



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.



Solvärme med säsongslagring i berg för 550 lägenheter i Lyckebo, Uppsala

Från idé till idrifttagning

Carl-Gunnar Hillström
Lars Åstrand m fl

K
ark

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

R43:1985

SOLVÄRME MED SÄSONGLAGRING I BERG
FÖR 550 LÄGENHETER I LYCKEBO, UPPSALA

Från idé till idrifttagning

Carl-Gunnar Hillström
Lars Åstrand m fl

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
790348-0 från Statens råd för byggnadsforskning
till Uppsala Kraftvärme AB, Uppsala.

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

Rapportförfattare

Redaktör för rapporten har varit Carl-Gunnar Hillström, för VIAK AB, Falun. Följande författare har medverkat:

Tommy Claesson	CTH Göteborg	Vattenkemiska undersökningar
Gunnar Gustafson Magnus Liedholm	VIAK AB Göteborg	Geologi/Geohydrologi Markundersökningar
Jonas Gräslund	Scandinavian Solar AB Göteborg	Solfångarsystemet
Carl-Gunnar Hillström	VIAK AB Falun	Förstudie Förprojektering
Per Holst	Studsvik En- ergiteknik AB Nyköping	Utvärdering av sol- fångarsystemet
Elisabeth Kjellson	Uppsala Kraft- värme AB	Delar av förstudie och förprojektering
Mats Larsson	Vattenfall Älvkarleby- laboratoriet	Utvärdering av den tek- niska funktionen hos energiförsörjningssystemet
Åke Nordkvist	Firma Markplan Uppsala	Omgivningspåverkan
Hans Pilebro	SKANSKA Danderyd	Lager och värmecentral
Göran Rehbinder	Stiftelsen Bergteknisk Forskning Stockholm	Bergstabilitet
Lars Åstrand	Uppsala Kraft- värme AB	Beslutsgång

R 43:1985

ISBN 91-540-4360-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Spångbergs Tryckerier AB, Stockholm 1985

INNEHÅLL

PRESENTATION - SOLVÄRME I BERG - BFRs	
SKRIFT G4:1985.....	5
SAMMANFATTNING.....	13
FÖRORD.....	17
MEDVERKANDE ORGANISATIONER OCH FÖRETAG	17
Beställare, byggledare.....	17
Finansiärer.....	17
Entreprenörer, leverantörer.....	17
Forskning, utvärdering.....	18
LYCKEBOPROJEKTET SAMT TIDIGARE	
SOLENERGI- OCH LAGRINGSPROJEKT.....	19
Solenergi med gropmagasin, Studsvik...	21
Lambohovprojektet i Linköping.....	22
Ingelstadprojektet i Växjö.....	22
Avestaprojektet.....	22
1. FÖRSTUDIE - FÖRPROJEKTERING.....	23
1.1 INLEDNING.....	23
1.1.1 Bakgrund.....	23
1.1.2 Målsättning för råenergiförsörjningen.	23
1.1.3 Solenergi och fjärrvärme.....	24
1.2 BYGGNADSPLANEARBETET.....	26
1.2.1 Projektets inledning.....	26
1.2.2 Planarbetet del I.....	27
1.2.3 Planarbetet del II.....	31
1.3 TEKNISKA FRÅGOR.....	34
1.3.1 Upphandlingsfilosofi.....	34
1.3.2 Markundersökning för lagret.....	37
1.3.3 Värmeförlustberäkningar.....	41
1.3.4 Val av solfångare.....	43
1.3.5 Värmepump eller ej.....	53
1.3.6 Huskonstruktion.....	54
1.4 BESLUTSSKEDEN.....	55
1.4.1 Inledning.....	55
1.4.2 Beslut om planering.....	55
1.4.3 Preliminärt beslut i UKAB.....	56
1.4.4 Beslut av BFR.....	56
1.4.5 Politiskt beslut.....	57
2. PROJEKTERING OCH BYGGSCHEDE.....	59
2.1 INLEDNING.....	59
2.1.1 Distributionssystemet.....	59
2.1.2 Säsongslager.....	60
2.1.3 Solfångarsystemet.....	60
2.2 STYR- OCH REGLERSYSTEM.....	61
2.2.1 Allmänt.....	61
2.2.2 Driftstrategi.....	64
2.2.3 Solfångarsystemet.....	65
2.2.4 Lagret.....	65
2.2.5 Distributionssystemet.....	66
2.3 SOLFÅNGARSYSTEMET	68
2.3.1 Allmänt.....	68
2.3.2 Grundprinciper vid projekteringen.....	69

2.3.3	Solfångaren.....	70
2.3.4	Solfångarens prestanda.....	71
2.3.5	Solfångargruppen.....	73
2.3.6	Värmeväxlarcentralen.....	74
2.3.7	Uppförande av solfångaranläggningen.....	75
2.3.8	Igångkörningsproblem.....	78
2.4	LAGER OCH VÄRMECENTRAL.....	79
2.4.1	Bakgrund.....	79
2.4.2	Projektering och byggande.....	80
2.4.3	Installationer för värmelagret.....	86
2.4.4	Installationer i värmecentral.....	92
2.4.5	Första uppvärmning (anvärmning).....	93
3.	EKONOMI/FINANSIERING.....	99
3.1	INVESTERINGAR.....	99
3.2	FINANSIERING.....	100
3.3	TOTALKOSTNADER.....	101
3.3.1	Förutsättningar.....	101
3.3.2	Resultat.....	101
3.4	EKONOMISK JÄMFÖRELSE MED TIDIGARE PROJEKT SAMT UTVECKLINGSPOTENTIAL.....	102
4.	FORSKNING OCH UTVÄRDERING.....	105
4.1	INLEDNING.....	105
4.2	MÅLSÄTTNING.....	105
4.3	OMFATTNING.....	105
4.4	SOLFÅNGARANLÄGGNINGEN.....	106
4.4.1	Målsättning och uppläggning av utvärderingsprogrammet.....	106
4.4.2	Mätdatainsamling.....	107
4.4.3	Utvärdering av primärdata.....	110
4.5	LAGRET SAMT SYSTEMFUNKTIONEN.....	111
4.5.1	Målsättning.....	111
4.5.2	Utvärdering av bergrummet som system- komponent.....	111
4.5.3	Utvärdering av bergrummets hydrauliska och värmetekniska egenskaper.....	111
4.5.4	Instrumentering, datainsamling, rapportering.....	111
4.5.5	Mätstorheter, datareducering.....	112
4.6	BERGSTABILITET.....	113
4.7	VATTENKEMISKA UNDERSÖKNINGAR.....	115
4.8	GEOLOGI - GEOHYDROLOGI.....	116
4.9	PÅVERKAN PÅ BEFINTLIG VEGETATION - DOKUMENTATION AV UTGÅNGSLÄGE.....	116
4.10	VÄRMEFÖRLUSTBERÄKNINGAR.....	118
4.11	DOKUMENTATION AV FORSKNINGSRISULTAT.....	118
5.	REFERENSER, LITTERATURFÖRTECKNING.....	119
5.1	Referenser (ej publicerade).....	119
5.2	Referenser (publicerade).....	120
5.3	Litteraturförteckning.....	121
5.3.1	Svensk litteratur.....	121
5.3.2	Internationell litteratur.....	123
BILAGA 1.	Värmeförluster och temperaturför- delning i berget (Vattenfall).....	125
BILAGA 2.	Studie av värmeförluster för Lyckebo värmelager i berg, Lunds Tekniska Högskola	137

Byggforskningsrådet

Solvärme i berg

Lyckebo Uppsala



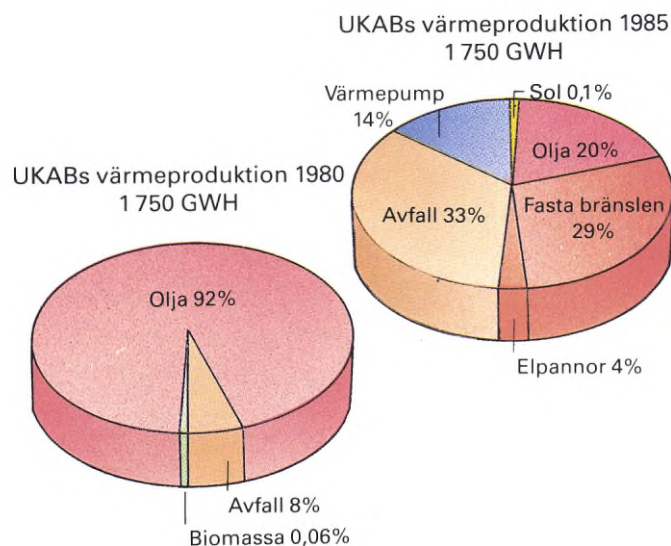
UTGIVEN I SAMARBETE MELLAN STATENS RÅD FÖR BYGG-
NADSFORSKNING OCH UPPSALA KRAFTVÄRME AB (UKAB)

Solvärme med säsongslagring i bergrum

Minskat oljeberoende

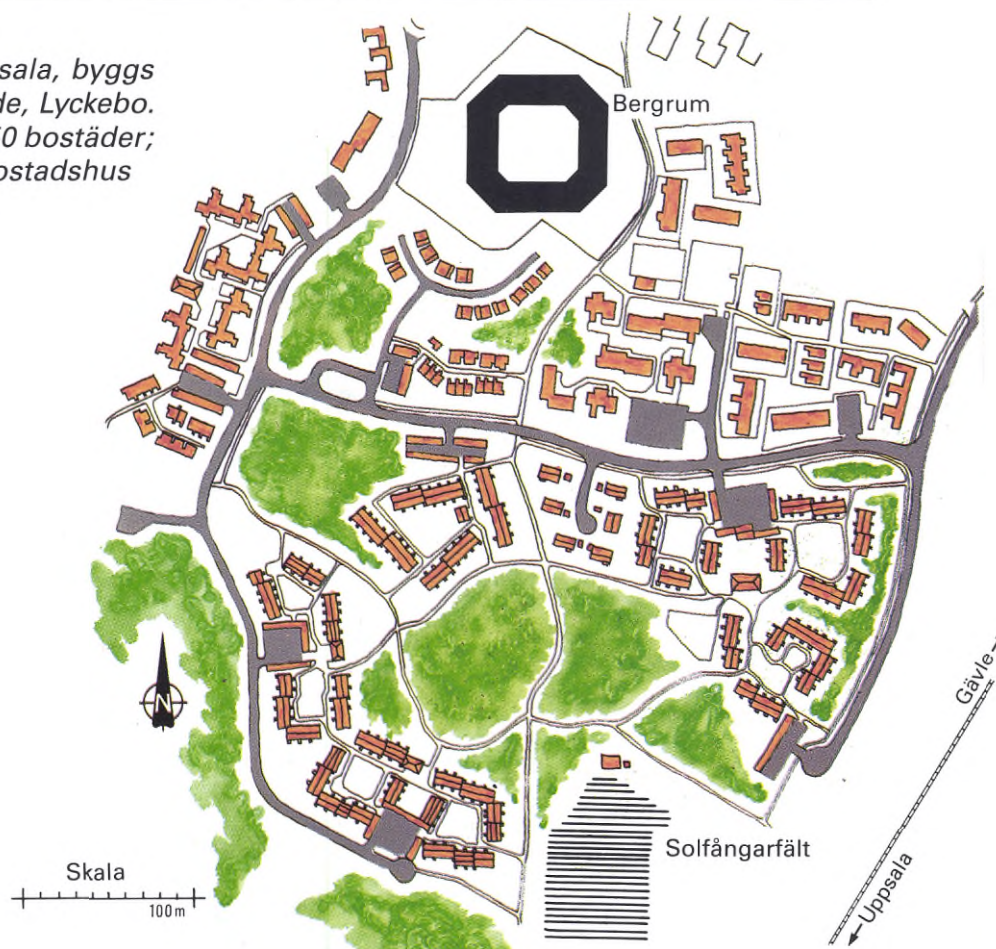
Uppsala Kraftvärme AB (UKAB) producerar fjärrvärme dels i huvudnätet i Uppsala, dels i några närliggande tätorter.

Fjärrvärmerna täcker i dag ca 90% av Uppsala tätorts värmebehov. Oljeberoendet, som tidigare har varit mycket stort, har minskats, bland annat genom utnyttjande av avfallsförbränning, värmepump vid avloppsreningsverket, fastbränsle och elpannor. I framtiden kan även solvärme komma att bidra med en inte så liten del till värmeproduktionen. För att redan nu få erfarenheter av en solvärmeanläggning i stor skala har UKAB med stöd av Byggforskningsrådet (BFR) låtit uppföra i ett separat fjärrvärmenät en solvärmeanläggning med säsongslagring, det s.k Lyckeboprojektet.



15% solvärme

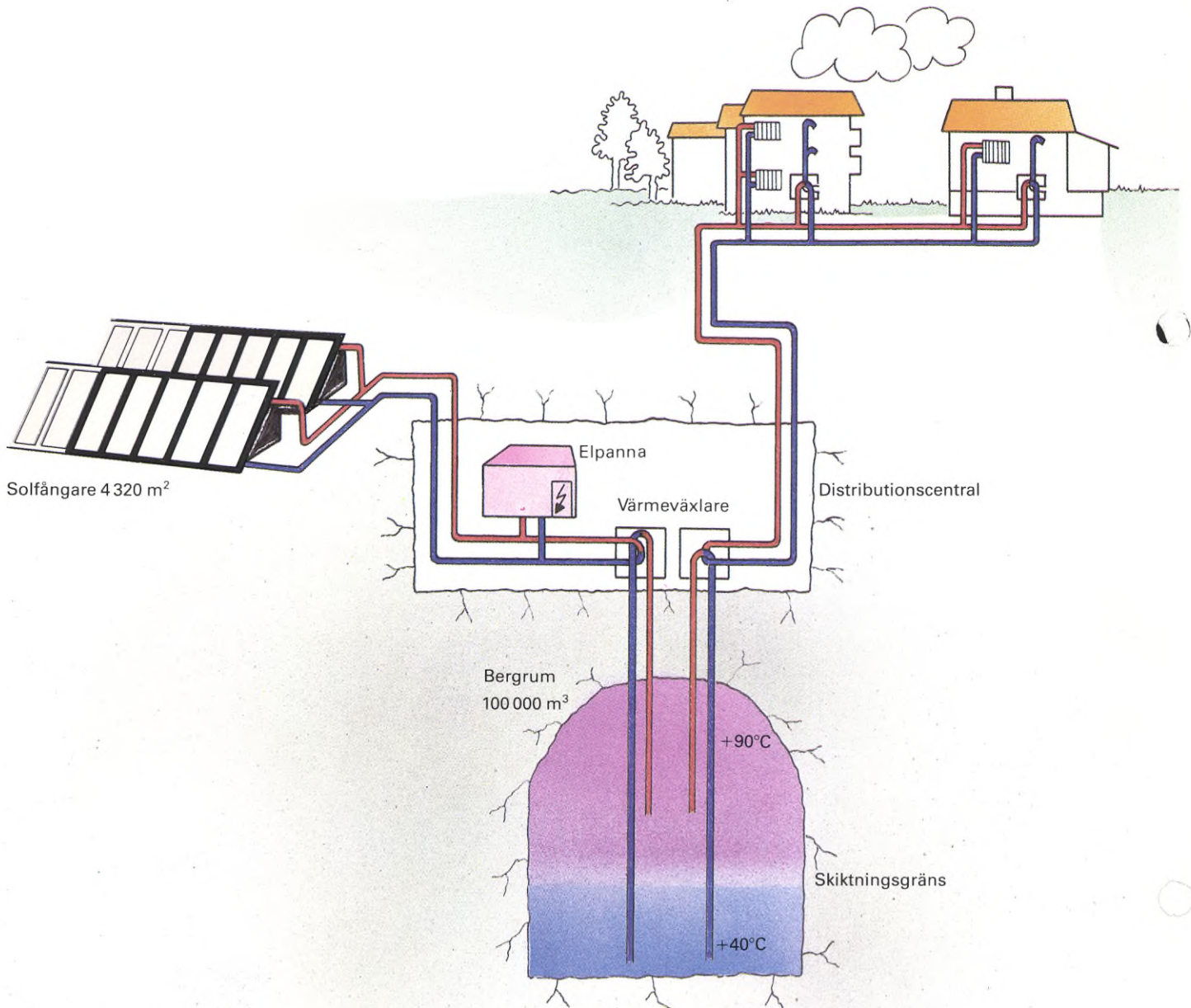
I Storvreta, ca 15 km norr om Uppsala, byggs 1981 till 1987 ett nytt bostadsområde, Lyckebo. Området omfattar i utbyggt skick 550 bostäder; en blandning av småhus och flerbostadshus samt gemensamhetslokaler.



Värmeförsörjningen sker med ett separat fjärrvärmesystem som arbetar med låga temperaturer på värmevattnet, max $+70^{\circ}\text{C}$ under vinterhalvåret och max $+55^{\circ}\text{C}$ under sommarhalvåret.

För att med solvärme täcka hela bostadsområdets årsbehov av värme krävs det drygt $25\,000\text{ m}^2$ solfångare och säsongslagring i befintligt $100\,000\text{ m}^3$ bergrum.

I en första etapp har $4\,320\text{ m}^2$ solfångare installerats. Detta motsvarar ungefär 15% av det totala årsbehovet på $8\,000\text{ MWh}$. Resterande del solvärme simuleras med hjälp av en 6 MW-elpanna. Det byggda solfångarfältet är emellertid tillräckligt för att nödvändiga erfarenheter skall erhållas av solvärmesystemet. Lagrets storlek och funktion skiljer sig inte från ett helt solenergiförsörjt system.



Mitt i Lyckeboområdet är värmelagret närsprängt i ett berget. I en tunnel mellan lagret och markytan finns en distributionscentral med ett kontrollrum för driften av hela värmesystemet. Solfångarna ligger i sin tur på ett fält, 500 m söder om bergrummet. Solvärmens leds till värmelagret genom en solvärmekulvert.

I en distributionstunnel ovanför lagret finns elpannan som simulerar solvärmens från den ännu ej utbyggda delen av solfångarfältet. På hösten skall lagret vara laddat med 90-gradigt vatten. Under vintern förbrukas värmen och framåt april månad är lagret urladdat och temperaturen har sjunkit till $+40^{\circ}\text{C}$.

De olika systemen

Solfångaranläggningen, markvärmelagret samt distributionssystemet för värmeförbrukarna är sinsemellan skiljda åt med värmeväxlare. Detta beror främst på att bergumsvattnets kemiska egenskaper är olämpliga för de andra systemen. Solfångarfältet regleras med en varvvalsreglerad pump för att stabila temperaturer skall kunna uppnås. Temperaturen från solfångarna varierar mellan ca +75°C och +90°C. Intaget och uttaget av värme i lagret sker med hjälp av två uppsättningar dubbla höj- och sänkbara teleskoprör.

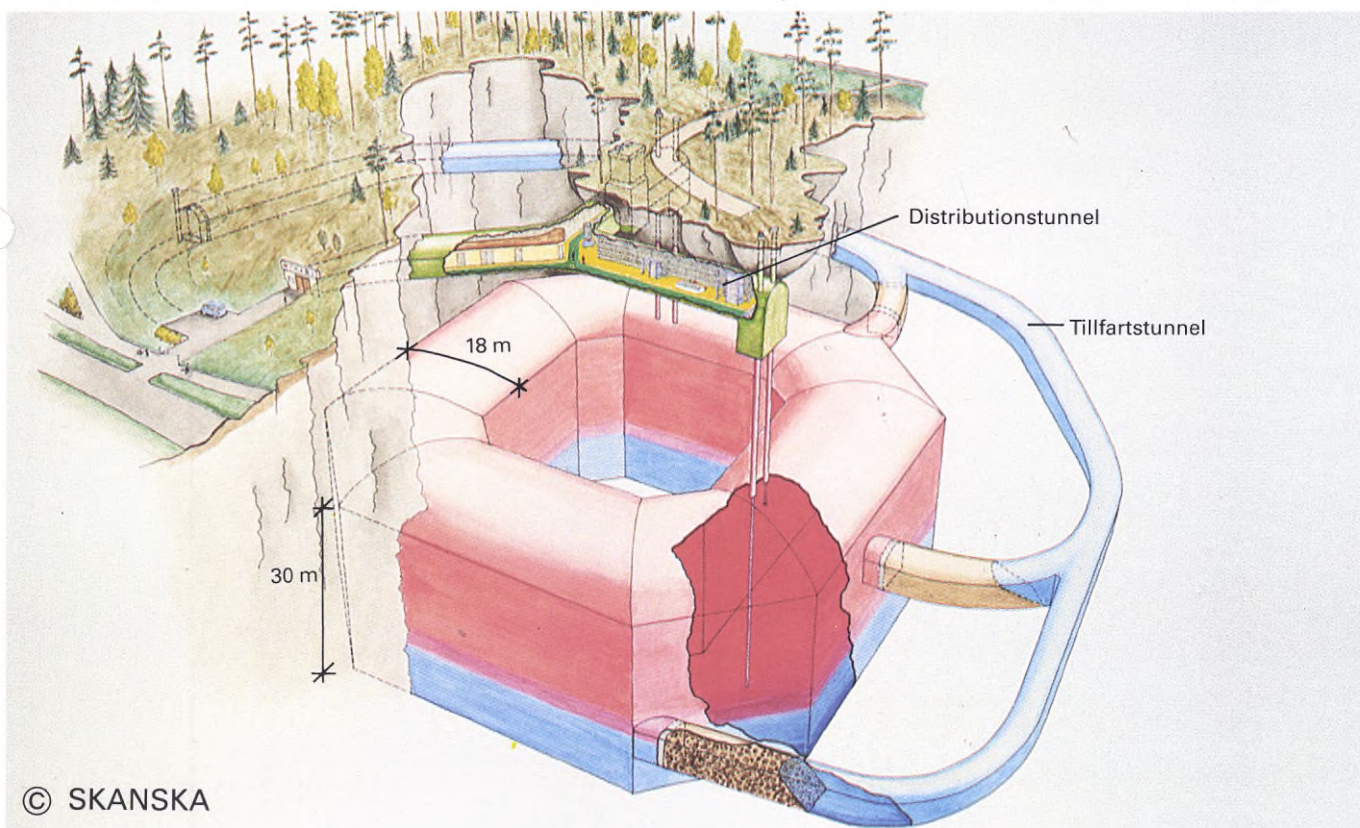
Lagret är temperaturskiktat med det kallaste vattnet i botten och det varmaste således högst upp. Teleskoprören kan låta hämta respektive lämna vatten på rätt nivå för att därigenom bibehålla temperaturskiktningen. I normalfallet används det ena paret rör för att distribuera fjärrvärme medan det andra används för överföring av solvärme till lagret. Möjligheter finns dessutom att växla sinsemellan rören och att även i vissa fall distribuera solvärme via värmeväxlare direkt till fjärrvärmenätet.

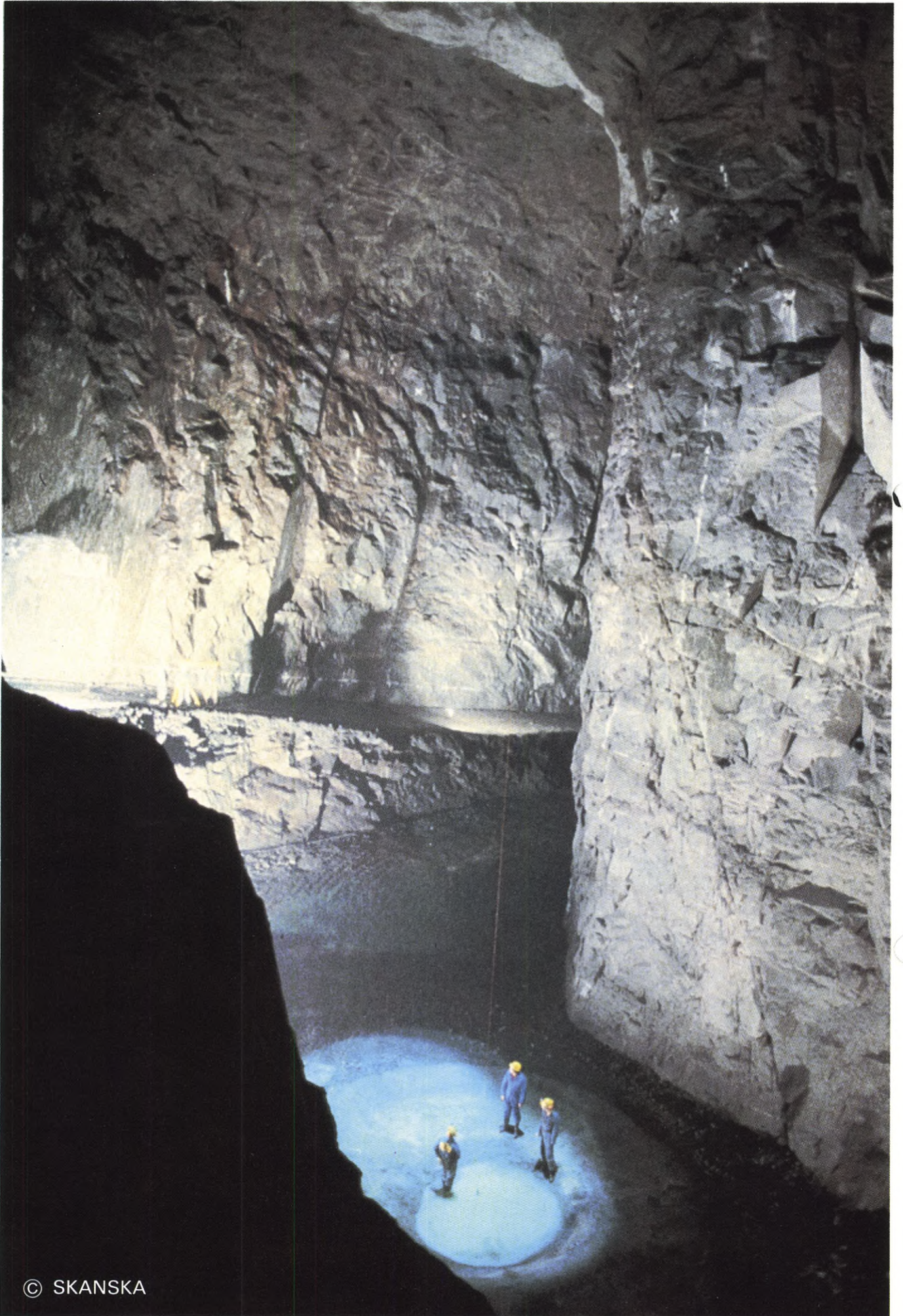
Värmelagret

Värmelagret utgörs av ett 100 000 m³ stort, vattenfyllt bergum vars tak ligger 30 m under markytan. Rummet är ringformat med ytterdiametern 75 m, bredden 18 m och höjden 30 m. Bergummet är oisolerat och grundvattenytan ligger ovanför bergumstaket. För att minimera grundvattengenomströmningen i lagret och hålla värmeförlusterna nere har bergummet förlagts i en tämligen tät bergplint.

För borttransport av sprängmassorna under byggnadstiden byggdes en tillfartstunnel runt bergummet med tre anslutningar på olika nivåer. Efter byggnadstidens slut pluggades anslutningarna igen.

Tillfartstunneln används i dag som expansionsutrymme. Ett borrhål mellan tunneln och bergummets botten gör att kallt bottenvatten strömmar i och ur tillfartstunneln vid lagrets temperaturförändringar. Bergummets botten och tunneln verkar då som ett expansionskärl. I distributionstunneln ovanför bergummet finns pumpar, värmeväxlare och elpanna. I kontrollrummet finns en styr- och reglerdator men också utrymme för ställverk och personalrum. Installationerna i denna tunnel gjordes fram till februari 1983 då värmningen av bergumsvattnet började. Från september 1983 har nuvarande Lyckebo värmeförsörjts från värmelagret.





© SKANSKA

Bergrum under anläggningsarbete

Finansiering och ekonomi

Investeringskostnaden för hela projektet (kapital, drift och underhåll) med markvärmelager, 4320 m² solfångare, elpanna och distributions-system uppgår till 39 miljoner kr.

Med avskrivningstiderna 40 år för lagret, 20 år för solfångarna och 30 år för övriga komponenter blir totalkostnaden 45 öre/kWh vid realräntan 4% och 85 öre/kWh vid nominella räntan 12%. Med 100% solvärme hade anläggningen kostat drygt 80 miljoner kronor.

Projektet är en experimentbyggnadsanläggning och den första i sitt slag för denna typ av system. Det är därför för tidigt att dra några generella slutsatser om ekonomin.

Finansieringen har skett genom att BFR har svarat för ett experimentbyggnadslån (villkorligt) motsvarande ungefär hälften av projektkostnaden. HSB och SKANSKA har vardera bidragit med två miljoner kr. UKAB svarar för resterande del.

Forskning och utvärdering

Till projektet har knutits en forsknings- och utvärderingsgrupp som har till uppgift att genomföra en teknisk utvärdering av systemfunktionen. 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 bergumslaget.

Studsviks Energiteknik AB ansvarar för utvärdering och analys av solfångaranläggningen. Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) studerar bergstabiliteten och tillsammans med VIAK svarar för forskningssamordning och totalutvärdering.

Kostnader

Total projektkostnad, priser 1983	39 Mkr
bl a	
Markvärmelager	17,5 Mkr
Solvärmesystem	8,5 Mkr
Fjärrvärmenät	3,0 Mkr
Styr- och reglerutrustning	2,4 Mkr
6 MWEIpanna	2,3 Mkr

Anläggningsdata

Byggherre	UKAB, Uppsala
Totalentreprenör för värmelagret	SKANSKA, Danderyd
Konstruktör för värmelagret	SKANSKA, Danderyd
Solfångarna och solfångaranläggningen	Scandinavian Solar AB, Göteborg
Bostadsområdets byggherre	HSB, Uppsala
Antal bostäder vid full utbyggnad	550
Andel solenergi	15%
Simulerad solenergi från elpanna	85%
Solfångaryta	4 320 m ²
Antal solfångare	360

BFRs satsning på solvärmesystem med säsongslagring i vatten

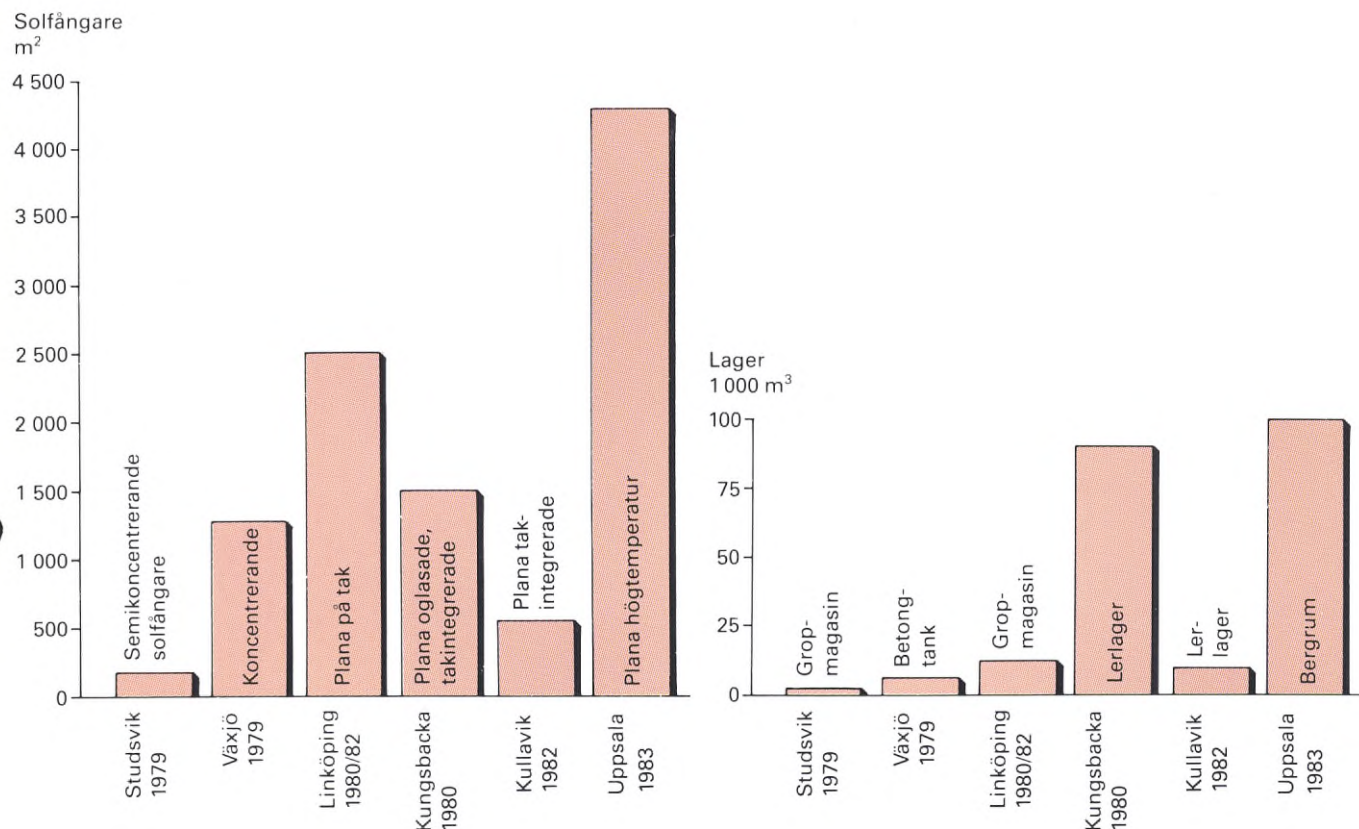
Om solvärmesystem skall ha någon framtid i Sverige behövs lagring från sommar till vinter. Byggnadsforskningsrådet prioriterade därför tidigt denna utvecklingslinje.

Liksom vid all annan teknikutveckling har även här problem uppstått. Solvärmecentralen i Studsvik fick i ett tidigt skede läckage på lagrets gummitätning. Lambohov har fått byggas om på grund av för mycket syreinläckning i systemet. Ingelstads koncentrerande solfångare har fått bytas ut mot plana. (För övrigt en vidareutveckling av Lyckebosolfångaren.)

Tack vare erfarenheterna från dessa anläggningar och engagemanget från stat och kommun samt från svensk industri har nu Sverige en tätp-lats i världen när det gäller antalet uppförda anläggningar, systemkunnande, och ekonomi/prestanda för såväl lager som solfångare.

Som förberedelse till Lyckeboanläggningen har UKAB låtit testa flera typer av solfångare i anslutning till Knivstas fjärrvärmenät. Vissa erfarenheter har också hämtats från experimentbergrummet i Avesta. Såväl Knivstaanläggningen som Lyckebo utgör en del av Sveriges bidrag till det internationella solvärmesamarbetet som administreras av IEA, International Energy Agency.

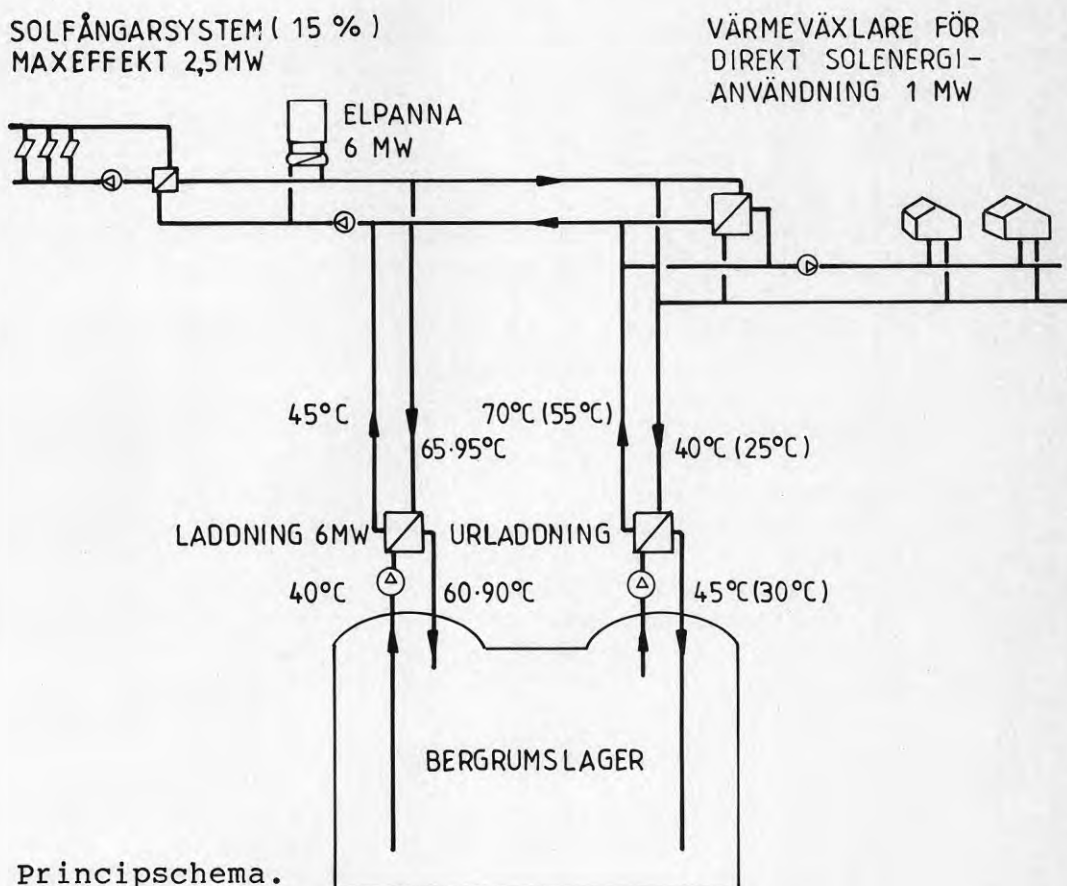
Lyckeboanläggningen representerar en brytpunkt i utvecklingen av solvärmesystem med vattenlager genom att såväl lagrings- som solfångarkostnaden blev avsevärt lägre än i föregående projekt.



BFRs experimentbyggnadsprojekt med solvärme och säsongslagring

SAMMANFATTNING

Lyckeboprojektet är ett solenergiprojekt med säsongslagring, beläget i Storvreta samhälle 13 km norr om Uppsala centrum. Bebyggelsen, bestående av ca 550 bostäder och en del övriga lokaler, värmeförsörjs via ett lokalt fjärrvärmenät, anslutet till ett säsongslager (oisolerat bergrum) på 100 000 m³. Lagret laddas under sommarhalvåret med solenergi från ett solfångarfält med solfångaryta 4 300 m², vilka producerar 15% av årsvärmeenergin i Lyckebo. Resterande 85% tillföres lagret med hjälp av en elpanna på 6 MW, vars roll också är att simulera en kommande etapps solfångare. Systemdelarna framgår av nedanstående principschema.



Solfångarna är plana stormodulsolfångare av högtemperaturtyp placerade på markmonterade stativ.

Värmepump används ej i systemet.

Uppsala långsiktiga mål för solenergi i Uppsala låg i slutet på 1970-talet på i storleksordningen 600 GWh/år varav med enklare solfångare i kombination med värmepump åtminstone 100 GWh/år skulle behövas i form av elkraft. Alternativet diseldriven värmepump bedömdes mindre intressant eftersom målet var att reducera

oljeberoendet. När det blir aktuellt med utbyggnad av stora solfångarytor torde el vara en bristvara som inte onödigtvis bör användas för uppvärmningsändamål.

Projektet har föregåtts av andra projekt i mindre skala i Sverige, t ex solvärmecentralerna i Lambohov och Ingelstad och är det första med säsongslagring i full skala.

Uppsala Kraftvärme AB (UKAB) är beställare och har ansvar för drift och underhåll av systemet.

Statens Råd för Byggnadsforskning har bidragit med ett villkorligt experimentbyggnadslån på 18.5 Mkr samt bekostar forskning och utvärdering.

HSBs Riksförbund AB och SKANSKA har vardera bidragit med 2.0 Mkr för att möjliggöra att projektet kom till utförande. Resterande 16.5 Mkr har bekostats av Uppsala Kraftvärme AB.

SKANSKA har i form av totalentreprenad levererat bergrumslager inklusive in- och utmatningsanordningar samt en del ytterligare kringutrustning.

Scandinavian Solar AB har levererat solfångarsystemet, även detta i form av totalentreprenad.

Lyckeboprojektet kom till på initiativ av UKAB i dess arbete med att ta fram alternativ till oljebaserad värme. UKAB ansåg att solenergi kunde vara ett bra alternativ i ett längre perspektiv, om lämplig teknik utvecklades för fjärrvärme.

Arbetet med projektet inleddes med en förstudie 1978 och resulterade efter genomförandebeslut i två totalentreprenader, bergrumslager respektive solfångarsystem, som handlades upp 1981 respektive 1982. Hela systemet togs i drift hösten 1983.

Det totala solenergiförsörjningssystemet liksom de olika delsystemen fungerar på avsett sett. Även som ett anläggningsprojekt betraktat är Lyckebo lyckat. Både tidplan och projektets budget har hållits.

Investeringsbeloppet i det byggda systemet är 39 Mkr. Med 100% sol (ca 30 000 m² solfångare) hade summan blivit drygt 80 Mkr. Specifik investeringskostnad för det totala byggda systemet (produktion, lagring och distributionssystem) är 4.90 kr/kWh, år och för 100% sol 10,40 kr/kWh, år i 1983 års prisnivå.

Med avskrivningstiden 40 år för lager, 20 år för solfångare och 30 år för övrigt blir totalkostnaden för värme i Lyckebo 45 öre/kWh vid realränta 4% och 85 öre/kWh vid nominell ränta 12%. Om det byggts för 100% sol hade kostnaderna blivit 73 öre/kWh respektive 146 öre/kWh.

I Lyckebo betalar dock abonnenterna lika mycket för värmeleveranser som de anslutna till det stora fjärrvärm nätet i Uppsala.

Nedan visas några ekonomiska nyckeltal för Lambohov, Ingelstad och Lyckebo. Beräkningsmetodiken är inte identisk för de tre anläggningarna och investeringsbeloppen hänförs till olika genomförandear och således olika penningvärden. Nyckeltalen illustrerar dock de ekonomiska framsteg som gjorts på grund av uppskalning och vidareutveckling. Skillnaderna i penningvärde och beräkningsmetodik är försumbara i sammanhanget.

År	Antal lgh	Invest. Mkr	Invest. kr/lgh	Energi prod MWh/år	Solfångare kr/m ²	Värmelag kr/m ³
1979 Ingelstad	52	11.8	236 000	1 100	3 000	600
1980 Lambohov	55	16.3	296 000	900	1 300*	485
1983 Lyckebo	550	39.0	71 000	8 000	1 780	124

* takintegrerad, exkl samlingsledningar

Solfångarsystemet i Lyckebo är utvecklat för stora system med höga temperaturer. Denna solfångarteknik introducerades 1982 i samband med Lyckebo-projektet. Leverantören uppger att en teknikutveckling därefter skett, innebärande en pris/prestandaförbättring på ca 25 %. Marknaden är ännu för liten för en rationell serieproduktion varför ytterligare kostnads/prestandaförbättringar på ca 25% kan förväntas om serieproduktionens fördelar kan utnyttjas.

