrigt samt normala drift- och underhållskostnader.

Datorsimuleringarna resulterade i ett kostnadsminimum vid c:a 80% värm täckning för Lyckeboanläggningen och vid c:a 83% för den större anläggningen (ref. 23). Investeringskostnaden för de två anläggningarna blev 5.7 kr/kWh, år respektive 5.4 kr/kWh, år vilket under angivna förutsättningar ger motsvarande värmekostnader på 0.44 kr/kWh och 0.42 kr/kWh. Prisläge 1986.

Dessa resultat kan jämföras med den förstudie som genomförts för ett solvärmesystem med säsongslager i Kungälv utanför Göteborg (ref 32). Den planerade anläggningen har en värmelast på 52 GWh, till befintlig bebyggelse. Övriga förutsättningar är lagring i oisolerat berggrum, plana högeffektiva solfångare och enkel systemuppbyggnad. Studien resulterade i ett systemförslag med 75% värm täckning och olja för tillsatsvärme. Specifika investeringskostnader och energipriset beräknas till 5.2 kr/kWh, år respektive 0.42 kr/kWh, inklusive kostnader för tillsatsvärmen samt utbyggnad av fjärrvärmesystemet.

Inför kommande projekt inom såväl solvärmeområdet som andra lagringsapplikationer i berggrum är Lyckebo en viktig referensanläggning. Det är därför av stor vikt att anläggningen även i fortsättningen utnyttjas för att ge ökade kunskaper inom dessa områden.

Medel har sökts och beviljats för en fortsatt utvärdering fram till och med 1987-12-31. Det fortsatta projektet avser en begränsad uppföljning av långsiktiga förlopp, till exempel värmeförluster och geohydrologiska förändringar. Vidare skall orsakerna till de stora skillnaderna mellan uppmätta och beräknade värmeförluster från lagret utredas. Målsättningen för denna del är att upprätta en korrekt värmebalans för lagret och att definiera möjliga åtgärder för denna typ av lager. En del av de förhöjda förlusterna kan antas vara tillfälliga och påskynda anvärmningen av omkringliggande berg medan resterande del är av kvarstående karaktär. Även denna fråga kommer att studeras mera ingående.

En annan aktuell fråga som diskuterats för Lyckebo är en utbyggnad av solfångarfältet. En sådan utbyggnad skulle i så fall föregås av en förstudie och därefter drivas som ett eget projekt.

9 REFERENSER

9.1 Referenser, Lyckeboprojektet

1. C.G Hillström, L Åstrand, m.fl, Solvärme med säsongslagring i berg i Lyckebo-från idé till idrifttagning, BFR, R43:1985.
2. L Åstrand, E Kjellsson, Solar district heating in Uppsala, Sweden, Proc. Solar World Congress, Perth, Australia, 1983.
3. E Kjellsson, The Lyckebo project-Solar district heating with seasonal storage in a rock cavern, Proc. the Int. Conf. on Subsurface Heat Storage, Stockholm, Sweden, 1983.
4. P Holst, H Zinko, Performance and operating results for the solar district heating plant at Lyckebo, Uppsala, Sweden, Proc. IEA-Workshop on the design and performance of large solar thermal collector arrays, San Diego, California, 1984.
5. C Brunström, M Larsson, C-G Hillström, The Lyckebo rock cavern seasonal storage, Proc. IEA-Workshop on Solar assisted heat pumps with ground coupled storage, Vienna, Austria, 1985. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 85:3.
6. C Brunström, m.fl, The Lyckebo project-a Swedish central solar heating plant with seasonal storage, Proc. INTERSOL 85, Montreal, Canada, 1985. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 85:13.
7. C Brunström, m.fl, The Lyckebo rock cavern seasonal storage plant-experience of one year of operation, Proc. ENERSTOCK 85, Toronto, Canada, 1985.
8. C Brunström, A-L Merckell, Lyckebo solvärmeanläggning-driftresultat 1984/85, SEAS-konferensen, Stockholm, Sverige, 1985. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 85:26.
9. C Brunström, Lyckebo central solar heating plant-results of first year of operation, final report, Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-A 86:1.
10. H Pilebro, C Brunström, M Larsson, The Lyckebo project-thermal energy storage i a rock cavern, Proc, LRC'86 the Int. Conf. on Large Rock Caverns, Helsinki, Finland, 1986. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 86:15.
11. C-G Hillström, C Brunström, M Larsson, The Lyckebo project-economy and measured performance, Proc. IECEC Thermal Energy Storage Session, San Diego, California, 1986. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 86:5.