Med dagens teknik kan man således förvänta sig en halvering av kostnaden för solfångarsystemet jämfört med den utförda Lyckeboanläggningen.

Värmelagret i Lyckebo har utformats för att optimalt kunna utnyttja olika temperaturnivåer för inmatad respektive utmatad energi. Genom att energin finns lagrad i vätska kan effekten vid såväl laddning som uttag ökas genom utökning av pumpar, rör och värmeväxlare.

Bergrummet har utförts med modern rationell bergsprängningsteknik, utvecklad och anpassad för stora bergvolymmer. På grund av höga "startkostnader" för bl a transporttunnlar, schakt och serviceanläggningar minskar dock volymkostnader vid ännu större lagringseinheter.

Med modern värmepumpsteknik kan det sannolikt i andra lagringstillämpningar vara intressant att utöka lagringskapaciteten genom att kyla lagrets kallaste del till ca +5°C. Sammantaget kan således den använda lagringstekniken generellt sett utvecklas både ekonomiskt och tekniskt så att en lagring av energi kan ske till ca 50% av kostnaderna för Lyckebo-anläggningen, enligt leverantörens uppgifter.

Sammantaget kan således den använda lagringstekniken utvecklas både ekonomiskt och tekniskt, så att en lagring av energi kan ske till ca 50% av kostnaderna för Lyckebo-anläggningen, enligt leverantörens uppgifter.

Ett tiotal institutioner och företag utför 1983 - 1985 en samlad forskning och utvärdering kring Lyckebo-projektet. Huvudansvarig är BEFO (projekt 820673-5) och Studsvik Energiteknik AB (projekt 820716-8)

För projektledning och projektsamordning av forskning och utvärdering svarar VIAK AB, Falun och Stiftelsen Bergteknisk Forskning. (BEFO)

FÖRORD

MEDVERKANDE ORGANISATIONER OCH FÖRETAG

Beställare, byggledare

Uppsala Kraftvärme AB initierade projektet och är beställare, projektledare och byggledare.

Projektledare har (fram till byggskedet) varit Carl-Gunnar Hillström samt därefter Ingvar Wahlander.

Finansiärer

Statens Råd för Byggnadsforskning (BFR) har beviljat s.k. experimentbyggnadslån på 18.5 Mkr till projektet. Forskning och utvärdering bekostas med bidragsmedel från BFR.

Uppsala Kraftvärme AB (UKAB) svarar själv för 16.5 Mkr av projektets finansiering. UKAB har vidare ansvar för drift och underhåll av systemet. Kostnadstäckning för detta erhålls genom värmeleveranser inom Lyckeboprojektet.

HSBs Riksförbund och Skånska Cementgjuteriet AB har lämnat bidrag med 2 Mkr vardera av projektets totala investeringsbelopp, för att möjliggöra dess genomförande.

Entreprenörer, leverantörer

SKÅNSKA har i form av totalentreprenad levererat bergrumslager inklusive in- och utmatningsanordningar och växlare, kontrollrum, samt övriga installationer.

Scandinavian Solar AB har tillverkat och monterat solfångarsystemet genom en totalentreprenad.

BBC har levererat datorsystemet (hård- och mjukvara) ingående i det totala styr- och reglersystemet.

Zander och Ingeström har levererat elpanna med växlare samt vattenbehandlingsutrustning för distributionssystemet.

Svensk Reningsteknik AB har levererat avhärdningsutrustning till bergrumskretsen.

Forskning och utvärdering

Forskning och utvärdering bekostas med bidragsmedel från Statens Råd för Byggnadsforskning. Ansvariga: Sven-Erik Lundin och Egil Öfverholm.

För projektledning, totalutvärdering och samordning svarar Carl-Gunnar Hillström, VIAK AB, Falun och Göran Rehbinder Stiftelsen Bergteknisk Forskning.

Vattenfall, Älvkarlebylaboratoriet svarar för utvärdering av den tekniska funktionen hos energiförsörjningssystemet, med tyngdpunkt på bergrumslagret. Anvarig: Mats Larsson.

Studsviks Energiteknik AB ansvarar för utvärdering och analys av solfångaranläggningen. Anvarig: Per Holst.

Stiftelsen Bergteknisk forskning studerar bergstabilitetsproblematiken och svarar för forskningsamordning. Anvarig: Göran Rehbinder.

VIAK AB genomför geohydrologisk uppföljning avseende grundvattennivåer och temperaturer runt bergrumslagret. Anvarig: Gunnar Gustafson, Göteborg.

Chalmers Tekniska Högskola svarar för de vattenkemiska undersökningarna. Ansvärlig Tommy Claesson vid institutionen för geologi.

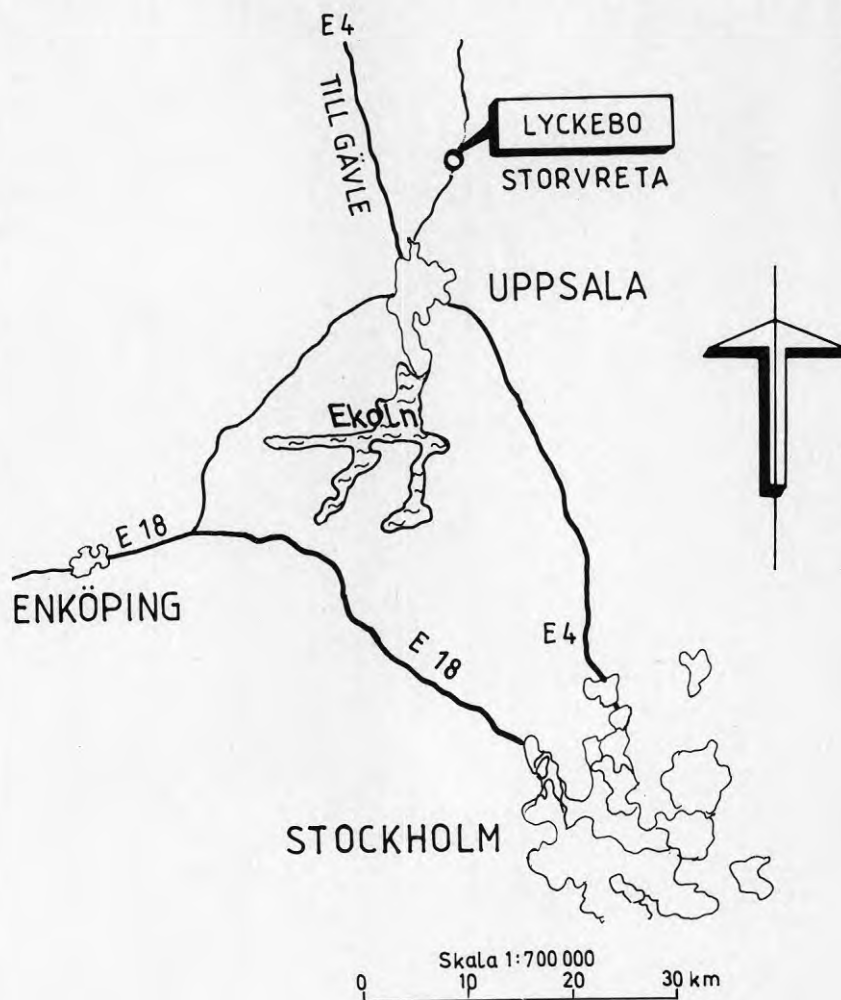
Firma Markplan Uppsala dokumenterar befintlig vegetation för att på sikt möjliggöra en utvärdering av bergrumslagrets eventuella påverkan på vegetationen. Anvarig: Åke Nordkvist.

Uppsala Kraftvärme AB medverkar i mätvärdesinsamling, på det vattenkemiska området och i totalutvärderingen.

Lunds Tekniska Högskola utför värmeförlustberäkningar.

LYCKEBOPROJEKTET SAMT TIDIGARE SOLENERGI- OCH
LAGRINGSPROJEKT

Storvreta samhälle ligger i Uppsala kommun 13 km norr
om Uppsala centrum.



I storvreta byggs 1981 - 1987 ett nytt bostadsområde, LYCKEBO. Området består av 550 bostäder varav 350 småhus och 200 lägenheter i flerbostadshus samt skola och en del andra lokaler av gemensamhetskaraktär.



Bostadsområdet Lyckebo i Storvreta 13 km norr om Uppsala

Bebyggelsen värmeförsörjs via ett lokalt fjärrvärmenät i Storvreta. Värmeenergin säsongslagras och hämtas från ett vattenfyllt oisolerat bergrumslager med volymen 100.000 m^3 .

Lagret laddas under sommarhalvåret med solenergi från ett solfångarfält med solfångaryta 4.300 m^2 vilket producerar 15% av värmeenergin i Lyckebo. Resterande 85% tillföres lagret med hjälp av en elpanna på 6 MW, vars roll också är att simulera en kommande etapps solfångare. Den första etappens solfångaryta är tillräckligt stor för att önskade erfarenheter skall erhållas. När solfångarutvecklingen fortskridit så att kostnadseffektivare solfångarsystem finns på marknaden är avsikten att installera solfångare upp till 100% årstäckningsgrad. Markområde finns reserverat för detta. Det är knappast sannolikt att ytterligare solfångare kommer att monteras före år 1990. Med det tidsperspektivet kommer tillbyggnaden av ytterligare solfångaryta att tidsmässigt sammanfalla med den tidpunkt när tillgången på billig elkraft börjar avta.

Föreliggande rapport beskriver Lyckeboprojektet från idéstadiet till starten av det byggda systemet.

Lyckeboprojektet började växa fram 1978. Vid den tidpunkten fanns några solenergiprojekt med säsongslagring i vattenmagasin byggda, under byggande eller på planeringsstadiet av upp till halvskalig karaktär.

Nedan beskrivs kortfattat de aktuella projekten. Rapporter från projekten anges i litteraturförteckningen i kapitel 5.

Solenergi med gropmagasin, Studsvik

Studsvik Energiteknik AB har för värmeförsörjning av en egen kontorsbyggnad ett solvärmesystem. Ett isolerat gropmagasin med gummiduk som tätningsskikt laddas med paraboliska solfångare monterade på lagrets roterande lock. Lagervolym: 640 m^3 . Temperaturintervall: $40-70^\circ\text{C}$

Lambohovprojektet i Linköping

Solvärmecentralen i Lambohov förser sedan juni 1979 55 radhus med värme och förbrukningsvarmvatten. Systemet innehåller även värmepumpar. Solfångaryta (takmontering): 2.500 m^2
Lager (isolerad bergrop med gummidukstättning): 10.000 m^3
Temperaturintervall: $5-70^\circ\text{C}$
Energi från solfångare: 1.000 MWh/år

Ingelstadprojektet i Växjö

Ett villaområde med 52 st villor är anslutet till solvärmeverket i Växjö sedan hösten 1979. Lagret är en isolerad betongcistern med invändig diameter 28 m och djup 8 m.

Solfångaryta: 1.320 m²
Lagervolym: 5.000 m³
Temperaturintervall: 40 - 95°C
Energi från solfångare: 550 MWh/år.

De ursprungliga solfångarna var av koncentrerande, solföljande typ. Under 1984 byttes solfångarna ut mot Scandinavian Solars HT-solfångare (den solfångartyp som finns i Lyckeboprojektet).

Avestaprojektet

Avesta värmeackumulator är en försöksanläggning för lagring av hetvatten i oinklätt bergrum. Anläggningen är förlagd i Avesta kommun under mark på ett djup av ca 25 m till taket. Bergrummet är konventionellt format med dimensionerna 40 x 18 x 23 m, med en volym av 15.000 m³. Anläggningen är ansluten till kommunens sopvärmeverk. Vid normal drift är temperaturen på hetvattnet som skall lagras maximalt +115°C och lägst +70°C.

Anläggningen togs i kommersiell drift 1984. Dessförinnan har ett omfattande forskningsprogram genomförts, som bl a syftar till att undersöka hur bergmassan påverkas av uppvärmningen och den cykliska värmebelastningen vid in- och urladdning av hetvattnet.

Lyckebo-projektets utvärderings- och forskningsdel är delvis samordnad med Avesta-projektets.

1. FÖRSTUDIE - FÖRPROJEKTERING

1.1 INLEDNING

1.1.1 Bakgrund

Uppsala kommun har i likhet med många andra tätorter i Sverige tagit över värmeförsörjningsansvaret från de enskilda fastighetsägarna i takt med en ökande fjärrvärmeanslutning under 1960- och 1970-talet. Tjockolja fanns då tillgängligt till lågt pris och var ett i jämförelse med andra alternativ lätthanterligt bränsle. Uppsala hade vid början av 1970-talet gjort sig i hög grad oljeberoende. Beroendet var högre än för landet i medeltal eftersom även huvuddelen av elkraften producerades i det oljeeldade mottrycksverket i Uppsala. 1973 inträffade den s k oljekrisen med galopperande oljeprisutveckling och förlorad försörjningstrygghet som följd. Det blev alltmer uppenbart att ett oljeberoende av Uppsalas storleksordning på sikt var ohållbart.

Uppsala kommun hanterar sin energiverksamhet dels genom sin Industriverksstyrelse (IVS) vars verkställande organ är Uppsala Industriverk (IV), dels genom sitt helägda aktiebolag Uppsala Kraftvärme AB (UKAB). IV handlägger frågor rörande distribution av energi medan UKAB svarar för produktion. Utnyttjande av solenergi för fjärrvärme är således en fråga för UKAB. Med hänsyn till att solenergi även får konsekvenser för plan- och markfrågor har Lyckeboprojektet haft anknytning även till kommunens byggnadsnämnd (BN) och fastighetsnämnd (FN). Samordningen mellan olika kommunala verksamheter sker på nämndplanet, varför även IVS deltagit i projektet.

1.1.2 Målsättning för råenergiförsörjningen

Under senare delen av 1970-talet började IV/UKAB aktivt att arbeta med att ta fram alternativ till oljebaserad värme. Med utgångspunkt från för Uppsala gällande förutsättningar började följande alternativ bearbetas:

- utökad avfallsförbränning
- kolinblandning i oljan
- användande av biobränsle
- värmepumpar

Kärnkraftverket i Forsmark ligger ca 7 mil från Uppsala och det var tekniskt möjligt att därifrån erhålla värmeenergi. Detta försörjningsalternativ var emellertid enligt bedömningar i Uppsala behäftat med alltför stor osäkerhet av flera skäl, varför det bedömdes nödvändigt att söka andra lösningar för att komma bort från oljeberoendet.

IV/UKAB beslöt efter överväganden att en önskvärd målsättning på 5 års sikt var att oljeberoendet på över 90% skulle halveras, samt inom 10 år ytterligare minskas. Dessutom ansåg IV/UKAB att solenergi i ett längre perspektiv kunde vara ett bra alternativ om lämplig teknik anpassad till fjärrvärme utvecklades.

1.1.3 Solenergi och fjärrvärme

1.1.3.1 Förutsättningar

Solen är en inhemsk, outtömlig och ren energikälla. Tekniken att samla in solenergi finns utvecklad fast det naturligtvis kan göras förbättringar. Det största hindret för ett genombrott för solenergi är av ekonomisk natur, både för solfångare och lagerteknik.

Dagens bostadsbestånd har en genomsnittlig livslängd på ca 50 år och är i betydande omfattning värmeförsörjda via fjärrvärme. Om solenergi skall få någon påverkan på den svenska energibalansen av betydelse måste solvärmerna tas in i de existerande fjärrvärmesystemen.

Uppsalas solenergiengagemang kan ses som en trestegsraket. Steg 1 innebar att Knivstaverket våren 1981 försågs med ca 100 m² solfångaryta av några olika fabriker inkopplade till fjärrvärmenätet. Syftet med detta steg var att få praktiska erfarenheter och att kontrollera utbytet från solfångarna under verkliga driftsförhållanden. Steg 2 var Lyckeboprojektet med byggstart hösten 1981. Hela årsbehovet var avsett att täckas för 550 lägenheter med ca 20 000 m² solfångaryta, och ett vattenlager på ca 100 000 m³ för säsongslagring. Steg 3 innebär att koppla in solfångarsystem till det befintliga fjärrvärmenätet i större skala.

1.1.3.2 Tillgång och efterfrågan på solvärme

Sverige har förvånansvärt många soltimmar per år; ca 1 800 h. Emellertid får vi huvuddelen av vår solenergi på sommaren medan värmebehovet i huvudsak föreligger under vinterhalvåret. Man kan i princip i ett fjärrvärmesystem av Uppsalas storlek och konstruktion täcka ca 10% av det totala årsbehovet av fjärrvärme med solenergi utan att bygga lager. Nätvolymen och den befintliga hetvattenackumulatorn på 30.000 m³ kan användas för att överbrygga nätter och dagar med dålig soltillgång.

Det finns emellertid andra energikällor som ger värmeenergi på sommaren till Uppsalas fjärrvärmesystem, varför även 10% täckning i praktiken kräver någon form av säsongslagring. Om systemet förses med ett lager på 2 000 000 m³ kan solfångarytan 1 400 000 m² inkopplas utan att någon energi går förlorad. Täckningsgraden blir ca 20%. För att täcka hela årsbehovet av värmeenergi i Uppsala erfordras ca 5 000 000 m² solfångaryta och en lagervolym på 15 000 000 m³.

Principiell energibalans för säsongslagrad solenergi framgår av figur 1:1.

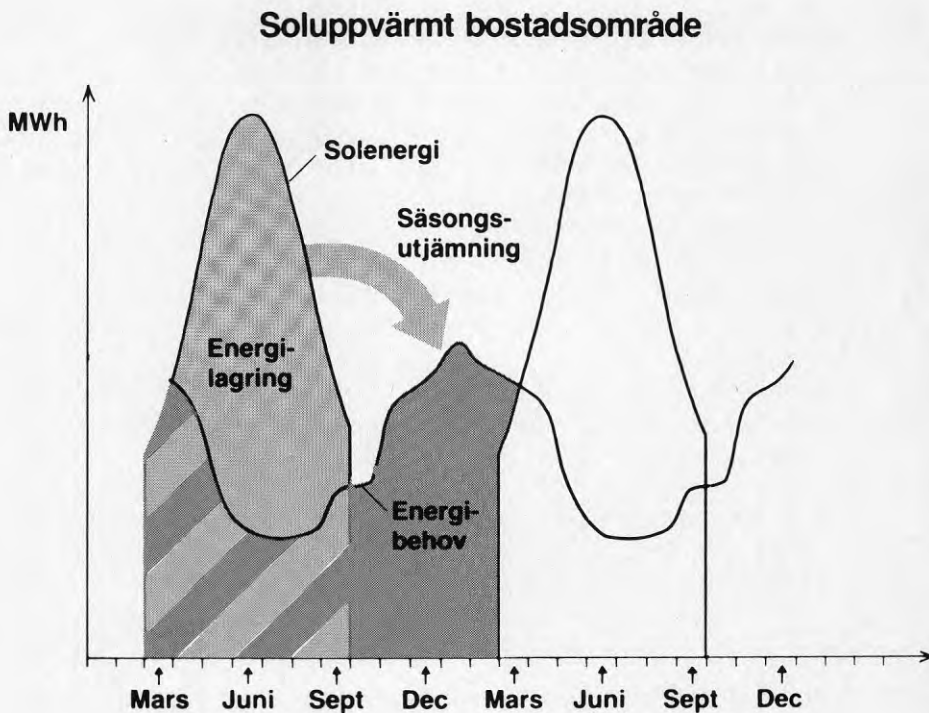


Fig 1:1 Principiell energibalans för säsongslagrad solenergi.

1.2 BYGGNADSPLANEARBETET

1.2.1 Projektets inledning

När tankegångarna om solenergi började konkretiseras i Uppsala riktades intresset tidigt mot de stadsplanemässiga problemen i samband med storskalig solenergi-användning. Dessa bedömdes bli den svåraste delen av ett solvärmeprojekt i full skala. Hur skall solfångarna placeras; centralt, lokalt eller en kombination av båda och hur skall husen placeras i förhållande till väderstrecken? Detta var frågor nödvändiga att nogsamt studera under projektets inledning.

Vissa restriktioner förelåg på kortare sikt för ett fullskaleprojekt. Området borde ligga skilt från nuvarande fjärrvärmeområde av flera skäl. Med ett nyproducerat bostadsområde slipper man de extra besvär ett befintligt husbestånd innebär med dåligt isolerade hus, hög temperaturnivå m m. Det bedömdes att de problem användandet av en ny obeprövad teknik skulle medföra var fullt tillräckliga utan att i det första skedet tillföra den befintliga bebyggelsens problemkomplex.

Vidare borde ett solvärmeprojekt på kollektiv bas omfatta minst 300 hus eller lägenheter. Ur ekonomisk synpunkt vore åtminstone 500 att föredra. Dimensionerande för projektets minimistorlek är lagret. Vid för små enheter blir värmeförlusterna från lagret besvärande stora. Byggkostnaden per m^3 lagervolym avtar med ökande volym varför även ur den synpunkten ett större lager är att föredra. Analys av specifika byggkostnadernas och värmeförlusternas storleksberoende gav att kurvorna någotsånär hade planat ut vid ca 100 000 m^3 lagervolym. Denna storlek harmonierar med ca 500 lägenheters energibehov för värme och varmvatten. Skalan är dessutom tillräckligt stor för att man skall tvingas till industriella, rationella lösningar och komma bort från laboratoriemässig miljö vilket även var en målsättning.

När man började granska bostadsbyggnadsprogrammet för Uppsala kommun visade det sig att ett bostadsområde som uppfyllde kraven skulle byggas i Storvreta, nämligen Lyckeboområdet.

1.2.2 Planarbetet del I

1.2.2.1 Förutsättningar

Trots att Lyckeboprojektet är ett av världens största solvärmeprojekt (39 Mkr i 1983 års prisnivå) är det ändå en i ekonomiska termer sett och även ur betydelssynpunkt mindre del av projektet "bostadsområdet Lyckebo". Området utgör en betydande del av bostadsbyggnadsprogrammet för Uppsala kommun under första halvan av 1980-talet i en under planeringsfasen ansträngd bostadsförsörjningssituation. Det stod rätt snart klart att solprojektets krav och synpunkter på intet sätt var överordnade bostadsprojektet och tidplanen styrdes av planarbete och bostadsproduktion. Detta innebar ett begränsat manöverutrymme för solprojektet och att hårda krav på att nödvändiga delbeslut måste fattas löpande förelåg under hela arbetet.

1.2.2.2 Projektorganisation

Under projektets förstudiefas (senare delen av 1978) bedrevs arbetet av fyra intressenter: HSB Uppsala (markägare och byggherre), IV/UKAB (energileverantör), Fastighetskontoret (fördelar mark och fastigheter) och Stadsarkitektkontoret (utarbetar byggnadsplan).

När projektet under början av 1979 övergick i byggnadsplanefasen tillsattes en politisk ledningsgrupp med representanter från Byggnadsnämnd och Fastighetsnämnd. Vidare tillsattes en projektgrupp sammansatt av tjänstemän från Fastighetskontoret, HSBS Riksförbund, Stadsarkitektkontoret, IV/UKAB, Skolförvaltningen, Socialförvaltningen, Fritidsförvaltningen och Gatukontoret. Det bildades också en referensgrupp med företrädare för Hem och Skola och föreningslivet i Storvretaområdet.

På IV/UKAB fanns en speciell projektorganisation för solenergidelen av projektet.

1.2.2.3 Solenergiprojektet ur plansynpunkt

Solenergiprojektet innehåller två företeelser med väsentlig inverkan ur plansynpunkt. Utrymmesbehovet för 20 000 m² solfångare var enligt de första bedömningarna 40 000 m² markareal vid markplacering. Vid närmare analys befanns att med den relation som rådde mellan markpris och solfångarpris (monterade inkl stativ) var det ekonomiskt motiverat att använda

60 000 m² mark till 20 000 m² solfångare. Detta är en avsevärd areal inom ett exploateringsområde för 550 bostäder. Det ansågs därför önskvärt att försöka takplacera så stor del av solfångarna som möjligt. Detta även ur den synpunkten att i ett längre perspektiv solfångare avsågs kopplas till det befintliga fjärrvärmenätet.

Det vore ur markanvändningssynpunkt en fördel med takplacerade solfångare i den befintliga bebyggelsen där erforderliga ytor annars kan bli ett problem att hitta. Vidare fanns tankar om att kostnadsfördelar skulle kunna erhållas genom en integrerad konstruktion av yttertak och solfångare. Flerbostadshus, radhus garage, skolor och gemensamhetsbyggnader bedömdes som lämpliga att montera solfångare på medan enskilda småhus inte övervägdes. Efter en uppskattning av hur stor andel av husen det var praktiskt möjligt att orientera i lämpligt väderstreck beräknades ca 7 000 m² (35 %) av solfångarytan kunna takmonteras.

Lagret är den andra systemdelen med betydande planpåverkan. Under projektets tidigare del var arbetshypotesen att den mest ekonomiska lösningen var ett lager delvis nersprängt mellan två kullar och med uppfyllda massor omkring samt en flytande takkonstruktion. Lagret borde placeras centralt i bebyggelsen nära tyngdpunkten på värmelasten. Det vore även en fördel om avståndet till solfångarytan var litet, men detta är inte lika väsentligt som närhet till värmelasten. Lagret skulle med denna utformning (jord/bergdammkonstruktion) ianspråka ett område med 180 m diameter och släntlutningen 1:3 med hänsyn till erosionsrisken.

IV/UKAB placerade lager och den markförlagda solfångarytan på för solprojektet optimalt sätt i förstudiefasen (december 1978). När naturvårdsintendenten i Uppsala kommun kopplades in i arbetet (maj 1979) visade det sig att IV/UKABs önskemål inte var idealiska ur naturvårdssynpunkt. Efter besiktning på platsen flyttades såväl lager som solfångare till nya lägen vilket kalkylerades medföra en fördyring på ca 1 Mkr. Planarkitektens första planskiss (juni 1979) illustrerar lager och solfångare i det nya läget. I nästa mera bearbetade version av planskiss (juli 1979) har arkitekten placerat lagret på en kulle och omformat solfångarområdet samt anknutit det till ett industriområde. Avståndet mellan lager och solfångare blir större och solfångarytan blir mindre optimal till sin form. Det börjar alltmer stå klart för IV/UKAB att solenergiprojektets ekonomiska/tekniska aspekter väger lätt i planeringsprocessen. Boendet och boendemiljön har betydligt större tyngd.

I augusti 1979 tillskriver den politiska ledningsgruppen IV/UKABs styrelser och begär att inga solfångare skall takplaceras:

"Arbetet med upprättande av byggnadsplan för Lyckebo pågår. Soluppvärmning av området påverkar planutformningen i första hand i vad avser utläggande av områden för solfångare och ackumulator, men även i vad avser projektering av sådana byggnader som planeras få solfångare på tak. Projekteringen av sistnämnda byggnader skulle bli tidsödande med risk för försening av detaljplanen. Med hänsyn härtill får ledningsgruppen för Lyckebo föreslå industriverksstyrelsen besluta att inga solfångare skall placeras på några bostadshus". Skrivelsen föranleder industriverksstyrelsen att föreslå överläggning i ärendet.

Under arbetets gång börjar lager i form av ett isolerat bergrum att framstå som ett intressant alternativ. I oktober 1979 anlitar IV/UKAB konsultföretaget VIAK för en jämförande analys av jord/bergdamm kontra bergrum. Stadsarkitektkontorets representant framhåller att det för utformningen av detaljplanen är helt avgörande om det blir bergrum eller damm. Planarkitekten anser bergrumsalternativet vara tilltalande ur många synpunkter. Detta alternativ genererar emellertid andra problem, t ex bortforsling och omhändertagande av bergmassorna. Förmodligen skall det även finnas kvar en nerfart till bergrummet efter byggnadstiden.

Fastställes att beslut i frågan vilken lagertyp som skall väljas kommer att ske 1 februari 1980. IV/UKAB släpper kravet på takmonterade solfångare.

Ledningsgruppen sammanträder 25 oktober 1979. Stadsarkitektkontorets representant redovisar de tankar som finns beträffande delning av planen. Anledningen till delningen är att ett ställningstagande till utformning av värmelagret görs tidigast i januari 1980. Genom att senarelägga planen för området söder om tvärförbindelsen, där solfångare och lager är belägna, kan tidplanen för den norra delen hållas.

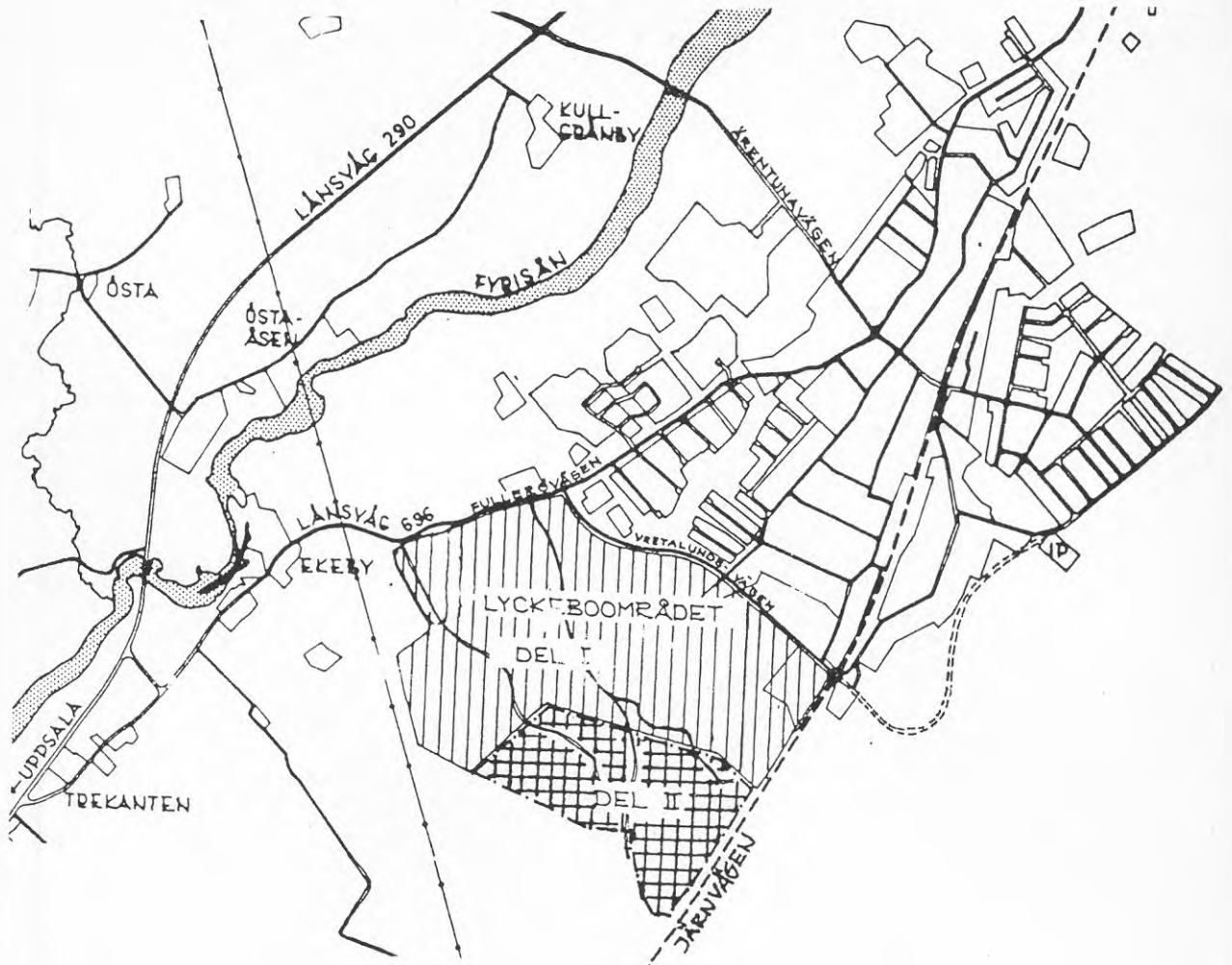
Ledningsgruppen beslutar att planläggningen skall bedrivas så att detaljplaneförslag för en första etapp kan tas fram utan att val av modell för värmelagring inväntas.

Industriverksstyrelsen beslutar 18 januari 1980 efter inkomna offerter att förorda lagring i bergrum. Därigenom friställs ett område som tidigare reserverats för lager vilket möjliggör inplacering av 25-30 lägenheter ytterligare.

1980-03-21 -- 1980-04-16 ställs förslaget till byggnadsplan för Lyckeboprojektet del I ut för granskning.

Planen antogs av kommunfullmäktige den 16 juni 1980.

En detaljerad beskrivning av gången i planarbetet finns i en promemoria från Uppsala Fastighetskontor.



Figur 1:2 Orienteringskarta tillhörande förslag till byggnadsplan

1.2.3 Planarbetet del II

1.2.3.1 Förutsättningar

Planen delades i två etapper för att en tidsfrist skulle erhållas, framför allt för lagrets utformning och placering.

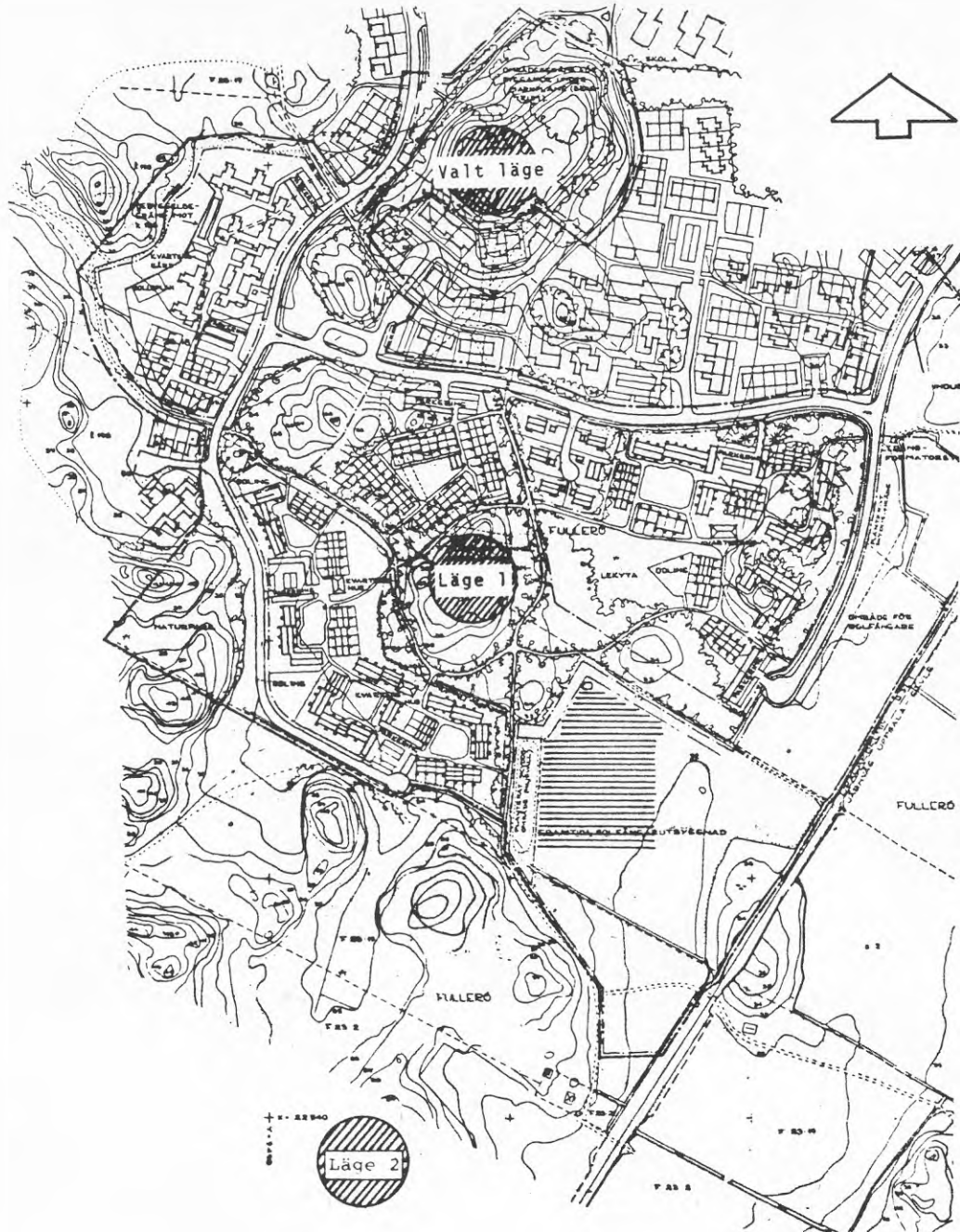
Solfångarfältet hade i detta skede redan funnit sin slutliga placering nere mot järnvägen i exploateringsområdets södra del.

Sedan beslut fattats om att utföra lagret som ett bergrum förändrades problematiken ur plansynpunkt. Själva bergrummet befinner sig i underjorden och utgör därför ingen restriktion i planen. Det som märks på ytan är tunnelpåslaget för tillfartstunneln. Vidare behövs två schakt från ytan och ner till rummet för i- och urladdning och i samband med dessa eventuellt en byggnad inrymmande rörinstallationer, pumpar, värmväxlare och elpanna för simulering av solfångarna i utbyggnadsetapp 2 av solfångarytan. I det slutliga utförandet blev även denna "byggnad" nersprängd under mark vilken mildrade dess planpåverkan.

Från bergrummet erhålles avsevärda bergmassor som kan krossas upp i lämpliga fraktioner och försäljas. Denna verksamhet är utrymmeskrävande och skrymmande och måste beaktas i byggnadsplanen. Den får vidare inte störa de i området boende efter inflyttning varför även en tidsmässig och transportmässig planering erfordrades.

1.2.3.2 Lokalisering av bergrummet

De undersökningar som utförts inledningsvis indikerade att en lokalisering till en bergplint inom del II av planen var sannolik (se fig 1:3, "läge 1").



SKALA 1:4000

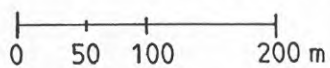


Fig 1:3 Alternativa placeringar av bergrummet

Det visade sig emellertid att tilltänkt plint var uppsprucken och genomströmmades av grundvattnet i en omfattning som omöjliggjorde byggande av ett funktionsdugligt bergrum för hetvattenlagring. Mot bakgrund av erfarenheterna de geotekniska undersökningarna gett kom intresset att riktas mot en plint inom del I av planen. Även en plint söder om planområdet och utanför detsamma undersöktes ("läge 2" i figur 1:3). Resultatet blev att plinten inom del I var den mest lämpade att bygga bergrummet i. ("Valt läge" i figur 1:3)

När man bygger ett bergrum spränger man först en tillfartstunnel som används under byggnadstiden för uttransport av bergmassorna. Längden på tunneln ges av den maximala stigning transportfordonen klarar av. Tunneln kostar en hel del per löpmeter varför strävan är att inte göra den längre än tekniskt nödvändigt. Platsen för tunnelmynningen, det s k tunnelpåslaget, bör helst vara av typ bergvägg för att markgenombryningen inte skall bli lång och komplicerad att utföra. Vidare bör transporttunneln helst inte korsa större vattenförande krosszoner. Det finns således en del restriktioner för tunneldragningen vilket gör det hela tämligen komplicerat. Det föreföll emellertid vara möjligt att åstadkomma en tunnelsträckning mynnande inom del II av planen vilket var en fördel. Vid de seismiska grundundersökningarna längs tunnelsträckningen befanns dock bergtäckningen på en längre sträcka inte bli tillräcklig varför alternativ lösning fick sökas. Lösningen blev en koncentrisk tillfartstunnel, tyvärr mynnande inom del I av planen. Slutresultatet blev således att hela bergrummet inklusive tunnelpåslag hamnade inom del I av planen, trots att orsaken till delningen och senareläggning av del II var lokalisering av lagret inom del II.

Den 12 november 1980 överlämnades planförslaget för del II innehållande även de delar av del I som förändrats på grund av bergrummets inplacering till byggnadsnämnden.

Planen antogs av kommunfullmäktige den 15 juni 1981.

1.3 TEKNISKA FRÅGOR

1.3.1 Upphandlingsfilosofi

1.3.1.1 Bakgrund

När IV/UKABs solenergiplaner åren 1978 -1979 började växa fram fanns ett ganska begränsat kunnande i Sverige om solvärme vid den tämligen höga temperaturnivå som erfordras vid större skala med säsongslagring. För att fånga upp idéer till tekniska lösningar och erhålla ett tekniskt och ekonomiskt kalkylunderlag av tillräcklig kvalitet beslöt IV/UKAB tillämpa ett tvåstegsförfarande för upphandlingen. Preliminära anbud infordrades för solfångare inklusive stativ monterade på av beställaren tillhandahållna fundament samt för hetvattenlager med anbudsgräns värmväxlarstutsar mot distributionsnätet. I anbudsförfrågan klargjordes att en andra anbudsomgång på ett förbättrat underlag skulle komma senare. Möjligheten att utifrån den preliminära offerten göra en förhandlingsupphandling fanns också, vilket blev fallet med lagret.

1.3.1.2 Solfångare

Den bästa kompetensen på solfångare i temperaturområdet av intresse bedömdes finnas i USA. Ett förfrågningsunderlag med upplysningar om projektet och dess bakgrund, data om värmebehov temperaturnivåer samt gällande klimatdata för Uppsala sammanställdes. Detta skickades ut till ledande amerikanska leverantörer och en del forskningsorganisationer i USA samt till några svenska leverantörer. En tidigare medarbetare på Uppsala Kraftvärme AB, verksam i St Paul, Minnesota, USA, med kontakter på Energidepartementet i Washington (Department of Energy, DOE), hjälpte till med urvalet på den svåröverskådliga amerikanska marknaden. Förfrågningsunderlaget skickades ut i mitten av juli 1979. Gensvaret på den amerikanska marknaden blev stort; samtliga tillfrågade lämnade anbud av skiftande kvalitet.

Flera av leverantörerna besökte därefter Uppsala och några etablerade kontakt med svenska firmor för samarbete och eventuell legotillverkning. UKABs grundtanke var att den riktiga uppläggningsdelen borde vara att importera den högteknologiska delen av solfångaren och tillverka resten i Sverige. Denna bedömning visade sig delas av fabrikanterna i USA.

För att få egna erfarenheter av montage, drift, underhåll och verkningsgrad samt för att göra en jämförelse av några olika solfångarfabrikat beslöt UKAB därefter att installera en testanläggning med ca 30 m² per fabrikat. Denna förlades till taket på värmeverket i Knivsta, i Uppsala Kommuns södra del, och tre olika typer av evakuerade solfångare kopplades in på returledningen i fjärrvärmenätet där. När BFR bestämde sig för att gå in i IEAs (International Energy Agency) jämförande test av evakuerade solfångarsystem, blev Knivstainstallationen Sveriges testinstallation och BFR svarade för mätning och utvärdering. Anläggningen och resultaten finns beskrivna i kap 1.3.4 "Val av solfångare".

För att inte låsa upphandlingen till evakuerade solfångare installerades även en rörlig, koncentrerande solfångare om ca 70 m² invid kraftvärmeverket i Uppsala. Förutom rena drift- och underhållserfarenheter var avsikten även att få fram bättre underlag på hur en koncentrerande solfångare fungerar i Sveriges klimat. Utvärderingen av denna solfångare komplicerades dock genom en mängd driftproblem, först i solföljningen, sedan även mekaniskt samt till sist även i mätsystemet. Mera om detta i kap 1.3.4 "Val av solfångare".

Under våren 1982, när en hel del erfarenheter vunnits från testanläggningarna, skickades en offertförfrågan ut till tretton solfångarfabrikanter, varav sju svenska. Tio av de presumptiva leverantörerna lämnade anbud, där 6 st gällde evakuerade solfångare, 2 st koncentrerande och 2 st plana. Eftersom kravet i förfrågan gällde en årlig energimängd (1280 MWh) där större delen levereras vid temperaturer över 90°C, gav svaren en spännvidd i solfångaryta. Ett önskemål var också att kunna köpa hela anläggningen på totalentreprenad och med energigarantier. För de utländska solfångarfabrikanterna kunde detta lösas genom samarbete med någon svensk firma vilken kunde stå för kringutrustning, rör, montering m m.

De minsta offererade solfångarytorna gällde de koncentrerande solfångarna, ca 3 000 m². De plana solfångarfabrikanterna föreslog ca 3 500 m² och de evakuerade varierade mellan 3 100 - 4 900 m². Skillnaden avspeglar dock inte endast solfångarprestanda utan är mer en bedömning av säkerhet beträffande energigarantierna.

Ett urval gjordes i första omgången av de mest intressanta fabrikaten. Här fanns fortfarande representanter för de tre olika solfångartyperna, då varje typ har sina för- resp nackdelar som är svåra att jämföra. Efter kompletteringar så att anläggningarna blev fullständiga kunde ekonomiska jämförelser göras i förhållande till förväntad energiproduktion. Ojämförligt lägsta kostnad per energienhet hade en plan

soolfångare, trots att en ökning av ytan till 4 300 m² gjorts i samband med att energigarantin lämnades. Därefter följde en koncentrerande solfångare, vars 3 100 m² skulle kosta ca 20% mer. De dyraste blev till slut de evakuerade solfångarna med nära 50% högre anläggningspris än för de plana. Kvadratmeterpriset var dock inte motsvarande dyrare eftersom den föreslagna ytan var ca 4 500 m², d v s större än för de plana. För de evakuerade fanns en potential att minska ytan och priset något, men eftersom gapet till de plana var så pass stort togs i detta skede beslutet att köpa den plana typen trots att UKAB inte hade haft möjlighet att testa dessa solfångare.

Att valet av solfångartyp inte blev vad som förväntades i början av projektet beror på både tekniska och ekonomiska förändringar under projektets gång. 1978 fanns inga plana, högtemperatursolfångare och inget egentligt utvecklingsarbete pågick heller. Det är inte osannolikt att de i Lyckeboprojektet ställda kraven initierade att utvecklingsarbetet kom igång. Det var naturligt att blickarna vid tiden för den preliminära anbudsfrågan vändes mot de existerande typerna evakuerade resp koncentrerande solfångare. Eftersom samtliga dessa var tillverkade utomlands, merparten dessutom i USA, kom även dollarkursens höjning med 50% under åren 1978-82 att spela en betydelsefull roll. När det svenska företaget Scandinavian Solar presenterade sin, i samarbete med Gränges Sunstrip, utvecklade solfångare, som både tekniskt och ekonomiskt kunde konkurrera med övriga typer, och när man dessutom kunde tillmötesgå de garantikrav på energi, material och arbete som UKAB ställt upp, kom Lyckeboanläggningen att byggas upp med plana, svenska solfångare.

1.3.1.3 Lager

När det gäller lager skiljde sig situationen markant från solfångare vad gällde kompetens inom landets gränser i slutet av 1970-talet. De svenska bergbyggarna har ett kunnande och erfarenheter som hävdar sig väl även i ett internationellt perspektiv. Svenskt underjordsbyggande har varit omfattande bland annat inom vattenkraft, tunnelbyggande för olika ändamål samt oljeberggrum. Inte minst den sistnämnda tillämpningen ligger nära hetvattenlagringens problemområde.

För Lyckeboprojektet valdes en arbetsmodell, där konsultföretaget VIAK anlätades för förundersökningar, byggkontroll m m. De bergbyggande leverantörerna tillfrågades om budgetofferter där leverantörerna själva fick lämna förslag på lagerkonstruktion. SKANSKA presenterade den såväl tekniskt som ekonomiskt mest intressanta lösningen, vilket senare resulterade i en förhandlingsupphandling av en totalentreprenad.

1.3.2 Markundersökning för lagret

1.3.2.1 Förstudier

När förstudien utfördes i slutet av 1978 var den första arbetshypotesen att lagret skulle utformas som ett gropmagasin, delvis nedsprängt i berg. Sprängmassorna skulle sedan tillsammans med befintliga kullar utnyttjas som vallar kring den övre delen av magasinet. Ett område med gynnsam topografi valdes för anläggningen i en av områdets lågområden, några hundra meter söder om den plats där lagret sedan kom att hamna.

För att ge underlag för förstudien utfördes en geoteknisk undersökning. Vid det planerade läget utfördes en seismisk undersökning för att kontrollera bergkvaliteter och jorddjup. Man fann inga indikationer på att berget skulle vara dåligt eller innehålla stora krosszoner. Den seismiska gånghastigheten var omkring 5 000 m/s. Bergytan verkade vara jämn och jorddjupen mellan 3 och 4 m. Den dominerande jordarten var morän.

Som en del av förstudiearbetet gjordes även en jämförelse mellan gropmagasin och bergrum ur byggnadsteknisk synpunkt. Man fann här att både byggkostnader och riskmoment vägde till förmån för ett bergrumslager. När sedan även de flesta entreprenörer som givit förslag om hur lagret skulle utformas förordade ett bergrum, valdes denna lösning.

1.3.2.2 Metodik för förundersökningar för bergrummet

Innan förundersökningar för bergrummet utfördes förekom en omfattande diskussion med presumptiva entreprenörer och konsulter om hur förundersökningarna borde utföras. Åsikterna varierade mellan den ena ytterligheten, att det i stort sett bara var att sätta igång och bygga, till den andra ytterligheten att mycket omfattande förundersökningar var nödvändiga med hänsyn till att projektet avsåg en ny tillämpning av bergrumstekniken.

Vid val av omfattning och metodik för förundersökningarna måste man vara medveten om att bergkvaliteten i hög grad påverkar byggkostnaderna. Så gör även grundvattenförhållandena och de flesta förstärkningsarbetena orsakas av kombinationen vatten och dåligt berg. Vidare medför lagrets användning att ytterligare vikt måste läggas vid de geohydrologiska förhållandena, då ett grundvattenflöde genom rummet medför värmeförluster.

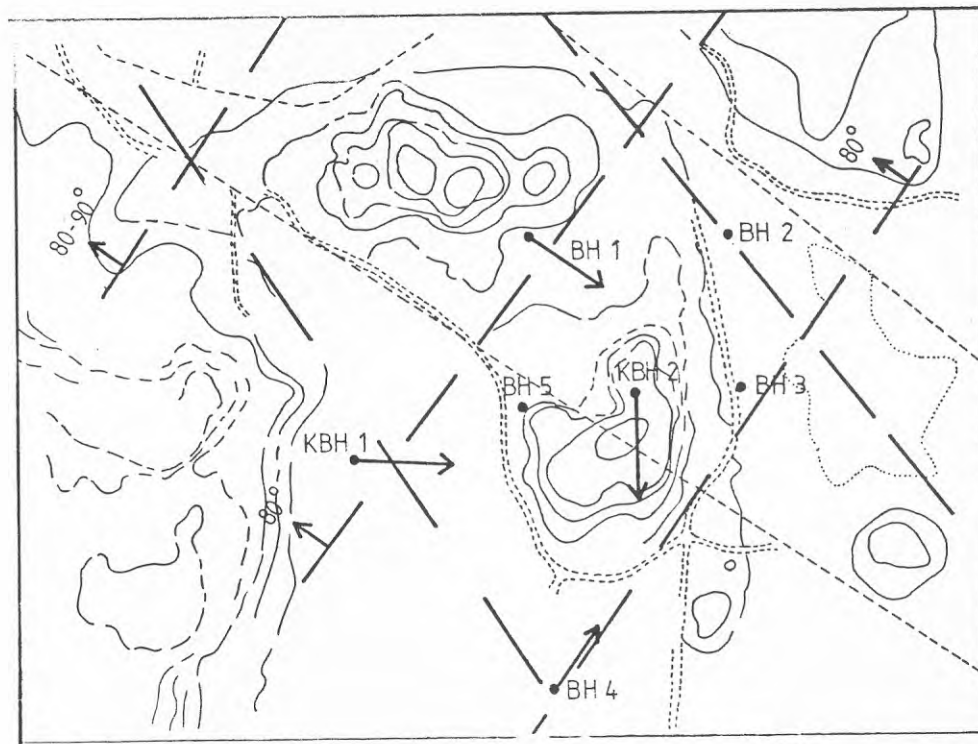
Efter diskussion mellan beställaren och den anlitate konsulten för de geologiska/geohydrologiska undersökningarna bestämdes att förundersökningarna skulle omfatta följande:

- Geologisk kartering och sprickkartering
- Geofysiska mätningar (VLF)
- Hammarbörningar
- Kärnbörningar
- Provpumpningar

1.3.2.3 Utförda undersökningar, område 1

Av plantekniska skäl valdes en bergplint omedelbart öster om det föreslagna läget för gropmagasinet, se Se figur 1:3, läge 1. I denna bergplint utfördes den första undersökningsetappen.

Som första del i undersökningen utfördes en hållkartering i området. På hållarna inmättes sprickornas antal och riktning. Vidare utfördes elektromagnetiska profilmätningar (VLF). Vid dessa mätes styrka och riktning hos fältet från lågfrekventa (Very Low Frequency) radiosändare. Radiovågorna kan till viss del tränga ned i marken och goda elektriska ledare, t ex. vattenfyllda sprickzoner) får fältet att ändra riktning, varför de kan detekteras. Detta material ställdes sedan mot en tektonisk flygbildskartering. Analysen visar en regelbundet rombiskt uppsprucken berggrund, där rutorna i romberna utgöres av synliga bergplintar. Se figur 1:4.



Skala 1:4000

Figur 1:4 Sprickzoner och borrhningar i område 1

På grundval av detta material utfördes sedan ett borrhningsprogram om 5 st hammarborrningar och två kärnborrningar, se figur 1:4. Borrningarna placerades så att den centrala delen av plinten, där bergrummet skulle placeras, och de begränsade sprickzonerna skulle penetreras av borrhålen.

Resultatet av borrningarna bekräftade sprickzonernas lägen och mycket stora vattenmängder erhöles enligt borrarerna från dessa. Även de centralt placerade hålen visade sprickigt berg.

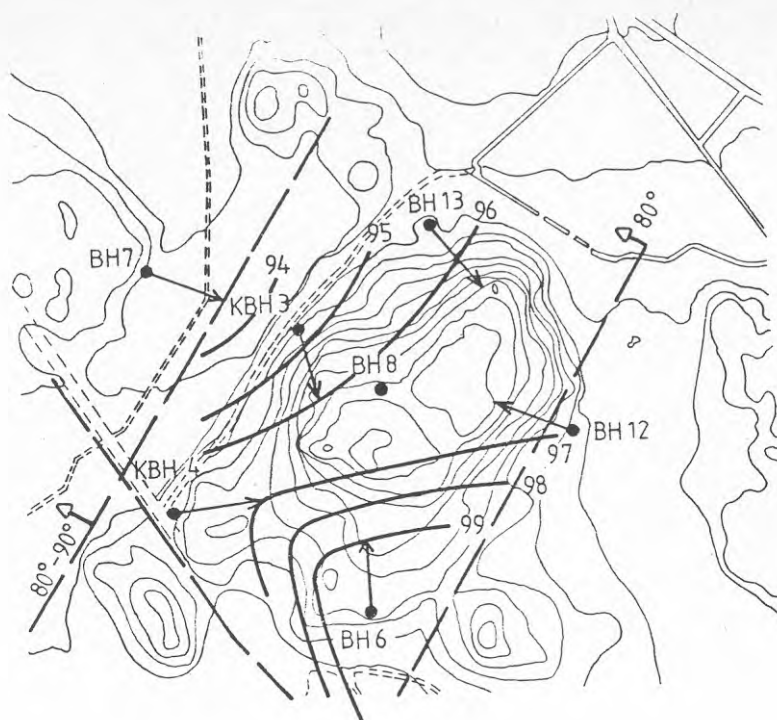
I tre av borrhålen utfördes provpumpningar, som bekräftade resultatet från borrningarna att plinten var uppsprucken. Detta medförde att område 1 inte kunde användas för berglagret.

1.3.2.4 Undersökningar i område 2

För att finna ett annat läge för bergrummet utökades undersökningarna med ett förenklat förfarande. Den geologiska karteringen och VLF-mätningarna utbreddes över ett större område. På detta underlag valdes två nya plintar ut där hammarborrningar utfördes. I område 2, som ligger sydväst om solfångarfältet borrades tre hål, som samtliga visade ett sprickigt berg med hög permeabilitet. Detta gjorde att området uteslöts.

1.3.2.5 Undersökningar vid det valda bergrumsläget

Inledningsvis utfördes tre hammarborrningar utsatta på grundval av den utökade geologiska karteringen. Dessa visade ett berg av väsentligt högre kvalitet och borrningarna kompletterades med två hammarborrhål och två kärnborrhål, se figur 1:5



Skala 1:4000

Figur 1:5 Borrningar och grundvattennivåer vid det valda bergrumsläget, lokalt höjdsystem.

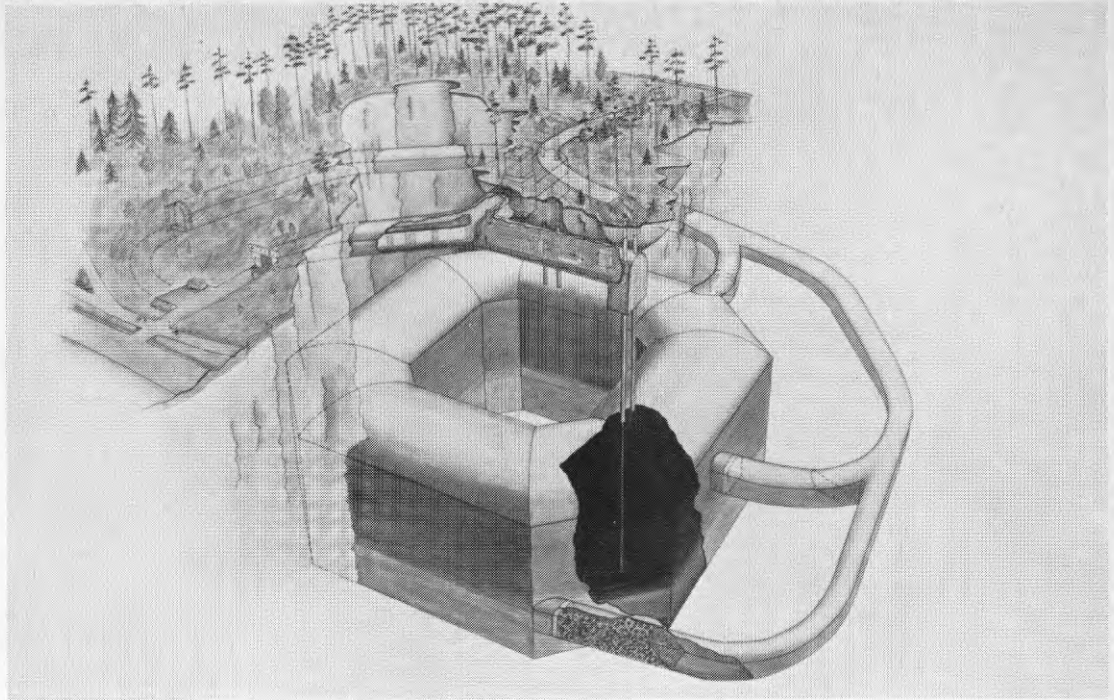
Kärnborrhningarna visade ett berg av mycket hög kvalitet med ett fåtal sprickor som ofta var läkta av sekundära mineraler.

Provpumpningar utfördes sedan på borrhålen BH7, BH12 och BH13. Utvärderingen visade att denna bergplint var väsentligt tätare än de tidigare. Plinten var vidare begränsad av vattenförande sprickzoner som måste undvikas vid byggandet. Pumpningar visade vidare att en sprickzon gick diagonalt genom plinten. Denna borde dock vara möjlig att undvika om bergrummet försköts mot norr inom plinten, d v s ungefär under borrhål BH8.

På detta underlag upprättades en preliminär layout. Med ett bergrum i två skepp och en transporttunnel, som planerades gå in i plinten från sydost.

När entreprenören, SKANSKA sedan tog över arbetet förändrades utformningen till en "ringformad tunnel" runt en central bergpelare i det valda läget. En seismisk undersökning visade vidare att bergtäckningen över den föreslagna transportorten skulle bli för liten, varför en spiralformad transportort inom plinten valdes. Se figur 1:6.

För att fastlägga förutsättningarna för att kunna förlägga fjärrvärmecentral och installationer för värmelager i en tunnel ovan lagret, kompletterades bergundersökningen med en seismisk undersökning även i bergrumsläget (se även kapitel 2.4.2.1).

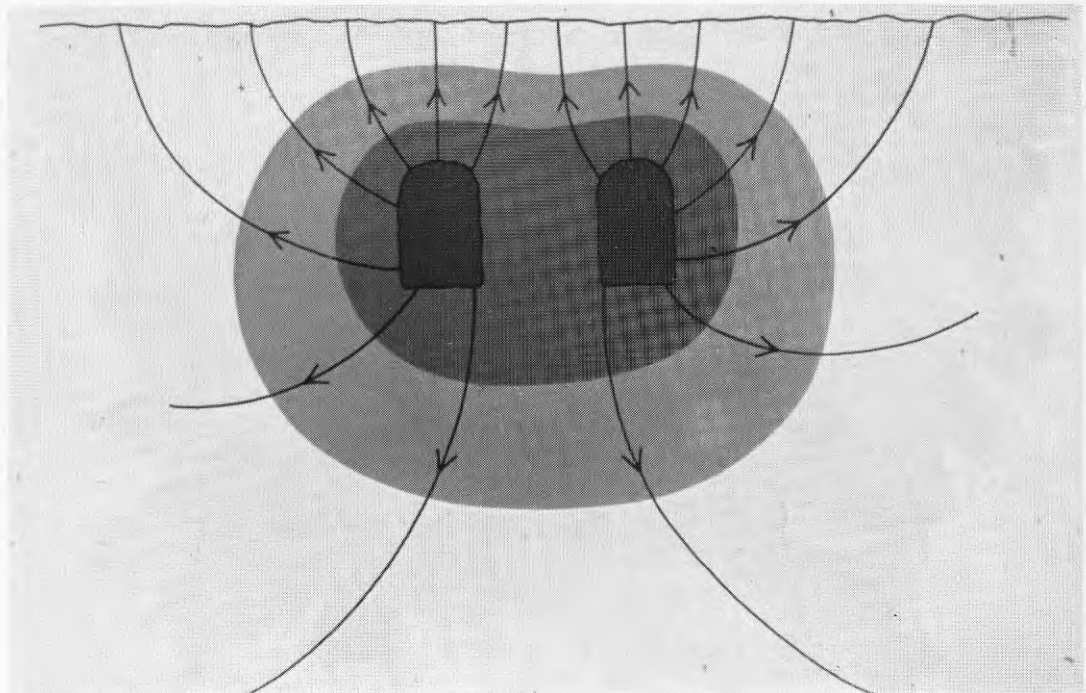


Figur 1:6 Värmelagret

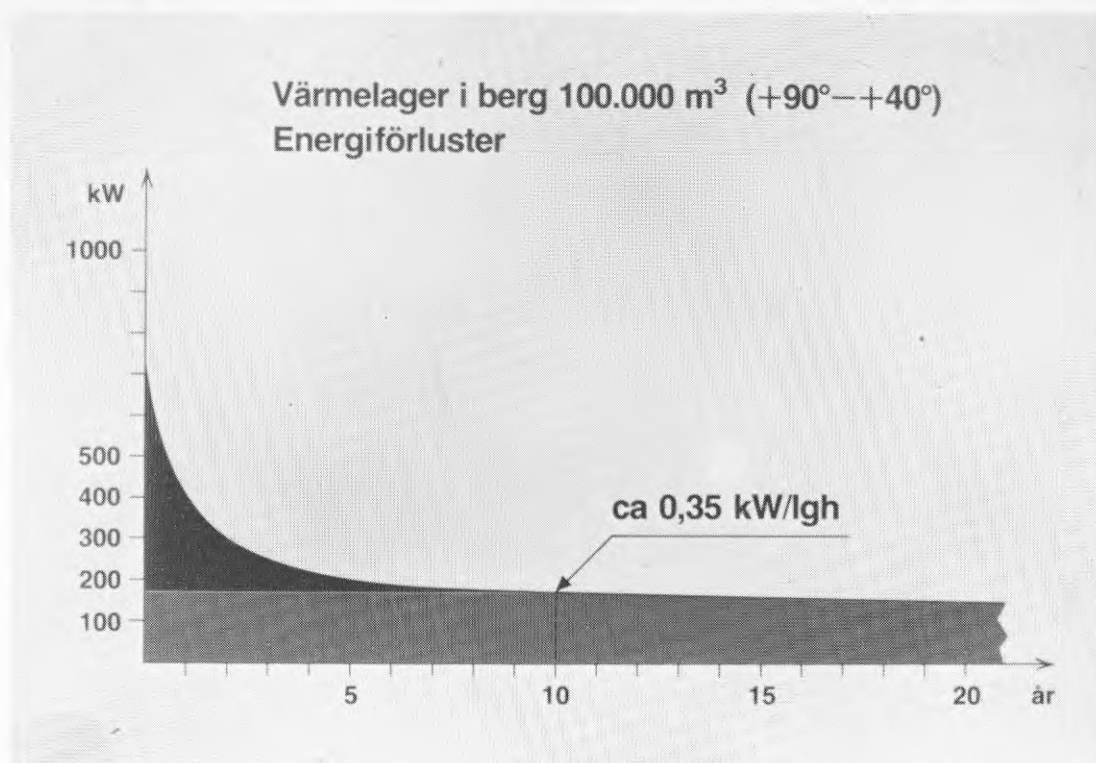
1.3.3 Värmeförlustberäkningar

Den principiella värmespridningen från lagret till det omgivande berget visas i figur 1:7.

Bergrumslagret är oisolerat. Genom att omgivande berg successivt uppvärms kommer de årliga värmeförlusterna att avta över tiden och närma sig ett stationärt tillstånd. Förloppet framgår av figur 1:8.



Figur 1:7 Principiell värmespridning från lagret till omgivande berg. Tvärs nitt.



Figur 1:8 Utvecklingen för berggrumslagrets energiförluster över tiden.

Uppsala Kraftvärme AB har berggrum för oljelagring med total volym 500 000 m³.

Utifrån oljeförbrukningen för varmhållningen av oljelagren gjordes jämförande beräkningar av UKAB över förväntade värmeförluster för ett hetvattenlager på 100 000 m³, med Lyckebos temperaturförhållanden, sedan stationärt tillstånd uppnåtts.

Förlusterna från oljelagret korrigerades med hänsyn till vatteninläckage, avvikande geometrisk form och storlek samt skillnad i temperaturnivå jämfört med det planerade Lyckebolagret. Den årliga energiförlust UKAB räknade fram överensstämde i stort med de senare utförda teoretiska beräkningarna.

För att utröna värmeförlusternas storlek på kortare sikt (cirka de första fem åren) och de långsiktiga förlusterna när stationärt tillstånd uppnåtts, utfördes två olika värmeförlustberäkningar vid tidpunkten för beslutet om projektets genomförande.

Vattenfall, Älvkarlebylaboratoriet, utförde den ena beräkningen och Lunds Tekniska Högskola den andra. I bilaga 1 och 2 beskrivs de båda beräkningarna och dess resultat. Senare utförde även totalentreprenören av berggrumslagret värmeförlustberäkningar.

Beräkningsresultaten från de tre beräkningarna blev tämligen samstämmiga med avtagande förluster över tiden enligt figur 1:8.

Efter att stationärt tillstånd uppnåtts kan cirka 75% av det man matar in i lagret matas ut på fjärrvärmenätet och de resterande 25 procenten lämnar lagret i form av förluster.

1.3.4 Val av solfångare

Temperaturkraven i fjärrvärmenätet gjorde det naturligt att i första hand intressera sig för solfångare som kan arbeta vid en hög temperaturnivå med bibehållen verkningsgrad. Vid lagring önskar man sig stor temperaturdifferens mellan topp och botten för att minimera lagerstorleken. Det är således av flera skäl ett önskemål att solfångarna kan leverera en temperatur nära 100°C.

Som ovan beskrivits (kap 1.3.1 "Upphandlingsfilosofi") installerade UKAB en testanläggning i Knivsta med 3 evakuerade solfångartyper samt en anläggning med koncentrerande solfångare vid kraftvärmeverket i Uppsala. Efter upphandlingen till Lyckeboprojektet, där valet föll på en plan solfångare, byttes ett av de evakuerade solfångarfabrikaten ut mot denna plana för att få jämförelser mellan de olika typerna.

1.3.4.1 Testinstallation i Knivsta

På taket av värmeverket i Knivsta, ca 20 km söder om Uppsala, monterades under 1980 och 1981 tre olika fabrikat av evakuerade solfångare. De tre fabrikaten var General Electric (GE), Owens-Illinois (OI) och Philips (Ph) med sammanlagd solfångaryta 100 m².



Figur 1:9 Knivstaverket med solfångarinstallation på taket.



Figur 1:10 Solfångarinstallationen på Knivstaverket i Uppsala

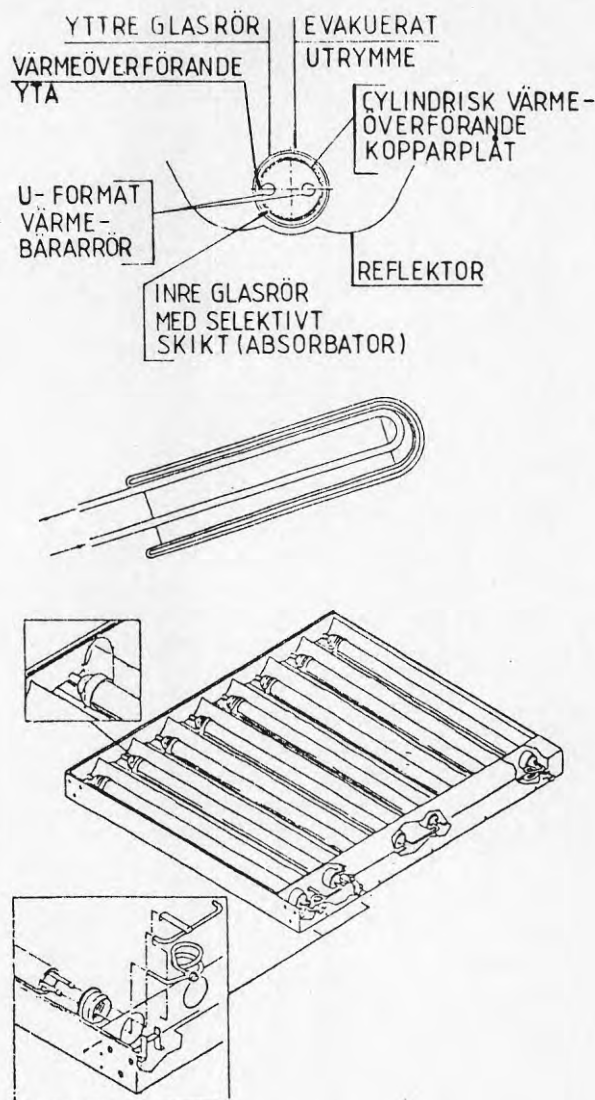
UKAB har ombesörjt inköp och montering av solfångarna med stativ och kringutrustning samt svarat för drift och underhåll. Anläggningen ingår i den internationella jämförelsen av olika evakuerade solfångarsystem (IEA Task VI). BFR har gett Studsvik Energiteknik i uppdrag att ansvara för mätvärdesinsamling och utvärdering. Inom Task VI (Performance of solar heating, cooling, and hot water system using evacuated collectors) sker ett regelbundet erfarenhetsutbyte mellan de deltagande länderna (Västtyskland, USA, Nederländerna, Storbritannien, Schweiz, Kanada, Australien, Japan, EG, Sverige). Anläggningarna finns dokumenterade och utvärderade enligt en standardnorm som utvecklats inom gruppen. Rapporter finns dels för respektive land, dels i sammanställningar med jämförelser mellan installationerna.

Alla tre systemen inkopplades i juni 1981 och har sedan dess varit i drift året om med glykol (GE) resp varmhållning (OI, Ph) som frysskydd. I januari 1983 byttes OI-solfångarna ut mot solfångare från Scandinavian Solar (SS), den till Lyckeboprojektet inköpta solfångaren.

Solfångarna är monterade i tre separata kretsar med tryckhållning, pump och ventiler och är via värmeväxlare anslutna till returledningen i fjärrvärmenätet. Eftersom värmebehovet alltid är mycket större än energiproduktionen från solfångarna finns inget lager i systemet.

1.3.4.1.2 General Electric

GES solfångare består av ett slutet, dubbelt glaströr med vacuum mellan och selektivt skikt på insidan, samt en kopparrör och ett u-format kopparrör där vattnet leds. Se figur 1.11.



Figur 1:11 General Electric's vacuum-solfångare TC 100

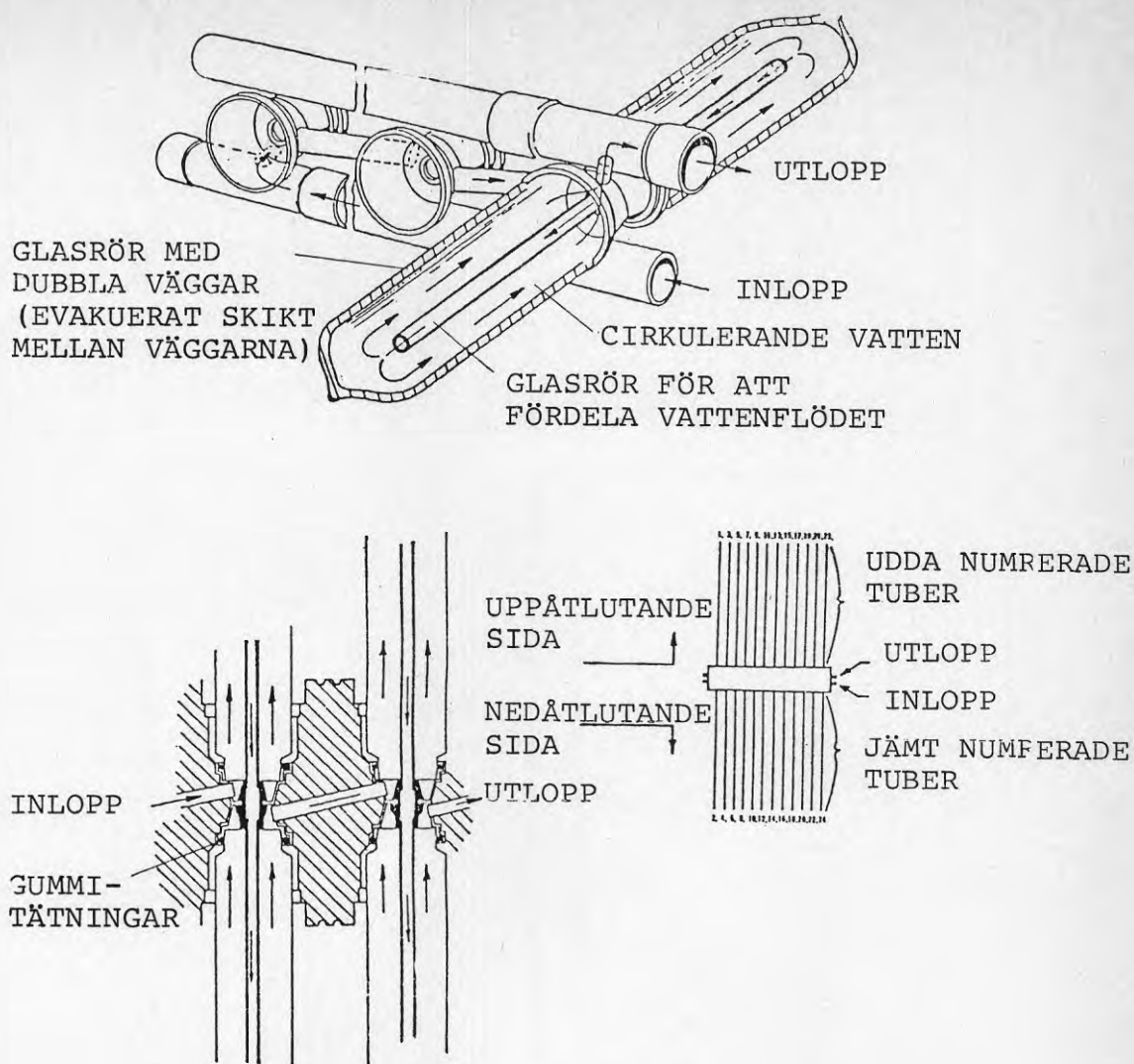
En modul utgörs av 8 seriekopplade tuber med sammanlagda totala ytan 1.62 m^2 resp effektiva ytan 1.38 m^2 . Solfångarna levererades monterade i färdiga moduler med solfångarrör, reflektorer och ram. Modellbeteckningen är TC 100. I Knivsta monterades 28 moduler i 2 rader med 14 moduler per rad. Modulerna är sinsemellan parallellkopplade. Sammanlagd yta är 38.36 m^2 och solfångarna är uppställda mot söder med 45° lutning.

GES solfångare var enkla att montera och ansluta till samlingsledningarna. Ett problem som uppstod i början av driftperioden var att de klena rören i solfångarna satte igen p g a föroreningar i vätskan. Det fanns inget filter i systemet. Ett filter monterades senare in men trots detta erhöles ånyo igensättningsproblem efter en ombyggnad av värmeverket då några moduler tillfälligt fick avlägsnas. På grund av igensättningar kom cirkulationen i systemet flera gånger att avstanna med åtföljande kokning. Glasrören tålde denna behandling men i vissa moduler oxiderade kopparplåten innanför glasröret så pass mycket att ett svart pulver i stort sett fyllde röret. På senare modeller har kopparplåten överdragits med ett nickellager för att minska oxidationsrisken. Även limmet till plasthattarna, som är placerade över vacuumförslutningen har åldrats och en del hattar har släppt. Detta gör glasrören känsliga för mekanisk påverkan och flera rör har gått sönder.

1.3.4.1.3 Owens-Illinois

OIs solfångare består också av ett slutet, dubbelt glasrör med vacuum mellan, selektivt skikt på insidan, men skiljer sig från GES solfångare genom att det innersta glasröret är vattenfyllt. Ett krent glasrör inuti det stora röret fördelar vattenflödet. En modul består av 24 seriekopplade rör som är monterade i 2 rader mot varandra. Varje modul har den totala ytan 2.97 m^2 resp effektiva ytan 2.55 m^2 . Modellen är Sunpac och i Knivsta monterades 14 moduler i 2 rader. Solfångarna står uppställda mot söder med 45° lutning och totala ytan är 35.64 m^2 . Se figur 1:12.

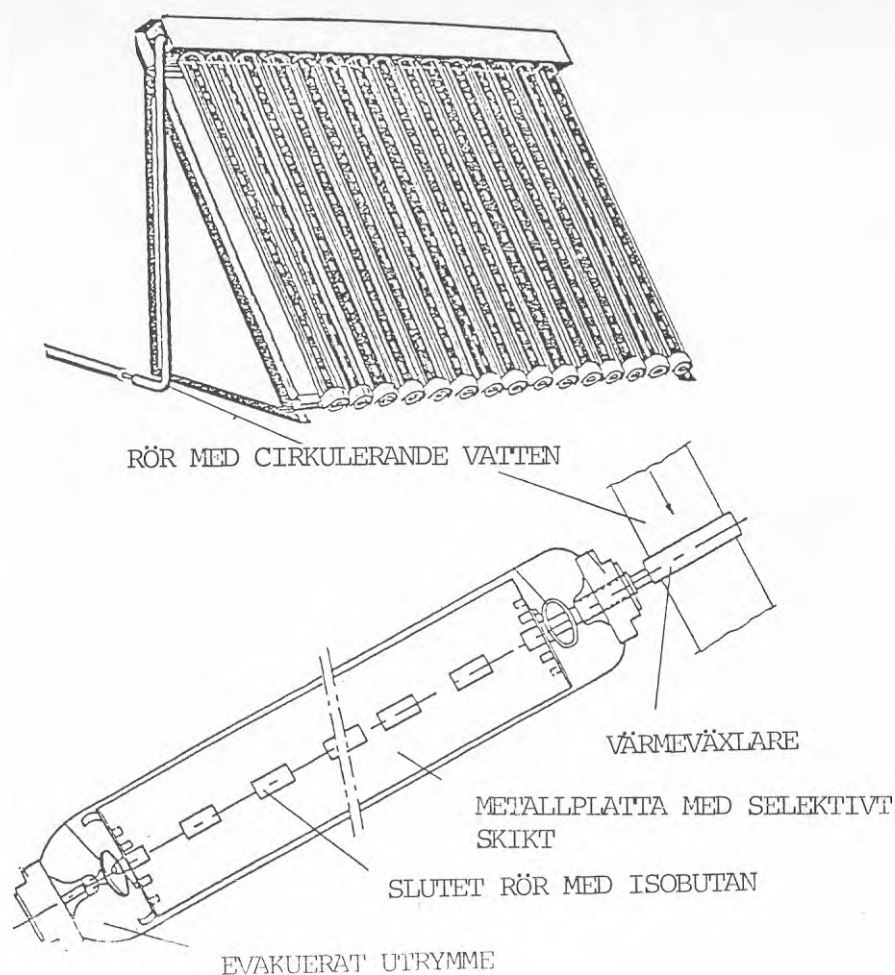
OIs solfångare levererades helt omonterad med ca 250 delar per modul (inkl nitar, skruvar m m). Solfångarna ligger inte i någon ram eller låda utan spänns ihop på baksidan med hjälp av dragstänger. Konstruktionen blir på grund av detta instabil och måste lyftas och förflyttas försiktigt. Denna detalj kom att bli betydelsefull vid driften av solfångarna på taket av värmeverket. Detta utsattes nämligen ständigt för vibrationer från transportskruvarna till flishanteringen varpå dragstängerna gängade upp sig och solfångarna började läcka. Läckage i detta system förekom relativt ofta och var oerhört besvärande dels p g a att hela övre radens vätska kunde försvinna ut, vilket omöjliggjorde användning av glykol, dels genom att systemet därefter var svårt och tidsödande att åter fylla upp.



Figur 1:12 Owens-Illinois vacuum-solfångare Sunpac

1.3.4.1.4 Philips

Philips evakuerade solfångare skiljer sig från föregående främst genom att den värmeupptagande vätskan i glaströren och vattenkretsen som distribuerar värmen till värmeväxlaren består av skilda kretsar. Glasröret är enkelväggigt och det är vacuum inuti. Inne i röret finns ett kopparrör och en plan plåt belagd med selektivt skikt. I röret finns en vätska, isobutan, som vid uppvärmning förångas. Den förångade vätskan stiger uppåt till en värmeväxlare (kondensator), som sitter i övre delen av röret. Ångbildningsvärmes överförs till distributionssystemet och kondensatet rinner tillbaka ner i rörets nedre del där det på nytt förångas o s v. Värmewäxlaren skruvas fast på distributionsledningarna. Rörsystemet är genom detta helt avskilt från solfångardelen. Fördelarna med denna typ av solfångare är bl a att risken för läckage är liten, solfångardelarna är lätt utbytbara och den termiska trögheten liten. Varje modul innehåller 19 rör och har en effektiv yta av 1.37 m^2 . I Knivsta är 18 moduler installerade i 3 seriekopplade rader med den sammanlagda ytan 24.62 m^2 . Reflektorer saknas vid denna installation och lutningen är 60° . (Figur 1:13).