12. C Brunström, M Larsson, The Lyckebo rock cavern seasonal storage plant-performance and economy, Proc. ASES Conference, Boulder, Colorado, 1986. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 86:6.
 13. C Brunström, A-L Merckell, M Larsson, The Lyckebo project-thermal performance of system and storage, Proc. North Sun '86, Copenhagen, Denmark, 1986. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 86:4.
 14. C Brunström, Lyckeboprojektet-solfjärrvärme med säsongslagring i bergrum, VVS & Energi, 11/1986.
 15. H Wallestun, P Holst, H Zinko, Performance and operating results for the solar district heating plant at Lyckebo/Uppsala, Sweden, Studsvik report EI-85/46.
 16. H Wallestun, A Östergren, Solfångaranläggning i Lyckebo/Uppsala-resultat för 1985, Studsvik arbetsrapport ED-86/19.
 17. C Brunström, A-L Merckell, (intensivmätningar sommaren 1986, ännu ej sammanställda).
 18. G Rehbinder, Lyckeboprojektet-mätning av bergets töjningar, BeFo 109:2/84.
 19. G Rehbinder, Strains in the rock around an unlined hot water storage cavern, Proc. ENERSTOCK 85, Toronto, Canada, 1985.
 20. G Gustafson, M Liedholm, Lyckeboprojektet-utvärderingsprogram geologi/geohydrologi, BeFo 109:1/84.
 21. T Claesson, H Westas, Värmelager-Lyckebo, utvärdering av förändringar i vattenkemin, BeFo 109:3/86.
 22. Å Nordqvist, Dokumentation av vegetation på värmelagret i Lyckebo/Storvreta/Uppsala kommun, Arbetsrapport F:A Markplan, Uppsala, november 1984.
 23. H Wallestun, MINSUNsimuleringar av Lyckeboanläggningen-systemsimuleringar och kostnadsminimeringar, Studsvik arbetsrapport ED-87/4.
- 9.2 Referenser, övrigt
24. J-O Dalenbäck, Solvärmeteknik i stor skala-synpunkter på systemuppbyggnad och dimensionering, BFR för publicering under 1987.
 25. Beskrivning av anläggning och forskningsprogram, Avesta projektet, rapport nr 1981:1, BeFo.
 26. B Vasseur, Uppmätta och beräknade temperaturer och energiförluster, Avestaprojektet, rapport nr 1986:1, BeFo.

27. C Brunström, B Karlsson, M Larsson, Climatic limitations and collector performance in the middle of Sweden, Proc. North Sun '86, Copenhagen, Denmark, 1986.
28. J Claesson, Thermodynamics of sensible heat storage systems-thermality concept, Dep. of Mathematical Physics, Lund University, Sweden, August 1979.
29. G Hellström, Comparison between theoretical models and field experiments for ground heat systems, Proc. the Int. Conf. on Subsurface Heat Storage, Stockholm, Sweden, 1983.
30. V Chant, R Håkansson, The MINSUN simulation and optimization program application and user's guide, International Energy Agency-Task VII, September 1985, Canada.
31. P-Å Andersson, Å Askling, J-O Dalenbäck, SIMSYS-Simuleringsprogram för värmecentraler med ny energiteknik, Avd. för Installationsteknik, CTH, I24:1986.
32. T Claesson, G Hultmark, T Jilar, Säsongslagrad solvärme i Kungälv-sammanfattning av en förundersökning, BFR, T9:1986.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 850832-6
från Statens råd för byggnadsforskning till Stiftelsen
Bergteknisk forskning, Stockholm.**

R86: 1987

ISBN 91-540-4788-9

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6707086

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirkapris: 30 kr exkl moms