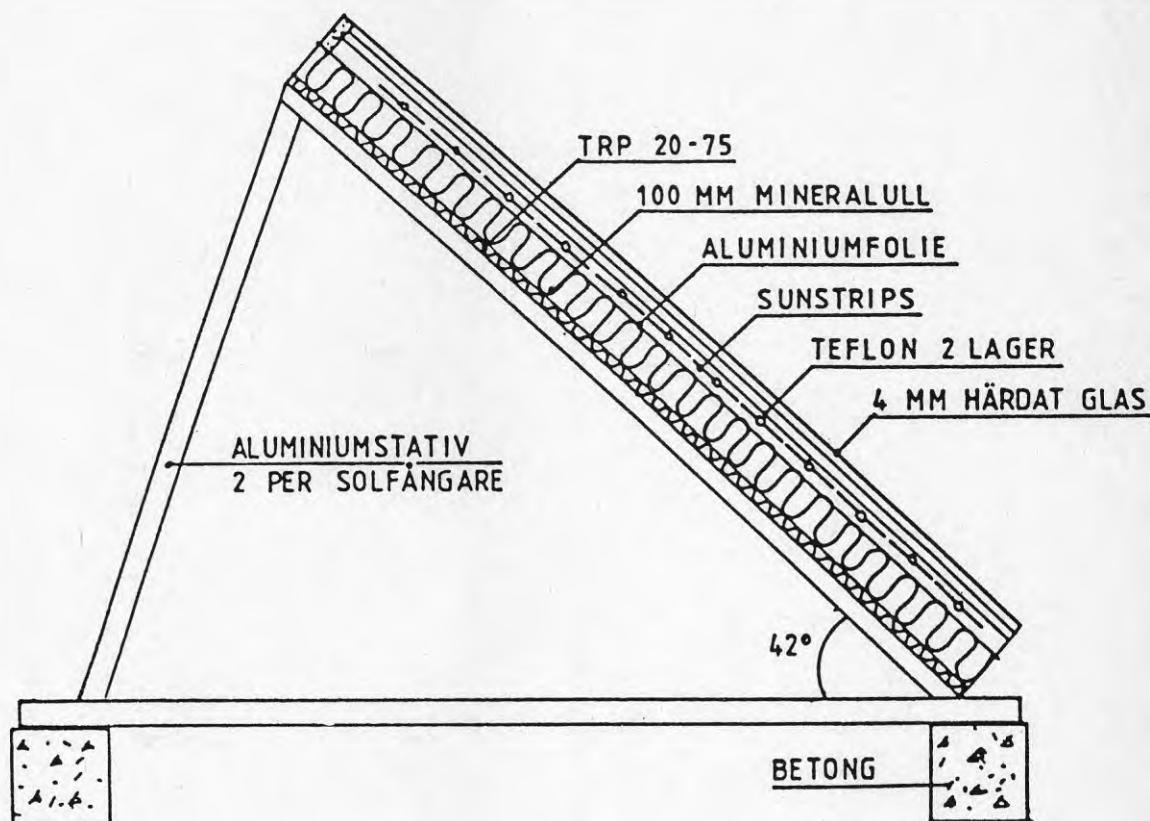
Figur 1:13 Philips vacuum-solfångare VTR 161

Monteringen var enkel men glaströren visade sig vara mycket sköra och ca 10% gick sönder i samband med monteringen. Drift och underhåll har varit utan problem främst genom att inga klena ledningar finns i systemet och genom seriekopplingen blir uppfyllning och avluftning enkel och snabb att utföra.

1.3.4.1.5 Scandinavian Solar

I Knivsta kopplades två solfångare från Scandinavian Solar in under januari 1983 i det system där Owens-Illinois tidigare varit monterad. Solfångaren beskrivs närmare i kap 2.3 "Solfångarsystemet" och här redovisas endast några av de resultat som kommit fram vid de jämförande mätningarna. Ytan i Knivsta är 24 m² och solfångarna är parallellkopplade. Genom att solfångarna monterades i ett befintligt system och detta inte var optimerat för dessa solfångare uppstod

bl a problem med avluftning av solfångarna, något som inte har inträffat i Lyckebo där effektiv avluftning finns.



Figur 1:14 Sektion av Scandinavian HT-solfångaren.

1.3.4.1.6 Resultat

Instrålad resp insamlad energimängd under oktober 1981 - september 1982 visas i fig 1:15. Energimängderna redovisas per m^2 effektiv solfångaryta. På grund av skillnaden i lutning mellan Philips och de båda övriga är instrålad energimängd olika. Medeltemperaturen under drift i solfångarna varierar mellan $60-70^{\circ}\text{C}$. Medelverkningsgraden för de tre systemen var i resp solfångarkrets 30% (General Electric), 27% (Owens-Illinois) resp 33% (Philips).

I figur 1:16 visas Scandinavian Solar och i figur 1:17 visas Philips under februari-oktober 1983. Medelverkningsgraden under denna tid var i resp solfångarkrets 30% (Scandinavian Solar) resp 35% (Philips).

Utvärderingen finns dokumenterad i IEA-rapporten. Se litteraturförteckningen.

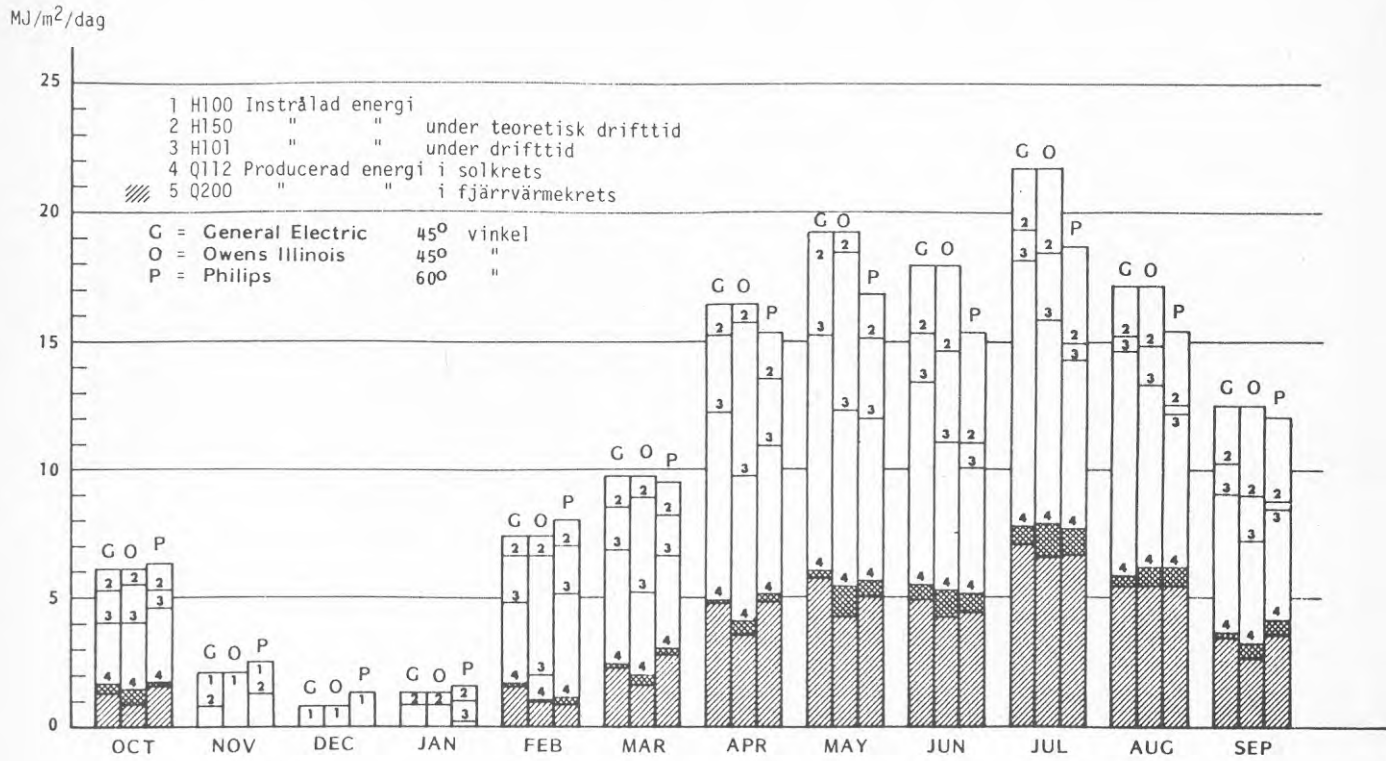
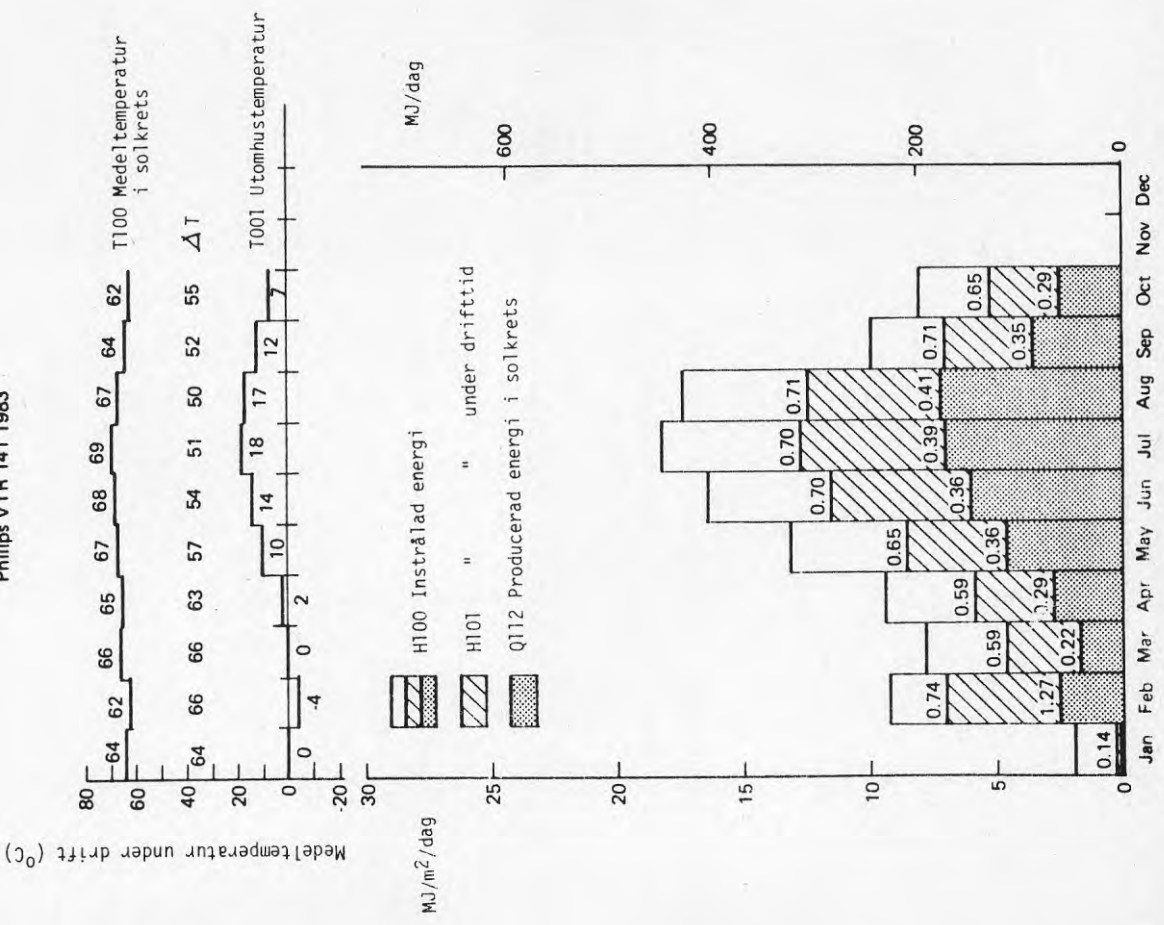


Fig 1:15

Instrålad resp insamlad energi under oktober 1981 - september 1982.

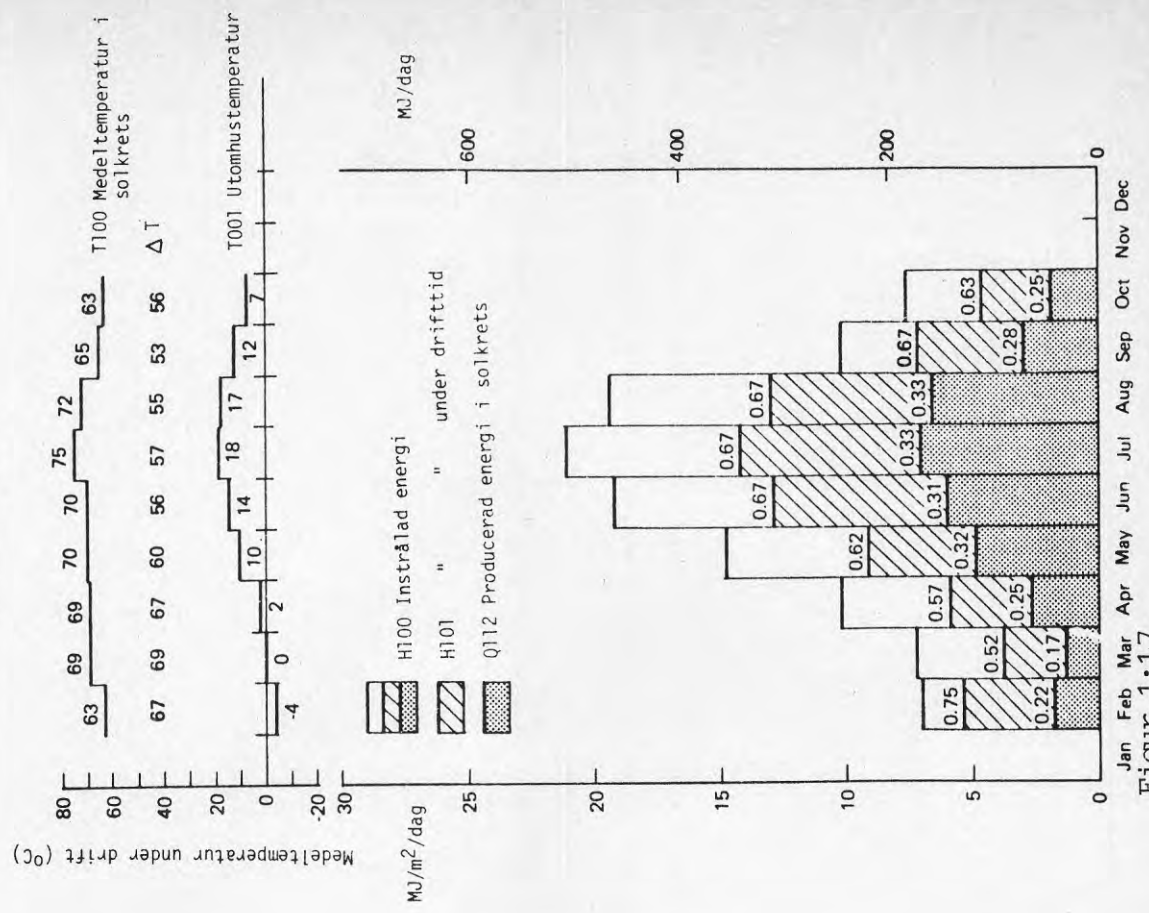
Philips VTR 141 1983



Figur 1:16

Instrålad energi, insamlad energi, verkningsgrad samt medeltemperatur under februari 1983 - oktober 1983 för Scandinavian HT.

Scandinavian HT 1983



Figur 1:17

Instrålad energi insamlad energi. verkningsgrad samt medeltemperatur under januari 1983 - oktober 1983 för Philips VTR 141.

1.3.4.2 Koncentrerad solfångare i Uppsala

Under slutet av 1981 och under 1982 lät Uppsala Kraftvärme AB installera en rörlig, linjefokuserande solfångare av fabrikat Suntec Systems Inc (St Paul, USA). Ytan var 67 m² med längden 24.4 m och bredden 2.75 m och den var horisonellt orienterad i nord-sydlig riktning. Solfångaren består av linjeparaboliskt formade speglar av försilvrat glas, placerade i en aluminiumram. Spegelarna vrides efter solen och de reflekterande strålarna samlas upp i en absorbator, som består av ett stålrör med selektivt skikt. I stålröret leds det värmebärande mediet (vatten/glykol) och stålröret skyddas utvändigt av en kåpa med plexiglas. Koncentrationsfaktorn uppges vara minst 40 gånger. Se figur 1:18.

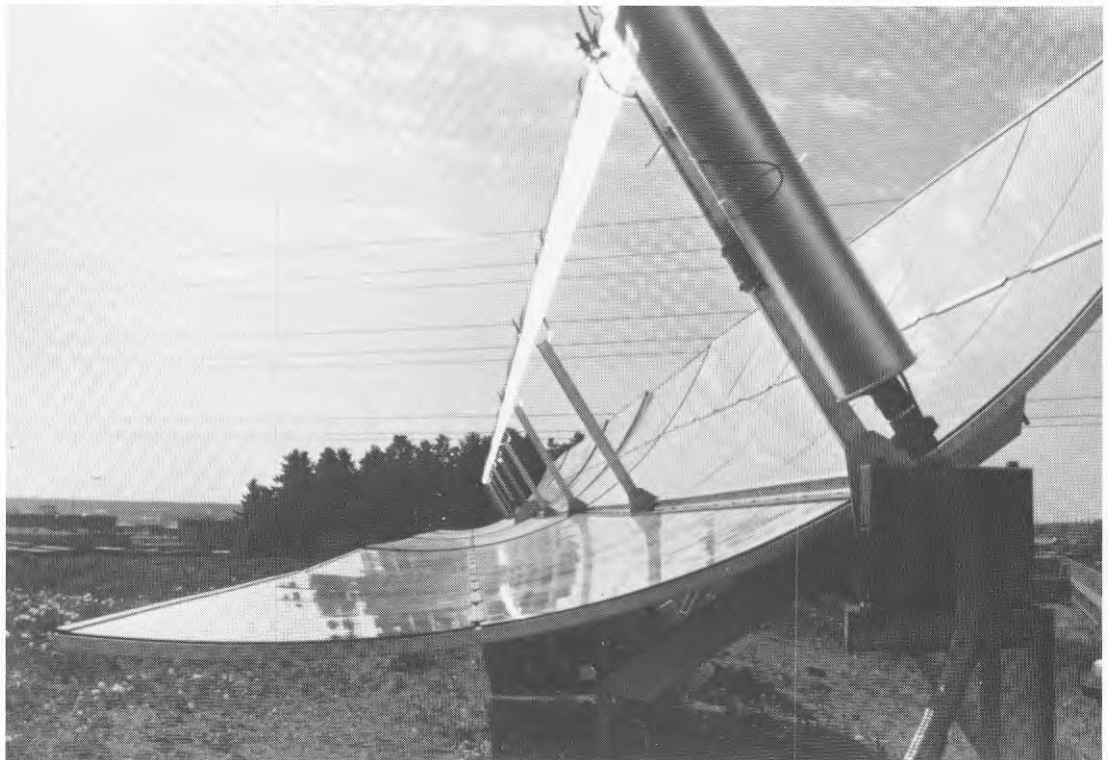


Fig 1:18 Suntec koncentrerande solfångare.

Solfångaren vrids med hjälp av en elektrisk motor och fokuseringen sköts automatiskt med signaler från 4 ljuskännare som är placerade på absorbatorröret.

I viloläge är solfångaren vänd med speglarna mot marken och en särskild solinstrålningsgivare ger impuls till solfångarna att starta upp vid ett visst instrålningsvärde.

Solfångaren är inkopplad på en 30 000 m³ stor hetvattenackumulator, som främst används i fjärrvärmenätet som effektreserv. Värmeväxling sker mellan solfångar- och ackumulatorkrets och drifttemperaturen från solfångaren är normalt mellan 70-80°C.

Arbetet med att installera Suntec-solfångaren tog lång tid och gav upphov till en hel del praktiska problem. Det svåraste problemet var att få solföljningen att fungera och detta kunde inte avhjälpas förrän en representant från Suntec Systems i St Paul kom till UKAB i maj 1982 och utförde elektriska och mekaniska justeringar.

Flera speglar har gått sönder och bytts ut och korrosionsangrepp kan noteras på en hel del speglar. I solfångarens båda ytterändar finns rörliga anslutningsledningar från absorbatorröret till den fasta rörledningen. Båda dessa har spruckit sönder på grund av utnötning vid solfångarens vridningar fram och åter.

Verkningsgraden i detta system är starkt beroende av att systemet är i trim. Spegelarna måste vara injusterade, hela och rena, absorbatorskyddet måste vara rent och solföljningen måste fungera. Det gör systemet mycket känsligare än några av de andra solfångartyperna som UKAB har provat. Därför har inte heller några långtidsvärden hittills kunnat tas fram och enskilda mätningar tyder på att verkningsgraden stannar runt 30% under en dag och vid momentana mätningar upp mot 50%.

1.3.5 Värmepump eller ej

Som ett alternativ till högtemperatursolfångare kan man tänka sig lågtemperatursolfångare i kombination med värmepump. Det befanns emellertid önskvärt av flera skäl som beskrives nedan att eftersträva ett system utan värmepump.

Uppsalas långsiktiga mål för solenergi i Uppsala låg i slutet på 1970-talet på i storleksordningen 600 GWh/år varav med enklare solfångare och värmepump åtminstone 100 GWh/år skulle behövas i form av elkraft. Alternativet dieseldriven värmepump bedömdes mindre intressant eftersom målet var att reducera oljeberoendet. När det blir aktuellt med utbyggnad av stora solfångarytor kan el komma att bli en bristvara som inte onödigtvis skall användas för uppvärmningsändamål. En majoritet av svenska folket har i folkomröstning uttalat sig för en avveckling av kärnkraften fram till år 2010. Det förefaller då inte riktigt att satsa på en teknik som om den tillämpades i stor skala skulle komma att skapa stora elbehov vid den tidpunkt då Sveriges befolkning nu bestämt sig för att avveckla kärnkraften.

Att överhuvudtaget lågtemperatursolfångare diskuterades har sin förklaring i att priserna på solfångare är höga. Det är inte helt ologiskt att låga prestanda också skulle kunna medföra låga priser. Huvuddelen av solfångarkostnaderna hänförs till ramar, stativ, montering m m. Dessa kostnader blir inte lägre för lågtemperatursolfångare. Kostnaden för själva vakuumrören i en evakuerad solfångare är t ex 25 -30% av totala kostnaden för fångare, inklusive stativ men exklusive solfångarnät, markarbeten etc. Den totala investeringen för ett färdigt system kommer således förmodligen inte i framtiden att bli avsevärt lägre för lågtemperatursystemen än för högtemperaturdito.

1.3.6 Huskonstruktion

Ett projekt i så stor skala som 300 - 500 hus måste ur den slutliga konsumentens synpunkt vara ett fullt kommersiellt projekt, i den meningen att värmeförsörjningen inte får påverka möjligheterna att sälja och/eller hyra ut hus och lägenheter negativt. Om leveransen betraktas som en normal fjärrvärmeleverans även taxemässigt uppstår den ekonomiska risken hos värmelieferantören, d v s i detta fall UKAB.

Det långsiktiga målet för solvärmeprojektet är att kunna förse en icke oväsentlig del av Uppsalas fjärrvärmesystem med solenergi. Detta mål innebär att det även i ett första projekt inte är lämpligt att använda specialhus utan i så stor utsträckning som möjligt standardhus. Det kan vara nödvändigt med en viss modifiering med hänsyn till att i detta första projekt en lägre temperaturnivå på värmen kan bli nödvändig. SBN 75 möjliggjorde detta.

Kravet på att projektet skall vara kommersiellt ledde till att kända provade komponenter har utnyttjats i så stor utsträckning som möjligt. Därmed garanterades driftsäkerhet. Möjligheten fanns att backa upp med provisoriska centraler om själva solenergisystemet skulle misslyckas.

Eftersom energiförsörjningssystemets totala kostnader i detta fullskaleprojekt är mycket höga bör emellertid eftersträvas att ingen onödig energiförbrukning sker. Detta innebär t ex att alla hus bör ha värmeväxlare för energiåtervinning ur frånluften. Vissa finansieringsproblem har förekommit eftersom lånereglerna för återvinningsaggregat för flerbostadshus var ogynnsamma. Några husgrupper har försetts med luftburen värme. Detta är gynnsamt genom att låga returtemperaturer erhålls som ger låg bottentemperatur i lagret och höjda solfångarverkningsgrader. Valet av ett luftburet system hänger inte helt ihop med solprojektet, utan sådana system röner ett generellt intresse för närvarande.

1.4 BESLUTSSKEDEN

1.4.1 Inledning

Ett projekt av Lyckeboprojektets storleksordning innebär inte bara att ett antal beslut i planfrågor och tekniska frågor måste fattas. Hur dessa frågor behandlats har framgått i det föregående. Därutöver, och viktigast, måste de olika instanser, som har att ta det ekonomiska ansvaret för projektet fatta de beslut som möjliggör att projektet också bli genomfört.

1.4.2 Beslut om planering

Den förstudie som genomfördes under hösten 1978 indikerade att projektets lönsamhet inte var bättre än att åtminstone hälften av investeringskostnaden måste täckas av staten för att projektet skulle vara rimligt ur kommunens synpunkt. Förstudien presenterades den 21 december 1978 vid ett sammanträde där även representanter för BFR deltog. Dessa förklarade därvid att projektet var av intresse för BFR och uppmanade kommunen till fortsatt arbete på projektet så att en fullständig ansökan om bidrag skulle kunna lämnas in i ett senare skede. Mot denna bakgrund beslöt fastighetsnämnden den 6 mars 1979 att tillsätta en ledningsgrupp för planering av Lyckeboområdet med representanter för byggnadsnämnd och fastighetsnämnd. Ledningsgruppen beslutade den 20 mars 1979 om projektorganisation för detaljplanearbetet. Den 22 mars tillsatte Industriverksstyrelsen en styrgrupp för solvärmeprojektet.

I det fortsatta arbetet konstaterar ledningsgruppen att Lyckeboplaneringen måste drivas med den förutsättningen att solvärmeprojektet kommer till stånd men att planutformningen måste vara sådan att planen fungerar även utan solvärme. I den tidplan som fastställdes förutsattes dock att beslutet om solvärme eller ej skulle fattas senast den 1 juli 1980, d v s vid ungefär samma tidpunkt som kommunfullmäktige förutsågs antaga planen för Lyckebo.

1.4.3 Preliminärt beslut i UKAB

Under sommaren och hösten 1979 fortsätter projektarbetet så långt att en preliminär kalkyl kan upprättas. Baserad på denna beslutar UKAB och Industriverksstyrelsen den 1 november 1979 att projektet skall genomföras under förutsättning dels att upprättad kalkyl håller, dels att bidrag med 50% erhålles från BFR. Vid ett gemensamt sammanträde med ledningsgruppen och IVS styrgrupp där även representanter för BFR deltagar konstaterades att det är av gemensamt intresse för kommunen och BFR att beslut om projektet kan ske så snart som möjligt.

Vidare konstaterades att projektet var intressant för BFR av flera skäl, bl a därför att det behövdes ett större projekt i Sverige som kunde komma igång redan 1983, samt därför att det handlar om bergrumslagring. Något annat större projekt som kunde bli färdigt i sådan tid att några slutsatser kan dras före 1985 fanns inte (1985 var den tidpunkt då man enligt "Sol 85" i 1979 års energiproposition skulle kunna bedöma solenergins framtidsmöjligheter). Mot denna bakgrund lämnas en formell ansökan in till BFR den 6 december 1979.

1.4.4 Beslut av BFR

Efter diverse överläggningar mellan BFR och UKAB beslutar BFR den 10 juni 1980 att bevilja UKAB ett experimentbyggnadslån på 17 Mkr. Summan förutsätts vara 50% av projektets kostnad sedan soldelen bantas till 15% och resterande solfångaryta simuleras med en elpanna. Beslutet innebär således ett ja till ett fullskaleförsök med bergrumslagring medan bara en mindre del av solfångarytan byggs.

Eftersom BFRs beslut innebär en avvikelse från UKABs ansökan har UKAB att ta ställning till huruvida man vill genomföra projektet i den föreslagna utformningen. Frågan behandlas av UKABs styrelse den 15 augusti 1980 varvid beslutas att under vissa förutsättningar acceptera BFRs förslag samt att eftersträva att på annat sätt söka bidrag till en framtida utbyggnad av solfångardelen. Förutsättningarna var dels att befrielse erhålles från energiskatt till elpannan, dels att el till elpannan kan erhållas till tillräckligt lågt pris. Dessutom uppvaktar kommunen energi- och industriministrarna i frågan.

Beträffande befrielse från energiskatt erhålles den 15 maj 1981 ett brev från dåvarande budgetminister Wirtén att gällande regler torde innebära att i stor utsträckning energiskatt inte behöver erläggas för en elleverans av detta slag. Från Vattenfall erhålles ett

principiellt ställningstagande att Vattenfall är berett att till lägsta möjliga pris leverera erforderlig elkraft.

För att bergrumsbygget skall kunna passas in i tidplanen för Lyckeboexploateringen, innebärande att bergrummet är färdigsprängt innan någon inflyttning sker, måste bergrummet börja byggas i augusti 1981. Definitivt beslut om projektet måste därför tas första kvartalet 1981. Kalkylerna visade att projektet kan komma att ge en förlust om solfångarfältet inte kan byggas ut vid den tidpunkt då el antas börja stiga i pris, d v s efter år 1990, med 4 Mkr. Diskussioner tas därför upp med HSBs Riksförbund som dels haft uppdraget för Lyckebo dels aktivt intresserat sig för projektets genomförande. Efter denna kontakt tar HSB upp med SKANSKA som bedöms ha lämnat det bästa anbudet på bergrum, om inte HSB och SKANSKA tillsammans kan bidra till projektets finansiering. De förklarar sig villiga att vardera delta med 2 Mkr.

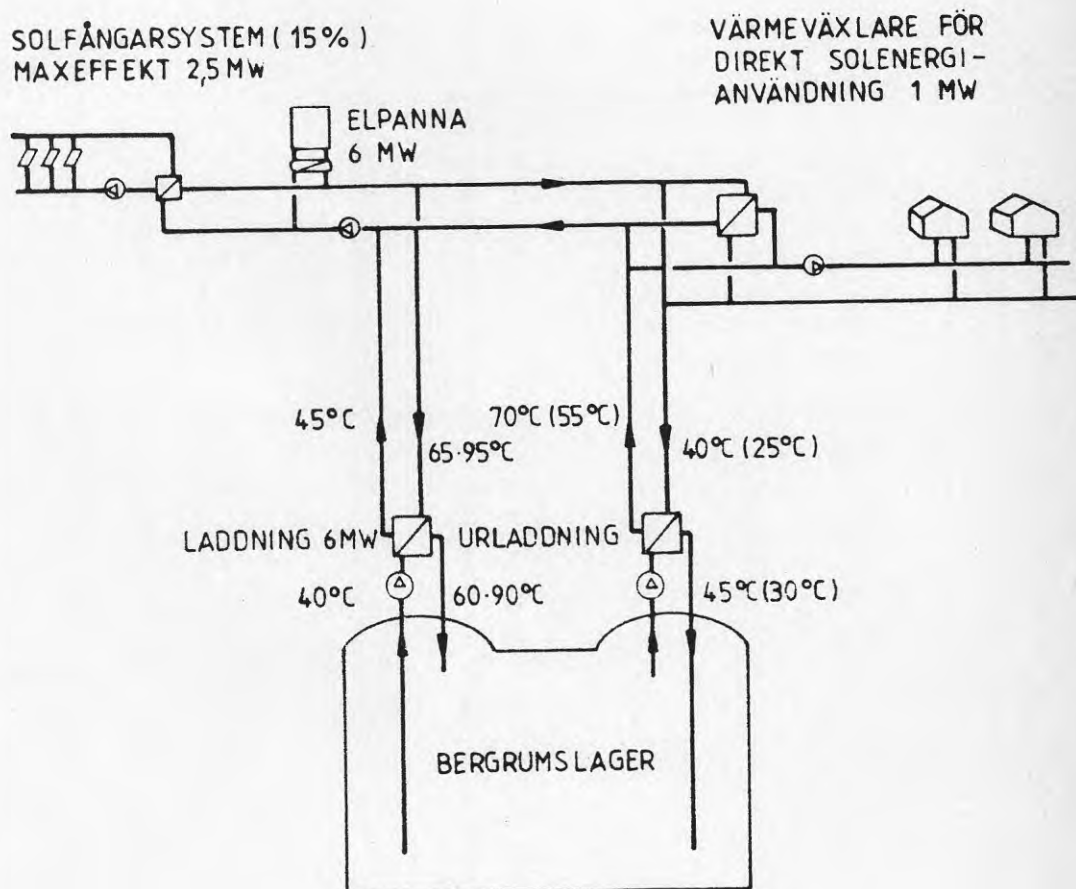
1.4.5 Politiskt beslut

Inför det slutliga ställningstagandet är således situationen att UKABs förlust på projektet inte bör överstiga 4 Mkr vartill kommer en latent risk på 4 Mkr i början på 90-talet. Eftersom detta till slut måste bäras av värmeabonenterna finner UKAB det lämpligt att beslut i frågan även fattas av IVS och underställs kommunfullmäktige för godkännande. IVS och UKAB fattar sina beslut den 26 mars 1981. Mot beslutet reserverar sig de moderata ledamötena. Samtidigt behandlas frågan i fullmäktiges partigrupper och därefter i kommunstyrelsen. KS beslutar den 25 mars 1981 att föreslå KF att låta genomföra projektet. KF beslutar den 30 mars 1981 i enlighet med KS förslag. Mot beslutet i KS och KF reserverar sig de moderata ledamötena.

2. PROJEKTERING OCH BYGGSCHEDE

2.1 INLEDNING

Lyckeboprojektets energiförsörjningssystem, består av solfångarsystem (inklusive elpannesimulering), säsongslager, distributionssystem samt ett styr- och reglersystem som knyter ihop de olika systemdelarna till en gemensamt fungerande helhet (se principalschema, figur 2:1). Energiförsörjningssystemet projekterades/byggdes uppdelat på flera entreprenader.



Figur 2:1 Principschema

2.1.1 Distributionssystemet

Distributionssystemet byggdes på det sätt Uppsala Industriverk vanligen bygger fjärrvärmenät, nämligen som delad entreprenad (byggentreprenad respektive rörentreprenad) där Industriverken upphandlar rörmaterialet och tillhandahåller den till rörentreprenören samt svarar för byggledning och samordning. Projekteringen utfördes av Uppsala Industriverk.

2.1.2 Säsongslager

Hetvattenlagret inklusive värmecentral genomfördes i form av en totalentreprenad med funktionsansvar. Entreprenadgräns var rörstutsar mot distributionssystemet och mellankretsen för solvärmesystemet. Totalentreprenören utförde erforderlig projektering och byggde lagret till fullt driftfärdig anläggning. I värmecentralen finns pumpar och reglerutrustning för styrning, kontroll och reglering av hela Lyckeboanläggningen, dvs inlagring av solenergi, simulering av solenergi med elpanna samt distribution av solenergi till fjärrvärmenätet. Elpanna, ställverk samt styrdator i värmecentralen direktupphandlades av UKAB.

2.1.3 Solfångarsystemet

Systemets andra totalentreprenad är solfångarsystemet. Detta handlades upp utifrån krav på leverans av energimängden 1280 MWh/år från solfångarsystemet. Energin skall levereras vid en årsmedeltemperatur av 70°C och anläggningen skall kunna leverera större delen av energin vid 95°C framledningstemperatur mot lagret.

15% av Lyckebosystemets totala energi kommer från solfångarna. Resterande 85% simuleras med en elpanna, som dock ingår i säsongslagrets totalentreprenad.

2.2 STYR- OCH REGLERSYSTEM

2.2.1 Allmänt

För att knyta ihop de olika delsystemen till ett fungerande energiförsörjningssystem erfordras ett gemensamt styr- och reglersystem. Systemet är datorbaserat och programmeringsunderlaget har framtagits av totalentreprenören för säsongslagret, SKANSKA i samarbete med beställaren Uppsala Kraftvärme AB.

För hårdvaruleverans och programmering utifrån programmeringsunderlaget har BBC svarat. En och samma projektgrupp bestående av beställare/entreprenör har hela tiden haft fullständig kontroll över att idéer och instruktioner för anläggningens funktion har fullföljts ända fram till det första driftsskedet. Dessutom har det redan under programmeringsskedet funnits möjlighet att korrigera och komplettera anläggningen i önskvärd grad.

Styrprogrammet har strukturerats i 14 renodlade driftfall/drifftillstånd:

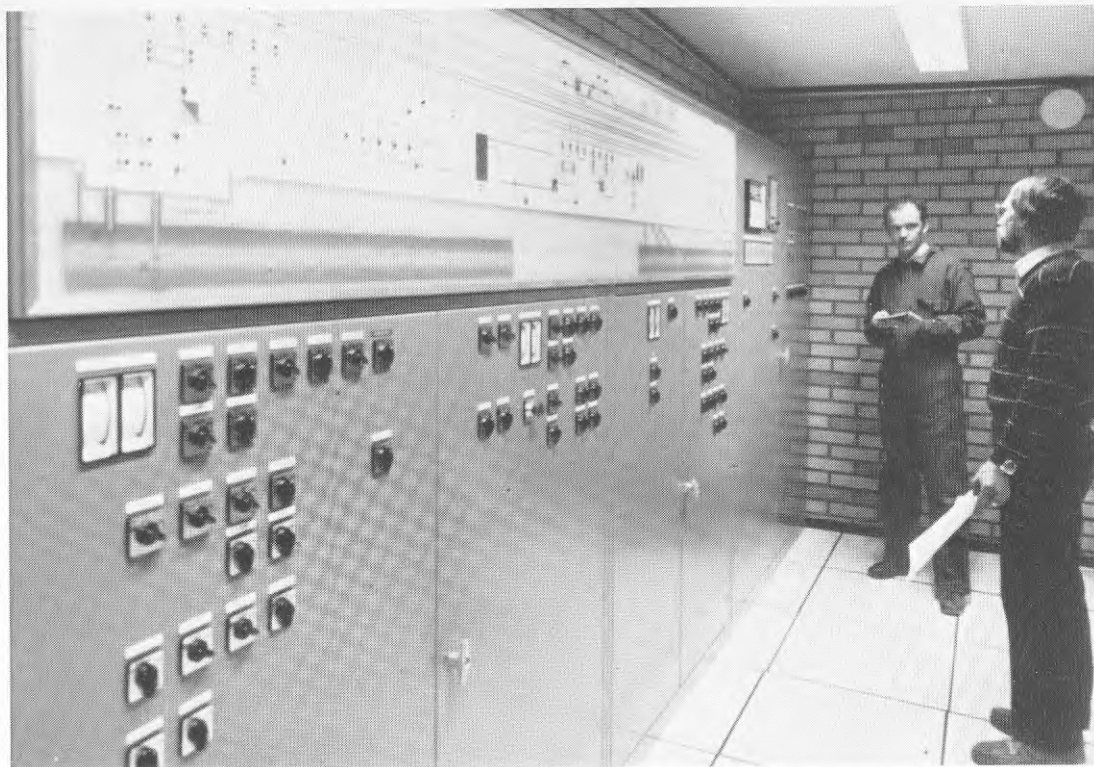
- inladdning sol (4 st)
- inladdning el (4 st)
- distribution från värmelager (4 st)
- distribution från elpanna (1 st)
- direktmatning solnät/distributionsnät (1 st)

Driftfallen är delvis kombinerbara och startar/stoppar alltefter driftssituationen i anläggningen.

Anläggningens komplexitet, automatisk drift samt behovet av att allteftersom driftserfarenheter uppnås kunna korrigera styrningen av anläggningen gjorde det lämpligt att installera ett datorbaserat styrsystem.

I princip sker all förregling, styrning, reglering, övervakning och registrering över datorsystemet. Undantag utgör elpannan och ventilationsanläggningen vilka har egna styrreglersystem för sina interna funktioner.

Som "Back-up" till datorsystemet finns en konventionell manövertavla i anläggningen vid vilken driftoperatören själv kan köra bergrumsanläggningen "för hand".



Figur 2:2 Manövertavla i kontrollrum

Styrsystemet är av fabrikat BBC och består av tre Procontic DP 800-system enligt konfigurations-skiss i figur 2:3.

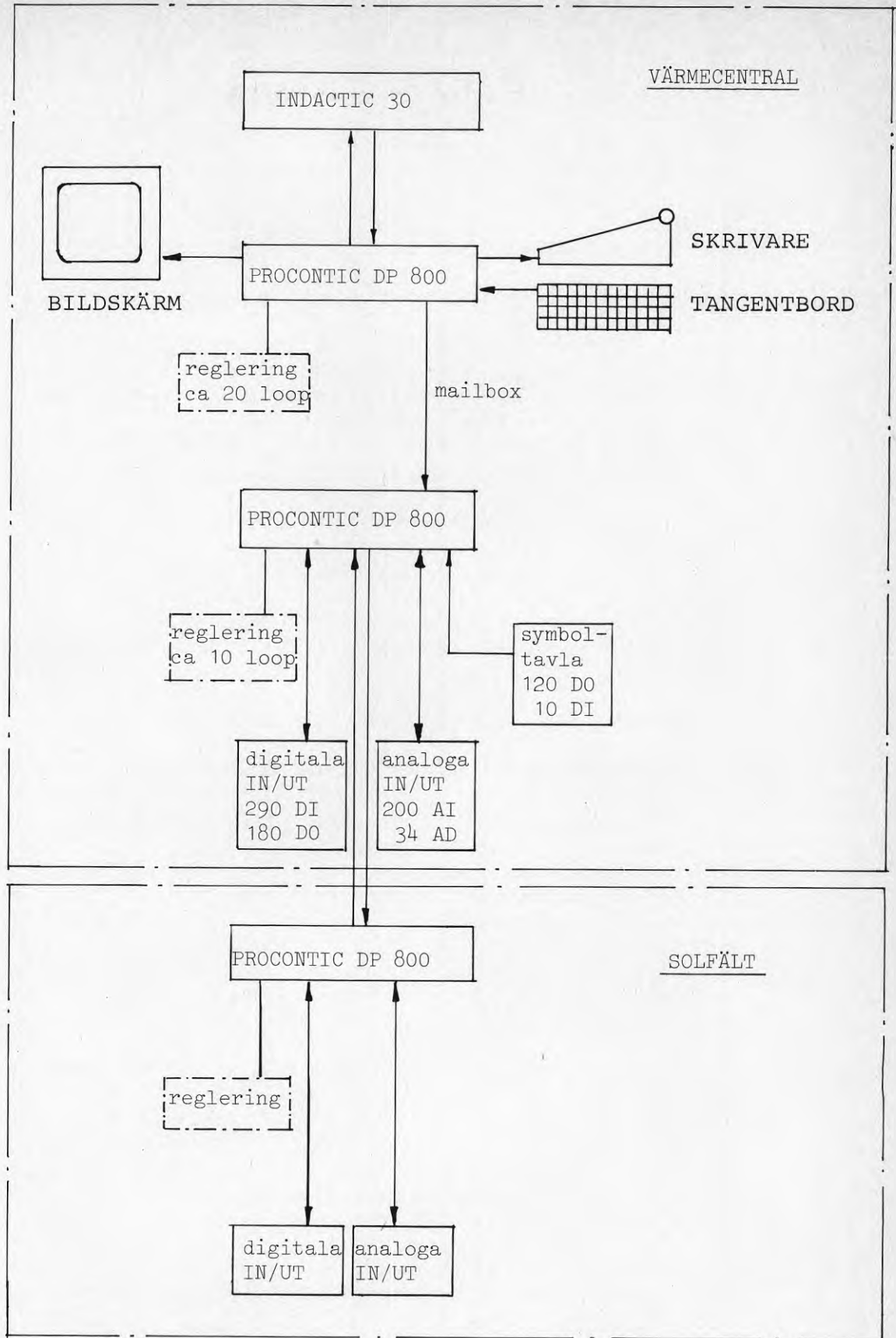
Procontic DP 800-systemet nr 1 styr processen.

Procontic DP 800-systemet nr 2 är ett överordnat system som sköter kommunikationen mellan operatör, genom skrivare, tangentbord och bildskärm, Procontic DP 800-system 1 och Indactic 30 (signalöverföringssystemet till UKABs centrala kontrollrum.

Prontic PD-800-systemet nr 3 styr solfångarsystemet.

I systemet finns reglerfunktioner för 120 st PID regulatorer samt beräkningsfunktioner för:

- in- och utmatad effekt och energi
- kontinuerlig temperaturkurva
- energiinnehåll i värmelager



Figur 2:3 Systemkonfiguration för styrsystem

- uttagningsnivå ur värmelager
- nivå för uttagningsanordning
- börvärdessignaler för nivåmätare
- optimalt temperaturprogram

För övervakning av intressanta variabler finns funktioner för visning av trendkurvor med 80 värden och med en tidsupplösning av 1 s, 1 min, 1 h eller 1 dygn. Maximalt 20 variabler kan registreras samtidigt. Variabler kan väljas via bildskärmen. Upplösning 0.5%.

Operatören kan via tangentbordsfunktioner utföra:

- inställning av alla reglerparametrar
- ändring av loggningsparametrar
- ändring av parametrar i beräkningsfunktionerna
- blockering av apparater
- val av driftsfall
- val av processbilder

Över bildskärmen kan information fås via 10 st processbilder och uppgifter om senaste larm. Utvalda objekt kan stoppas och startas med manuell start.

För lagring av driftsdata och timmedelvärden har systemet 64 kbyte minneskapacitet. Vid behov kan minnet utökas.

Över skrivaren finns utskriftsfunktioner för:

- 24 timmars protokoll av mätdata med 6 variabler, där varje variabel har 4 parametrar
- larmutskrifter med 200 larpunkter

För programmering av de olika driftsfallen i anläggningen ingår ett programminne om 32 kbyte. Vid behov kan minnet utökas.

2.2.2 Driftstrategi

Driften av anläggningen måste ske så att bebyggelsens värmebehov kan tillgodoses såväl energi- som effektmässigt.

Solfångarnas verkningsgrad avtar med ökande drifttemperatur, varför det är intressant med låg produktionstemperaturnivå. För att utnyttja värmelagrets kapacitet mellan "fullt" och "tomt" lager måste emellertid tillräckligt hög temperatur produceras i solfångarsystemet/elpannan under delar av året. Vidare bör låga returtemperaturer eftersträvas från distributionsnätet.

Ovanstående delvis motstridiga målsättningar uppnås genom att vid driften välja mellan tre temperaturnivåer.

- a) Lägsta möjliga drifttemperatur dvs solfångarna körs mot fjärrvärmenätets returtemperatur och/eller bottenskiktet i bergrummet. Detta ger maximal energiinsamling.
- b) Momentan framledningstemperatur i fjärrvärmenätet. Detta innebär att det momentana behovet tillgodoses utan omvägen via dubbla värmeväxlingar till och från lagret.
- c) Maxtemperatur för säsongslagring.

Vilken temperaturnivå som väljes bestämmas av fjärrvärmelast, framledningstemperatur i fjärrvärmenätet, solfångarfältets effekt och leveranstemperatur samt status i lagret t ex fyllnadsgrad.

2.2.3 Solfångarsystemet

Då låg solintensitet råder startar solkretsen upp med 40% av totalflödet och förvärmer solkretsen tills önskad arbetstemperatur erhålls. Nu kan anläggningen börja leverera energi till värmelagret. Styrventil på sekundärsidan öppnar och reglerar flödet så att önskad framledningstemperatur mot lagret konstanthålls. Parallellt med styrventilen varvtalsreglerar solpumpen för att konstanthålla temperaturen på solsidan. Vid uppstart börjar man leverera energi vid temperaturnivå 60 - 70°C.

Då hög solinstrålning råder stegas framledningstemperaturen upp till högttemperaturnivå, d v s konstanthållning vid 95°C.

Vid minskad solintensitet stegas temperaturerna åter ner till lågtemperaturnivå. Då ej heller denna temperatur kan upprätthållas stänger styrventilen på sekundärsidan och pumpen på solsidan håller min.flöde tills solintensiteten avtagit helt.

Temperaturnivåer för hög- och lågtemperaturfallen kan av driftoperatören väljas från t ex månad till månad beroende på temperaturutseendet i värmelagret.

2.2.4 Lagret

Huvudfunktionen i fjärrvärmecentralen är att leverera energi till distributionsnätet med så låg framledningstemperatur som möjligt från lägsta möjliga temperaturnivå (exergi) i systemet.

För att begränsa antalet möjliga driftssituationer och säkerställa en jämn fjärrvärmedistribution försörjes i princip distributionsnätet alltid från värmelagret med lägsta möjliga temperaturnivå medan värmekällorna solnät och elpanna i princip alltid skall leverera all sin energi till aktuella temperaturnivåer i lagret.

Flöde respektive effekt i distributionsnätet styrs ej från värmecentralen utan regleras av abonnenternas reglercentraler. För att denna reglering skall fungera krävs dock att fjärrvärmecentralen till varje abonnent levererar:

- En tillräcklig hög framledningstemperatur
- Ett lagom stort differenstryck mellan fram- och returledning.

2.2.5 Distributionssystemet

Framledningstemperatur (T_f) i distributionsnätet bestäms dygnsvis beroende på aktuell utetemperatur (T_u) med följande samband.

T_u högre än 0°C : $T_f = 55^\circ$

T_u mellan 0°C och -21°C : $T_f = 55 - T_u \times 15/21$ ($^\circ\text{C}$)

T_u lägre än -21°C : $T_f = 70$ ($^\circ\text{C}$)

Önskad framledningstemperatur (börvärde för värmedistribution) ställs in dygnsvis på en motorpotentiometer med fjärrkontroll från UKABS huvudkontrollrum i Uppsala.

Returledningstemperatur i distributionsnätet bestäms av abonnenternas reglercentraler/värmesystem och kan ej direkt påverkas från fjärrvärmecentralen.

2.2.5.1 Differenstryck i distributionsnätet

Erforderligt differenstryck i distributionsnätet, upprätthålles med någon av distributionspumparna samt någon av reglerventilerna i systemet.

Differenstrycket (ärvärde) mätes på en differensstryckgivare som har placerats i en representativ punkt av nätet.

Önskat differenstryck (börvärde) inställes på en motorpotentiometer i styrcentralen.

2.2.5.2 Flöde i distributionsnätet

Aktuellt flöde i nätet bestäms av abonnenternas reglercentraler/värmesystem och påverkas ej direkt från värmecentralen. En sänkt framledningstemperatur i nätet ger dock som svar ett ökat flöde i fjärrvärmesnätet.

2.2.5.3 Systemtryck

Gemensam tryckhållning i distributionsnätet och solvärmenätet sker via tryckhållningsutrustning med ett 500 l utjämningskärl och 2 st 3000 l förrådsbehållare. Systemtrycket hålles konstant vid 2.5 bar. I tryckhållningsledningen finns en signalmanometer som ger larm vid högt respektive lågt systemtryck.

I förrådsbehållarna finns nivåutrustning som ger larm vid hög respektive låg nivå.

Påfyllning av systemet sker manuellt via överkoppling från vattenbehandlingsutrustning för elpanna.

2.3 SOLFÅNGARSYSTEMET

2.3.1 Allmänt

Uppförande av första solfångaretappen där 15% av totala solfångarytan skulle byggas och en energimängd på 1280 MWh/år levereras, bestämdes efter datakörning och samråd mellan solfångarentreprenör och beställare till att omfatta en solfångaryta på 4320 m². Dimensionerande effekt var 2 MW.

Övriga krav var:

- Energin skall levereras vid en årsmedeltemperatur av 70°C till den så kallade mellankretsen (se fig 2:8)

- Anläggningen skall kunna leverera större delen av energin vid 95°C framledningstemperatur mot värmelagret.

Solfångardelen konstruerades och uppfördes som en totalentreprenad där anläggningen byggdes upp kring en plan englasad solfångare med konvektionshinder och selektiv absorptor utförd i stora moduler.

Solfångarna är placerade mot söder 15 st i bredd per rad (färre i norr). Totalt är 360 st solfångare utplacerade, fördelade på 26 st rader.

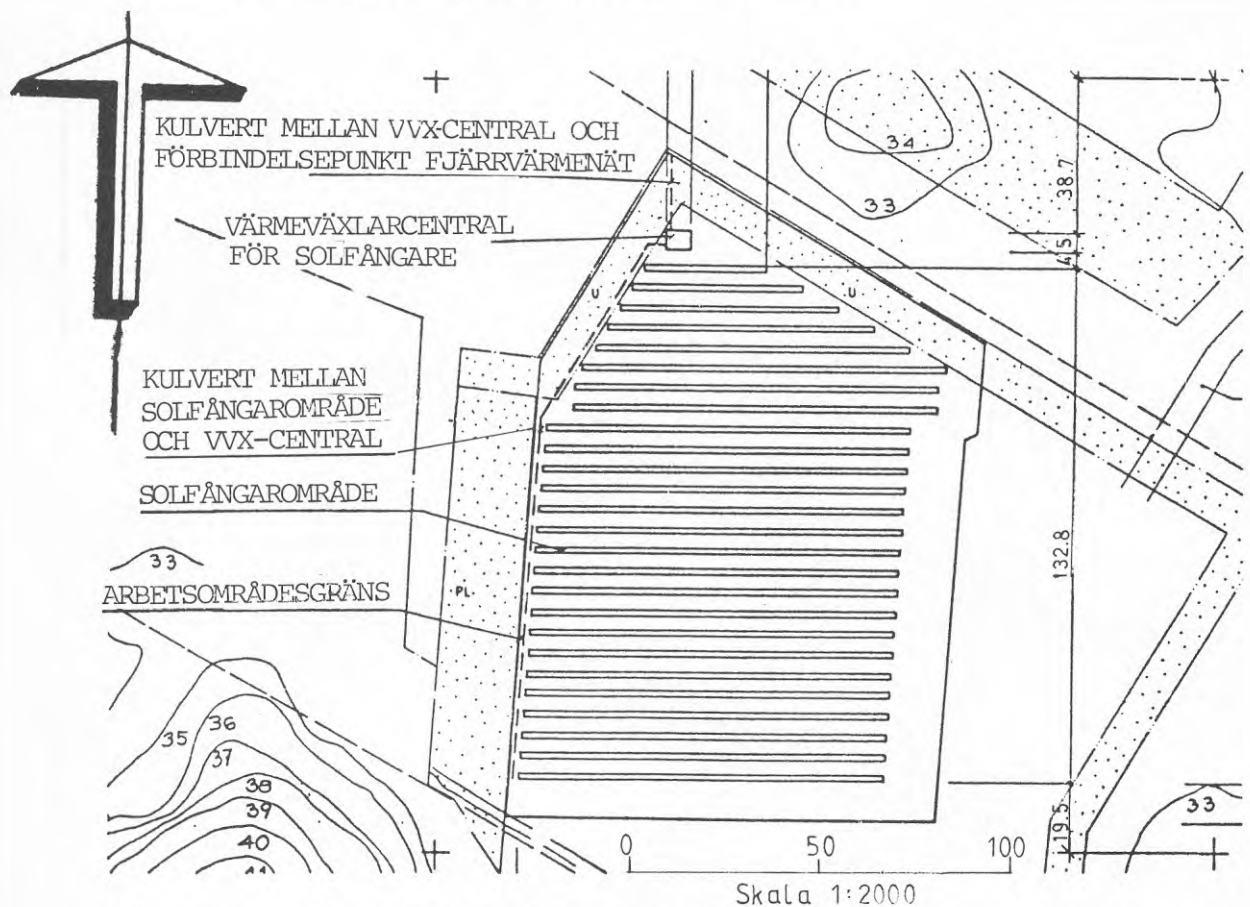


Fig 2.4 Planritning över solfångarfältet.

Solfångarområdet är avsett för ca sju gånger den solfångaryta på 4320 m² som installeras i denna etapp. De 4320 m² fördelade på 360 st solfångare placerades på den nordligaste delen av solfångarområdet, ca 500 m söder om bergrummet. Se figur 2:4.

2.3.2 Grundprinciper vid projekteringen

För att erhålla en bra systemfunktion valdes följande dimensioneringskriterier:

- Stor temperaturhöjning över solfångarna
- Stor del av totala tryckfallet över solfångarna
- Turbulent strömning i absorbatortuberna
- Liten vätskevolym

Genom att ha stor temperaturhöjning över solfångaren kan man hålla ett lågt vätskeflöde genom den vid oförändrad energitransport. För solfångartuber och övriga fördelnings- och kulvertrör innebär detta klena dimensioner och för apparatrummet mindre värmeväxlare och cirkulationspump med lägre effekt och energiförbrukning. I denna anläggning har 40°C temperaturhöjning vid dimensionerande effekt valts.

Relativt höga tryckfall över solfångarna innebär att man automatiskt får en likvärdig flödesfördelning mellan dem vilket underlättar inreglering av anläggningen. Dessutom kan man tillåta måttliga tryckfall även i fördelningsrören, d v s små rördimensioner.

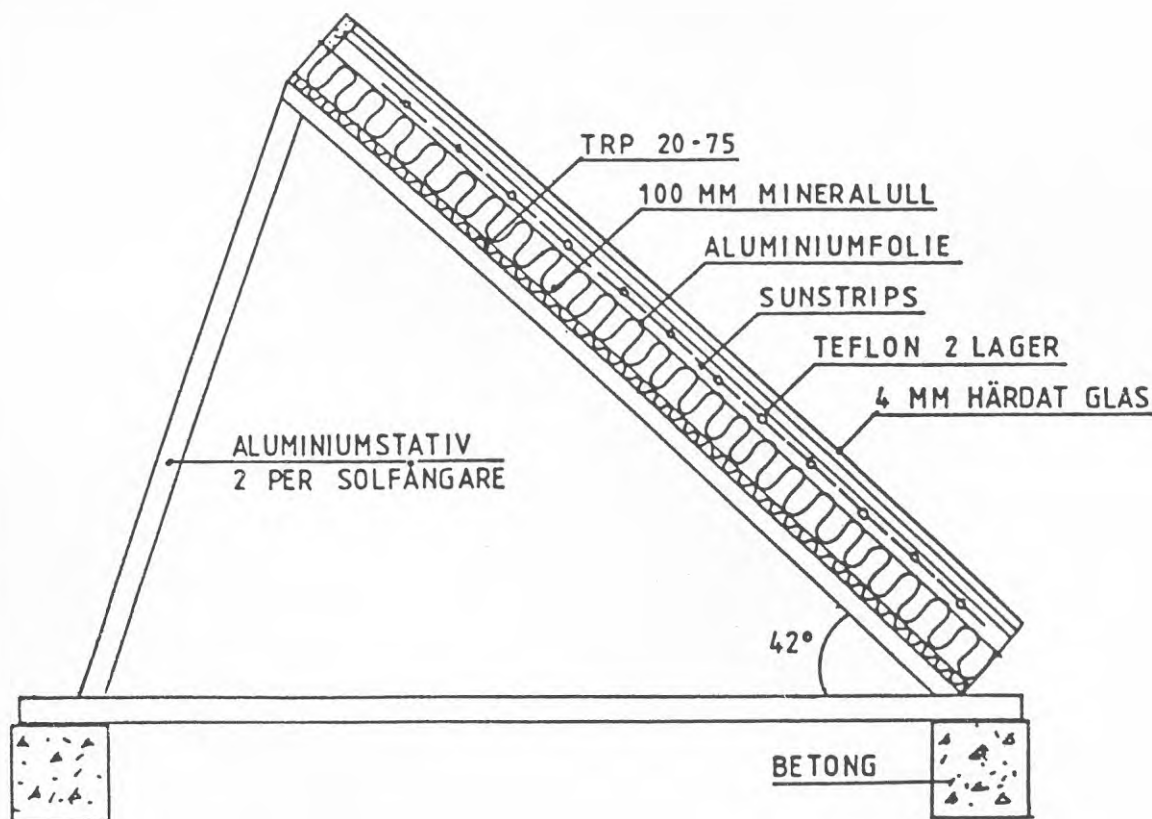
För att få god värmeöverföring mellan tubvägg i absorlator och cirkulerande medie, d v s turbulent strömning, krävs höga hastigheter i dessa tuber. För att uppnå detta används således vid litet flöde klena tubdimensioner och långa seriekopplade längder.

Genom att hålla nere vätskevolymen i systemet minskar systemets tröghet under uppstartning morgontid, d v s systemet kommer upp i arbetstemperatur snabbare.

Ett ytterligare krav var att transport, utplacering samt montering av fundament och solfångare på solfångarfältet skall kunna utföras rationellt, vilket ställde även andra än termiska krav på konstruktionen. Betongfundamentlängder samt solfångaryttermått skulle vara anpassade till en långtradares lastbils- och släpflaksmått. Antalet infästningspunkter för montering hållas nere o s v.

2.3.3 Solfångaren

Solfångaren i Lyckebo, Scandinavian HT (High Temperature) är en stormodulsfångare på 12 m², ca 6 m lång och 2 m hög. Den är monterad mot söder med 2 stativ på löpande betongfundament med 42 graders solfångarvinkel.



Figur 2:5 Sektion av Scandinavian HT-solfångaren

Solfångaren består av en aluminiumkantlist som förutom klimatskydd tjänstgör som bärande ram. På listan är en täckskiva av härdat glas med tjocklek 4 mm infäst. Glaset har låg järnoxidhalt vilket ökar ljustransmissionen genom glaset gentemot vanligt glas. Under glaset finns ett konvektionshinder utfört av dubbel teflonfilm.

Solfångarens framsida är uppdelad i 5 st segment bestående av täckskiva samt konvektionshinder infästade vid varandra med spröjsprofiler.

Därunder ligger absorbatoren som är utförd av aluminium med invalsade kopparrör, så kallade "Sunstrips". Aluminiumytan är belagd med ett selektivt skikt, vilket innebär att den absorberar solljus effektivt utan att avge någon större mängd värmestrålning, d v s strålningsförlusten är låg.

"Stripsen", 14 st, är seriekopplade till varandra genom lödda kopparrör i ändarna. Den kalla vätskan leds ner till det lägst liggande stripset och leds sedan i en obruten slinga upp genom strips för strips för att i översta stripsen mynna ut från absorbatoren. Totala slinglängden är således 14 gånger 6 m långa strips, d v s 84 m per solfångare.

Bakom absorbatoren finns 10 cm tjock mineralullisoleringsmatta.

Mellan absorbatoren och isolering är en aluminiumfolie inspänd som hindrar damm och gaser från isoleringen att nå absorbatoren och minska dess effektivitet.

För att ventilera solfångaren samt dränera den vid kondens finns 2 st filterförsedda lufthål i kantprofilens underkant.

Solfångarens baksida består av en korrugerad aluminiumplåt, figur 2:5.

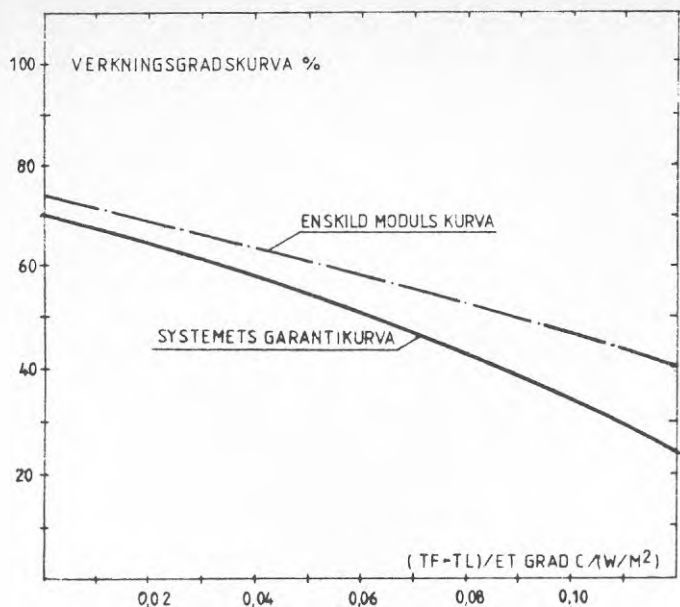
Solfångaren ansluts i gaveln till fördelningsnätet med diam 10 mm kopparrör.

Totalvikten är 300 kg per modul.

2.3.4 Solfångarens prestanda

Stormodulsolfångaren med konvektionshinder är betydligt effektivare än tidigare traditionellt byggda plana småmodulssolfångare och kan jämföras med de evakuerade solfångarna vad gäller prestanda. Stagnationstemperaturen ligger över 200°C.

Solfångarens nominella verkningsgradskurva ligger över den garanterade systemverkningsgradskurvan där systemförluster typ kulvert- och apparatrumvärmeförluster ingår. Systemets garantiverkningsgradskurva innehåller även marginal för garantiåtagandet.



TF = medeltemp. i solfångaren

TL = lufttemperatur

ET = solinstrålning

Figur 2:6 Enskild moduls samt systemets verkningsgrad som funktion av övertemperaturen (TF-TL) dividerad med solinstrålningen (ET).

En solfångares förluster kan delas in i tre delar:

- strålningsförluster
- konvektion
- värmeledning

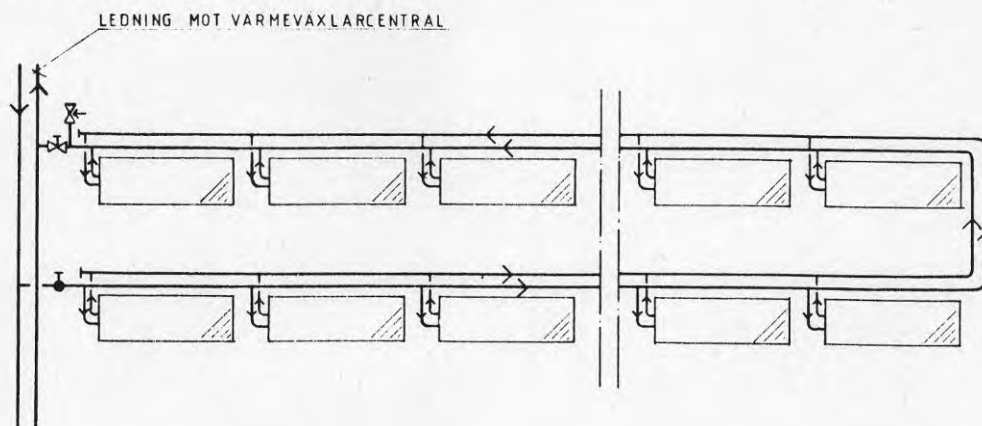
För att minimera strålningsförlusterna till omgivningen bör endast absorbatoren tillåtas vara varm. Strålningen från absorbatoren hålls nere med hjälp av det selektiva skiktet på ytan.

Konvektionsförlusterna i solfångaren uppkommer då luft i solfångaren värms av den uppvärmda absorbatoren och når det kalla glaset, kyls och värms åter av absorbatoren. Då denna anläggning jobbar med höga temperaturer har konvektionshinder utnyttjats. Förutom konvektionsförluster invändigt kyls solfångaren utvändigt av vind.

Värmeledningen uppträder i huvudsak via absorbator genom isoleringen till baksidan samt via infästning till aluminiumram. I denna solfångare är absorbatorinfästningen avisolerad mot aluminiumramen. Genom att använda stora moduler minskar kantförlusterna - färre kortsidor per m² solfångaryta då solfångaren är 6 m lång mot normala konstruktioners ca 1 m - samt antal anslutningar och infästningar av absorbatoren.

2.3.5 Solfångargruppen

Solfångarna är fördelade på 12 st grupper med 30 st solfångare i varje grupp. Inkopplingen till grupp-slingan är gjord enligt sk Tischerman-koppling, vilket innebär att varje solfångare i gruppen har samma längd samlingsrör (till-rör + från-rör = konstant längd) oberoende av var den är placerad. Fördelen med denna inkopplingsprincip är att gruppens solfångare arbetar med likvärda tryckfall och därför ej behöver enskilda inregleringsventiler. Varje grupp har däremot en reglerventil för gruppflödet samt avstängningsventil och säkerhetsventil för urkoppling av grupp, figur 2:7.



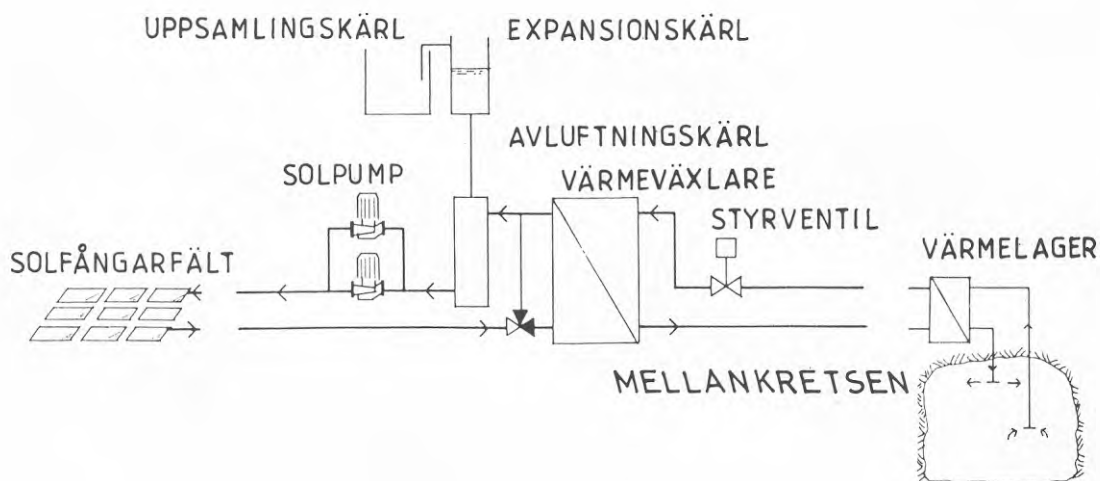
Figur 2:7 Flödet i en solfångargrupp

Ledningarna inom gruppen är förlagda på betongfundamenten och löper bakom solfångarna. Till-ledningen kommer upp från markkulvert i väst och leds mot öster genom en solfångarrad för att i öst gå ner i mark, vinkla av mot raden bakom och återvänder i denna solfångarrad åter mot väster där den parallellt liggande från-ledningen fortsätter ner till markförlagda kulverten mot värmeväxlarcentralen. Isoleringen av gruppledningarna är utförd som samisolering med mineralull i en aluminiumlåda.

2.3.6 Värmeväxlarcentralen

Den markförlagda fördelnings- och samlingskulverten löper i nord-sydlig riktning och förbinder solfångargrupperna med värmeväxlarcentralen.

I centralen finns plattvärmeväxlaren för energiöverföring från solvärmekretsen, en varvtalsstyrd dubbel-pump för cirkulation av solfångarkretsen samt en styrventil för reglering av flödet i solvärmekretsen.



Figur 2:8 Principschema värmeväxlarcentral

För avluftning av systemet har valts att hålla så höga flödes hastigheter i solfångare och rörsystem (0.7-1.5m/s) att luft leds ned från högpunkter ner i markförlagda kulverten för att avluftas centralt i ett avluftningskär i apparatrummet där flödes hastigheten är så låg att luft avskiljs.

Vid driftavbrott under stark solinstrålning kommer kokning i solfångarna att inträda, vilket leder till att vätska bräddar över systemet. För att ej förlora bräddad systemvätska -propylenglykol är dyrt - finns ett uppsamlingskär på 2.5 m³ invid säkerhetsventilerna i värmeväxlarcentralen. Totala systemvolymen är 9 m³.

Glykol:

I systemet används en 55% propylenglykolvattenblandning för att förhindra frysning ner till -40 grad C.

Propylenglykol bryts ned med tiden till bl a myrsyra och försämrar sina frysnedsättande egenskaper samtidigt som korrosionshastigheten ökar. Därför används inhibitorer som stabiliserar pH-värdet.

För att ytterligare förhindra korrosion i systemet bör mängden småpartiklar i systemvätskan hållas nere. I Lyckebo systemet har därför ett delflödesfilter installerats förutom grovfiltret som är standard i VVS-system.

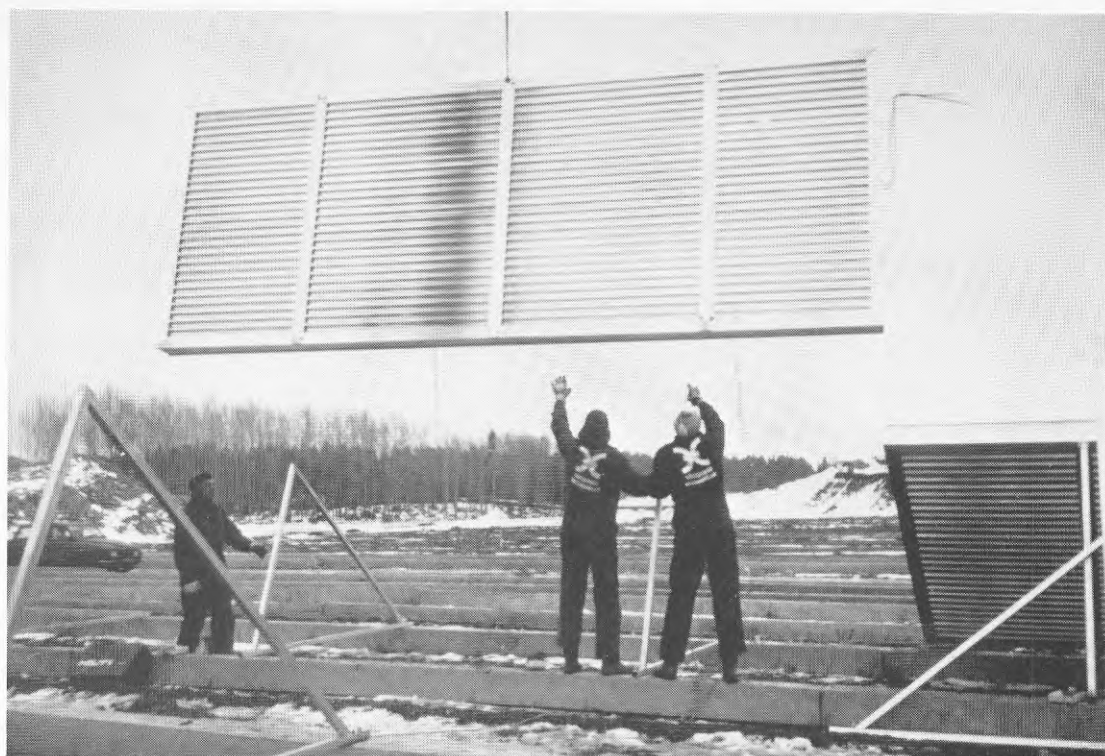
2.3.7 Uppförande av solfångaranläggningen

Hela byggprocessen tog mindre än 10 månader med projekteringsstart i oktober -82 och förbesiktning i juni -83.

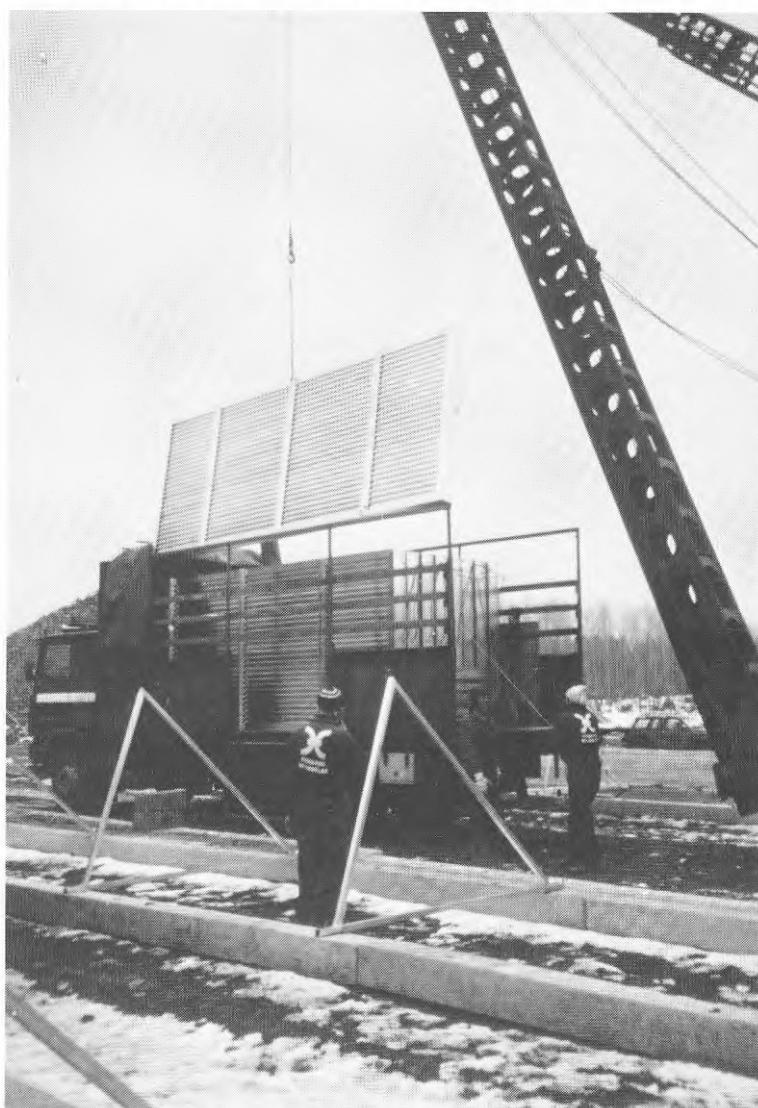
Projekteringen utfördes under oktober, november och december med byggstart mitten på december då grunden till värmväxlarbyggnaden utfördes. Omedelbart därefter följde schakt och förläggning av fördelnings- och samlingskulvert innan tjälen hann gå i mark.

Under februari färdigställdes kulvertrören och provtrycktes med 25 bar. Normalt provtrycks med 13 bar. På grund av att vissa rör i leveransen var defekta provtrycktes emellertid med det högre trycket. Efter återfyllning av samtliga rörgravar startade avplaning av området öster om kulverten där solfångarna skulle ställas upp. Utläggningen av betongfundamenten påbörjades i början av mars och första solfångartransporten levererades två veckor senare. Solfångarmontering och fundamentutläggning följde därefter parallellt under 5 veckor.

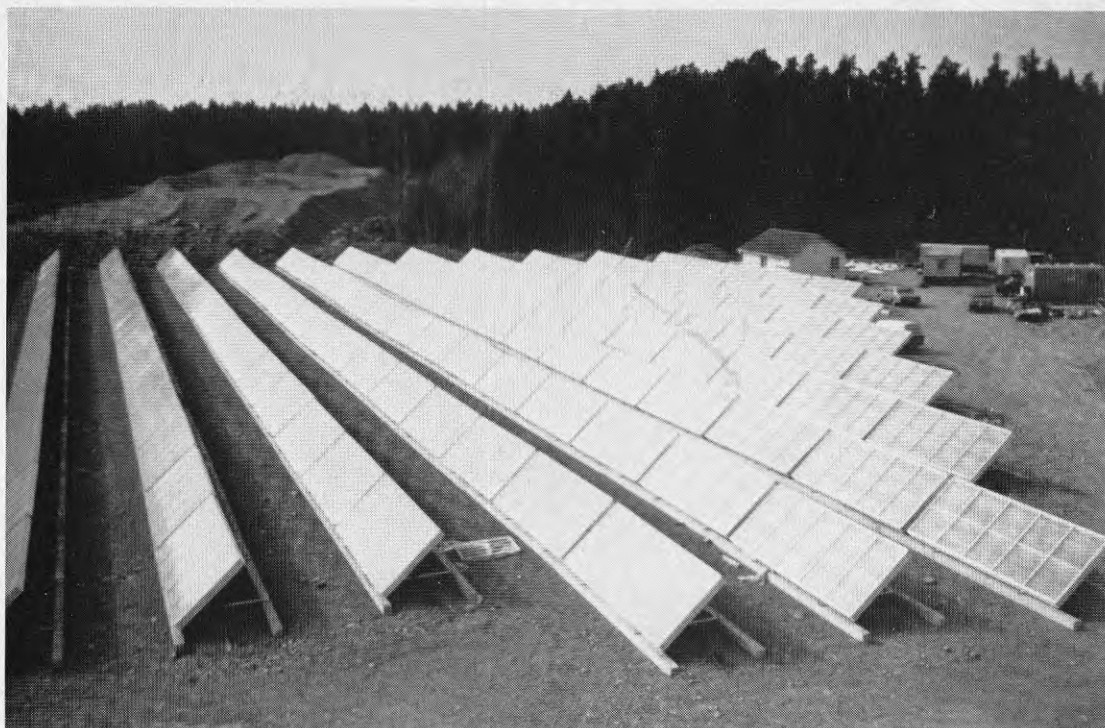
En pålkran användes för att lyfta över solfångarna från lastbil och släp till sin plats på fundamentet. Monteringshastigheten var som mest 120 m²/timme.



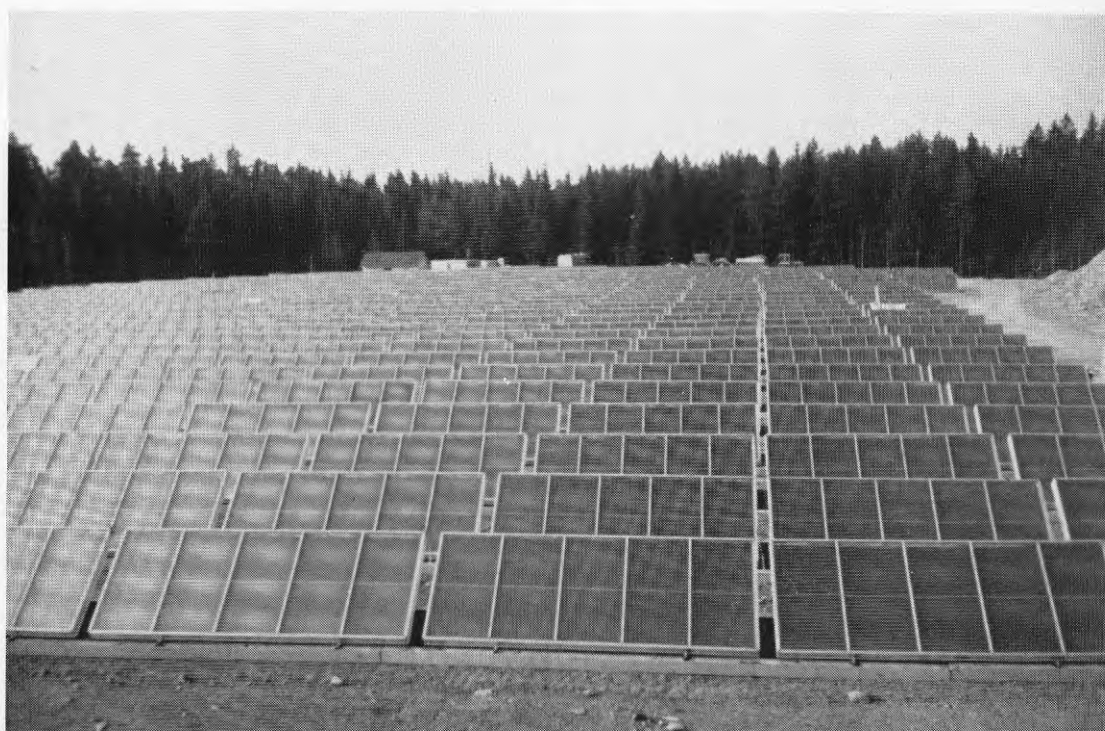
Figur 2:9 utplacering av solfångare i solfångarfältet.



Figur 2:10 Montering av solfångare med hjälp av pålkran.



Figur 2:11 Solfångarfältet under montagetiden



Figur 2:12 Färdigt solfångarfält



Figur 2:13 Flygfoto av solfångarfältet

Efter att de första raderna med solfångare monterats startade installation av gruppleddningar och rör ovan mark parallellt med rörinstallationer i värmeväxlarcentral.

Anläggningen togs i drift 19 maj grupp för grupp med manuell styrning av pump och styrventil. Efter provtryckning av solfångarkretsen startade isolering av kopplingsledningarna ut från solfångarna samt gruppleddningarna ovan fundamenten. Isolerarbetena färdigställdes till förbesiktningen som ägde rum 17 juni i enlighet med det uppsatta tidsschemat.

Under sommarmånaderna färdigställdes det centrala PC-systemet (Program Control) och i slutet på augusti tog automatiken helt över styrningen av soldelen.

2.3.8 Igångkörningsproblem

Under intrimningsperioden sommaren 1983 kom solfältet oavsiktligt att utsättas för avbrott i kylningen. Detta inträffade under en solig helgdag innan all automatik tagits i drift. Anläggningen klarade dock påfrestningen relativt väl. När trycket stigit över det tillåtna öppnade säkerhetsventilen mot samlingskärlet. Större delar av ångan som bildades vid överhettningen strömmande till samlingskärlet. En del av

ången blåstes också ut genom takröret i värmväxlarcentralen. Genom att viss ångmängd även kom in i centralen tog delar av plastbeklädnaden av isoleringen skada, men detta var dess bättre än den i stort sett enda påtagliga skadan.

2.4 LAGER OCH VÄRMECENTRAL

2.4.1 Bakgrund

Den preliminära anbudsfrågan för lageranläggningen angav två alternativa principer för hetvattenlagret:

- isolerad jord/bergdamm
- berggrum

Vid en överslagmässig beräkning av ett berggrumsalternativ med konventionell tunnel-layout konstaterades att ett isolerat berggrums värmeförluster blev större än för en isolerad ovanjordstank. Däremot bedömdes de tekniska och ekonomiska riskerna som betydligt mindre för berggrummet baserat på den mångåriga erfarenhet som fanns från berggrum för lagring av varm tjockolja vid ca + 60 °Cs temperaturnivå.

En berggrumslösning konkurrerade med andra möjliga lösningar ur såväl teknisk, ekonomisk som driftmässig synvinkel. Anläggningen projekterades med hög prioritet av följande grundförutsättningar:

- låg energiförlust till följd av konvektion genom berget
- låg energiförlust på grund av inläckning/utläckning av vatten till omgivande grundvatten
- låg anläggningskostnad (rationell layout med hänsyn till känd bergsprängningsteknik och tillgänglig bergdrivningsutrustning)
- all installationsutrustning skall vara tillgänglig för service och underhåll
- insläpp och uttag av vatten skall kunna ske på samtliga nivåer i lagret så att temperaturskiktningen utnyttjas optimalt.
- dubblerade installationssystem ur driftsäkerhetssynpunkt.
- berggrumsvattnet avskiljs från fjärrvärme/solfångarvattnet med värmväxlare

- installationssystemen utformas så att samma utrustning kan användas för både inladdning och urladdning av lagret.

2.4.2 Projektering och byggande

2.4.2.1 Allmänt

Eftersom anläggningen utfördes på totalentreprenad där ansvaret för såväl projektering som byggande låg hos entreprenören kunde arbetena med nedfartsramper och tunnlar starta efter en mycket kort projektering så snart myndigheter och berörda parter gett klartecken för anläggningen.

Den detaljerade projekteringen av anläggningen fortskred sedan parallellt med att anläggningen sprängdes ut. Med denna flexibla utförandeform kunde därigenom anläggningen i viss mån modifieras för att på bästa sätt passa in i miljön samt ge möjlighet till för alla parter gynnsamma tekniska lösningar.

Från början planerades således anläggningen att utföras med installationsschakt till markytan där pumpar, värmeväxlare, elpanna m m skulle placeras i byggnader ovan jord.

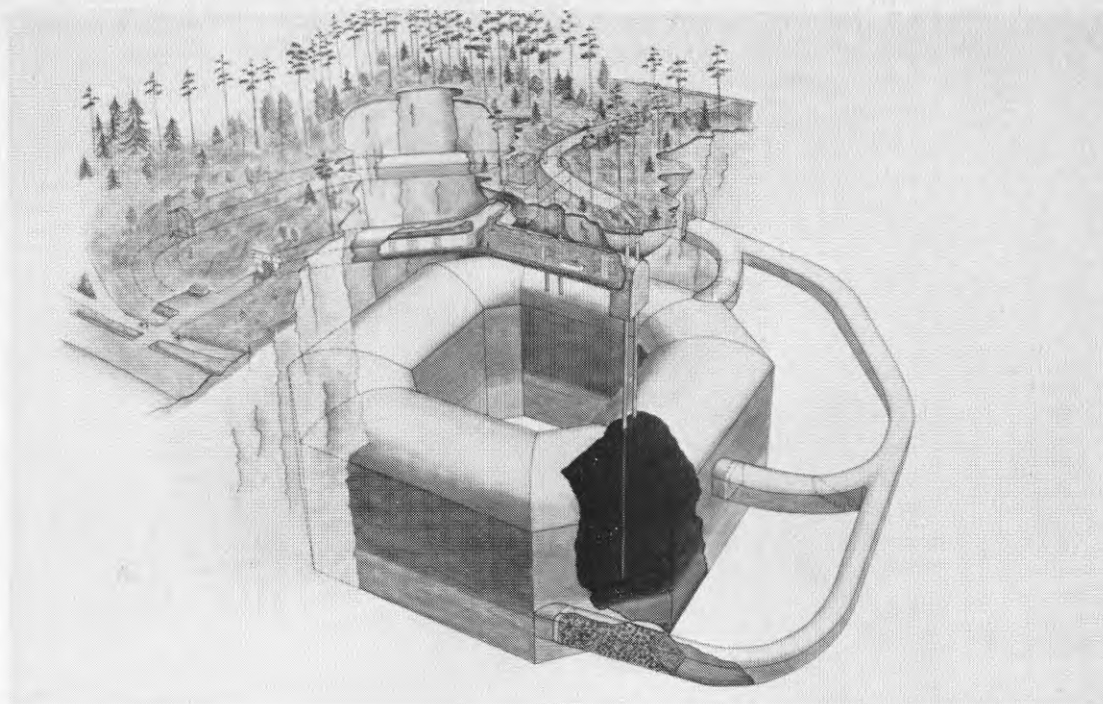
Genom en noggrann studie av nivåer för gator, avlopp, grundvatten samt mark- och bergyta konstaterades att samtliga installationsutrymmen med knapp marginal kunde inrymmas i en y-formad servicetunnel i princip horisontellt in från gatuplanet (endast med 5 - 6 m bergtäckning över tunneln). Därigenom kunde anläggningen utföras med torrt uppställda pumpar i stället för planerade hydrualiska sänkpumpar.

Ur miljösynpunkt reducerades således intrånget i den känsliga boende-miljön till ett minimum samtidigt som såväl tekniska som driftmässiga fördelar uppnåddes.

2.4.2.2 Bergrum

Bergrummet med 100.000m^3 volym utformades som en "ringformad" tunnel med 18 m bredd och 30 m höjd runt en central bergpelare med ca 35 m diameter. Bergrummet's hjässa placerades på nivån +8 m ca 30 m under markytan.

Från markytan sprängdes en ca 250 m lång transport-tunnel i lutning 1:7 ned till bergrummet där tunnelanslutningar gjordes till tre olika nivåer.



Figur 2:14 Värmelagrets utformning

Utsprängningen gjordes i fyra etapper: 7 m högt takgalleri och 3 st 7-8 m horisonellt borrarade pallar. För uttransport av den lägsta pallen utfördes inne i lagringsrummet en ca 7 m bred och 50 m lång ramp ned till bottennivån.



Figur 2:15 Takgalleri utsprängt. Arbeten med pall 1 pågår.

Bergsprängningsarbetena utfördes i två skift. All borrhning utfördes med ett 3-boms hydrualborraggregat. Tunnlar, gallerier och pallar sprängdes ut i salvlängder om 4-4.5 m. Utlastningen bedrevs med en hjullastare typ Caterpillar 980 C eller Caterpillar 988 B samt 4-5 st 25 tons bergtruckar typ Kockums KL 425 B.

Under bergsprängningsskedet arbetade totalt ca 35 personer på arbetsplatsen.



Figur 2:16 Borrhning för sprängning i pall 1.

Från byggstarten i september 1981 drevs transporttunneln under drygt två månader ned till gallerinivån varefter hela berggrumsvolymen om 100.000 m³ sprängdes ut på knappt 5 månader. Under den mest intensiva bergsprängningsperioden sprängdes mellan 25.000 och 30.000 m³ berg ut per månad. Allt berg transporterades till det blivande solfångarområdet där massorna krossades upp i olika fraktioner.



Figur 2:17 Utlastning av bergmassor från galleriet

Från gallerinivån utfördes förstärkning av bergrumstaket med 3 m långa bergbult i erforderlig omfattning (ca 300 st) samt en systematisk förstärkning med ett påslag (ca 2.5 cm) sprutbetong över hela takytan, ca 4.600 m², ned till 1 m under takbågens anfangsnivå.



Figur 2:18 Skrotning och bultning i tak



Figur 2:19 Förstärkning av bergrumstak med sprutbetong.

De vertikala bergsidorna förstärktes med totalt ca 600 bergbultar samt på ett lokalt parti med ca 250 m² sprutbetong.

För installation av in- och utmatningsanordningarna borrades 4 st Ø 1 m vertikala fullortsborrade hål (s k raise-boring) genom den mellanliggande installations-tunneln till markytan. Borrhålerna fyllde under byggnadstiden en väsentlig funktion för ventilation av spränggaser och avgaser från bergrummet.



Figur 2:20 Fullortsborrning



Figur 2:21 Fullortsborrat hål \varnothing 1 m

Efter avslutade sprängningsarbeten spolades bergväggarna rena med vatten under högt tryck.

Bergrummets volym bestämdes på fotogrammetrisk väg med en noggrannhet av + 1% till en volym av 104.300 m^3 mellan nivå + 8 m och - 22 m. Som underlag för energiberäkning av energiinnehåll i lagret upprättades en volymtabell med delvolymmer för va 10:e cm i höjdlöd.



Figur 2:22 Färdigt bergrum

Anslutande tunnlar stängdes av med ca 1 m tjocka betongbarriärer mot vilka ca 10 m berg- och jordmassor fylles som isolering.

För utjämning av vattentryck mellan bergrum och omkringliggande transporttunnel borrades ett 150 mm grovt borrhål från tunneln till bergrummets botten. Utjämning av termiska volymändringar vid uppvärmning/avkylning (ca 3 %) sker därigenom med det kallaste vattnet från lagrets botten.

Genom att bergrummet i princip omslutes av transporttunneln kommer denna att leda eventuella grundvattenströmmar runt anläggningen. Kallt vatten rinner således in i tunneln på "uppströmssidan" och rinner ur tunneln på "nedströmssidan" medan bergrumsvattnet och sprickvatten i bergpartiet mellan bergrum och tunnel förblir opåverkade av grundvattenströmmar.

Under byggnadstiden mättes veckovis inläckande grundvattenmängd till lagret. Inläckningen ökade succesivt allteftersom bergrummet fördjupades och uppgick till ca 5-6 m³/h när bergrummet hade färdigställt. Av detta vatten läckte huvuddelen in i bergrummets lägsta del varför förbindelsen mot omgivande grundvattenbassäng i huvudsak kommer att ske med lagrets kallaste del.

Som jämförelse med ett oljebergrum av motsvarande storlek uppgår en normal inläckning till ca 1-5 m³/h. Berget i Lyckebo kan i en sådan jämförelse betraktas som "ordinärt och inte särskilt tätt". Inläckningen har dock som nämnts en gynnsam lokalisering i lagret.

2.4.3 Installationer för värmelagret

2.4.3.1 Servicetunnel

En servicetunnel (ca 600 m²) ovan värmelagret sprängdes ut samtidigt med nedfartstunneln till bergrummet.

Tunneln har placerats så att den ligger 2-3 m ovan den naturliga grundvattenytan i området (i princip lika med vattennivån i lagret).

För värmelagret anordnas 2 st identiska "cistern-toppar" omfattande in- och uttagsanordningar, värmeväxlare och cirkulationspumpar.

Förutom utrustning för värmelagret innehåller tunneln elpanna (6 MW) fjärrvärmepumpar, solvärmepumpar, värmeväxlare för elpanna, värmeväxlare för direktmatning solnät/distributionsnät, tryckhållnings- och

expansionskärl för fjärrvärme- och solnät, temporär avhärtningsutrustning för berggrumsvatten, samt en ca 100 m² byggnad innehållande högspänningsställverk 10 kV, transformator 10 kV/0.4 kV, lågspänningsställverk 0.4 kV, kontrollrum och personalutrymmen.

2.4.3.2 In- och utmatningsanordningar

För uttag och insläpp av vatten från/till valfri nivå i lagret finns 4 st teleskopiska rör monterade från servicetunneln ned i lagret. Varje rör opererar på halva cisternhöjden (15 m) så att två rör täcker övre cisternhalvan och två rör nedre cisternhalvan. Alla fyra rören kan utnyttjas för såväl uttag som insläpp av vatten i lagret.

Teleskoprören monterades med mobilkran från markytan via serviceschakt direkt ned i anläggningen. Utrustningen som är utförd i rostfritt syrafast stål SIS 2343 tillverkades helt färdig på verkstad och monterades i anläggningen på en arbetsdag. Vid behov kan utrustningen lyftas upp ur anläggningen för inspektion och service.



Figur 2:23 Montering av in- och utmatningsrör



Figur 2:24 Montering av in- och utmatningsrör

2.4.3.3 Värmeväxlare

För överföring av energi mellan solvärmenät/fjärrvärmenät samt berggrumsvatten finns 2 st plattvärmeväxlare installerade med följande data: (inladdning)

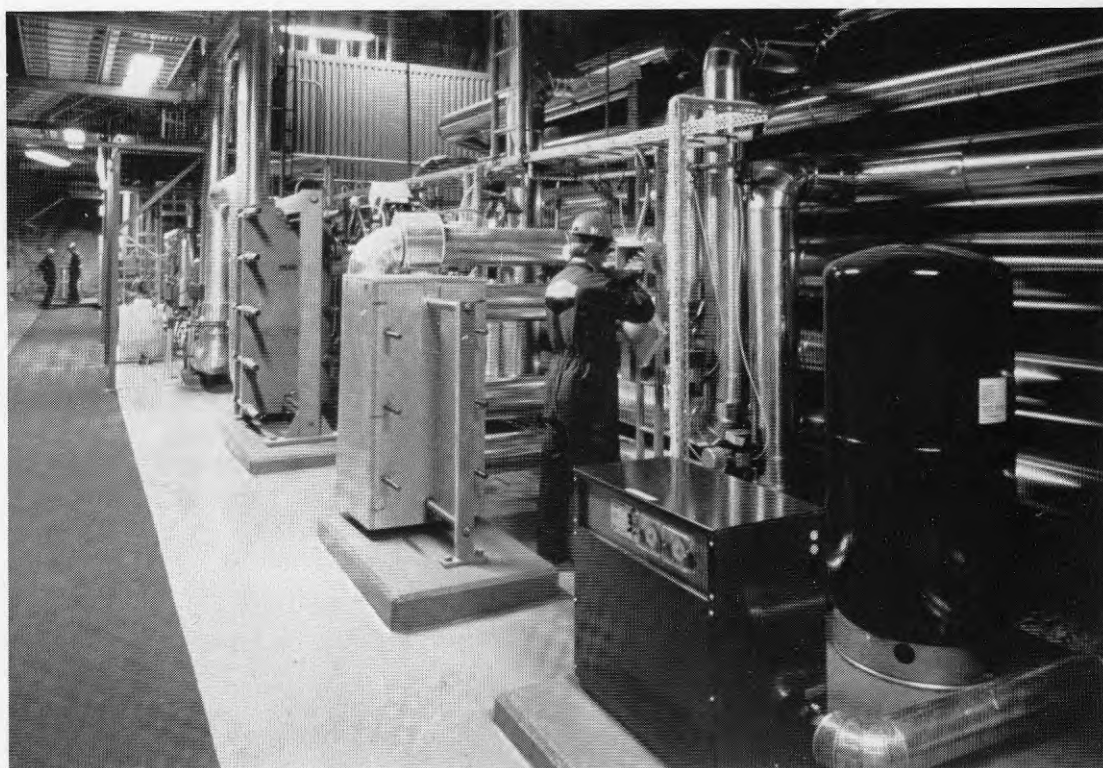
Effekt:	6.000 kW
Värmeyta:	269 m ²
Material i plattor:	SIS 2343
Vikt:	3.200 kg
Flöde:	103.2 t/h
Temperatur solnät:	95/45°C
Temperatur berggrumsvatten:	40/90°C
Beräkningstryck:	PN10

2.4.3.4 Cirkulationspumpar - rörsystem, värmelager

I servicetunneln installerades på varje cisterntopp torrt uppställda cirkulationspumpar av centrifugaltyp, kapacitet $105 \text{ m}^3/\text{h} \times 30 \text{ mvp}$. Anslutande rörsystem för värmelagret är utförda i rostfritt syrfast material, SIS 2343, tryckklass PN 10.

För kontroll och reglering av flödet i ackumulator-kretsen finns flödesmätare, reglerventiler samt tryck- och temperaturgivare monterade i rörsystemet. Luft som frigöres ur ackumulatorvattnet vid uppvärmning avluftas automatiskt ur ledningarna.

I returledningarna till lagret finns tryckhållningsventiler för undvikande av ångslag i returledningen.

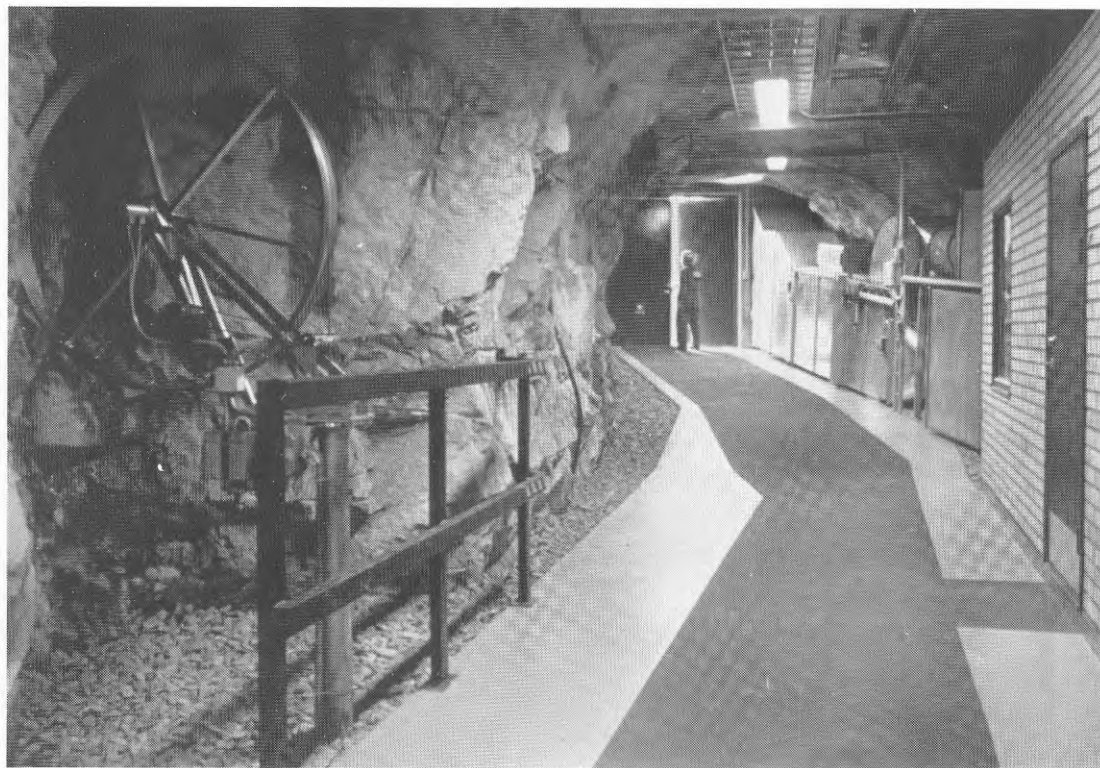


Figur 2:25 Värmelagrets värmväxlarutrustning

2.4.3.5 Nivåmätning - temperaturmätning

Vattennivån i lagret registreras av en nivåmätare. Vid låg vattennivå sker påfyllning från vattenledningsnätet. För att undvika överfyllnad i lagret finns ett bräddavlopp anordnat från tunnelsystemet. I första hand återinfiltreras avbräddat vatten till grundvattnet, i andra hand rinner vattnet till dagvattenavloppssystemet i området.

Temperaturen i lagret registreras av en rörlig temperaturgivare/nivåmätare.



Figur 2:26 Temperaturmätningstrustning för värme-
lagret monterad i servicetunneln

2.4.3.6 Vattenfyllning

Så snart byggnadsarbetena i bergrummet hade färdigställt påbörjades vattenfyllningen av lagret under sensommaren och hösten 1982. Bergrum och tunnel fylldes upp till en nivå som ungefär motsvarar den naturliga grundvattennivån i bergplinten. Olika alternativ för vattenfyllning av värmelagret diskuterades. Dels filtrering av sommarvarmt vatten från Fyrisån, dels vatten från provpumpning av en närbelägen vattentäkt (grusås). För avhärdning av vattnet övervägdes dels utfällning direkt i bergrummet, dels avhärdning i avhärdningsfilter.

Bergrummet fylldes med vatten under ca 6 veckor under hösten 1982.

Den valda metoden blev pumpning från vattentäkten med partiell avhärdning från 17 ° dH till en totalhårdhet av 11° dH med en tillfällig avhärdningsutrustning uppställd utanför anläggningen. Denna avhärdningsnivå skulle senare visa sig otillräcklig genom att en kraftig kalkutfällning inträffade i värmeväxlarna (se avsnitt "Första uppvärmning" nedan).

För den mer omfattande avhärdningen installerades avhärdningsutrustningen "permanent" i servicetunneln.

2.4.3.7 Förberedelser för eventuell framtida värmepump

Anläggningen har förberetts för installation av en värmepump internt i lagret. Avsikten med en sådan utrustning är att öka lagrets kapacitet. Värmepumpen utnyttjar därvid medelvarmt bergrumsvatten som dels värms till en temperatur av ca 90°C dels kyles till 40°C eller lägre. Installation av värmepump kan tänkas påkallas av:

- a) Solfångarsystemet förmår ej leverera tillräcklig mängd energi vid hög temperaturnivå.
- b) Abonnenterna i fjärrvärmesystemet förmår ej leverera tillräckligt låg returtemperatur till värmecentralen.
- c) Kortslutningseffekter utjämnar temperaturskillnaden i lagret.
- d) In- och uttagssystemet förmår ej fördela vatten till temperaturskikten på avsett sätt.
- e) Styr- och reglersystemet förmår ej styra och reglera samt lagra in och distribuera energi på avsett sätt.
- f) Lagringskapaciteten på lagret behöver ökas.

Förberedelser i anläggningen omfattar borring av ett hål \varnothing 150 mm från servicetunneln ovan lagret dels till hjässan i bergrummet (för utsläpp av varmt vatten) dels till bottennivån av bergrummet (för utsläpp av kallt vatten). Medelvarmt vatten hämtas upp ur berg- rummet med något av de befintliga teleskoprören.

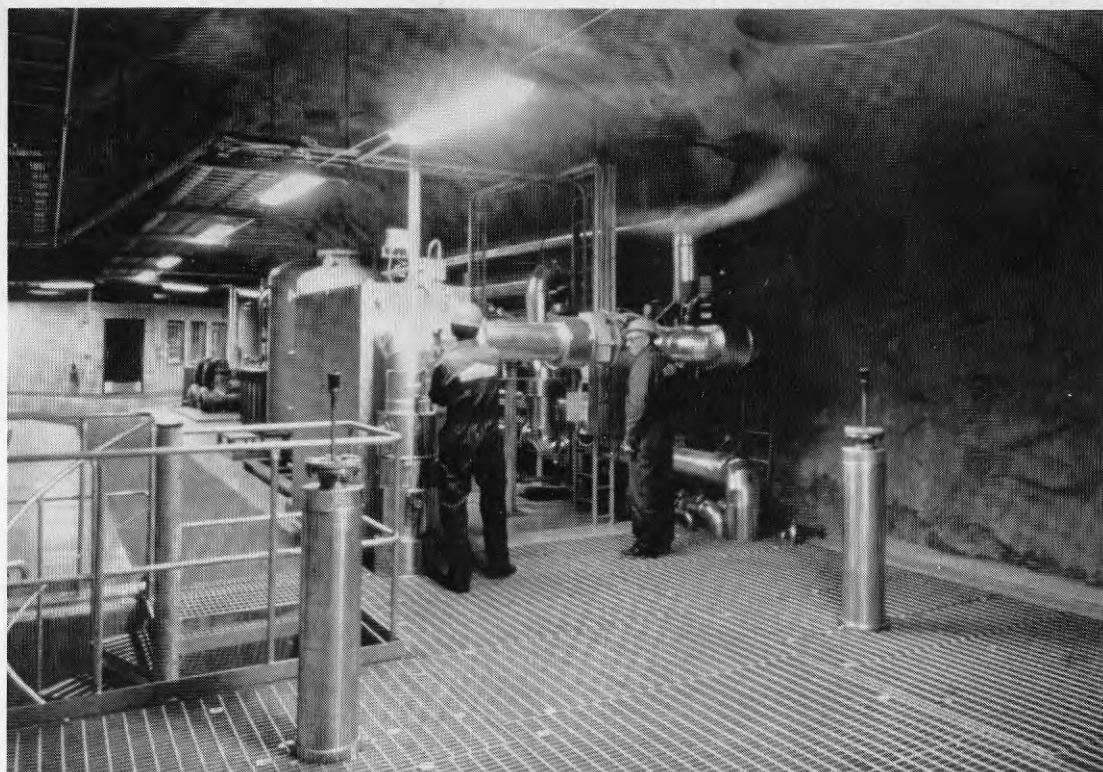
För installation av värmepump, cirkulationspumpar m m finns plats reserverad i servicetunneln. Detta utrymme har under den första drifttiden delvis utnyttjats för avhärdningsutrustningen.

2.4.4 Installationer i värmecentral

I värmecentralen finns pumpar och reglerutrustning för styrning, kontroll och övervakning av hela Lycke- boanläggningen d v s inlagring av solenergi, simu- lering av solenergi med hjälp av elpanna samt di- stribution av energi till fjärrvärmenätet. Anlägg- ningen är helautomatisk med fjärrövervakning från UKABs centrala kontrollrum i Uppsala (ca 20 km från anläggningen).

Värmecentralen omfattar i huvudsak följande kom- ponenter/system:

- 2 st cisterntoppar för värmelagret (se tidigare be- skrivning)
- 2 st cirkulationspumpar för solvärmekrets (35 m^3/h x 44 mvp) respektive 105 m^3/h x 55 mvp).
- 3 st cirkulationspumpar för fjärrvärmenät (30 m^3/h x 35 mvp respektive 2 x 145 m^3/h x 50mvp).
- 1 st elpanna 6 MW av elektrodotyp med cirkulationspump, värmeväxlare och reglerutrustning (separat krets),
- 1 st plattvärmväxlare (1 MW) för direktmatning av energi från solnät till distributionsnät
- 10 st reglerventiler för flödesreglering
- 7 st flödesmätare, temperaturgivare, tryckgivare
- Högspänningsställverk 10 kV
- Transformator 10 kV/0.4 kV
- Lågspänningsställverk
- Styr- och reglersystem
- Tryckluftssystem för manövrering av avstängnings- ventiler och teleskoprör
- Ventilationssystem
- Vatten och avlopp.



Figur 2:27 Installationer i värmecentral

2.4.5 Första uppvärmning (anvärmning)

Lagret började värmas upp med hjälp av elpannan i mitten av mars 1983. I mitten av maj kopplades solfångarsystemet in och under sommaren värmdes lagret upp både med solvärme och elpanna. Automatiken för teleskoprören kopplades in i september och fram till dess skedde således en utjämning av temperaturskiktningen i lagret. I samband med att automatiken för styrning och reglering togs i drift började även värme att distribueras ut till områdets bostäder. Dessa hade dessförinnan försörjts med transportabla oljeeldade pannor. Värmen i lagret var ca 75°C i toppen och framledningstemperaturen i distributionsnätet reglerades till ca 60°C .

För den första uppvärmningen av lagret upprättades ett särskilt anvärningsprogram. Syftet med detta var:

- a) att varsamt värma berggrummets tak med en maximal temperaturhöjning av 2°C per dag så att onödiga temperaturchocker av berget skulle undvikas.
- b) att så snabbt som möjligt få berggrummet operativt ur distributionssynpunkt, d v s uppnå lagertemperaturer över 60°C .
- c) att testa effekten av utsläpp av vatten på fel temperaturnivå

- d) att testa effekten av utsläpp på rätt temperaturnivå
- e) att testa utbredningshastighet av värmeskikt i lagrets horisontalledd

Uppvärmningen utfördes helt enligt uppvärmningsprogrammet fram till skede 2 (ca 45°C) varvid värmeväxlarna sattes igen av kalkavlagringar. Under denna tid kunde kostateras att:

- a) Utsläpp av övertempererat vatten mitt på cisternhöjden gav en fullständig diffus och homogen uppvärmning i ovanliggande vattenvolym, (temperaturskillnaden mindre än 1 °C) medan underliggande vattenvolym blev helt opåverkad.
- b) Den horisontella utbredningen i lagret var fullständig. Inga mätbara temperaturskillnader kunde konstateras vid mätning på samma nivå i lagret (3 olika punkter).
- c) Vid uppvärmning till ca 80°C inträffade en mycket snabb kalkutfällning i bergrumsvattnet varvid plattvärmväxlarna snabbt sattes igen.

Avhärdning till en totalhårdhet av maximalt 2⁰DH erfordras för att undvika detta fenomen, varför avhärdningen bör pågå tills bergrumsvattnet når denna hårdhetsnivå, (jämviktssläge vid 90°C).

Den fortsatta uppvärmningen av lagret kom att avvika från upprättat program genom att dels avhärdning av vattnet påbörjades, dels genom att solvärmefältet togs i drift. Det avhärdade vattenflödet (ca 30 m³/h) kunde därvid upphettas till ca 90°C före återsläpp till bergrummet. Eftersom styr- och reglerutrustningen i anläggningen ej hade tagits i drift kyldes solvärmekretsen via växlare med bergrummets kallaste vatten.

Uppvärmningen av lagret försigick således på många olika temperaturnivåer och resulterade därvid i en temperaturprofil med fallande temperatur mot cisternbotten utan något uttalat gränsskikt med hög temperaturgradient.

I och med att styrdatorutrustningen blev driftklar påbörjades distribution av energi från lagret. Detta uttag sker därvid från lägsta möjliga temperaturnivå som är tillräcklig för att upprätthålla erforderlig framledningstemperatur i fjärrvärmenätet.

Eftersom energiuttaget kom att ske på temperaturnivåer under toppskiktet i lagret reducerades gränsskiktet redan efter några månaders drift så att ett temperatursprång på 30°C (80°C - 50°C) uppstod på ca 1 m höjdskillnad.

Genom att anläggningen endast distribuerade energi reduceras således gränsskiktet i princip helt.

I dagsläget synes således anläggningen med god marginal uppfylla alla ställda krav på funktionsduglighet, driftsäkerhet och ekonomi.

Samtidigt med anvärmningen utfördes driftprov av anläggningens elpanna.

Uppvärmningen skedde i 4 faser enligt fig 2:28 - 2:31.

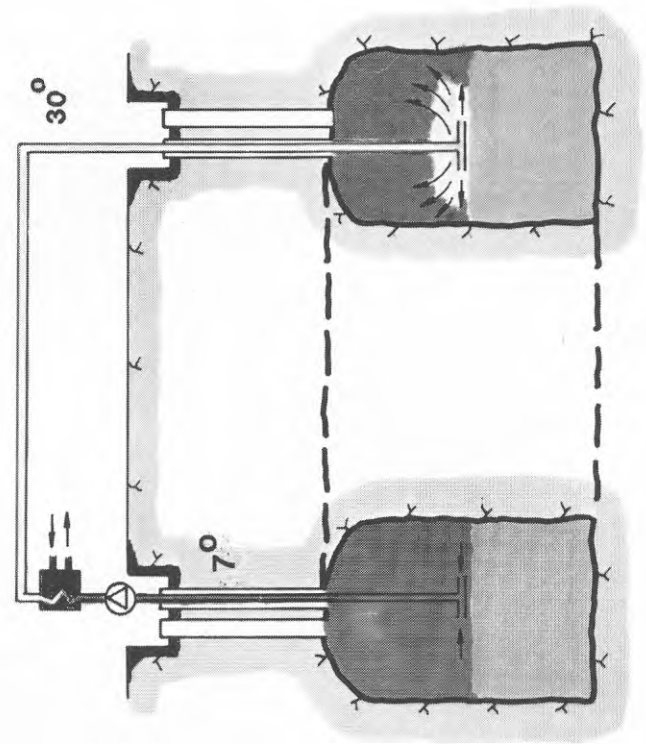


Fig 2:28 Uppvärmning, Fas 1, av berg-
rummets övre halva från +7°C
till +30°C.

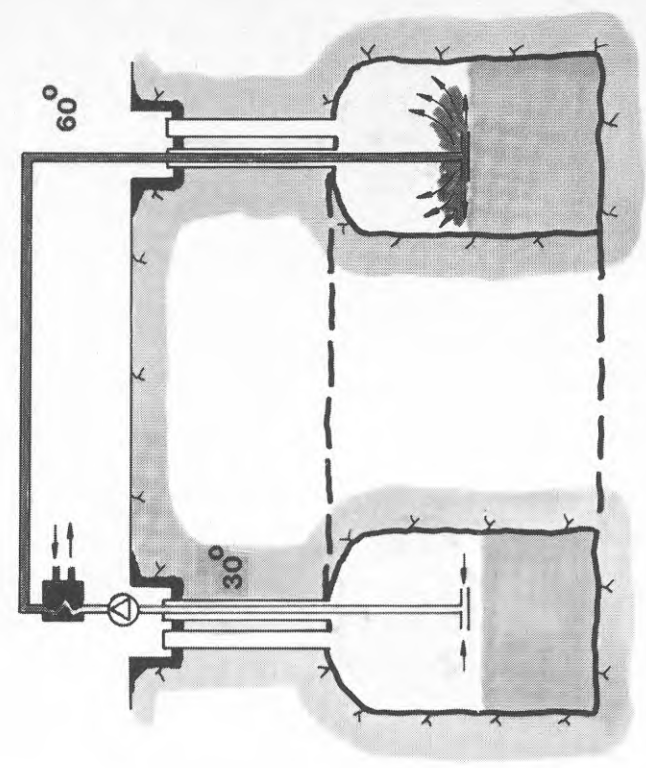


Fig 2:29 Uppvärmning, Fas 2, av berg-
rummets övre halva från +30°C
till +60°C.

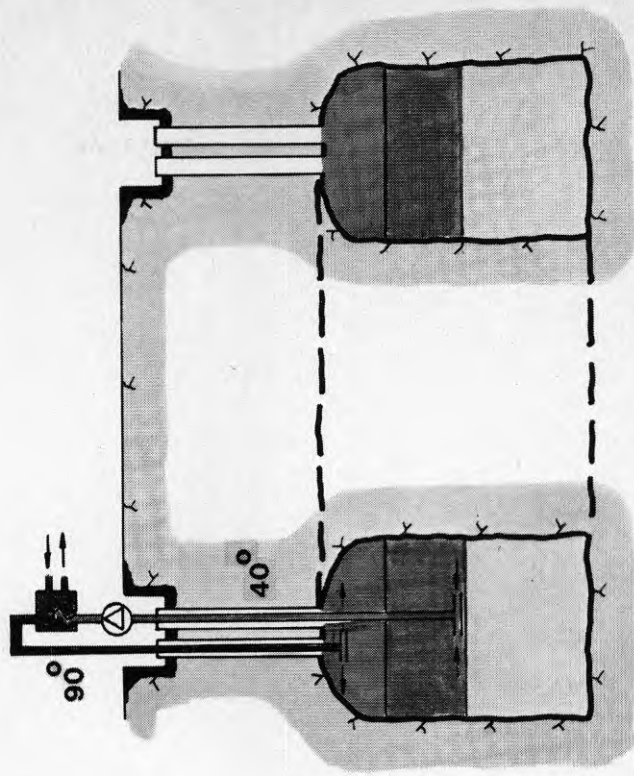


Fig 2:31 Uppvärmning, Fas 4, av berg-
rummets hela övre halva till
90°C, successiv uppvärmning
av undre del, skiktat utsläpp.

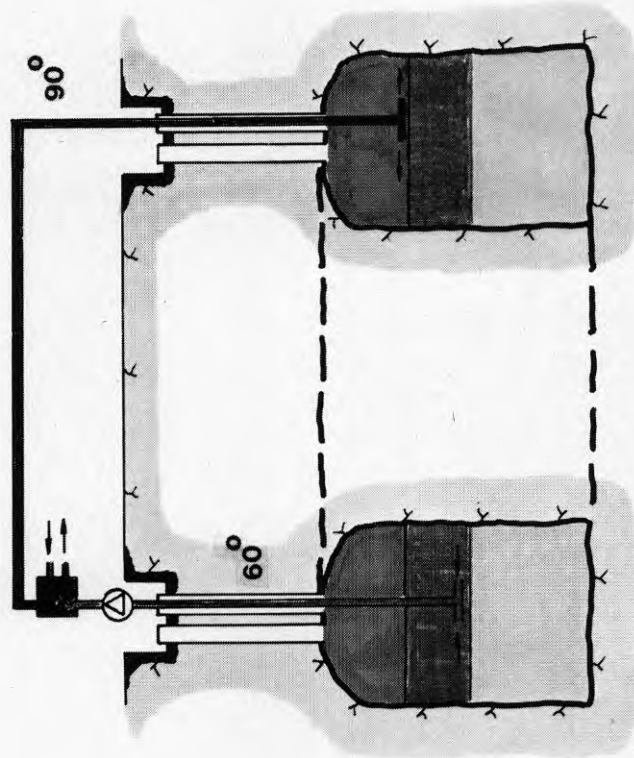


Fig 2:30 Uppvärmning, Fas 3, av berg-
rummets övre fjärdedel från
60°C till 90°C.

3. EKONOMI/FINANSIERING

Projektet genomfördes av skäl som tidigare beskrivits med lagerdelen i full skala (bergrum på 100 000 m³). Lagret laddas under sommarhalvåret med solenergi från ett solfångarfält med solfångaryta 4 300 m², vilket motsvarar 15% av den totala värmeenergin. Resterande 85% tillföres med hjälp av en elpanna på 6 MW, vars roll är att simulera en kommande etapps solfångare.

I detta kapitel redovisas det utförda systemets ekonomi samt ekonomin omräknad till 100 % solenergi.

3.1 INVESTERINGAR

Investeringarna sträckte sig över en tidsperiod av flera år. De investeringsposter som ej betalades år 1983 har omräknats till detta år, varför i nedanstående sammanställning penningvärdet avser 1983 års nivå för samtliga poster (exkl moms)

	Verklig investering Byggt syst. 15 % sol Mkr	Beräknad investering vid 100%. sol Mkr
Förundersökningar	0.6	0.6
Konsulter	1.8	1.8
Bergrum (utsprängning) värmväxlare, in- och uttag)	14.5 ¹⁾	14.5
Vattenfyllning	0.2	0.2
Anvärmning (vatten, berg)	2.1 ²⁾	2.1
Avhärdningsfilter	0.3	0.3
Elpanna	2.3	-
Installationer distribu- tionscentral	2.0	2.0
Styrning och reglering (lager, distribution)	2.4	2.4
Fjärrvärmenät	3.0	3.0
Ledning solfångarfält/ bergrum	0.8	0.8
Solvärmesystem (inkl mark)	8.5 ³⁾	55.0
Reserv	0.5	0.5
Totalt	39 Mkr	83 Mkr

1)

Posten för Bergrum fördelar sig
 12.4 Mkr för bergarbeten
 2.1 Mkr för installationer
 Specifik investering för själva bergrummet är således
 124 kr/m³.

2)

Beträffande det byggda systemet pågår fortfarande
 anvärmningen varför verklig slutkostnad ej ännu
 föreligger. Så vitt idag kan bedömas kommer anvärm-
 ningskostnaden ej att överstiga de angivna 2.1 Mkr.

3)

Solvärmesystem 8.5 Mkr innefattar 800 kkr för
 48.000 m² mark. Specifik investering för solfångare
 monterade på stativ är således 1780 kr/m².

3.2 FINANSIERING

I det byggda systemet har investerats totalt 39.0 Mrk.
 Projektet har finansierats enligt nedan:

	Mkr
Statens råd för byggnadsforskning (Experimentbyggnadslån)	18.5
Uppsala Kraftvärme AB (varav investeringsbidrag 1.3 Mkr)	16.5
HSBs Riksförbund	2.0
SKANSKA	<u>2.0</u>
	39.0

För investeringar fakturerade under 1982 och 1983
 fanns ett tillfälligt investeringsbidrag avseende
 maskininstallationer. UKAB beviljades av dessa medel
 1.3 Mkr.

3.3 TOTALKOSTNADER (kapital, drift och underhåll)

3.3.1 Förutsättningar

	Byggt system	System med 100 % sol
Investering	39 Mkr	83 Mkr
Beräknad energi- prod.	8 000 MWh	8 000 MWh
Drift- och underh.kostn	400 Kkr/år	850 Kkr/år
Avskrivningstider	lager solfångare övrigt	40 år 20 år 30 år
Ränta	realränta 4% respektive nominell ränta 12%	
Kalkylmetod	annuitetsmetoden	

För drift och underhållskostnad har räknats med 0.5% av investeringsbeloppet/år för bergrummet och 1.0% för övrigt (förundersökning, konsulter, vattenfyllning och anvärmning har ej medtagits i beräkningsunderlaget).

3.3.2 Resultat

	Byggt system		100% sol	
	Real- ränta 4%	Nom ränta 12%	Real- ränta 4%	Nom ränta 12%
Investering	28.9	69.5	61.8	135.0
El	10.5	10.5	-	-
Drift och underhåll	5.2	5.2	10.7	10.7
S:a öre/kWh	44.6	85.2	72.5	145.7
Specifik inv.kostnad	4.9 kr/kWh, år		10.4 kr/kWh, år	

3.4 EKONOMISK JÄMFÖRELSE MED TIDIGARE PROJEKT SAMT UTVECKLINGSPOTENTIAL

Investeringsbeloppet i det byggda systemet är 39 Mkr. Med 100 % sol har investeringsbeloppet beräknats till ca 80 Mkr. Specifik investeringskostnad för det totala byggda systemet (produktion, lagring och distributionssystem) är 4,9 kr/kWh, år och för 100 % sol 10,4 kr/kWh, år.

Med avskrivningstiden 40 år för lager, 20 för solfångare och 30 år för övrigt blir totalkostnaden för värme i Lyckebo 45 öre/kWh vid realränta 4% och 85 öre/kWh vid nominell ränta 12%. Om det byggts för 100 % sol hade kostnaderna blivit 73 öre/kWh respektive 146 öre/kWh.

I Lyckebo betalar dock abonnenterna lika mycket för värmeleveranser som de anslutna till det stora fjärrvärm nätet i Uppsala.

Nedan visas några ekonomiska nyckeltal för Lambohov, Ingelstad och Lyckebo. Beräkningsmetodik är inte identisk för de tre anläggningarna och investeringsbeloppen hänförs till olika genomförandeår och således olika penningvärden. Nyckeltalen illustrerar dock de ekonomiska framsteg som gjorts på grund av uppskalning och vidrareutveckling. Skillnaderna penningvärde och beräkningsmetodik är försumbara i sammanhanget.

År		Antal lgh	Invest. Mkr	Invest. kr/lgh	Energi prod MWh/år	Solfångare kr/m ²	Värmelager kr/m ³
1979	Ingelstad	52	11.8	236 000	1 100	3 000	600
1980	Lambohov	55	16.3	296 000	900	1 300*	485
1983	Lyckebo	550	39.0	71 000	8 000	1 780	124

* takintegrerad, exkl samlingsledningar

Solfångarsystemet i Lyckebo är utvecklat för stora system med höga temperaturer. Denna solfångarteknik introducerades 1982 i samband med Lyckebo-projektet. Leverantören uppger att en teknikutveckling därefter skett, innebärande en pris/prestandaförbättring på ca 25%. Marknaden är dock ännu för liten för en rationell serieproduktion varför ytterligare kostnads-/prestandaförbättringar på ca 25% kan förväntas om serieproduktionens fördelar kan utnyttjas.

Med dagens teknik kan man således förvänta sig en halvering av kostnaden för solfångarsystemet jämfört med den utförda Lyckeboanläggningen.

Värmelagret i Lyckebo har utformats för att optimalt kunna utnyttja olika temperaturnivåer för inmatad, respektive utmatad energi. Genom att energin finns lagrad i vätska kan effekten vid såväl laddning som uttag ökas genom utökning av pumpar, rör och värmväxlare.

Berggrummet har utförts med modern rationell bergsprängningsteknik. Utvecklad och anpassad för stora bergsvolymer. På grund av höga "startkostnader" för bl a transporttunnlar, schakt och serviceanläggningar minskar volymkostnader vid ännu större lagringseenheter.

Med modern värmepumpsteknik kan det sannolikt i andra lagringstillämpningar vara intressant att utöka lagringskapaciteten genom att kyla lagrets kalla del till ca +5°C.

Sammantaget kan således den använda lagringstekniken utvecklas både ekonomiskt och tekniskt, så att en lagring av energi kan ske till ca 50% av kostnaderna för Lyckebo-anläggningen, enligt leverantörens uppgifter.

4. FORSKNING OCH UTVÄRDERING

4.1 INLEDNING

Lagring av hetvatten i oinklädda bergrum är en helt ny teknik. Denna är föremål för ett omfattande forskningsprogram inom ramen för Vattenfalls s k Avesta-projekt (beträffande rapporter därifrån se litteraturförteckning). När beslutet att bygga Lyckeboanläggningen fattades, bedömdes det lämpligt att genomföra en driftuppföljning samt en forskningsinsats.

4.2 MÅLSÄTTNING

Forsknings- och utvärderingsinsatsernas målsättning är att genomföra en teknisk utvärdering av systemfunktionen så att underlag skapas för en bedömning av teknikens ekonomi utgående från aktuella komponentkostnader vid bedömningstillfället

att kontrollera inverkan av bergrumslagret på bergstabilitet, grundvatten och yttre miljö.

4.3 OMFATTNING

Forskningsprogrammet för Lyckeboprojektet, består av:

- | | |
|---|---|
| - systemfunktion, övergripande | VIAK AB, Falun
m fl |
| - uppföljning och utvärdering av solfångaranläggningen | Studsvik Energiteknik AB, Nyköping |
| - utvärdering av den tekniska funktionen hos energiförsörjningssystemet med tyngdpunkt på bergrummet. | Vattenfall
Älvkarlebylaboratoriet |
| - bergstabilitet. | Stiftelsen Bergteknisk forskning
Råcksta |
| - vattenkemiska undersökningar. | Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Geologi, Göteborg |
| - geologi, geohydrologi. | VIAK AB, Göteborg |
| - omgivningspåverkan på befintlig vegetation. | Firma Markplan
Uppsala |
| -värmeförlustberäkningar | Lunds Tekniska Högskola, Lund |

4.4 SOLFÅNGARANLÄGGNINGEN

4.4.1 Målsättning och uppläggning av utvärderingsprogrammet

Studsvik Energiteknik ansvarar för datainsamling från och utvärdering av solfångaranläggningen. Utvärdering och analys begränsas till själva solfångaranläggningen varför simuleringen med elpannan ej ingår.

Utvärderingsprogrammet har utformats både för att följa solfångarfältets totala energiproduktion och motsvarande klimatförutsättningar och för att möjliggöra detaljerade analyser av solfångarnas prestanda och dynamik under olika driftförhållanden.

Genom användande av ett datorbaserat mätsystem har relativt omfattande databehandling gjorts möjlig redan i mätsystemet. Sålunda kan t ex solfångarfältets energiproduktion indelas i temperaturnivåer och vissa temperaturer medelvärdesbildas viktat med avseende på momentan effekt från fältet.

Den övergripande målsättningen för utvärdering och analys kan brytas ned i följande delmål:

- redovisa energiproduktion, drifttillstånd, hjälpenergi och instrålning relaterat till effektviktat medelvärde för drifttemperatur m m. Dygns- och månadsvärden i första hand. Redovisa Input/Output-diagram för avgränsade perioder (månad) med likartade klimatförutsättningar.
- redovisa klimatdata.
- redovisa temperaturnivåer i det centrala systemet för att kunna följa temperaturförluster i värmväxlaren, m m.
- vid några tillfällen manuellt mäta upp och redovisa temperaturfördelningen i solfångarfältet under drift (endast lokala givare i fältet).
- redovisa insamlad energi, instrålning, verkningsgrad och drifttid uppdelat i temperaturklasser från 10 - 100°C med 10°C intervall.
- under en period analysera fördelning av instrålning, solfrekvenser och varaktighet på effektklasser i området 100 - 1 000 W/m² med 100 W/m² intervall. Materialet kommer att användas för att analysera solfångarnas dynamiska egenskaper och för att fördjupa förståelsen av mekanismerna bakom Input/Output-diagrammen.
- studera start- och stopp-förlopp vid några olika driftförhållanden och, om nödvändigt, lagra data med högre frekvens under några korta perioder.

- genom on-line-simulering av solfångarfält och rörsystem verifiera och korrigera beräkningsmodellen för teoretisk energi. Vid jämförelse mellan teoretisk förväntad och uppnådd energiproduktion studera orsaker till eventuellt sänkt energitillgänglighet.
- redovisa solfångarnas prestandaparametrar t ex i verkningsgradsdiagram under olika yttre driftbetingelser. Eventuell degradering av prestanda undersöks.

Redovisning kommer att ske löpande månadsvis i form av en större mängd driftdata och vissa energidiagram.

I slutrapporten kommer ett större antal samband, driftförlopp och prestanda att redovisas i grafisk form tillsammans med de ovan skisserade utredningarna inom varje delmål.

Förutom det material i form av mätdata som ligger till grund för rapporten kommer drifterfarenheter från UKAB (Uppsala Kraftvärme AB) såsom tillgänglighet, felorsaker och insatser för korrigerande och förebyggande underhåll att redovisas.

4.4.2 Mätdatainsamling

Datainsamlingen görs i en bordsdator HP -85 via överföring av data från det styr- och reglersystem (ett PC-system: Procontic DP 800) som styr anläggningen.

PC-systemet består av en centralenhet placerad vid berggrummet och en underenhet placerad vid solfångarna.

Den mätutrustning (givare, kablage och signalomvandlare) som används för mätprojektet, är ansluten till PC-systemet vid solfångaranläggningen och rådata överförs sedan till bordsdatorn i ett datatelegram varje minut. Kommunikationen sker seriellt i ASCII-form, varför datatelegrammen också direkt kan skrivas ut på en vanlig printer, Se figur 4:1.

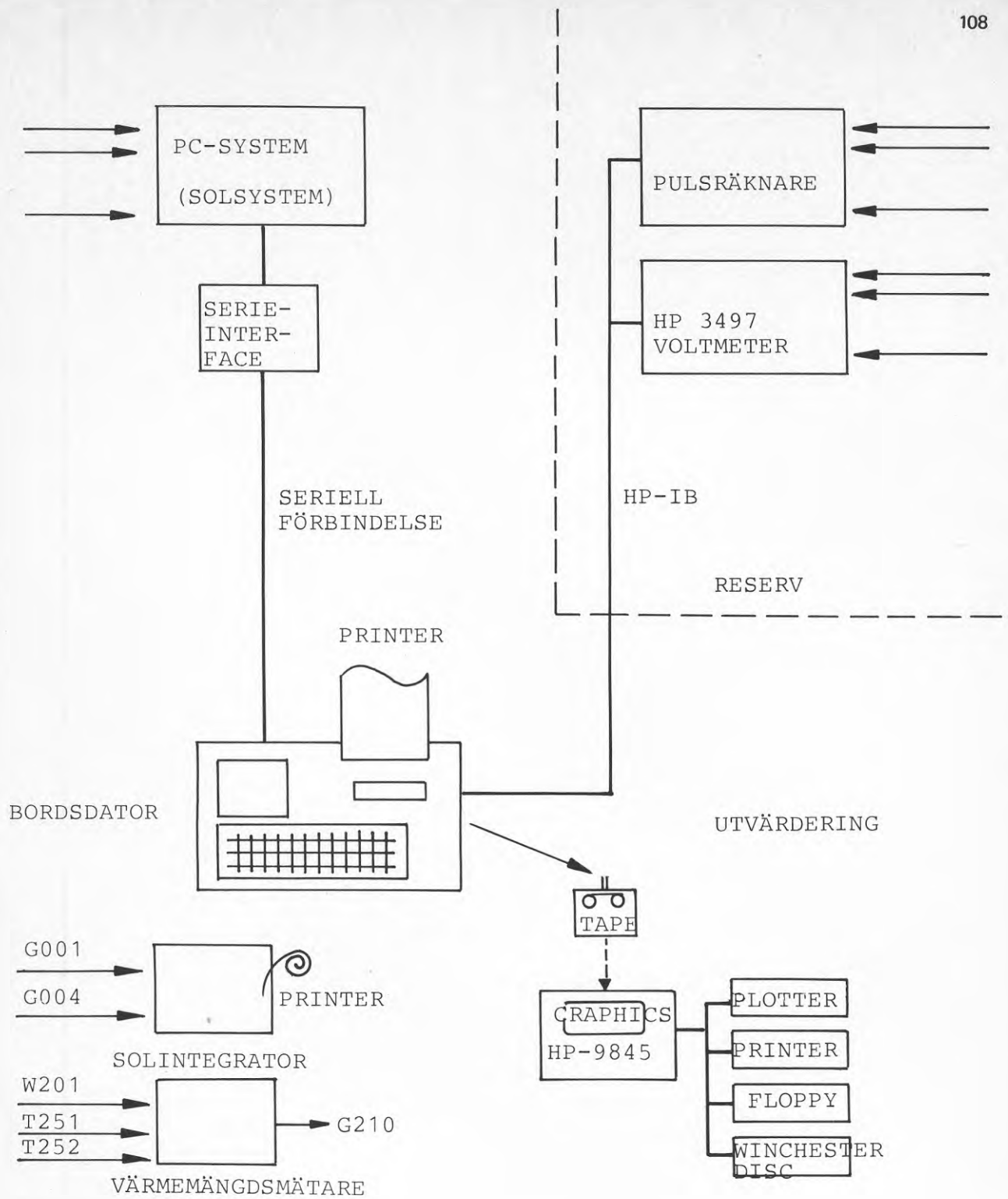


Fig 4:1 Blockschema över mätutrustning och utvärderingssystem för solfångarsystemet.

Emellertid blir, genom systemets uppbyggnad, mätdatas tillgänglighet och noggrannhet beroende av att styr- och reglersystemet arbetar på ett riktigt sätt.

Av denna orsak har under sommaren 1983 en annan mätutrustning hyrts in för att kunna starta mätningarna i väntan på att data från PC-systemet skulle bli tillgängliga.

Från slutet av oktober 1983 har data insamlats via PC-systemet.

För datainsamling har givare för solinstrålning (solfångarplan, horisontellt), vindhastighet, elenergi samt temperaturgivare och flödesmätare för energi-beräkning anslutits. Processens tillstånd avläses med indikatorer på de två solpumparna, och på ändläget för bergssidans reglerventil. Reglersignaler för pumpvarvtal och ventilläge är också anslutna.

I figur 4:2 redovisas samtliga givare i ett block-schema.

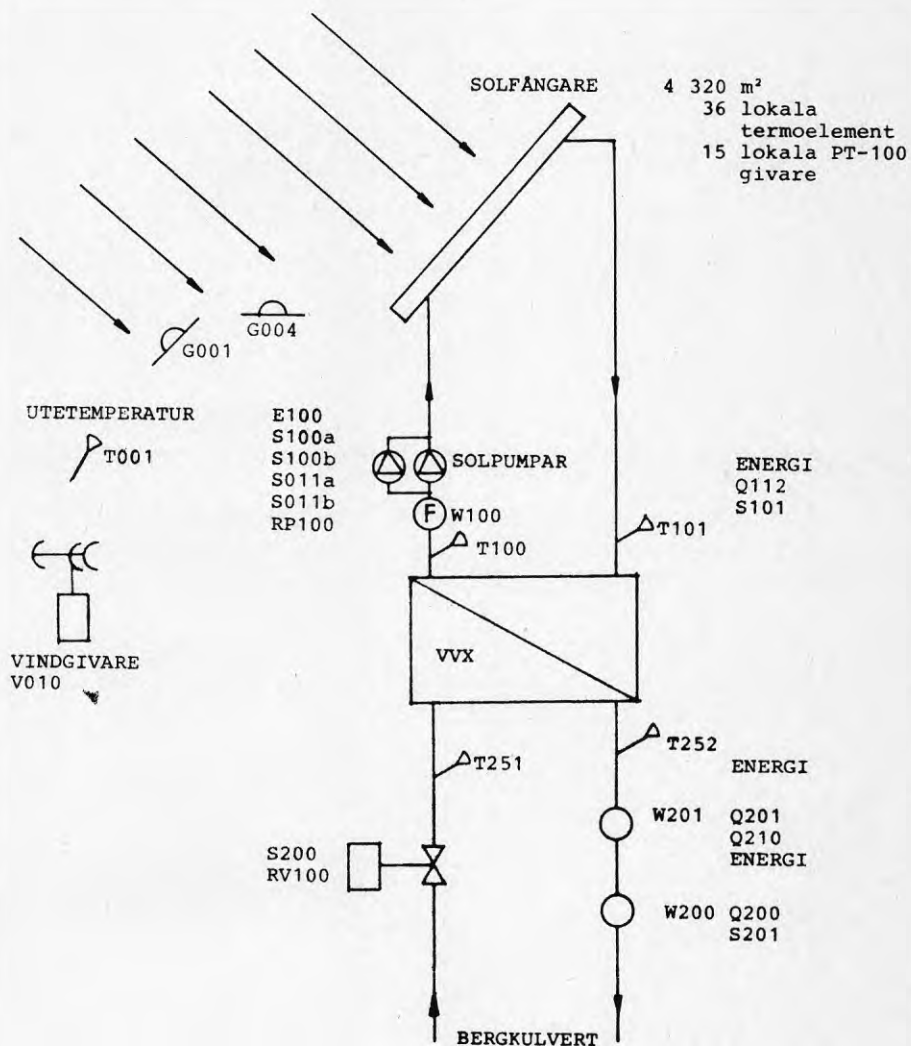


Fig 4:2 Givarplacering i solfångaranläggning

Mätpunkterna i solfångarfältet är lokala och avläses manuellt med ett bärbart instrument.

De primärdata (20 mätvariabler) som ingår i data-telegrammet bearbetas (kalibrering, datareduktion osv) i en standardmätprogramvara som anpassats för att ta emot data via seriekanal.

Utgående från mottagna kalibrerade rådata beräknas sedan ett större antal teoretiska värden (teoretisk energi, medeldrifttemperatur, solinstrålning på hela solfångarfältet osv).

Samtliga momentanvärden (mätvariabler och beräknade variabler) reduceras kontinuerligt till reducerade data (medelvärden, ackumulerade värden, min, max osv) vilka lagras på band varje timme. Under natten begränsas lagringen till enbart klimatdata.

4.4.3 Utvärdering av primärdata

Utvärdering av insamlade data består av följande delmoment:

- kopiering och eventuell korrigerings av insamlade timdata för lagring på winchester-disk.
- sammanställning av dygnsvärden och månadssummor samt redovisning av "Input/Output"-diagram i form av månadsrapport.
- olika analyser och grafisk presentation av timvärden för att lösa de ovan uppställda delmålen.
- sammanställning av årsöversikter.

Utvärdering sker i en större bordsdator och styrs till största delen av parametrar i sina rutinmässiga delar.

Vid framtagning av årsöversikter och slutrapport kan grafiska redovisningar göras av selekterade timdata-block uppfyllande vissa uppställda villkor.

Genom detta kan speciella driftsituationer, i det stora material av timdata som finns tillgängligt, letas upp och jämföras.

4.5 LAGRET SAMT SYSTEMFUNKTIONEN

4.5.1 Målsättning

Syftet är att bestämma energiflöden och temperaturförhållanden i systemet så att bergrummets energi- och temperaturverkningsgrader kan beräknas och systemets allmänna funktion bedömas.

Vidare studeras skiktstabilitet och sker utvärdering av effektiviteten hos in-utmatningsanordningarna.

4.5.2 Utvärdering av bergrummet som systemkomponent

Systemets energiflöden bestäms genom mätning av volymflöden och temperaturdifferenser och integrering se fig 4:3.

Energiinnehållet vid en viss tidpunkt i bergrummet erhålls ur mätning av den vertikala temperaturfördelningen. Förlusterna under en viss period erhålls som under perioden till bergrummet inmatad energi minus utmatad plus skillnaden i energiinnehåll i bergrummet mellan periodens början och slut.

Lagrets energiverkningsgrad beräknas.

Utvärderingen inriktas även på att bestämma karakteristiska temperaturer för de olika energiflödena. Lagrets temperaturreverkningsgrad efter en årscykel bestäms.

4.5.3 Utvärdering av bergrummets hydrauliska och värmetekniska egenskaper

Utvärderingen inriktas på studier av skiktstabilitet samt på in-och utmatningsanordningarnas funktion. Som underlag för detta mäts den vertikala temperaturfördelningen i lagret.

4.5.4 Instrumentering, datainsamling, rapportering

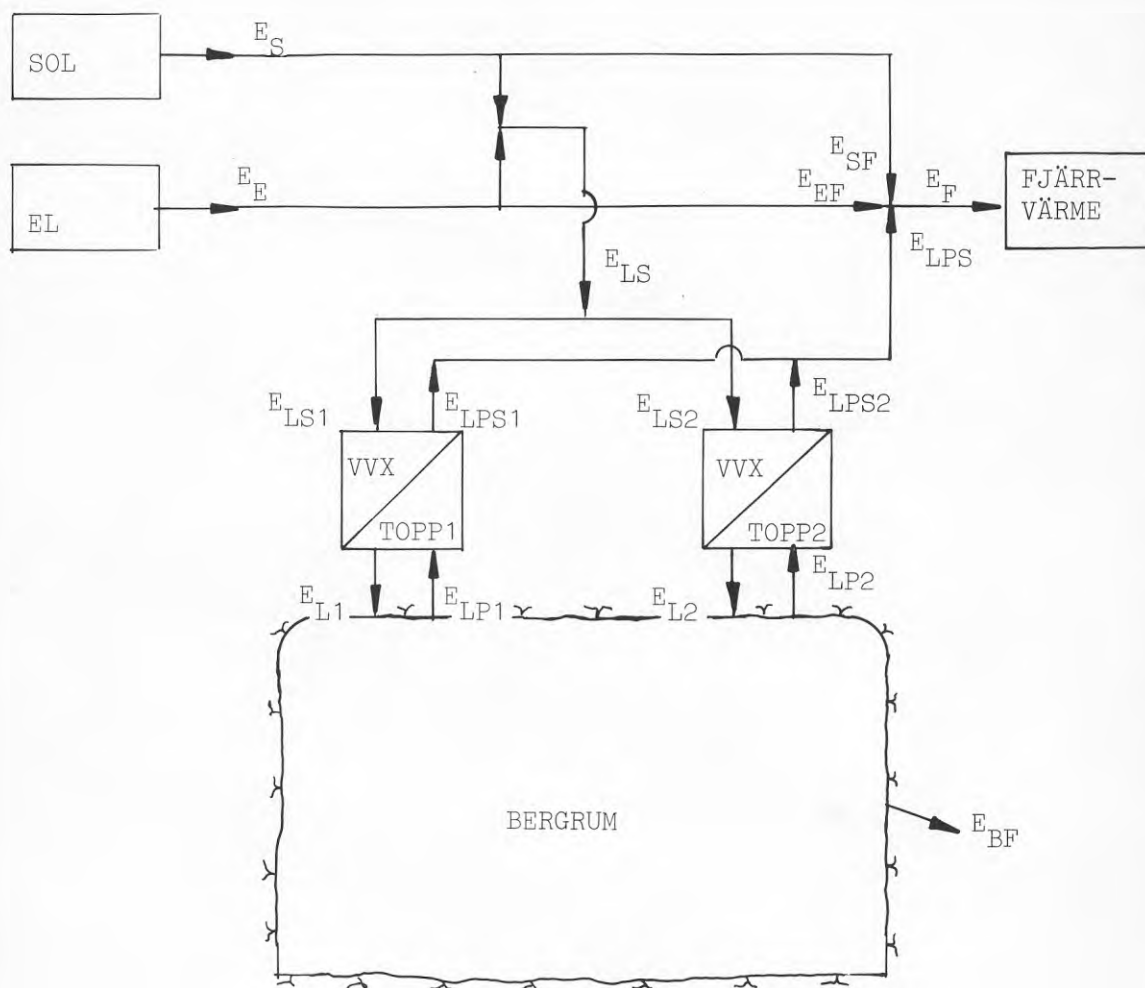
Mätningen och primär datainsamling genomförs med standardutrustningen för reglering och övervakning. Från reglerdatorn läggs de storheter som är intressanta för utvärderingen ut på kassetband som sedan skickas till Älvkarlebylaboratoriet för vidare bearbetning.

4.5.5 Mätstorheter, datareducering

Fyra typer av mätstorheter förekommer:

- Energi
- Temperatur
- Flöde
- Status hos ventiler

I styr- och reglerdatorn reduceras datamängden genom integrering av effekt och flöde och medelvärdering av temperatur så att timsummor respektive timmedelvärden bildas. Dessa matas ut på kassettband. Ventilstatus registreras och matas ut vid timmens slut.



Figur 4:3 Energiflöden i Lyckebosystemet.
Principskiss

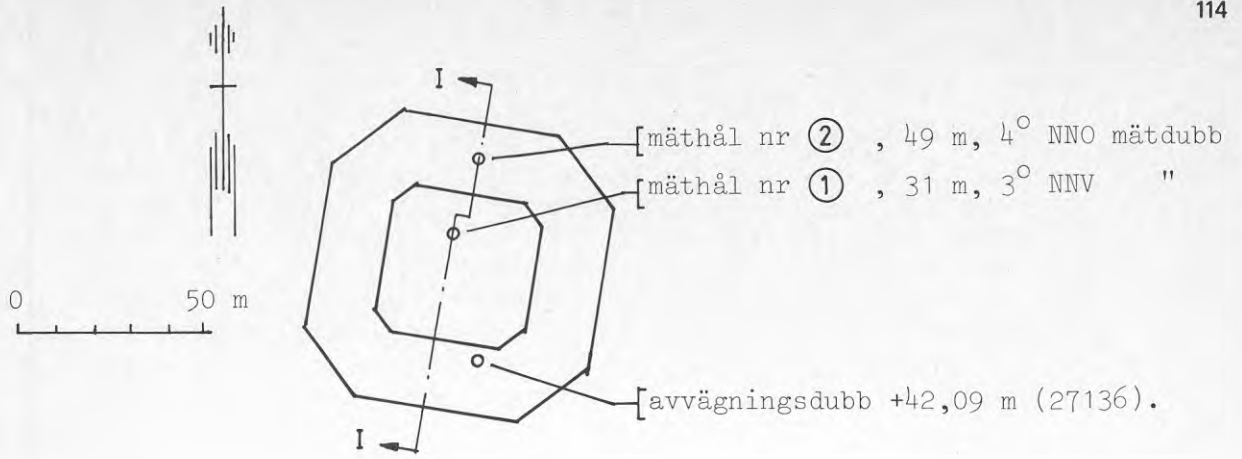
4.6 BERGSTABILITET

Om hetvatten förvaras i bergrum kan vissa problem förutses. Dels kan värmeutbytet mellan berget och vattnet påverka driften dels påverkas berget rent hållfasthetsmässigt.

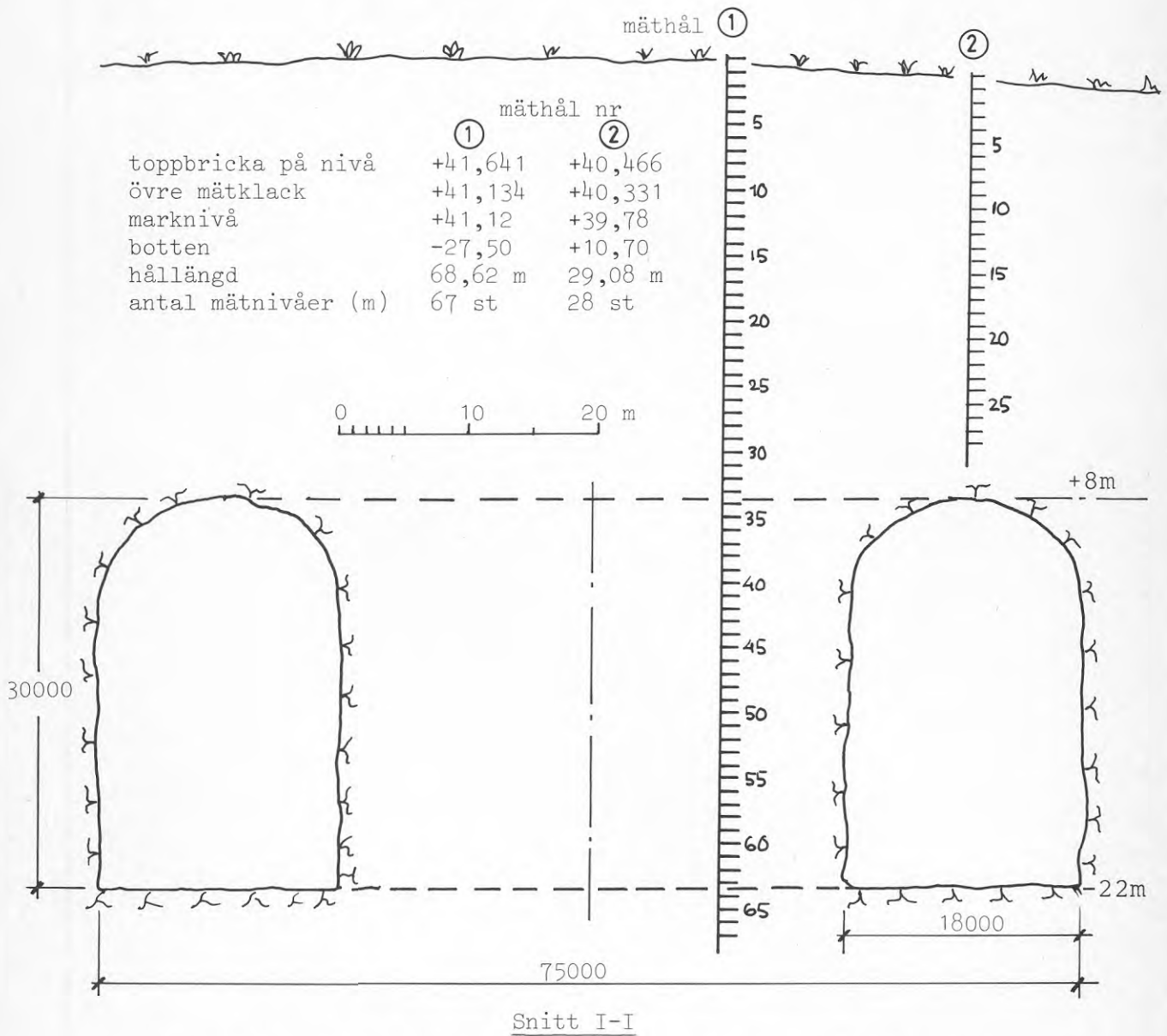
Varmvattnet som lagras i rummet kommer att värma upp berget, vilket leder till värmespänningar i berget. Det intressantaste fenomenet i detta sammanhang är att temperaturen varierar, vilket skulle kunna orsaka att kvarstående deformationer efter varje temperaturcykel ackumuleras med instabilitet som följd.

Det föreligger således ett behov att övervaka de deformationer som berget undergår till följd av temperaturfluktuationerna. Omfattande undersökningar av detta slag ingår i Avesta-projektet (se litteraturförteckningen). Den begränsade studie som rör Lyckebo-projektet är koncentrerad till det som skiljer de båda anläggningarna i Avesta och Lyckebo åt, nämligen till mittpelaren.

Två stycken lodräta borrhål, det ena över rummets hjässa, det andra genom hela pelaren, har borrats från markytan. Se figur 4:4. I hålen finns fastgjutna mätklackar med en meters mellanrum, vilkas inbördes förskjutning kan mätas. Mätning av dessa relativa förskjutningar äger rum ungefär en gång i kvartalet. Mätningarna ger bl a besked om den intrikata frågan huruvida mittpelaren är utsatt för drag eller tryck.



Bergrummet sett uppifrån



Figur 4:4 Översiktsbild för deformationsmätningar i vertikala mät hål.

4.7 VATTENKEMISKA UNDERSÖKNINGAR

Vattnet som används i berglagret är grundvatten, hämtat från en provpumpningsbrunn i en grusås i närheten. Vid fyllning, som skedde under ca 6 veckor under hösten 1982, gjordes en partiell avhärdning av vattnet där hårdheten minskades från 17^odH till 11^odH. Denna resterande hårdhet gav upphov till beläggningar, (kalciumkarbonat) under anvärmningen i värmeväxlarna, vilket förorsakade en del problem i igångkörnings-skedet. Avhärdningen kommer att pågå tills berggrums-vattnet innehåller 2^odH vilket är jämviktssläge vid 90^oC.

Löslighetsprodukten för de mineraler som finns lösta i lagringsvattnet samt för dem som vattnet löser ut ur berget och ur förstärkningsbetongen är en funktion av de olika mineralens koncentrationer samt av vattnets temperatur. Detta medför att lösta mineral kan deponeras i främst värmeväxlarna som ingår i systemet. Dessutom är vissa typer av joner aggressiva mot metaller. Det är således av stor vikt att fortlöpande mäta koncentrationen i vattnet av ett antal intressanta joner.

Det vattenkemiska forskningsprogrammet omfattar analys av berggrumsvattnet med avseende på följande joner:

Silikat	(SiO ₂)
Aluminium	(Al)
Natrium	(Na)
Kalium	(K)
Kalcium	(Ca)
Magnesium	(Mg)
Järn	(Fe)
Fosfat	(PO ₄)
Sulfat	(SO ₄)
Klorid	(Cl)
Syre	(O ₂)
Nitrat	(NO ₃)

Vidare analyseras vattnet med avseende på sin konduktivitet, som är ett integrerat mått på jonkoncentrationen, samt med avseende på pH-värdet, dvs surhetsgraden. Analys utförs en gång i månaden. Dessa analyser gör det sålunda möjligt att studera hur mineral-koncentrationerna varierar med tiden och vattentemperaturen. Analysprogrammet genomförs av Institutionen för geologi vid Chalmers Tekniska Högskola. Rutinanalyserna kräver snabb expediering och utförs vid UKAB i Uppsala.

Vidare har laboratorieundersökningar genomförts genom att provstycken tagits från berget i Lyckebo samt från betongen i bergrummet. Dessa prover har kokats i vatten från bergrummet i autoklav på Chalmers Tekniska Högskola.

4.8 GEOLOGI - GEOHYDROLOGI

Lokaliseringen av värmelagret föregicks av en omfattande hydrogeologisk studie, dels för att finna det bästa läget för bergrummet, samt dels för att ge ett projekteringsunderlag. En första del i utvärderingsprogrammet är därför att stämma av resultatet mot förundersökningarna.

Under byggnadstiden genomfördes regelbundna bergsbesiktningar och vatteninflödet mättes. Vidare gjordes en noggrann berg- och sprickartering innan rummet fylldes med vatten. Resultatet av dessa arbeten redovisas i en särskild rapport.

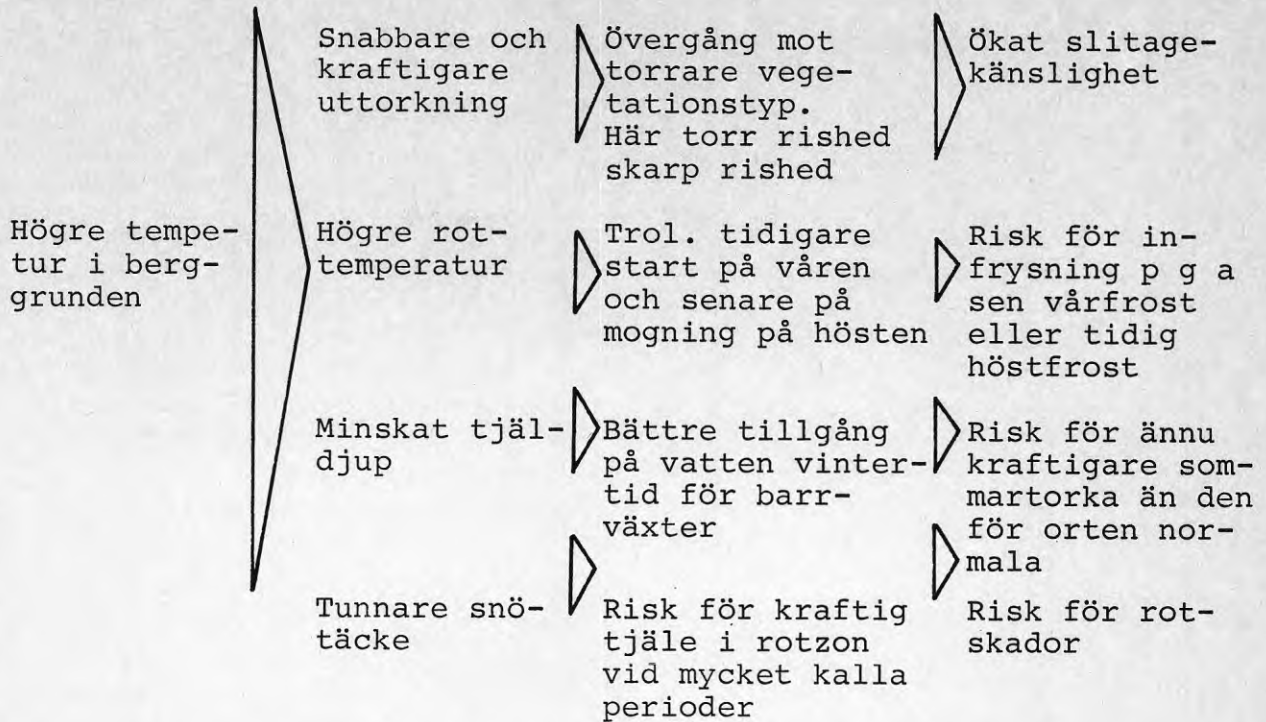
När lagret är i drift, måste vattentrycket i rummet balanseras mot grundvattennivån i omgivningen för att inte värme skall förloras genom ett vattenutbyte. För att kontrollera detta, mätes grundvattennivåerna i kringliggande borrhål och i bergrummet. Samtidigt mätes temperaturen i borrhålen för att spåra eventuella värmeläckage.

4.9 PÅVERKAN PÅ BEFINTLIG VEGETATION - DOKUMENTATION AV UTGÅNGSLÄGE

När man, som i Störvreta, använder ett bergrum i naturmark som magasin för t ex uppvärmt vatten kan man på sikt befara att mark och vegetation kommer att påverkas. Förutom av byggverksamheten ändras naturmiljön sannolikt av ändrade vatten och värmeförhållanden i marken under driftskedet.

Avsikten med studien är att främst dokumentera och på sikt även utvärdera den påverkan på befintlig vegetation som en uppvärmning av berget medför. I det aktuella fallet är vegetationen, som är den befintliga naturmarksvegetationen, vattenförsörjd endast genom nederbörd och grundvattenyta saknas i de tunna, lösa jordlagren. En sänkning av grundvattennivån förväntas därför ge endast marginell effekt bortsett från i vissa mindre områden.

Huvudproblemet är hur den relativt långsamma uppvärmningen av marken ovan lagret ändrar ståndortsförhållanden och hur förändringen kan påvisas i den befintliga naturmarksvegetationen. Nedan presenteras de effekter som är tänkbara i detta fallet.



En eventuell uppvärmning av berget vid markytan startar följande för vegetationen viktiga händelseförlopp:

- förlängd vegetationsperiod - ändrad fenologi
- försämrad vattenförsörjning - ändrad vegetationssammansättning
- markorganismernas antal och aktiviteter påverkas
- snabbare vittring på sikt

Detta projekt kommer att resultera i en dokumentation av nuläget i området. Uppföljning kan sedan ske om ett antal år för att förändringen skall kunna bekräftas till typ och omfattning.

Metoden som användes för detta är att ett antal provytor i form av band, 2 m breda och 30 - 50 m långa placeras i olika riktningar över bergrummets topp. På samma sätt placeras provytor på ett referensområde i närheten. I provytorna noteras samtliga växter och deras täckningsgrad. Ytorna fotodokumenteras med lodbilder.

4.10 VÄRMEOFÖRLUSTBERÄKNINGAR

När vattnet i bergrummet börjar värmas leds värme bort genom berget. Under inledningsfasen under vilken berget uppnår värmemättnad försvinner avsevärd mängd värme ut i berget. Dessa förluster kan betraktas som ett slag av nödvändig investering. Efter det att värmemättnad uppnåtts, som för Lyckebolagrets del tar omkring 4 år, sker fortlöpande värmeförluster som belastar driftsekonomin.

Beräkning av förlusterna kommer att utföras av Lundagruppen för markvärme vid Lunds Tekniska Högskola och jämförelser görs med de värmebalanser Älvkarlebylaboratoriet kommer att ta fram baserade på de mätningar som utförs.

4.11 DOKUMENTATION AV FORSKNINGSRISULTAT

Resultaten av ovanstående undersökningar redovisas av flera olika rapportutgivare. Undersökningarna beskrivna under pkt 4.4 ovan redovisas i arbetsrapporter och delrapporter som utges av Studsvik Energi AB under det att resultaten från övriga undersökningar redovisas i rapporter utgivna av Stiftelsen Bergteknisk Forskning.

En samlad slutrapportering kommer att ske i någon av BFRs rapportserier.

5. REFERENSER, LITTERATURFÖRTECKNING

5.1 Referenser (ej publicerade)

Hillström C-G, 1978	Förstudie (UKAB) 1978-12-19)
Hillström C-G, 1979	Specification for preliminary quote regarding the solar collector system (UKAB 1979-07-17)
Lunds Tekniska Högskola 1981	Värmeteknisk förlustberäkning (Lund 1981-04-14)
Wahlander I, 1979	Förfrågningsunderlag lager (UKAB)
Vattenfall, 1981	Värmeteknisk förlust- beräkning (Älvkarleby 1981-03-12)
VIAK, 1979	Jämförande analys bergrum/jordberggrop
VIAK, 1980	Geoteknisk undersökning
VIAK 1980	Geohydrologisk under- sökning
Wikner T, 1980	Lyckebo solvärmepro- jekt. Dokumentation av projektering (bebyg- gelseområdet) Uppsala 1980-04-01)
Uppsala kommun	Byggnadsplan Lyckebo del I, KF 1980-06-16. Byggnadsplan Lyckebo del II, KF 1981-06-15.

5.2 Referenser (publicerade)

- Hillström C-G, 1979 Solenergi och fjärrvärme (UKAB 1979-09-24), VVF Tekniska mötet.
- Kjellsson E, 1982 Solfångaranläggning vid Knivstaverket (UKAB 1982-01-20). Publiceras i VVF serie Lågtempererad energi i fjärrvärmesystem.
- Nyström K, 1980 Erfarenheter från Uppsala applicerbara på solvärmelager (UKAB 1980-02-07). Publicerad i Seminarium BFR 636:1980 Tätning och isolering av behållare för säsongslagring av solvärt vatten.
- Åstrand L, 1980 Uppsalaprojektet, VVF årsmöte 1980.
- Åstrand L, 1981 Solar Energy in Uppsala, Föredrag VVS-mässan 1981-10-26.
- Åstrand L, Kjellsson E, Zinko H & Perers B, 1982 Solar Heating Using Evacuated Collectors.

5.3 Litteraturförteckning

5.3.1 Svensk Litteratur

- | | |
|---|---|
| Lagring och transport av vattenburen värme i berg Fältförsök. | BeFo rapport nr 11:14/77 |
| Förstudie rörande kemiproblem vid lagring och transport av vattenburen värme i berg. | Studsvik /E2-79/149 |
| Solvärmeverket Ingelstad i Växjö. | BFR-rapport R82:1979 |
| Blockfyllda bergrum för långtidslagring av värme Lägesrapport för NE-projekt 2060 571.1980. | Chalmers Tekniska Högskola Institutionen för Geoteknik |
| Blockfyllda bergrum för värmelagring Värmespridning i lagret. | BeFo rapport nr 61:1/81 |
| Lågtempererad energi i fjärrvärmesystem. Försök med solfångre i fjärrvärmesystem. | Delrapport 4 Svenska Värmeverksföreningen februari 1983. |
| Solfjärrvärme- testanläggning i Södertörn. | BFR-rapport R84:1983 |
| Utvärdering av solvärmecentralen i Lambohov. | BFR-rapport R92:1984 |
| Solvärmeteknik i stor skala Ingelstad - En värmecentral utan värmepump. | BFR-rapport R103:1984 |
| Solvärmesystem med årslagring. | BFR-rapport R148:1984 |
| -Avestaprojektet- BeFo's (Stiftelsen för Bergteknisk Forskning) rapportserie. | |
| 1981:1 | Beskrivning av anläggning och forskningsprogram. (Description of the plant and the research programme). |
| 1981:2 | G Rehbinder
Några tredimensionella värmeberäkningar. (Threedimensional thermal calculations). |

-Avesta projektet fortsättning-

- 1981:3 G Rehbinder
Vågrörelse i gränsytan vid termisk skiktning (Wave motion at the boundary surface of thermal stratification).
- 1981:4 B Fogdestar, T Olsson, L Särnblad
Hydrogeologiska förhållanden inom anläggningsområdet. Etapp 1. (Hydrogeological conditions in the plant area. Stage 1).
- 1983:1 K Röshoff, J Norin
Bergmekanisk dokumentation och stabilitetsanalys av Avesta värmeackumulatorer. (Rock mechanical documentation and stability analysis of the Avesta accumulator).
- 1983:2 T Olsson, L Tilly
Numeriska beräkningar avseende grundvattenförhållandena under byggnads- och driftsskede. (Numerical calculations concerning ground-water conditions during the construction and operation).
- 1983:3 J Norin, K Röshoff
Lakningens inverkan på Avestagnejsens mekaniska egenskaper.
- 1983:4 G Rehbinder, K Ingevald
Mätning av termiska spänningar och deformationer i berget. Etapp 1. (Measurements of stresses and deformations in the rock).
- 1983:5 C L Axelsson, T Olsson, L Särnblad
Hydrogeologiska undersökningar under byggnadsskedet. (Hydrogeological investigations during the construction).
- 1984:1 T Claesson
Kemiska reaktioner mellan vattnet och berget. (Chemical reactions between water and rock).
- 1984:2 B Sköldström, T Radway
Fysiologiska mätningar på dykare i varmvattenlager. (Physiological measurements on divers in a hot water storage).
- 1984:3 B Fogdestam, T Olsson, L Särnblad
Instrumentering för det geohydrologiska undersökningsprogrammet. (Instrumentation for the geohydrological investigations).

5.3.2 Internationell litteratur

- Swedish Council for Building Research Subsurface Heat Storage in theory and practice. Conference proceeding. D16:1983. D17:1983.
- Bjurström, S.: Energy conservation by underground heat storage. Proc. 3rd Int. Tunnelling Symp. London 1982.
- Bjurström, S.: Heat storage in rock caverns in Sweden. Proc. Inst. Conf. Subsurface Heat Storage. Stockholm 1983.
- Bjurström, S., Karlsson, P-O Martna, J: The Avesta project - a test plant for storage of heated water in rock caverns. Proc. Rock store 80. Stockholm 1980.
- Bjurström, S., Martna, J, Rehbinder, G. and Röshoff, K: Stability of a Rock opening subjected to pulsating temperature. Proc 5th ISRM Conf. Melbourne 1983.
- Brander, O., and Rehbinder G.: A theoretical analysis of the dynamics of hot water underground storages of general shape. Journ of Phys D 16 (1983) 2039 - 2056
- Martna, J.: The Avesta test plant for storage of hot water in an unlined rock cavern. Proc. Inst. Conf. om STES. Seattle, Wash 1981.
- Martna, J.: The Avesta research plant for hot water storage - state of the project. Proc. Inst. Conf. Subsurface Heat Storage. Stockholm 1981.
- Rehbinder, G.: Wave propagation at the interface in a hot water storage. Journ. of Energy Res. Techn. 104 (1982) 389 - 392.
- Rehbinder, G.: Avestaprojektet. (The Avesta project, in Swedish). Proc. of Soc. of Norwegian Civil Engineers. Olso 1984.
- Rehbinder, G.: Strains and stresses in the rock around an unlined hot water cavern. Rock Mech. & Rock eng. (to be publ). 1984.
- Vasseur, B.: Heatloss from and stability problems in a waterfilled density-stratified rock cavern. Proc. Int. Conf. Subsurface Heat Storage. Stockholm 1983.

Uppsala Kraftvärme AB
Att: Ingvar Wallander
Box 125
751 04 UPPSALA

Uppsala - Lyckebo - Värmelager i berg.
Värmeförluster och temperaturfördelning i berget.
Preliminära beräkningsresultat 1981-03-12.

För att bättre kunna dimensionera det planerade värmelagret i berggrunden söder om Storstveta, Uppsala kommun, har beräkningar gjorts för att uppskatta värmeförlusterna från lagret. Beräkningarna utfördes med hjälp av programmet TEUFEM som är ett programpaket grundat på finita elementmetoden (FEM). Vid en tidigare beräkning har vi testat datorprogrammet och valet av elementfördelning och tidssteg mot en analytisk lösning och visat att överensstämmelsen var mycket god. Eftersom det planerade lagret har en cylindrisk form (se bil. 1) är det rimligt att använda en 2-dimensionell cylindersymmetrisk beräkningsmodell. Detta kan ge en god utgångspunkt för att förutse det verkliga lagrets beteende vid olika omständigheter. Beräkningsmodellen och den finita elementfördelningen kan ses i bilaga 2. Som framgår av bilaga 2 går beräkningsmodellens gräns 90 m från lagrets symmetriaxeln (rand 3) och 60 meter under lagrets botten (rand 2). Denna avgränsning är vald med hänsyn till bergets sprickighet och den ger möjlighet till att i viss mån ta hänsyn till grundvattenströmningen i sprickorna. Som randvillkor har nämligen vid de härränderna antagits att temperaturen är 60°C konstant i tiden och att värmeövergångstalet α är $250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{OC}}$, (dvs grundvattnet bortför värme konvektivt). Berget har annars antagits vara isotropt och nedanstående generella parametervärden har använts, vilka är tagna från VIAK:s förundersökning, ref (1) eller erfarenhetsvärden.

Värmeledningstal i berget	$k = 3.1 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$
Värmekapacitet i berget	$c = 800 \frac{\text{kg}^{\circ}\text{C}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$
Bergets densitet	$\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Bergets initialtemperatur	$T = 6^{\circ}\text{C}$
Lufttemperatur vid markytan	$T = 6^{\circ}\text{C}$
Värmeövergångstal mellan vatten och berg	$\alpha_1 = 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{OC}}$
Värmeövergångstal vid markytan	$\alpha_2 = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{OC}}$

Vattentemperaturen i lagret antogs variera enligt följande: Vid start är lagret fyllt med 6°C-igt vatten. Sedan höjs vattentemperaturen homogent till medeltemperaturnivån 65°C på 3.3 månader (100 dagar) och därefter antogs att temperaturen är konstant i tiden och lika med medeltemperaturen 65°C. Detta antagande kan ge en god bedömning av medelförlusterna, men tar inte hänsyn till temperaturskiktningen och bergets deltagande i värmelagring. Beräkningen med ovan presenterade indata kallas för beräkning 1. Utöver beräkning 1 har vi utfört en annan beräkning, beräkning 2, som skilde sig från beräkning 1 endast beträffande värmeövergångstalet (α_1) mellan vatten och berg. Målet var att undersöka beräkningsresultatens känslighet för olika värmeövergångstal. I beräkning 2 användes $\alpha_1 = 150 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}$ istället för $\alpha_1 = 250$. Skillnaden i medelförluster var mindre än 1 procent.

Beräkningsresultaten för medelförlusterna är redovisade i bilaga 3 och 4. Temperaturfältet vid tiden 16 år efter start anges i bilaga 5. Sammanfattningsvis kan sägas att medelförlusterna beräknats till:

1700 MWh under anvärmningsperioden (första 100 dagarna)

4500 MWh under det första året efter anvärmningen

2300 MWh mellan det 2:a - 3:e året efter start

1620 MWh "- 6:e - 7:e "-

1360 MWh "- 15:e - 16:e "-

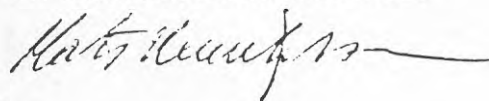
De ovan nämnda årsmedelförlusterna har ett mycket ojämn fördelning under året. Värmelagringen i berget är stor och enligt de preliminära beräkningarna är förlusterna under laddningsperioden ca 35 % högre än medelförlusterna, medan under urladdningsperioden får man tillbaka ca 35 % av medelförlusterna från berget. Dessa värmemängder kan på ett avgörande sätt påverka vattentemperaturen i lagret.

Som fortsatta beräkningar avser vi modifiera vår beräkningsmodell så att de ovan beskrivna effekterna kan kvantifieras bättre och ge säkrare underlag för driftstrategi och ekonomi för lagret.

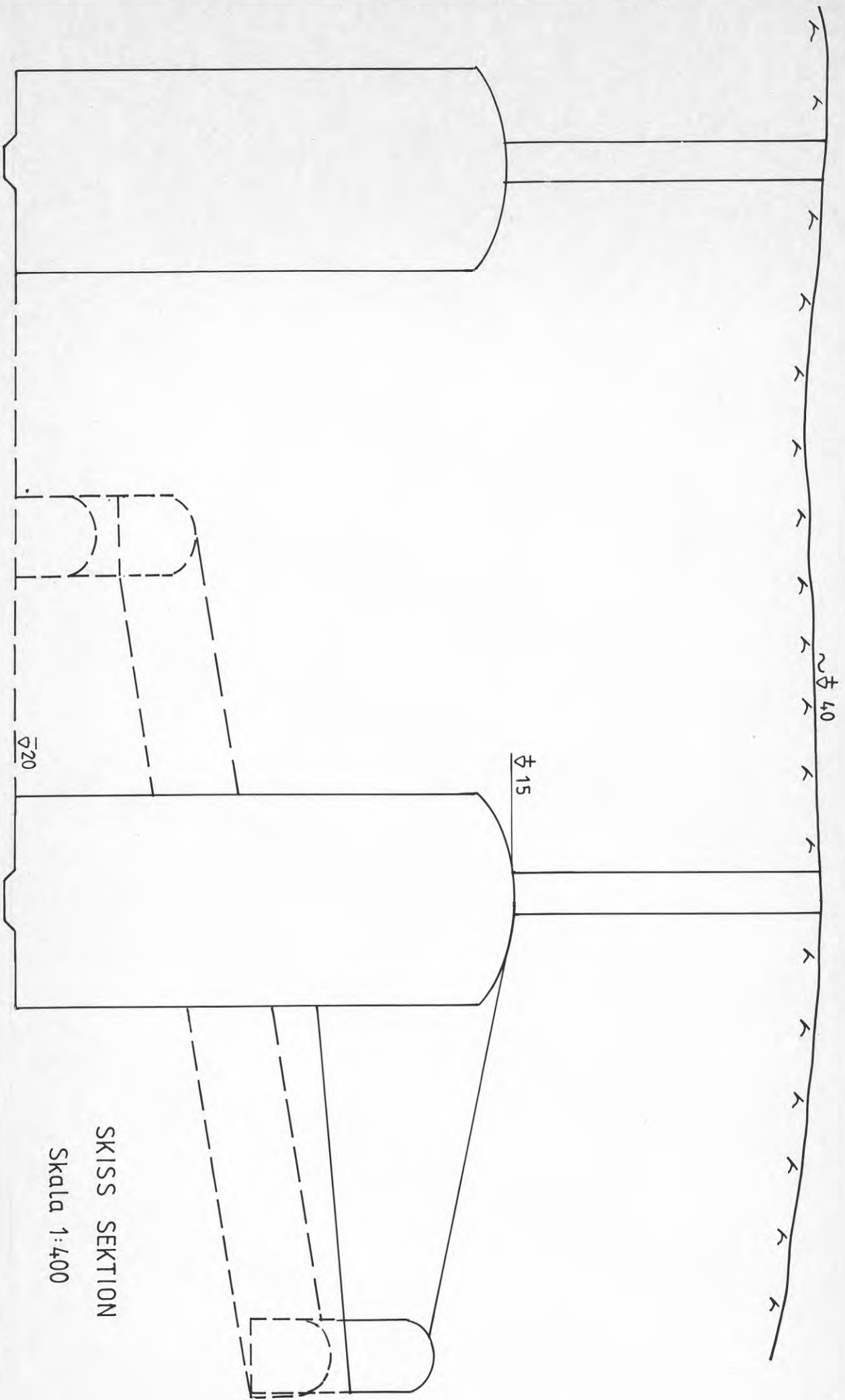
Vi ber Er att ta del av resultatet som underlag för fortsatta diskussioner och beräkningar. Speciellt intressant anser vi det vara att jämföra det ringformade bergrummet med två parallella tunnlar beträffande förluster och temperaturfördelning.

Med vänlig hälsning

STATENS VATTENFALLSVERK
BYGGNADSTEKNIK
VATTENBYGGNADSLABORATORIET



Mats Henriksson



SKISS SEKTION
Skala 1:400

UPPSALA - LYCKEBO - VÄRMELAGER I BERG

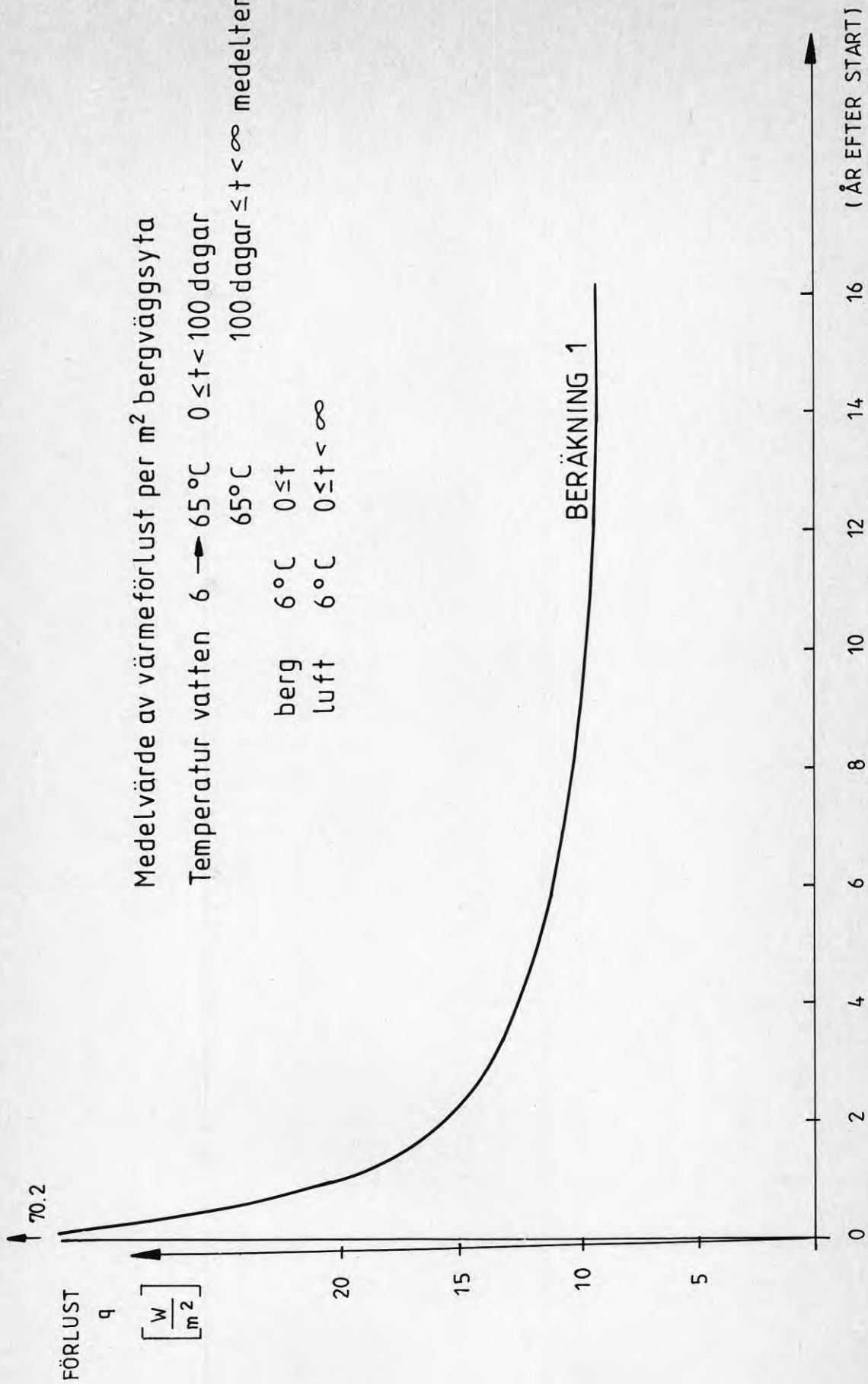
Medelvärde av värmeförlust per m² bergväggsyta

Temperatur vatten 6 → 65 °C 0 ≤ t < 100 dagar

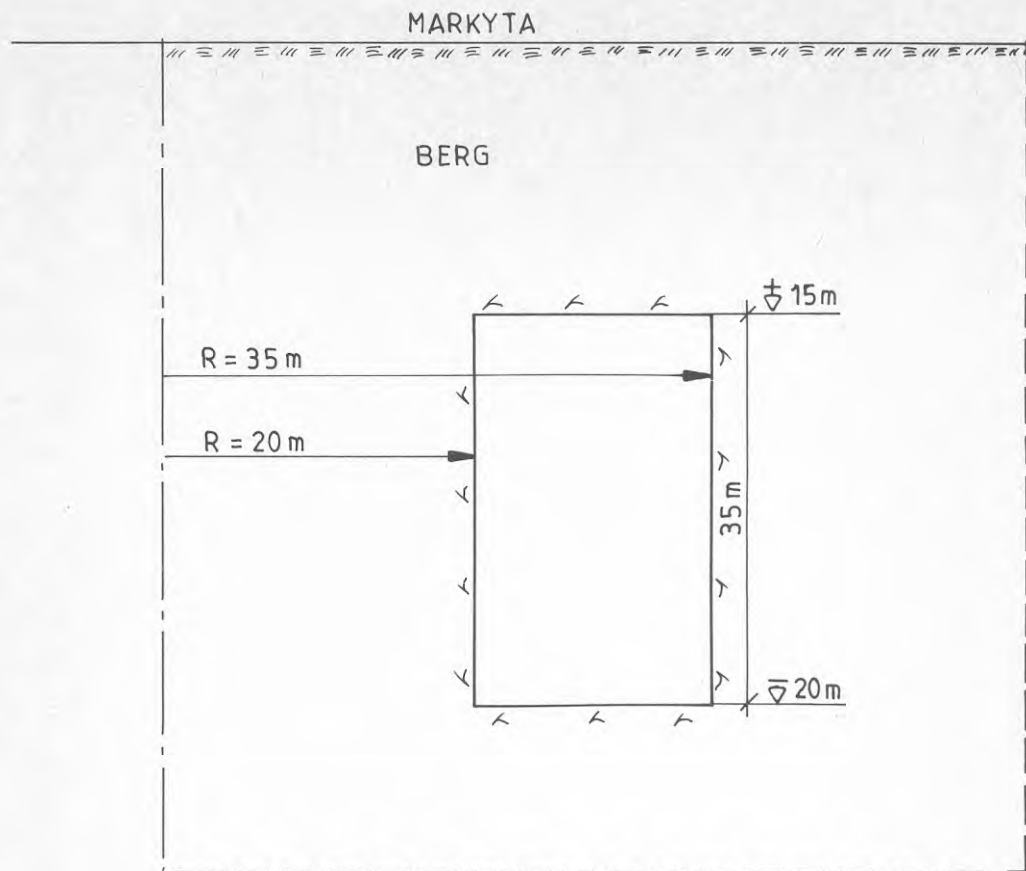
65 °C 100 dagar ≤ t < ∞ medeltemp

berg 6 °C 0 ≤ t

luft 6 °C 0 ≤ t < ∞



UPPSALA-LYCKEBO-VÄRMELAGRING I BERG



Bergrummets data:

$$\text{Volym}^* = (35^2 - 20^2)\pi \cdot 35 = 90\,714\text{ m}^3$$

$$\text{Area}^* = 2\pi(20 + 35) \cdot 35 + 2 \cdot (35^2 - 20^2) \cdot \pi = 17\,279\text{ m}^2$$

*) plus ev. tillägg för vattenfyllda tunnlar

Integrerade förluster från datalistan resp. från bilaga 3.

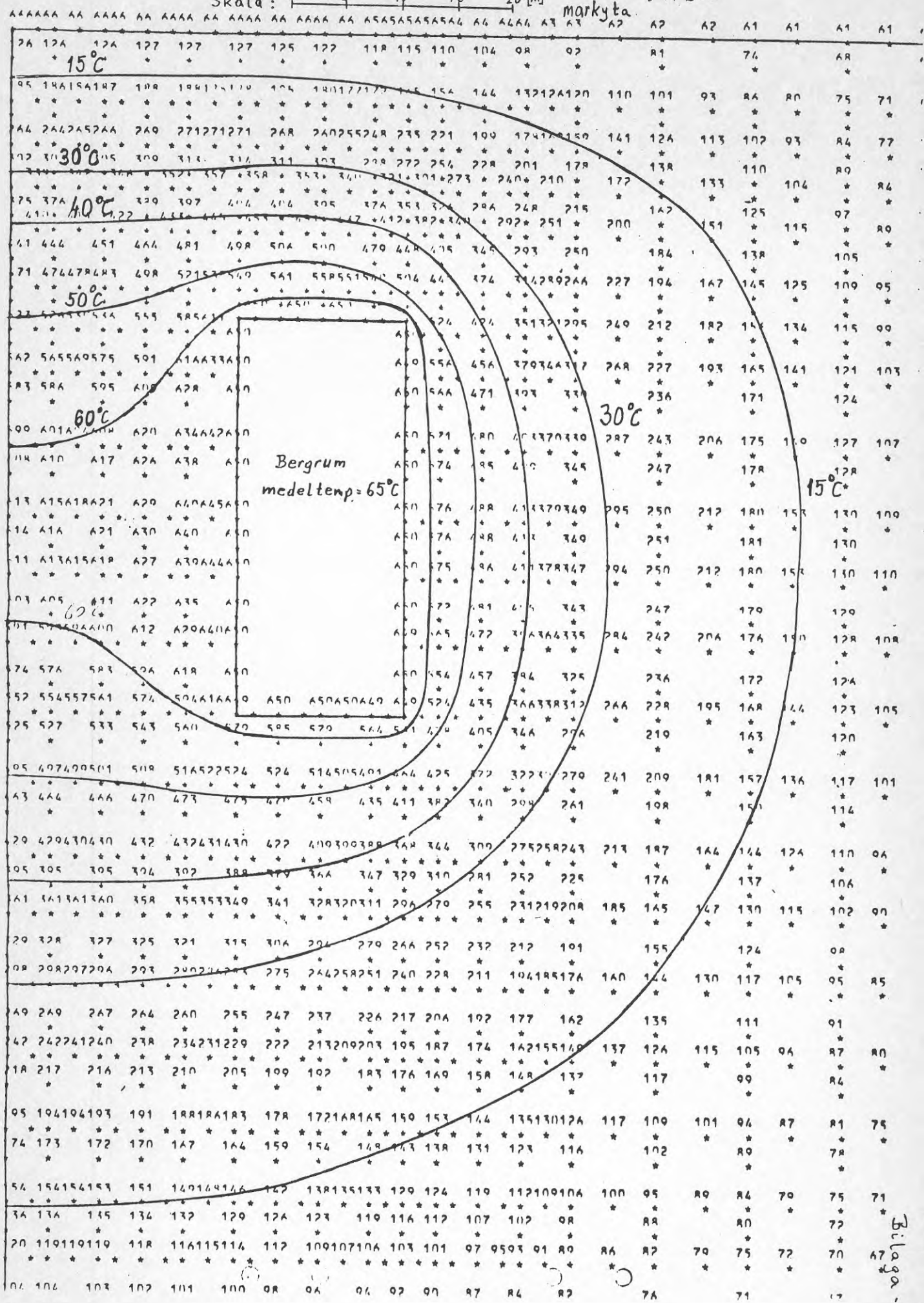
tid	medelförlust/ m^2 W/m^2	förlust MWh	motsvarande temperatur- sänkning i vattnet (90710m^3) $^{\circ}\text{C}$
0 - 100 dagar	40.	1660	16.3
100 - 465 "-	29.9	4520	44.4
2 - 3 år e.start	15.	2270	22.3
6 - 7 "-	10.75	1620	15.9
15 - 16 "-	9.	1360	13.4

-1
TIPLY THE VALUES WITH 10

Beräkning 1. Tid efter start 16 ö

Skala: 0 5 10 15 20 [m]

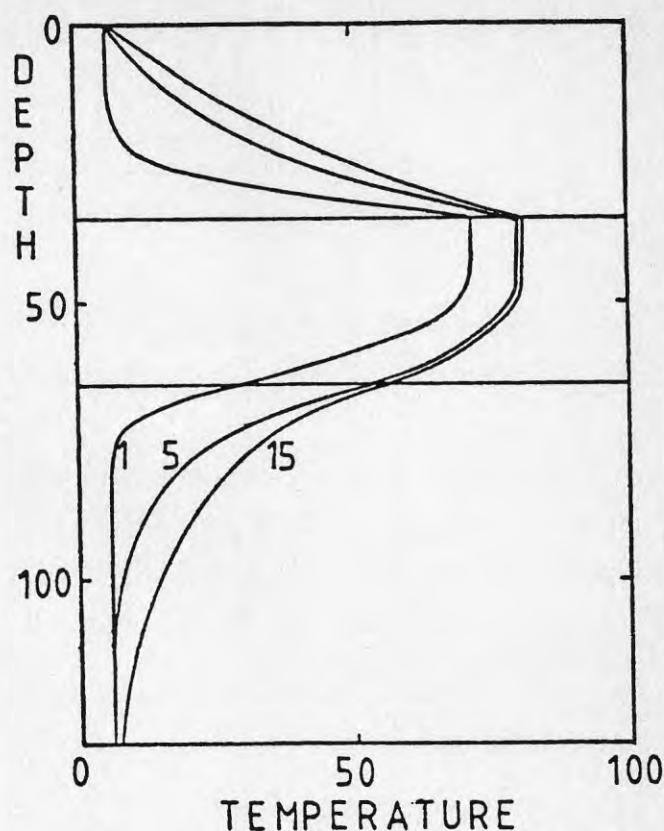
markyta 11:30h



Bilaga

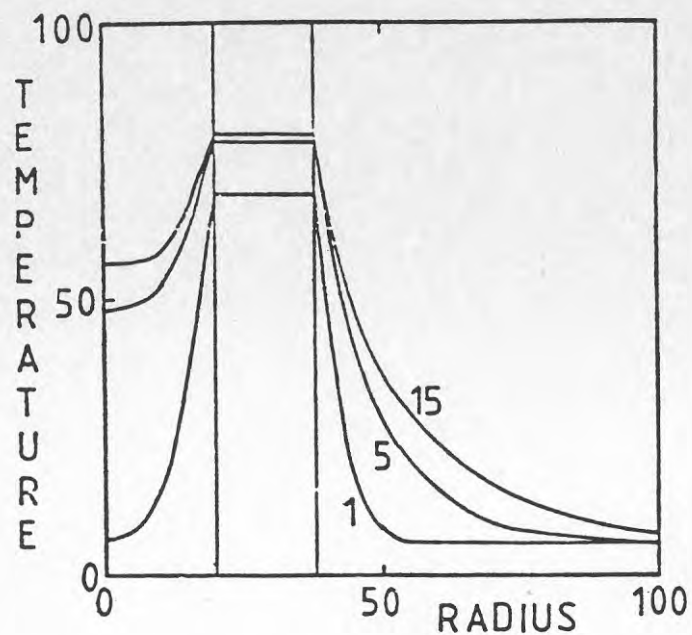
Den 15:e cykeln ger effektiviteten 0.772 för $D=30$ och 0.782 för $D=35$.

Figur 2.1 visar temperaturen före urladdning längs en vertikal linje på radien 27.5 meter, d.v.s. nära bergrummets mitt, under cykel 1, 5 och 15. Värmeledningsförmågan i bergrummet är 5 W/mK



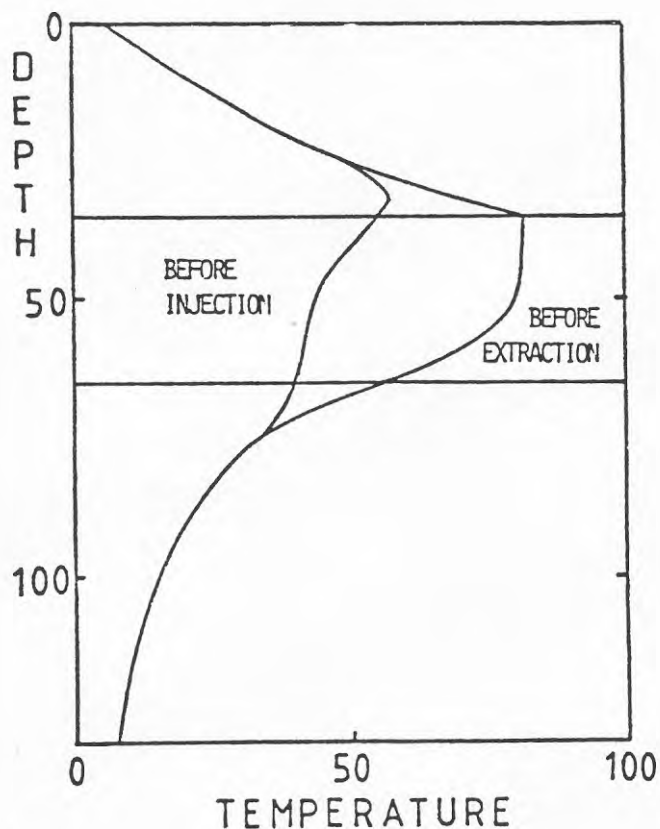
Figur 2:1. Temperaturen före urladdning längs en vertikallinje på radien 27.5 meter under cykel 1, 5 och 15.

i vertikalled. I figur 2.2 visas temperaturen längs en linje i radiell riktning på djupet 50.5 meter för samma tidpunkter. Uppvärmningen av omkringliggande skikt kan här iakttas. Efter 15 cykler har temperaturen på ett avstånd av 60 meter från lagret höjts någon grad.



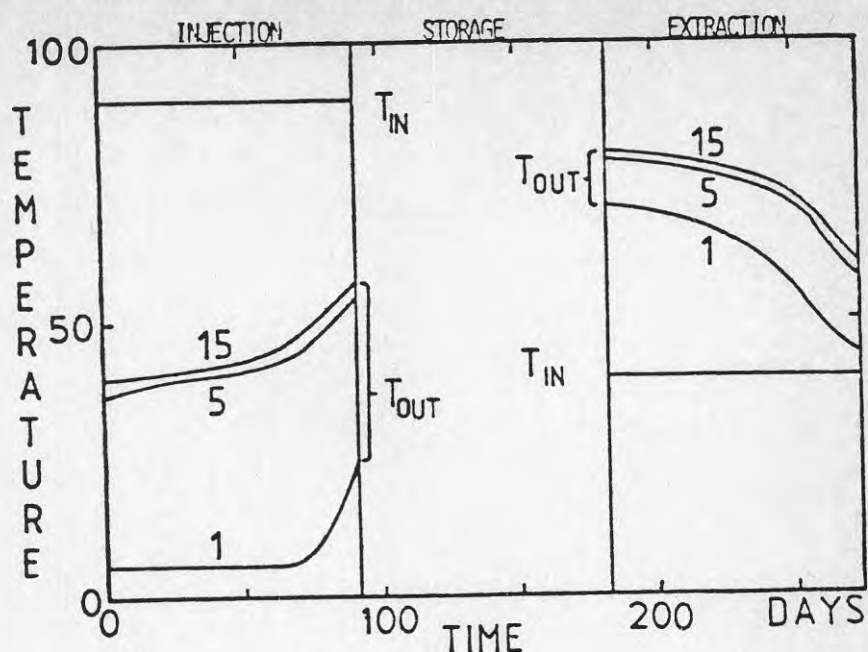
Figur 2.2. Temperaturen före urladdning längs en radiell linje på djupet 50.5 meter ($D=35$) under cykel 1, 5 och 15.

I figur 2.3 visas vertikala temperaturprofiler nära lagrets mitt, före injektion och före extraktion, under den 15:e cykeln. Influensområdet för den årliga temperaturvariationen i lagret sträcker sig knappt 10 meter in i berget.



Figur 2.3. Temperaturen före injektion resp. före extraktion längs en vertikal linje på radien 27.5 meter under cykel 15.

I figur 2.4 visas temperaturen på det inmatade och utmatade vatt-
net under cykel 1, 5 och 15 för injektions- och extraktionsperio-
der. Skillnaden mellan cykel 5 och 15 är påfallande liten. När den
första cykeln börjar är vattentemperaturen i hela berggrummet en-



Figur 2.4. Temperaturen på inmatat resp. utmatat vatten under
cykel 1, 5 och 15.

dast 6°C. Det krävs därför en stor energimängd för att höja tempe-
raturen i lagret till 90°C. Under uttagsperioden fylls lagret
efterhand med 40-gradigt returvatten. Under följande cykler krävs
därför en mindre energimängd för laddningen och effektiviteten
blir avsevärt högre.

SAMMANFATTNING

Värmeförluster från berggrummet har simulerats med en modell där
årsmedeltemperaturen på berggrummets yta uppskattades. Värmeutflö-
det under det femte året blev 1720 MWh. Vid stationära förhållan-
den efter många årsstyckler blir förlusten 1120 MWh.

Vidare har det termiska förloppet i lagret och berget simulerats
under antagande av god temperaturstratifiering i vattnet. Värme-
återvinningen blev under det första, andra, tredje, femte, tionde
och femtonde året 28, 55, 64, 71, 76 respektive 77%. En ökning av

vattnets värmeledningsförmåga från 0.6 till 5 (för att simulera en extra värmeblandning) sänker värmeutvinningen med maximalt två procentenheter. Temperaturen på uttaget vatten under extraktionsperioden under den femte årscykeln faller från 78°C till 57°C.

REFERENS

1. Hellström, Claesson. Heat Losses and Temperature Fields for Heat Storage Aquifers. A Computational Model with a Simplified Linear Water Flow. 1978. Matematisk fysik, Lund.

STUDIE AV VÄRMEFÖRLUSTER FÖR LYCKEBO VÄRMELAGER I BERG

Johan Claesson
Bengt Eftring
Göran Hellström

Lund 1981-04-14

Projekt i samarbete med
Uppsala Kraftvärme AB, Ingvar Wallander
Vattenfall, Mats Henriksson
VIAK, Gunnar Gustafson

1. BERÄKNING MED GIVEN TEMPERATUR ÖVER LAGRETS YTOR

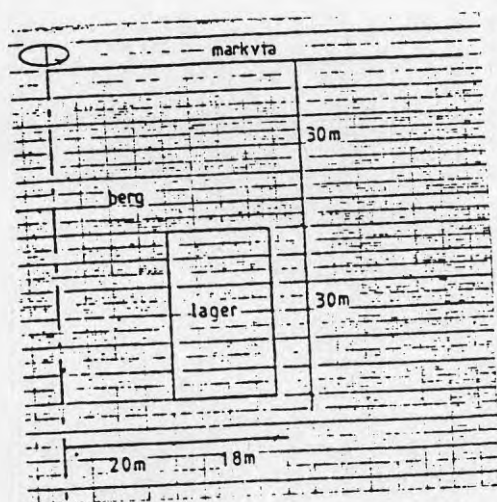
Bergrummet anses vara cylindersymmetriskt. Avvikelsen från den verkliga formen är liten. I figur 2 visas den antagna geometrin för lagret. Lagrets volym är $96\,400\text{ m}^3$.

Det kontinuerliga temperaturfältet beskrives med c:a 1100 temperaturpunkter. Den nedre randen ligger 500 m under markytan och den vertikala yttre randen ligger 500 m från symmetrilinjen. De minsta beräkningscellerna har tvärsnittsytan $1 \times 1\text{ m}^2$.

Markytans temperaturvariation under året saknar betydelse för lagrets funktion. Årsmedelvärdet 6°C ansättes därför som randtemperatur vid markytan. Vid de övriga yttre ränderna är värmeflödet genom randen noll.

Som randvärden vid bergrummets ytor ansättes en uppskattad årsmedeltemperatur. Under laddningen fylls lagret uppifrån med nittiogradigt vatten. Fronten mellan varmt och kallt vatten rör sig under laddningsperioden ner till botten. Under uttagsperioden påfyller fyrtiogradigt vatten underifrån varvid fronten rör sig uppåt. Två olika beskrivningar av lagrets årsmedeltemperatur användes. I det första fallet ges hela lagret temperaturen 65°C . Den andra beskrivningen tar hänsyn till effekterna av den rörliga fronten mellan det varma och kalla vattnet. En lineär temperaturfördelning mellan 90°C vid lagrets topp och 40°C vid dess botten ansättes.

Vid lagringens början det första året är det omgivande bergets temperatur 6°C .



Figur 1.2. Geometri för beräkningsvolymen.

Beräkningsresultat

Fall 1A. För att simulera det första årets extrema förhållanden ansattes en lineärt stigande lagertemperatur från lagringsstarten. Lagertemperaturen stiger från 6°C till 65°C under de första hundra dagarna. Därefter är lagrets temperatur konstant 65°C . Tabell 1.1 visar årsförlusten för år 1, 5, 10 och 15, samt det insvängda (stationära) resultatet.

Fall 1B. Den lineärt stigande lagertemperaturen vid lagringen det första året ersättes med ett språng från 6°C till 65°C femtio dygn efter lagringsstarten. Beräkningen genomfördes för tre olika värmeledningsförmågor för berget. Resultat visas i tabell 1.1. Den lineärt stigande lagertemperaturen det första året kan väl beskrivas av ett temperatursprång efter halva stigtiden.

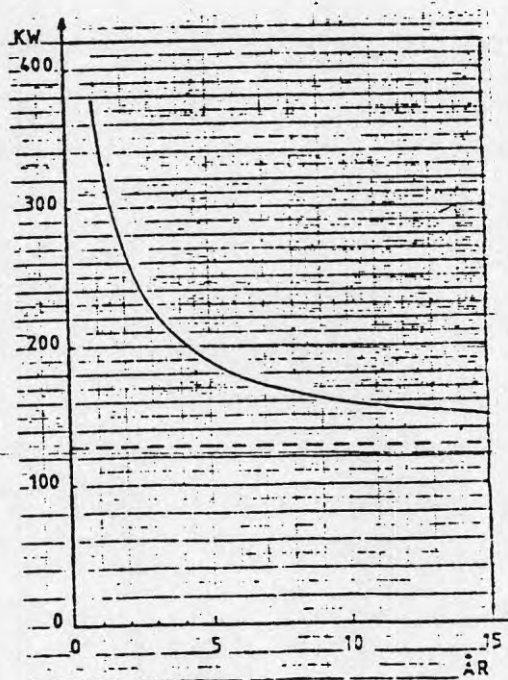
	Fall 1A	Fall 1B		
år	$\lambda=3.1$ MWh	$\lambda=2.5$ MWh	$\lambda=3.1$ MWh	$\lambda=3.5$ MWh
0-1	4826	4286	4838	5183
4-5	1719	1493	1718	1865
9-10	1391	1179	1391	1533
14-15	1287	1076	1287	1428
∞	1056	852	1056	1192

Tabell 1.1. Årlig värmeförlust från lagret. Fall 2 är räknat för tre olika värmeledningsförmågor (W/mK) i berget.

Fall 2. Lagrets överyta har temperaturen 90°C och dess bottenyta har temperaturen 40°C . Väggarna har en lineär temperaturfördelning från 40°C vid botten till 90°C vid toppen. Lagrets temperatur höjes med ett språng till den lineära fördelning 50 dygn efter lagringens början det första året. Tabell 1.2 visar den årliga värmeförlusten för år 1, 5, 10 och 15 samt det insvängda (stationära) resultatet. Figur 1.3 visar den momentana värmeförlusten från lagret under de femton första åren. Den streckade linjen ger det stationära värmeutflödet som erhålles efter lång tid.

Fall 2			
år	$\lambda=2.5$ MWh	$\lambda=3.1$ MWh	$\lambda=3.5$ MWh
0-1	4284	4833	5181
4-5	1494	1720	1868
9-10	1186	1404	1550
14-15	1091	1310	1458
49-50	-	1183	-
∞	904	1121	1265

Tabell 1.2. Årliga värmeförluster. Lagrets årsmedeltemperatur varierar lineärt från 40°C vid botten till 90°C vid toppen.



Figur 1.3. Momenta värmeförluster för fall 2 ($\lambda=3.1$ W/mK). Den streckade linjen ger stationär förlust.

2. BERÄKNING MED INTERN VÄRMELEDNING OCH VERTIKAL VATTENSTRÖMNING I BERGRUMMET

Bergrummets geometri beskrivs i figur 1.2.

Begynnelsetemperaturen i det vattenfyllda bergrummet och omgivande berg antas vara 6°C. Temperaturen vid markytan är konstant 6°C, eftersom variationer kring detta årsmedelvärde ej påverkar det djupt liggande lagret.

Lagringscykeln sträcker sig över ett år och omfattar 4 perioder: injektion, lagring, extraktion och vila. Dessa perioder har för dessa körningar satts till vardera 3 månader. Under injektionsperioden tillförs vatten med temperaturen 90°C i bergrummets översta del. Vatten återleds från bergrummets nedre del. Vid urladdning är cirkulationsriktningen den omvända och temperaturen på det tillförda vattnet är 40°C . Vattenflödet är $45.7 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{h}$. Det är valt så att vattenvolymen i bergrummet blir fullständigt utbytt under injektion och extraktion.

2.1 Numerisk modell

Den termiska processen i och kring lagret simuleras med en numerisk modell. Denna modell finns beskriven i referens 1. Vid beräkningen används den explicita finita differensmetoden. Beräkningsområdet uppdelas i ett rektangulärt gitter där temperaturfältet representeras med ett värde i varje cell. Den konvektiva transporten i bergrummet simuleras genom att flytta temperaturfältet, d.v.s. temperaturen i en cell flyttas till närmaste cell i strömriktningen. Tidssteget för den konvektiva förflyttningen bestäms av cellstorlek och flödes hastighet. För värmeledningen väljs tidssteget så att den numeriska lösningen är stabil. Genom ovan antydd metod kan s.k. numerisk dispersion undvikas.

Den konvektiva förflyttningen sker endast vertikalt. Konvektionsströmmar, som uppstår p.g.a. täthetskillnader för vattnet i olika delar av bergrummet, simuleras ej. Vattnet kommer att vara skiktat med fallande temperatur mot lagrets botten. I den numeriska simuleringen indelas vattenvolymen i berget i ett antal skikt. För dessa har man vertikal värmeledning och ett horisontellt värmeutbyte med berget. Härigenom kan den vertikala temperaturprofilen med fallande temperatur nedåt störas så att temperaturen i en cell blir högre än ovanliggande. Skikten sorteras därför vid varje tidssteg så att man får en täthetsstabil fallande temperatur. Detta är givetvis bara en förenklad approximativ beskrivning av det verkliga förloppet.

Lagrets effektivitet definieras som kvoten mellan uttagen och inmatad energimängd. Effekten vid injektion och extraktion är pro-

portionell mot temperaturdifferensen mellan tillfört och utmatat vatten.

Gittret för denna beräkning har 1100 celler. Beräkningstiden för 15 cykler är 3 minuter (CPU, UNIVAC 1100/80).

2.3 Resultat

I tabell 2.1 ges inmatad och uttagen energimängd samt effektivitet för cykel 1-5, 10 och 15. Tre olika fall har studerats. För värmeledning i vertikalled i bergrummet används dels värmeledningsförmågan för stillastående vatten, 0.6 W/mK, dels ett högre värde 5 W/mK. Det högre värdet ger ökad utjämning av temperaturen i bergrummet.

Cykel	$\lambda=0.6$ W/mK						$\lambda=5$ W/mK		
	D=30 m			D=35 m			D=35 m		
	E_{in} (GWh)	E_{ut} (GWh)	η	E_{in} (GWh)	E_{ut} (GWh)	η	E_{in} (GWh)	E_{ut} (GWh)	η
1	9.53	2.70	0.283	9.53	2.70	0.283	9.33	2.44	0.262
2	6.28	3.47	0.553	6.28	3.47	0.553	6.14	3.25	0.529
3	5.86	3.72	0.635	5.86	3.72	0.635	5.67	3.53	0.623
4	5.69	3.86	0.678	5.69	3.86	0.678	5.50	3.67	0.667
5	5.58	3.94	0.706	5.58	3.94	0.706	5.42	3.75	0.692
10	5.42	4.11	0.758	5.42	4.11	0.758	5.22	3.92	0.751
15	5.36	4.14	0.772	5.33	4.17	0.782	5.17	3.97	0.768

Tabell 2.1. Inmatad och uttagen energimängd samt effektivitet för tre fall med olika värmeledningsförmåga, λ , och avstånd D mellan markytan och bergrummets övre begränsningsyta. Beräkningen omfattar 15 årscykler.

Effekten av detta kan utläsas ur tabell 2.1. Effektiviteten under den 15:e cykeln är 0.782 för $\lambda=0.6$ och 0.768 för $\lambda=5$, då avståndet D mellan markytan och bergrummets övre begränsningsyta är 35 meter. Två fall med avståndet D lika med 30 respektive 35 meter har simulerats. Under de första 10 cyklerna kan ingen skillnad urskiljas.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 790348-0
från Statens råd för byggnadsforskning
till Uppsala Kraftvärme AB, Uppsala.**

R43:1985

ISBN 91-540-4360-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6705043

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirka pris: 50 kr exkl moms